

TAUVASTRUCT MITOITUS- OHJELMA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Jaakko Arokoski	
Työn nimi TauvaStruct mitoitusohjelma	
Päiväys	12.4.2018
Sivumäärä/Liitteet	40/49
Ohjaajat Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja rakennetekniikan opettaja, Henri Humala	
Toimeksiantaja Yksityinen	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Ohjelman päätarkoitus oli mitoittaa sauvoja käyttäjän syöttämällä arvoilla ja asetuksilla. Ohjelmalla voidaan mitoittaa esimerkiksi palkkia tai pilaria. Pilari tai palkki voi olla moniaukkoinen ja käyttäjä pystyy itse määrittelemään tukien vapausasteitten reunaehdoja. Tämä antaa käyttäjän mitoittaa monimuotoisia, mutta kuitenkin vain jatkuvia, pilari- tai palkkirakenteita käyttämällä eri kuormitustapauksia ja normiasetuksia.</p> <p>Ohjelma mitoittaa annetuilla materiaaleilla ja mitoilla käyttäjälle eri kuormitustapauksien profiilit. Näin käyttäjä voi tehdä vertailuja eri profiilien ja materiaalien välillä. Tämä antaa käyttäjälle hyvän katsauksen, käsityksen ja mahdollisuuden valita rakenne eri vaihtoehtoista. Opinnäytetyössä vertailtiin ja laskettiin ohjelmalla kolme eri rakennetyyppiä. Näin saadaan käsitys ohjelman käytännöllisyydestä suunnittelutyössä. Opinnäytetyön pääasiallinen sisältö koostuu luodun ohjelman rakenteesta ja sen toimintaperiaatteesta. Opinnäytetyön raportissa ei selitetä ohjelman lähdekoodia. Ohjelman tekeminen ja ohjelmointi suoritettiin Microsoftin Visual Studio käyttöympäristössä.</p> <p>Ennen ohjelman luomista tulisi ymmärtää rakenteiden mitoituksen periaatteita, kuten elementtimenetelmän mukaista laskentaa. Elementtimenetelmällä pystytään laskemaan ja arviomaan numeerisesti sauvojen rasituksia ja siirtymiä eri kuormien alaisuudessa. Elementtimenetelmässä tarkastellaan rakennetta sekä lineaarisesti että epälineaarisesti. Euronormeista tulisi ymmärtää teräksen, puun ja betonin mitoituksen periaatteet ja mitoituskäytännöt. Opinnäytetyössä luodun ohjelman tavoitteena on muun muassa, että rakenteiden mitoituksien tarkkuus olisi riittävä ja yhdenmukainen sekä verrattavissa muihin mitoitusohjelmiin.</p> <p>Tämä opinnäytetyö vaatii kaikkien mitoituksen osien ymmärtämistä. Opinnäytetyön raportti ei kerro tehdyn työn laajuudesta tai määrästä. Ainoastaan muutama prosentti tehdystä työstä on käytetty opinnäytetyön raportin kirjoittamiseen.</p>	
Avainsanat Ohjelmointi, Elementtimenetelmä, Puumitoitus, Teräsmitoitus, Betonimitoitus, Mitoittaminen, C#	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author Jaakko Arokoski			
Title of Thesis Calculation Software <i>TauvaStruct</i>			
Date	April 12, 2018	Pages/Appendices	40/49
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, Principal Lecturer, PhD and Mr Henri Humala, Lecturer			
Client Organisation /Partners Private			
<p>Abstract</p> <p>The main purpose of the program was to calculate simple beam or column structures. A beam or column can be continuous or non-continuous and the user can adjust boundary conditions of nodes and supports. This gives the user the ability to design diverse structures, but only continuous beam or column structures by using different load cases and norms.</p> <p>The software designs and calculates profiles for different load cases. This allows the user to make comparisons between different profiles and materials. This gives the user a good overview of calculations and conceivable choice for profile and material of the structure. Three different structures were calculated and compared which gave an idea of the practicality of the program in design. This thesis mainly consists of the structure of the created program and its operating principle but does not show or explain the program's source code. The programs used in this project were written with Microsoft's Visual Studio Community Edition and the chosen programming language was C#. Prior to the creation of the program, the principles of designing the structures, such as calculation of the Finite element method, should be understood. The Finite element method can be used to calculate and evaluate numerically the stresses and displacements of rods under different loads. The Finite element method can survey the structure both linearly and nonlinearly. The calculation principles and practices for steel, timber and concrete design should be understood as they are given in the Eurocodes. The aim of the program created in this final project is, among other things, that the accuracy of the calculation of the structures should be sufficient and consistent and comparable to other calculation programs.</p> <p>This thesis requires the comprehension of all parts of the design and therefore it was also a very good way to learn about the calculation of structure and its principles. The thesis report itself is not very special in this case, because more work was placed on what has been developed and achieved with the program. The concepts and the complexity of the thesis is large, so this report did not elaborate on every single detail that was required in the work.</p>			
Keywords Finite Element Method, timber design, steel design, concrete design, programming, calculation of structures			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Tavoite.....	6
1.2	FEM-laskenta	7
1.2.1	Lineaarinen FEM	8
1.2.2	Epälineaarinen FEM	9
1.3	Normit ja eurokoodi	10
1.4	Olio-ohjelmointi ja tietokonelaskeminen	11
2	MITOITUKSEN PERIAATE	12
2.1	Ohjelman ja projektin kulku	12
2.1.1	Projektin aikataulu	13
2.1.2	Tiedon hankinta	14
2.1.3	Ohjelman liitännäiset (plugins).....	14
2.2	Rakennemallin määrittäminen.....	14
2.3	Kuormat ja yleiset.....	16
2.4	Teräs	18
2.5	Puu.....	20
2.6	Betoni	21
2.7	Laskenta	24
3	OHJELMAN LUONTI	25
4	VERTAILU JA LASKENTA	26
4.1	Palkkirakenteet	26
4.1.1	A -palkkirakenne	27
4.1.2	Laskentatulokset A-palkki.	29
4.1.3	B -palkkirakenne	32
4.1.4	Laskentatulokset B-palkki	33
4.2	Pilari	35
5	POHDINTA.....	39
5.1	Laskenta	39
5.2	Ohjelman jatkaminen	39
5.3	Itsearviointi	40
	LÄHTEET	41

LIITE 1: A-PALKKIRAKENNE GLT 360X115.....	43
LIITE 2: B-PALKKIRAKENNE TBP:380X230 AP:5T12.....	53
LIITE 3: PILARIRAKENNE SHS180X6	66

1 JOHDANTO

Hyvässä suunnittelussa suunnittelija haluaa tietää parhaimman, sopivimman, tehokkaimman ratkaisun suunnitelmaan ja sen yleiseen malliin. Täten suunnittelussa joudutaan tutustumaan tai tietämään kaikki mahdolliset vaihtoehdot mitä ja miten suunnitelma tai ongelma voidaan ratkaista. Näin tulevana suunnittelija tämä tarkoittaisi sitä, että joutuisin tutustumaan jokaiseen mahdolliseen suunnitelmatyyppiin ja vertailemaan niitä keskenään. Jos kyseessä on esimerkiksi ulkoseinän rakenteen suunnittelu, mahdollisia ja ratkaisuja olisi monia, mutta yleensä suunnittelija tai tässä tapauksessa minä rakennesuunnittelijana päätyisin siihen tutuimpaan tai niin sanottuun turvalliseen ratkaisuun. Tämä ei välttämättä tarvitse olla näin. Ratkaisuun tai suunnitteluun voidaan hakea apua tietenkin muista osapuolista tai tietolähteistä mihin ollaan totuttu, tässä tapauksessa se olisi ohjelma.

1.1 Tavoite

Tässä työssä tai ohjelmalla haen vastausta ja ratkaisua hyvinkin yksinkertaiseen asiaan, kuten sauvan mitoitus, tässä tapauksessa yksittäisen palkin tai pilarin mitoitukseen. Tätä varten joudutaan luomaan ohjelma, joka pystyisi esittämään suunnittelijalle kaikki mahdolliset ratkaisut ja vaihtoehdot kyseiseen rakennemalliin, palkkiin tai pilariin. Ohjelman tulisi myös vertailla eri vaihtoehtoja keskenään ja esittää mahdollisesti näistä kaikista vaihtoehdoista paras mahdollinen ratkaisu kyseiseen rakenteeseen. Puhutaan yli tuhannen eri profiilin laskemisesta, jolla saadaan hyvä käsitys eri vaihtoehdoista.

Varsinainen tavoite ohjelman luonnissa ei ollut varsinkaan kovin selkeä projektin alussa, sillä ohjelman tekemiseen ja siihen tarvittava osaamisenmäärä tai tietomäärä ei ollut kovinkaan selvillä. Ohjelmaa lähdin tekemään enemmänkin oppimisen kannalta, sillä tämä työ vaatisi minulta ymmärrystä rakenteiden mitoituksesta ja sen kokonaiskuvasta. Jotta pystyisin kyseisen ohjelman tekemään, joutuisin tutustumaan ja soveltamaan melkein kaikkia opittuja opintoja, mitä opiskelun aikana olen oppinut rakenteiden mitoituksessa, kuten statiikkaa, lujuusoppia, kehärakenne / FEM-laskentaa, puu, teräs ja betoni rakenteiden mitoitusta. Uutena asiana tulisi ohjelmointi jonka työkielenä olisi C#-kieli.

Olen asettanut nyt valmiille lopulliselle ohjelmalle tarkoituksen, että ei tehdä vaan ohjelmaa mikä laskisi käyttäjälle ratkaisun, vaan ohjelma tulisi myös auttaa ymmärtämään käyttäjää rakenteiden mitoituksien periaatteisiin ja määräyksiin. Ohjelma täten voisi toimia myös opettavassa mielessä palvellen käyttäjää ja kertomaan selkeästi mitä ohjelma laskee ja mitoittaa laskelmissaan.

Itselleni ohjelman tekeminen vaatisi todellakin perehtymistä kaikkiin mahdollisiin opittuihin opintoihin mitä olen oppinut opintojen aikana. Tämä pakottaa minut soveltamaan opittuja taitoja ja tietoa ja auttaa minua ymmärtämään enemmän rakenteiden mitoituksesta mitä tällä hetkellä olen oppinut. Jotta saisin pätevän ohjelman luotua, joutuisin tekemään melkein virheetöntä työtä ja laskelmia tämän toteuttamiseksi.

Itse tässä opinnäyteraportissa tutustutaan enemmänkin laskennan vertailuun, sekä hieman sen teorian periaatteisiin.

1.2 FEM-laskenta

FEM-laskennassa sovelletaan lujuusopin ja statiikan opittuja analyyttisiä menetelmiä, kaavoja ja teorioita. Analyyttinen menetelmä käytännössä soveltuu vain harvoille säännöllisille geometrian omaaville ongelmille. Täten FEM-laskenta itsestään on numeerinen lujuusopin ja statiikan teorioitten laskentamenetelmä, mihin melkein kaikki nykyiset lineaariset ja epälineaariset laskenta ja mitoitusohjelmat perustuvat.

Ohjelmassa joudutaan käyttämään ja soveltamaan FEM-laskentaa (elementtimenetelmä), sekä lujuusoppia. Nämä osa-alueet luovat perustan rakennemekaniikkaan ja niitten ymmärtämiseen mitoituksessa. Ilman näitten laajojen käsitteiden ymmärtämistä nykyisten mitoitusnormien soveltaminen olisi mitoittajalle tai rakennelaskijalle mahdotonta. Lujuusopin kannalta ohjelma tarkastelee tukien tukirektiota ja profiilien poikkileikkauksien rasituksia, sekä geometrian muutoksia rakenteessa.

FEM-laskenta kehitettiin mekaniikan ja materiaalien rasituksien, siirtymien, ja muodonmuutoksien laskentaan ja niitten ymmärtämiseen. Rakennesuunnittelussa FEM-laskentaa on tunnettu rakennetekniikassa elementti/kehämenetelmänä, joka perustuu sauvojen/elementtien rasituksien ja voimien tarkasteluun. Tämä laskentamenetelmä antaa suunnittelijalle hyvän käsityksen rakenteiden muodon muutoksista ja jännityksistä mitä kuillekin sauvalle tai elementille kohdistuu ulkoistenvoimien seurauksista.

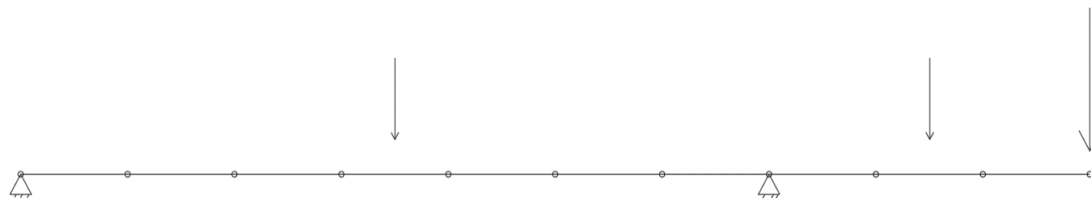
Elementtimenetelmässä rakennetta kuvataan sen osien muodostamalla elementtijoukolla, jota sanotaan elementtiverkoksi tai laskentamalliksi. Elementtien rasituksien ja siirtymien ratkaisemiseen lineaariseen laskemiseen käytetään siirtymämenetelmä kaavaa

$$[K][r] = [R^0] - [R]$$

Jossa:

K	elementtien jäykkyys matriisi
r	elementtien solmupisteitten siirtymä vektori
R^0	solmupisteitten voima vektori
R	solmupisteitten väliset lukkoimet

Kaavasta ratkotaan siirtymät $[r]$ joitten avulla ratkaistaan solmupisteissä kohdistuvat voimat, sekä elementtien paikalliset solmupistevoimat ja siirtymät. Muodostetaan täten noin elementtijoukko, jonka jäykkyyttä kuvaillaan K jäykkyyismatriisilla. Elementit liitetään toisiinsa solmupisteissä, joita kutsutaan elementtien vapausasteiksi, lokaalipisteiksi (local nodes) tai elementtiverkon globaalisolmuiksi (global nodes).



Kuva 1. Periaattellinen kuvaus FEM-mallista (Arokoski 2018)

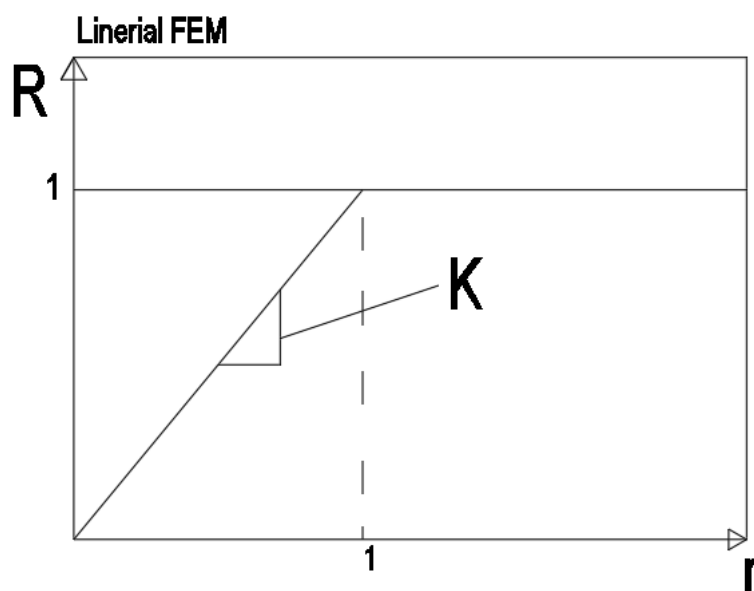
Kuvassa 1 ja 2 pyritään osoittamaan elementtimallin luomisen periaate ohjelmassa. Ohjelmassa luodaan sauvoille niin sanotut välielementit, joitten solmupisteillä lasketaan sauvoille rasitukset, kuten momentit, leikkausvoimat, normaalivoimat ja siirtymät. Tästä saadaan laskettua myös solmupisteissä olevien poikkileikkauksien jännitykset ja venymät. Elementit ovat laskennassa 6-vapausasteisia.

K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	*	r	=	R^0	-	R
1	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	0	0	0	*	0	=	R01	-	R1
2	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	0	0	0		0		R02		R2
3	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	$K1$	0	0	0		x		R03		R3
4	$K1$	$K1$	$K1$	$K1 + K2$	$K1 + K2$	$K1 + K2$	$K2$	$K2$	$K2$		0		R04		R4
5	$K1$	$K1$	$K1$	$K1 + K2$	$K1 + K2$	$K1 + K2$	$K2$	$K2$	$K2$		x		R05		R5
6	$K1$	$K1$	$K1$	$K1 + K2$	$K1 + K2$	$K1 + K2$	$K2$	$K2$	$K2$		0		R06		R6
7	0	0	0	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$		0		R07		R7
8	0	0	0	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$		0		R08		R8
9	0	0	0	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$	$K2$		0		R09		R9

Kuva 2. Periaattellinen kuvaus FEM-laskentamatriisista (Arokoski 2018)

1.2.1 Lineaarinen FEM

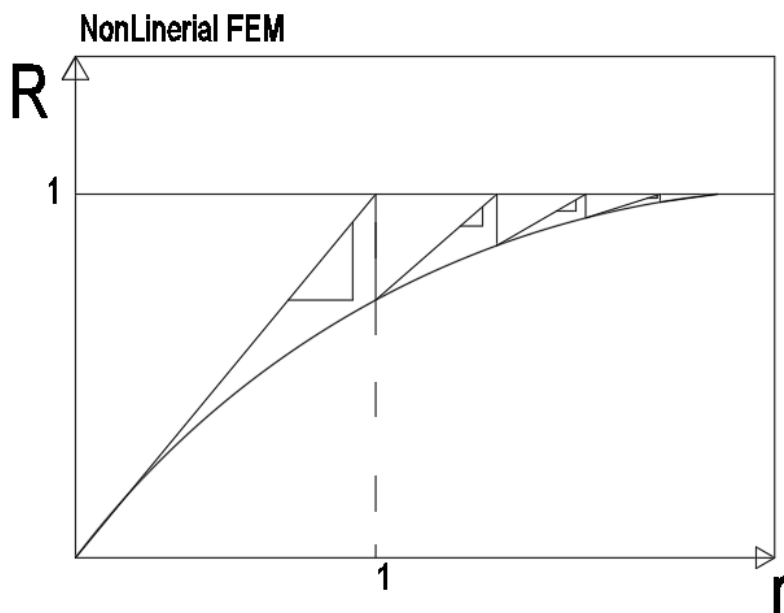
Linearisessa analyysissä rakenteen kuormitusten ja niistä seurauksena olevien jännitysten ja siirtymien välinen yhteys on lineaarinen. Tällöin materiaalin tai elementin jäykkyys oletetaan käyttäytyvän lineaarisesti kimmoisesti ilman plastisia muodonmuutoksia ja rakenteen siirtymät oletetaan olevan pieniä, että ne eivät merkittävästi vaikuta rakenteen jäykkyyden kokonaisuuteen. Kuvassa 3 pyritään esittämään lineaarisen elementtimenetelmän käyttäytyminen. Elementin tai tässä tapauksessa jäykkyydimatriisi K pysyy vakiona koko funktion aikana.



Kuva 3. Esitetään lineaarisen laskennan funktio elementtimenetelmässä (Arokoski 2018)

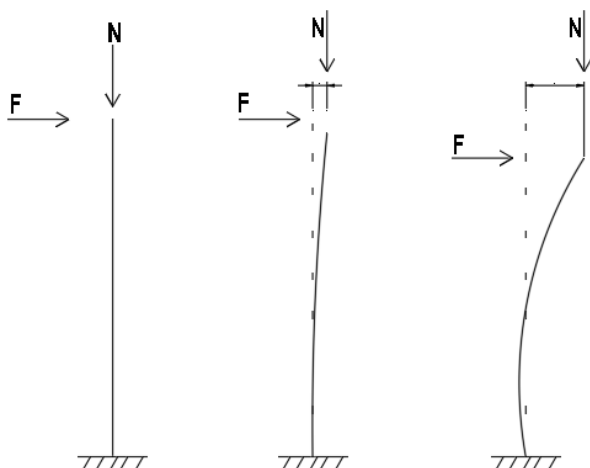
1.2.2 Epälineaarinen FEM

Käytännössä mikään materiaali tai rakenne kuormien aiheuttamista siirtymistä ei ole lineaarista. Tämä voi riippua joko rakenteen geometrisistä, materiaalista tai reunaehtoihin liittyvistä seikoista.



Kuva 4. Epälineaarisen laskennan periaatefunktio elementtimenetelmässä (Arokoski 2018)

Geometrinen epälinearisuus syntyy, kun kuormitukset aiheuttavat rakenteeseen niin suuria siirtymiä, ettei niiden välinen yhteys ole riittävän tarkasti lineaarinen. Esimerkkitapauksena otetaan vaikka rakennuksien pilarit, joissa on jatkuva normaalivoima tai aksiaalinen kuormitus. Tämä aiheuttaa lisää momenttia, jos rakenteeseen yhdistyy muita ulkoisia voimia kuten esimerkiksi tuuli.



Kuva 5. Pilarin epälineaarinen käyttäytyminen (Arokoski 2018)

Kuvassa 5 esitetään miten tuulen ja normaalivoiman yhteisvaikutus vaikuttaa sauvan käyttäytymiseen. Voima F aiheuttama siirtymä sauvan päässä normaalivoimien yhteisvaikutuksesta aiheuttaa geometristä epälineaarista rasitusta ja siirtymiä. Eli rakenteiden geometrinen epälineaarinen käyttäytyminen voidaan myös selittää ajan funktion seurauksesta.

Epälineaarisuus materiaalissa tarkoittaa, että materiaalin konstitutiiviset yhtälöt eivät ole lineaariset, kuten esimerkiksi hypo- ja hyperelastisten materiaalien tapauksissa. Tällöin on kuitenkin tunnettava tarkoin materiaalin lujuusopin teoria tai sen epälineaarinen käyttäytyminen, kun lähestytään plastisia muodonmuutoksia. Yleensä FEM-laskennassa, kun mitoitetaan rakennuksen palkki tai pilari rakenteissa, niin liikutaan materiaalin kimmoisella alueella ja eikä mitoituksessa ylitetä plastista rajaa, jotta rakenteeseen ei tulisi pysyviä muodonmuutoksia. Tämä otetaan huomioon FEM-laskennassa elementin jäykkyyteen, jossa tehdään tarvittava iteraatio laskennan aikana.

Reunaehtoihin liittyvät ongelmat epälineaarisessa laskennassa annetut siirtymä tai vapausasteiden ehdot ovat vaihtuvia ajan funktion tai rasituksen kanssa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kun suoritetaan laskentaa elementtien vapausasteitten reunaehdot alussa voi muuttua jännityksien myötä, täten joudutaan muuttamaan ratkaisun jäykkyydsmatriisin muotoa. Myös mahdolliset kontaktit siirtymien muutoksista, jotka aiheuttavat reunaehtoihin myös mahdollisia muutoksia.

1.3 Normit ja eurokoodi

Vuodesta 2007 lähtien kantavien rakenteiden suunnitteluun on Suomessa voitu käyttää joko Suomen rakentamismääräyskokoelman B-osassa esitettyjä määräyksiä ja ohjeita tai vaihtoehtoisesti 1.11.2007 voimaan tulleita eurokoodeja kansallisine liitteineen. (Eurokoodit ja rakentamismääräysten ohjeet rinnakkaiskäytössä)

Ohjelmassa joudutaan tarkastelemaan laskelmia normien mukaisesti, jotta saadaan hyvä käsitys vertailusta. Koodeissa ja normeissa otetaan kantaa kantavien rakenteiden suunnitteluun koskeviin eu-

rooppalaisiin standardeihin. Ohjelmassa normit kattavat rakenteille erilaiset varmuuden määrittämisperiaatteet. Suomessa ja muissakin maissa, joissa sovelletaan eurokoodi standardeja, on tehty omat kansalliset liitteet ja ohjeet. Suomessa näiden kansallisten liitteiden laatimisesta vastaa Ympäristöministeriö talonrakentamisen ja Liikennevirasto siltojen osalta.

Ohjelmassa kuitenkin pääosin mitoituksessa sovelletaan Suomen Rakennusinsinöörienliiton, Betonteollisuuden ry ja Teräsrakenneyhdistys ry julkaisemia ohjeita ja julkaisuja.

1.4 Olio-ohjelmointi ja tietokonelaskeminen

Työn ohjelmointikielenä käytetään C#-kieltä, joka on täysin olio-ohjelmointikieli. Oliot eli objektit vastaavat perinteisen ohjelmoinnin aliohjelmia eli funktioita. Olio-ohjelmointi on kuitenkin huomattavasti kehittyneempi, ja myös monipuolisempi, mutta valitettavasti myös monimutkaisempi tekniikka. Kun olio-ohjelmoinnin oppii kuitenkin sisäistämään, niiden käyttö sujuu siinä kuin funktioidenkin. Olio-ohjelmointi itsestään voidaan kuvata nykyiseen tunnettuun maailmaan ja jakaa kukin reaali-maailman asia omaksi olioksi. Tämä luo hyvät edellytykset ohjelmien tekemiseen ja muitten olioitten yhteiseen kanssakäymiseen eri funktioitten ja metodien kautta.

Oliot C#-kielessä ja yleensä muissakin ohjelmointikielissä tunnetaan nimellä class (classification), suomeksi: luokka tai luokitus. Työssä hyvänä esimerkkinä voidaan luoda luokka nimeltä: Sauva jonka ominaisuuksiksi voidaan määritellä: nimi, id, pituus tai sijainnit. Tällöin Sauva-luokalle voi tällöin esimerkiksi luoda luokan sisäinen metodi tai funktio, jossa lasketaan sauvan pituus sauvan sijaintipisteitten avulla.

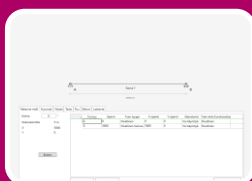
Työssä luodaan täten monia eri luokkia, jotka muodostaa noin sanotun luokkakirjaston (Class Library), josta kutsutaan olioita ja funktiota ohjelman käyttöliittymään. Tässä tapauksessa ohjelma tai käyttäjän käyttöliittymänä integroidaan WFA (Windows Forms Application) ympäristöön, joka siis on Windows -käyttöjärjestelmän oma käyttöympäristöpohja Windows-ohjelmille.

Jotta voidaan suorittaa monien laskutoimituksien laskenta tietokonepohjaisilla ohjelmilla, tulee myös ohjelmoinnissa ottaa huomioon muistin käyttö, prosessorin laskentakuormitus, sekä asynkroninen tekniikka. Asynkroninen ohjelmointi on tekniikka, jolla saavutetaan ohjelmassa samanaikaisuutta luopumalla vaatimuksesta, että ohjelmalausekkeet pitää suorittaa tietyssä järjestyksessä. Sitä voidaan pitää synkronisen ohjelmoinnin vastakohtana, jossa ohjelman käskyt suoritetaan ajallisesti samassa järjestyksessä kuin ne esiintyvät lähdekoodissa. Tällä tekniikalla pystytään luomaan käyttäjystävällisiä käyttöliittymää, joka mahdollistaa työn tekemisen taustalla laskelmien aikana.

2 MITOITUKSEN PERIAATE

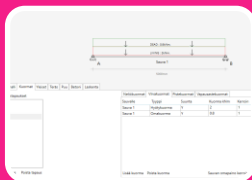
2.1 Ohjelman ja projektin kulku

Ohjelman aloittamisessa tulisi tietää ohjelman ja projektin kulku alusta loppuun. Ennen yhtäkään koodirivin kirjoittamista tulisi tietää ohjelman laajuus, käyttötarkoitus, laatuvaatimukset, sekä tulevien päivityksien huomioon ottaminen. Ohjelmointi ja luokkakirjasto tulisi ohjelmoida siten, että sen korjaaminen ja uudelleen käyttäminen olisi mahdollisemman nopeaa ja selkeää. Sitä ennen kuitenkin määritetään ohjelman kulku ja sen päämäärä.



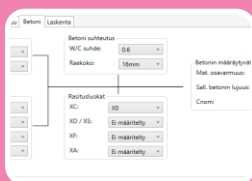
Rakennemalli määrittäminen

- Määritetään sauvan pituus ja kulma
- Määritetään tukien sijainnit rakennemallissa, sekä tukien ja vapausasteitten reunaehdot.



Kuormitustapauksien määrittäminen

- Määritetään kuormitustapaukset, sekä määritetään kuormitustapauksien kuormat.



Normien ja yleiset ehtojen määrittäminen

- Määritellään yleiset ehdot rakenteen kokonaisuudesta.
- Määritellään mitä kullekin materiaalille puulle, teräkselle ja betonille tarvitaan, muuttujia mitä tarvitaan Eurokoodi standardeissa.

Materiaali	Profiili	Mitoitus	%
Puu	LVL 300x63	Kierratuslujuus	0,9
Puu	LVL 300x75	Taivutuslujuus	0,9
Puu	LVL 300x113	Taivutuslujuus	0,9
Betoni	380x280 AP-2T12	Taivutuskestävyys	0,7
Betoni	380x280 AP-3T10	Taivutuskestävyys	0,6
Betoni	380x280 VP-2T10 AP-2T10	Taivutuskestävyys	0,9
Betoni	380x280 VP-3T10 AP-3T10	Taivutuskestävyys	0,6
Puu	LVL 300x75	Kierratuslujuus	0,6
Puu	LVL 300x63	Kierratuslujuus	0,6
Betoni	380x280 VP-2T12 AP-2T12	Taivutuskestävyys	0,9
Puu	GLT 375x80	Taivutuskestävyys-1	0,6
Puu	LVL 200x80	Taivutuslujuus	0,7
Puu	LVL 400x63	Kierratuslujuus	0,7
Puu	GLT 270x115	Taivutuslujuus	0,7

Laskenta ja tulosten tarkastelu

- Kun kaikki tarvittavat ehdot on määritelty, niin suoritetaan laskenta
- Vertaillaan tuloksia toisiinsa ja valitaan sopivin vaihtoehto mitoituksen ja rakenteen kannalta.

Materiaali	Profiili	Mitoitus	%
Puu	LVL 300x63	Kierratuslujuus	0,9
Puu	LVL 300x75	Taivutuslujuus	0,9
Puu	LVL 300x113	Taivutuslujuus	0,9
Betoni	380x280 AP-2T12	Taivutuskestävyys	0,7
Betoni	380x280 AP-3T10	Taivutuskestävyys	0,6
Betoni	380x280 VP-2T10 AP-2T10	Taivutuskestävyys	0,9
Betoni	380x280 VP-3T10 AP-3T10	Taivutuskestävyys	0,6
Puu	LVL 300x75	Kierratuslujuus	0,6
Puu	LVL 300x63	Kierratuslujuus	0,6
Betoni	380x280 VP-2T12 AP-2T12	Taivutuskestävyys	0,9
Puu	GLT 375x80	Taivutuskestävyys-1	0,6
Puu	LVL 200x80	Taivutuslujuus	0,7
Puu	LVL 400x63	Kierratuslujuus	0,7
Puu	GLT 270x115	Taivutuslujuus	0,7

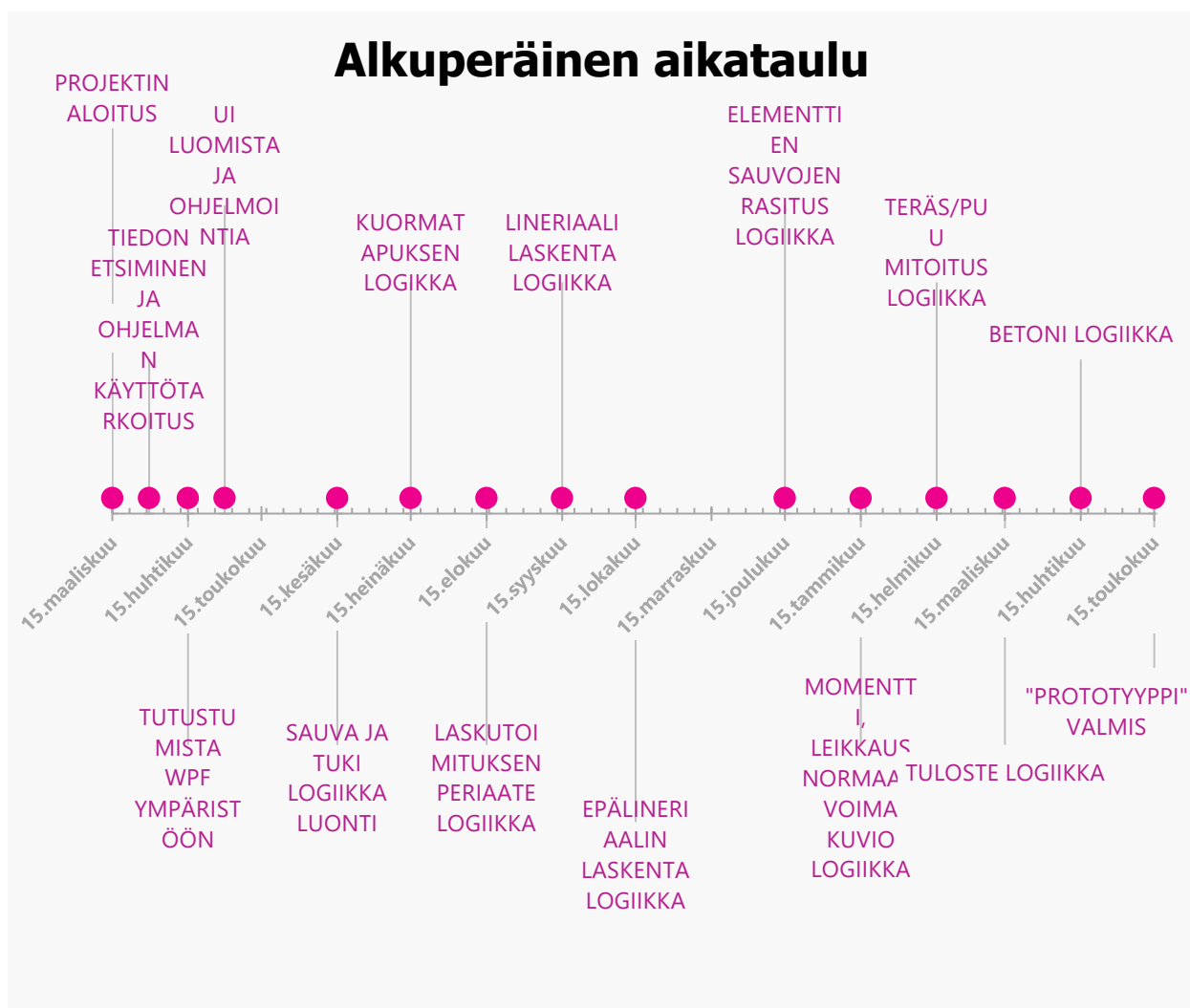
Raportti

- Tarkastellaan laskelman annettuja tuloksia rasituksista, siirtymiä ja materiaalin standarti mitoituksia.

Kuvio 1. Ohjelman kulku (Arokoski 2018)

Kuviossa 1 näytetään ohjelman periaate. Ohjelma on pyritty pitämään ja sen käyttäjäliittymä mahdollisemman yksinkertaisena, jotta ei turhaan anneta monimutkaisia asetuksia tai määritelmiä Eurokoodi-standardeihin liittyvistä asetuksista tai muuttujista. Täten annetaan käyttäjälle mahdollisemman selkeä kuva siitä mitä lasketaan ja millä arvoilla.

2.1.1 Projektin aikataulu



Aikajana 1. Projektin likimäinen aikajana (Arokoski 2018)

Aikajana kuvassa esitetään ideaalinen työn eteneminen 2017 keväästä 2018 kevääseen. Kuvassa esitetään työhön liittyvät tarvittavat työvaiheet ja niiden mahdollisesti viemä aika ja aikajanassa tosiaan pyritään osoittamaan projektin työn lineaarisuus. "prototyyppi" versiolla viitataan ohjelman versiota, jossa olisi ohjelman runko ja pääperiaatteet olisi valmiina käytettäväksi. Tämä aikataulu oli suuntaa antava näkemys työn etenemisestä alusta loppuun saakka.

Todellisuudessa aikataulu 1 antaa virheellisen näkemyksen projektin kulusta. Projektin aikana tuli jatkuvasti eri käsitteitä, tietoa ja ymmärrystä, joka taas vaihtoi ohjelman tekemisen kulkua. Tämä aiheuttaa itse ohjelmoinnissa menetelmien suunnitteluun korjauksiin ja luokkien välistä yhteen sovittelua sitä mukaan, miten uutta asiaa tuli. Projektin aikana tuli muutettua esimerkiksi käyttöliittymä kesken kaiken uudemmaksi, koska nähtiin että Microsoftin WPF -ympäristö oli paljon joustavampi ja tehokkaampi verrattuna vanhaan WinForms käyttöliittymään/ympäristöön. Tästä huolimatta mitä enemmän tietoa ja asian ymmärrystä työn aikana tuli sitä enemmän pystyttiin työstämään projektia eteenpäin paremmalla teholla ja varmuudella.

Kirjoittaessani tätä opinnäyteraporttia, projekti on noin betonimitoitusta vailla, sekä epälineaarisen FEM -laskennan menetelmien vertailua vailla. Itse aikataulusta ei olla juurikaan myöhässä, mutta projektin työn lineaarisuus on hyvinkin vaihtunut ja työvaiheitten sijoitus aikataulussa muuttuneet huomattavasti tiedon lisääntymisen myötä.

2.1.2 Tiedon hankinta

Tiedon hankinta tapahtui netin, kirjojen ja opintojen ohella saatujen materiaalin avulla. Materiaalitietoa ohjelman ohjelmointiin ja mitoituksen laskemiseen löytyy hyvin eri tietoläheteistä. Tässä tapauksessa, kun tietoa etsitään FEM-laskentaan, normeihin, ohjelmoitiin ja mitoittamiseen, niin tietolähde pohja on todella kattava.

Tietoa ohjelmointiin ja C#-ohjelmointikieleen löytyy valtavasti internetistä ja eri nettisivuilta. Ohjelmointiesimerkkien ja koodauspätkien luomiseen löytyy monia lähtötietoja ja esimerkkejä esimerkiksi YouTube, Stack Overflow ja Microsoft .NET Libraries for Developers yms. Näistä tietolähteistä löytyy hyvin myös, olio-ohjelmointiin ja siihen kohdistuvaan logiikkaan ja periaatteisiin.

FEM-Laskentaan, sekä standardimitoitukseen tieto lähtökohtaisesti haettiin oppikirjoista ja niihin liitetyistä julkaisuista. Mainittakoon Betoniteollisuuden ry julkaisemat oppikirjat, Puuinfo julkaisemia laskentaohjeet, sekä Teräsrakenteiden ry julkaisemat oppikirjat ja ohjeet. FEM-laskennasta tietoa löytyi hyvin paljon Internetissä, sillä FEM -laskentaa käytetään maailmanlaajuisesti eripuolilla maailmaa eri käyttötarkoituksiin.

2.1.3 Ohjelman liitännäiset (plugins)

Ohjelmassa käytettiin rakenteiden tukireaktioiden ja solmusiirtymien laskentaa varten päädyttiin hyödyntämään kolmannen osapuolen tarjoamaa ohjelmointikirjastoa Math.Net Numerics, sekä Newtonsoft.Json ohjelmointikirjastoa. Math.Net Numerics katettuja aiheita ovat esimerkiksi erikoistoiminnot, lineaarinen algebra, todennäköisyysmallit, satunnaiset numerot, interpolointi, integraalimuunnokset. Json (lyhenne sanoista JavaScript Object Notation) on yksinkertainen avoimen standardin tiedostomuoto tiedonvälitykseen. Nimestään ja JavaScript-perustastaan huolimatta JSON on JavaScriptistä riippumaton.

2.2 Rakennemallin määrittäminen

Rakennemallin määrittämisen käyttöliittymä pyrittiin muokkaamaan mahdollisemman yksinkertaiseksi, siten että siihen käyttäjä voisi helposti lisätä tai muokata reunaehtoja ja rakennemallia. Käyttäjä voi rakennemallin määrittelyssä määrittää lähdetäänkö mitoittamaan esimerkiksi jatkuvaa

pilaria tai jatkuvaa palkkia. Tämä vaatii ohjelman kirjottajalta määrittelyä sauvojen ja tukien grafiikasta, sekä niiden käyttäytymisestä keskenään.

Tunnus	Sijainti	Tuen tyyppi	X-sijainti	Y-sijainti	Käyritymä	Tuen ehto Eurokoodissa
A	0	Nivellinen	0	0	Käyrityminen	Nivellinen
B	4000	Nivellinen	4000	0	Käyrityminen	Nivellinen
C	12000	Nivellinen liukuva	12000	0	Käyrityminen	Nivellinen
D	15000	Vapaa	15000	0	Käyrityminen	Nivellinen

Buttons: Uusi vapausaste, Poista vapausaste, Päivitä vapausasteet

Kuva 5. Käyttöliittymän rakennemallin määrittäminen (Arokoski 2018)

Kuvassa 5 näytetään rakennemallin määrittämisen periaatteet. Ohjelma täten antaa käyttäjän määrittää rakenteen kulmasta 0-90 asteeseen, vapausasteitten paikkojen sijainnit, sekä reunaehdot. Rakennemallissa voidaan määrittää myös pilareilta, kuten kuvassa 6 näky.

Tunnus	Sijainti	Tuen tyyppi	X-sijainti	Y-sijainti	Käyritymä	Tuen ehto Eurokoodissa
A	0	Nivellinen	0	0	Käyrityminen	Nivellinen
B	4000	Nivellinen liukuva	4000	0	Käyrityminen	Nivellinen
C	12000	Nivellinen liukuva	0	12000	Käyrityminen	Nivellinen
D	15000	Vapaa	0	15000	Käyrityminen	Nivellinen

Buttons: Uusi vapausaste, Poista vapausaste, Päivitä vapausasteet

Kuva 6. Pilariesimerkki (Arokoski 2018)

2.3 Kuormat ja yleiset

Kuormien määrittelyssä ohjelmassa pyritään yksinkertaisuuteen, jossa annetaan hyvin yksinkertaisia vaihtoehtoja ja kuormatyyppejä käyttäjälle käyttää. Kuormitustapauksilla tai kuormitusyhdistelmillä annetaan omat kuormat ja varmuuskertoimet. Tällä pyritään antamaan käyttäjälle mahdollisuus kuormittaa kaikissa annetuissa kuormitustapauksissa eri kuormilla ja kerroin yhdistimillä, kuten kuvassa 7 näytetään.

Rakenne malli Kuormat Yleiset Teräs Puu Betoni Laskenta

Kuormitustapaukset

- KY1
- KY2
- KY3

Lisää tapaus Poista tapaus

Neliökuormat	Viivakuormat	Pistekuormat	Vapausastekuormat		
Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ²	Leveys m	Kerroin
Sauva1	Hyötykuorma	Y	2	1	1.5
Sauva2	Hyötykuorma	Y	2	1	1.5
Sauva3	Hyötykuorma	Y	2	1	1.5
Sauva1	Omakuorma	Y	0.8	1	1.15
Sauva2	Omakuorma	Y	0.8	1	1.15
Sauva3	Omakuorma	Y	0.8	1	1.15

Lisää kuorma Poista kuorma Sauvan omapaino kerroin: 1

Kuva 7. Kuormitustapauksien määrittely (Arokoski 2018)

Tällä hetkellä ohjelmassa on 4 eri kuormatyyppiä: neliökuorma, viivakuorma, pistekuorma ja vapausastekuorma. Näillä pystytään jo mitoittamaan hyvin monta erilaista kuormitustilojen liittyviä tapauksia. Neliö ja viivakuorma on hyvin samakaltaisia, paitsi neliökuorma tyyppissä käyttäjä voi päättää kuormitusleveyden jolla helpottaa viivakuormien laskemista. Pistekuormassa käyttäjälle annetaan mahdollisuus päättää missä kohdin sauvaa kuormitus sijaitsee. Vapausastekuorma on tarkoitettu vapausasteille. Ohjelma automaattisesti kertoo kuormat seuramusluokan kfi kertoimella, jonka käyttäjä voi määrittää yleiset näkymästä.

Rakenne malli Kuormat Yleiset Teräs Puu Betoni Laskenta

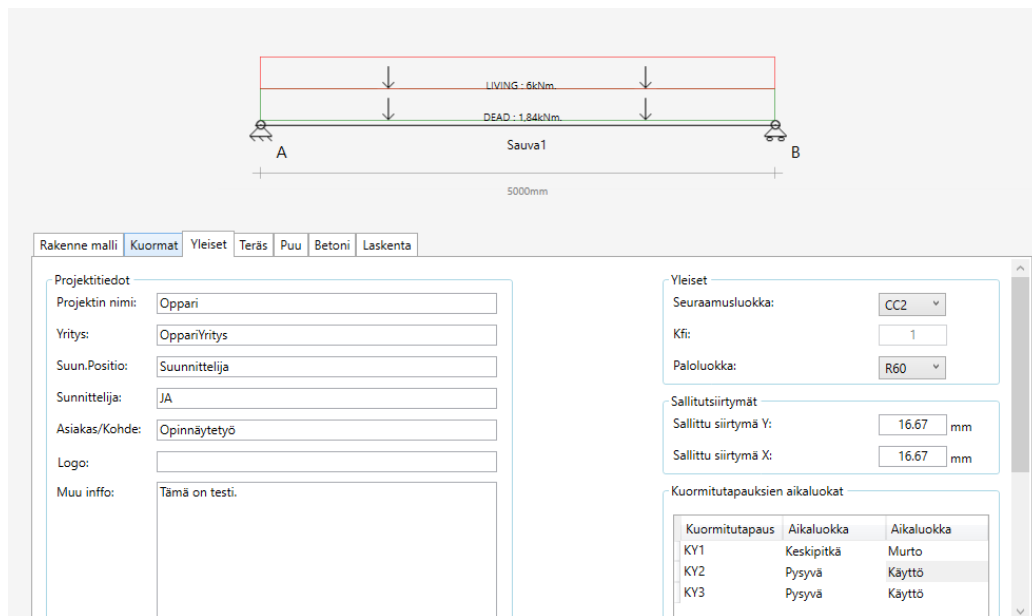
Kuormitustapaukset

- KY1
- KY2
- KY3

Neliökuormat	Viivakuormat	Pistekuormat	Vapausastekuormat		
Vapausaste	Tyyppi	Suunta	Kuorma kN	Kerroin	
B	Tuulikuorma	X	10	1.5	

Kuva 8. Esimerkki kuormitussuunnista (Arokoski 2018)

Käyttäjä pitää myös pystyä määrittelemään kuorman suunta (kuva 8). Kuormitussuuntia käyttäjä voi määrittää joko X tai Y suuntaan. Käyttäjän tulee myös määrittää sauvan omapainokerroin kuormitustapauksessa, mikä otetaan huomioon laskennassa kullekin materiaalipainolle tapauksissaan. Yleiset käyttöliittymässä kuvassa 9 käyttäjä voi määrittää myös kuormitustapauksien aikaluokat ja onko kyseessä murto vai käyttörajatilamitoitus.



Kuva 9. Yleiset käyttöliittymän näkymä (Arokoski 2018)

Yleiset käyttöliittymässä käyttäjä pystyy määrittelemään kohteen perustiedot, kuten esimerkiksi seuraamusluokka, paloluokka tai sallitut taipumat. Nämä kaikki tiedot otetaan huomioon laskelmissa ja tulostetaan lopulliseen raporttiin. Käyttäjän pitää myös määrittää epätarkkuustekijöitten vaikuttavat kertoimet, kuten kuvassa 10 näytetään.

Epätarkkuustekijät

Lasketaan

Rakenteen korkeus: m

Rakenne osien määrä:

Kuva 10. Epätarkkuustekijöitten vaikuttavat tekijät (Arokoski 2018)

2.4 Teräs

Teräsmitoituksessa oleellista on kuitenkin se, että lasketaan oikeilla varmuuskertoimilla. Jos halutaan vertailla laskettuja tuloksia muihin ohjelmiin tai laskelmiin nämä ovat yleensä ne tekijät, jotka aiheuttavat laskennassa eroja. Varmuuskertoimiin vaikuttaa profiilin poikkileikkausluokka, teräsmateriaali, hitsaus tai valssaus, sauvan momenttipinnan muoto, sekä rakennemallin reunaehdot.

Teräkseen liittyvien eurokoodistandardin varmuuskertoimet on pyritty yksinkertaistamaan ohjelmassa siten, että niihin vaikuttavat tekijät ja kertoimet ohjelma itse määritteli automaattisesti antamalla käyttäjän asetuksilla. Tämä johtaa siihen, että käyttäjälle ei anneta juurikaan mahdollista suoraan vaikuttaa näihin kyseisiin kertoimiin. Teräsvalikossa kuvassa 11 pystytään kuitenkin määrittelemään kyseiset asetukset:

- Teräsmateriaali
 - o vaikuttaa teräksen kestävyteen ja poikkileikkausluokan varmuuskertoimiin.
- Valsattu vai hitsattu, jos valsattu siten lasketaan kuumavalsattuna
 - o vaikuttaa varmuuskertoimiin esim. nurjahdus ja kiepahdus kertoimiin.
- Yhteisvaikutustekijöitten laskentatapa A / B.
 - o vaikuttaa pilarin mitoitukseen, kun tarkastellaan kiepahduksen ja nurjahduksen yhteisvaikutuksen kestävyyttä, kertoimet k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} .
 - o A menetelmä 1: SFS-EN 1994-1-1:2005[1] opastava liite A mukaisesti.
 - o B menetelmä 1: SFS-EN 1994-1-1:2005[1] opastava liite B mukaisesti.
- Kiepahdus -ja nurjahduskertoimet
 - o käyttäjä voi päättää sauvojen nurjahdus – ja kiepahduskertoimet itse.

Teräs materiaali asetukset		Teräksen nurjahduskertoimet			Teräksen kiepahdustuenta		
Teräs materiaali:	S 355	Sauva	Lc,y kerroin	Lc,y pituus	Sauva	Lc,z kerroin	Lc,z pituus
Valssaus/Hitsaus	Valsattu	Sauva1	1.1	5500	Sauva1	1.1	5500
Putki profiilien valssaus	Kuumavalsattu						
Teräs arvio €/kg:	2						
Yhteisvaikutustekijät							
Laskenta tapa:	B metodi						
Mitoitetaan							
<input checked="" type="checkbox"/> Nurjahdus vahvemmassa							
<input checked="" type="checkbox"/> Nurjahdus heikommassa							
<input checked="" type="checkbox"/> Kiepahdus							
		Sauva	Kiepahdustuenta	Kiepahdus tukiväli / kiepahdus pituus m			
		Sauva1	<input type="checkbox"/>	5000			

Kuva 11. Teräs asetusnäky (Arokoski 2018)

Teräksen varmuuskertoimien määrittely on hyvinkin työlästä, siksi ohjelmalla poistetaan tämä vaihe kokonaan, jotta kyseiseen säästettäisiin aikaa. Tämä kuitenkin vaati ohjelmoinnissa hyvin tarkkaa ja selkeää suoritusta. Haastetta aiheuttanut tekijä on ollut esimerkiksi kertoimien C1 (momentin ja kaantumiskerroin), C2 (kuormitustapakerroin), jotka ovat riippuvaisia momenttipinnan suhteista ja

suuruuksista. Kriittisen pituuden kertoimen k_z ja k_w voidaan määrittellä käyttäjän antamista eurokoodi ehdoista, sekä poikkileikkauksen kiertymä ehdoista, mitkä käyttäjä voi itse määrittellä rakennemalli näkyvässä. Ohjelmassa pystytään mitoittamaan seuraavat tunnetut standardin mukaiset profiilit, kuten:

- IPE, I-profiili.
- HEA, H-profiili.
- HEB, H-profiili.
- RHS, suorakaideputki-profiili.
- CHS, ympyräputki-profiili.
- SHS, neliöputki-profiili.
- UPE, U-profiili.
- UPN, U-profiili.

Teräksen rakenteissa tai teräsmitoituksessa tulee erottaa teräksen stabiilimitoitus ja poikkileikkauksen mitoitus. Ellei stabiiliuden menetys rajoita poikkileikkauksen tai sen osan kestävyyttä, poikkileikkauksen voi saavuttaa kestäväytensä plastisoitumisen seurauksena (Eurcode3-oppikirja). Siksi teräsmitoituksessa teräsprofiilien hoikkuudesta johtuvat varmuuskertoimet tekevät mitoituksen luonteesta monimutkaista. Tässä ohjelmassa kuitenkin mitoitetaan seuraavat mitoittavat tekijät:

- vetokestävyys.
- puristuskestävyys.
- taivutuskestävyys.
- leikkauskestävyys.
- taivutus ja aksiaalinen voiman yhteisvaikutus.
- nurjahdus vahvemmassa suunnassa.
- nurjahdus heikommassa suunnassa.
- kimmoteorian mukainen kriittinen momentti.
- kiepahdus.
- kiepahdus -ja nurjahduskestävyys x-suunnassa.
- kiepahdus -ja nurjahduskestävyys y-suunnassa.
- taipuma.

2.5 Puu

Puuhun liittyvien Eurokoodi-standardien varmuuskertoimet on pyritty yksinkertaistamaan ohjelmassa siten, että niihin vaikuttavat tekijät ja kertoimet ohjelma itse määritteli automaattisesti antamalla käyttäjän syöttämällä asetuksilla. Tämä johtaa siihen, että käyttäjälle ei anneta juurikaan mahdollista suoraan vaikuttaa näihin kyseisiin kertoimiin. Puuvalikossa kuvassa 12 pystytään kuitenkin määrittelemään kyseiset asetukset mitkä vaikuttavat seuraaviin asioihin:

- Puumateriaali
 - o käyttäjä voi vaikuttaa liimapuun, sahatavaran tai kertopuun materiaali valintaan.
- Käyttöluokka
 - o vaikuttaa varmuuskertoimiin.
- Tukileveydet.
 - o käyttäjä voi päättää solmupisteitten kohdalla olevien mahdollisten tukileveyksien mitat itse.
- Kiepahdus -ja nurjahduskertoimet
 - o käyttäjä voi päättää sauvojen nurjahdus – ja kiepahduskertoimet itse.

The screenshot shows a software interface with several sections for wood settings:

- Puu materiaalit:** LVL materiaali: Kerto-S, GLT materiaali: GL30c, Saha materiaali: C30.
- Muut asetukset:** Käyttöluokka: 1.
- Mitoitetaan:**
 - Nurjahdus vahvemmassa
 - Nurjahdus heikommassa
 - Kiepahdus
- Puu nurjahduskertoimet:** Two tables showing 'Sauva', 'Lc,y kerroin', and 'Lc,y pituus' with values 1, 1.1, and 5500.
- Puu tukilevydet:** A table with columns 'Vapausaste', 'Laskenta', and 'Tukilevey mm'. Rows A and B both show 'Lasketaan' and '50'.

Kuva 12. Puuhun asetukset (Arokoski 2018)

Ohjelma automaattisesti määrittelee varmuuskertoimet, kuten esimerkiksi k_{def} ja k_{mod} arvot. k_{def} eli virumaluvun kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin sille muuttuvalla kuormalla, joka aiheuttaa lujuuteen nähden suurimman jännityksen ei oteta huomioon, vaan virumaluku ja laskemiseen käytettävä kimmomoduuli $E_{mean,fin}$ on tällöin vakio. Ohjelmassa pystytään mitoittamaan liimapuu, kertopuu ja sahatavara materiaaleja.

Puumitoittaminen näistä kolmesta materiaaleista on selvästi helpoin tai sen annetut standardit ja ohjeet ovat hyvinkin yksinkertaisia ja selkeitä ymmärtää kokonaisuudessaan verrattuna betoniin tai teräkseen. Puurakenteissa kuitenkin, esimerkiksi kantavan puu- palkin mitoittamisen ratkaisevat tekijät ovat palomitoitus, värähtelymitoitus tai taipuma. Kantavien puurakenteitten kohdalla tietty pitää suunnittelussa ottaa huomioon monia muita rakennefysikaalisia muuttujia, mutta yleensä miksi puu ei aina sovellu esimerkiksi kantavaksi välipohjarakenteeksi, ovat juuri nuo kolme yllä mainittua koh-

taa. Tässä ohjelmassa en ota kantaa värähtelymitoitukseen tai palomitoitukseen, jotka olisivat hyvin olennaisia, kun verrataan toisia materiaaleja toisiinsa, mutta käyttäjä kuitenkin voi verrata materiaalien välistä kestävyyttä toisiinsa. Ohjelmassa mitoitetaan seuraavat asiat:

- vetolujuus.
- puristuslujuus.
- taivutuslujuus.
- leikkauslujuus.
- taivutus ja aksiaalinen voiman yhteisvaikutus.
- nurjahdus vahvemmassa suunnassa.
- nurjahdus heikommassa suunnassa.
- kiepahduslujuus.
- kiepahdus -ja nurjahduskestävyys vahvemmassa suunnassa yhteisvaikutus.
- kiepahdus -ja nurjahduskestävyys heikommassa suunnassa yhteisvaikutus.
- taivutus -ja nurjahdus vahvemmassa suunnassa yhteisvaikutus.
- taivutus -ja nurjahdus heikommassa suunnassa yhteisvaikutus.
- tukipainelujuudet.
- taipuma.

Ja ohjelma mitoitaa seuraavia tyyppiprofileja/materiaaleja:

- LVL, viilupuu.
- GLT, liimapuu.
- sahatavara.

2.6 Betoni

Ohjelmassa betonin mitoitus eroaa siten muihin, että betonissa lähdetään mitoitamaan yhtä suora-kaide -profileja, johon ohjelma luo automaattisesti erilaisia rauditusvaihtoehtoja mitä lähdetään mitoitamaan. Ennen mitoitusta, kuitenkin pitää määritellä betoniin vaikuttavat muuttujat. Betoni näistä materiaaleista vaatii huomattavasti eniten aikaa suunnittelussa, sillä siihen vaikuttavien rakennefysi-kaalisten muuttujien arvojen määrä on suurempi verrattuna puuhun tai teräkseen. Ohjelmassa aluksi piti sisältyä ympyräpoikkileikkaus, mutta ajallisista syistä en kerkeä esittämään sitä tähän opinnäyte-työhön.

Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelussa ohjelma ottaa huomioon seuraavat muuttujat, joista ohjelma automaattisesti määrittelee betonimateriaalin varmuusluvun, sallitun betonilujuuden, minimi betonilujuuden, sallitun halkeaman ja betonipeitteen (kuva 13). Ohjelmassa on noudatettu betoninormien by 65 kirjan taulukon 3.8 ja taulukon 3.9 betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvoja.

- Betonimateriaalit / betonilujuus
 - o Ohjelma huomauttaa mahdollisesti sallitusta betonilujuudesta, jos betonilujuus liian suuri
- Raudoitusmateriaali
 - o Tällä hetkellä ohjelmassa pystytään vain valitsemaan B500A harjateräslaataa.
- Toleranssit.
 - o ohjelma pyytää käyttäjää määrittelemään kohteen toleranssiluokan ja toteutusluokan, jotka vaikuttavat määräytyviin arvoihin.
 - o Kohteen käyttöikä.
 - o C dev toleranssi lisäarvo betonipeitteen lopulliseen arvoon $C_{nom} = c_{min} + c_{dev}$.
- Betoni suhteutus
 - o Ohjelma tarkistaa maksimi v/s -suhteen ja varoittaa käyttäjä, jos tämä ylittyy.
 - o Raekoon valinta vaikuttaa raudoituksen luontiin profiileissa.
- Rasitusluokat
 - o Käyttäjä määrittelee betonin rasitusluokat, jonka perusteella ohjelma määrittelee vähimmäislujuusluokan ja betonipeitteen betonille.
- Virumaluku
 - o Käyttäjä määrittelee virumaluvun jokaiselle kuormitustapaukselle, johon käyttäjä voi vaikuttaa rakenteen kosteuden hallinnassa, sekä viruman aikatekijät.

Kuva 13. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien valinta näkymä ohjelmassa (Arokoski 2018)

Betonin verrattuna puuhun ja teräkseen eroaa oleellisesti siinä, että betonin taiputusjäykkyys ei ole vakio, vaan poikkileikkauksessa oleva momentin lisääntyvä suuruus pienentää jäykkyyttä, kun betoni halkeaa. Taipumia laskettaessa rakenteelle arvioidaan tehollinen jäykkyys, jotta tunnettuja vakiojäykkyyteen perustuvia taipumalausekkeitä voidaan käyttää (by210). Rakenteen vedettyjen osien ominaisuudet vaikuttavat taiputusjäykkyyteen ja numeerisia menetelmiä otetaan ohjelmassa asettamalla sopiva interpolaatiofunktio. Eurocode 2:ssa ja betoninormeissa periaate taiputusjäykkyyden tarkastelussa tarkoittaa lauseketta

$$(EI_{ef}) = \zeta(EI_{II}) + (1 - \zeta)(EI_I)$$

missä

(EI_I) ehyen betonipoikkileikkauksen taivutusjäykkyys

(EI_{II}) taivutusjäykkyys halkeaman kohdalla

ζ jautumakerroin, jolla otetaan huomioon betonin vetojäykistysvaikutus

Tämä tarkoittaa laskennassa käytännössä sitä, että laskenta pitää suorittaa vaiheittain iteroimalla. Näin päästään lähes tarkkoihin taipumiin ja betonipoikkileikkaus taivutusjäykkyyksiin. Ohjelmoinnissa tai laskennassa pitää varmistaa siitä, että poikkileikkauksen vetopuolella on aina raudoitusta, eli siellä missä on momenttia tulisi aina olla vetopuolella rautaa. Silloin ohjelmassa joudutaan ennen varsinaista laskentaa tietämään missä kohdin momenttia syntyy rakennemallissa ja kuinka pitkälle matkalle raudoitusta olisi hyvä suunnitella.

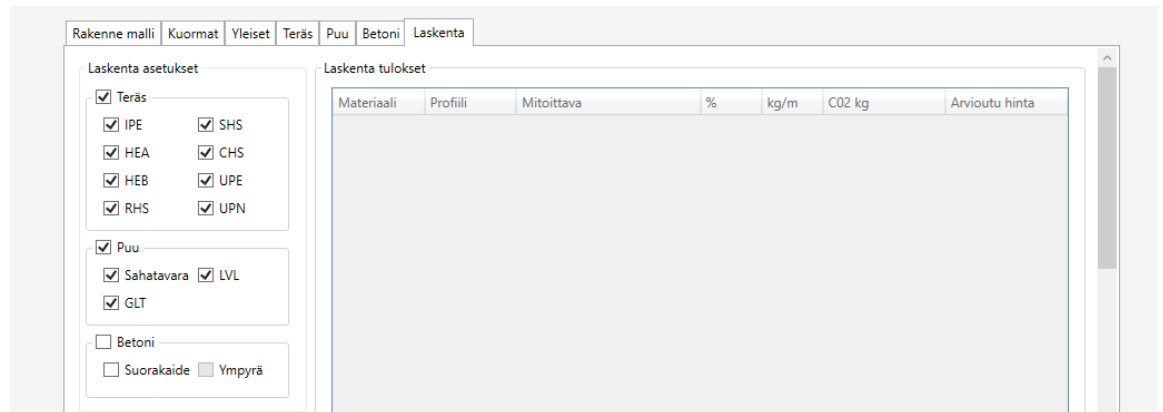
Ohjelma suunnittelee raudoituksen riippuen siitä, onko kyseessä pilari vai palkkirakenne. Jos kyseessä on pilarirakenne tällöin ohjelma luo symmetrisen raudoituksen ympäri poikkileikkausta, kun taas palkki rakenteessa ohjelma luo eri tyyppisiä raudoitussyhdistelmiä sauvoihin. Kun saadaan laskettua oikeat rasitukset ja taipumat ohjelma laskee betonimitoituksessa:

- taivutuskestävyys.
- leikkausraudoituskestävyys.
- leikkausmurtokestävyys.
- ankkurointipituus.
- halkeama.
- taipuma.

Betonin mitoituksesta puuttuu pilarien mitoitus, jotenka tähän opinnäytetyöhön saadaan vertailuarvoiksi vain betonipalkkirakenteita.

2.7 Laskenta

Laskenta kuvassa 14 näkyvässä käyttäjä voi itse päättää mitä profiileja lähdetään materiaaleille laskemaan.



Kuva 14. Laskentavalikko (Arokoski 2018)

Jos määriteltyjä sauvoja ja kuormitustapauksia on monia, niin tämä aiheuttaa moninkertaisen laskenta määrän ohjelmassa, joka johtaa taas laskennankestoon ja muistivaraukseen. Ohjelman lähdekoodissa pitää tämä ottaa huomioon siten, että kaikki oliopohjaisia laskenta tuloksia ei varastoida hetkelliseen muistiin vaan pyritään pitämään laskelmien tiedot mahdollisemman pienenä funktiota käyttäen. Ohjelma voi olla hyvinkin raskas, jos lähdetään laskemaan jokaisen tunnetun profiilin laskematapaukset. Tätä pyritään rajoittamaan laskenta-asetusvalikossa, jossa käyttäjä voi itse päättää mitä lasketaan.

3 OHJELMAN LUONTI

Ohjelman luomiseen luonnollisesti tarvitaan paljon suunnittelua ja ohjelmointia. Yleensä, kun lähde-tään suunnittelemaan ohjelmistoa, ollaan jo tietoisia siitä, että mitä sen tulisi pitää sisällään ja miten se toteutetaan. Tämä on hyvin oleellista, kun suunnitellaan oliopohjaista luokkakirjastoa, jolla rakennetaan niin sanottu perusta tyyppioliolle. Siksi tässä projektissa haasteita aiheutti suunnittelun epävarmuus ja projektin vieminen eteenpäin epätietoisuuden takia. Projektissa niin sanotusti väkisin jouduttiin tekemään suunnitteluvirheitä tämän takia, jotta päästäisiin eteenpäin ymmärtämään luomisen kokonaisuutta.

Tässä projektissa tarvittiin monia eri olioluokkia ja funktiota, joilla pystyttiin luomaan hyvä perusta ja miten ohjelma käyttäytyy käyttöliittymän, käyttäjän ja olioitten välillä. Vaikka koodaus rivien määrä ei välttämättä kerro koko työn määrää, niin puhutaan noin 30 - 50 tuhannen koodirivin määrästä. Tässä pitää ottaa huomioon se, että olio-ohjelmoinnissa tai koodissa tärkeintä ei ole rivien määrä vaan sen mahdollinen toistettavuus, uudelleenikäyttö, selkeys, tehokkuus ja toiminnallisuus millä tarkoitan mahdollisten bugien ja virheitten minimointia, sekä mahdollisten päivityksien asettamisen helpoutta.

```
double Cyy = 1 + (wy - 1) * ((2 - (1.6 / wy) * Math.Pow(Cmy, 2) * lambda_max - ((1.6 / wy) * Math.Pow(Cmy, 2) * Math.Pow(lambda_max, 2))) * npl - bLT);
if(Cyy < (Wely / Wply)) { Cyy = (Wely / Wply); }

double cLT = 10 * a_LT * ((Math.Pow(lambda_0, 2) / (5 + Math.Pow(lambda_z, 4))) * (Myed_max / (Cmy * XLT * Mpl_y_Rd)));
double Cyz = 1 + (wz - 1) * ((2 - 14 * ((Math.Pow(Cmz, 2) * Math.Pow(lambda_max, 2)) / Math.Pow(wz, 5))) * npl - cLT);
if(Cyz < 0.6 * Math.Sqrt(wz / wy) * (Welz / Wplz)) { Cyz = 0.6 * Math.Sqrt(wz / wy) * (Welz / Wplz); }

double dLT = 2 * a_LT * (lambda_0 / (0.1 + Math.Pow(lambda_z, 4))) * (Myed_max / (Cmy * XLT * Mpl_y_Rd)) * (Mzed_max / (Cmz * Mpl_y_Rd));
double Czy = 1 + (wy - 1) * ((2 - 14 * ((Math.Pow(Cmy, 2) * Math.Pow(lambda_max, 2)) / Math.Pow(wy, 5))) * npl - dLT);
if (Czy < 0.6 * Math.Sqrt(wy / wz) * (Wely / Wply)) { Czy = 0.6 * Math.Sqrt(wy / wz) * (Wely / Wply); }

double eLT = 1.7 * a_LT * (lambda_0 / (0.1 + Math.Pow(lambda_z, 4))) * (Myed_max / (Cmy * XLT * Mpl_y_Rd));
double Czz = 1 + (wz - 1) * ((2 - (1.6 / wz) * Math.Pow(Cmz, 2) * lambda_max - ((1.6 / wz) * Math.Pow(Cmz, 2) * Math.Pow(lambda_max, 2))) - eLT) * npl;
if (Czz < (Welz / Wplz)) { Czz = (Welz / Wplz); }

if(this.SectionClass.Value == 3 || this.SectionClass.Value == 4)
{
    this.kyy.Value = Cmy * CmlT * (mu / (1 - (Ned / Ncr_y)));
    this.kyz.Value = Cmz * (mu / (1 - (Ned / Ncr_z)));
    this.kzy.Value = Cmy * CmlT * (mu_z / (1 - (Ned / Ncr_y)));
    this.kzz.Value = Cmz * (mu_z / (1 - (Ned / Ncr_z)));
}
else if(this.SectionClass.Value == 1 || this.SectionClass.Value == 2)
{
    this.kyy.Value = Cmy * CmlT * (mu / (1 - (Ned / Ncr_y))) * (1 / Cyy);
    this.kyz.Value = Cmz * (mu / (1 - (Ned / Ncr_z))) * (0.6 / Cyz) * Math.Sqrt(wz / wy);
    this.kzy.Value = Cmy * CmlT * (mu_z / (1 - (Ned / Ncr_y))) * (0.6 / Czy) * Math.Sqrt(wy / wz);
    this.kzz.Value = Cmz * (mu_z / (1 - (Ned / Ncr_z))) * (1 / Czz);
}
```

Kuva 15. Esimerkki lähdekoodista yhteisvaikutustekijöitten laskennasta (Arokoski 2018)

Ohjelmoinnissa ja laskennassa virheitten mahdollisuus on hyvin suuri, joten on tärkeää, että koodi on selkeää ja helposti korjattavissa. Esimerkiksi kuvassa 15 C#-koodin laskentaa, missä lasketaan teräspilarin yhteisvaikutustekijöitä. Laskennassa käytettävien symbolien tunnuksia pyritään esittämään mahdollisemman selkeinä ja antaa laskijalle tai koodaajalle hyvä siitä käsitys mitä lasketaan.

4 VERTAILU JA LASKENTA

Lähdetään vertailemaan palkki ja pilarirakenteita. Tässä työssä otan kaksi palkkirakennetta ja yhden pilarirakenteen, joissa vertaillaan ohjelman antamia laskentatuloksia. Vertailussa vertaillaan profiileja toisiinsa mitoittavatekijän, kg/m suuruuden, hinnan, ja hiilijalanjäljen avulla.

Materiaalihinnoissa on käytetty taulukon 1 osoittamia hintoja. Nämä hinnat ovat suuntaa antavia hintoja, jotka perustuvat materiaalin ainekustannuksiin, joissa veroprosentti on 0%. Käyttäjä voi kuitenkin itse määrittellä käytetyn materiaalin hinnan ohjelmassa, jos haluaa.

Taulukko 1. Laskennassa käytetyt materiaalit, hinnat ja hiilijalanjäljet

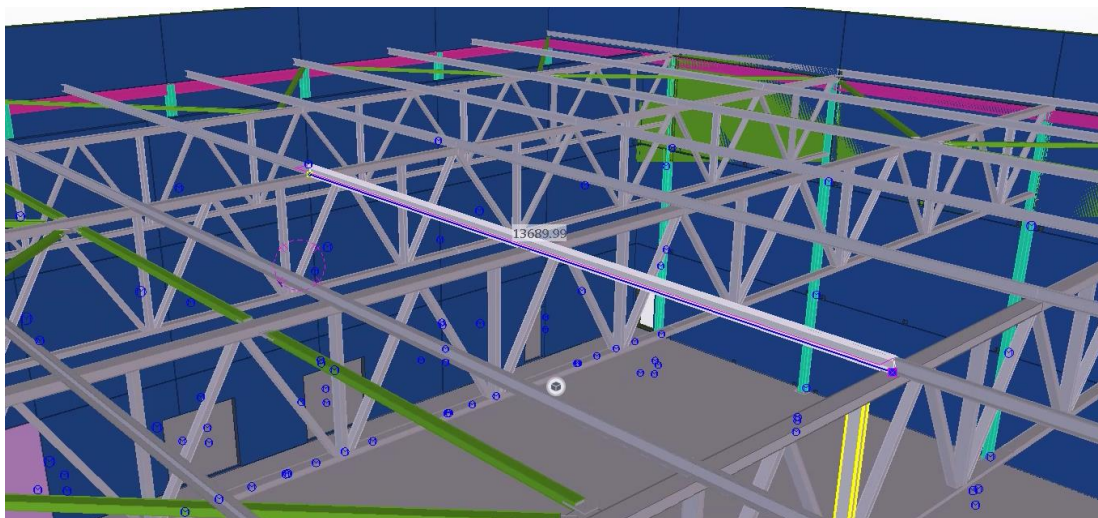
Materiaali	Käytetty materiaali	Hinta arvio	Hiilijalanjälki CO2kg
Liimapuu	GL30c	870 €/m ³	130kg/m ³ – 789kg/m ³ ;
Kertopuu	Kerto-S	710 €/m ³	109kg/m ³ – 1730kg/m ³ ;
Sahatavara	C30	350 €/m ³	152kg/m ³ – 1638kg/m ³ ;
Betoni	C30/37	140 €/m ³	1639kg/m ³
Betonin rauditus	B500A	1 €/kg	121kg/m ³
Teräs	S355	2 €/kg	1639kg/m ³

Hiilijalanjäljen laskennassa ollaan käytetty VTT julkaisemaa Carbon footprint for building products raportin antamia laskentatietoja. Teräkselle ja betonille tarkkoja hiilijalanjälki arvoja ei tässä työssä voida pitää oikeina, koska niistä on hyvin epäselviä arvoja monista eri tietolähteistä. Laskennassa on kuitenkin käytetty monien tietolähteitten yhdistettyjä keskiarvoja ja suuntaa antavia arvoja, mitä löydettiin netistä.

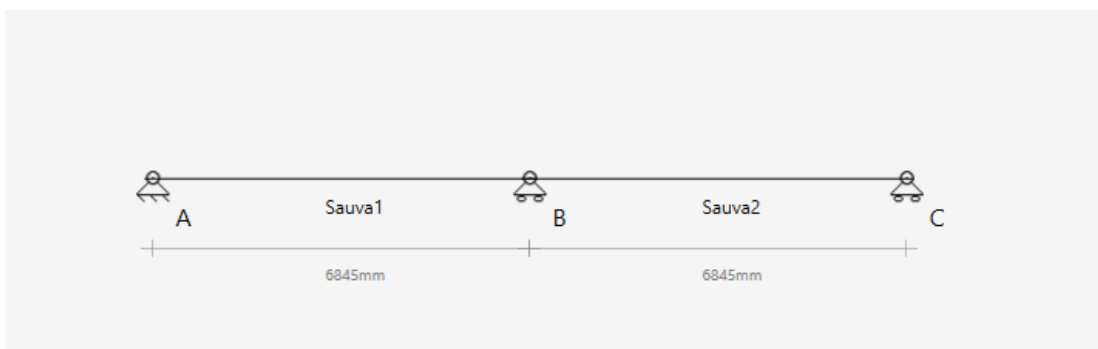
4.1 Palkkirakenteet

Palkki rakenteissa valitaan mielivaltaisesti kaksi esimerkki tapausta, A ja B. A -tapauksen esimerkkirakenne perustuu Savonian kolmannen vuoden harjoitusprojektityöhön. Projektissa suunniteltiin tennishalli ja yksi harjoitustöistä oli mitoittaa kattoristikoitteen väliset palkki/orsi -rakenne. B -tapauksen esimerkkirakenne perustuu Savonia Opistotien kampuksen opetusluokkien välipohjapalkkien rakenteeseen, jossa käytetään betonilaattapalkkipoikkileikkausta kantavana rakenteena.

4.1.1 A -palkkirakenne



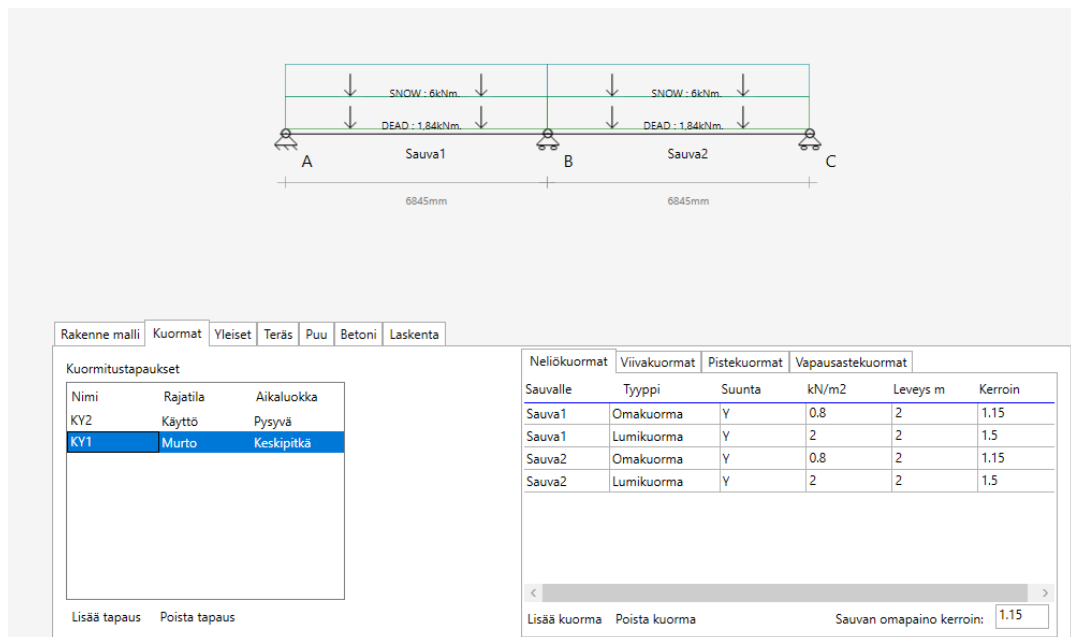
Kuva 16. TeklaStructures näkymä A-palkki rakenteesta (Arokoski 2018)



Kuva 17. A -palkkirakenne yksinkertaistettu rakennemallissaan (Arokoski 2018)

Oletetaan, että kuvissa 16 ja 17 A -palkki rakenne vastaanottaa kuormaa puolelta leveydeltä orsijakoa yläpohjasta, jossa käytetään kevytrakenteista yläpohjarakennetta. Rakenne on yksinkertaistettu, siten että siihen ei kohdistu aksiaalisia voimia sen pituus 2-aukkoinen, 6845 + 6845 mm. Orsijako on 2 m.

Rakenteen kuormituksessa ominaiskuormissa tarkastellaan lumi ja yläpohjan omaa painoa. Olkoon lumi 2.00 kN/m² ja yläpohjan omapaino 0.80 kN/m². Kuormitustarkastelussa yksinkertaistetaan kuormitustapaukset kahteen tapaukseen: KY1 kuvassa 18, jossa lumi pääkuormana (murtorajatila) ja KY2, jossa käytetään kuormien ominaiskuormia (käyttörajatila).



Kuva 18. Kuva käytetyistä kuormista ohjelmassa (Arokoski 2018)

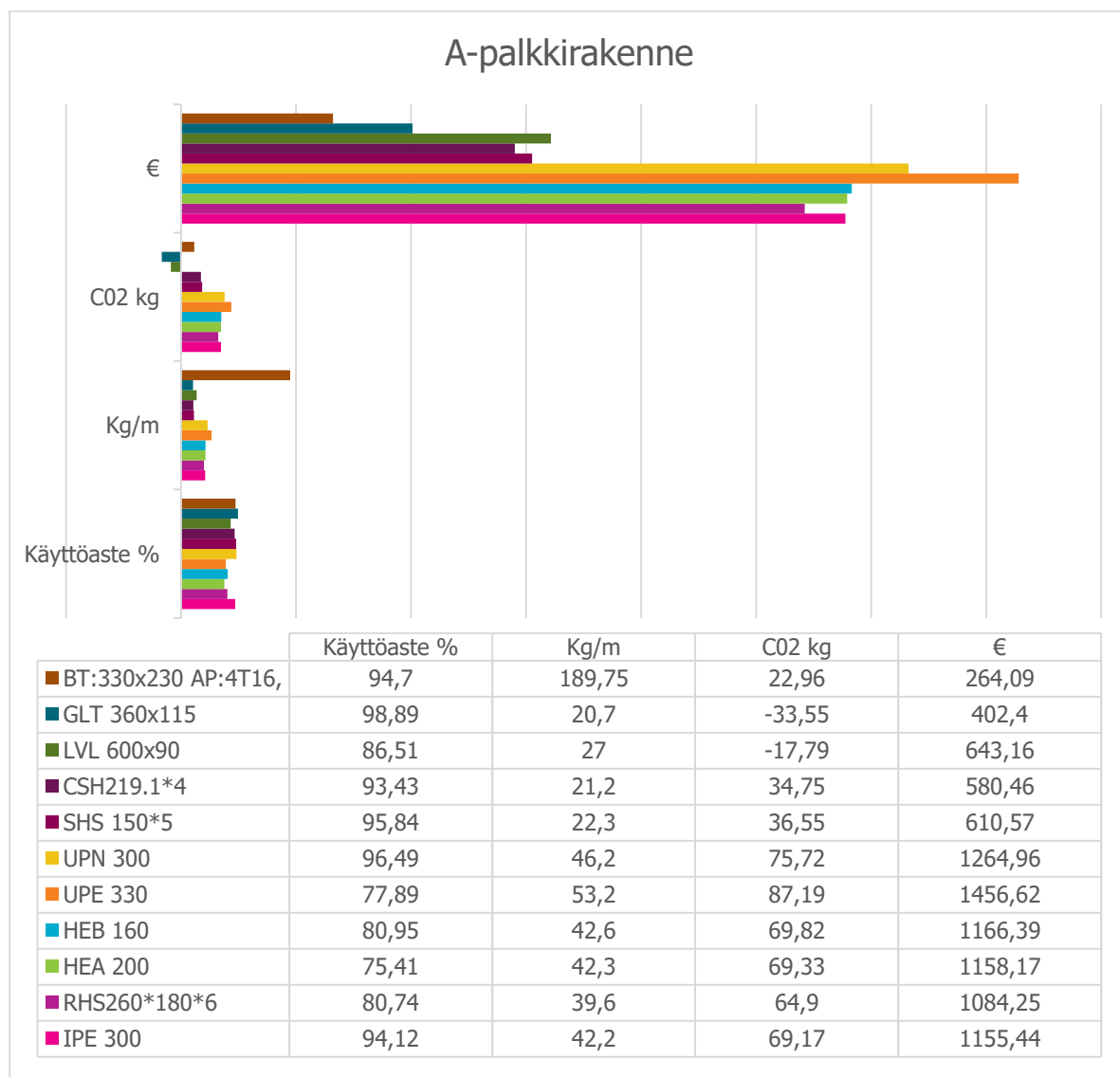
Asetuksiin määritellään kaikille materiaaleille sisätila-asetukset. Rakennetta ei ole tuettu kiepahdukselle, joten kiepahduspituus rakenteessa käytetään 6845 mm. Betonipalkkina käytetään 280x180mm kokoista palkkia, vaikka kyseiseen rakenteeseen ei olisi viisasta miettiä betonipalkki ratkaisua otetaan se tähän laskelmaan ihan vain vertailun vuoksi.

Puun tukipainelevyydet asetetaan A tuenalle 125 mm, B tuennalle 250 ja C tuennalle 125 mm. Teräs profiilit mitoitetetaan hitsattuna ja rasitusluokkavaatimukset betonille asetetaan sisätilavaatimukset, ja myös puulle.

4.1.2 Laskentatulokset A-palkki.

Tarkastellaan jokaisen tyyppiprofilin halvinta hyväksyttyä tulosta taulukossa 2.

Taulukko 2. A-palkkirakenteen laskelmien tulokset



Laskelmista huomataan, että halvimmat vaihtoehdot löydetään liimapuusta 360x115 ja betonipalkista 330x230 jossa kyseinen annettu rauditus. Lähdetään tarkastelemaan GLT 360x115 ohjelman luomaa raporttia. Kyseiset poikkileikkaukset ovat hyvin järeitä orsirakenteiksi, joten alkuperäisessä rakenteessa olisi hyvä tihentää orsijakoa tai korvata orret muilla ylittävillä rakenteilla. Nyt kuitenkin tarkastellaan GLT 360x115 profiilin laskelmia, jossa mitoittava tekijä oli kiepahdus.

Opinnäytetyö 12.3.2018

Projektintiedot:

Suunnittelija:	Jaakko Arokoski	Ammatti/positio:	Opiskelija
Yritys:	Savonia	Asiakas / kohde:	Opinnäytetyö testi
Muulinformaatio: A-palkkirakenteen esimerkkilaskelma opinnäytetyöhön.			

Yleistä:

Seuraamusluokka:	CC2	Paloluokka:	R60
Kfi:		1	

Materiaali:

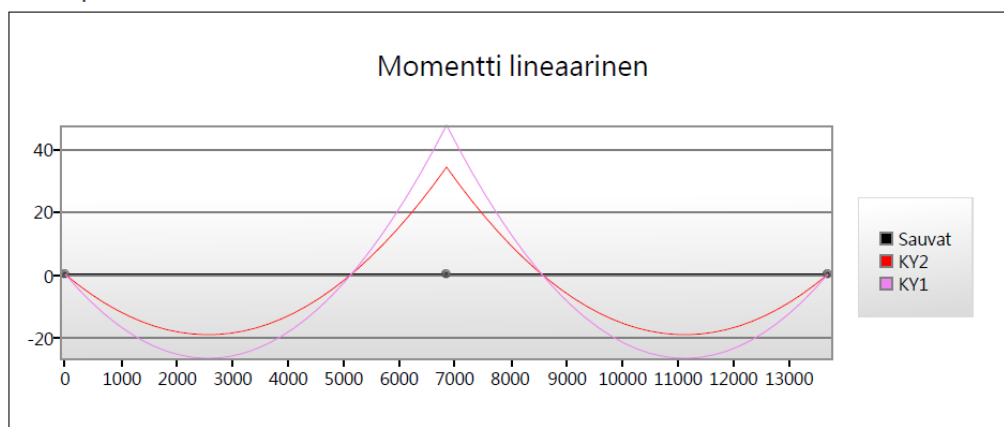
Materiaali:	GL30c	Hiihijalanjalki:	-33,55kg
Osavarmuusluku:	1,2	f_{c0k} :	24,5N/mm ²
E0 mean:	13000MPA	f_{c90ku} :	2,5N/mm ²
E0 05:	10800MPA	f_{mk} :	30N/mm ²
E90 mean:	300MPA	f_{vk} :	3,5N/mm ²
Gmean:	540MPA	f_{t0k} :	19,5N/mm ²
pk:	390kg/m ³	f_{t90k} :	0,5N/mm ²
pmean:	430kg/m ³	f_{trk} :	1,2N/mm ²

Profiili:

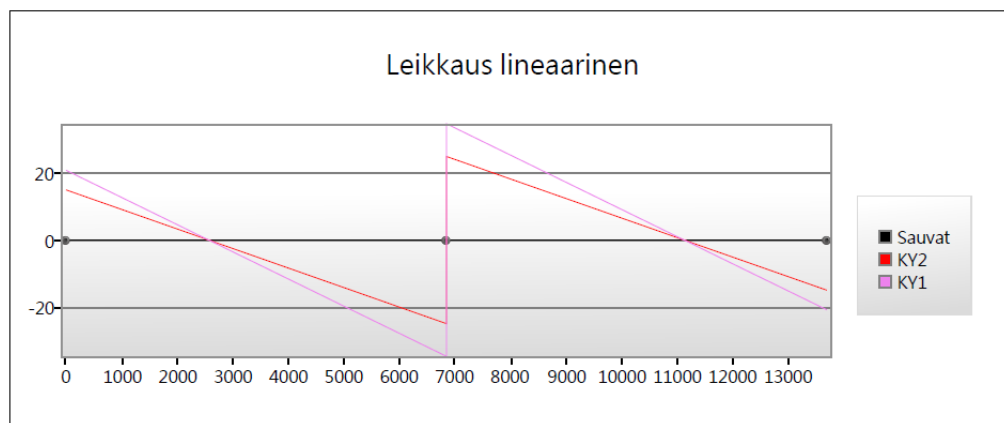
Profiili:	GLT 360x115	ix:	10,4cm
Korkeus:	360mm	iy:	3,3cm
Leveys:	115mm	Welx:	2484cm ³
A:	414cm ²	Wely:	793,5cm ³
Ix:	44712cm ⁴	Wply:	4562,6cm ⁴
Iy:		4562,6cm ⁴	

Kuva 19. Näyte raportista, tiedot kohteesta, materiaalista ja profiilista (Arokoski 2018)

Kuormitustapauksien momentti arvot:



Kuva 20. A-palkin momenttikaavio (Arokoski 2018)



Kuva 21. A-palkin leikkauskaavio (Arokoski 2018)

Raportista nähdään rakenteen rasitukset ja taipumat joitten perusteella ohjelma mitoittaa jokaisen sauvan omissaan kuormitustapauksissaan. GLT 360x115 profiilin suurimmat mitoittavimmat tekijät oli kuormitustapauksessa KY1. Kuvissa 19, 20, 21 ja 22 nähdään esimerkki näyte ohjelman luomasta raportointi tyylistä.

Sauva1 kuormitustapaus: KY1:

Sauvaan ei kohdistu vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

K _{mod} :	0,8	k _{def} :	0,6
L _{lateral} :	6845mm	L _{c, y} :	1mm
K _{c 90} :	1,5	L _{c, z} :	1mm
k _{crit} :	0,915		

Taivutuslujuus y-suunnassa:

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 21,048\text{N/mm}^2$$

Missä:

$f_{m,k}$	=	30N/mm ²	Taivutus ominaislujuus
k_{mod}	=	0,8	Kosteuden muunnoskerroin
γ_{mod}	=	1,2	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
Kh	=	1,052	Taivutuslujuuden ominaisarvoa suurennuskerroin

19,05 / 21,05N/mm² Käyttöaste: 90,5%

Leikkauslujuus:

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 2,333\text{N/mm}^2$$

Missä:

$f_{v,k}$	=	3,5N/mm ²	Ominais leikkauslujuus
k_{mod}	=	0,8	Kosteuden muunnoskerroin
γ_{mod}	=	1,2	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku

0,83 / 2,33N/mm² Käyttöaste: 35,8%

Kiepahduslujuus:

$$f_{m,y,d} k_{crit} = 19,261\text{N/mm}^2$$

Missä:

k_{crit}	=	0,915	Kiepahduslujuuden pienennyskerroin
$f_{m,y,d}$	=	21,048N/mm ²	Taivutuslujuus y-suunnassa

19,05 / 19,26N/mm² Käyttöaste: 98,9%

Kuva 22. Esimerkki näyte GLT 360x115 raportista (Arokoski 2018)

Raportit pyrkivät osoittamaan hyvinkin selkeästi raporteissaan mitä on laskettu, kuten kuvassa 22 näytetään ja millä arvoilla mahdollisemman selkeästi. Tällä pyritään antamaan ohjelman käyttäjälle hyvinkin selkeä kuva laskenta arvoista, joka taas vahvistaa käyttäjän ymmärrystä.

4.1.3 B -palkkirakenne

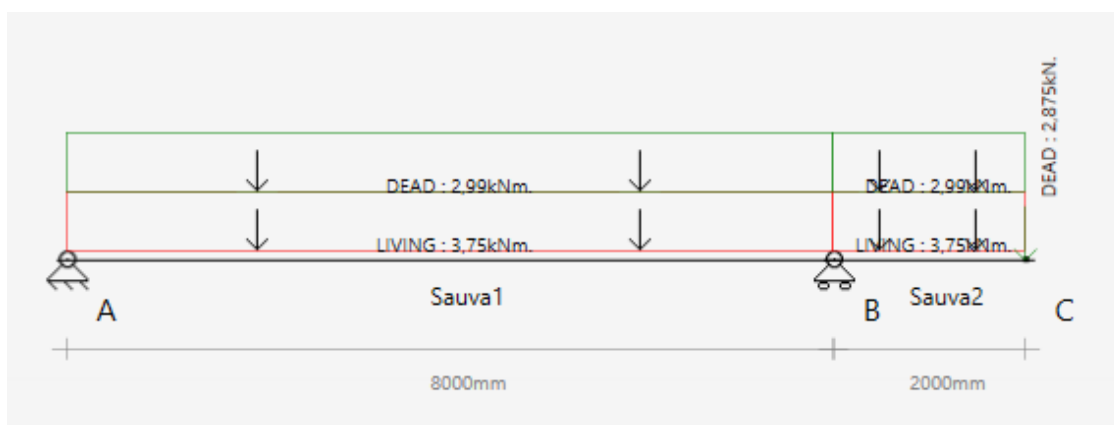
B –rakenteeseen kuvassa 23 tarkkoja mittoja todellisesta luokkakoosta tai sen leveydestä ei ole, mutta arvioksi voidaan määritellä 8 metriä leveä luokka ja 2 metrin ulokkeella, joka johtaa kampuksen käytävälle. Laattarakenteen laatan paksuudeksi arvioidaan 100mm, joka otetaan huomioon laskennassa välipohjan omassa painossa. Laattapalkkirakenteen alkuperäinen korkeus noin 500 mm josta palkki osuus on noin 400mm. Ulokkeen päässä on kaide, josta muodostuu pistekuormaa rakenteeseen. Kyseinen kaide on myös tehty betonista, joten pistekuorman suuruus on hyvin merkittävä.



Kuva 23. B -palkkirakenteen rakennemalli (Arokoski 2018)

B-rakenteen vertailussa ei oteta huomioon palomitoitusta tai värähtelymitoitusta, joka olisi hyvin olennaista materiaalivertailussa, kun suunnitellaan osastoivia välipohjarakenteita. Vertailussa lähinnä vertaillaan tyyppiprofiilien kestävyksiä ja taipumia.

Kuormituksen ominaisarvoina käytetään omapainona 2,6 kN/m² ja hyötykuormana 2,5 kN/m². Palkkijako arvioidaan metriseksi ja ulokkeen kaiteesta syntyvä pistekuorma on noin 2,5 kN. Kuormitustapaukset yksinkertaistetaan kahteen tapaukseen, jossa KY1 (kuva 24) on hyötykuorma pääkuormana murtorajatilassa, ja KY2 on kuormitus käyttörajatilassa, missä kuormat ovat ominaiskuorminaan.

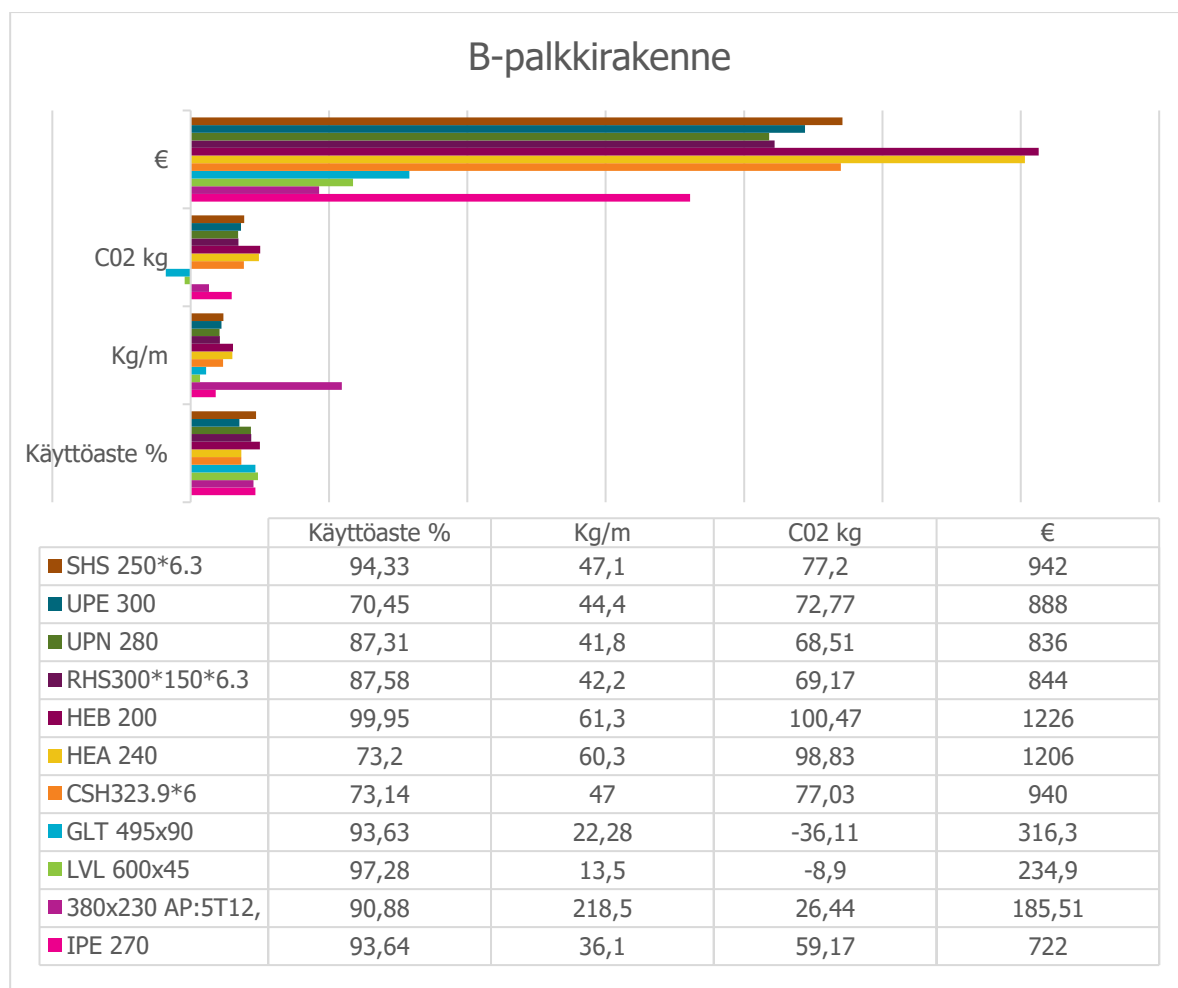


Kuva 24. B-rakenteen kuormitus kuormitustapauksessa KY1 (Arokoski 2018)

Oletetaan, että rakenne on sisätiloissa. Rakenteen sallittu taipuma raja asetetaan 20 mm (8000 mm/400). Puun tukipaineleveydeksi tuennalla A asetetaan 100 mm, ja tukipisteellä B asetetaan 200 mm. Teräs profiilit mitoitetaan kuumavalssattuna ja betonipoikkileikkauksena käytetään 380x230. Mitoituksessa ei tarkastella kiepahdusta, sillä oletetaan että välipohjanlaatta tukee palkistoa kiepahdukselta tai se on jotenkin muuten tuettu.

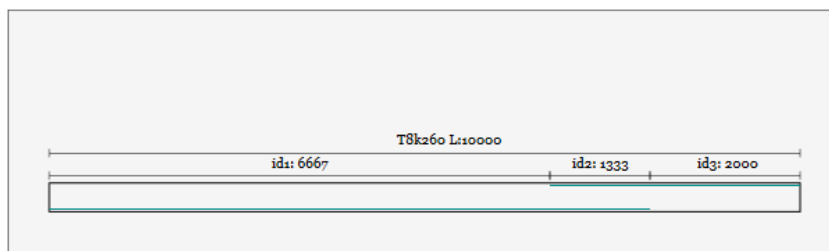
4.1.4 Laskentatulokset B-palkki

Taulukko 3. B-palkkirakenteen laskelmien tulokset (Arokoski 2018)



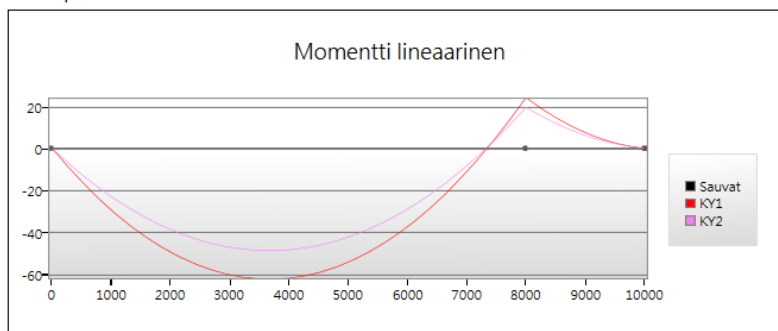
Taulukosta 3 ja laskelmista huomataan, että halvimmat vaihtoehdot löydetään betonipalkista 380x230 ja LVL 600x45. Melkein jokaisessa tyypiprofiilissa mitoittava tekijä oli sallittu taipuma, mikä on hyvin tyypillistä välipohja rakenteissa, joissa on suhteellisen iso omapaino kuormitus verrattuna hyötykuormaan. Kun ei tarkastella palkkien kiepahdusta teräs ja puu mitoituksessa, niin profiilin leveys voi olla hyvinkin pieni ja korkeus suuri, jos katsotaan LVL 600x45 ja GLT 495x90 profiilia.

Tarkastellaan betonipalkin ohjelman luomaa raporttia laskennasta. Raportissa nähdään, kuinka ohjelma automaattisesti on luonut betonin koko palkin matkalle raudoituksen, siten missä rakenteessa syntyy vetoa poikkileikkauksessa. Tällä pyritään lähinnä osoittamaan se, että minkälaisella raudoituksella palkkia tai sauvaa on laskettu. Kuvissa 24 ja 25 nähdään momentin ja raudoituksen yhteensattuma. Leikkausraudoitus pysyy samana, koska laskettu leikkausraudoitus leikkausvoimalle on pienempi, kuin laskettu minimi leikkausraudoitus. Ohjelma täten asettaa minimi raudoituksen koko palkin matkalle. Kuvissa 25, 26 ja 27 esitetään betonipalkin raportti näytteitä.



Kuva 25. Betonipalkin raudoitus (Arokoski 2018)

Kuormitustapauksien momentti arvot:



KY1: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -24,255kNm kohdassa x: 8000mm.

Max: 62,374kNm kohdassa x: 3733mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -24,255kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 0kNm kohdassa x: 2000mm

KY2: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -19,57kNm kohdassa x: 8000mm.

Max: 48,888kNm kohdassa x: 3733mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -19,57kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 0kNm kohdassa x: 2000mm

Kuva 26. B-palkkirakenteen momentti käyrästä (Arokoski 2018)

Mitoitus

Sauva1 kuormitustapaus: KY1:

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Taivutuskestävyys:

$$M_{s,ra} = \mu \cdot b \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd} = 68,633 \text{ kNm}$$

Missä:

b	=	230mm	Poikkipinnan leveys
d	=	340,2mm	Poikkipinnan hyötykorkeus
η	=	1	Jännitys jakauma- η
μ	=	0,152	Suhteellinen momentti
f_{cd}	=	17N/mm ²	Betonin mitoituslujuus

62,37 / 68,63kNm Käyttöaste: 90,9%

Leikkausraudoituksen kestävyys:

$$R_{s,ra} = s \cdot A_{sw} \cdot f_{yd} = 128,011 \text{ kN}$$

Missä:

s	=	260mm	Leikkausraudoituksen jako
A_{sw}	=	100mm ²	Leikkausraudoituksen pinta-ala
f_{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

40,04 / 128,01kN Käyttöaste: 31,3%

Kuva 27. Näyte raportin betonimitoituksesta ja kaavoista (Arokoski 2018)

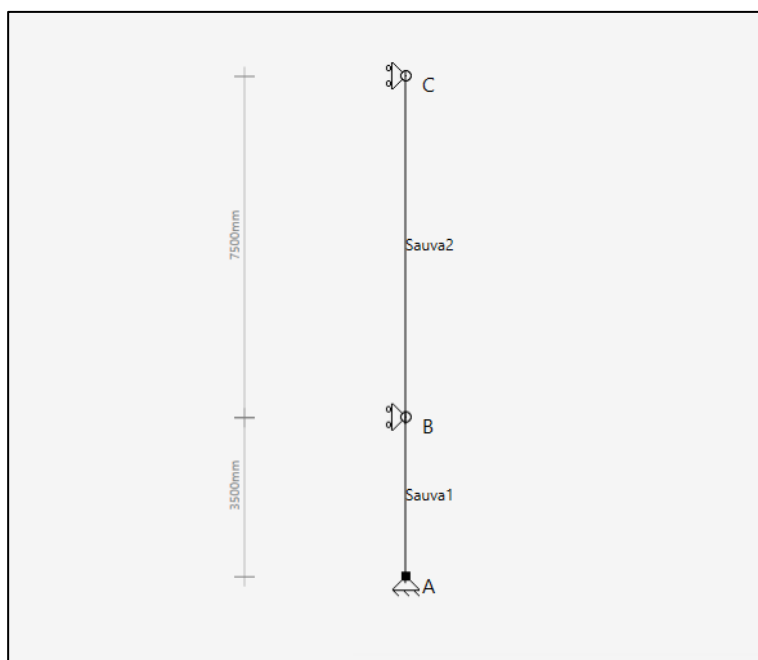
4.2 Pilari

Pilari rakenteeksi valitaan mielivaltaisesti esimerkkirakenne, joka myös perustuu Savonian kolmannen vuoden harjoitusprojektityöhön. Projektissa mitoitettiin teräspilareita tennishalliin ja niiden kestävyksiä. Yksi pilari, joka jäi mitoittamatta projektissa, oli sisäänkäynnin kantava pilari kuvassa 28.



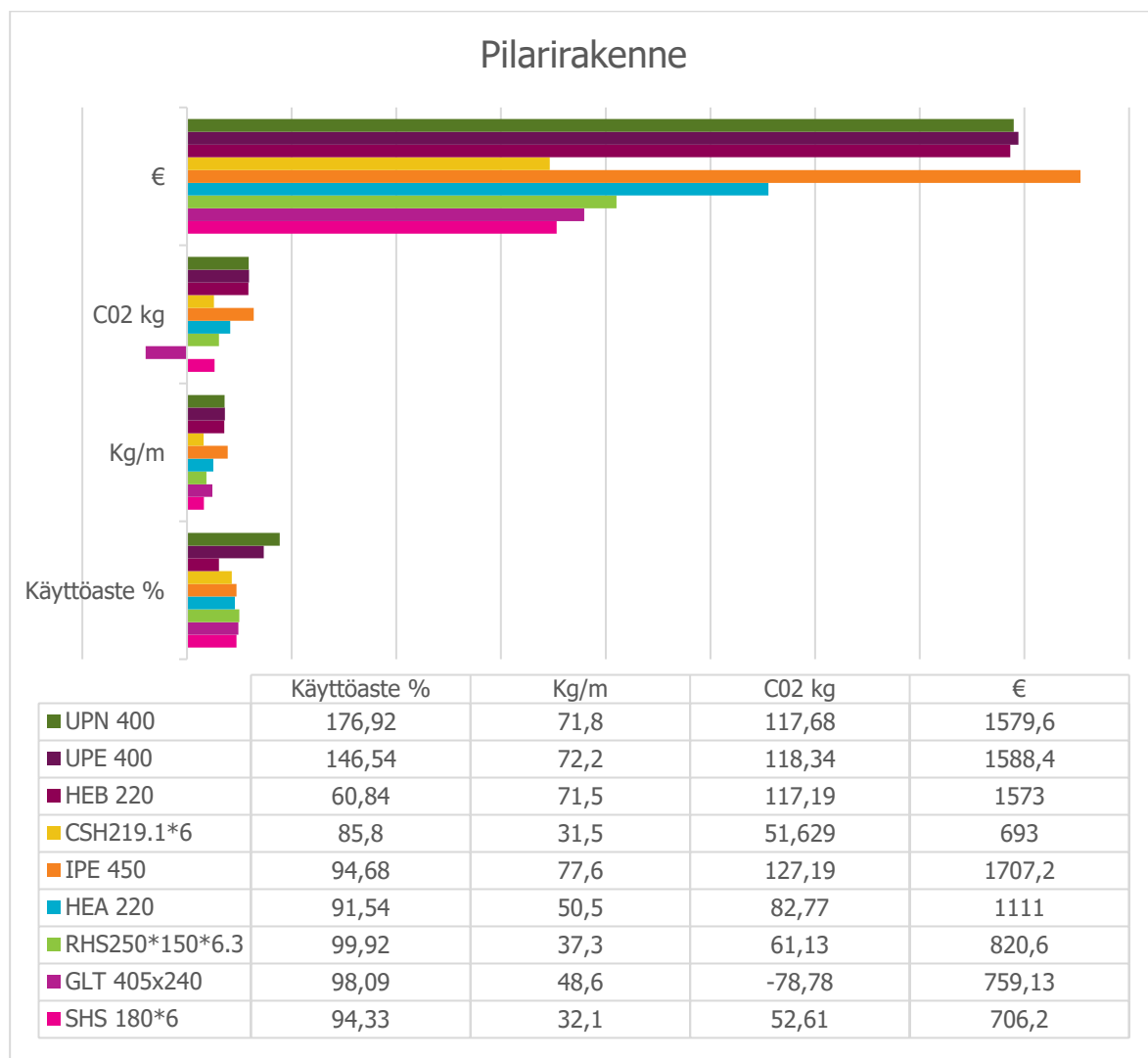
Kuva 28. Tennishallin sisäänkäynti (Kesonen-Kumpumäki 2017)

Pilari ottaa vastaa ulkoa tulevia tuulikuormia. Korkeus on 11 metriä ja tuulen kuormitusleveys on noin 7 metriä. Pilaria tuetaan vahvemmalta puolelta nurjahdustuella, joka 3,5 metrin korkeudella. Koko rakenteen korkeus on noin 13 metriä, joka otetaan huomioon epäkeskisten kuormien laskennassa. Kuvassa 29 esitetään ohjelman rakennemalli.



Kuva 29. Pilarin rakennemalli (Arokoski 2018)

Mitoitukseen otetaan mukaan teräs -ja puurakenteet. Nurjahduspituudet määritellään siten, että heikommissa suunnassa nurjahduspituus on pilarin kokonaiskorkeus ja vahvemmassa pienennetty nurjahdustuntojen kuvan 25 mukaisesti. Pilaria kuormitetaan yläpohjasta 10x5 metrin leveydeltä, jossa yläpohjan omapaino 1,0kN/m² ja lumen paino 2,0KN/m². Tuulenpaineesta johtuva neliökuorma pilariin on 0,7kN/m². Kuormitustapaukset yksinkertaistetaan kolmeen tapaukseen, joissa pääkuormitusyhdistelminä on KY1 tuuli pääkuormana, KY2 lumi pääkuormana ja KY3 käyttörajatilan kuormitus.



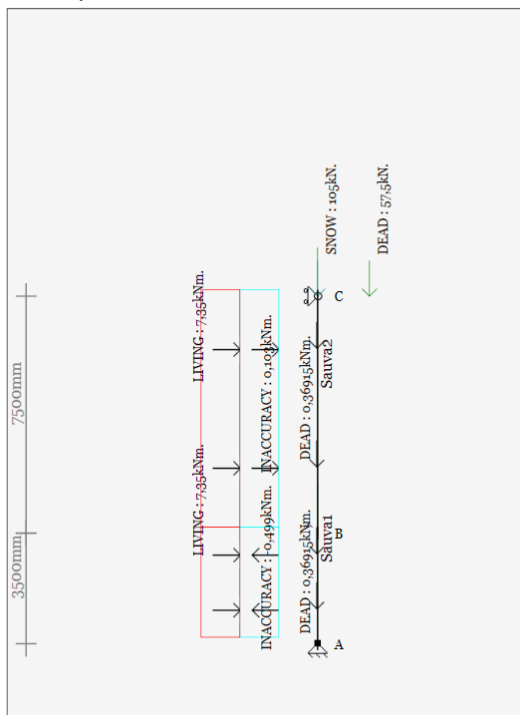
Taulukko 4. Pilarirakenteen laskelmien tulokset

Taulukkoon 4 on otettu jokaisesta tyyppiprofiilista oma halvin vaihtoehto, joiden mitoitettu käyttöaste pysyy alle 100 prosentin. Laskelmista huomataan, että halvimmat vaihtoehdot löydetään liima puusta 405x240, teräsneliöputki profiili SHS 180x6 ja ympyräputki profiili CSH219x6. Tarkastellaan SHS 180x6 ohjelman luomaa raportin laskelmia. Sahatavara ja LVL eivät sovellu laskelmiin, sillä niiden hoikkuus on liian suuri kyseiseen rakenteeseen. UPN ja UPE profiilit ovat myös heikkoja vertailussa, sillä ne ovat hyvin hoikkia heikommissa suunnassa.

Kuvassa 30. nähdään miten ohjelma automaattisesti luo pilarille alkuvinouden ja alkukäyryyden ekvivalentti korvausvoimat. Tämä helpottaa laskennan kulkua, jossa ohjelman käyttäjä ei tarvitse laskea

tai arvioida korvausvoimien suuruksia. Pilarimitoituksessa myös otetaan huomioon sauvan epälineaarinen käyttäytyminen kuormituksenalla ja niistä johtuvat lisärasitukset, sekä taipumat.

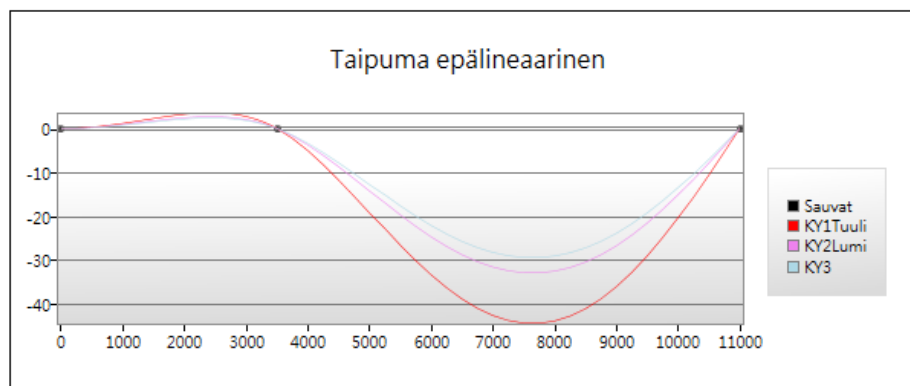
Kuormitustapaukset:



Kuormitustapaus: KY1Tuuli

Kuva 30. Pilarin kuormitus ja lisätyt ekvivalentti korvausvoimat (Arokoski 2018)

Epälineaarit aiiset taipuma arvot:



KY1Tuuli: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: -3,65mm kohdassa x: 2450mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 3500mm

Min y siirtymä: -0,68mm kohdassa x: 3500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 7500mm.

Max x siirtymä: 44,8mm kohdassa x: 4250mm

Min y siirtymä: -2,11mm kohdassa x: 7500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Kuva 31. Rakenteen epälineaarit aiiset taipumat (Arokoski 2018)

Kuvassa 31 nähdään, että kuormitustapauksessa KY1Tuuli taipumat ovat suurimmillaan, ja ohjelma kääntää taipuma käyrästä käyttäjälle sauvojen paikalliseen koordinaatistoon. Kuvassa 31 taulukon alla ohjelma myös esittää sauvojen maksimi ja minimi siirtymät globaalissa x ja y koordinaatistossa, ja niitten arvojen sijainnin sauvan x-akselin mukaisesti. Kuvassa 32 on näyte teräs Eurokoodi mitoituksesta.

Taivutuskestävyys:

$$M_{s,y,Ed} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72 \text{ kNm}$$

Missä:

$$W = 264 \text{ cm}^3 \quad \text{Poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

45,08 / 93,72 kNm Käyttöaste: 48,1%

Kiepahduskestävyys:

$$M_{s,y,Ed} = \frac{W_{eff} f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}} = 93,72 \text{ kNm}$$

Missä:

$$W = 264 \text{ cm}^3 \quad \text{Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_{LT} = 1 \quad \text{Kiepahduskestävyyden pienennystekijä}$$

45,08 / 93,72 kNm Käyttöaste: 48,1%

Nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$N_{b,y,Ed} = \frac{A f_y X_y}{\gamma_{M1}} = 1329,999 \text{ kN}$$

Missä:

$$A = 4080 \text{ mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen pinta-ala}$$

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_y = 0,918 \quad \text{Nurjahduskestävyyden pienennystekijä}$$

166,56 / 1330 kN Käyttöaste: 12,5%

Kuva 32. Näyte raportin teräsmitoituksesta ja kaavoista (Arokoski 2018)

5 POHDINTA

5.1 Laskenta

Laskelmista saadaan hyvä yleiskäsitys tyyppi-profiilien kestävyyksistä ja niiden käyttäytymisestä kuormitusten alla. Vaikka en saanut tähän työhön betonipilarivertailua tai muita betonityyppi-profiileja, niin saatiin hyvä arvio betonin, puun ja teräksen kestävyyksistä. Pilarirakenteessa huomattiin hyvin miten heikomman suunnan hoikkuus vaikuttaa tyyppi-profiilin kestävyys ja palkki rakenteissa nähdään kuinka palkkien kiepahduskestävyys rajoittaa paljon tyyppi-profiilien kestävyttä. Laskennassa käytettiin yli tuhat tyyppi-profiilia, joka määrällisesti on kattava ja antaa hyvän käsityksen eri vaihtoehdoista esimerkki rakenteille.

5.2 Ohjelman jatkaminen

Ohjelman tekemiseen tarvittiin myös paljon ohjelmointiosaamista. Ohjelmointi ja tietokäsittelytaidot antavat mahdollisuuksia tuleviin ammatteihin ja töihin, mitä työuran aikana voisin kohdata. Uskon, että ohjelmointi ja tietokonekäsittelytaitojen kysyntä, sekä vaatimukset kasvavat yhä entistä enemmän ajan myötä, kun tietokone ja informaatiotekniikka rakennussuunnittelussa mennään eteenpäin.

Ohjelma ei ole vielä valmis, mikä merkitsee sitä, että ohjelman luomiseen tulee vielä paljon korjauksia, tarkennuksia ja uusia toimintoja. Ohjelmaa voidaan viedä enemmän ja enemmän eteenpäin ja parantaa sitä mukaan mitä ohjelmalta vaaditaan. Ohjelmoinnin yksi periaate oli luoda koodia, jota pystytään helposti uudestaan käyttämään ja soveltamaan eri tapauksissa ja funktiossa mitä ohjelmalta vaaditaan tulevaisuudessa. Olen miettinyt seuraavia lisätoimintoja ohjelmaan tulevaisuudessa, jotka olisivat hyviä ja tarpeellisia toimintoja jatkoa ajatellen.

- tarkastelu ja kuormittaminen heikommassa suunnassa.
- lisää profiileja ja materiaaleja.
- tulostuksen ja raportin toimintojen parantaminen.
- lisää kuormitustyypppejä, kuten esimerkiksi pistemomentti.
- palomitoitus.
- värähtelymitoitus.
- esijännitetyt rakenteet.
- yhdistetyt rakenteet.
- liitosmitoitus.

Nämä lisätoiminnot kuitenkin vaativat lisää aikaa ja lisäopiskelua, joita voin sitten lisätä ohjelmaan myöhemmin ajansaatossa.

5.3 Itsearviointi

Päämerkitys työhön oli halu oppia. Työn tekemiseen tarvittiin laajakäsitys rakenteiden mitoittamisesta ja niitten soveltamisesta. Työ oli hyvin vaativa, sekä työläs. Suurin osa projektin tekemisessä meni kuitenkin suunnitteluun, asioitten ymmärtämiseen, virheitten korjaamiseen ja tiedon etsimiseen, mikä itsestään tekemisen myötä paransi itseni tietotaitoa ja käsitystä rakenne mitoittamisesta hyvinkin paljon. Itse tykkään tämän tyyppisistä projektitöistä, joissa tekijältä vaaditaan enemmänkin kokonaisuuden ymmärtämistä ja sen soveltamista käytännössä. Vaikka joskus teki mieli työn aikana leikkimielisesti hypätä ikkunasta ulos, olen silti tyytyväinen tämän hetkiseen tuotokseen ja tulokseen mitä ohjelmalla olen saanut aikaan.

LÄHTEET

ANTONOV, Pekka 2015. Asynkronisen ohjelmoinnin tekniikoiden vertailu Node.jsympäristössä [viitattu 2018-3.3]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104384/ont_petka_antonov.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa1 2013. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa2 2014. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Betonitekniikan oppikirja 2004. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Betoninormit 2016. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Betoniteollisuus. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan.[verkkoaineisto] [viitattu 2018-4.3]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/suunnitteluprosessi/normit-ja-standardit/suunnittelu-eurokoodeilla>

Carbon footprint for building products, ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products [viitattu 2018-4.3]. Espoo: VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T115.pdf>

DUNKEL, Harry EC2:n oppimateriaali/versio 1.3, Betonirakenteiden suunnittelu. 2011 [opetusaineisto] [viitattu 2018-4.3].

EC 5 Sovelluslaskelmat Hallirakennus toinen painos Eurocoodi 5. PDF-julkaisu, kesäkuu 2010: PUUINFO OY

Eurocoodi help desk [verkkoaineisto] [viitattu 2018-4.3]. 2018. Saatavissa: <Http://www.eurocodes.fi>.

ELEMENTTIMENETELMÄN PERUSTEET SESSIO 01: Johdanto. Elementtiverkko. Solmusuureet.: FEM-ohjelman analyysityypit.[verkkoaineisto] [viitattu 2018-3.3]. DIGMA . Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5G0jJ/FES01.pdf>

ELEMENTTIMENETELMÄN PERUSTEET SESSIO 03: FEM-ohjelman analyysityypit [verkkoaineisto] [viitattu 2018-4.3]. DIGMA . Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5GiAj/FES03.pdf>

Elementtisuunnittelu.fi [verkkoaineisto] [viitattu 2018-4.3]. 2018. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi>

HIETIKKO, Esa 2004. Palkki - Lujuslaskennan perusteet. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.

LAMPIMÄKI, Jarmo 2014. Mastopilarikehän FEM-laskenta [opinnäytetyö] [viitattu 2018-4.3]. Kuopio: Savonia ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/72650>

LESKELÄ, Matti v. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Math.NET Numerics [laajennusosa]. Saatavissa: <https://numerics.mathdotnet.com/>

Popular high-performance JSON framework for .NET [laajennusosa]. Saatavissa: <https://www.newtonsoft.com/json>

PuuInfo [verkkoaineisto] [viitattu 2018-3.3]. 2018. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/>

Puurakenteiden suunnittelu Lyhennetty suunnitteluohje Kolmas painos. Elokuu 2011. PUUINFO OY

Ril 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Ril 173-1997 Teräsrakenteet rajatilamitoitusohjeet 1996 Mitoitustaulukot ja käyrästöt. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

SALMI, Tapio 2014. Statiikka. Tampere: PRESSUS Oy.

SALMI, Tapio ja PAJUNEN, Sami 2014. Lujuusoppi. Tampere: PRESSUS Oy.

SALMI, Tapio ja KUULA, Kai 2017. Rakenteiden mekaniikka. Tampere: PRESSUS Oy.

Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3 -oppikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry

Kesonen-Kumpumäki. Tennishalliprojekti 2017 [valokuva]. Sijainti: Kuopio.

THELANDERSSON, Sven 1984. Konstruktionsberäkningar med dator. 2. painos. Lund: Studentlitteratur.

LIITE 1: A-PALKKIRAKENNE GLT 360X115



Opinnäytetyö 12.3.2018

Projektitiedot:

Suunnittelija:	Jaakko Arokoski	Ammatti/positio:	Opiskelija
Yritys:	Savonia	Asiakas / kohde:	Opinnäytetyö testi
Muoinformaatio: A-palkkirakenteen esimerkkilaskelma opinnäytetyöhön.			

Yleistä:

Seuraamusluokka:	CC2	Paloluokka:	R60
Kfi:		1	

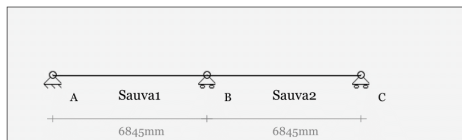
Materiaali:

Materiaali:	GL30c	Hiihtijalanjälki:	-33,55kg
Osavarmuusluku:	1,2	f_{c0k} :	24,5N/mm ²
E0 mean:	13000MPa	f_{c90ku} :	2,5N/mm ²
E0 05:	10800MPa	f_{mk} :	30N/mm ²
E90 mean:	300MPa	f_{vk} :	3,5N/mm ²
Gmean:	540MPa	f_{t0k} :	19,5N/mm ²
ρ_k :	390kg/m ³	f_{t90k} :	0,5N/mm ²
ρ_{mean} :	430kg/m ³	f_{trk} :	1,2N/mm ²

Profilii:

Profilii:	GLT 360x115	ix:	10,4cm
Korkeus:	360mm	iy:	3,3cm
Leveys:	115mm	Web:	2484cm ³
A:	414cm ²	Wely:	793,5cm ³
ix:	44712cm ⁴	Wply:	4562,6cm ⁴
Iy:		4562,6cm ⁴	

Rakenne malli:

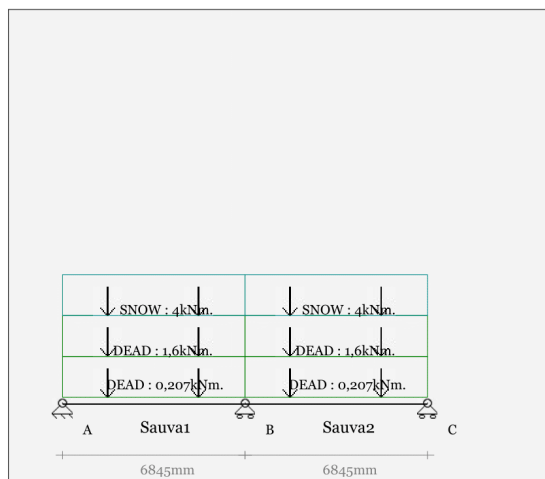


Kokonaispituus:	13690mm
Kulma:	0

Sauvat:

Nimi	Pituus
Sauva1	6845mm
Sauva2	6845mm

Kuormitustapaukset:



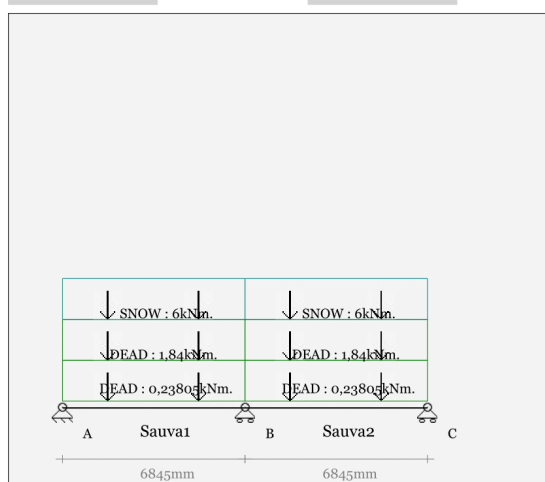
Kuormitustapaus: KY2

Neliökuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m2 ominais	Leveys	Kerroin	kN/m2 murto
Sauva1	DEAD	Y	0,8kN/m2	2m	1	1,6kN/m2
Sauva1	SNOW	Y	2kN/m2	2m	1	4kN/m2
Sauva2	DEAD	Y	0,8kN/m2	2m	1	1,6kN/m2
Sauva2	SNOW	Y	2kN/m2	2m	1	4kN/m2

Viivakuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ominais	Kerroin	kN/m murto
Sauva1	DEAD	Y	0,207kN/m	1	0,207kN/m
Sauva2	DEAD	Y	0,207kN/m	1	0,207kN/m



Kuormitustapaus: KY1

Neliökuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m2 ominais	Leveys	Kerroin	kN/m2 murto
Sauva1	DEAD	Y	0,8kN/m2	2m	1,15	1,84kN/m2
Sauva1	SNOW	Y	2kN/m2	2m	1,5	6kN/m2
Sauva2	DEAD	Y	0,8kN/m2	2m	1,15	1,84kN/m2

Sauva2	SNOW	Y	2kN/m2	2m	1,5	6kN/m2
--------	------	---	--------	----	-----	--------

Viivakuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ominais	Kerroin	kN/m murto
Sauva1	DEAD	Y	0,207kN/m	1,15	0,23805kN/m
Sauva2	DEAD	Y	0,207kN/m	1,15	0,23805kN/m

Tukireaktiot

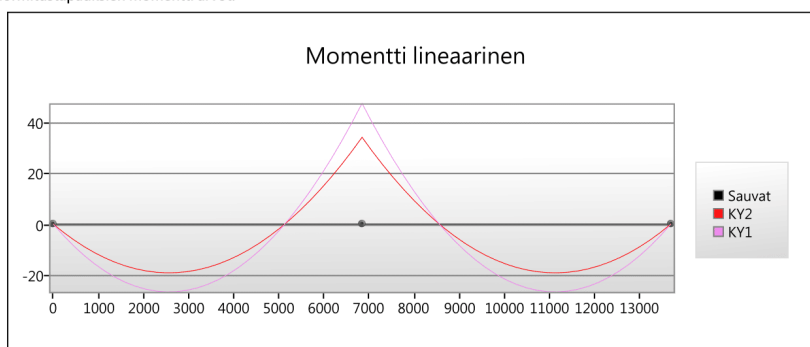
KY2:

Tukireaktiot	X	Y	M
A	0kN	14,91kN	0kNm
B	0kN	49,69kN	0kNm
C	0kN	14,91kN	0kNm

KY1:

Tukireaktiot	X	Y	M
A	0kN	20,74kN	0kNm
B	0kN	69,12kN	0kNm
C	0kN	20,74kN	0kNm

Kuormitustapauksien momentti arvot:



KY2: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -34,01kNm kohdassa x: 6845mm.

Max: 19,121kNm kohdassa x: 2510mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -34,01kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 19,121kNm kohdassa x: 4335mm

KY1: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -47,311kNm kohdassa x: 6845mm.

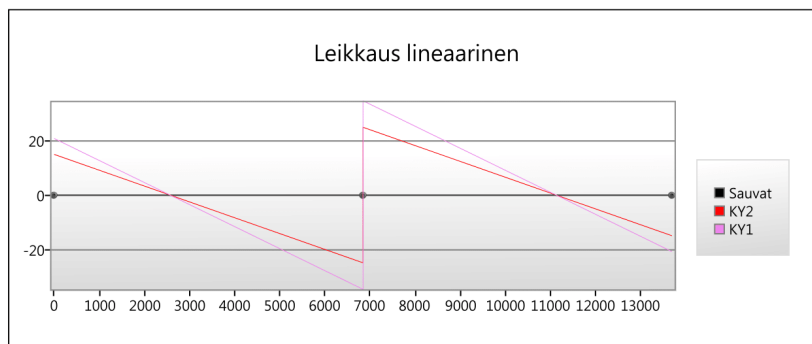
Max: 26,599kNm kohdassa x: 2510mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -47,311kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 26,599kNm kohdassa x: 4335mm

Kuormitustapaus leikkaus arvot:

**KY2: sauvojen leikkausvoimat**

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: -14,906kN kohdassa x: 0mm.

Max: 24,843kN kohdassa x: 6845mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -24,843kN kohdassa x: 0mm.

Max: 14,906kN kohdassa x: 6845mm

KY1: sauvojen leikkausvoimat

Sauva1 leikkausvoimat:

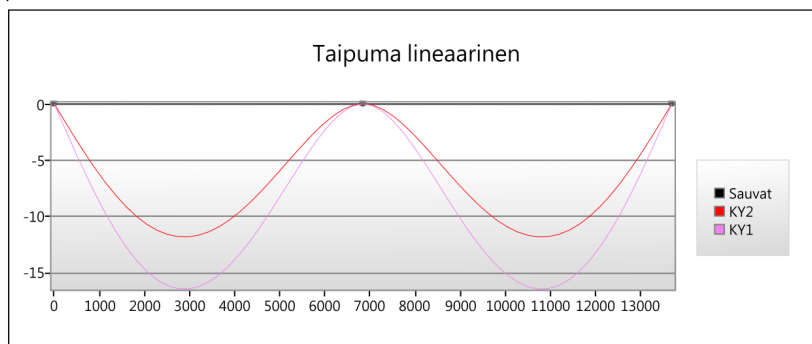
Min: -20,735kN kohdassa x: 0mm.

Max: 34,559kN kohdassa x: 6845mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -34,559kN kohdassa x: 0mm.

Max: 20,735kN kohdassa x: 6845mm

Taipuma arvot:**KY2: sauvojen taipuma-arvot**

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -11,868mm kohdassa x: 2966mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -11,868mm kohdassa x: 3879mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

KY1: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -16,51mm kohdassa x: 2966mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Sauva2 taipumat:

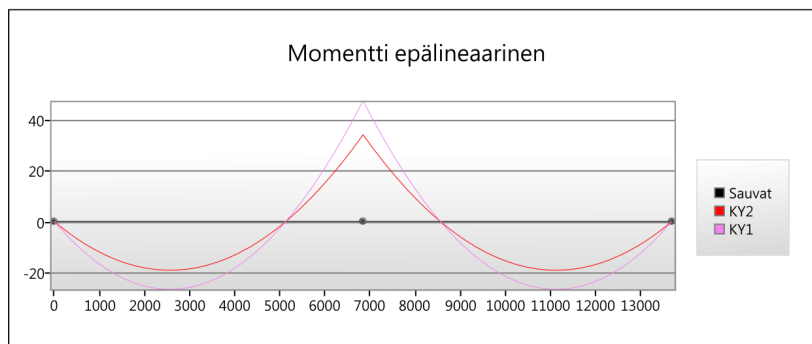
Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -16,51mm kohdassa x: 3879mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Epälineaariset momentti arvot:

**KY2: sauvojen momentit**

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -34,01kNm kohdassa x: 6845mm.

Max: 19,121kNm kohdassa x: 2510mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -34,01kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 19,121kNm kohdassa x: 4335mm

KY1: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

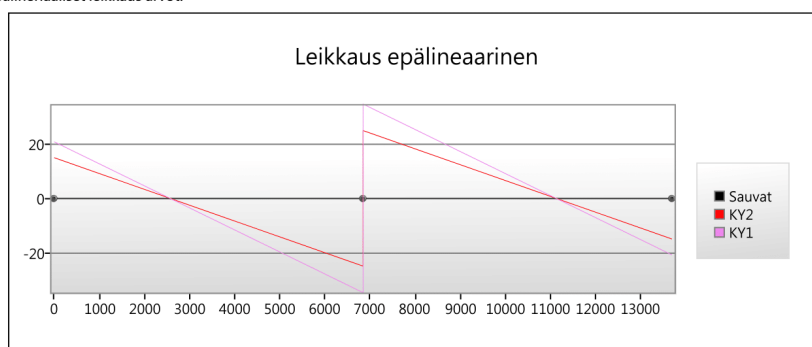
Min: -47,31kNm kohdassa x: 6845mm.

Max: 26,599kNm kohdassa x: 2510mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -47,31kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 26,599kNm kohdassa x: 4335mm

Epälineariaaliset leikkaus arvot:**KY2 sauvojen leikkausvoimat:**

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: -14,91kN kohdassa x: 0mm.

Max: 24,84kN kohdassa x: 6845mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -24,84kN kohdassa x: 0mm.

Max: 14,91kN kohdassa x: 6845mm

KY1 sauvojen leikkausvoimat:

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: -20,74kN kohdassa x: 0mm.

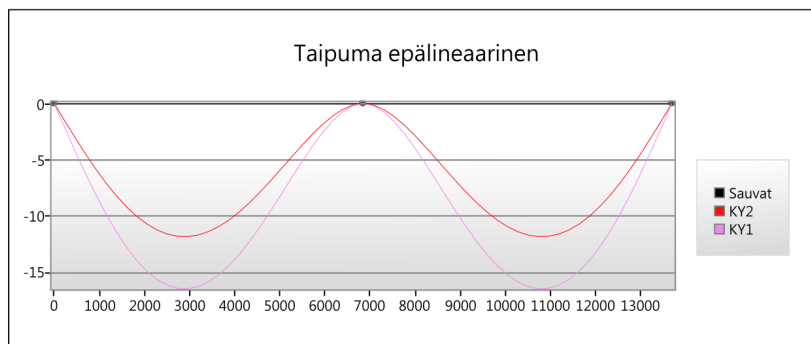
Max: 34,56kN kohdassa x: 6845mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -34,56kN kohdassa x: 0mm.

Max: 20,74kN kohdassa x: 6845mm

Epälineariaaliset taipuma arvot:

**KY2: sauvojen taipuma-arvot**

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -11,87mm kohdassa x: 2966mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -11,87mm kohdassa x: 3879mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

KY1: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -16,51mm kohdassa x: 2966mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Min y siirtymä: -16,51mm kohdassa x: 3879mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 6845mm

Mitoitus**Sauva1 kuormitustapa: KY2:**

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Kmod:	0,6	kdef:	0,6
L,lateral:	6845mm	Lc, y:	1mm
Kc 90:	1,5	Lc, z:	1mm
kcrit:	0,915		

Taivutuslujuus y-suunnassa:

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 15,786\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$f_{m,k} = 30\text{N/mm}^2 \quad \text{Taivutus ominaislujuus}$$

$$k_{mod} = 0,6 \quad \text{Kosteuden muunnoskerroin}$$

$$\gamma_{mod} = 1,2 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$K_h = 1,052 \quad \text{Taivutuslujuuden ominaisarvoa suurennus kerroin}$$

13,69 / 15,79N/mm² Käyttöaste: 86,7%**Leikkauslujuus:**

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 1,75\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$f_{v,k} = 3,5\text{N/mm}^2 \quad \text{Ominais leikkauslujuus}$$

$$k_{mod} = 0,6 \quad \text{Kosteuden muunnoskerroin}$$

$$\gamma_{mod} = 1,2 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$0,6 / 1,75\text{N/mm}^2 \quad \text{Käytöaste: 34,3\%}$$

Kiepahduslujuus:

$$f_{m,y,d} k_{crit} = 14,446\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$k_{crit} = 0,915 \quad \text{Kiepahduslujuuden pienennyskerroin}$$

$$f_{m,y,d} = 15,786\text{N/mm}^2 \quad \text{Taivutuslujuus y-suunnassa}$$

$$13,69 / 14,45\text{N/mm}^2 \quad \text{Käytöaste: 94,8\%}$$

Tukipainekestävyys-1:

$$f_{c,90,d} k_c = 2,325\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$k_c = 1,86 \quad \text{Tukipaine kerroin}$$

$$f_{c,90,k} = 1,25\text{N/mm}^2 \quad \text{Tukipainelujuus}$$

$$1,04 / 2,32\text{N/mm}^2 \quad \text{Käytöaste: 44,6\%}$$

Tukipainekestävyys-2:

$$f_{c,90,d} k_c = 2,1\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$k_c = 1,68 \quad \text{Tukipaine kerroin}$$

$$f_{c,90,k} = 1,25\text{N/mm}^2 \quad \text{Tukipainelujuus}$$

$$0,86 / 2,1\text{N/mm}^2 \quad \text{Käytöaste: 37,2\%}$$

Taipuma y-suunnassa:

$$\frac{w_x}{w_{x,max}} \leq 1 = 35\text{mm}$$

Missä:

$$11,87 / 35\text{mm} \quad \text{Käytöaste: 33,9\%}$$

Sauva2 kuormitustapa: KY2:

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Kmod:	0,6	kdef:	0,6
L,lateral:	6845mm	Lc, y:	1mm
Kc 90:	1,5	Lc, z:	1mm
kcrit:	0,915		

Taivutuslujuus y-suunnassa:

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 15,786\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$f_{m,k} = 30\text{N/mm}^2 \quad \text{Taivutus ominaislujuus}$$

$$k_{mod} = 0,6 \quad \text{Kosteuden muunnoskerroin}$$

$$\gamma_{mod} = 1,2 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$K_h = 1,052 \quad \text{Taivutuslujuuden ominaisarvoa suurennus kerroin}$$

$$13,69 / 15,79\text{N/mm}^2 \quad \text{Käytöaste: 86,7\%}$$

Leikkauslujuus:

$$f_{v,d} = \frac{f_{c,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 1,75\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$f_{v,k} = 3,5\text{N/mm}^2 \quad \text{Ominais leikkauslujuus}$$

$$k_{mod} = 0,6 \quad \text{Kosteuden muunnoskerroin}$$

$$\gamma_{mod} = 1,2 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

0,6 / 1,75N/mm2 Käytöaste: 34,3%

Kiepahduslujuus:

$$f_{m,y,d} k_{crit} = 14,446\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$k_{crit} = 0,915 \quad \text{Kiepahduslujuuden pienennyskerroin}$$

$$f_{m,y,d} = 15,786\text{N/mm}^2 \quad \text{Taivutuslujuus y-suunnassa}$$

13,69 / 14,45N/mm2 Käytöaste: 94,8%

Tukipainekestävyys-1:

$$f_{c,90,d} k_c = 2,1\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$k_c = 1,68 \quad \text{Tukipainekerroin}$$

$$f_{c,90,k} = 1,25\text{N/mm}^2 \quad \text{Tukipainelujuus}$$

0,86 / 2,1N/mm2 Käytöaste: 41,1%

Tukipainekestävyys-2:

$$f_{c,90,d} k_c = 2,325\text{N/mm}^2$$

Missä:

$$k_c = 1,86 \quad \text{Tukipainekerroin}$$

$$f_{c,90,k} = 1,25\text{N/mm}^2 \quad \text{Tukipainelujuus}$$

1,04 / 2,32N/mm2 Käytöaste: 49,4%

Taivuma y-suunnassa:

$$\frac{w_x}{w_{x,max}} \leq 1 = 35\text{mm}$$

Missä:

11,87 / 35mm Käytöaste: 33,9%

Sauva1 kuormitustapa: KY1:

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Kmod:	0,8	kdef:	0,6
L,lateral:	6845mm	Lc, y:	1mm
Kc 90:	1,5	Lc, z:	1mm
kcrit:	0,915		

Taivutuslujuus y-suunnassa:

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 21,048\text{N/mm}^2$$

Missä:

$f_{m,k}$	=	30N/mm ²	Taivutus ominaislujuus
k_{mod}	=	0,8	Kosteuden muunnoskerroin
γ_{mod}	=	1,2	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
Kh	=	1,052	Taivutuslujuuden ominaisarvoa suurennuskerroin

19,05 / 21,05N/mm² Käyttöaste: 90,5%

Leikkauslujuus:

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 2,333\text{N/mm}^2$$

Missä:

$f_{v,k}$	=	3,5N/mm ²	Ominais leikkauslujuus
k_{mod}	=	0,8	Kosteuden muunnoskerroin
γ_{mod}	=	1,2	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku

0,83 / 2,33N/mm² Käyttöaste: 35,8%

Kiepahduslujuus:

$$f_{m,y,d} k_{crit} = 19,261\text{N/mm}^2$$

Missä:

k_{crit}	=	0,915	Kiepahduslujuuden pienennyskerroin
$f_{m,y,d}$	=	21,048N/mm ²	Taivutuslujuus y-suunnassa

19,05 / 19,26N/mm² Käyttöaste: 98,9%

Tukipainekestävyys-1:

$$f_{c,90,d} k_c = 3,1\text{N/mm}^2$$

Missä:

k_c	=	1,86	Tukipaine kerroin
$f_{c,90,k}$	=	1,667N/mm ²	Tukipainelujuus

1,44 / 3,1N/mm² Käyttöaste: 46,5%

Tukipainekestävyys-2:

$$f_{c,90,d} k_c = 2,8\text{N/mm}^2$$

Missä:

k_c	=	1,68	Tukipaine kerroin
$f_{c,90,k}$	=	1,667N/mm ²	Tukipainelujuus

1,2 / 2,8N/mm² Käyttöaste: 38,8%

Sauva2 kuormitustapa: KY1:

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Kmod:	0,8	kdef:	0,6
L _{lateral} :	6845mm	L _{c, y} :	1mm
Kc 90:	1,5	L _{c, z} :	1mm
kcrit:	0,915		

Taivutuslujuus y-suunnassa:

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 21,048\text{N/mm}^2$$

Missä:

$f_{m,k}$	=	30N/mm ²	Taivutus ominaislujuus
k_{mod}	=	0,8	Kosteuden muunnoskerroin
γ_{mod}	=	1,2	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
Kh	=	1,052	Taivutuslujuuden ominaisarvoa suurennuskerroin

19,05 / 21,05N/mm² Käyttöaste: 90,5%

Leikkauslujuus:

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,d} k_{mod}}{\gamma_{mod}} = 2,333\text{N/mm}^2$$

Missä:

$f_{v,k}$	=	3,5N/mm ²	Ominais leikkauslujuus
k_{mod}	=	0,8	Kosteuden muunnoskerroin
γ_{mod}	=	1,2	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku

0,83 / 2,33N/mm² Käyttöaste: 35,8%

Kiepahduslujuus:

$$f_{m,y,d} k_{crit} = 19,261\text{N/mm}^2$$

Missä:

k_{crit}	=	0,915	Kiepahduslujuuden pienennyskerroin
$f_{m,y,d}$	=	21,048N/mm ²	Taivutuslujuus y-suunnassa

19,05 / 19,26N/mm² Käyttöaste: 98,9%

Tukipainekestävyys-1:

$$f_{c,90,d} k_c = 2,8\text{N/mm}^2$$

Missä:

k_c	=	1,68	Tukipainekerroin
$f_{c,90,k}$	=	1,667N/mm ²	Tukipainelujuus

1,2 / 2,8N/mm² Käyttöaste: 42,9%

Tukipainekestävyys-2:

$$f_{c,90,d} k_c = 3,1\text{N/mm}^2$$

Missä:

k_c	=	1,86	Tukipainekerroin
$f_{c,90,k}$	=	1,667N/mm ²	Tukipainelujuus

1,44 / 3,1N/mm² Käyttöaste: 51,5%

Kuormitustapauksen KY2 mitoittava tekijä oli: Kiepahduslujuus (14,4N/mm²).

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 94,8%.


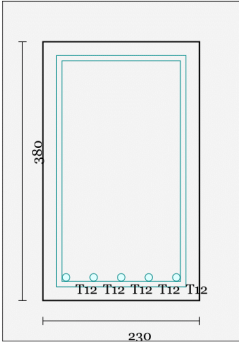
Kuormitustapauksen KY1 mitoittava tekijä oli: Kiepahduslujuus (19,3N/mm²).

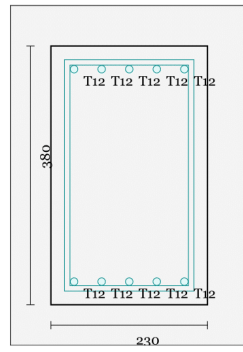
Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 98,9%.

Kokonais laskutoimituksen mitoittava tekijä oli: Kiepahduslujuus (19,3N/mm²), KY1 kuormitustapauksessa.

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 98,9%.

LIITE 2: B-PALKKIRAKENNE TBP:380X230 AP:5T12

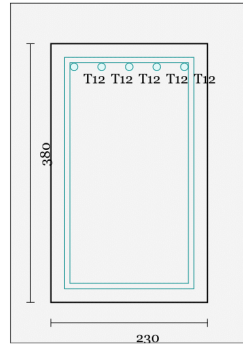
Opinäytetyö		14.3.2018			
Projektintiedot:					
Suunnittelija:	Jaakko Arokoski	Ammatti/positio:	Opiskelija		
Yritys:	Savonia	Asiakas / kohde:	B-palkkirakenne		
Muuiinformaatio: B-palkki rakenteen esimerkki laskelma.					
Materiaali:					
Materiaali:	C30/37	Hiihijalanjälki:	26,44kg		
Osavarmuusluku:	1,5	fck.cube:	37N/mm ²		
Ed:	27364MPA	fck:	30N/mm ²		
Ecm:	32837MPA	fctm:	2,9N/mm ²		
ec1:	2‰	fctk 005:	2,03N/mm ²		
ecu1:	3,5‰	ec2:	2‰		
n:	2‰	ecu2:	3,5‰		
ec3:	1,75‰	ecu3:	3,5‰		
Betoni rasisitusvaatimukset:					
Raekoko:	16mm	W/C:	0,6		
Cnom:	20mm	Toteutusluokka:	TWO		
Cdev:	10mm	Käyttöikä:	V50		
Yc:	1,5	Käyttöluokka:	ONE		
Ys:	1,15	Teräs:	B500A		
XC:	X0	XF:	Ei määriteltä		
XD/XS:	Ei määriteltä	XA:	Ei määriteltä		
Profiili:					
Profiili:	380x230 AP:5T12,	ix:	11cm		
Korkeus:	380mm	iy:	6,6cm		
Leveys:	230mm	Welx:	5535333,3cm ³		
A:	874cm ²	Wely:	3350333,3cm ³		
Ix:	105171,3cm ⁴	Wply:	38528,8cm ⁴		
Iy:					
					
As: 565mm ²		cnom: 20	d: 340	dc: 380	
AP: 5T12 k40		As: 565mm ²	P: 0,00722		



As: 1130mm² cnom: 20 d: 340 dc: 40

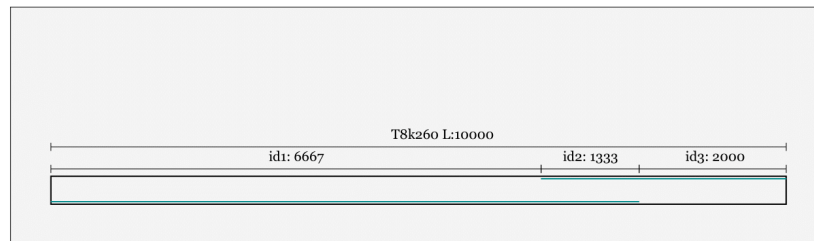
AP: ST12 k40 As: 565mm² P: 0,00722

YP: ST12 k40 As: 565mm² P: 0,00722



As: 565mm² cnom: 20 d: 340 dc: 40

YP: ST12 k40 As: 565mm² P: 0,00722



Rakenne malli:

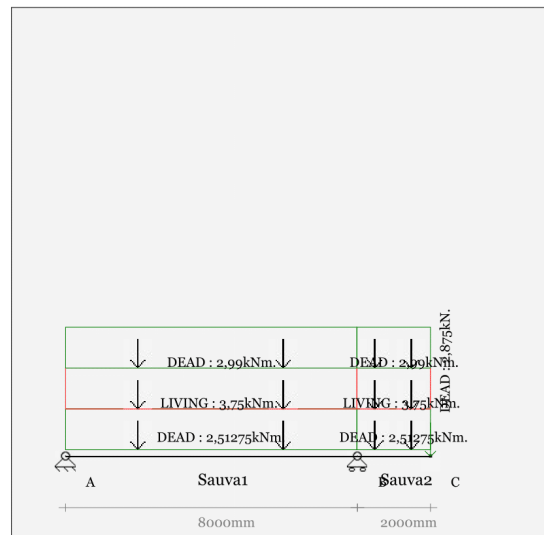


Kokonaispituus: 10000mm
Kulma: 0

Sauvat:

Nimi	Pituus
Sauva1	8000mm
Sauva2	2000mm

Kuormitustapaukset:



Kuormitustapaus: KY1

Neliökuormat:

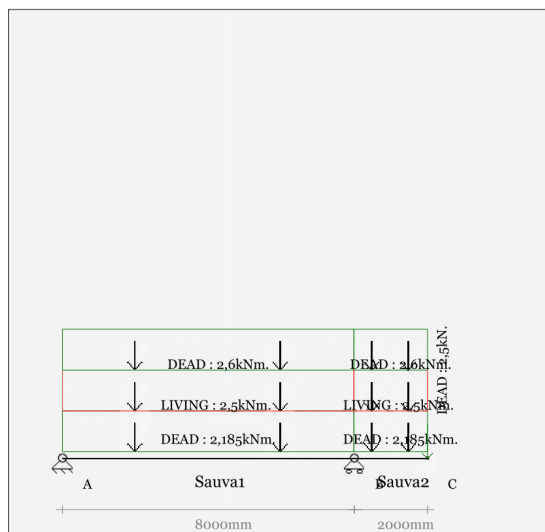
Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m2 ominais	Leveys	Kerroin	kN/m2 murto
Sauva1	LIVING	Y	2,5kN/m2	1m	1,5	3,75kN/m2
Sauva2	LIVING	Y	2,5kN/m2	1m	1,5	3,75kN/m2
Sauva1	DEAD	Y	2,6kN/m2	1m	1,15	2,99kN/m2
Sauva2	DEAD	Y	2,6kN/m2	1m	1,15	2,99kN/m2

Viivakuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ominais	Kerroin	kN/m murto
Sauva1	DEAD	Y	2,185kN/m	1,15	2,51275kN/m
Sauva2	DEAD	Y	2,185kN/m	1,15	2,51275kN/m

Vapausaste kuormat:

Vapausasteelle	Tyyppi	Suunta	kN ominais	Kerroin	kN murto
C	DEAD	Y	2,5kN	1,15	2,875kN



Kuormitustapaus: KY2

Neliökuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m2 ominais	Leveys	Kerroin	kN/m2 murto
Sauva1	LIVING	Y	2,5kN/m2	1m	1	2,5kN/m2
Sauva2	LIVING	Y	2,5kN/m2	1m	1	2,5kN/m2
Sauva1	DEAD	Y	2,6kN/m2	1m	1	2,6kN/m2
Sauva2	DEAD	Y	2,6kN/m2	1m	1	2,6kN/m2

Viivakuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ominais	Kerroin	kN/m murto
Sauva1	DEAD	Y	2,185kN/m	1	2,185kN/m
Sauva2	DEAD	Y	2,185kN/m	1	2,185kN/m

Vapausasteuormat:

Vapausasteelle	Tyyppi	Suunta	kN ominais	Kerroin	kN murto
C	DEAD	Y	2,5kN	1	2,5kN

Tukireaktiot

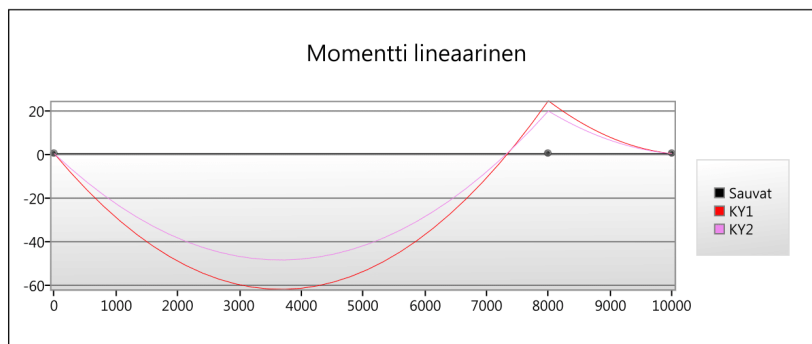
KY1:

Tukireaktiot	X	Y	M
A	0kN	33,98kN	0kNm
B	0kN	61,42kN	0kNm

KY2:

Tukireaktiot	X	Y	M
A	0kN	26,69kN	0kNm
B	0kN	48,66kN	0kNm

Kuormitustapauksien momentti arvot:

**KY1: sauvojen momentit**

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -24,255kNm kohdassa x: 8000mm.

Max: 62,374kNm kohdassa x: 3733mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -24,255kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 0kNm kohdassa x: 2000mm

KY2: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

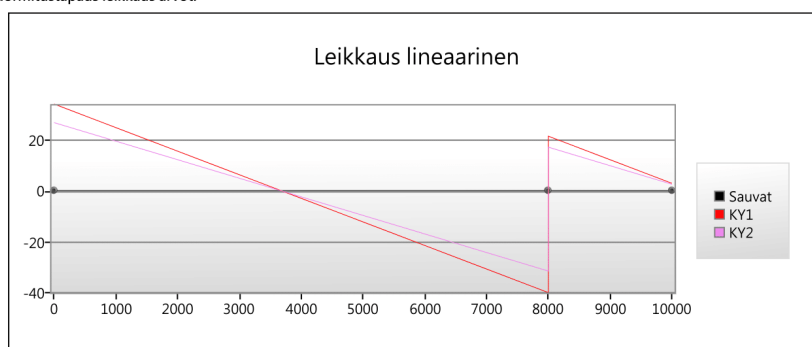
Min: -19,57kNm kohdassa x: 8000mm.

Max: 48,888kNm kohdassa x: 3733mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -19,57kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 0kNm kohdassa x: 2000mm

Kuormitustapaus leikkaus arvot:**KY1: sauvojen leikkausvoimat**

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: -33,979kN kohdassa x: 0mm.

Max: 40,043kN kohdassa x: 8000mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -21,38kN kohdassa x: 0mm.

Max: 0kN kohdassa x: 0mm

KY2: sauvojen leikkausvoimat

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: -26,694kN kohdassa x: 0mm.

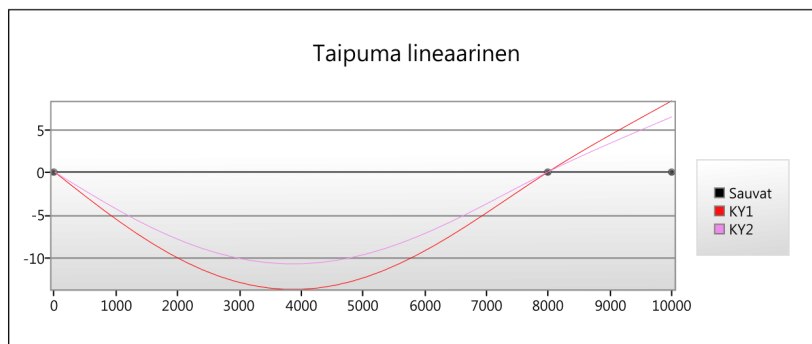
Max: 31,586kN kohdassa x: 8000mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -17,07kN kohdassa x: 0mm.

Max: 0kN kohdassa x: 0mm

Taipuma arvot:

**KY1: sauvojen taipuma-arvot**

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm.

Min y siirtymä: -13,776mm kohdassa x: 4000mm.

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 2000mm.

Min y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 2000mm

Max y siirtymä: 8,313mm kohdassa x: 2000mm

KY2: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm.

Min y siirtymä: -10,781mm kohdassa x: 4000mm.

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 2000mm.

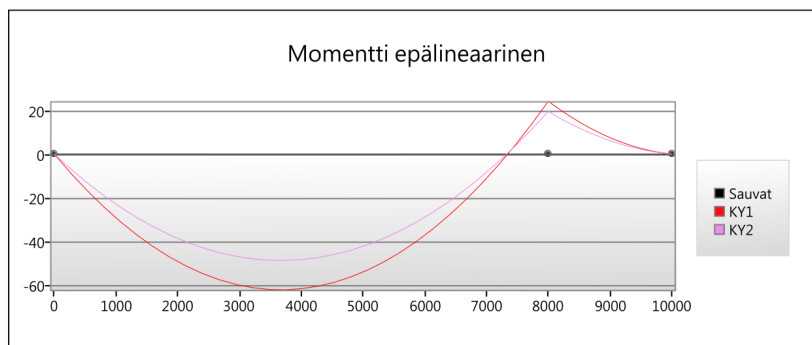
Min y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 2000mm

Max y siirtymä: 6,436mm kohdassa x: 2000mm

Epälineaariset momentti arvot:**KY1: sauvojen momentit**

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -24,26kNm kohdassa x: 8000mm.

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -24,26kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 62,373kNm kohdassa x: 3733mm

Max: 0kNm kohdassa x: 2000mm

KY2: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -19,57kNm kohdassa x: 8000mm.

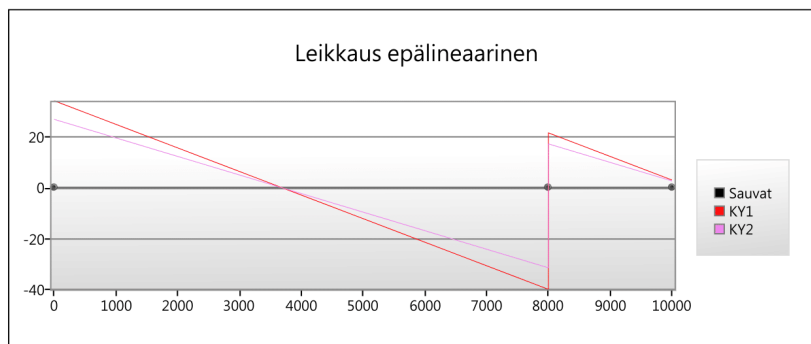
Sauva2 momenttivoimat:

Min: -19,57kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 48,888kNm kohdassa x: 3733mm

Max: 0kNm kohdassa x: 2000mm

Epälineaaliset leikkaus arvot:

**KY1 sauvojen leikkausvoimat:**

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: -33,98kN kohdassa x: 0mm.

Max: 40,04kN kohdassa x: 8000mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -21,38kN kohdassa x: 0mm.

Max: 0kN kohdassa x: 0mm

KY2 sauvojen leikkausvoimat:

Sauva1 leikkausvoimat:

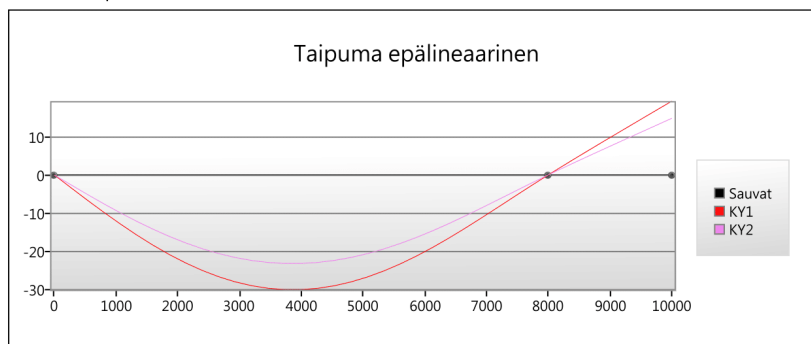
Min: -26,69kN kohdassa x: 0mm.

Max: 31,59kN kohdassa x: 8000mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -17,07kN kohdassa x: 0mm.

Max: 0kN kohdassa x: 0mm

Epälineaariset taipuma arvot:**KY1: sauvojen taipuma-arvot**

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: -0,25mm kohdassa x: 8000mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Min y siirtymä: -30,04mm kohdassa x: 3733mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: -0,33mm kohdassa x: 2000mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Min y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm.

Max y siirtymä: 19,32mm kohdassa x: 2000mm

KY2: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: -0,15mm kohdassa x: 8000mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Min y siirtymä: -23,19mm kohdassa x: 3733mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 8000mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: -0,2mm kohdassa x: 2000mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Min y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm.

Max y siirtymä: 14,82mm kohdassa x: 2000mm

Mitoitus**Sauva1 kuormitustapa: KY1:**

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Taivutuskestävyys:

$$M_{p,Rd} = \mu \cdot b d^2 \eta f_{cd} = 68,633 \text{ kNm}$$

Missä:

b	=	230mm	Poikkipinnan leveys
d	=	340,2mm	Poikkipinnan hyötykorkeus
η	=	1	Jännitys jakauma- η
μ	=	0,152	Suhteellinen momentti
f_{cd}	=	17N/mm ²	Betonin mitoituslujuus

62,37 / 68,63kNm Käyttöaste: 90,9%

Leikkausraudoituksen kestävyys:

$$V_{Rd} = f_{ctd} \frac{A_{sw}}{s} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin(\alpha) = 128,011 \text{ kN}$$

Missä:

s	=	260mm	Leikkausraudoituksen jako
A_{sw}	=	100mm ²	Leikkausraudoituksen pinta-ala
f_{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

40,04 / 128,01kN Käyttöaste: 31,3%

Puristusmurtokestävyys:

$$V_{Rd,comp} = v f_{ctd} b_w \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} = 128,011 \text{ kN}$$

Missä:

v	=	0,6	Leikkausraudoituksen jako
b_w	=	230mm	Uuman leveys
f_{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

33,98 / 128,01kN Käyttöaste: 26,5%

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = 128,011 \text{ kN}$$

Missä:

$$V_{Rd,comp} = v f_{ctd} b_w \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} = 128,011 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = f_{ctd} \frac{A_{sw}}{s} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin(\alpha) = 128,011 \text{ kN}$$

40,04 / 128,01kN Käyttöaste: 31,3%

Ankkurointi-1:

$$l_b = l_{b,rqd} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 = 120 \text{ mm}$$

Missä:

$$0.3 \cdot l_b, rqb = 22,247 \text{ mm}$$

Ankkurointi vähimmäispituus

10φ	=	120mm	Ankkurointi vähimmäispituus
100mm	=	100mm	Ankkurointi vähimmäispituus

Ankkurointi-2:

$$l_b = l_{b,rqd} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 = 120\text{mm}$$

Missä:

0.3 * L _{b,rqb}	=	26,218mm	Ankkurointi vähimmäispituus
10φ	=	120mm	Ankkurointi vähimmäispituus
100mm	=	100mm	Ankkurointi vähimmäispituus

Sauva2 kuormitustapa: KY1:

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Taivutuskestävyys:

$$M_{y,Rd} = \mu b d^2 \eta f_{cd} = 68,633\text{kNm}$$

Missä:

b	=	230mm	Poikkipinnan leveys
d	=	340,2mm	Poikkipinnan hyötykorkeus
η	=	1	Jännitys jakauma-η
μ	=	0,152	Suhteellinen momentti
F _{cd}	=	17N/mm ²	Betonin mitoituslujuus

24,26 / 68,63kNm Käyttöaste: 35,3%

Leikkausraudoituksen kestävyys:

$$V_{Rd} = f_{ctd} \frac{A_{sw}}{s} (z \cos \theta + \cot \theta) \sin \alpha = 128,011\text{kN}$$

Missä:

s	=	260mm	Leikkausraudoituksen jako
A _{sw}	=	100mm ²	Leikkausraudoituksen pinta-ala
F _{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

21,38 / 128,01kN Käyttöaste: 16,7%

Puristumurtokestävyys:

$$V_{Rd,max} = v f_{ctd} b_w z \cos \theta = 128,011\text{kN}$$

Missä:

v	=	0,6	Leikkausraudoituksen jako
b _w	=	230mm	Uuman leveys
F _{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus

α	=	90°	Hakojen kaltevuus
21,38 / 128,01kN		Käyttöaste: 16,7%	
Leikkauskestävyys:			
$V_{pl,Rd}$	=	128,011kN	
Missä:			
$V_{Rd,max} = v \cdot f_{ctd} b_w \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot\theta \cot\alpha}$	=	128,011kN	Puristusmurtokestävyys
$V_{Rd,s} = f_{ctd} \frac{A_{sw}}{s} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin(\alpha)$	=	128,011kN	Leikkausraudoituksen kestävyys
21,38 / 128,01kN		Käyttöaste: 16,7%	
Ankkurointi-1:			
$l_b = l_{b,rqd} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5$	=	120mm	
Missä:			
$0.3 \cdot l_b, rqb$	=	13,999mm	Ankkurointi vähimmäispituus
10φ	=	120mm	Ankkurointi vähimmäispituus
100mm	=	100mm	Ankkurointi vähimmäispituus

Sauva1 kuormitustapa: KY2:

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Taivutuskestävyys:

$M_{y,Rd} = \mu \cdot b d^2 \eta f_{cd}$	=	68,633kNm	
Missä:			
b	=	230mm	Poikkipinnan leveys
d	=	340,2mm	Poikkipinnan hyötykorkeus
η	=	1	Jännitys jakauma- η
μ	=	0,152	Suhteellinen momentti
f_{cd}	=	17N/mm ²	Betonin mitoituslujuus
48,89 / 68,63kNm		Käyttöaste: 71,2%	
Leikkausraudoituksen kestävyys:			

$V_{Rd,s} = f_{ctd} \frac{A_{sw}}{s} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin(\alpha)$	=	128,011kN	
Missä:			
s	=	260mm	Leikkausraudoituksen jako
A_{sw}	=	100mm ²	Leikkausraudoituksen pinta-ala
f_{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

31,59 / 128,01kN Käyttöaste: 24,7%

Puristusmurtokestävyys:

$V_{Rd,max} = v \cdot f_{ctd} b_w \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot\theta \cot\alpha}$	=	128,011kN	
--	---	-----------	--

Missä:			
v	=	0,6	Leikkausraudoituksen jako
b_w	=	230mm	Uuman leveys
F_{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

26,69 / 128,01kN Käytöaste: 20,9%

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = 128,011kN$$

Missä:

$$V_{pl,Rd} = v \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot \theta \cot \alpha} = 128,011kN \quad \text{Puristusruttokestävyys}$$

$$V_{pl,Rd} = f_{ctd} \cdot b_w \cdot z \cdot \cot \theta \cdot \sin(\alpha) = 128,011kN \quad \text{Leikkausraudoituksen kestävyys}$$

31,59 / 128,01kN Käytöaste: 24,7%

Ankkurointi-1:

$$l_b = l_{b,rqb} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 = 120mm$$

Missä:

$$0,3 \cdot l_{b,rqb} = 17,478mm \quad \text{Ankkurointi vähimmäispituus}$$

$$10\phi = 120mm \quad \text{Ankkurointi vähimmäispituus}$$

$$100mm = 100mm \quad \text{Ankkurointi vähimmäispituus}$$

Ankkurointi-2:

$$l_b = l_{b,rqb} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 = 120mm$$

Missä:

$$0,3 \cdot l_{b,rqb} = 20,681mm \quad \text{Ankkurointi vähimmäispituus}$$

$$10\phi = 120mm \quad \text{Ankkurointi vähimmäispituus}$$

$$100mm = 100mm \quad \text{Ankkurointi vähimmäispituus}$$

Taipuma y-suunnassa:

$$\frac{w_x}{w_{x,max}} \leq 1 = 20mm$$

Missä:

10,78 / 20mm Käytöaste: 53,9%

Halkeamaleveys:

$$w_k = S_{r,max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = 0,4mm$$

Missä:

$$S_{r,max} = 176,296mm \quad \text{Halkeamavälin maksimiarvo}$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = 0,001 \quad \text{Venymäero}$$

0,4 / 0,4mm Käytöaste: 52,8%

Sauva2 kuormitustapa: KY2:

Sauvaan ei kohdistus vaaka suuntaisia voimia, joten mitoitetaan palkkina.

Taivutuskestävyys:

$$M_{p,Rd} = \mu \cdot b d^2 \eta f_{ctd} = 68,633kNm$$

Missä:

b	=	230mm	Poikkipinnan leveys
d	=	340,2mm	Poikkipinnan hyötykorkeus
η	=	1	Jännitys jakauma- η
μ	=	0,152	Suhteellinen momentti
Fcd	=	17N/mm ²	Betonin mitoituslujuus

19,57 / 68,63kNm Käyttöaste: 28,5%

Leikkausraudoituksen kestävyys:

$$V_{Rd} = f_{ctd} \frac{A_{sw}}{s} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha = 128,011 \text{ kN}$$

Missä:

s	=	260mm	Leikkausraudoituksen jako
A _{sw}	=	100mm ²	Leikkausraudoituksen pinta-ala
F _{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

17,07 / 128,01kN Käyttöaste: 13,3%

Puristusmurtokestävyys:

$$V_{Rd,comp} = v f_{ctd} b_w \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} = 128,011 \text{ kN}$$

Missä:

v	=	0,6	Leikkausraudoituksen jako
b _w	=	230mm	Uuman leveys
F _{yd}	=	434,783N/mm ²	Teräksen mitoituslujuus
z	=	306,18mm	Sisäinen momenttivarsi
θ	=	2,5°	Puristussauvojen kaltevuus
α	=	90°	Hakojen kaltevuus

17,07 / 128,01kN Käyttöaste: 13,3%

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = 128,011 \text{ kN}$$

Missä:

$V_{Rd,comp} = v f_{ctd} b_w \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}$	=	128,011kN	Puristusmurtokestävyys
$V_{Rd} = f_{ctd} \frac{A_{sw}}{s} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha$	=	128,011kN	Leikkausraudoituksen kestävyys

17,07 / 128,01kN Käyttöaste: 13,3%

Ankkurointi-1:

$$l_b = l_{b,rq\phi} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 = 120 \text{ mm}$$

Missä:

0,3 * l _{b,rqφ}	=	11,177mm	Ankkurointi vähimmäispituus
10φ	=	120mm	Ankkurointi vähimmäispituus
100mm	=	100mm	Ankkurointi vähimmäispituus

Taipuma y-suunnassa:

$$\frac{w_x}{w_{x,max}} \leq 1 = 20\text{mm}$$

Missä:

6,44 / 20mm Käyttöaste: 32,2%

Halkeamaleveys:

$$W_k = S_{cr,max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{sm}) = 0,4\text{mm}$$

Missä:

$$S_{rmax} = 176,296\text{mm} \quad \text{Halkeamavälin maksimiarvo}$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = 0 \quad \text{Venymäero}$$

0,4 / 0,4mm Käyttöaste: 15,5%

Kuormitustapauksen KY1 mitoittava tekijä oli: Taivutuskestävyys (68,6kNm).

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 90,9%.

Kuormitustapauksen KY2 mitoittava tekijä oli: Taivutuskestävyys (68,6kNm).

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 71,2%.

Kokonais laskutoimituksen mitoittava tekijä oli: Taivutuskestävyys (68,6kNm), KY1 kuormitustapauksessa.

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 90,9%.

LIITE 3: PILARIRAKENNE SHS180X6



Opinnäytetyö 13.3.2018

Projektintiedot:

Suunnittelija:	Jaakko Arokoski	Ammatti/positio:	Opiskelija
Yritys:	Savonia	Asiakas / kohde:	Opinnäytetyön pilari
Muuinformaatio: Opinnäytetyön testi pilari näyte laskelma.			

Yleistä:

Seuraamusluokka:	CC2	Paloluokka:	R60
Kfi:		1	

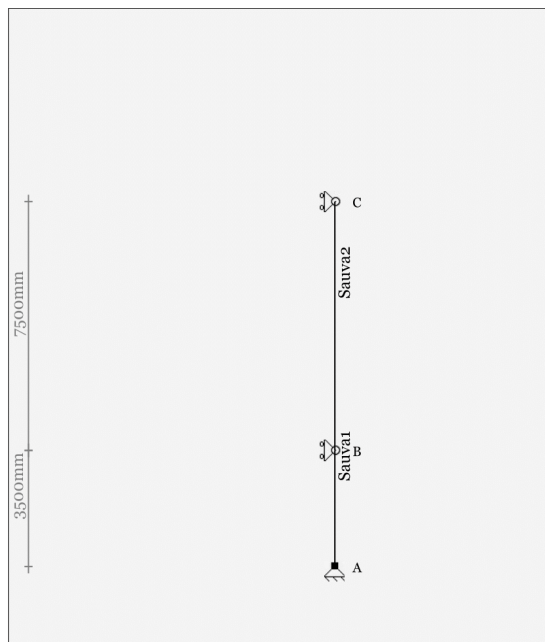
Materiaali:

Materiaali:	S 355	Hiielijalanjälki:	52,61kg
Osavarmuusluku:	1	fy:	355N/mm ²
E:	210000MPa	fu:	510N/mm ²

Profiili:

Profiili:	SHS 180*6	ix:	7,06cm
Korkeus:	180mm	iy:	7,1cm
Leveys:	180mm	Welx:	226cm ³
A:	40,8cm ²	Wely:	226cm ³
Avy:	0cm ²	Wplx:	264cm ³
Ix:	2037cm ⁴	Wply:	264cm ³
Iy:	0cm ⁴	t1:	6mm

Rakenne malli:

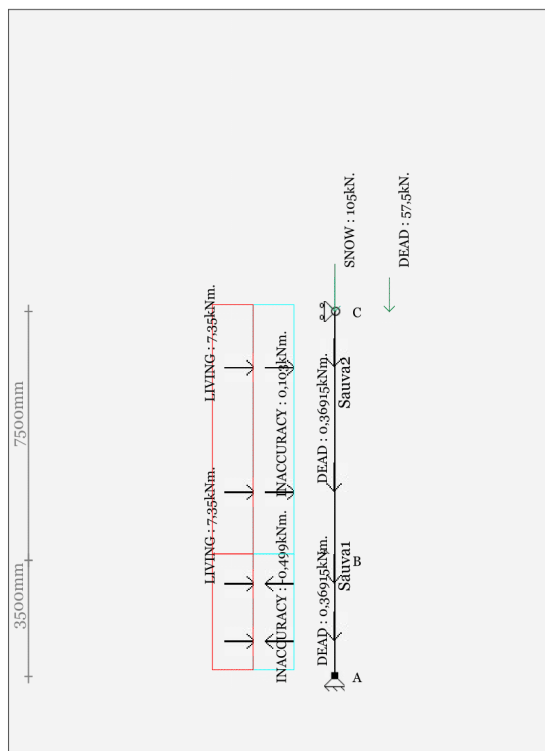


Kokonaispituus:	11000mm
Kulma:	90

Sauvat:

Nimi	Pituus
Sauva1	3500mm
Sauva2	7500mm

Kuormitustapaukset:



Kuormitustapaus: KY1Tuuli

Neliökuormat:

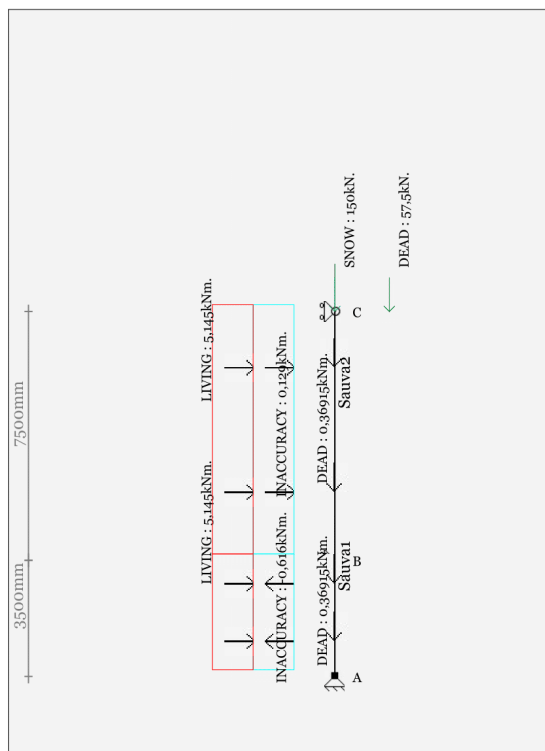
Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m2 ominais	Leveys	Kerroin	kN/m2 murto
Sauva1	LIVING	X	0,7kN/m2	7m	1,5	7,35kN/m2
Sauva2	LIVING	X	0,7kN/m2	7m	1,5	7,35kN/m2

Viivakuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ominais	Kerroin	kN/m murto
Sauva1	DEAD	Y	0,321kN/m	1,15	0,36915kN/m
Sauva2	DEAD	Y	0,321kN/m	1,15	0,36915kN/m
Sauva1	INACCURACY	X	-0,499kN/m	1	-0,499kN/m
Sauva2	INACCURACY	X	0,103kN/m	1	0,103kN/m

Vapausastekuormat:

Vapausasteelle	Tyyppi	Suunta	kN ominais	Kerroin	kN murto
C	SNOW	Y	100kN	1,05	105kN
C	DEAD	Y	50kN	1,15	57,5kN



Kuormitustapaus: KY2Lumi

Neliökuormat:

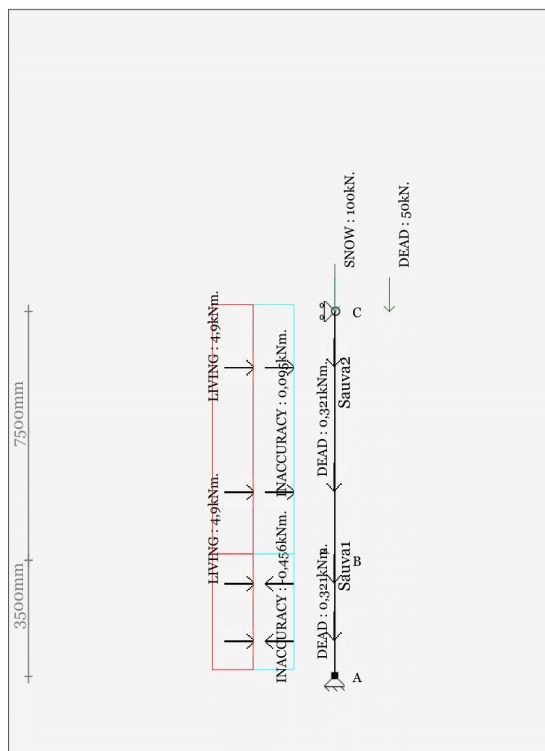
Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m2 ominais	Leveys	Kerroin	kN/m2 murto
Sauva1	LIVING	X	0,7kN/m2	7m	1,05	5,145kN/m2
Sauva2	LIVING	X	0,7kN/m2	7m	1,05	5,145kN/m2

Viivakuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ominais	Kerroin	kN/m murto
Sauva1	DEAD	Y	0,321kN/m	1,15	0,36915kN/m
Sauva2	DEAD	Y	0,321kN/m	1,15	0,36915kN/m
Sauva1	INACCURACY	X	-0,616kN/m	1	-0,616kN/m
Sauva2	INACCURACY	X	0,129kN/m	1	0,129kN/m

Vapausastekuormat:

Vapausasteelle	Tyyppi	Suunta	kN ominais	Kerroin	kN murto
C	SNOW	Y	100kN	1,5	150kN
C	DEAD	Y	50kN	1,15	57,5kN



Kuormitustapaus: KY3

Neliökuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m2 ominais	Leveys	Kerroin	kN/m2 murto
Sauva1	LIVING	X	0,7kN/m2	7m	1	4,9kN/m2
Sauva2	LIVING	X	0,7kN/m2	7m	1	4,9kN/m2

Viivakuormat:

Sauvalle	Tyyppi	Suunta	kN/m ominais	Kerroin	kN/m murto
Sauva1	DEAD	Y	0,321kN/m	1	0,321kN/m
Sauva2	DEAD	Y	0,321kN/m	1	0,321kN/m
Sauva1	INACCURACY	X	-0,456kN/m	1	-0,456kN/m
Sauva2	INACCURACY	X	0,095kN/m	1	0,095kN/m

Vapausastekuormat:

Vapausasteelle	Tyyppi	Suunta	kN ominais	Kerroin	kN murto
C	SNOW	Y	100kN	1	100kN
C	DEAD	Y	50kN	1	50kN

Tukireaktiot

KY1Tuuli:

Tukireaktiot	X	Y	M
A	-25,7kN	166,56kN	9,38kNm
B	-21,08kN	0kN	0kNm
C	-33,1kN	0kN	0kNm

KY2Lumi:

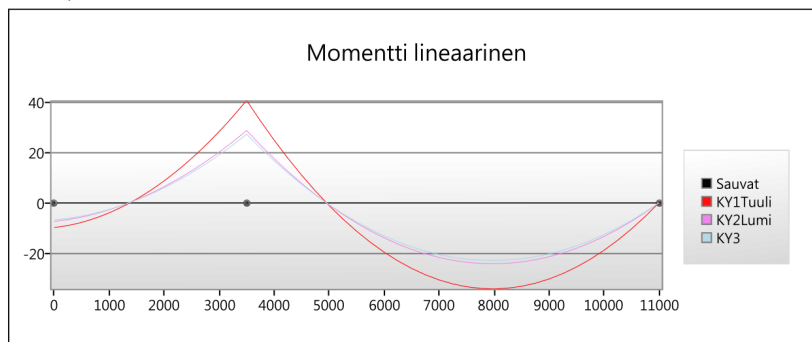
Tukireaktiot	X	Y	M

A	-17,53kN	211,56kN	6,95kNm
B	-14,55kN	0kN	0kNm
C	-23,33kN	0kN	0kNm

KY3:

Tukireaktiot	X	Y	M
A	-16,87kN	153,53kN	6,4kNm
B	-14,02kN	0kN	0kNm
C	-22,12kN	0kN	0kNm

Kuormitustapauksien momentti arvot:



KY1Tuuli: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -40,543kNm kohdassa x: 3500mm.

Max: 9,804kNm kohdassa x: 0mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -40,543kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 34,091kNm kohdassa x: 4500mm

KY2Lumi: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -28,606kNm kohdassa x: 3500mm.

Max: 7,383kNm kohdassa x: 0mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -28,606kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 24,157kNm kohdassa x: 4500mm

KY3: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -27,133kNm kohdassa x: 3500mm.

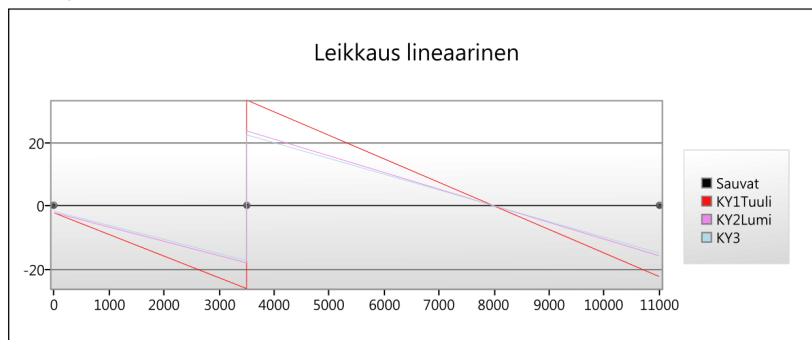
Max: 6,776kNm kohdassa x: 0mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -27,133kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 22,863kNm kohdassa x: 4500mm

Kuormitustapaus leikkaus arvot:



KY1Tuuli: sauvojen leikkausvoimat

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: 0kN kohdassa x: 0mm.

Max: 26,374kN kohdassa x: 3500mm

Sauva2 leikkausvoimat:
Min: -33,354kN kohdassa x: 0mm. Max: 22,543kN kohdassa x: 7500mm

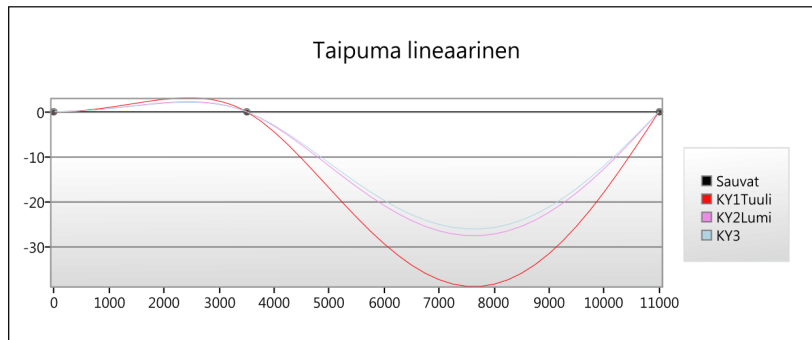
KY2Lumi: sauvojen leikkausvoimat

Sauva1 leikkausvoimat:
Min: 0kN kohdassa x: 0mm. Max: 18,208kN kohdassa x: 3500mm
Sauva2 leikkausvoimat:
Min: -23,592kN kohdassa x: 0mm. Max: 15,963kN kohdassa x: 7500mm

KY3: sauvojen leikkausvoimat

Sauva1 leikkausvoimat:
Min: 0kN kohdassa x: 0mm. Max: 17,465kN kohdassa x: 3500mm
Sauva2 leikkausvoimat:
Min: -22,349kN kohdassa x: 0mm. Max: 15,113kN kohdassa x: 7500mm

Taipuma arvot:



KY1Tuuli: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:
Min x siirtymä: -3,091mm kohdassa x: 2450mm. Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 3500mm
Min y siirtymä: -0,678mm kohdassa x: 3500mm. Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm
Sauva2 taipumat:
Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 7500mm. Max x siirtymä: 38,858mm kohdassa x: 4250mm
Min y siirtymä: -2,112mm kohdassa x: 7500mm. Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

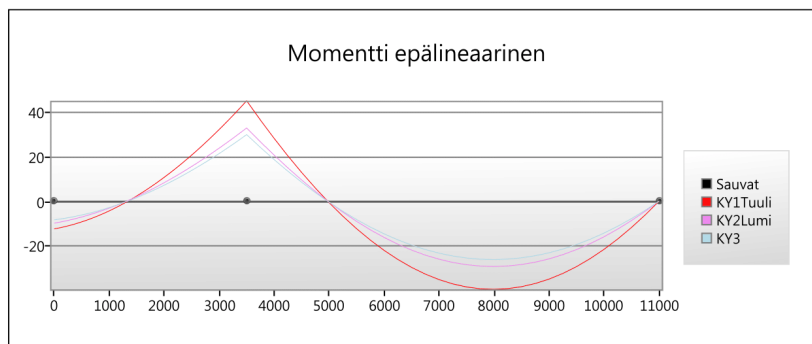
KY2Lumi: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:
Min x siirtymä: -2,233mm kohdassa x: 2450mm. Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 3500mm
Min y siirtymä: -0,862mm kohdassa x: 3500mm. Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm
Sauva2 taipumat:
Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 7500mm. Max x siirtymä: 27,563mm kohdassa x: 4250mm
Min y siirtymä: -2,69mm kohdassa x: 7500mm. Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

KY3: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:
Min x siirtymä: -2,093mm kohdassa x: 2450mm. Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 3500mm
Min y siirtymä: -0,625mm kohdassa x: 3500mm. Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm
Sauva2 taipumat:
Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 7500mm. Max x siirtymä: 26,073mm kohdassa x: 4250mm
Min y siirtymä: -1,948mm kohdassa x: 7500mm. Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Epälineaariset momentti arvot:

**KY1Tuuli: sauvojen momentit**

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -45,08kNm kohdassa x: 3500mm.

Max: 12,45kNm kohdassa x: 0mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -45,08kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 39,594kNm kohdassa x: 4500mm

KY2Lumi: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

Min: -32,87kNm kohdassa x: 3500mm.

Max: 9,885kNm kohdassa x: 0mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -32,87kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 29,341kNm kohdassa x: 4500mm

KY3: sauvojen momentit

Sauva1 momenttivoimat:

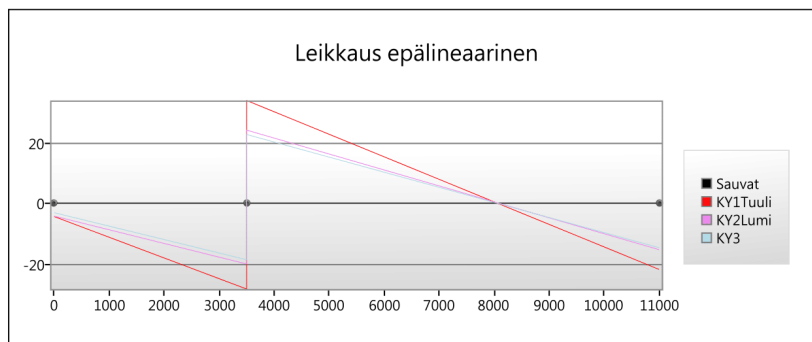
Min: -29,91kNm kohdassa x: 3500mm.

Max: 8,397kNm kohdassa x: 0mm

Sauva2 momenttivoimat:

Min: -29,91kNm kohdassa x: 0mm.

Max: 26,227kNm kohdassa x: 4500mm

Epälineaariset leikkaus arvot:**KY1Tuuli sauvojen leikkausvoimat:**

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: 0kN kohdassa x: 0mm.

Max: 28,42kN kohdassa x: 3500mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -33,96kN kohdassa x: 0mm.

Max: 21,94kN kohdassa x: 7500mm

KY2Lumi sauvojen leikkausvoimat:

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: 0kN kohdassa x: 0mm.

Max: 20,14kN kohdassa x: 3500mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -24,16kN kohdassa x: 0mm.

Max: 15,4kN kohdassa x: 7500mm

KY3 sauvojen leikkausvoimat:

Sauva1 leikkausvoimat:

Min: 0kN kohdassa x: 0mm.

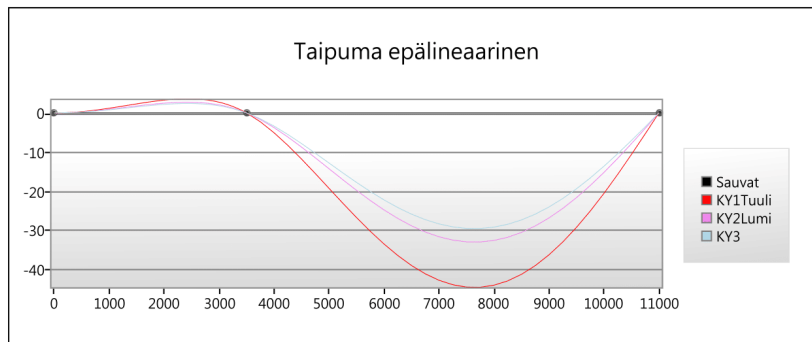
Max: 18,72kN kohdassa x: 3500mm

Sauva2 leikkausvoimat:

Min: -22,72kN kohdassa x: 0mm.

Max: 14,74kN kohdassa x: 7500mm

Epälineaaliset taipuma arvot:



KY1Tuuli: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: -3,65mm kohdassa x: 2450mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 3500mm

Min y siirtymä: -0,68mm kohdassa x: 3500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 7500mm.

Max x siirtymä: 44,8mm kohdassa x: 4250mm

Min y siirtymä: -2,11mm kohdassa x: 7500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

KY2Lumi: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: -2,76mm kohdassa x: 2450mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 3500mm

Min y siirtymä: -0,86mm kohdassa x: 3500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 7500mm.

Max x siirtymä: 33,16mm kohdassa x: 4250mm

Min y siirtymä: -2,69mm kohdassa x: 7500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

KY3: sauvojen taipuma-arvot

Sauva1 taipumat:

Min x siirtymä: -2,44mm kohdassa x: 2450mm.

Max x siirtymä: 0mm kohdassa x: 3500mm

Min y siirtymä: -0,62mm kohdassa x: 3500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Sauva2 taipumat:

Min x siirtymä: 0mm kohdassa x: 7500mm.

Max x siirtymä: 29,71mm kohdassa x: 4250mm

Min y siirtymä: -1,95mm kohdassa x: 7500mm.

Max y siirtymä: 0mm kohdassa x: 0mm

Mitoitus

Sauva1 kuormitustapa: KY1Tuuli:

Sauva on puristettu joten mitoitetaan pilarina.

Poikkileikkausluokka:	2	kz:	0,7
C1:	2,538	kω:	0,7
C2:	0	C3:	1,34
Kyy:		1,1	
Kyy:		0,66	
XLT:		1	
Xc:		0,918	
Xy:		0,215	

Puristuskestävyys:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 1448,4\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{cm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$166,56 / 1448,4\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 11,5\%}$$

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 418,117\text{kN}$$

Missä:

$$A = 20,4\text{cm}^2 \quad \text{Leikkaus tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$28,42 / 418,12\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 6,8\%}$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{e,y,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$45,08 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 48,1\%}$$

Kiepahduskestävyys:

$$M_{b,y,Rd} = \frac{W_y f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_{LT} = 1 \quad \text{Kiepahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$45,08 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 48,1\%}$$

Nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$N_{b,Rd,y} = \frac{A f_y X_y}{\gamma_{M1}} = 1329,999\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_y = 0,918 \quad \text{Nurjahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$166,56 / 1330\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 12,5\%}$$

Nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y X_z}{\gamma_{M1}} = 311,482\text{kN}$$

Missä:

A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	=	355N/mm ²	Teräksen myötöraja
γ_{M0}	=	1	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
X_z	=	0,215	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

166,56 / 311,48kN Käytöaste: 53,5%

Taivutus -ja puristuskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1 = 0,596$$

Missä:

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72\text{kNm} \quad \text{Taivutuskestävyys}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 1448,4\text{kN} \quad \text{Puristuskestävyys}$$

0,6 / 1 Käytöaste: 59,6%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd,y}} + k_{yy} \frac{M_{ed}}{M_{b,y,Rd}} \leq 1 = 0,654$$

Missä:

$$M_{b,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_{t,y}}{\gamma_{M1}} X_{LT} = 93,72\text{kNm} \quad \text{Kiepahduskestävyys}$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} X_y = 1329,999\text{kN} \quad \text{Nurjahduskestävyys y-suunnassa}$$

$$k_{yy} = 1,1 \quad \text{Yhteivaikutustekijä kyy}$$

0,65 / 1 Käytöaste: 65,4%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd,z}} + k_{zy} \frac{M_{ed}}{M_{b,z,Rd}} \leq 1 = 0,852$$

Missä:

$$M_{b,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_{t,z}}{\gamma_{M1}} X_{LT} = 93,72\text{kNm} \quad \text{Kiepahduskestävyys}$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} X_z = 311,482\text{kN} \quad \text{Nurjahduskestävyys z-suunnassa}$$

$$k_{zy} = 0,66 \quad \text{Yhteivaikutustekijä kzy}$$

0,85 / 1 Käytöaste: 85,2%

Sauva2 kuormitustapa: KY1Tuuli:

Sauva on puristettu joten mitoitetaan pilarina.

Poikkileikkaluokka:	2	kz:	1
C1:	1,132	kw:	1
C2:	0,459	C3:	0,525
Kyy:			1,216
Kyy:			0,73
XLT:			1
Xc:			0,423
Xy:			0,215

Puristuskestävyys:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 1448,4\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{cm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$165,27 / 1448,4\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 11,4\%}$$

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 418,117\text{kN}$$

Missä:

$$A = 20,4\text{cm}^2 \quad \text{Leikkaus tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$33,96 / 418,12\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 8,1\%}$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$45,08 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 48,1\%}$$

Kiepahduskestävyys:

$$M_{b,y,Rd} = \frac{W_y f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_{LT} = 1 \quad \text{Kiepahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$45,08 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 48,1\%}$$

Nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$N_{b,Rd,y} = \frac{A f_y X_y}{\gamma_{M1}} = 612,192\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_y = 0,423 \quad \text{Nurjahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$165,27 / 612,19\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 27\%}$$

Nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y X_z}{\gamma_{M1}} = 311,482\text{kN}$$

Missä:			
A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	=	355N/mm ²	Teräksen myötöraja
γ_{M0}	=	1	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
X_z	=	0,215	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

165,27 / 311,48kN Käytöaste: 53,1%

Taivutus -ja puristuskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1 = 0,595$$

Missä:			
$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$	=	93,72kNm	Taivutuskestävyys
$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$	=	1448,4kN	Puristuskestävyys

0,6 / 1 Käytöaste: 59,5%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{t,Rd,y}} + k_{yy} \frac{M_{ed}}{M_{t,y,Rd}} \leq 1 = 0,855$$

Missä:			
$M_{t,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_{t,y}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{t,Rd,y} = \frac{A f_{t,y}}{\gamma_{M1}}$	=	612,192kN	Nurjahduskestävyys y-suunnassa
k_{yy}	=	1,216	Yhteivaikutustekijä kyy

0,85 / 1 Käytöaste: 85,5%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{t,Rd,z}} + k_{zy} \frac{M_{ed}}{M_{t,z,Rd}} \leq 1 = 0,881$$

Missä:			
$M_{t,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_{t,z}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{t,Rd,z} = \frac{A f_{t,z}}{\gamma_{M1}}$	=	311,482kN	Nurjahduskestävyys z-suunnassa
k_{zy}	=	0,73	Yhteivaikutustekijä kzy

0,88 / 1 Käytöaste: 88,1%

Sauva1 kuormitustapa: KY2Lumi:

Sauva on puristettu joten mitoitetaan pilarina.

Poikkileikkausluokka:	2	kz:	0,7
C1:	3,009	k _w :	0,7
C2:	0	C3:	1,059
Kyy:			1,127
Kyy:			0,676
XLT:			1
Xc:			0,918
Xy:			0,215

Puristuskestävyys:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 1448,4kN$$

Missä:			
A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$211,56 / 1448,4\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 14,6\%}$$

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 418,117\text{kN}$$

Missä:

$$A = 20,4\text{cm}^2 \quad \text{Leikkaus tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$20,14 / 418,12\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 4,8\%}$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$32,87 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 35,1\%}$$

Kiepahduskestävyys:

$$M_{b,y,Rd} = \frac{W_y f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_{LT} = 1 \quad \text{Kiepahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$32,87 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 35,1\%}$$

Nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$N_{b,Rd,y} = \frac{A f_y X_y}{\gamma_{M1}} = 1329,999\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_y = 0,918 \quad \text{Nurjahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$211,56 / 1330\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 15,9\%}$$

Nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y X_z}{\gamma_{M1}} = 311,482\text{kN}$$

Missä:			
A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	=	355N/mm ²	Teräksen myötöraja
γ_{M0}	=	1	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
X_z	=	0,215	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

211,56 / 311,48kN Käytöaste: 67,9%

Taivutus -ja puristuskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1 = 0,497$$

Missä:			
$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$	=	93,72kNm	Taivutuskestävyys
$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$	=	1448,4kN	Puristuskestävyys

0,5 / 1 Käytöaste: 49,7%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,ed}}{M_{b,y,Rd}} \leq 1 = 0,554$$

Missä:			
$M_{b,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_{yk}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{b,Rd} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$	=	1329,999kN	Nurjahduskestävyys y-suunnassa
k_{yy}	=	1,127	Yhteivaikutustekijä kyy

0,55 / 1 Käytöaste: 55,4%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd,z}} + k_{zy} \frac{M_{z,ed}}{M_{b,z,Rd}} \leq 1 = 0,916$$

Missä:			
$M_{b,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_{yk}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_{yk}}{\gamma_{M1}}$	=	311,482kN	Nurjahduskestävyys z-suunnassa
k_{zy}	=	0,676	Yhteivaikutustekijä kzy

0,92 / 1 Käytöaste: 91,6%

Sauva2 kuormitustapa: KY2Lumi:

Sauva on puristettu joten mitoitetaan pilarina.

Poikkileikkausluokka:	2	kz:	1
C1:	1,132	k _w :	1
C2:	0,459	C3:	0,525
Kyy:			1,275
Kyy:			0,765
XLT:			1
Xc:			0,423
Xy:			0,215

Puristuskestävyys:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 1448,4kN$$

Missä:			
A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$210,27 / 1448,4\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 14,5\%}$$

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 418,117\text{kN}$$

Missä:

$$A = 20,4\text{cm}^2 \quad \text{Leikkaus tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$24,16 / 418,12\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 5,8\%}$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$32,87 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 35,1\%}$$

Kiepahduskestävyys:

$$M_{b,y,Rd} = \frac{W_y f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_{LT} = 1 \quad \text{Kiepahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$32,87 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 35,1\%}$$

Nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$N_{b,Rd,y} = \frac{A f_y X_y}{\gamma_{M1}} = 612,192\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_y = 0,423 \quad \text{Nurjahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$210,27 / 612,19\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 34,3\%}$$

Nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y X_z}{\gamma_{M1}} = 311,482\text{kN}$$

Missä:			
A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	=	355N/mm ²	Teräksen myötöraja
γ_{M0}	=	1	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
X_z	=	0,215	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

210,27 / 311,48kN Käytöaste: 67,5%

Taivutus -ja puristuskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1 = 0,496$$

Missä:			
$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$	=	93,72kNm	Taivutuskestävyys
$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$	=	1448,4kN	Puristuskestävyys

0,5 / 1 Käytöaste: 49,6%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{t,Rd,y}} + k_{yy} \frac{M_{ed}}{M_{t,y,Rd}} \leq 1 = 0,791$$

Missä:			
$M_{t,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_{t,y}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{t,Rd,y} = \frac{A f_{t,y}}{\gamma_{M1}}$	=	612,192kN	Nurjahduskestävyys y-suunnassa
k_{yy}	=	1,275	Yhteivaikutustekijä k _{yy}

0,79 / 1 Käytöaste: 79,1%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{t,Rd,z}} + k_{zy} \frac{M_{ed}}{M_{t,z,Rd}} \leq 1 = 0,943$$

Missä:			
$M_{t,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_{t,z}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{t,Rd,z} = \frac{A f_{t,z}}{\gamma_{M1}}$	=	311,482kN	Nurjahduskestävyys z-suunnassa
k_{zy}	=	0,765	Yhteivaikutustekijä k _{zy}

0,94 / 1 Käytöaste: 94,3%

Sauva1 kuormitustapa: KY3:

Sauva on puristettu joten mitoitetaan pilarina.

Poikkileikkausluokka:	2	kz:	0,7
C1:	2,538	k _w :	0,7
C2:	0	C3:	1,34
Kyy:			1,092
Kyy:			0,655
XLT:			1
Xc:			0,918
Xy:			0,215

Puristuskestävyys:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 1448,4\text{kN}$$

Missä:			
A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$153,53 / 1448,4\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 10,6\%}$$

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_w f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 418,117\text{kN}$$

Missä:

$$A = 20,4\text{cm}^2 \quad \text{Leikkaus tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$18,72 / 418,12\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 4,5\%}$$

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$29,91 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 31,9\%}$$

Kiepahduskestävyys:

$$M_{b,y,Rd} = \frac{W_y f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_{LT} = 1 \quad \text{Kiepahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$29,91 / 93,72\text{kNm} \quad \text{Käyttöaste: 31,9\%}$$

Nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$N_{b,Rd,y} = \frac{A f_y X_y}{\gamma_{M1}} = 1329,999\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{mm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_y = 0,918 \quad \text{Nurjahduskestävyyden pienennystekijä}$$

$$153,53 / 1330\text{kN} \quad \text{Käyttöaste: 11,5\%}$$

Nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y X_z}{\gamma_{M1}} = 311,482\text{kN}$$

Missä:			
A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	=	355N/mm ²	Teräksen myötöraja
γ_{MO}	=	1	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
X_z	=	0,215	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

153,53 / 311,48kN Käytöaste: 49,3%

Taivutus -ja puristuskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Bt}} + \frac{M_{ed}}{M_{c,y,Bt}} \leq 1 = 0,425$$

Missä:			
$M_{c,y,Bt} = \frac{W_{pl,y}}{\gamma_{M0}}$	=	93,72kNm	Taivutuskestävyys
$N_{c,Bt} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$	=	1448,4kN	Puristuskestävyys

0,43 / 1 Käytöaste: 42,5%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,y,Bt}} + k_{yy} \frac{M_{ed}}{M_{b,y,Bt}} \leq 1 = 0,464$$

Missä:			
$M_{b,y,Bt} = \frac{W_{pl,y} N_{c,T}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{b,y,Bt} = \frac{A f_y N_c}{\gamma_{M1}}$	=	1329,999kN	Nurjahduskestävyys y-suunnassa
k_{yy}	=	1,092	Yhteivaikutustekijä k _{yy}

0,46 / 1 Käytöaste: 46,4%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,z,Bt}} + k_{zy} \frac{M_{ed}}{M_{b,z,Bt}} \leq 1 = 0,702$$

Missä:			
$M_{b,z,Bt} = \frac{W_{pl,z} N_{c,T}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{b,z,Bt} = \frac{A f_y N_c}{\gamma_{M1}}$	=	311,482kN	Nurjahduskestävyys z-suunnassa
k_{zy}	=	0,655	Yhteivaikutustekijä k _{zy}

0,7 / 1 Käytöaste: 70,2%

Taipuma x-suunnassa:

$$\frac{w_y}{w_{y,max}} \leq 1 = 50mm$$

Missä:

2,09 / 50mm Käytöaste: 4,2%

Taipuma y-suunnassa:

$$\frac{w_x}{w_{x,max}} \leq 1 = 50mm$$

Missä:

0,62 / 50mm Käytöaste: 1,2%

Sauva2 kuormitustapa: KY3:

Sauva on puristettu joten mitoitetaan pilarina.

Poikkileikkauksluokka:	2	kz:	1
C1:	1,132	kw:	1
C2:	0,459	C3:	0,525

Kyy:	1,199
Kyy:	0,719
XLT:	1
Xc:	0,423
Xy:	0,215

Puristuskestävyys:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 1448,4\text{kN}$$

Missä:

$$A = 4080\text{cm}^2 \quad \text{Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

152,41 / 1448,4kN Käyttöaste: 10,5%

Leikkauskestävyys:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 418,117\text{kN}$$

Missä:

$$A = 20,4\text{cm}^2 \quad \text{Leikkaus tehollinen pinta-ala}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

22,72 / 418,12kN Käyttöaste: 5,4%

Taivutuskestävyys:

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

29,91 / 93,72kNm Käyttöaste: 31,9%

Kiepahdukkestävyys:

$$M_{b,y,Rd} = \frac{W_y f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}} = 93,72\text{kNm}$$

Missä:

$$W = 264\text{cm}^3 \quad \text{Tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus}$$

$$f_y = 355\text{N/mm}^2 \quad \text{Teräksen myötöraja}$$

$$\gamma_{M0} = 1 \quad \text{Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku}$$

$$X_{LT} = 1 \quad \text{Kiepahdukkestävyyden pienennystekijä}$$

29,91 / 93,72kNm Käyttöaste: 31,9%

Nurjahdukkestävyys y-suunnassa:

$$N_{t,Rd,y} = \frac{Af_y X_y}{\gamma_{M1}} = 612,192\text{kN}$$

Missä:

A	=	4080mm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	=	355N/mm ²	Teräksen myötöraja
γ_{M0}	=	1	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
X_y	=	0,423	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

152,41 / 612,19kN Käytöaste: 24,9%

Nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y X_z}{\gamma_{M1}} = 311,482\text{kN}$$

Missä:

A	=	4080cm ²	Poikkileikkauksen pinta-ala
f_y	=	355N/mm ²	Teräksen myötöraja
γ_{M0}	=	1	Materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
X_z	=	0,215	Nurjahduskestävyyden pienennystekijä

152,41 / 311,48kN Käytöaste: 48,9%

Taivutus -ja puristuskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1 = 0,424$$

Missä:

$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$	=	93,72kNm	Taivutuskestävyys
$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$	=	1448,4kN	Puristuskestävyys

0,42 / 1 Käytöaste: 42,4%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys y-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd,y}} + k_{yy} \frac{M_{y,ed}}{M_{b,y,Rd}} \leq 1 = 0,632$$

Missä:

$M_{b,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{b,Rd,y} = \frac{A f_y X_y}{\gamma_{M1}}$	=	612,192kN	Nurjahduskestävyys y-suunnassa
k_{yy}	=	1,199	Yhteivaikutustekijä k _{yy}

0,63 / 1 Käytöaste: 63,2%

Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa:

$$\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd,z}} + k_{zy} \frac{M_{z,ed}}{M_{b,z,Rd}} \leq 1 = 0,719$$

Missä:

$M_{b,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_y X_{LT}}{\gamma_{M1}}$	=	93,72kNm	Kiepahduskestävyys
$N_{b,Rd,z} = \frac{A f_y X_z}{\gamma_{M1}}$	=	311,482kN	Nurjahduskestävyys z-suunnassa
k_{zy}	=	0,719	Yhteivaikutustekijä k _{zy}

0,72 / 1 Käytöaste: 71,9%

Taipuma x-suunnassa:

$$\frac{w_y}{w_{y,max}} \leq 1 = 50\text{mm}$$

Missä:

26,07 / 50mm Käyttöaste: 52,1%

Taipuma y-suunnassa:

$$\frac{w_x}{w_{x,max}} \leq 1 = 50\text{mm}$$

Missä:

1,95 / 50mm Käyttöaste: 3,9%

Kuormitustapauksen KY1Tuuli mitoittava tekijä oli: Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa.

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 88,1%.

Kuormitustapauksen KY2Lumi mitoittava tekijä oli: Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa.

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 94,3%.

Kuormitustapauksen KY3 mitoittava tekijä oli: Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa.

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 71,9%.

Kokonais laskutoimituksen mitoittava tekijä oli: Kiepahdus -ja nurjahduskestävyys z-suunnassa, KY2Lumi kuormitustapauksessa.

Käyttöaste tälle mitoitukselle on annettu 94,3%.
