



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# TERÄSSAUVOJEN LASKENTAOHJELMAN KÄYTTÖOHJE JA ESIMERKKILASKELMAT

Janne Koivuniemi

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2016  
Rakennustekniikan ko.  
Talonrakennustekniikka



# TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Talonnustekniikka

KOIVUNIEMI, JANNE

Terässauvojen laskentaohjelman käyttöohje ja esimerkkilaskelmat

Opinnäytetyö 80 sivua, joista liitteitä 61 sivua  
Maaliskuu 2016

---

Tämän työn tarkoituksena oli tuottaa teräsprofiilien mitoituslaskentaohjelmaan käyttöönottoa ja käyttöä helpottavat käyttöohje ja esimerkkilaskelmat. Lisäksi tarkoituksena on löytää ohjelmasta mahdollisia virheitä tai puutteita ja antaa kehitysehdotuksia. Työn toimeksiantajana on Sweco Rakennustekniikka Oy ja tarkoituksena on, että jatkossa toimin yrityksen sisällä ohjelman tukihenkilönä muulle henkilöstölle.

Työssä toteutettiin esimerkkilaskelmat todellisesta Swecolla suunnitellusta kohteesta ja laskelmien tuloksia vertailtiin 3D-FEM –ohjelmalla saatuihin tuloksiin. Laskentaohjelmalla lasketut tulokset vastaavat 3D-FEM –ohjelmalla saatuja tuloksia. Käyttöohjeesta ja esimerkkilaskelmista saatiin halutun kaltaiset.

---

Asiasanat: käyttöohje, esimerkkilaskelma, terässauva

## **ABSTRACT**

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

KOIVUNIEMI, JANNE:

Instruction document and example calculations for steel member design program.

Bachelor's thesis 80 pages, appendices 61 pages

March 2016

---

The main purpose of this thesis is to produce instruction document and example calculations for a program that is meant for designing and calculating of steel members. The purpose of these documents is to make the program more accessible to new users. In addition, while making these documents, it is purposed to find possible errors or shortages the program might have and give successions on how to develop the program further. This thesis is made for Sweco Rakennetekniikka Oy and it is meant that in the future I will be acting as support regarding this program for the personnel inside Sweco Rakennetekniikka Oy.

The example calculations are made from actual project designed in Sweco and the results of the example calculations are compared to the calculations made with the 3D-FEM software used to design the structures. The results of the example calculations are consistent with the 3D-FEM results. The finished instruction document and example calculations are as they were wanted to be.

---

Key words: instruction document, example calculation, steel member

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	LASKENTAOHJELMA .....	6
3	LASKENTAOHJELMAN TOIMINTA.....	7
3.1	Statiikka .....	7
3.2	Profiilien mitoitus .....	7
3.3	Laskennan tulokset .....	8
4	LASKENTAOHJELMAN KÄYTTÖOHJE .....	9
5	ESIMERKKILASKELMAT .....	10
5.1	Esimerkkilaskelmien kohde .....	10
5.2	Esimerkkilaskelmien valinta .....	10
5.3	Esimerkkilaskelmien lähtötiedot.....	10
5.4	Esimerkkilaskelmien kohteet .....	11
5.4.1	Valssattu sekundääripalkki .....	11
5.4.2	Hitsattu primääripalkki.....	12
5.4.3	Hitsattu kotelopilari.....	13
5.4.4	Putkiprofiilinen vinoside.....	14
5.5	Esimerkkilaskelmien tekeminen .....	14
6	KEHITYSEHDOTUKSET .....	17
7	POHDINTA.....	18
	LÄHTEET.....	19
	LIITTEET .....	20
	Liite 1. Vexcel member design 1.0 käyttöohje.....	20
	Liite 2. Esimerkkilaskelma - Primääripalkki.....	38
	Liite 3. Esimerkkilaskelma - Pilari.....	51
	Liite 4. Esimerkkilaskelma - Vinoside .....	65



## 1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tuottaa Sweco Rakennetekniikka Oy:lle tehtyyn terässauvojen laskentaohjelmaan käyttöohje ja esimerkkilaskelmat. Näiden on tarkoitus toimia ohjelman käyttöönottoa helpottavina dokumentteina koko Sweco Rakennetekniikan henkilöstölle. Esimerkkilaskelmat toteutettiin todellisesta Swecolla suunnitellusta kohteesta. Esimerkkilaskelmia tehtäessä oli tarkoitus myös raportoida mahdollisista virheistä tai puutteissa ohjelmassa ja antaa mahdollisia kehitysehdotuksia.

Lisäksi tarkoituksena on sisäistää ohjelman toiminta ja käyttö siinä laajuudessa, että jatkossa voin avustaa muita käyttäjiä ongelmatilanteissa ja vastata mahdollisiin kysymyksiin. Työhön kuului myös koulutustilaisuus ohjelman käytöstä Tampereen teräsosaston henkilöstölle.

## 2 LASKENTAOHJELMA

Laskentaohjelman nimeksi on valittu Vexcel member design, lyhemmin Vexcel. Se on Ville Lehtimäen diplomityönä KPM-Engineering:lle tekemä teräsprofiilien laskentapohja, joka soveltuu teräspalkkien, -pilareiden ja -siteiden laskentaan. Laskentaohjelma on myöhemmin päivitetty Sweco versioon, mutta ohjelman varsinaiseen toimintaa ei ole tullut muutoksia.

Vexcel käyttää alustana Microsoftin Excel -ohjelmaa ja ohjelman käyttö on rajoitettu niin, että ohjelmaa käyttääkseen on kirjauduttava tietokoneelle Swecon Windows tunnuksella.

Vexcelin profiilikirjastosta löytyy eurooppalaisia, kiinalaisia ja amerikkalaisia (AISC = American Institute of Steel Construction) profiileja. Valittavina profiilityyppeinä ovat valssattu tai hitsattu I-profiili, hitsattu koteloprofiili ja kylmä- ja kuumavalssatut putki-profiilit. Putkiprofiilit voivat olla neliö-, suorakaide- tai ympyräprofiileja.

Vexcelillä voidaan laskea rakenteen statiikka antamalla rakenteelle mitat, aukkojen lukumäärä, tuentaehdot ja kuormat. Rakenne mitoitetaan murto- ja käyttörajatilassa. Palotilanteen mitoitusta ei Vexcelissä vielä ole, mutta mahdollisesti tulevaisuudessa se lisätään ohjelmaan.

### 3 LASKENTAOHJELMAN TOIMINTA

#### 3.1 Statiikka

Vexcel käyttää rakenteiden statiikan laskentaan elementtimenetelmää (Finite Element Method, FEM). Käytetty teoria on lineaarinen kimmoteoria. Elementtimenetelmä soveltuu hyvin tietokoneavusteiseen rakenteiden statiikan laskentaan.

Vexcel laskee rakenteen statiikan palkille tai pilarille, jolla voidaan antaa kuormituksiksi piste- ja viivakuormia, normaalivoimia ja pistemomentteja. Rakenne voi olla moniaukkoinen ja sisältää ulokkeita. Rakenne voi olla tuettu jäykästi, nivelisesti tai osittain jäykästi. Statiikan laskennassa voidaan Vexeliin syöttää joko ominaiskuormia ilman mitään kertoimia ja antaa ohjelman laskea kuormitusyhdistelyt tai syöttää yhdistely- ja varmuuskertoimilla kerrottuja mitoituskuormia.

Statiikka lasketaan 2D:nä, eikä laskennassa huomioida vääntöä. Rakenteen heikomman suunnan rasituksia ei siis voida ohjelmalla laskea. Myöskään kuormat eivät voi olla epäkeskisiä rakenteeseen nähden.

Vexeliin on myös mahdollista syöttää rasitukset taulukkoon, jolloin voidaan antaa myös heikomman suunnan rasituksia. Käytännössä tämä tarkoittaa usein sitä, että rakenteen statiikka on pitänyt laskea jollain statiikkaohjelmalla. Taulukkoon syöttämällä ei kuitenkaan voida huomioida vääntörasituksia. Jos rakenteeseen kohdistuu suuria vääntörasituksia, on mitoitus tehtävä joltain muuta ohjelmaa käyttäen.

#### 3.2 Profiilien mitoitus

Rakenteen mitoitus tapahtuu Eurokoodin 3. osan mukaan. Murtorajatilassa rakenteelle tehdään veto-, puristus-, taivutus- ja leikkauskestävyyksien sekä näiden yhteisvaikutusten tarkastelut. Lisäksi tarkastellaan rakenteen stabiilisuuden menetystä, nurjahdusta, kiepahdusta ja pistekuormakestävyyttä. Käyttörajan tarkastelussa tutkitaan rakenteen taipumaa. Valssatuille profiileille Vexcel laskee kestävyyydet Eurokoodin mukaan ja hitsatuille profiileille Ruukin Hitsatut profiilit Käsikirjan mukaan.

Profiilia mitoitettaessa on suunnittelijan oltava perehtynyt teräsrakenteiden mitoittamiseen ja ymmärrettävä parametreja valitessaan niiden vaikutukset rakenteen toimintaan. Oletuksena Vexcelissä on varmalla puolella olevat valinnat parametreihin, jolloin sen käyttö on melko turvallista, vaikkei kovin perehtynyt teräsrakenteiden mitoitukseen olisikaan.

Mitoituksen yhteydessä voidaan suorittaa profiilin optimointi, jolloin Vexceliin annetaan profiilille kriteerit, joiden sisältä haetaan kevyintä rasiutukset kestävää profiilia. Tasokuorma kantaville rakenteille on myös mahdollista hakea optimaalinen keskeltä keskelle jako. Lisäksi mitoituksen yhteydessä voidaan laskea rakenteen värähtelyn ominaistuuus ja värähtelymuoto, sekä laskea staattisen rakennemallin mukainen nurjahduspituus rakenteelle.

### **3.3 Laskennan tulokset**

Kun rakenne on mitoitetu, on Vexcelistä nähtävissä rakenteen käyttöasteet kaikkien laskettujen kestävyysien suhteen. Nähtävissä on myös rakenteen rasitus-, taipuma-, värähtely- ja nurjahdusmuotokuvaajat. Normaali- ja leikkausvoimalle, taivutusmomentille ja taipumalle on myös nähtävissä suurin ja pienin arvo, näiden yhteisvaikutusten suurin ja pienin arvo, sekä näiden sijainti rakenteessa.

Laskennasta voidaan tulostaa raportti pdf-muodossa. Valittavana on joko suppea tai laaja raportti. Suppea raportti on mahdutettu A4-kokoon ja siinä on rakenteen oleelliset tiedot ja suurin käyttöaste. Laajempi raportti kattaa kaikki mitoituksessa käytetyt parametrit ja käyttöasteet jokaisen kestävyysien suhteen.

## 4 LASKENTAOHJELMAN KÄYTTÖOHJE

Käyttöohje on opinnäytetyön liitteenä, liite 1.

Käyttöohjeesta on pyritty tekemään mahdollisimman kattava, yksiselitteinen ja selkeä. Vexceliä käytettäessä on käyttäjän tehtävä mitoituseseen vaikuttavia valintoja ja tämä edellyttää käyttäjältä perehtyneisyyttä rakenteiden ja erityisesti teräsrakenteiden mitoitusesta ja statiikan laskennasta. Käyttöohjeeseen on kuitenkin pyritty selittämään valintojen vaikutuksia ja ilmiöitä näiden valittavien parametrien ja käytettävien laskentatapojen takana. Esimerkiksi kiepahdusmitoitukseen liittyvät sauvan pään kiertyminen ja käyristyminen on käyttöohjeessa selitetty ja esitetty kuvin.

Vexcelin laajoista ominaisuuksista johtuen käyttöohjeesta tuli melko laaja, mikä saattaa vaikuttaa käyttäjien motivaatioon lukea käyttöohjetta. Luettavuutta pyrittiin parantamaan mahdollisimman selkeällä asettelulla, kuvilla ja selkeällä sisällysluettelolla, jonka avulla käyttäjän on helpompi löytää vastaus mahdolliseen ongelmatilanteeseen ohjelmaa käytäessään.

## **5 ESIMERKKILASKELMAT**

Esimerkkilaskelmat ovat opinnäytetyön liitteenä, liitteet 2-4.

### **5.1 Esimerkkilaskelmien kohde**

Esimerkkilaskelmat tehtiin Nokianvirran kattilalaitoksen teräsosista. Kattilarakennuksen toimittaa Valmet Power Oy ja rungon teräsrakenteet on suunniteltu Sweco Rakennetekniikka Oy:ssä. Kohteessa oleva vanha kattila korvataan uudella ja se kannatellaan alta pilari-palkki-runkoisilla pukeilla. Uudet hoitotasot ja laitetuet kannatellaan suurimmalta osin vanhasta betonirungosta konsolikiinnityksin. Teräsrakenteet on mitoitettu DI Juha Väliwerrosen toimesta StaadPro V8i –ohjelmalla ja Vexcelistä saatuja tuloksia vertaillaan näihin tuloksiin. Rakenteet on mallinnettu Tekla Structures 17.0.8 –ohjelmalla. Esimerkkilaskelmiin on otettu kuvakaappauksia Teklasta havainnollistamaan rakenteita.

### **5.2 Esimerkkilaskelmien valinta**

Itse olen toiminut mallintajana kyseisessä projektissa, joten sen valinta esimerkkilaskelmien kohteeksi oli hyvin luonteva ratkaisu. Kohteen teräsrakenteet olivat entuudestaan tuttuja. Kohteessa on myös käytetty kattavasti erilaisia profiileja ja rakenneratkaisuja. Kaikki esimerkkilaskelmiksi halutut kohteet löydettiin projektista.

Esimerkeissä on pyritty mahdollisimman kattavasti tuoda esiin Vexcelin monipuolisia ominaisuuksia erilaisten osien mitoituksessa ja havainnollistaa Vexcelin käyttöä jokapäiväisessä työskentelyssä teräsrakennesuunnittelijan tehtävissä.

### **5.3 Esimerkkilaskelmien lähtötiedot**

Teräsrakenteet on mitoitettu standardin EN 1993 ja sen Suomen kansallisia liitteitä noudattaen. Käytetyt kuormitusyhdistelmät perustuvat standardiin EN 1990 ja sen Suomen

kansalliseen liitteeseen. Lumi- ja tuulikuormina käytetään standardin EN 1991 ja vastaavien Suomen kansallisten liitteiden mukaisia arvoja. Hyöty-, laite- ja muut kuormat ovat Valmet Power Oy:ltä saatujen tietojen mukaisia.

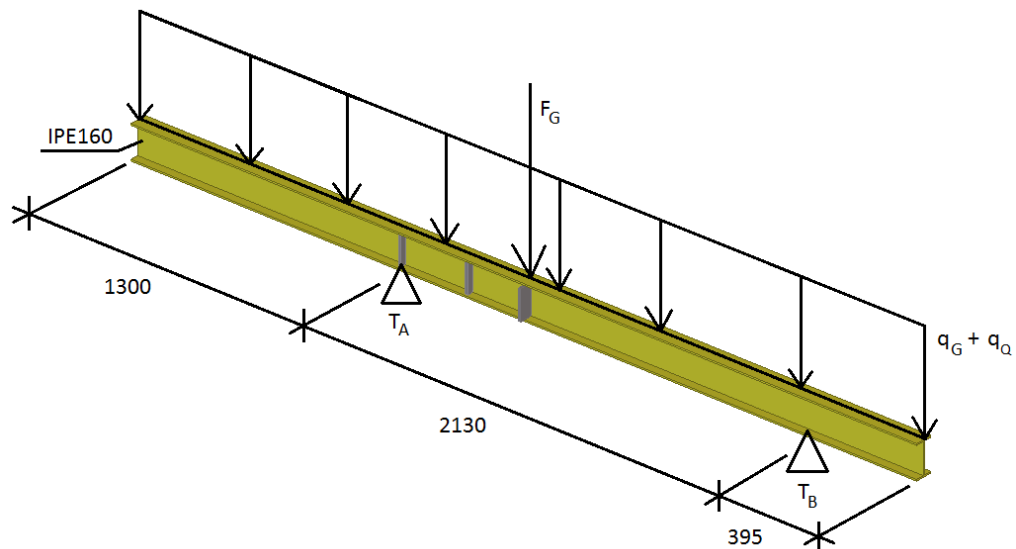
Nokianvirran kohteessa IPE180 ja pienemmät valssatut avoprofiilit valmistetaan teräslajista S235JRG2. Tätä suuremmat valssatut avoprofiilit ja hitsatut profiilit valmistetaan teräslajista S355J2. Putkiprofiileissa teräslajina käytetään S355J2H.

Kohteessa ei ole käytetty IPE160 pienempää avoprofiilia kantavana rakenteena. IPE160 profiilin laippoihin vielä juuri ja juuri saadaan M12 pultit ja täytettyä standardissa EN 1993-1-8 vaaditut pulttiliitoksien reunaetäisyydet. Tätä pienemmissä profiileissa eivät kyseiset reunaetäisyydet täyty ja pienempiä pultteja ei rakenneliitoksissa käytetä. IPE160 ja IPE180 profiileja on käytetty pääasiassa hoitotasojen sekundääripalkkeina ja kevyiden laitteiden tukina.

## **5.4 Esimerkkilaskelmien kohteet**

### **5.4.1 Valssattu sekundääripalkki**

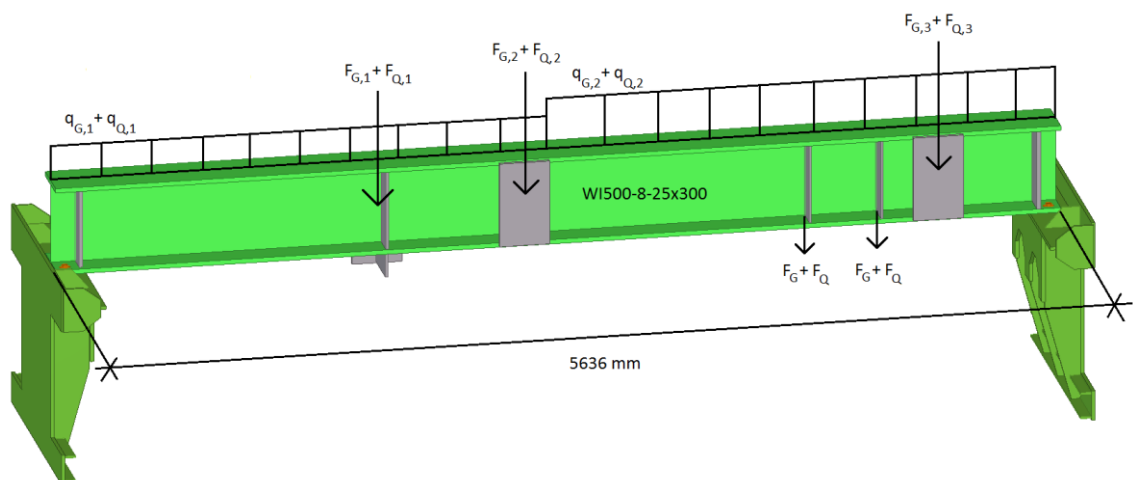
Ensimmäiseksi esimerkkilaskelmaksi valittiin hoitotasoa kannatteleva valssattu I-profiilinen sekundääripalkki (kuva 1). Palkille kohdistuu tasokuormaa omasta painosta ja hyötykuormasta. Lisäksi palkille kohdistuu laitteelta pistekuorma. Pistekuorma on laitteen omaa painoa. Palkki on kannateltu primääripalkkien päälle. Sekundääripalkin profiiliksi oli projektissa valittu IPE160.



KUVA 1. Valssatun sekundääripalkin rakennemalli.

#### 5.4.2 Hitsattu primääripalkki

Toiseksi esimerkkilaskelmaksi (liite 2) valittiin hoitotasoa, silloa ja laitekuormia kannatteleva hitsattu primääripalkki (kuva 2). Palkille kohdistuu tasokuormaa omasta painosta ja hyötykuormasta. Lisäksi palkille kohdistuu pistekuormia laiteripustuksilta ja viereisiltä primääripalkeilta. Pistekuormat koostuvat omasta painosta ja hyötykuormasta. Palkki on kannateltu vanhoista betonipilareista teräskonsoleilla. Konsolit kiinnittyvät betoniin kierretangoilla ja injektointimassalla. Primääripalkin profiiliksi oli projektissa valittu WI500-8-25x300.

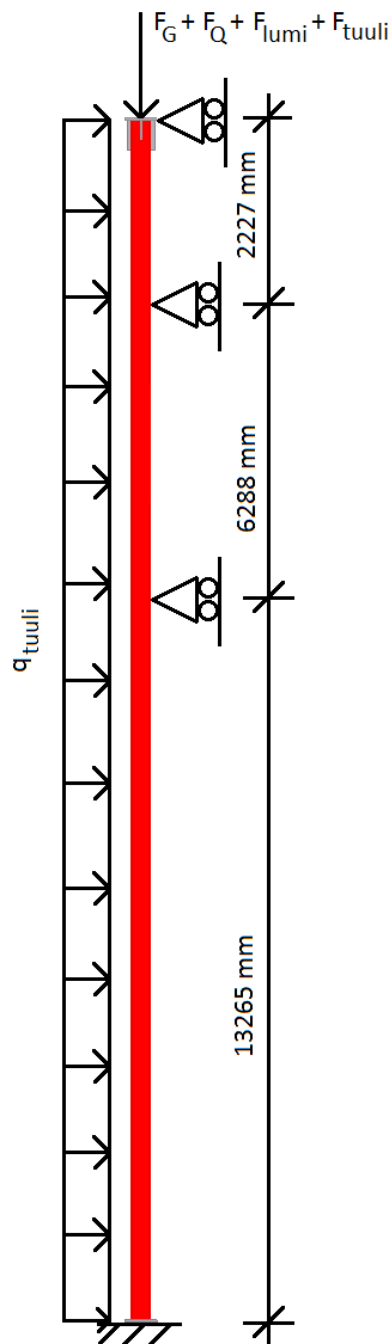


KUVA 2. Hitsatun primääripalkin rakennemalli.



### 5.4.3 Hitsattu kotelopilari

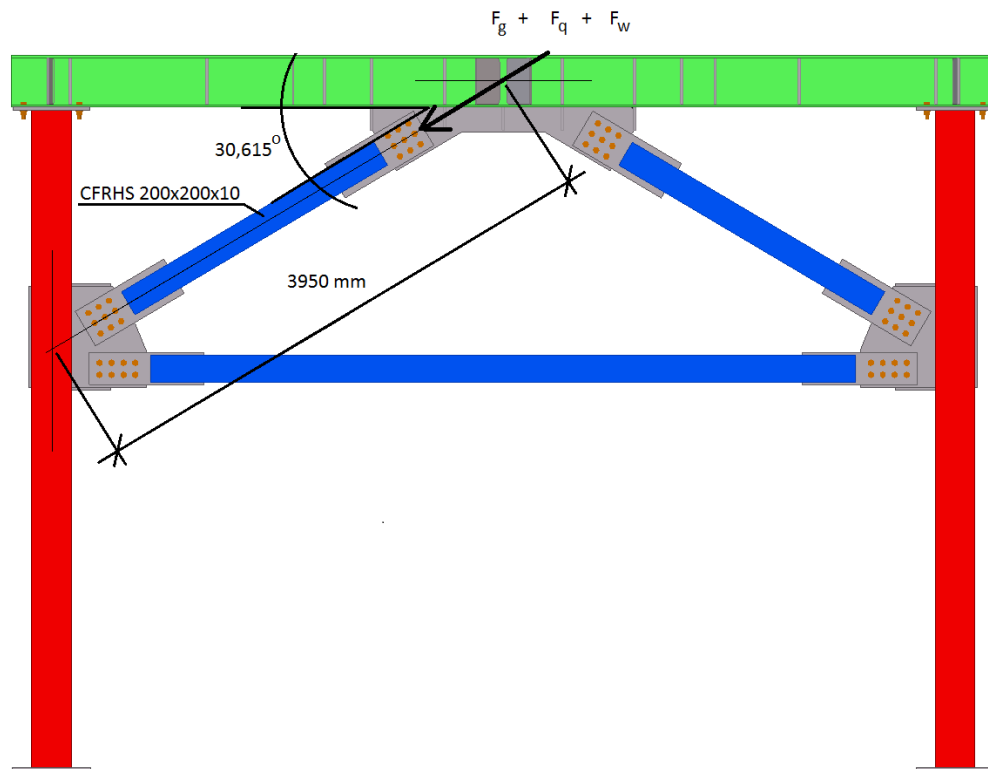
Kolmanneksi esimerkkilaskelmaksi (liite 3) valittiin polttoainesiiloa ja ympäröiviä tasoja kannatteleva hitsattu kotelopilari (kuva 3). Pilarille kohdistuu normaalivoimaa siilolta ja tasoilta tulevasta omasta painosta, hyöty-, lumi- ja tuulikuormasta. Lisäksi pilaria taivuttaa tuulesta aiheutuva viivakuorma. Pilari on jäykästi kiinnitetty perustuksiin ja se on tuettu kolmelta tasolta vanhaan betonirunkoon, sekä viereiseen porrastorniin siteillä ja palkeilla. Kotelopilarin profiiliksi oli projektissa valittu WB350-25-25x350/25.



KUVA 3. Hitsatun kotelopilarin rakennemalli

#### 5.4.4 Putkiprofiilinen vinoside

Neljänneksi esimerkkilaskelmaksi (liite 4) valittiin kattilapukin vinoside (kuva 4). Vinositeelle kohdistuu normaalivoimaa kattilan omasta painosta ja hyötykuormasta sekä vaakasuuntaisesta tuulikuormasta. Vinositeen profiiliksi oli projektissa valittu CFRHS200x200x10.



KUVA 4. Kattilapukin vinoside

#### 5.5 Esimerkkilaskelmien tekeminen

Esimerkkilaskelmia tehdessä kohdattiin yksi suuri haaste rakenteiden mitoituksessa. Ulokkeellisen palkin tai maston kiepahduskestävyyttä ei pystytä tarkasti mitoittamaan Vexcelillä. Tämä johtuu kiepahduskestävyyttä mitoittaessa tarvittavan kriittisen kiepahdusmomentin laskentakaavasta, joka on tarkoitettu molemmista päistään haarukkatuetuille palkeille (Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirja). Tällöin se ei päde ulokkeellisiin rakenteisiin. Kaava on yleisesti käytetty teräsrakenteiden kiepahdusta laskettaessa ja löytyy esimerkiksi Ruukin Hitsatut profiilit käsikirjasta. Kaava alla.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left[ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right]$$

$k$  on poikkileikkauksen taivutustasossa tapahtuvan nurjahduksen kriittinen kerroin

$k_w$  on vääntöön ja puristetun laipan päiden reunaehtoihin liittyvä kerroin

$I_w$  on rakenteen käyristymisjäyhyys

$I_z$  on rakenteen poikittainen jäyhyysmomentti

$I_T$  on rakenteen vääntöjäyhyys

$E$  on materiaalin kimmokerroin

$G$  on materiaalin liukumoduli

$L$  on rakenteen kiepahduspituus

$C_1$  on momentin jakaantumiskerroin

$C_2$  on kuormitustapakerroin

$C_3$  on poikkileikkauksen asymmetriakerroin

$z_g$  on kuorman etäisyys rakenteen vääntökeskiöstä

$z_j$  ottaa huomioon poikkileikkauksen monosymmetrisyyden

Esimerkkilaskelmissa sekundääripalkki sisälsi ulokkeen. Koska rakennetta ei pystytty Vexcelillä mitoittamaan tarkasti, päätettiin sekundääripalkki tiputtaa pois esimerkkilaskelmista. Yksi tapa arvioida ulokepalkin kestävyyttä Vexcelillä olisi lisätä palkin kiepahduspituutta. Sitä kuinka paljon pituutta olisi lisättävä, on mahdoton määrittää tarkasti johtuen kiepahdusilmiön monimutkaisuudesta. Muut esimerkkilaskemat saatiin Vexcelillä laskettua.

Vexcelillä lasketut käyttöasteet rakenteille ovat hyvin lähellä Staadilla laskettuja. Heitot ovat vähäisiä ja ne johtuvat lähinnä rakenteiden kuormien määrityksistä. Ohjelmallisesti ja käsin määriteltäessä rakenteille kohdistuviin kuormiin tulee aina jonkin verran eroavaisuuksia. Alla olevassa taulukossa (taulukko 1) on esitetty rakenteiden maksimi käyttöasteet molemmilla ohjelmilla laskettuna.

TAULUKKO 1. Rakenteiden maksimi käyttöasteet

Rakenne	Vexcel member design	StaadPro v8i
Sekundääripalkki	Ei tulosta.	26 %
Primääripalkki	68,46 %	64 %
Kotelopilari	69,22 %	68 %
Vinoside	71,22 %	72 %

## 6 KEHITYSEHDOTUKSET

Yhtenä osa-alueena työtä tehdessä oli löytää ohjelmasta siinä mahdollisesti olevia vikoja tai puutteita ja raportoida niistä, sekä antaa kehitysehdotuksia. Vexcel on hyvin tehty ohjelma ja varsinaisia vikoja siitä ei löytynyt. Jo työtä aloittaessa oli kehityslistalla palomitoituksen lisääminen, heikomman suunnan rasiutusten huomioon ottaminen myös Vexcelin omaa statiikan laskua käytettäessä ja vääntömitoituksen lisääminen. Jo edellä mainittu ulokepalkin tai maston kiepahdusmitoituksen ongelmat huomattiin vasta esimerkkilaskelmia tehdessä ja näiden mitoitukseen on menetelmä kehitteillä.

Lisäksi primääripalkin esimerkkilaskelmaa tehdessä huomattiin, että rakenteen pistekuormakestävyyden huomioiminen olisi hyvä saada pois päältä profiileita optimoidessa. Käytännössä avoprofiileissa usein käytetään jäykistelevyjä suurien pistekuormien kohdalla, jolloin profiilin ei itsessään tarvitse kestää kyseistä pistekuormaa. Tällä hetkellä optimoitaessa suuria pistekuormia (mukaan lukien tuet) sisältäviä rakenteita, profiilin optimointi ajaa raskaisiin profiileihin pistekuormakestävyyden takia, vaikka todellisuudessa profiililta ei vaadita tällaista pistekuormakestävyyttä. Myös tämä asia on lisätty kehityslistalle.

## 7 POHDINTA

Työn tarkoituksena oli tuottaa käyttöohje terässauvoja mitoittavaan laskentaohjelmaan, sekä tehdä ohjelmalla todellisesta kohteesta havainnollistavia ja ohjelman ominaisuuksia esiintuovia esimerkkilaskelmia. Ohjeen ja esimerkkilaskelmien tarkoituksena on madaltaa kynnystä ottaa käyttöön uusi laskentaohjelma koko teräsrakenteita suunnittelevan henkilöstön osalta. Tuotetuista dokumenteista saatiin hyvät ja varsinkin esimerkkilaskelmat varmasti toimivat juuri tässä tarkoituksessa. Käyttöohjeesta haluttiin kattava, joten luonnollisesti siitä tuli myös hieman pitkä, joka saattaa osaltaan syödä motivaatiota dokumenttiin tutustumiseen. Ohjeesta löytyy kuitenkin hyvä sisällysluettelo, joten ainakin ongelmatilanteiden ja epäselvyyksien ratkomisessa siitä on varmasti hyötyä.

Ohjelmaan toivottiin kehitysehdotuksia ja kaksi tällaista saatiinkin aikaiseksi. Näistä on varmasti hyötyä ohjelman jatkokehityksessä.

Esimerkkilaskemia ja ohjetta tehdessä joutui syventämään Teräsrakenteiden kursseilla opittuja oppeja ja tutustumana teräsrakenteiden mitoittamiseen yksityiskohtaisemmin. Työn tekeminen on ollut varsin mielenkiintoista ja opettavaista. Aiempaa syvällisemmin tuli tutustuttua varsinkin I-profiilien kiepahdusilmiöön, sekä pistekuormakestävyyksien laskentaan.

## LÄHTEET

Lehtimäki V. 2013. Teräsprofiilien laskentapohja. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

Lehtimäki V. 2011. Teräsprofiilien Excel-laskentapohja. Kandidaattityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

Ongelin P. & Valkonen I. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirja. Keuruu: Rautaruukki Oyj.

Ongelin P. & Valkonen I. 2012. Rakenneputket EN 1993 –käsikirja. Keuruu: Rautaruukki Oyj.

SFS-EN 1993-1-1. 2006. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

SFS-EN 1993-1-5. 2007. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Teräsrakenneyhdistys ry. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3-opikirja. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

Ympäristöministeriö. 2007. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-1 Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.

**LIITTEET**

Liite 1. Vexcel member design 1.0 käyttöohje

1 (18)

**VEXCEL MEMBER DESIGN 1.0****Käyttöohje**

Vexcel: Ville Lehtimäki

Ohje: Janne Koivuniemi

18.01.2016



## Sisällysluettelo

<b>1 Yleistä.....</b>	<b>3</b>
<b>2 Mitoitus.....</b>	<b>4</b>
2.1 Rakenne ja kuormat .....	4
2.1.1 Rakennemalli .....	4
2.1.2 Kuormat.....	4
2.2 Valsstatut- ja putkiprofiilit .....	7
2.2.1 Profiilin valinta .....	7
2.2.2 Parametrit.....	8
2.2.2.1 Ulokepalkin kiepahduspituus.....	8
2.2.2.2 Kiertyminen: .....	8
2.2.2.3 Käyristyminen: .....	9
2.2.2.4 Pistekuorman leveys .....	9
2.2.3 Tulokset .....	10
2.2.3.1 Pistekuormakestävyys: .....	10
2.2.4 Optimointi.....	11
2.2.5 Laskennan lisäominaisuudet .....	12
2.3 Hitsatut profiilit.....	13
2.3.1 I-profiilit.....	13
2.3.2 Koteloprofiilit .....	13
2.3.3 Mitoitusparametrit.....	14
2.3.3.1 Shear-lag (leikkausviive): .....	14
2.3.4 Tulokset .....	15
2.3.5 Optimointi.....	15
2.4 Rasitukset .....	17
2.5 Tulostus .....	17
2.6 Palaute.....	17
<b>3 Yksinkertainen mitoitus .....</b>	<b>18</b>

## 1 Yleistä

Vexcel member design on Ville Lehtimäen tekemä teräsprofiilien mitoitusohjelma, jonka alustana toimii Microsoft Excel. Vexcelistä löytyy yksinkertainen mitoitus, jolla voi nopeasti tarkastaa profiilin momentti-, normaalivoima-, ja leikkauskapasiteetit, sekä kattavampi mitoitus, jossa voidaan määritellä rakennemallin ja kuormat ja Vexcel laskee rakenteen statiikan, mitoittaa ja tarvittaessa optimoi profiilin.

Vexcelin taustalla olevaa teoriaa on esitetty tarkemmin Ville Lehtimäen diplomityössä ”Teräsprofiilien laskentapohja”.

Vexcelillä pystyy mitoittamaan yksi- tai moniaukkoisen valssatun tai hitsatun I-profiilin, putkiprofiilit ja hitsatun koteloprofiilin. Profiilikirjastosta löytyy eurooppalaisia, kiinalaisia, venäläisiä ja AISC (American Institute of Steel Construction) profiileja. Profiilikirjastoon on myös mahdollista lisätä muiden maiden profiileja.

Mitoitus tapahtuu Eurocode 3:n mukaan. Kansallisista liitteistä löytyy tällä hetkellä Suomen kansallinen liite. Niitä on kuitenkin mahdollista lisätä tarvittaessa. Hitsattuja profiileita mitoittaessa laskenta perustuu Ruukin Hitsatut Profiilit Käsikirjaan.

Vexcelin oma statiikan laskenta ei ota huomioon heikomman suunnan rasituksia, mutta laskee kuitenkin nurjahduskestävyyden ja stabiiliuden yhdistettyjen vaikutusten suhteen myös heikommassa suunnassa. Vexcelin versioon 1.0 ei myöskään ole sisällytetty vääntö- tai palomitoitusta.

Vexcelissä on paikoittain ohjeita. Ohjeet löytyvät viemällä hiiren kursori ohje –tekstin yläkulmassa olevan punaisen kolmion päälle. Ohjeisiin kannattaa tutustua käytön aikana.

ohje

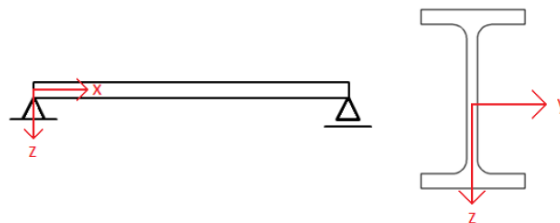
Kattavampaan mitoitukseen pääset etusivun *Mitoitus* –painikkeesta, josta löytyy yläreunasta sivut *Rakenne ja kuormat*, *Valssatut- ja putkiprofiilit*, *Hitsatut profiilit*, *Rasitukset* ja *Tulostus*. *Palaute* –painikkeesta pääset antamaan palautetta ohjelman tekijälle. Tarkemmat ohjeet sivujen käyttämisestä jäljempänä.

Etusivu	Rakenne ja kuormat	Valssatut- ja putkiprofiilit	Hitsatut profiilit	Rasitukset	Palaute
---------	--------------------	------------------------------	--------------------	------------	---------

Vexcel toimii vain Swecon käyttäjätunnuksilla ja käyttäjällä on oltava yhteys Swecon verkkolevyille.

Vexcelissä käytetään desimaalierottimena pilkkua.

Vexcelin koordinaatisto:



## 2 Mitoitus

### 2.1 Rakenne ja kuormat

Rakenteen rasitukset voidaan antaa taulukosta, jos sellainen on saatu jostain statiikkaohjelmasta tai käyttää laskentapohjan omaa statiikkaa. Jos rasitukset annetaan taulukosta, voidaan huomioida myös heikomman suunnan rasitukset (ei vääntöä). Käytettäessä laskentapohjan omaa statiikan laskentaa, huomioidaan vain z- ja x- akselin suuntaiset rasitukset.

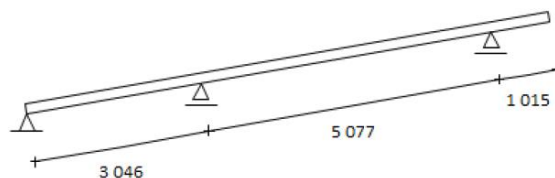
#### 2.1.1 Rakennemalli

Aluksi syötetään taulukkoon rakenteen staattisen rakennemallin tiedot: aukkojen lukumäärä, rakenteen kulma vaakatasoon nähden ( $0-89^\circ$  = palkki,  $90^\circ$  = pilari) aukkojen pituudet, tukityypit ja tukileveydet. Rakenteen mitat voidaan antaa joko palkin suunnassa tai vaakasuunnassa (merkitystä jos palkki vinossa). Tukityypit on esitetty taulukon alla: liukuva nivel, kiinteä nivel, liukutuki, jäykkä tuki, jousituki (annettava jäykkyydet z ja x suunnassa, sekä kiertymäjäykkyys) tai ei tukea (uloke). Oikealla reunalla piirtyy näkyviin palkin/pilarin rakennemalli. Samaan rakennemalliin piirtyy rakenteen suunnittelukuormat kun ne on syötetty.

Alla nivelellisesti tuettu 3-aukkoinen palkki, jonka viimeinen aukko on uloke. Palkki on  $10^\circ$  kulmassa. Mitat on annettu vaakasuunnassa.

Rakenne	ohje								
Aukkojen lukumäärä	3	Kulma	10	astetta	Mitat	Vaakasunnassa	Palkin pituus	9139	mm
Aukkojen pituus (mm)	3000	5000	1000	3000	4000	1			
Tukityyppi	2	1	1	6	5	1	1	1	
Tukileveys	60	60	60	60					
Jäykkyys z (kN/m)	1000	1	1000	0	500				
Jäykkyys x (kN/m)	2000	1	0	0					
Kiertymäjäykkyys (kNm/rad)	1000	1	500	0	2000				

1 = liukuva niveltuki 2 = kiinteä niveltuki 3 = liukutuki 4 = jäykkä tuki 5 = jousituet 6 = ei tukea



#### 2.1.2 Kuormat

Vexceliin voidaan syöttää joko peruskuormitustapauksia, jolloin ohjelma tekee itse kuormitusyhdistelyt tai suoraan mitoituskuormia, jos ne ovat tiedossa. Valinta tehdään asettamalla täppä haluttuun paikkaan (kohta 1). Peruskuormitustapauksia käsiteltäessä on ensin valittava kansallinen liite (oletuksena Suomi), seuraamuluokka ja määräävä muuttuva kuorma (kohta 2). Oikealla näkyy kuormitusyhdistelyssä käytettävät kertoimet (kohta 3). Omanpainon varmuuskertoimenä on oletuksena Suomen kansallisessa liitteessä esitet-

ty 1,15, mutta on harkitseminen arvoista käyttää kertoimen arvoa 1,35. On myös mahdollista käyttää kuormille omia yhdistelykertoimia, ne syötetään taulukossa  $\psi_{0,oma}$  kohtaan. Jollei haluta käyttää omia yhdistelykertoimia taulukossa oltava  $\psi_{0,oma}$  kohdassa nollat. Taulukon alla on näkyvissä kuormitusyhdistelyn kaava.

Kuormia syöttäessä valitaan halutusta kuormasta (pintakuorma, pistekuorma, pistemomentti, normaali-voima) kuormatyyppi (omapaino = G, hyötykuorma = Q, lumi, tuuli) laittamalla täppä haluttuun paikkaan (kohta 4). Tämän jälkeen painetaan oikealta *Lisää* – painiketta.

Ilmestyvälle riville syötetään kuorman arvo ja paikka (mitat samassa suunnassa kuin rakenteen mittojen määrittäminen). Pinta- ja pistekuormille annetaan myös suunta (kohtisuorassa palkkia vasten = 1 tai pystysuorassa = 2). Pintakuormille annetaan vielä kuormitusleveys, jolta pintakuorma kerääntyy (jos kyseessä viiva-kuorma, kuormitusleveys = 1 m). Pintakuormasta saadaan trapetsi- tai kolmiokuorma syöttämällä alku- ja loppupisteille eri arvot.

Murtorajatilan mitoituskuormien lisääminen käy kuten peruskuormitustapauksien, mutta tällöin ei tarvitse valita kuormatyyppiä tai määrääviä muuttuvia kuormia. Tarpeettomat kohdat peittyvät harmaalla rasterillä.

Kuormat tulevat näkyviin rakennemalliin omilla väreillään, mitoituskuormina. Kuormia voidaan poistaa painamalla *Lisää* - painikkeen vierestä *Poista* – painiketta, jolloin Vexcel poistaa alimman kuorman. Jos on useita kuormia ja halutaan poistaa tietty kuorma, voidaan antaa poistettavan kuorman järjestysnumero ylhäältä lukien. Myös koko rakenne ja kuormat on mahdollista nollata painamalla *Rakenteen ja kuormien nollaus* – painiketta sivun ylälaudassa.

Kuva ennen kuormien syöttämistä (kohdat 1-4 esitetty):

**Kuormat** ohje

Syötettävien kuormien tyyppi  
☒ peruskuormitustapauksia ☐ mitoituskuormia MRT

Kansallinen liite: Oletus

Seuraamusluokka: CC2

Määräävä muuttuvakuorma: ☒ Q ☐ Lumi ☐ Tuuli

1 = kohtisuorassa 2 = pystysuorassa

**Kuormitusyhdistely**

	G	Q	Lumi	Tuuli
$\gamma$	1,15	1,5	1,5	1,5
$K_E$	1,0	1,0	1,0	1,0
$\psi_o$		1,0	0,7	0,6
$\psi_{0,oma}$		0	0	0

$1,15 * 1 * G + 1,5 * 1 * 1 * Q + 1,5 * 1 * 0,7 * Lumi + 1,5 * 1 * 0,6 * Tuuli$

**Pintakuormat**  
Pintakuormien lukumäärä: 0

**Pistekuormat**  
Pistekuormien lukumäärä: 0

**Pistemomentit**  
Pistemomenttien lukumäärä: 0

**Normaaliavoimat**  
Normaaliavoimien lukumäärä: 0

**FEM asetukset**  
Elementtien lukumäärä, statikka: 600  
Elementtien lukumäärä, nurjahdus ja värähtely: 60

ohje

Kuva kuormien syöttämisen jälkeen:

**Kuormat** ohje

Syötettävien kuormien tyyppi  
☒ peruskuormitustapauksia ☐ mitoituskuormia MRT

Kansallinen liite Oletus

Seuraamusluokka CC2

Määräävä muuttuvakuorma ☒ Q ☐ Lumi ☐ Tuuli

Kuormitusyhdistely

	G	Q	Lumi	Tuuli
$\gamma$	1,35	1,5	1,5	1,5
$K_d$	1,0	1,0	1,0	1,0
$\psi_0$		1,0	0,7	0,6
$\psi_{0,oma}$		0	0	0

$1,35 * 1 * G + 1,5 * 1 * 1 * Q + 1,5 * 1 * 0,7 * Lumi + 1,5 * 1 * 0,6 * Tuuli$

1 = kohtisuorassa 2 = pystysuorassa

**Pintakuormat**

Pintakuormien lukumäärä 2

Kuormitusleveys 4 m

Kuormatyyppi	Suunta	p1 (kN/m <sup>2</sup> )	p2 (kN/m <sup>2</sup> )	p1 <sub>MRT</sub> (kN/m)	p2 <sub>MRT</sub> (kN/m)	alkupiste (mm)	loppupiste (mm)	$\psi_0$
G	2	3	2	16,20	10,80	0	9000	1
Q	1	5	5	30,00	30,00	0	9000	1

**Pistekuormat**

Pistekuormien lukumäärä 1

Kuormatyyppi	Suunta	F (kN)	F <sub>MRT</sub> (kN)	Paikka (mm)	$\psi_0$
Lumi	2	10	10,50	5000	0,7

**Pistemomentit**

Pistemomenttien lukumäärä 1

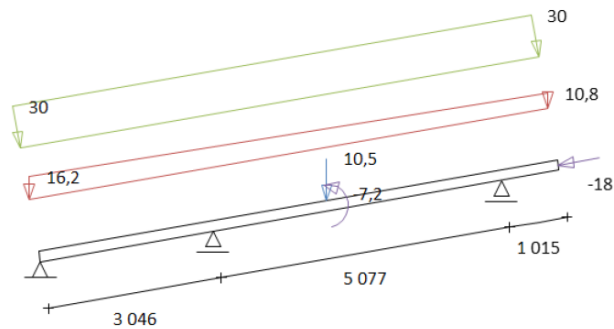
Kuormatyyppi	M (kNm)	M <sub>MRT</sub> (kNm)	Paikka (mm)	$\psi_0$
Tuuli	-8	-7,20	5000	0,6

**Normaalivoimat**

Normaalivoimien lukumäärä 1

Kuormatyyppi	N (kN)	N <sub>MRT</sub> (kN)	Paikka (mm)	$\psi_0$
Tuuli	-20	-18,00	9000	0,6

Kuormat päivittyvät rakennemalliin kuormitusyhdistelmien mukaisilla kertoimilla kerrottuna:



Sivun alareunassa päästään säätämään myös laskentaan käytetyn elementtimenetelmän asetuksia. Tähän harvemmin on tarvetta.

## 2.2 Valssatut- ja putkiprofiilit

### 2.2.1 Profiilin valinta

Aluksi valitaan käytettävä kansallinen liite (Oletus = Suomi), käytettävä profiilityyppi (I-profiili tai putkiprofiili) ja tämän jälkeen mitoitettava profiili. Jos halutaan käyttää Vexcelin optimointityökalua, laitetaan täppä *Optimoi profiili* -laatikkoon (kohta 5). Tämän jälkeen valitaan käytettävä teräslaji. Halutessaan voi antaa oman myötörajan arvon kohtaan  $f_{y,oma}$ .

Kansallinen liite:  ohje

Profiili:  ☒ Optimoi profiili **5**

Teräslaji:   $f_{y,oma}$   MPa

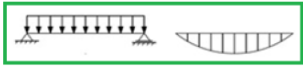
Nurjahdus:

Nurjahduspituus: **Huom! Rakenteessa uloke.**  
 z-akselin suhteen  m  
 y-akselin suhteen  m

Kiepahdus:

Massa  kg/m  
☒ Profiilin omapaino huomioidaan

Momenttipinnan muoto:

 **6**

Kiepahduspituus:  m  $M_{cr,oma}$   kNm **7**  $M_{cr}$   kNm **8**

Kuormituspiste: ☒ Ylälaippa ☐ Vääntökeskiö ☐ Alalaippa

Kuorman suunta: ☒ Kuorma ☐ z-akselin pos. suuntaan ☐ z-akselin neg. suuntaan

Kiertymä: ☒ Kiertymä ☐ vapaa sauvan päissä ☐ estetty sauvan päissä

Käyritymä: ☒ Käyritymä ☐ vapaa sauvan päissä ☐ estetty sauvan päissä

N-M yhteisvaikutus: ☒ N-M yhteisvaikutus ☐ Menetelmä 1 (Lite A) ☐ Menetelmä 2 (Lite B)

Sauvan sivuun siirtyvyys: ☒ Sivunsiirtyvyys ☐ sivuun siirtymätön ☐ molempiin suuntiin ☐ z-akselin suuntaan ☐ y-akselin suuntaan

Taipumaraja:   $L$

Esikorotus:  mm Laske esikorotus pysyvälle kuormalle

Pistekuorman leveys:  mm

Teräksen osavarmuusluvut:  $V_{M0}$    $V_{M1}$



### 2.2.2 Parametrit

Seuraavaksi valitaan mitoituksessa käytettävät parametrit. Rakenne voidaan laittaa nurjahdustuetuksi toisessa, molemmissa tai ei kummassakaan suunnassa. Valitaan myös onko kiepahdus estetty. Oletuksena profiiliin oma paino huomioidaan mitoituksessa. Jos ei kuitenkaan haluta huomioida tätä, voidaan ottaa täppä pois kohdasta *Profiiliin omapaino huomioidaan*.

Nurjahduspituudeksi Vexcel olettaa rakenteen pisimmän aukkomitan. Jos rakenteessa on ulokkeita, ei tämä välttämättä ole todellinen nurjahduspituus. Voit syöttää nurjahduspituuden itse tai antaa Vexcelin laskea rakennemallin mukaisen nurjahduspituuden *Laskennan lisäominaisuudet* –painikkeen takaa avautuvasta *Nurjahdus* välilehdestä (katso kohta 2.2.5).

Myös kiepahduspituudeksi Vexcel olettaa rakenteen pisimmän aukkomitan. Voit halutessasi antaa eri kiepahduspituuden. Jos rakenteessa on kiepahdustuet on kiepahduspituus tällöin tukien välinen etäisyys.

#### 2.2.2.1 Ulokepalkin kiepahduspituus

Vexcel käyttää kriittisen kiepahdusmomentin laskemiseen kaavaa, joka on tarkoitettu päästään haarukkatuetulle rakenteelle. Tästä johtuen ulokepalkkeja mitoittaessa täytyy ehdottomasti käyttää pidempää kiepahduspituutta.

Koska momenttipinnan muoto vaikuttaa rakenteen kiepahduskestävyyteen, muodoksi valitaan lähinnä todellisuutta oleva muoto (*Rasitukset* –välilehdeltä pääset tarkastelemaan rakenteen rasituskuvioita, kun rakenne ja kuormat on määritetty) tai varmalla puolella oleva muoto.

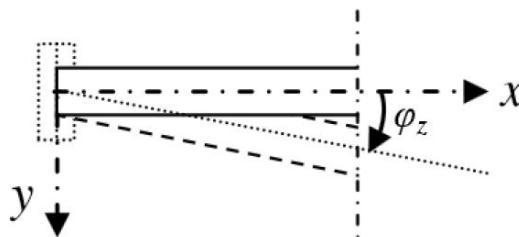
Kuormituksen vaikuttaessa rakenteen ylälaipassa ja kohdistuessa kohti neutraaliakselia on varmalla puolella oleva momenttikuvaaja ”tasainen kuorma”. Jos kuormituksen vaikutuspistettä ei huomioida tai kuorma vaikuttaa rakenteen neutraaliakselilla tai laipassa profiilista pois-päin (roikotus), on varmalla puolella oleva momenttipinnan muoto ”momentit palkin päissä”.

Kun momenttipinnan muoto on valittu vetovalikosta, piirtyy alle sitä vastaava kuormitus ja momenttipinnan kuvaaja (kohta 6).

Halutessa voidaan antaa kriittiselle kiepahdusmomentille oma arvo kohtaan  $M_{cr,oma}$ , muutoin kohdassa on oltava 0 (kohta 7). Tämän jälkeen valitaan mihin rakenteessa olevat kuormat vaikuttavat, ja kuormien suunta. Tämän jälkeen valitaan rakenteen päiden tuentaehdot. Kiertymä ja käyristymä voivat olla joko vapaat tai estetyt päissä, varmalla puolella on jos ne pidetään vapaana. Kun kiepahdukseen vaikuttavat parametrit on valittu, nähdään rakenteen kriittinen kiepahdusmomentti kohdasta  $M_{cr}$  (kohta 8).

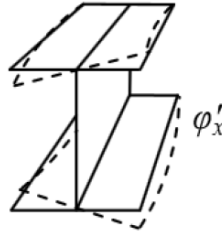
#### 2.2.2.2 Kiertyminen:

Tarkoittaa xy-tasossa tapahtuvaa sauvan pään kiertymää:



### 2.2.2.3 Käyristyminen:

Tarkoittaa sauvan pään poikkileikkauksen käyristymistä väännön seurauksena:



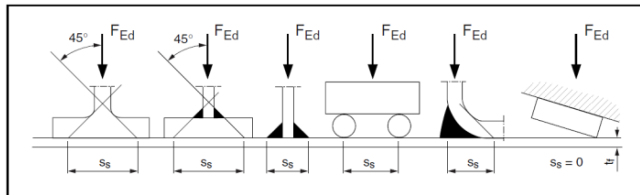
Seuraavaksi valitaan normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutuksen laskentamenetelmä. Suomessa käytetään menetelmää 2, jos se soveltuu tehtävään. Vaihtoehtoista menetelmää 1 voidaan myös käyttää. Valittaessa menetelmä 2 on vielä valittava, onko rakenne sivuun siirtyvä vai ei. Menetelmä 1 on käsin laskiessa työläämpi.

Pistekuorman leveytenä käytetään eurokoodin mukaista arvoa.

### 2.2.2.4 Pistekuorman leveys

Pistekuorman leveys esitetään eurokoodissa termillä  $s_s$ , alla olevassa kuvassa on esitetty pistekuormaleveyksiä eri tapauksille.

Pistekuormalle määritetään aluksi kuvan 2.35 perusteella ns. jäykän tukipinnan pituus  $s_s$ , eli pituus jolle laipan päällä oleva pistekuorma laskennallisesti kohdistuu. Kuorman oletetaan tällöin leviävän  $45^\circ$  kulmassa. Mitta  $s_s$  saa kuitenkin olla korkeintaan uuman korkeus  $h_w$  [12,13].



Kuva 2.35 Pistekuorman jakaantumispituus

Jos kuormaa välittävä kantopinta muodostaa kulman laipan pinnan kanssa (kuva 2.35, viimeinen tapaus), pituuden  $s_s$  arvoksi valitaan  $s_s = 0$  [12,13].

Kuvan perusteella pistekuormaleveydelle voidaan johtaa seuraavat kaavat:

$$s_s = t_w + 2 \cdot t_f + 2 \cdot (2 - \sqrt{2}) \cdot r_i \quad (\text{kuorma valssatulta profiililta})$$

$$s_s = t_w + 2 \cdot t_f + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \quad (\text{kuorma hitsatulta profiililta})$$

$$s_s = 2 \cdot t + (2 - \sqrt{2}) \cdot r_i \quad (\text{kuorma rakenneputkelta, pyörästys täytetty hitsillä})$$

Teräksen osavarmuusluvut ovat oletuksena 1, mutta myös näitä on mahdollista vaihtaa.



Käyttörajan mitoitus varten annetaan vielä taipumaraja (voidaan valita alavetoalvikosta tai antaa oma) ja mahdollinen esikoroitus (voidaan myös antaa Vexcelin laskea esikoroitus pysyvän kuorman osuudelle).

Jos profiili on poikkileikkausluokkaa 4, voidaan teholliset poikkileikkaussuureet iteroida.

### 2.2.3 Tulokset

Oikealta nähdään rakenteen poikkileikkausluokat eri rasiusten suhteen, käyttöasteet ja eurokoodin kohta, johon laskenta perustuu. Jos käyttöaste on yli 100 %, näkyy kohdassa punainen rasti ja solu on maalattu punaiseksi. Jos käyttöaste on 80 % - 100 %, näkyy kohdassa keltainen huutomerkki. Alla on painike *Katso mitoitusparametreja*, josta halutessaan pääsee tarkastelemaan mitoituksessa käytettyjä parametreja.

Tulokset	PL	Käyttöaste %	Eurokoodi:
Vetokestävyys		0,00	1993-1-1, 6.2.3
Puristuskestävyys	2	5,23	1993-1-1, 6.2.4
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	2	99,36	1993-1-1, 6.2.5
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	2	0,00	
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	2	0,00	
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		32,70	1993-1-1, 6.2.6
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		0,00	1993-1-5, 5
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	2	0,00	1993-1-1, 6.2.8
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	2	0,00	1993-1-5, 7.1
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	2	0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys y-akselin ympäri	2	0,00	1993-1-1, 6.2.9
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys z-akselin ympäri	2	0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys yhteisvaikutus	2	0,00	
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	2	176,24	1993-1-1, 6.2.16, Liite A ja B
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	2	101,48	
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys y-akselin ympäri	2	0,00	1993-1-1, 6.2.10
Taivutus- ja leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys z-akselin ympäri	2	0,00	
Taivutus- ja leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys yhteisvaikutus	2	0,00	
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	2	7,16	1993-1-1, 6.3.1
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	2	13,66	
Vääntönurjahduskestävyys	2	8,12	
Kiepahduskestävyys	2	153,32	1993-1-1, 6.3.2
Pistekuormakestävyys		45,48	1993-1-5, 6
Taipuma z-akselin suunnassa		254,08	

#### Huomioita:

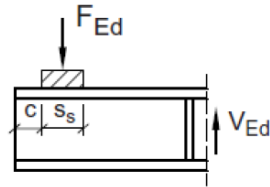
- Leikkauslommahduskestävyys lasketaan ainoastaan I-profiileille ja laskennassa käytetään ei-jäykkää päätyjäykistettä.
- Pistekuormakestävyys lasketaan ainoastaan I-profiileille, eikä siinä huomioida momentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutusta.
- Pyöreitä putkiprofiileita ei lasketa PL4:ssä.

Katso  
mitoitusparametreja

#### 2.2.3.1 Pistekuormakestävyys:

Pistekuormakestävyteen vaikuttavat pistekuorman leveys ja tukileveydet. Vexcel mitoittaa profiilit ilman jäykisteitä ja usein mitoittavana kohtana on pistekuormakestävyys rakenteen päissä, jossa Vexcel olettaa eurokoodissa esitetyn c – mitan nolllaksi. Käytettäessä jäykisteitä ja c-mitan ollessa jotain muuta kuin nolla voidaan siis käyttää profiilia jonka pistekuorman käyttöaste on yli 100 %. Tällöin on kuitenkin aina tutkittava pistekuormakestävyys erikseen.

11



### 2.2.4 Optimointi

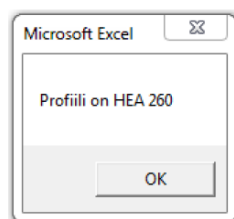
Optimointi tarkoittaa keveimmän mitoitus ehdot täyttävän profiilin hakua valittujen profiilien joukosta.

Aluksi valitaan hakukohdat ja profiilien lukumäärä hakukohdista eteen- ja taaksepäin, joista Vexcel etsii kevyintä profiilia. Hakukohdat valitaan vasemmalta *Profiili* kohdasta, valitsemalla haluttu profiili ja painamalla *Valitse hakukohta* -painiketta *Optimoinnin* alta. Laskettavien profiilien lukumäärä määräytyy profiilivetovalikon mukaan. Jos halutaan nopeuttaa optimointia ja laskea esimerkiksi IPE-, HEA ja HEB profiileja, kannattaa siis hakukohtiin valita yksi jokaista profiilityyppiä ja pienentää laskettavien profiilien lukumäärää.

Keveimmälle profiilille voidaan myös antaa ehtoja käyttöasteiden, poikkileikkauksen tai poikkileikkausluokan mukaan. Tämän jälkeen painetaan *Etsi profiili* -painiketta ja Vexcel optimoi profiilin. Jos haluat tarkastella laskettuja profiileita, niiden käyttöasteita ja massoja, pääset katsomaan näitä *Katso laskentatulokset* -painikkeella. Voit katsoa tuloksista optimoidun profiilin käyttöasteet.

Profiilin optimointi		ohje		Hakukohdat:		3																				
<input type="button" value="Etsi profiili"/>	<input type="button" value="Katso laskentatulokset"/>	<input type="button" value="Valitse hakukohta"/>	<input type="button" value="Tyhjennä hakukohdat"/>																							
Profiilien lukumäärä hakukohdasta eteenpäin	<input type="text" value="5"/>	$h_{min}$	<input type="text" value="1 mm"/>	<table border="1"> <tr><td>12</td><td>IPE 330</td></tr> <tr><td>24</td><td>HEA 200</td></tr> <tr><td>48</td><td>HEB 200</td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </table>			12	IPE 330	24	HEA 200	48	HEB 200														
12	IPE 330																									
24	HEA 200																									
48	HEB 200																									
Profiilien lukumäärä hakukohdasta taaksepäin	<input type="text" value="0"/>	$h_{max}$	<input type="text" value="800 mm"/>																							
Maksimi käyttöaste mrt	<input type="text" value="90"/>	$b_{min}$	<input type="text" value="1 mm"/>																							
Maksimi käyttöaste krt	<input type="text" value="100"/>	$b_{max}$	<input type="text" value="500 mm"/>																							
Sallitut PL:t	<input type="text" value="Kaikki sallittu"/>	$t_{f,min}$	<input type="text" value="1 mm"/>																							
		$t_{w,min}$	<input type="text" value="1 mm"/>																							

Optimoitu profiili:



11

Laskentatulokset:

1	Profiili	Teräslaji	Massa (kg/m)	PL	Käyttöaste mrt(%)	Käyttöaste krt(%)	h	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>				
2	HEA 200	24 S355	42,3	2	176,24	254,08	190	200	10	6,5				
3	HEA 220	25 S355	50,5	2	123,95	173,70	210	220	11	7				
4	HEA 240	26 S355	60,3	2	88,47	121,28	230	240	12	7,5				
5	HEA 260	27 S355	68,2	3	73,91	90,20	250	260	12,5	7,5				
6	HEA 280	28 S355	76,4	3	59,81	69,08	270	280	13	8				
7	IPE 330	12 S355	49,1	4	177,43	79,83	330	160	11,5	7,5				
8	IPE 360	13 S355	57,1	4	128,56	57,85	360	170	12,7	8				
9	IPE 400	14 S355	66,3	4	95,05	40,76	400	180	13,5	8,6				
10	IPE 450	15 S355	77,6	4	70,71	28,00	450	190	14,6	9,4				
11	IPE 500	16 S355	90,7	4	52,55	19,65	500	200	16	10,2				
12	HEB 200	48 S355	61,3	1	99,92	165,32	200	200	15	9				
13	HEB 220	49 S355	71,5	1	75,04	116,63	220	220	16	9,5				
14	HEB 240	50 S355	83,2	1	57,05	84,01	240	240	17	10				
15	HEB 260	51 S355	93	1	46,00	63,52	260	260	17,5	10				
16	HEB 280	52 S355	103,1	1	38,01	49,28	280	280	18	10,5				

Palaa mitoitukseen

### 2.2.5 Laskennan lisäominaisuudet

*Laskennan lisäominaisuudet* –painikkeesta päästään tarkastelemaan rakenteen värähtelyä, nurjahdusta ja optimoimaan kk-jakoa. Nurjahdus välilehdeltä voidaan laskea arvio rakenteen nurjahduspituudelle, rakennemallin mukaan määriteltynä. Tämän jälkeen voidaan painaa *Syötä pituudet taulukkoon* –painiketta, jolloin Vexcel muuttaa rakenteen nurjahduspituuden mitoitusparametreihin. Kun nurjahduspituus on laskettu, voidaan nurjahdusmuotoja tarkastella Vexcelin *Rasitukset* -sivulta.

*Värähtely* –välilehdeltä voidaan laskea rakenteen ominaistajuus antamalla värähtelevä massa (kg/m). Jos tarkastellaan pelkän profiilin värähtelyä, annetaan profiilin oma massa. Vexcelin *Rasitukset* –sivulta voidaan tarkastella värähtelyn ominaismuotoa.

Optimaalinen kk-jako voidaan etsiä *Kuormitusleveys* –välilehdeltä painamalla *Etsi kuormitusleveys* –painiketta. Tämän jälkeen Vexcel laskee kuormitusleveyden, jolla rakenne kestää. Kun laskenta on valmis voidaan painaa *Syötä uusi kuormitusleveys* –painiketta ja Vexcel syöttää kuormitusleveyden *Rakenne ja kuormat* –sivulle.

Laskenta voidaan tallentaa tekstiedostoksi painamalla *Luo tekstiedosto* -painiketta. Myöhemmin laskentaa voidaan jatkaa avaamalla tallennettu tekstiedosto Vexcelin etusivulla olevasta *Avaa tekstiedosto* –painikkeesta.

2.3 Hitsatut profiilit

Aluksi valitaan kansallinen liite, profiilityyppi (I-, tai koteloprofiili) ja teräslajityyppi (eurooppalaiset, kiinalaiset, venäläiset tai amerikkalaiset teräslajit). Levyjen paksuuden vaikutus myötörajaan huomioidaan automaattisesti. Profiilivalinnan vieressä näkyvissä suositellut levypaksuudet, joita hitsatuissa profiileissa tulisi käyttää. Mitoitus on kuitenkin mahdollinen muillekin levypaksuuksille.

2.3.1 I-profiilit

Uumalle ja laipoille annetaan lujuus, jos käytetään eri lujuutta laipoissa ja uumassa, on kyseessä ns. hybridipalkki. Hybridipalkin mitoitus toimii ainoastaan molempien akseleiden suhteen symmetrisille I-profiileille, jotka ovat poikkileikkausluokkaa 1,2 tai 3. Tämän jälkeen taulukkoon syötetään poikkileikkauksen mitat ja profiilin hitsin a-mitta. Viereen piirretty kuva profiilin poikkileikkauksesta.

Kansallinen liite: Oletus

Profiili: Hitsattu I-profiili

Teräslajityyppi: Eurooppalaiset teräslajit

ohje

Suosittelvat levypaksuudet:  
5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 80, 100

Hitsattu I-Profiili:

Uuman lujuus	$f_{y,w}$	S355	355 MPa
Laipan lujuus	$f_{y,f}$	S355	355 MPa ≤ 710 MPa
Korkeus	$h$	300 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yf}$	200 mm	$h_w/t_w$ 34,50 < 226,96
Alalaipan leveys	$b_{af}$	200 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	8 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{r,yf}$	12 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{r,af}$	12 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	4 mm ≥ 3,00 mm	

Hitsattu koteloprofiili:

Teräslaji	$f_y$	S355	355 MPa
Korkeus	$h$	300 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yf}$	160 mm	
Alalaipan leveys	$b_{af}$	160 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	5 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{r,yf}$	10 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{r,af}$	10 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	3 mm ≥ 3,00 mm	
Uumien sisäreunojen etäisyys	$b$	120 mm ≤ 141,51 mm	

Hybridipalkin mitoitus toimii ainoastaan kaksoisymmetriselle I-profiilille poikkileikkausluokissa 1,2 ja 3.

2.3.2 Koteloprofiilit

Valitaan käytettävä teräslaji ja poikkileikkauksen mitat, sekä profiilin hitsin a-mitta. Uumien sisäreunojen etäisyydelle Vexcel ilmoittaa maksimimitan, jolla hitsi vielä mahtuu laippojen ulkonemaan.

Kansallinen liite: Oletus ohje

Profiili: Hitsattu koteloprofiili Suositeltavat levypaksuudet: 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 80, 100

Teräslajityyppi: Eurooppalaiset teräslajit

**Hitsattu I-Profiili:**

Uuman lujuus	$f_{y,w}$	S355	355 MPa
Laipan lujuus	$f_{y,l}$	S355	355 MPa ≤ 710 MPa
Korkeus	$h$	300 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yl}$	200 mm	$h_w/t_w$ 34,50 < 226,96
Alalaipan leveys	$b_{al}$	200 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	8 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{r,yl}$	12 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{r,al}$	12 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	4 mm ≥ 3,00 mm	

Hybridipalkin mitoitus toimii ainoastaan kaksoisymmetrisellä I-profiililla peikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3.

**Hitsattu koteloprofiili:**

Teräslaji	$f_y$	S355	355 MPa
Korkeus	$h$	300 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yl}$	160 mm	
Alalaipan leveys	$b_{al}$	160 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	5 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{r,yl}$	10 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{r,al}$	10 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	3 mm ≥ 3,00 mm	
Uumien sisäreunojen etäisyys	$b$	120 mm ≤ 141,51 mm	

### 2.3.3 Mitoitusparametrit

Mitoitus on hyvin samankaltainen valssattujen- ja putkiprofiilien kanssa. Mitoitusparametrit ovat pitkälti samat. Uutena parametrina profiilitietojen lisäksi Shear-lag ilmiön huomioon ottaminen. Ilmiö voidaan joko ottaa huomioon tai jättää huomioimatta.

#### 2.3.3.1 Shear-lag (leikkausviive):

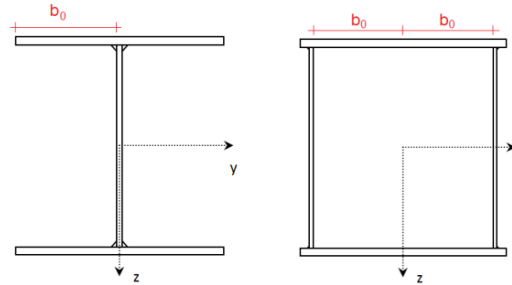
Leveälaippaisissa palkeissa laipan osat, jotka ovat kaukana uumasta jäävät jälkeen uuman kohdalla tapahtuvasta siirtymästä leikkausmuodonmuutoksista johtuen. Tätä ilmiötä kutsutaan leikkausviiveilmiöksi. Jos leikkausviive huomioidaan, käytetään laippojen tehollista leveyttä profiilin mitoituksessa.

Leikkausviiveilmiön voi jättää huomioimatta, jos:

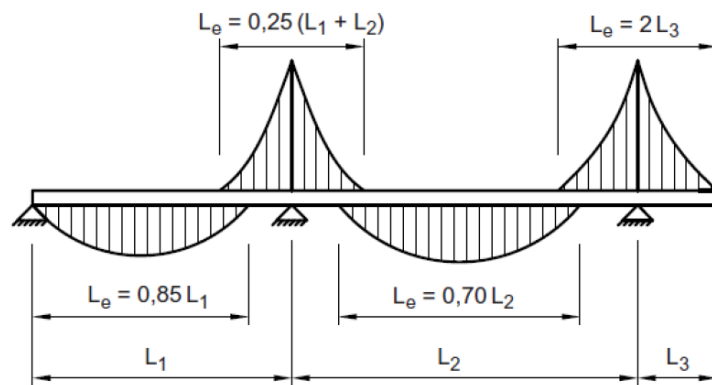
$$b_0 < \frac{L_e}{50}$$

missä  $b_0$  on laipan leveys, joksi otetaan yhdeltä reunalta tuetun taso-osan tapauksessa ko. taso-osan koko leveys, ja kahdelta reunalta tuetun taso-osan tapauksessa puolet ko. taso-osan leveydestä, alla olevan kuvan mukaisesti.

15



$L_e$  on taivutusmomentin nollakohtien välinen etäisyys.



### 2.3.4 Tulokset

Tulokset näkyvät kuten valssattujen- ja putkiprofiilien mitoituksessa, sillä erotuksella että mitoituksessa käytetyt eurokoodin kohdat on korvattu Hitsatut profiilit käsikirjan kohdilla.

### 2.3.5 Optimointi

Hitsattujen profiilien optimointi toimii molempien akselien suhteen symmetrisille profiileille. Teräslajina käytetään mitoitusaulukossa syötettyä teräslajia. Optimointityökalu käyttää teräslevyjen paksuuksina suositeltuja levypaksuuksia.

15



Profiilin optimointi		ohje	
Etsi rajat		Etsi profiili	
Leveyden muutos $\Delta b$	5 mm	$h_{min}$	285 mm
Korkeuden muutos $\Delta h$	5 mm	$h_{max}$	360 mm
Maksimi käyttöaste mrt	90	$b_{min}$	95 mm
Maksimi käyttöaste krt	100	$b_{max}$	170 mm
Sallitut PL:t	Kaikki sallittu	$c$	20 mm
$t_{r,min}$	8 mm	$t_{r,max}$	12 mm
$t_{w,min}$	8 mm	$t_{w,max}$	12 mm

Laskettujen profiilien lukumäärä: 2304      Laskettavien profiilivaihtoehtojen lukumäärä: 2304

Aluksi on valittava rajat, jonka sisältä optimaalisinta profiilia haetaan. Profiilia optimoidessa Vexcel laskee kaikki mahdolliset profiilit annettujen rajojen sisällä. Laskettavien profiilien lukumäärä näkyy *Optimointi* –kohdan alareunassa. Mitä enemmän laskettavia profiileja on, sitä kauemmin laskenta kestää.

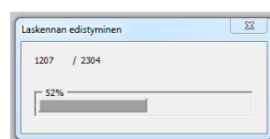
Rajoina on profiilin korkeuden ja leveyden minimi ja maksimi, sekä uuman ja laippojen paksuuden minimi ja maksimi. Määritellään myös profiilin leveyden ja korkeuden muutos, joka tarkoittaa väliä jolla profiilin mitat muuttuvat annettujen rajojen sisällä. Mitä pienempi muutos on, sitä enemmän laskettavia profiileja.

Jos profiilin koosta ei ole tietoa voidaan antaa Vexcelin muodostaa rajat painamalla *Etsi rajat* –painiketta. Vexcel muodostaa alustavan profiilin ja syöttää sen tiedot mitoituskeinoon. Tämän jälkeen Vexcel muodostaa profiilin mittojen mukaan rajat, joiden sisältä optimaalisin profiili todennäköisesti löytyy. Halutessaan voidaan vielä muokata rajoja ennen profiilin etsimistä.

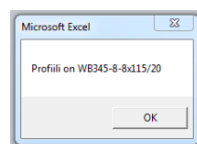
*Etsi profiili* toiminnolla ei aina löydy ehdot täyttävää profiilia. Tällöin rajat on määriteltävä itse. Tämä ilmenee yleensä lyhyen jännevälän rakenteilla, joissa pistekuormakestävyys on mitoittavana tekijänä.

Muita ehtoja, jotka halutaan profiilin täyttävän, ovat sallitut käyttöasteet ja poikkileikkausluokat. Profiilien poikkileikkausluokat suositellaan rajoittamaan poikkileikkausluokkiin 1, 2 ja 3. Taulukossa parametri  $c$  on koteloprofiilin laipan ulkonema. Kun rajat on määriteltä painetaan *Etsi profiili* –painiketta ja Vexcel etsii kevyimmän profiilin, joka täyttää annetut ehdot rajojen sisällä.

Optimointi käynnissä:



Optimoitu koteloprofiili:



## 2.4 Rasitukset

*Rasitukset* –sivulla nähdään rakenteen rakennemalli kuormineen. Nähtävissä ovat myös normaalivoima-, leikkausvoima-, taivutusmomentti- ja taipumakuvaajat, sekä minimi- ja maksimiarvot edellä mainituille. Jos on käytetty Vexcelin omaa statiikan laskentaa, ovat y-akselin suuntainen leikkausvoimakuvaja ja z-akselin ympäri vaikuttava momenttikuvaja peitetty harmaalla rasterilla, sillä tämän suuntaisia rasituksia ei Vexcelin statiikan laskenta käsittele. Jos taas on käytetty *Rasitukset taulukosta* –vaihtoehtoa *Rakenne ja kuor-mat* –sivulla ja heikomman suunnan rasituksia on lisätty, ovat kohdat auki ja kuvaajat näkyvissä.

Sivulta nähdään myös tukireaktiot ja rasitusten yhdistettyjen vaikutusten paikat ja arvot.

Oletuksena *Rasitukset* –sivulla on näkyvissä murtorajatilän kuormitusyhdistely, mutta myös muita kuormitusyhdistelmiä ja kuormitustapauksia on mahdollista tarkastella. *Kuormitustapaus tai –yhdistelmä* –kohdasta voidaan valita tarkasteltava tapaus tai yhdistelmä. Valitessa esim. G mrt, rasituksina näkyvät pelkän omanpainon aiheuttamat rasitukset murtorajatilassa. Taipuma esitetään aina käyttörajatilän mukaan.

Jos laskennan lisäominaisuuksista on laskettu nurjahdusta tai värähtelyä näkyvät sivun alalaidassa nurjahdus- ja värähdysmuodot.

## 2.5 Tulostus

*Tulostus* –sivulta on mahdollista tulostaa rakenteesta joko suppea tai laaja tulostus. Suppea tulostus on yhdelle A4-paperille mahdutettuna laskennan ja profiilin oleelliset tiedot. Laajemmassa tulostuksessa on näkyvissä rasituskuviot ja käyttöasteet kaikille lasketuille kestävyyksille. Molemmissa tapauksissa on täytettävänä kenttinä rakennelaskelman numero, työn numero, kohde, tekijä, päiväys ja laskennan sisältö. Tulostus on mahdollista tehdä eri kielillä (Suomi, Englanti, Venäjä). Tulostus onnistuu valitsemalla haluttu tulostus painamalla *Laaja tulostus* – tai *Suppea tulostus* –painiketta, jonka jälkeen Excelistä File -> Print. Tulostusalue on valmiiksi määriteltynä.

## 2.6 Palaute

Vexcelistä löytyy välilehtien vierestä *Palaute* –painike. Tästä pääset antamaan palautetta ohjelman tekijälle. Jos ohjelmasta löytyy vikoja tai puutteita, voi niistä raportoida tätä kautta.



### 3 Yksinkertainen mitoitus

Yksinkertaisella mitoituksella voit tarkastaa profiilin momentti-, normaalivoima- ja leikkauskapasiteetit. Yksinkertainen mitoitus ei huomioi rasitusten yhdistettyjä vaikutuksia, pistekuormakestävyyttä, eikä taipumaa.

Aluksi valitaan haluttu profiilityyppi, valssattu profiili, hitsattu I-profiili tai hitsattu koteloprofiili. Tämän jälkeen määritetään itse profiili. Hitsattua koteloprofiilia mitoittaessa Vexcel antaa uumien sisäreunoille minimietäisyyden, jolla valittu hitsi mahtuu laippojen ulkonemaan.

Seuraavaksi valitaan teräslaji ja mitoituksessa käytettävät parametrit. Nurjahduspituudelle voidaan syöttää oma arvio tai antaa ohjelman laskea se pilarin pituuden ja päiden tuentojen perusteella.

Kun profiili ja parametrit on valittu, nähdään oikealla reunalla profiilin poikkileikkaustiedot ja kestävyudet. Yksinkertainen mitoitus ei laske poikkileikkausluokkaan 4 kuuluville profileille puristus- tai nurjahduskestävyyksiä. Kestävyyksien oikealle puolelle voidaan antaa profiiliin kohdistuvat kuormitukset ja Vexcel laskee profiilin käyttöasteet.

Alla on niveällisesti päistään tuettu, tasaisen kuorman kuormittama HEA180 profiili, jonka pituus on 4 m. Teräslajina S355. Kuormituksina on momenttia, normaalivoimaa ja leikkausvoimaa.

**SWECO**  
Yksinkertainen mitoitus

Profiili: Valssattu profiili

Valssattu profiili: Eurooppalaiset I-profiilit

HEA 180

Hitsattu profiili: Eurooppalaiset teräslajit

Teräslajityyppi: Eurooppalaiset teräslajit

Korkeus h: 113 mm

Ylälaipan leveys  $b_{yl}$ : 113 mm

Alälaipan leveys  $b_{al}$ : 113 mm

Uuman paksuus  $t_w$ : 5 mm

Ylälaipan paksuus  $t_{f,yl}$ : 5 mm

Alälaipan paksuus  $t_{f,al}$ : 5 mm

Hitsin leveys  $a$ : 5 mm

Uumien sisäreunojen etäisyys  $b$ : 90,837864 mm  $\leq$  153,86 mm

Teräslaji: S355

Kiepahduspituus: 4 m

Momenttipinnan muoto: Tasainen kuorma

Kuormituspaikka: Ylälaippa

Pilarin pituus: 4 m

Pilarin päiden tuenta: Vahvempi akseli y-y: nivo-nivel, nivo-jäykä, jäykkä-jäykä; Heikompi akseli z-z: nivo-nivel, nivo-jäykä, jäykkä-jäykä

Nurjahduspituus: Vahvemman akselin suhteen y-y: 4,00 m; Heikomman akselin suhteen z-z: 4,00 m

Oma arvio: 0 m

Oma arvio: 0 m

Yms: 1

Yms: 1

Oma arvio on oikea, jos haluan käyttää tarkennus nurjahduspituutta.

**Poikkileikkaustiedot:**

Massa: 35,50 kg/m

Pinta-ala: 4525,00 mm<sup>2</sup>

Neliömomentti  $I_y$ : 25102883 mm<sup>4</sup>

Neliömomentti  $I_z$ : 9246046 mm<sup>4</sup>

Kimmoinen taipuvastus  $W_{y,el}$ : 293601 mm<sup>3</sup>

Plastinen taipuvastus  $W_{y,p}$ : 324833 mm<sup>3</sup>

Kimmoinen taipuvastus  $W_{z,el}$ : 102734 mm<sup>3</sup>

Plastinen taipuvastus  $W_{z,p}$ : 156494 mm<sup>3</sup>

**Momentti:**

Momentti  $M_y$ : 81,22 kNm

PL: 2

Poikkileikkauksen taipuvastuskestävyys: 115,32 kNm

Kiepahdus: 81,22 kNm

Momentti  $M_z$ : 55,56 kNm

PL: 2

**Kuormitus:**

Momentti  $M_y$ : 50 kNm

Momentti  $M_z$ : 5 kNm

**Käyttöasteet:**

Momentti  $M_y$ : 61,56 %

Momentti  $M_z$ : 6,16 %

**Normaalivoima:**

Puristusvoima: 729,70 kN

Vetovoima: 1606,38 kN

PL: 2

Poikkileikkauksen puristuskestävyys: 1256,34 kN

Nurjahdus y-y: 1256,34 kN

Nurjahdus z-z: 729,70 kN

**Kuormitus:**

Normaalivoima: 600 kN

**Käyttöasteet:**

Normaalivoima: 82,23 %

**Leikkaus:**

Leikkausvoima  $V_y$ : 238,16 kN

Leikkausvoima  $V_z$ : 740,52 kN

Poikkileikkauksen leikkauskestävyys z: 238,16 kN

Leikkauslommahduskestävyys: 238,16 kN

**Kuormitus:**

Leikkausvoima  $V_y$ : 75 kN

Leikkausvoima  $V_z$ : 75 kN

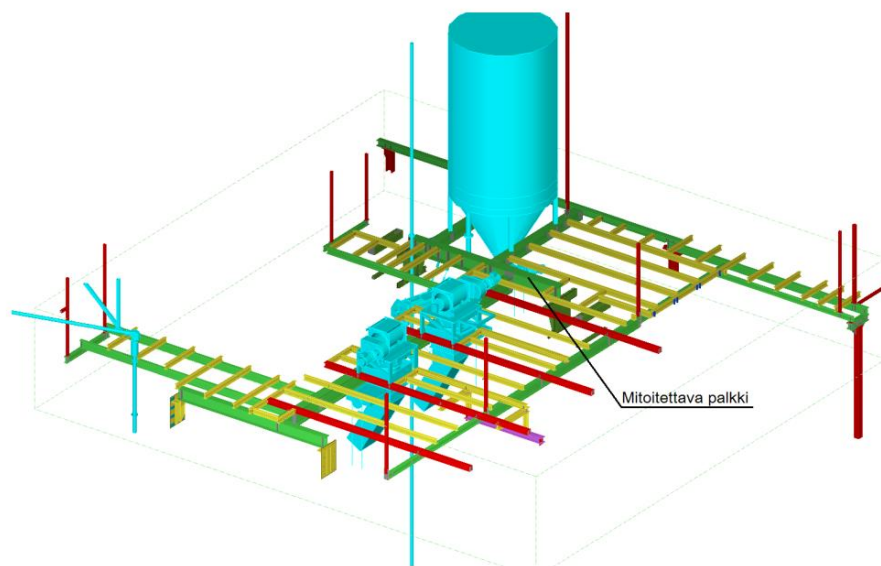
**Käyttöasteet:**

Leikkausvoima  $V_y$ : 31,49 %

Leikkausvoima  $V_z$ : 10,13 %

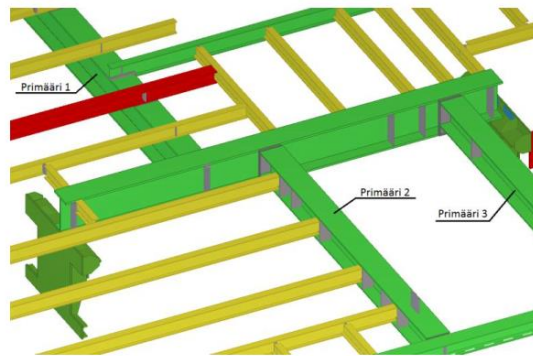
## Vexcel 1.0 esimerkkilaskelmat

Hoitotason hitsattu primääripalkki



### Mitoitettava rakenne

Mitoitettavana rakenteena on 1-aukkoinen niveltuettu ritilätason primääripalkki, joka kannattelee myös laitetukina toimivia palkkeja. Palkki on tuettu päistään betonipilareihin kiinnitetyillä konsoleilla. Mitoitettavalle palkille kerääntyy kuormaa ympärillä olevilta ritilätasoilta ja laitteilta. Suurin osa palkin kuormista tulee primääreiltä 1, 2 ja 3 pistekuormina. Palkille tulee kuitenkin jonkin verran tasaista kuormaa. Alkupäässä kuormitusleveytenä 730 mm ja loppupäässä 1080 mm. Palkkiin alalaippaan kohdistuu myös kaksi piste-kuormaa roikotuksista. Kohde sijaitsee Suomessa.



Mitoitettava palkki: WI500-8-25x300  
 Jänneväli: 5636 mm  
 Teräslaji: S355J2  
 Tason hyötykuorma:  $q_Q = 3 \text{ kN/m}^2$   
 Tason omapaino:  $q_G = 1 \text{ kN/m}^2$

Mitoitettavan palkin pistekuormat:

Primääri 1: WI500-6-25x300

$F_{G,1} = 62,2 \text{ kN}$

$F_{Q,1} = 84,9 \text{ kN}$

Primääri 2: HEA340

$F_{G,1} = 28,2 \text{ kN}$

$F_{Q,1} = 204,2 \text{ kN}$

Primääri 3: HEA340

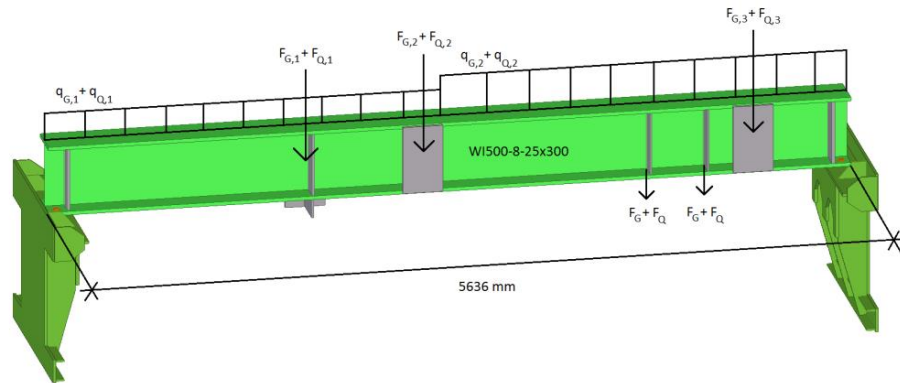
$F_{G,1} = 20,1 \text{ kN}$

$F_{Q,1} = 187,1 \text{ kN}$

Roikotukset:

$F_G = 3 \text{ kN}$

$F_Q = 3 \text{ kN}$



Murtorajatilassa kuormien resultantti on 888,6 kN.

## Mitoitus

Mitoitetaan primääripalkki Vexcelillä. Etusivulta valitaan *Mitoitus*.

### Rakenne ja kuormat

Aluksi syötetään palkin rakenne taulukkoon. Syötetään aukkojen lukumäärä ja pituudet sekä tukien tyypit. Tukityypit ovat nähtävissä taulukon alapuolella. Tukileveytenä on käytetty konsolin tehollista tukileveyttä.

**Rakenne** ohje

Aukkojen lukumäärä  Kulma  astetta Mitat  Palkin pituus 5636 mm

Aukkojen pituus (mm)

Tukityyppi

Tukileveys

Jäykkyys z (kN/m)

Jäykkyys x (kN/m)

Kiertymäjäykkyys (kNm/rad)

1 = liukuva niveltuki 2 = kiinteä niveltuki 3 = liukutuki 4 = jäykkä tuki 5 = jousituet 6 = ei tukea

Tämän jälkeen valitaan syötettävien kuormien tyypiksi peruskuormitustapaukset, kansalliseksi liitteeksi Suomi, seuraamusluokaksi CC2 ja määrääväksi muuttuvaksi kuormaksi hyötykuorma Q. Halutessaan voi muuttaa pysyvän kuorman varmuuskertointa. Käytetään oletusta 1,15.

Sitten syötetään kuormat ominaisarvoina eli ilman mitään kertoimia. Syötetään ensin pintakuormat. Pysyvän kuorman saadaan valitsemalla *Pintakuormat* -kohdasta G ja painamalla *Lisää*. Hyötykuormat vastaa- vasti valitsemalla Q ja painamalla *Lisää*. Käytetään kuormitusleveytenä 1 m ja syötetään palkille tulevat viivakuormat. Alkuosalla on pienempi viivakuorma johtuen pienemmästä kuormitusleveydestä. Syötetään kuormien suuruudet ja alku- ja loppupisteet.

**Kuormat** ohje

Syötettävien kuormien tyyppi ☒ peruskuormitustapauksia ☐ mitoituskuormia MRT

Kansallinen liite

Seuraamusluokka

Määräävä muuttuvakuorma ☒ Q ☐ Lumi ☐ Tuuli

Kuormitusyhdistely

	G	Q	Lumi	Tuuli
$\gamma$	1,15	1,5	1,5	1,5
$K_{fi}$	1,0	1,0	1,0	1,0
$\psi_0$	1,0	0,7	0,6	0,6
$\psi_{0,oma}$	0	0	0	0

$1,15 * 1 * G + 1,5 * 1 * 1 * Q + 1,5 * 1 * 0,7 * Lumi + 1,5 * 1 * 0,6 * Tuuli$

1 = kohtisuorassa 2 = pystysuorassa

**Pintakuormat**

Pintakuormien lukumäärä

Kuormitusleveys  m

Kuormatyyppi	Suunta	p1 (kN/m <sup>2</sup> )	p2 (kN/m <sup>2</sup> )	p1 <sub>MRT</sub> (kN/m)	p2 <sub>MRT</sub> (kN/m)	alkupiste (mm)	loppupiste (mm)	$\psi_0$
G	2	1,1	1,1	1,27	1,27	2775	5636	1
Q	1	3,5	3,5	5,25	5,25	2775	5636	1
G	1	0,8	0,8	0,92	0,92	0	2775	1
Q	1	2,2	2,2	3,30	3,30	0	2775	1

Lisää Poista

Poistettava kuorma:

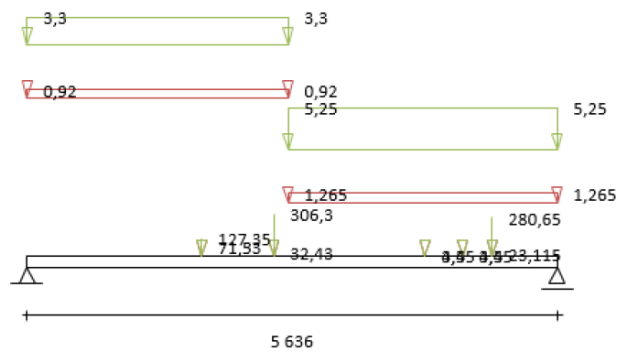
Seuraavaksi lisätään primääreiltä ja roikotuksilta tulevat pistekuormat. Kuormien lisääminen tapahtuu samaan tapaan kuin pintakuormien kohdalla. Annetaan kuormien suuruudet ja vaikutuspisteet.

Pistekuormat					
<input type="radio"/> G <input checked="" type="radio"/> Q <input type="radio"/> Lumi <input type="radio"/> Tuuli					
Pistekuormien lukumäärä		10			
Kuormatyyppi	Suunta	F (kN)	F <sub>MRT</sub> (kN)	Paikka (mm)	Ψ <sub>0</sub>
G	1	62,2	71,53	1860	1
Q	1	84,9	127,35	1860	1
G	1	28,2	32,43	2625	1
Q	1	204,2	306,30	2625	1
G	1	20,1	23,12	4945	1
Q	1	187,1	280,65	4945	1
G	1	3	3,45	4233	1
Q	1	3	4,50	4233	1
G	1	3	3,45	4633	1
Q	1	3	4,50	4633	1

Lisää	Poista
Poistettava kuorma: 0	

Kuormia voi poistaa painamalla *Poista* -nappia. Vexcel poistaa alimman kuorman listalta, jollei poistettavan kuorman järjestysnumeroa ole annettu.

Rakennetta ja kuormia muokattaessa oikealle piirtyy rakenteen rakennemalli. Kuormatyyppit piirtyvät omilla väreillään rakennemalliin. Kuvassa esitetään suunnittelukuormat eli yhdistelykertoimilla kerrotut kuormat.



### Profiilin mitoitus

Kun rakennemalli on valmis, mennään Vexcelin yläreunasta *Hitsatut profiilit* -välilehdelle.

Valitaan kansallinen liite ja mitoittettava profiili. Valitun profiilin mukainen osuus pysyy auki ja tarpeettoman profiilin osuus peittyy harmaalla rasterilla. Seuraavaksi syötetään profiilin poikkileikkaustiedot ja käytetyt teräslajit. Käytetään uumissa ja laipassa S355 teräslajia. Profiilina WI500-8-25x300.

Kansallinen liite: Suomi ohje

Profiili: Hitsattu I-profiili Suositeltavat levypaksuudet: 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 80, 100

Teräslajityyppi: Eurooppalaiset teräslajit

**Hitsattu I-Profiili:**

Uuman lujuus	$f_{y,w}$	S355	355 MPa
Laipan lujuus	$f_{y,f}$	S355	355 MPa
Korkeus	$h$	500 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yf}$	300 mm	
Alalaipan leveys	$b_{af}$	300 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	8 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{r,yf}$	25 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{r,af}$	25 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	5 mm	$\geq 4,50$ mm

$h_w/t_w$  56,25 < 122,95

Hybridipalkin mitoitus toimii ainoastaan kaksoisymmetriselle I-profiilille poikkileikkausluokissa 1,2 ja 3.

**Hitsattu koteloprofiili:**

Teräslaji	$f_y$	S355	355 MPa
Korkeus	$h$	1000 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yf}$	500 mm	
Alalaipan leveys	$b_{af}$	500 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	15 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{r,yf}$	30 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{r,af}$	30 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	5 mm	$\geq 4,98$ mm
Uumien sisäreunojen etäisyys	$b$	400 mm	$\leq 455,86$ mm

Seuraavaksi määritetään mitoituksessa käytettävät parametrit. Pidetään kohta *Profiilin omapaino huomioidaan* valittuna. Otetaan shear-lag eli leikkausviive huomioon. Pidetään nurjahdus vapaana eli *nurjahduksia ei estetty*. Koska palkille ei tule normaalivoimaa ei nurjahduspituudella ole merkitystä. Haluamme optimoida profiilin, joten laitetaan kohta *Optimoi profiili* valituksi.

Shear-lag: Shear-lagia ei oteta huomioon

Nurjahdus: Nurjahduksia ei estetty

Nurjahdus pituus:

z-akselin suhteen	5,636 m
y-akselin suhteen	5,636 m

Neutraaliakseli yläreunasta 250,00 mm

Massa 146,01 kg/m

☒ Profiilin omapaino huomioidaan


☒ Optimoi profiili

Kiepahdusta ei ole estetty ja momenttipinnan muotona käytetään tasaisen kuorman aiheuttamaa momenttia. Tässä esimerkissä primäärit huomioidaan palkille kiepahdustuiksi (konservatiivinen oletus), joten kiepahduspituutena käytetään suurinta primääriväliä. Kiepahduspituudeksi syötetään siis primäärin 2 ja 3 välinen etäisyys 2320 mm. Ei anneta omaa kriittistä kiepahdusmomenttia ( $M_{cr,oma}$ ) vaan annetaan Vexcelin laskea se. Kuormituspiste on ylälaipassa, kuorman suuntana z-akselin positiivinen suunta ja pidetään kier-

tymä ja käyristymä vapaina. Normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutuksen menetelmällä ei tässä merkitystä, koska rakenteeseen ei kohdistu normaalivoimaa.

**Kiepahdus:** Kiepahdusta ei estetty

**Momenttipinnan muoto:** Tasainen kuorma



**Kiepahduspituus:** 2,32 m  $M_{cr,oma}$  0 kNm  $M_{cr}$  7855 kNm

**Kuormituspiste:** Kuormituspiste  
☒ Ylälaippa  
☐ Vääntökeskiö  
☐ Alalaippa

**Kuorman suunta:** Kuorma  
☒ z-akselin pos. suuntaan  
☐ z-akselin neg. suuntaan

**Kiertymä:** Kiertymä  
☒ vapaa sauvan päissä  
☐ estetty sauvan päissä

**Käyristymä:** Käyristymä  
☒ vapaa sauvan päissä  
☐ estetty sauvan päissä

**N-M yhteisvaikutus:** N-M yhteisvaikutus  
☒ Menetelmä 1 (Liite A)  
☐ Menetelmä 2 (Liite B)

**Sauvan sivuun siirtyvyys:** Sivun siirtyvyys  
☒ sivun siirtymätön  
☐ molempin suuntien  
☐ z-akselin suuntaan  
☐ y-akselin suuntaan

Määritetään vielä käyttörajatilassa käytettävät mitoitusparametrit. Käytetään taipumarajana  $L/400$ . Piste-kuorman leveydellä ei tässä tapauksessa ole merkitystä, koska primääreiltä tulevat pistekuormat eivät vaikuta palkin laipalla kohti profiilin keskilinjaa. Syötetään pistekuormaleveydeksi sama kuin tukien tukileveys. Ei esikorotusta.

**Taipumaraja:** Pääkannattaja välipohjassa  $L/400$   $L/100$

**Esikorotus:** 0,0 mm Laske esikorotus pysyväälle kuormalle

**Pistekuorman leveys:** 50 mm

**Teräksen osavarmuusluvut:**  
 $\gamma_{M0}$  1  $\gamma_{M1}$  1  $\gamma_{M2}$  1,25

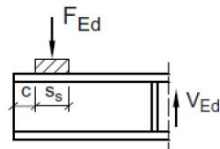
Kun mitoituksessa käytettävät parametrin on valittu, voidaan tarkastella oikealla puolella näkyviä tuloksia hitsatulille profiilille. Tuloksista nähdään profiilin käyttöaste ja poikkileikkausluokka jokaiselle rasitukselle. Tulosten vieressä näkyy Hitsatut profiilit käsikirjan kohta, jonka mukaan laskenta on suoritettu. Käyttöasteen ollessa välillä 0 – 80 % on käyttöasteen vieressä vihreä v. Jos käyttöaste on 80 – 100 % on sen paikalla keltainen huutomerkki. Käyttöasteen ollessa yli 100 % maalautuu käyttöastesolu punaiseksi ja sen vieressä on punainen rasti.



**Tulokset:**

	PL	Käyttöaste %	Hitsatut profiilit käsikirja:
Vetokestävyys		✓ 0,00	2.6.1
Puristuskestävyys	4	✓ 0,00	2.6.2
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 57,28	2.7
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		✓ 68,46	2.8
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		✓ 0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.3
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.5
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	✓ 0,00	2.11
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	✓ 0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.6
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	4	✓ 0,00	2.6.3
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	4	✓ 0,00	
Vääntönurjahduskestävyys	4	✓ 0,00	
Taivutusvääntönurjahdus	4	✓ 0,00	
Kiepahduskestävyys	1	✓ 64,73	2.7.8
Pistekuormakestävyys		✗ 190,42	2.12.2
Taipuma z-akselin suunnassa		✓ 63,31	

Huomataan, että profiilin pistekuormakestävyys ylittyy. Kestävyys ylitys tapahtuu tuella, koska Vexcel ei huomioi palkissa mahdollisesti käytettäviä jäykisteitä ja olettaa mitan  $c$  olevan nolla. Palkissa on käytetty poikittaisjäykisteitä tukien kohdalla, joten profiili kestää siihen kohdistuvat rasitukset. Pistekuormakestävyys ylittyessä on kuitenkin pistekuormakestävyys jäykisteiden kanssa mitoitettava aina erikseen.

**Tulosten vertailu**

Kohteen rakenteet on mitoitettu StaadPRO –ohjelmalla. Staadista saatu käyttöaste palkille on 64 %. Huomataan, että Vexcelillä laskettu käyttöaste vastaa melko hyvin Staadin tulosta.

**Profiilin optimointi**

Halutaan esimerkin vuoksi löytää profiili, joka kestää rasitukset ilman jäykisteitä, joten käytetään Vexcelin optimointityökalua. Se löytyy tulosten yläpuolelta. Koska Vexcel käy läpi kaikki mahdolliset kriteerit täyttä-



vät profiilit ja etsii niistä kevyimmän, täytyy kriteereiden olla järkeviä. Kriteereiden ollessa liian väljät saat-  
taa laskenta viedä kohtuuttomasti aikaa. Jos kriteerit ovat liian tiukat, ei sopivinta profiilia välttämättä löy-  
dy. Optimointi kohdan oikeasta alareunasta on nähtävissä laskettavien profiilivaihtoehtojen lukumäärä.

Laitetaan leveyden ja korkeuden muutoksiksi 10 mm, profiilin korkeuden vaihteluväliksi 400 – 650 mm,  
leveyden vaihteluväliksi 250 – 400 mm, laipan paksuuden vaihteluväliksi 20 – 35 mm ja uuman paksuuden  
vaihteluväliksi 8 – 12 mm. Optimointi käyttää uuman ja laippojen levyvahvuuksina suositeltuja levyvah-  
vuuksia. Optimoinnissa mitta c on koteloprofiilin laippojen ulkonema.

Annetaan sallituiksi käyttöasteiksi 90 % ja sallituiksi poikkileikkausluokiksi 1, 2 ja 3.

**Profiilin optimointi** ohje

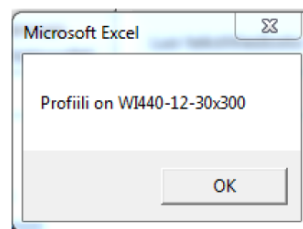
Etsi rajat

Etsi profiili

Leveyden muutos $\Delta b$	10	mm	h <sub>min</sub>	400	mm	t <sub>f,min</sub>	20	mm
Korkeuden muutos $\Delta h$	10	mm	h <sub>max</sub>	650	mm	t <sub>f,max</sub>	35	mm
Maksimi käyttöaste mrt	90		b <sub>min</sub>	250	mm	t <sub>w,min</sub>	8	mm
Maksimi käyttöaste krt	90		b <sub>max</sub>	400	mm	t <sub>w,max</sub>	12	mm
Sallitut PL:t	1,2,3		c	50	mm			

Laskettujen profiilien lukumäärä: 6240
Laskettavien profiilivaihtoehtojen lukumäärä: 6240

Tämän jälkeen painetaan *Etsi profiili* –painiketta. Laskettuaan Vexcel ilmoittaa että kevyin, kriteerit täyttävä  
profiili on W1440-12-30x300.



Uuden profiilin massa on 177,10 kg/m. Alkuperäisen profiilin massa oli 146,01 kg/m. Alla uuden profiilin  
käyttöasteet.

**Tulokset:**

	PL	Käyttöaste %	Hitsatut profiilit käsikirja:
Vetokestävyys		✓ 0,00	2.6.1
Puristuskestävyys	2	✓ 0,00	2.6.2
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 55,21	2.7
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		✓ 46,80	2.8
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		✓ 0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.3
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.5
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	✓ 0,00	2.11
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	✓ 0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.6
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	2	✓ 0,00	2.6.3
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	2	✓ 0,00	
Vääntönurjahduskestävyys	2	✓ 0,00	
Taivutusvääntönurjahdus	2	✓ 0,00	
Kiepahduskestävyys	1	✓ 84,48	2.7.8
Pistekuormakestävyys		✓ 77,49	2.12.2
Taipuma z-akselin suunnassa		✓ 70,87	

**Rasitukset**

*Rasitukset* –välilehden takaa nähdään palkin normaalivoima-, leikkausvoima ja taivutusmomenttikuvaajat, sekä taipumakuvaaja, sekä arvot maksimi- ja minimiarvoille. Välilehdeltä löytyy myös tukireaktiot. Oletuksena Vexcel näyttää murtorajatilän kuormitusyhdistelyn rasitukset, mutta helposti voidaan myös tarkastella käyttörajatilän kuormitusyhdistelyn tai yksittäisten kuormitustapausten rasituksia. Näytettäviä rasituksia voidaan vaihtaa alasvetovalikosta sivun yläreunassa. Taipuma on laskettu aina käyttörajatilassa.

**Laskennan tulostus**

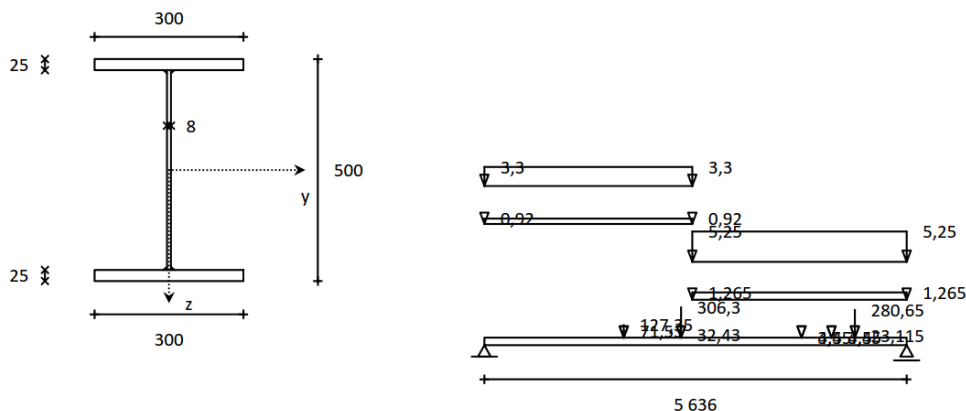
Lopuksi voidaan tulostaa joko suppea tai laaja tulostus laskelmasta *Tulostus* –välilehdeltä. Tulostusalueet ovat valmiiksi määritellyt. Alla laaja tulostus laskelmasta projektissa käytetyllä W1500-8-25x300 profiililla.

## Vexcel member design

Rakennelaskelma nro:	3 Päiväys:	19.1.2016
Työn nro:	T106	Sisältö:
Kohde:	Nokianvirta	
Tekijä:	Janne Koivuniemi	Hitsattu primääripalkki

Laskennan perustana on Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja, EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5

### Rakenne ja kuormat:



Palkin pituus: 5636 mm  
Palkin kulma: 0 astetta

Profiilin paino: huomioidaan 146,0 kg/m

Pintakuormat Kuormitusleveys 1,0

	p1 (kN/m <sup>2</sup> )	p2 (kN/m <sup>2</sup> )	p1 mrt (kN/m)	p2 mrt (kN/m)	alkupiste (mm)	loppupiste (mm)	ψ <sub>0</sub>
G	1,1	1,1	1,265	1,265	2775	5636	1
Q	3,5	3,5	5,25	5,25	2775	5636	1
G	0,8	0,8	0,92	0,92	0	2775	1
Q	2,2	2,2	3,3	3,3	0	2775	1

### Pistekuormat

	F (kN)	F mrt (kN)	Paikka (mm)	ψ <sub>0</sub>
G	62,2	71,53	1860	1
Q	84,9	127,35	1860	1
G	28,2	32,43	2625	1
Q	204,2	306,3	2625	1

G	20,1	23,115	4945	1
Q	187,1	280,65	4945	1
G	3	3,45	4233	1
Q	3	4,5	4233	1
G	3	3,45	4633	1
Q	3	4,5	4633	1

### Mitoitus:

**Kansalliset liitteet:** Oletus

**Teräslaji:** Uuma S355 Laippa S355

**Nurjahdus:** Nurjahduksia ei estetty **Nurjahduspituus:** z-akselin suhteen 5,6 m  
y-akselin suhteen 5,6 m

**Kiepahdus:** Kiepahdusta ei estetty **Kiepahduspituus:** 2,3 m

**Kuormituspiste:** Ylälaippa **Kuorman suunta:** z-akselin pos. suuntaan

**Momenttipinnan muoto:**  **Mcr:** 7854,7 kNm

**Kiertymä:** vapaa sauvan päissä **Käyritymä:** vapaa sauvan päissä

**N-M yhteisvaikutus:** Menetelmä 1 (Liite A) **Sivuun siirtyvyys:** sivuunsiirtymätön

**Taipumaraja:** L/400 **Esikorotus:** 0,0 mm

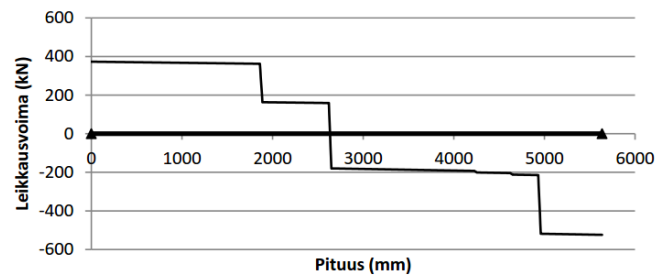
**Tulokset:**

	PL	Käyttöaste %
Vetokestävyys		0,0
Puristuskestävyys	4	0,0
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	57,3
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		68,5
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiilisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	0,0
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiilisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	0,0
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	4	0,0
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	4	0,0
Vääntönurjahduskestävyys	4	0,0
Taivutusvääntönurjahdus	4	0,0
Kiepahduskestävyys	1	64,7
Pistekuormakestävyys		190,4
Taipuma z-akselin suunnassa		63,3

**Tukireaktiot mrt**

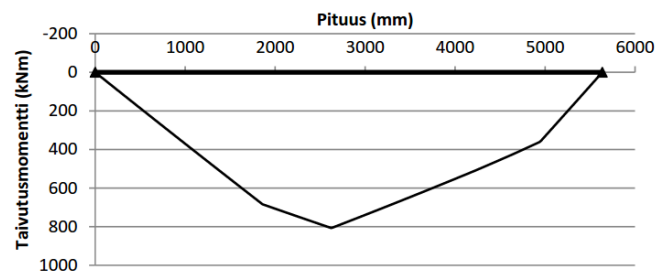
Tuki	z-suunta	x-suunta	Momentti (kNm)
1	373,1	0,0	0,0
2	523,9	0,0	0,0

### Leikkausvoima z



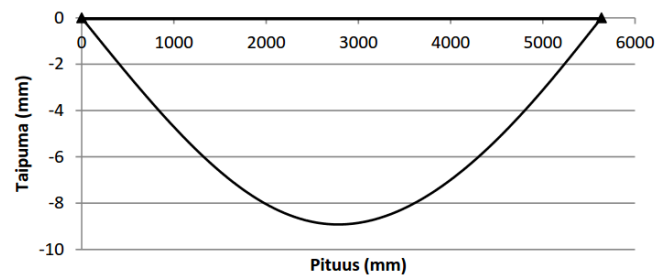
Maksimi: 373,1 kN  
Minimi: -523,9 kN

### Taivutusmomentti y



Maksimi: 806,7 kNm  
Minimi: 0,0 kNm

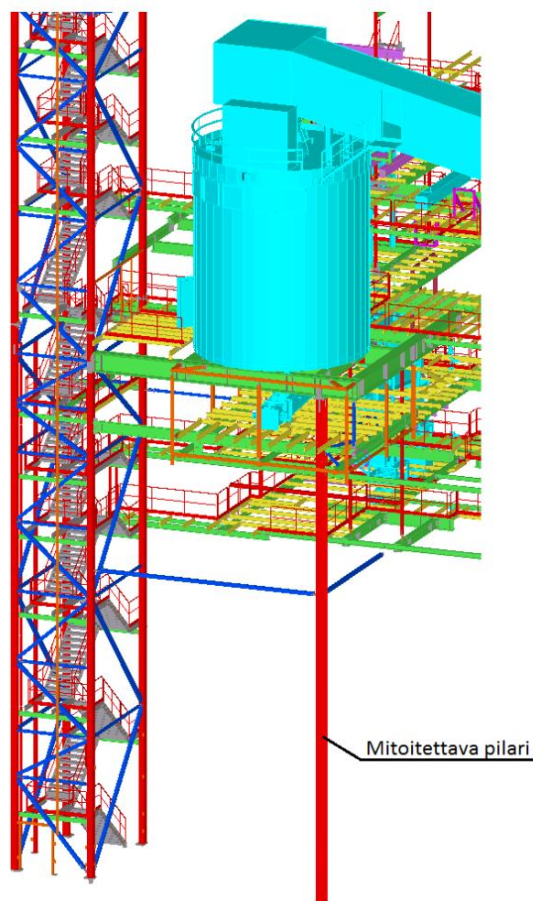
### Taipuma



Maksimi: 0,0 mm  
Minimi: -8,9 mm

## Vexcel 1.0 esimerkkilaskelmat

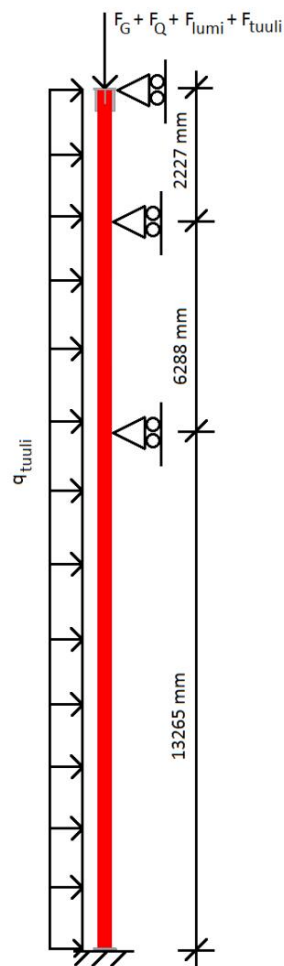
Polttoainesiihon hitsattu kotelopilari



### Mitoitettava rakenne

Mitoitettavana rakenteena on polttoainesiihon rakenteita kannatteleva hitsattu kotelopilari. Pilari on alapäästään oletettu jäykästi tuetuksi perustuksiin ja yläpäästään nivelisesti siilopalkkeihin. Pilari on myös tuettu vaakasuunnassa kahdella välituella. Toisena tukena toimivat siteet korkeudella 13 265 mm ja toisena polttoainesiihon alapuolisen ritilätason primäärit ja siteet korkeudella 19 553 mm. Vaakatuett vievät kuormat viereiselle porrastornille ja kattilalaitoksen betonirungolle. Kohde sijaitsee Suomessa.

Kuormituksia pilarille aiheutuu siilon ja kuljettimen painon lisäksi ympäröiviltä hoitotasoilta, tuulikuormasta ja lumikuormasta. Kuormien tarkempaan määrittämiseen ei tässä esimerkissä mennä.



Mitoitettava pilari: WB350-25-25x350/25

Kokonaismitta: 21780 mm

Teräslaji: S355J2

Siilon kuormat:

$$F_{G, \text{siilo}} = 420 \text{ kN}$$

$$F_{Q, \text{siilo}} = 1400 \text{ kN}$$

Kuljettimen kuormat siilolle:

$$F_{G, \text{kuljetin}} = 163 \text{ kN}$$

Hoitotasojen kuormat:

$$q_Q = 3 \text{ kN/m}^2$$

$$q_G = 1 \text{ kN/m}^2$$

Lumikuorma maassa:

$$2,5 \text{ kN/m}^2$$

Tuulikuorma:

$$q_p(z=22\text{m}) = 0,786 \text{ kN/m}^2$$

Pilarin kuormitukset:

$$F_G = 556,0 \text{ kN}$$

$$F_Q = 1174,5 \text{ kN}$$

$$F_{\text{lumi}} = 90,2 \text{ kN}$$

$$F_{\text{tuuli}} = 64,4 \text{ kN}$$

$$q_{\text{tuuli}} = 0,54 \text{ kN/m}$$

Murtorajatilan resultantit:

$$\text{Pystykuormat: } 2553,8 \text{ kN}$$

$$\text{Vaakuormat: } 10,6 \text{ kN}$$



## Mitoitus

Mitoitetaan kotelopilari Vexcelillä. Etusivulta valitaan *Mitoitus*.

### Rakenne ja kuormat

Aluksi syötetään pilarin rakenne taulukkoon. Syötetään aukkojen lukumäärä ja pituudet sekä tukien tyypit. Asetetaan rakenteen kulmaksi 90 astetta. Tukityypit ovat nähtävissä taulukon alapuolella. Pilari on päistään tuettu päätylevyillä, joten päiden tukileveys ei vaikuta profiilin pistekuormakestävyyteen. Välitukien ka-peimmat tuet ovat 15 mm paksut siteiden liitoslevyt. Käytetään välituilla tukileveyttä 15 mm ja päissä 100 mm.

**Rakenne** ohje

Aukkojen lukumäärä 3 Kulma 90 astetta Mitat Pilarin suunnassa Pilarin korkeus 21780 mm

Aukkojen pituus (mm) 13265 6288 2227 5000 4000 1

Tukityyppi	4	1	1	1	5	1	1	1
Tukileveys	100	15	15	100				
Jäykkyys z (kN/m)	1000	1	1000	0	500			
Jäykkyys x (kN/m)	2000	1	0	0				
Kiertymäjäykkyys (kNm/rad)	1000	1	500	0	2000			

1 = liukuva niveltuki 2 = kiinteä niveltuki 3 = liukutuki 4 = jäykkä tuki 5 = jousituot 6 = ei tukea

Tämän jälkeen valitaan syötettävien kuormien tyypiksi peruskuormitustapaukset, kansalliseksi liitteeksi Suomi, seuraamusluokaksi CC2 ja määrääväksi muuttuvaksi kuormaksi hyötykuorma Q. Halutessaan voi muuttaa pysyvän kuorman varmuuskertointa. Käytetään oletusta 1,15.

Sitten syötetään kuormat ominaisarvoina eli ilman mitään kertoimia. Syötetään ensin pilaria vaakasuunnassa kuormittava tuulikuorma. Tuulikuorma saadaan valitsemalla pintakuormat kohdasta *Tuuli* ja painamalla *Lisää*. Käytetään kuormitusleveytenä 1 m ja syötetään pilarille tuleva viivakuorma. Syötetään kuorman suuruus, pintakuorma on oletuksen koko pilarin matkalla.

**Kuormat** ohje

Syötettävien kuormien tyyppi ☒ peruskuormitustapauksia ☐ mitoituskuormia MRT

Kansallinen liite Suomi

Seuraamusluokka CC2

Määräävä muuttuvakuorma ☒ Q ☐ Lumi ☐ Tuuli

1 = kohtisuorassa 2 = pystysuorassa

**Pintakuormat**

Pintakuormien lukumäärä 1 Kuormitusleveys 1 m

**Kuormitusyhdistely**

	G	Q	Lumi	Tuuli
Y	1,15	1,5	1,5	1,5
K <sub>E</sub>	1,0	1,0	1,0	1,0
ψ <sub>0</sub>	1,0	0,7	0,6	
ψ <sub>0,oma</sub>	0	0	0	

1,15 \* 1 \* G + 1,5 \* 1 \* Q + 1,5 \* 1 \* 0,7 \* Lumi + 1,5 \* 1 \* 0,6 \* Tuuli

☐ G ☐ Q ☐ Lumi ☒ Tuuli

Lisää Poista

Poistettava kuorma: 0

Kuormatyyppi	Suunta	p1 (kN/m <sup>2</sup> )	p2 (kN/m <sup>2</sup> )	p1 <sub>MRT</sub> (kN/m)	p2 <sub>MRT</sub> (kN/m)	alkupiste (mm)	loppupiste (mm)	ψ <sub>0</sub>
Tuuli	1	0,54	0,54	0,49	0,49	0	21780	0,6

Seuraavaksi lisätään pilaria kuormittavat normaalivoimat. Normaalivoimien lisääminen tapahtuu samaan tapaan kuin pintakuormien kohdalla. Syötetään omanpainon (G), hyötykuorman (Q) ja lumi- ja tuulikuorman osuus ja annetaan kuormien suuruudet ja vaikutuspisteet.

**Normaalivoimat**

Normaalivoimien lukumäärä: 4

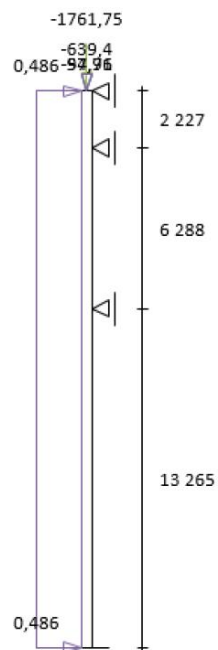
☐ G
 ☐ Q
 ☐ Lumi
 ☒ Tuuli

Kuormatyyppi	N (kN)	N <sub>MET</sub> (kN)	Paikka (mm)	Ψ <sub>e</sub>
G	-556	-639,40	21780	1
Q	-1174,5	-1761,75	21870	1
Lumi	-90,2	-94,71	21780	0,7
Tuuli	-64,4	-57,96	21780	0,6

Poistettava kuorma: 0

Kuormia voi poistaa painamalla *Poista* -nappia. Vexcel poistaa alimman kuorman listalta, jollei poistettavan kuorman järjestysnumeroa ole annettu.

Rakennetta ja kuormia muokatessa oikealle piirtyy rakenteen rakennemalli. Kuormatyyppit piirtyvät omilla väreillään rakennemalliin. Kuvassa esitetään suunnittelukuormat eli yhdistelykertoimilla kerrotut kuormat.



### Profiilin mitoitus

Kun rakennemalli on valmis, mennään Vexcelin yläreunasta *Hitsatut profiilit* –välilehdelle.

Valitaan kansallinen liite ja mitoittettava profiili. Valitun profiilin mukainen osuus pysyy auki ja tarpeettoman profiilin osuus peittyy harmaalla rasterilla. Seuraavaksi syötetään profiilin poikkileikkaustiedot ja käytetyt teräslajit. Käytetään S355 teräslajia. Profiilina WB350-25-25x350/25. Käytetään profiilin mitoituksessa paksumien hitsien mukaista nurjahduskäyrää (nurjahduskäyrä c) eli syötetään hitsien a-mitaksi 13 mm. Hitsit luetaan paksuiksi, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

$$\begin{aligned} a &> 0,5 \cdot t_f \\ b_f/t_f &< 30 \\ h/t_w &< 30 \end{aligned}$$

Pilarin laippojen ulkonema on 25 mm ja uumien paksuus 25 mm, joten uumien sisäreunojen etäisyydeksi jää 250 mm.

Kansallinen liite: Suomi ohje

Profiili: Hitsattu kotelo Suositeltavat levypaksuudet: 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 80, 100

Teräslajityyppi: Eurooppalaiset teräslajit

**Hitsattu I-Profiili:**

Uuman lujuus	$f_{y,w}$	S355	355 MPa
Laipan lujuus	$f_{y,f}$	S355	355 MPa
Korkeus	$h$	85 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yf}$	50 mm	$h_w/t_w$ 15,00 < 217,35
Alalaipan leveys	$b_{yf}$	50 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	5 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{f,yf}$	5 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{f,af}$	5 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	8 mm	$\geq 3,00$ mm

**Hitsattu kotelo:**

Teräslaji	$f_y$	S355	355 MPa
Korkeus	$h$	350 mm	
Ylälaipan leveys	$b_{yf}$	350 mm	
Alalaipan leveys	$b_{af}$	350 mm	
Uuman paksuus	$t_w$	25 mm	
Ylälaipan paksuus	$t_{f,yf}$	25 mm	
Alalaipan paksuus	$t_{f,af}$	25 mm	
Hitsin a-mitta	$a$	13 mm	$\geq 4,50$ mm
Uumien sisäreunojen etäisyys	$b$	250 mm	$\leq 263,23$ mm

Hybridipalkin mitoitus toimii ainoastaan kaksiosasymmetriselle I-profiilille poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3.

Seuraavaksi määritetään mitoituksessa käytettävät parametrit. Pidetään kohta *Profiilin omapaino huomioon* valittuna. Otetaan shear-lag eli leikkausviive huomioon. Pidetään nurjahdus vapaana eli *nurjahduksia ei estetty*. Pilarin nurjahdusmitoituksessa ei ole otettu huomioon pilarin alapään jäykän tuennan vaikutusta

nurjahduspituuteen, joten nurjahduspituutena käytetään pisimmän aukon pituutta. Halutaan optimoida profiiliin, joten laitetaan kohta *Optimoi profiili* valituksi.

<b>Shear-lag:</b>	Shear-lag otetaan huomioon	Neutraaliakseli yläreunasta	175,00 mm
<b>Nurjahdus:</b>	Nurjahduksia ei estetty	Massa	255,13 kg/m
<b>Nurjahdus pituus:</b>		<input checked="" type="checkbox"/> Profiilin omapaino huomioidaan	
		<input checked="" type="checkbox"/> Optimoi profiili	
	z-akselin suhteen	13,265 m	
	y-akselin suhteen	13,265 m	

Kiepahdusta ei ole estetty ja momenttipinnan muotona käytetään tasaisen kuorman aiheuttamaa momenttia. Pidetään kiepahduspituutena Vexcelin oletettaman pisin tukiväli. Ei anneta omaa kriittistä kiepahdusmomenttia ( $M_{cr,oma}$ ), vaan annetaan Vexcelin laskea se. Kuormituspiste on ylälaipassa, kuorman suuntana z-akselin positiivinen suunta ja pidetään kiertymä ja käyristymä vapaina.

Käytetään normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutuksen mitoituksessa eurokoodin liitteen B mukaista menetelmää 2. Tämä menetelmä on käytössä Suomessa. Oletetaan rakenteen olevan sivuun siirtyvä molempiin suuntiin (varmalla puolella oleva oletus).

<b>Kiepahdus:</b>	Kiepahdusta ei estetty
<b>Momenttipinnan muoto:</b>	Tasainen kuorma

<b>Kiepahduspituus:</b>	13,265 m	$M_{cr,oma}$	0 kNm	$M_{cr}$	18934 kNm
-------------------------	----------	--------------	-------	----------	-----------

<b>Kuormituspiste:</b>	Kuormituspiste <input checked="" type="radio"/> Ylälaippa <input type="radio"/> Vääntökeskiö <input type="radio"/> Alalaippa	<b>Kuorman suunta:</b>	Kuorma <input checked="" type="radio"/> z-akselin pos. suuntaan <input type="radio"/> z-akselin neg. suuntaan
<b>Kiertymä:</b>	Kiertymä <input checked="" type="radio"/> vapaa sauvan päissä <input type="radio"/> estetty sauvan päissä	<b>Käyristymä:</b>	Käyristymä <input checked="" type="radio"/> vapaa sauvan päissä <input type="radio"/> estetty sauvan päissä
<b>N-M yhteisvaikutus:</b>	N-M yhteisvaikutus <input type="radio"/> Menetelmä 1 (Liite A) <input checked="" type="radio"/> Menetelmä 2 (Liite B)	<b>Sauvan sivuun siirtyvyys:</b>	Sivun siirtyvyys <input type="radio"/> sivuun siirtymätön <input checked="" type="radio"/> molempiin suuntiin <input type="radio"/> z-akselin suuntaan <input type="radio"/> y-akselin suuntaan

Määritetään vielä käyttörajatilassa käytettävät mitoitusparametrit. Käytetään omaa taipumarajaa, kohteessa käytetty vaakasuuntaisen sivusiirtymän raja-arvona  $H/400$ . Syötetään siis taipumarajaksi  $L/400$ . Pilariin ei

kohdistu vaakasuuntaisia pistekuormia, joten pistekuorman leveydellä ei ole merkitystä. Syötetään piste-kuormaleveydeksi sama kuin päiden tukien tukileveys. Ei esikorotusta.

Taipumaraja:  L/

Esikorotus:  mm Laske esikorotus pysyvälle kuormalle

Pistekuorman leveys:  mm

Teräksen osavarmuusluvut:

$Y_{MO}$    $Y_{M1}$    $Y_{M2}$

Kun mitoituksessa käytettävät parametrin on valittu, voidaan tarkastella oikealla puolella näkyviä tuloksia hitsatulle profiilille. Tuloksista nähdään profiilin käyttöaste ja poikkileikkausluokka jokaiselle rasitukselle. Tulosten vieressä näkyy Hitsatut profiilit käsikirjan kohta, jonka mukaan laskenta on suoritettu. Käyttöasteen ollessa välillä 0 – 80 % on käyttöasteen vieressä vihreä v. Jos käyttöaste on 80 – 100 % on sen paikalla keltainen huutomerkki. Käyttöasteen ollessa yli 100 % maalautuu käyttöastesolu punaiseksi ja sen vieressä on punainen rasti.

#### Tulokset:

	PL	Käyttöaste %	Hitsatut profiilit käsikirja:
Vetokestävyys	✓	0,00	2.6.1
Puristuskestävyys	1 ✓	22,68	2.6.2
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1 ✓	0,57	2.7
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1 ✓	0,00	
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1 ✓	0,00	
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa	✓	0,09	2.8
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa	✓	0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1 ✓	0,00	2.10.3
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1 ✓	0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1 ✓	0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys y-akselin ympäri	1 ✓	23,25	2.10.5
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys z-akselin ympäri	1 ✓	22,68	
Taivutus- ja normaalivoimakkestävyys yhteisvaikutus	1 ✓	0,00	
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1 ✓	59,42	2.11
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1 ✓	69,22	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys y-akselin ympäri	1 ✓	0,00	2.10.6
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys z-akselin ympäri	1 ✓	0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakkestävyys yhteisvaikutus	1 ✓	0,00	
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	1 ✓	58,62	2.6.3
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	1 ✓	68,77	
Vääntönurjahduskestävyys	1 ✓	22,68	
Taivutusvääntönurjahdus	1 ✓	0,00	
Kiepahduskestävyys	1 ✓	0,60	2.7.8
Pistekuormakestävyys	✓	0,30	2.12.2
Taipuma z-akselin suunnassa	✓	1,37	



### Tulosten vertailu

Kohteen rakenteet on mitoitettu StaadPRO –ohjelmalla. Staadista saatu käyttöaste pilarille on 68 %. Huomataan, että Vexcelillä laskettu käyttöaste vastaa melko hyvin Staadin tulosta.

### Profiilin optimointi

Profiilin käyttöasteet ovat melko alhaiset, joten optimoidaan profiilin. Tulosten yläpuolelta löytyy profiilin optimointityökalu. Koska Vexcel käy läpi kaikki mahdolliset kriteerit täyttävät profiilit ja etsii niistä kevyimän, täytyy kriteereiden olla järkeviä. Kriteereiden ollessa liian väljät saattaa laskenta viedä kohtuuttomasti aikaa. Jos kriteerit ovat liian tiukat, ei sopivinta profiilia välttämättä löydy. Optimointi kohdan oikeasta alareunasta on nähtävissä laskettavien profiilivaihtoehtojen lukumäärä.

Laitetaan leveyden ja korkeuden muutoksiksi 10 mm, profiilin korkeuden vaihteluväliksi 300 – 400 mm, leveyden vaihteluväliksi 300 – 400 mm, laipan paksuuden vaihteluväliksi 15 – 25 mm ja uuman paksuuden vaihteluväliksi 15 – 25 mm. Optimointi käyttää uuman ja laippojen levyvahvuuksina suositeltuja levyvahvuuksia. Optimoinnissa mitta c on koteloprofiilin laippojen ulkonema, laitetaan tähän 25 mm.

Annetaan sallituiksi käyttöasteiksi 90 % ja sallituiksi poikkileikkausluokiksi 1, 2 ja 3.

**Profiilin optimointi** ohje

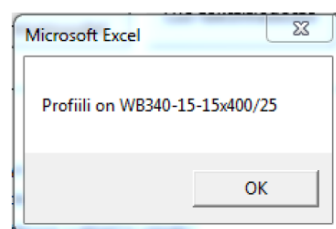
Etsi rajat

Etsi profiili

Leveyden muutos $\Delta b$	10 mm	h <sub>min</sub>	300 mm	t <sub>r,min</sub>	15 mm
Korkeuden muutos $\Delta h$	10 mm	h <sub>max</sub>	400 mm	t <sub>r,max</sub>	25 mm
Maksimi käyttöaste mrt	90	b <sub>min</sub>	300 mm	t <sub>w,min</sub>	15 mm
Maksimi käyttöaste krt	90	b <sub>max</sub>	400 mm	t <sub>w,max</sub>	25 mm
Sallitut PL:t	1,2,3	c	25 mm		

Laskettujen profiilien lukumäärä: 4356
Laskettavien profiilivaihtoehtojen lukumäärä: 4356

Tämän jälkeen painetaan *Etsi profiili* –painiketta. Laskettuaan Vexcel ilmoittaa että kevyin, kriteerit täyttävä profiili on WB340-15-15x400/25.



Uuden profiilin massa on 167,21 kg/m. Alkuperäisen profiilin massa oli 255,13 kg/m. Alla uuden profiilin käyttöasteet.

#### Tulokset:

	PL	Käyttöaste %	Hitsatut profiilit käsikirja:
Vetokestävyys		✓ 0,00	2.6.1
Puristuskestävyys	1	✓ 34,32	2.6.2
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,85	2.7
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		✓ 0,15	2.8
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		✓ 0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.3
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 35,16	2.10.5
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 34,32	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	⚠ 87,73	2.11
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	✓ 82,78	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	2.10.6
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	1	⚠ 86,40	2.6.3
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 82,19	
Vääntönurjahduskestävyys	1	✓ 34,32	
Taivutusvääntönurjahdus	1	✓ 0,00	
Kiepahduskestävyys	1	✓ 0,00	2.7.8
Pistekuormakestävyys		✓ 0,59	2.12.2
Taipuma z-akselin suunnassa		✓ 2,01	

Käyttöasteet näyttävät ensin yli 90 %, mutta kun muuttaa profiilin mittatiedoista *Uumien sisäreunojen etäisyys* –kohdasta arvon 320 millimetriin, saadaan ylläolevat tulokset. Kun kyseinen mitta on 320 mm on laippojen ulkonema 25 mm.

#### Rasitukset

*Rasitukset* –välilehden takaa nähdään palkin normaalivoima-, leikkausvoima ja taivutusmomenttikuvaajat, sekä taipumakuvaaja, sekä arvot maksimi- ja minimiarvoille. Välilehdeä löytyy myös tukireaktiot. Oletuksena Vexcel näyttää murtorajatilän kuormitusyhdistelyn rasitukset, mutta helposti voidaan myös tarkastella käyttörajatilän kuormitusyhdistelyn tai yksittäisten kuormitustapausten rasituksia. Näytettäviä rasituksia voidaan vaihtaa alaspäin sivun yläreunassa. Taipuma on laskettu aina käyttörajatilassa.

#### Laskennan tulostus

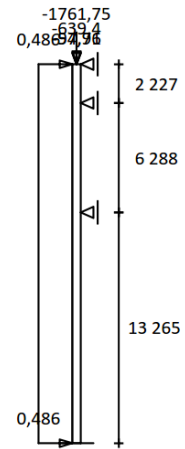
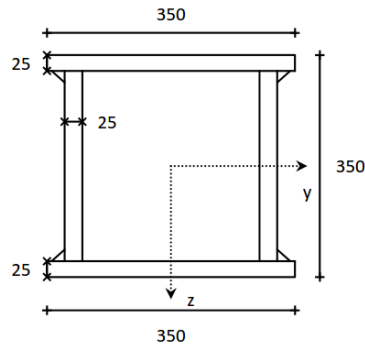
Lopuksi voidaan tulostaa joko suppea tai laaja tulostus laskelmasta *Tulostus* –välilehdeä. Tulostusalueet ovat valmiiksi määritellyt. Alla laaja tulostus laskelmasta projektissa käytetyllä WB350-25-25x350/25 profiililla.

## Vexcel member design

Rakennelaskelma nro:	4 Päiväys:	25.1.2016
Työn nro:	T106	Sisältö:
Kohde:	Nokianvirta	
Tekijä:	Janne Koivuniemi	Polttoainesiilon hitsattu kotelopilari

Laskennan perustana on Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja, EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5

### Rakenne ja kuormat:



Pilarin korkeus: 21780 mm  
Palkin kulma: 90 astetta

Profiilin paino: huomioidaan 255,1 kg/m

Pintakuormat Kuormitusleveys 1,0


	p1 (kN/m <sup>2</sup> )	p2 (kN/m <sup>2</sup> )	p1 mrt (kN/m)	p2 mrt (kN/m)	alkupiste (mm)	loppupiste (mm)	Ψ <sub>0</sub>
Tuuli	0,54	0,54	0,486	0,486	0	21780	0,6

### Normaalivoimat

	N (kN)	N mrt (kN)	Paikka (mm)	Ψ <sub>0</sub>
G	-556	-639,4	21780	1
Q	-1174,5	-1761,8	21870	1
Lumi	-90,2	-94,71	21780	0,7
Tuuli	-64,4	-57,96	21780	0,6

### Mitoitus:



<b>Kansalliset liitteet:</b>	Oletus		
<b>Teräslaji:</b>	Uuma	S355	Laippa S355
<b>Nurjahdus:</b>	Nurjahduksia ei estetty	<b>Nurjahduspituus:</b>	z-akselin suhteen 13,3 m y-akselin suhteen 13,3 m
<b>Kiepahdus:</b>	Kiepahdusta ei estetty	<b>Kiepahduspituus:</b>	13,3 m
<b>Kuormituspiste:</b>	Ylälaippa	<b>Kuorman suunta:</b>	z-akselin pos. suuntaan
<b>Momenttipinnan muoto:</b>			<b>Mcr:</b> 18933,7 kNm
<b>Kiertymä:</b>	vapaa sauvan päissä	<b>Käyritymä:</b>	vapaa sauvan päissä
<b>N-M yhteisvaikutus:</b>	Menetelmä 2 (Liite B)	<b>Sivuun siirtyvyys:</b>	molempiin suuntiin
<b>Taipumaraja:</b>	L/400	<b>Esikorotus:</b>	0,0 mm

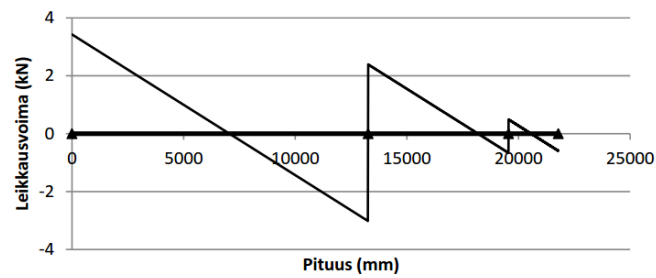
**Tulokset:**

	PL	Käyttöaste %
Vetokestävyys		0,0
Puristuskestävyys	1	22,7
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	0,6
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		0,1
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	23,2
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	22,7
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiilisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	59,4
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiilisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	69,2
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	1	58,6
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	1	68,8
Vääntönurjahduskestävyys	1	22,7
Taivutusvääntönurjahdus	1	0,0
Kiepahduskestävyys	1	0,6
Pistekuormakestävyys		0,3
Taipuma z-akselin suunnassa		1,4

**Tukireaktiot mrt**

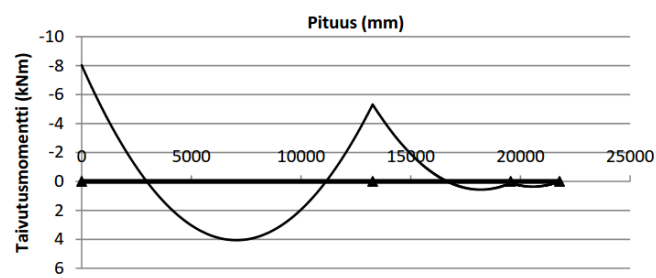
Tuki	z-suunta	x-suunta	Momentti (kNm)
1	2616,5	-3,4	-8,0
2	0,0	-5,4	0,0
3	0,0	-1,2	0,0
4	0,0	-0,6	0,0

### Leikkausvoima z



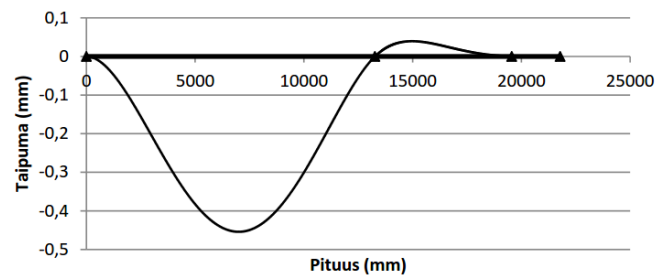
Maksimi: 3,4 kN  
Minimi: -3,0 kN

### Taivutusmomentti y



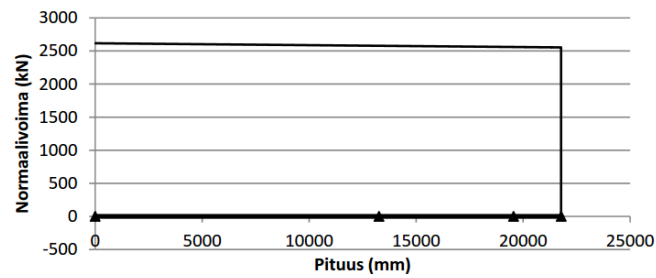
Maksimi: 4,1 kNm  
Minimi: -8,0 kNm

### Taipuma



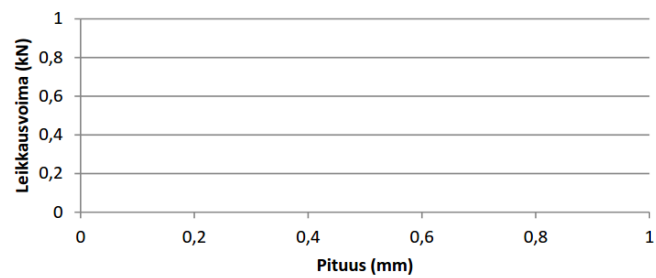
Maksimi: 0,0 mm  
Minimi: -0,5 mm

### Normaalivoima



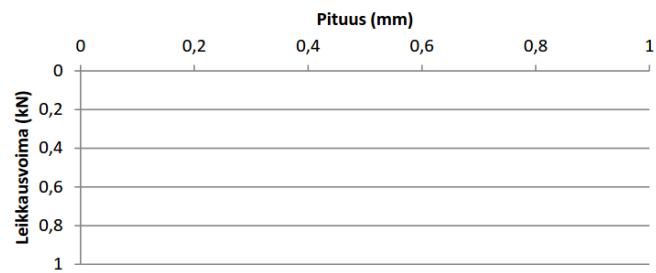
Maksimi: 2616,5 kN  
Minimi: 0,0 kN

### Leikkausvoima y



Maksimi: 0,0 kN  
Minimi: 0,0 kN

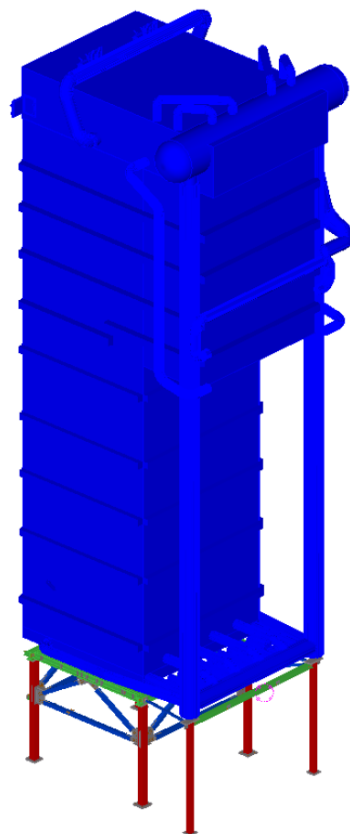
### Taivutusmomentti z



Maksimi: 0,0 kNm  
Minimi: 0,0 kNm

## Vexcel 1.0 esimerkkilaskelmat

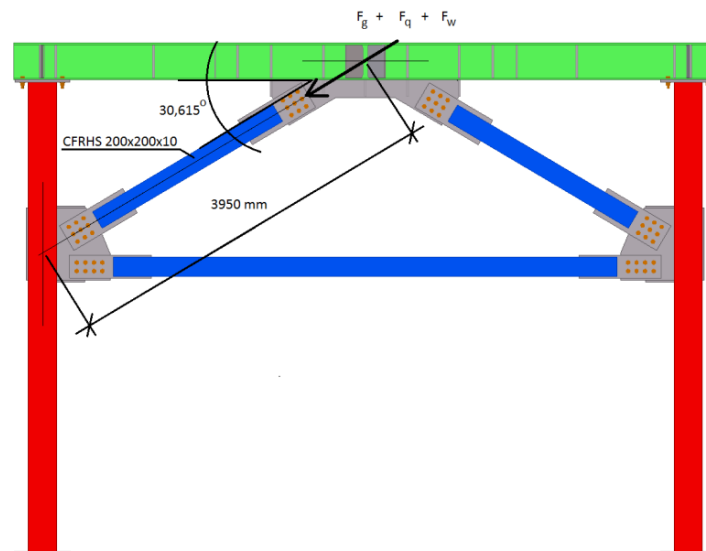
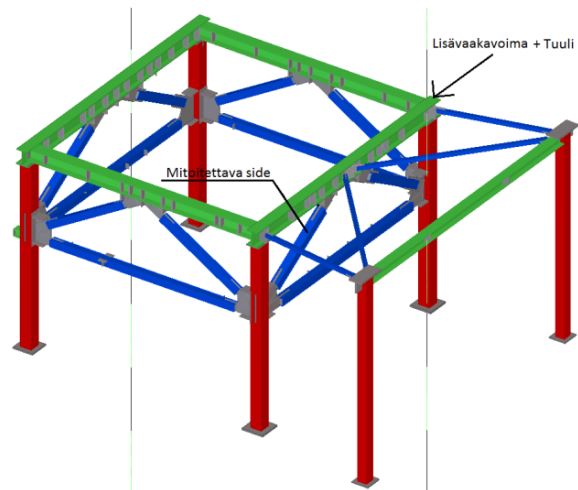
Kattilapukin vinoside



2 (16)

### Mitoitettava rakenne

Mitoitettavana rakenteena on kattilapukin vinoside. Kattilapukki on mitoitettu seuraamusluokassa CC3 ja pysyvälle kuormalle käytetty varmuuskerrointa 1,35. Kuormia vinositeelle kohdistuu kattilalta tulevista pysytkuormista, näistä aiheutuvista lisävaakavoimista ja mitoituksessa on huomioitu vaakavoimana vielä tuulikuorma pukin nurkille. Kohde sijaitsee Suomessa.



3 (16)

Side: CFRHS 200x200x10  
 Siteen kulma:  $\alpha = 30,615^\circ$   
 Teräslaji: S355

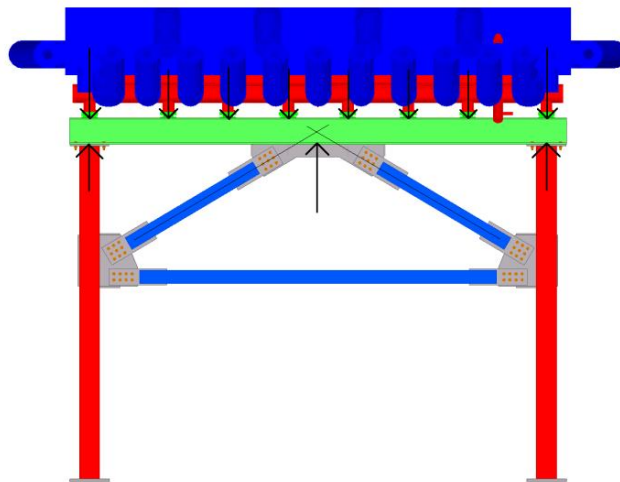
Primääripalkki: HEA400  
 Kattilan hyötykuorma:  $F_Q = 3129 \text{ kN}$   
 Kattilan omapaino:  $F_G = 1586,1 \text{ kN}$   
 Tuulikuorma:  $F_w = 15 \text{ kN}$   
 Pilariväli: 6800 mm

Siteiltä tuleva tukireaktio kohdistuu puoliväliin pilariväliä.

### Siteen kuormien määrittäminen

Aluksi tarvitaan siteelle tulevat kuormitukset. Vinositeet muodostavat palkin keskelle pystysuuntaisen tukireaktion. Tämän tukireaktion selvittämiseksi syötetään palkin rakenne Vexceliin. Kattilan kuormat jakaantuvat primääripalkille kahdeksaan eri pisteeseen. Koska Vexceliin saa maksimissaan 10 kappaletta pistekuormia, lasketaan kattilalta tulevien kuormien mitoitusarvot ja syötetään nämä Vexceliin.

Nurkissa omaa painoa 143,4 kN ja hyötykuormaa 71,8 kN. Muissa pisteissä omaa painoa 119,5 kN ja hyötykuormaa 91,9 kN. Lisävaakavoima on 1/150 osa pystykuormasta ja se kohdistuu primääripalkin tasoon.



Aluksi syötetään palkin rakenne taulukkoon. Syötetään aukkojen lukumäärä ja pituudet sekä tukien tyypit. Tukityypit ovat nähtävissä taulukon alapuolella. Tukileveydellä ei ole merkitystä, koska palkkia ei tässä mitoiteta.

4 (16)

**Rakenne** ohje

Aukkojen lukumäärä **2** Kulma **0** astetta Mitat **3400** **2000** **5000** **4000** Palkin suunnassa **1** Palkin pituus **6800** mm

Aukkojen pituus (mm) **3400** **2000** **5000** **4000**

Tukityyppi **2** **1** **1** **1** **5** **1** **1** **1**

Tukileveys **50** **50** **50** **50** **50** **50** **50** **50**

Jäykkyys z (kN/m) **1000** **1** **1000** **0** **500** **0** **0** **0**

Jäykkyys x (kN/m) **2000** **1** **0** **0** **0** **0** **0** **0**

Kiertymäjäykkyys (kNm/rad) **1000** **1** **500** **0** **2000** **0** **0** **0**

1 = liukuva niveltuki 2 = kiinteä niveltuki 3 = liukutuki 4 = jäykkä tuki 5 = jousituet 6 = ei tukea

Valitaan syötettävien kuormien tyyppi *mitoituskuormia* MRT. Huomataan että osa sivusta muuttuu harmaaksi. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseisiä kohtia ei huomioida.

**Kuormat** ohje

Syötettävien kuormien tyyppi ☐ peruskuormitusapauksia ☒ mitoituskuormia MRT

Kansallinen liite **Oletus**

Seuraamusluokka **CC2**

Määräävä muuttuva kuorma ☒ Q ☐ Lumi ☐ Tuuli

Kuormitusyhdistely

	G	Q	Lumi	Tuuli
$\gamma$	1,35	1,5	1,5	1,5
$K_e$	1,0	1,0	1,0	1,0
$\psi_s$		1,0	0,7	0,6
$\psi_{s,mins}$		0	0	0

$1,35 * 1 * G + 1,5 * 1 * 1 * Q + 1,5 * 1 * 0,7 * Lumi + 1,5 * 1 * 0,6 * Tuuli$

Syötetään pistekuormat painamalla *Lisää* pistekuormien kohdalta. Syötetään kuormien suuruudet ja paikat.

**Pintakuormat**

Pintakuormien lukumäärä **0**

☐ G ☐ Q ☐ Lumi ☐ Tuuli

**Lisää** **Poista**

Poistettava kuorma: **0**

**Pistekuormat**

Pistekuormien lukumäärä **8**

☐ G ☐ Q ☐ Lumi ☐ Tuuli

**Lisää** **Poista**

Poistettava kuorma: **0**

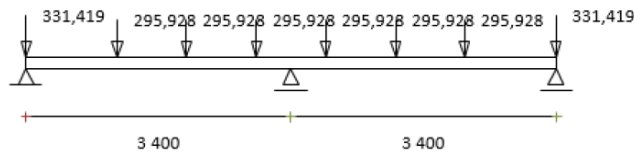
Kuormatyyppi	Suunta	F (kN)	F <sub>MRT</sub> (kN)	Paikka (mm)	$\psi_s$
Ei tyyppiä	1	331,419	331,42	0	1
Ei tyyppiä	1	295,928	295,93	1172,5	1
Ei tyyppiä	1	295,928	295,93	2057,5	1
Ei tyyppiä	1	295,928	295,93	2957,5	1
Ei tyyppiä	1	295,928	295,93	3842,5	1
Ei tyyppiä	1	295,928	295,93	4742,5	1
Ei tyyppiä	1	295,928	295,93	5627,5	1
Ei tyyppiä	1	331,419	331,42	6800	1

Voit poistaa kuormia painamalla *Poista* -nappia. Vexcel poistaa alimman kuorman listalta, jollei poistettavan kuorman järjestysnumeroa ole annettu.

Rakennetta ja kuormia muokatessa oikealle piirtyy rakenteen rakennemalli. Kuvassa esitetään suunnittelu-kuormat eli yhdistelykertoimilla kerrotut kuormat.



5 (16)



Seuraavaksi mennään *Valssatut- ja putkiprofiilit* –välilehdelle ja valitaan profiiliksi *Eurooppalaiset I-profiilit* ja HEA400. Tarkistetaan että *Profiilin omapaino huomioidaan*, on valittuna. Muilla mitoituskriteereillä ei tässä ole merkitystä, koska palkkia ei tässä esimerkissä mitoiteta.

**Kansallinen liite:** Oletus ohje

**Profiili:** Eurooppalaiset I-profiilit  
HEA 400 ☐ Optimoi profiili

**Teräslaji:** S355  $f_{y,oma}$  355 MPa

**Nurjahdus:** Nurjahduksia ei estetty

**Nurjahduspituus:**  
z-akselin suhteen 3,4 m  
y-akselin suhteen 3,4 m

**Kiepahdus:** Kiepahdusta ei estetty

**Momenttipinnan muoto:** Tasainen kuorma

Massa 124,80 kg/m  
☒ Profiilin omapaino huomioidaan

Seuraavaksi mennään *Rasitukset* –välilehdelle. Täältä näemme palkin rasituskuvaajat ja löydämme palkin keskelle kohdistuvan pystysuuntaisen tukireaktion. Tukireaktion on 1350,2 kN, joka jakautuu tasan molemmille siteille. Yhdelle siteelle kohdistuu siis 675,1 kN.

Tukireaktio on mitoitusvoima, joka koostuu omanpainon ja hyötykuorman aiheuttamasta voimasta. Jaetaan tukireaktio ominaisarvoiksi ja saadaan pystysuuntaiseksi voimiksi omanpainon osuutta 106,7 kN ja hyötykuorman osuudeksi 313,1 kN.

Kun otetaan vielä huomioon lisävaakavoiman aiheuttama kuormitus ja siteen kulma saadaan sidettä kuormittaviksi normaalivoimiksi seuraavat:

Omapaino: $F_G = 215,4$ kN	Normaalivoima murtorajatilassa: 1356,5 kN
Hyötykuorma: $F_Q = 617,9$ kN	Pystysuuntainen komponentti: 690,9 kN
Tuulikuorma: $F_w = 17,5$ kN	Vaakasuuntainen komponentti: 1167,5 kN

6 (16)

## Mitoitus

Mitoitetaan vinoside Vexcelillä. Etusivulta valitaan *Mitoitus*.

## Rakenne ja kuormat

Aluksi syötetään siteen rakenne taulukkoon. Tukileveydellä ei ole merkitystä, koska siteelle ei kohdistu poikittaisia rasituksia.

**Rakenne** ohje

Aukkojen lukumäärä	1	Kulma	30,62	astetta	Mitat	Palkin suunnassa	Palkin pituus	3950 mm
Aukkojen pituus (mm)	3950	3000	2000	5000	4000	1		

Tukityyppi	2	1	1	1	5	1	1	1
Tukileveys	10	10	50	50				
Jäykkyys z (kN/m)	1000	1	1000	0	900			
Jäykkyys x (kN/m)	2000	1	0	0				
Kiertymäjäykkyys (kNm/rad)	1000	1	500	0	2000			

1 = liukuva niveltuki    2 = kiinteä niveltuki    3 = liukutuki    4 = jäykkä tuki    5 = jousituet    6 = ei tukea

Tämän jälkeen valitaan syötettävien kuormien tyypiksi peruskuormitustapaukset, kansalliseksi liitteeksi Suomi, seuraamusluokaksi CC3 ja määrääväksi muuttuvaksi kuormaksi hyötykuorma Q. Kuormitusyhdistelyyn muutetaan pysyvän kuorman varmuuskertoimeksi 1,35.

**Kuormat** ohje

Syötettävien kuormien tyyppi  
☒ peruskuormitustapauksia    ☐ mitoituskuormia MRT

Kansallinen liite: Oletus

Seuraamusluokka: CC3

Määräävä muuttuvakuorma: ☒ Q    ☐ Lumi    ☐ Tuuli

**Kuormitusyhdistely**

	G	Q	Lumi	Tuuli
$\gamma$	1,35	1,5	1,5	1,5
$K_{eff}$	1,1	1,1	1,1	1,1
$\psi_0$	1,0	0,7	0,6	0,6
$\psi_{0,oma}$	0	0	0	0

$1,35 * 1,1 * G + 1,5 * 1,1 * Q + 1,5 * 1,1 * 0,7 * Lumi + 1,5 * 1,1 * 0,6 * Tuuli$

Sitten syötetään kuormat ominaisarvoina eli ilman mitään kertoimia. Siteelle kohdistuu pelkkiä normaali-voimia, joita aiheutuu omasta painosta, hyötykuormasta ja tuulesta. Syötetään kukin normaalivoima erikseen valitsemalla kuormatyyppi ja painamalla *Lisää*.

**Normaalivoimat**

Normaalivoimien lukumäärä: 3

☐ G    ☐ Q    ☐ Lumi    ☒ Tuuli

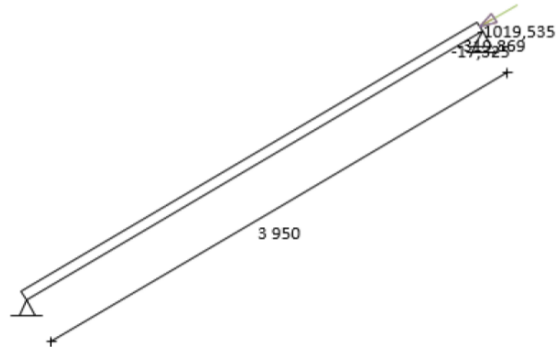
Kuormatyyppi	N (kN)	N <sub>mer</sub> (kN)	Paikka (mm)	$\psi_0$
G	-215,4	-319,87	3950	1
Q	-617,9	-1019,54	3950	1
Tuuli	-17,5	-17,33	3950	0,6

Lisää    Poista

Poistettava kuorma: 0

7 (16)

Tarkistetaan, että rakennemalli näyttää oikealta. Kuormatyytit piirtyvät omilla väreillään rakennemalliin. Kun samaan pisteeseen kohdistuu monia kuormia, tulee rakennemallista hieman epäselvä. Kuvassa esitetty mitoituskuormat.



### Profiilin mitoitus

Kun rakennemalli on valmis, mennään Vexcelin yläreunasta *Valssatut- ja putkiprofiilit* -välilehdelle.

Valitaan kansallinen liite, mitoittettava profiili ja käytettävä teräslaji. Projektissa käytetty siteenä kylmävalsattua putkiprofiilia CFRHS 200x200x10 ja teräslajina S355J2H, valitaan nämä. Pidetään nurjahdus vapaana eli *nurjahduksia ei estetty*. Side on päästään nivelisesti tuettu, joten siteen nurjahduspituus on sama kuin tukiväli. Tämä on Vexcelissä oletuksena. Halutaan optimoida profiili, joten laitetaan kohta *Optimoi profiili* valituksi.

Kansallinen liite: Suomi ohje

Profiili: Eurooppalaiset putkiprofiilit

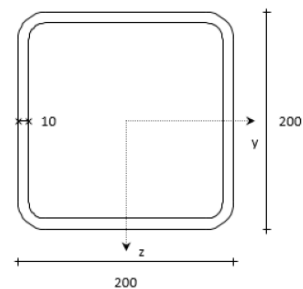
CFRHS 200x200x10 ☒ Optimoi profiili

Teräslaji: S355  $f_{y,oma}$  355 MPa

Nurjahdus: Nurjahduksia ei estetty

Nurjahduspituus:

z-akselin suhteen	3,95 m
y-akselin suhteen	3,95 m



8 (16)

Kiepahduskestävyyteen liittyvillä parametreilla ei tässä juurikaan merkitystä, koska kuormitus koostuu lähinnä normaalivoimasta. Käytetään Vexcelin oletusvalintoja. Kiepahduskestävyyteen liittyviä parametreja ovat momenttipinnan muoto, kiepahduspituus, kuormituspiste, kuorman suunta, kiertymä ja käyristymä. Normaalivoiman ja momentin yhteisvaikutuksen menetelmäksi valitaan Suomessa käytössä oleva menetelmä 2. Oletetaan rakenne molempiin suuntiin sivuun siirtyväksi (varmalla puolella oleva oletus).

<b>Kiepahdus:</b>	<input type="text" value="Kiepahdusta ei estetty"/>	<b>Massa</b>	56,96 kg/m
<b>Momenttipinnan muoto:</b>	<input type="text" value="Tasainen kuorma"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Profilin omapaino huomioidaan

<b>Kiepahduspituus:</b>	<input type="text" value="3,95"/> m	$M_{cr,oma}$	<input type="text" value="0"/> kNm	$M_{cr}$	6151 kNm
-------------------------	-------------------------------------	--------------	------------------------------------	----------	----------

<b>Kuormituspiste:</b>	Kuormituspiste <input checked="" type="radio"/> Ylälaippa <input type="radio"/> Vääntökeskiö <input type="radio"/> Alalaippa	<b>Kuorman suunta:</b>	Kuorma <input checked="" type="radio"/> z-akselin pos. suuntaan <input type="radio"/> z-akselin neg. suuntaan
<b>Kiertymä:</b>	Kiertymä <input checked="" type="radio"/> vapaa sauvan päissä <input type="radio"/> estetty sauvan päissä	<b>Käyristymä:</b>	Käyristymä <input checked="" type="radio"/> vapaa sauvan päissä <input type="radio"/> estetty sauvan päissä
<b>N-M yhteisvaikutus:</b>	N-M yhteisvaikutus <input type="radio"/> Menetelmä 1 (Liite A) <input checked="" type="radio"/> Menetelmä 2 (Liite B)	<b>Sauvan sivuun siirtyvyys:</b>	Sivun siirtyvyys <input type="radio"/> sivuun siirtymätön <input checked="" type="radio"/> molempiin suuntiin <input type="radio"/> z-akselin suuntaan <input type="radio"/> y-akselin suuntaan

Taipumarajalla ja esikorotuksella ei tässä tapauksessa merkitystä, koska sidettä taivuttavia voimia ei siteen omanpainon lisäksi ole. Käytetään oletusarvoja. Myöskään pistekuorman leveys ei vaikuta tässä tapauksessa mitoituseseen, sillä siteelle ei kohdistu poikittaissuuntaisia pistekuormia.

<b>Taipumaraja:</b>	<input type="text" value="Pääkannattaja vesikatossa ja katoksessa L/300"/>	<input type="text" value="L/100"/>
<b>Esikorotus:</b>	<input type="text" value="0,0"/> mm	Laske esikorotus pysyvälle kuormalle
<b>Pistekuorman leveys:</b>	<input type="text" value="50"/> mm	
<b>Teräksen osavarmuusluvut:</b>	$\gamma_{M0}$ <input type="text" value="1"/>	$\gamma_{M1}$ <input type="text" value="1"/>

Kun mitoituksessa käytettävät parametrin on valittu, voidaan tarkastella oikealla puolella näkyviä tuloksia CFRHS 200x200x10 profiilille. Tuloksista nähdään profiilin käyttöaste ja poikkileikkausluokka jokaiselle rasi-tukselle. Tulosten vieressä näkyy Eurokoodin kohta, jonka mukaan laskenta on suoritettu. Käyttöasteen

ollessa välillä 0 – 80 % on käyttöasteen vieressä vihreä V. Jos käyttöaste on 80 – 100 % on sen paikalla keltainen huutomerkki. Käyttöasteen ollessa yli 100 % maalautuu käyttöastesolu punaiseksi ja sen vieressä on punainen rasti. Vexcel ei laske pistekuormakestävyyksiä putkiprofiileille.

Tulokset	PL	Käyttöaste %	Eurokoodi:
Vetokestävyys		✓ 0,00	1993-1-1, 6.2.3
Puristuskestävyys	1	✓ 52,70	1993-1-1, 6.2.4
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,70	1993-1-1, 6.2.5
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		✓ 0,17	1993-1-1, 6.2.6
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		✓ 0,00	1993-1-5, 5
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	1993-1-1, 6.2.8
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	1993-1-5, 7.1
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,01	1993-1-1, 6.2.9
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	✓ 71,23	1993-1-1, 6.2.16, Liite A ja B
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	✓ 71,23	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	1993-1-1, 6.2.10
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 71,22	1993-1-1, 6.3.1
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 71,22	
Väöntönurjahduskestävyys	1	✓ 52,70	
Kiepahduskestävyys	1	✓ 0,00	1993-1-1, 6.3.2
Pistekuormakestävyys		Ei laske	1993-1-5, 6
Taipuma z-akselin suunnassa		✓ 9,79	

### Tulosten vertailu

Kohteen rakenteet on mitoitettu StaadPRO –ohjelmalla. Staadista saatu käyttöaste siteelle on 72 %. Huomataan, että Vexcelillä laskettu käyttöaste vastaa melko hyvin Staadin tulosta.

### Profiilin optimointi

Profiilin käyttöaste on 71,23 %, joten halutessaan voi optimoida profiilin. Tulosten yläpuolelta löytyy profiilin optimointityökalu. Valitaan hakukohdat, joista profiilia lähdetään etsimään eteen- ja/tai taaksepäin. Hakukohtien lisääminen onnistuu painamalla *Valitse hakukohta* –painiketta ja Vexcel lisää silloin mitoitettavana olevan profiilin hakukohtiin. Profiilin vieressä näkyy profiilin numero, joiden mukaan Vexcel hakee profiileita. Tämän jälkeen valitaan laskettavien profiilien lukumäärä hakukohdasta eteen- ja taaksepäin ja sallitut käyttöasteet murto- ja käyttörajatilassa. Myös profiilin mitoille voidaan antaa kriteerejä. Valitaan hakukohdaksi mitoitettu CFRHS 200x200x10 profiili ja laskettavien profiilien lukumääräksi 20 eteen- ja taaksepäin. Annetaan sallituiksi käyttöasteiksi 90 % ja sallituiksi poikkileikkausluokiksi 1, 2 ja 3.

10 (18)

**Profiilin optimointi** ohje

Hakukohdat: 1

Etsi profiili Katso laskentatulokset Valitse hakukohta Tyhjennä hakukohdat

Profiilien lukumäärä hakukohdasta eteenpäin 20  $h_{min}$  1 mm

Profiilien lukumäärä hakukohdasta taaksepäin 20  $h_{max}$  800 mm

Maksimi käyttöaste mrt 90  $b_{min}$  1 mm

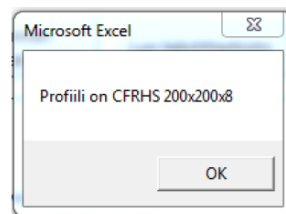
Maksimi käyttöaste krt 90  $b_{max}$  500 mm

Sallitut PL:t 1,2,3  $t_{r,min}$  1 mm

$t_{w,min}$  1 mm

599	CFRHS 200x200x10

Tämän jälkeen painetaan *Etsi profiili* -painiketta. Laskettuaan Vexcel ilmoittaa että kevyin, kriteerit täyttävä profiili on CFRHS 200x200x8.



Uuden profiilin massa on 46,51 kg/m. Alkuperäisen profiilin massa oli 56,96 kg/m. Alla uuden profiilin käyttöasteet.

Tulokset	PL	Käyttöaste %	Eurokoodi:
Vetokestävyys		✓ 0,00	1993-1-1, 6.2.3
Puristuskestävyys	1	✓ 64,54	1993-1-1, 6.2.4
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,69	1993-1-1, 6.2.5
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		✓ 0,17	1993-1-1, 6.2.6
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		✓ 0,00	1993-1-5, 5
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	1993-1-1, 6.2.8
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	1993-1-5, 7.1
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,01	1993-1-1, 6.2.9
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	⚠ 86,59	1993-1-1, 6.2.16, Liite A ja B
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiiliisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	⚠ 86,58	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	✓ 0,00	1993-1-1, 6.2.10
Taivutus- ja leikkaus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	✓ 0,00	
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	✓ 0,00	
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	1	⚠ 86,58	1993-1-1, 6.3.1
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	1	⚠ 86,58	
Vääntönurjahduskestävyys	1	✓ 64,54	
Kiepahduskestävyys	1	✓ 0,00	1993-1-1, 6.3.2
Pistekuormakestävyys		Ei laske	1993-1-5, 6
Taipuma z-akselin suunnassa		✓ 11,99	

11 (18)

*Katso laskentatulokset* –painikkeen takaa päästään tarkastelemaan laskettuja profiileja, niiden käyttöasteita ja massoja. Näkyvissä on myös profiilien mitat ja poikkileikkausluokat.

Profiili	Teräslaji	Massa (kg/m)	PL	Käyttöaste mrt(%)	Käyttöaste krt(%)	h	b	t <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>
CFRHS 160x160x6,3	579 S355	29,33513011	1	159,33	19,01	160	160	6,3	6,3
CFRHS 160x160x8	580 S355	36,4573446	1	129,75	15,29	160	160	8	8
CFRHS 160x160x10	581 S355	44,40460093	1	108,12	12,56	160	160	10	10
CFRHS 160x160x12	582 S355	50,91468168	1	99,35	10,95	160	160	12	12
CFRHS 160x160x12,5	583 S355	52,6292987	1	96,47	10,59	160	160	12,5	12,5
CFRHS 160x160x16	584 S355	63,72032298	1	82,25	8,75	160	160	16	16
CFRHS 180x180x4	585 S355	21,78215211	4	219,34	25,60	180	180	4	4
CFRHS 180x180x5	586 S355	26,96961267	4	160,45	20,67	180	180	5	5
CFRHS 180x180x6	587 S355	32,05384225	2	132,82	17,39	180	180	6	6
CFRHS 180x180x6,3	588 S355	33,29153011	1	128,27	16,75	180	180	6,3	6,3
CFRHS 180x180x8	589 S355	41,4813446	1	103,82	13,44	180	180	8	8
CFRHS 180x180x10	590 S355	50,68460093	1	88,05	11,00	180	180	10	10
CFRHS 180x180x12	591 S355	58,45068168	1	77,34	9,54	180	180	12	12
CFRHS 180x180x12,5	592 S355	60,4792987	1	74,94	9,22	180	180	12,5	12,5
CFRHS 180x180x16	593 S355	73,76832298	1	62,76	7,56	180	180	16	16
CFRHS 200x200x4	594 S355	24,29415211	4	198,13	22,95	200	200	4	4
CFRHS 200x200x5	595 S355	30,10961267	4	141,91	18,52	200	200	5	5
CFRHS 200x200x6	596 S355	35,82184225	2	111,45	15,56	200	200	6	6
CFRHS 200x200x6,3	597 S355	37,24793011	2	107,42	14,97	200	200	6,3	6,3
CFRHS 200x200x8	598 S355	46,5053446	1	88,75	11,99	200	200	8	8
CFRHS 200x200x10	599 S355	56,96460093	1	72,64	9,79	200	200	10	10
CFRHS 200x200x12	600 S355	65,98668168	1	63,28	8,45	200	200	12	12
CFRHS 200x200x12,5	601 S355	68,3292987	1	61,21	8,16	200	200	12,5	12,5
CFRHS 200x200x16	602 S355	83,81632298	1	50,64	6,65	200	200	16	16
CFRHS 220x220x5	603 S355	33,24961267	4	129,57	16,77	220	220	5	5
CFRHS 220x220x6	604 S355	39,58984225	4	99,24	14,08	220	220	6	6
CFRHS 220x220x6,3	605 S355	41,20433011	4	92,96	13,53	220	220	6,3	6,3
CFRHS 220x220x8	606 S355	51,5293446	1	75,82	10,82	220	220	8	8
CFRHS 220x220x10	607 S355	63,24460093	1	61,89	8,82	220	220	10	10
CFRHS 220x220x12	608 S355	73,52268168	1	53,58	7,58	220	220	12	12
CFRHS 220x220x12,5	609 S355	76,1792987	1	51,78	7,32	220	220	12,5	12,5
CFRHS 220x220x16	610 S355	93,86432298	1	42,47	5,94	220	220	16	16
CFRHS 250x250x5	611 S355	37,95961267	4	117,39	14,69	250	250	5	5
CFRHS 250x250x6	612 S355	45,24184225	4	91,59	12,32	250	250	6	6
CFRHS 250x250x6,3	613 S355	47,13893011	4	82,66	11,83	250	250	6,3	6,3
CFRHS 250x250x8	614 S355	59,0653446	2	62,35	9,44	250	250	8	8
CFRHS 250x250x10	615 S355	72,66460093	1	50,74	7,67	250	250	10	10
CFRHS 250x250x12	616 S355	84,82668168	1	43,64	6,57	250	250	12	12
CFRHS 250x250x12,5	617 S355	87,9542987	1	42,13	6,34	250	250	12,5	12,5
CFRHS 250x250x16	618 S355	108,936323	1	34,25	5,12	250	250	16	16

## Rasitukset

*Rasitukset* –välilehden takaa nähdään palkin normaalivoima-, leikkausvoima-, taivutusmomentti- ja taipumakuvaajat, sekä näiden maksimi- ja minimiarvot. Välilehdeltä löytyy myös tukireaktiot. Oletuksena Vexcel näyttää murtorajatilan kuormitusyhdistelyn rasitukset, mutta helposti voidaan myös tarkastella käyttöraja-tilan kuormitusyhdistelyn tai yksittäisten kuormitustapausten rasituksia. Näytettäviä rasituksia voidaan vaihtaa alusvetovalikosta sivun yläreunassa. Taipuma on laskettu aina käyttöraja-tilassa.

## Laskennan tulostus

Lopuksi voidaan tulostaa joko suppea tai laaja tulostus laskelmasta *Tulostus* –välilehdeltä. Tulostusalueet ovat valmiiksi määritellyt. Alla laaja tulostus laskelmasta projektissa käytetyllä CFRHS 200x200x10 profiililla.



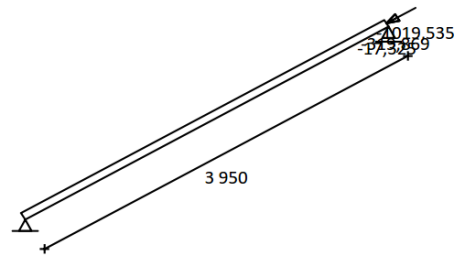
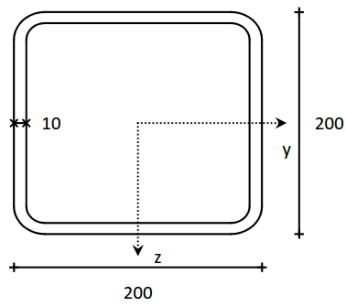
12 (16)

## Vexcel member design

Rakennelaskelma nro:	1 Päiväys:	25.1.2016
Työn nro:	T106	Sisältö:
Kohde:	Nokianvirta	
Tekijä:	Janne Koivuniemi	Kattilapukin vinoside

Laskennan perustana on Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Eurocode 3-oppikirja (EN 1993-1-1), EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5

### Rakenne ja kuormat:



**Profiili:** CFRHS 200x200x10

**Palkin pituus:** 3950 mm  
**Palkin kulma:** 30,62 astetta

**Profiilin paino:** huomioidaan 57,0 kg/m

### Normaalivoimat

	N (kN)	N mrt (kN)	Paikka (mm)	$\psi_0$
G	-215,4	-319,87	3950	1
Q	-617,9	-1019,5	3950	1
Tuuli	-17,5	-17,325	3950	0,6

### Mitoitus:

**Kansalliset liitteet:** Oletus

**Teräslaji:** S355

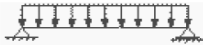

**Nurjahdus:** Nurjahduksia ei estetty

**Nurjahduspituus:**



13 (16)



			z-akselin suhteen	4,0	m
			y-akselin suhteen	4,0	m
<b>Kiepahdus:</b>	Kiepahdusta ei estetty	<b>Kiepahduspituus:</b>		4,0	m
<b>Kuormituspiste:</b>	Ylälaippa	<b>Kuorman suunta:</b>		z-akselin pos. suuntaan	
<b>Momenttipinnan muoto:</b>			<b>Mcr:</b>	6151,4	kNm
<b>Kiertymä:</b>	vapaa sauvan päissä	<b>Käyritymä:</b>		vapaa sauvan päissä	
<b>N-M yhteisvaikutus:</b>	Menetelmä 2 (Liite B)	<b>Sivuun siirtyvyys:</b>		molempiin suuntiin	
<b>Taipumaraja:</b>	L/300	<b>Esikorotus:</b>		0,0	mm

14 (16)

**Tulokset:**

	PL	Käyttöaste %
Vetokestävyys		0,0
Puristuskestävyys	1	52,7
Taivutuskestävyys y-akselin ympäri	1	0,7
Taivutuskestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutuskestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Leikkauskestävyys z-akselin suunnassa		0,2
Leikkauskestävyys y-akselin suunnassa		0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja leikkauskestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiilisuuden menetys mahdollinen, y-aks. suhteen	1	71,2
Taivutus- ja puristuskestävyys, stabiilisuuden menetys mahdollinen, z-aks. suhteen	1	71,2
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys y-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys z-akselin ympäri	1	0,0
Taivutus-, leikkaus- ja normaalivoimakestävyys yhteisvaikutus	1	0,0
Nurjahduskestävyys y-akselin ympäri	1	71,2
Nurjahduskestävyys z-akselin ympäri	1	71,2
Vääntönurjahduskestävyys	1	52,7
Kiepahduskestävyys	1	0,0
Pistekuormakestävyys		Ei laske
Taipuma z-akselin suunnassa		9,8

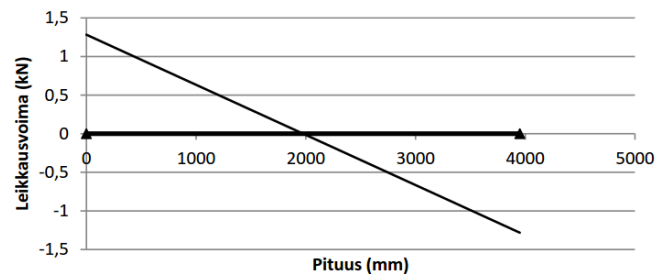
**Tukireaktiot mrt**

Tuki	Tuki	x-suunta	Momentti (kNm)
1	692,5	1167,6	0,0
2	1,5	0,0	0,0

Pystysuunnan tukireaktiot      Vaakasuunnan tukireaktiot

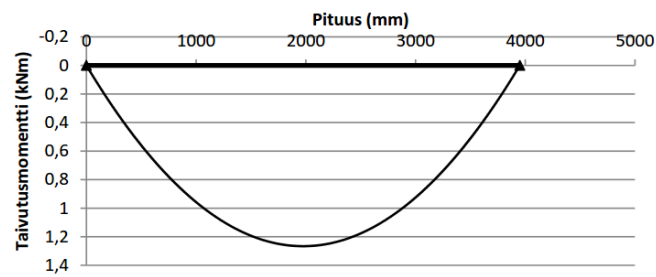
15 (16)

### Leikkausvoima z



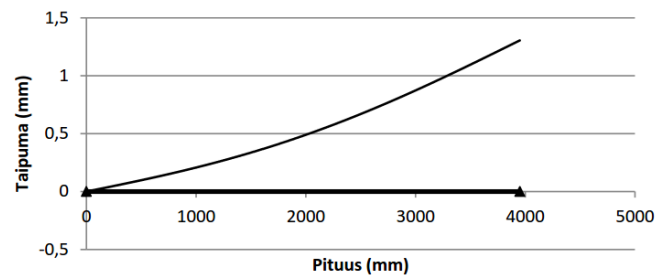
Maksimi: 1,3 kN  
Minimi: -1,3 kN

### Taivutusmomentti y



Maksimi: 1,3 kNm  
Minimi: 0,0 kNm

### Taipuma

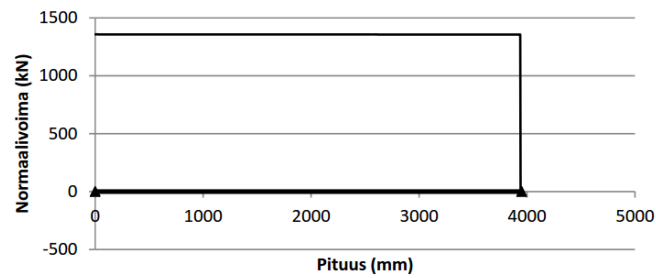


Maksimi: 1,3 mm  
Minimi: 0,0 mm

16 (16)

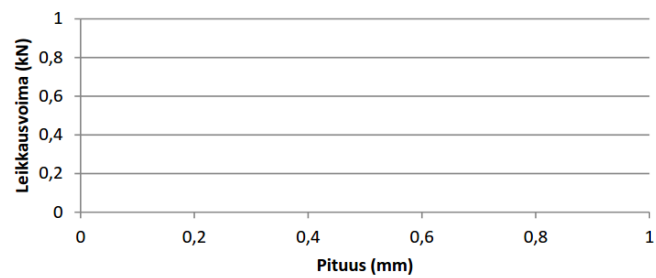


### Normaalivoima



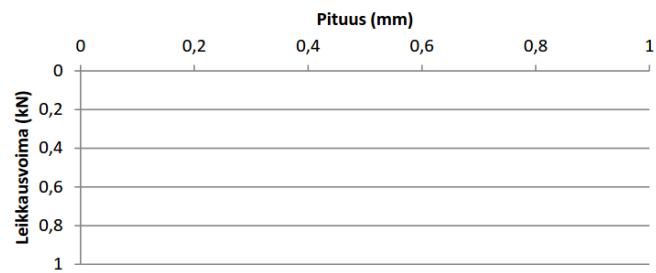
Maksimi: 1357,5 kN  
Minimi: -0,8 kN

### Leikkausvoima y



Maksimi: 0,0 kN  
Minimi: 0,0 kN

### Taivutusmomentti z



Maksimi: 0,0 kNm  
Minimi: 0,0 kNm