



## **ULOKEPORTAALI 12 m TYYPPISUUNNITELMA**

### **Ulokeportaali ( $L \leq 12\text{m}$ )**

Uloke (m) 8,3...12,0

Korkeus (m)  $\leq 8,30$

Kuormitus: Tuulikuorma, maastoluokka II, Lumikuorma

## **Rakennelaskelmat**

**29.3.2019**

### **SUUNNITTELU / SITOWISE**

Laatinut: Mikko Tuominen

Sisäinen tarkastus: Jussi Luokkakallio 30.10.2019

### **TARKASTAMINEN / HYVÄKSYMINEN**

Tarkastusluokka 2

Hyväksynyt: xxxx, nimi / taho

## Sisälllys rakennelaskelmat

1 Perustiedot	1
1.1 Suunniteluperusteet	1
1.2 Rakennemallit	3
1.3 Vertailu käytössäoleviin ulokeportaaleihin	8
1.4 Materiaaliominaisuudet	10
2 Maan sivuvastukset	21
2.1 Paalujen sivuvastukset	21
2.2 Siipiosan sivuvastukset	27
3 Kuormat	30
3.1 Pysyvät kuormat	31
3.2 Muuttuvat kuormat	32
3.3 Kuormien yhdistely	37
4 Voimasuureet pylvään juuressa	38
4.1 Pysyvät kuormat	39
4.2 Muuttuvat kuormat	39
4.3 Yhdistelyt	40
4.4 Voimasuureiden tarkistus	40
5 Peruslaatan geotekninen mitoitus	41
5.1 Peruslaatan ja jalustaosan mitat	41
5.2 Kuormat	44
5.3 Voimasuureet	47
5.4 Epäkeskisyydet ja pohjapaineet käyttörajatiloissa	54
5.5 Kantokestävyys	61
5.6 Liukumiskestävyys	73
5.7 Yhteenveto	74
6 Perustuksen kiertymät ja siirtymät	77
6.1 Maaparametrit	77
6.2 Kiertymät ja siirtymät	79
7 Anturaperustuksen rakenteellinen mitoitus	81
7.1 Peruslaatan mitoitus	82
7.2 Jalustaosan mitoitus	91
8 Paaluperustuksen rakenteellinen mitoitus	95
8.1 Paalun mitoitus	96
8.2 Siiven mitoitus	117
9 Pylvään mitoitus	120
9.1 Poikkileikkaus- ja materiaalitiedot	121
9.2 Voimasuureet	122
9.3 Kapasiteetti	125
9.4 Kytkenäaukkojen vaikutukset	129
10 Orren mitoitus	130
10.1 Alkuosa	131
10.2 Loppuosa	145

11 Liitosten mitoitus	149
11.1 Orren jatkoksen päätyöevyliitos	150
11.2 Orren kiinnittyminen pylvääseen	157
11.3 Perustusliitos	160
12 Siirtymätarkastelut	165

# 1 Perustiedot

## 1.1 Suunnitteluperusteet

### Noudatettavat ohjeet ja standardit

Portaalien teräsrakenteiden laatuvaatimukset standardin SFS-EN 1090-2 mukaan (Huomioidaan Väyläviraston OHJE 18.6.2014 3172/070/2013)

LO 32/2016 Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje

LO 20/2013 Liikennemerkkien rakenne ja pystytys

LO 31/2017 NCCI 2 – Betonirakenteiden suunnittelu

LO 27/2016 NCCI 4 – Teräs- ja liittorakenteiden suunnittelu

LO 28/2014 NCCI T – Teräsrakenteiden toteutus (SFS-EN 1090-2 soveltamisohje)

LO 13/2017 NCCI 7 – Geotekninen suunnittelu

RIL 254-2016 Paalutusohje, PO-2016

### Portaalin mitat

Orren maksimipituus pylvään keskilinjasta mitattuna: 12 m

Orren maksimikorkeus (perustusliitos → Orren keskilinja): 8,2 m

Alikulkukorkeus: 6,3 m

Opastusmerkkien yhteenlaskettu maksimipinta-ala: 12 m<sup>2</sup>

Opastusmerkin maksimiohitus orren päässä: 0,40 m

Taulujen kokonaispinta-alan maksimiepäkesisyys 2,0 m

Mitoituksellisesti suunnittelussa varaudutaan 15 % esitettyä 12 m<sup>2</sup> maksimitaulupinta-alaa suurempiin tauluihin

### Luokitukset

Suunnittelukäyttöikä: 50 vuotta

Seuraamusluokka: CC2

Betonirakenteiden toteutusluokka: 2

Teräsrakenteiden toteutusluokka: EXC2

Paalun korroosiovara: 3,25 mm

(PO-2016, taulukko 4.21, Tiivistämättömät aggressiiviset täytöt, 50 vuotta)

## Kuormat

Käytetään Liikenneviraston ohjeen Liikennemerkkien rakenne ja pystytys, 18.6.2013 (Liikennevi-raston ohjeita 20/2013) mukaisia portaalille kappaleessa 5 määritettyjä kuormia. Tämän lisäksi on käytetty lumikuormaa. Kyseisellä kuormalla mallinnetaan lumen lisäksi rakenteisiin mahdollisesti kertyvä jää. Rakenteen mitoituksessa käytetyt kuormat:

- Rakenteen omapaino
- Tuulikuorma
  - o Tuulennopeuden perusarvo 21 m/s
  - o Maastoluokka II
  - o Nopeuspainekorkeus 10 m
- Lumikuorma 1,0 kN/m<sup>2</sup>

## Muita huomioita

Suunnittelun lähtökohtana on pidetty Väylävirasto ulokeportaalien tyypipiirustuksia. Nämä on todettu toimiviksi; Tyypipiirustussarja on ollut käytössä 90-luvun alusta. Teräsrakenteen mitoituksessa ei ylitetä Väyläviraston tyypipiirustusten käyttöasteita. Näin on tehty myös seuraavista syistä:

- Tuulikuorman aiheuttamaa mahdollista värähtelyä ei ole voitu tutkia tarkasti (rakennekerroin värähtelylle on vaikeasti määritettävissä)
- Tuulikuorman mahdollisesti aiheuttamaa väsytystä ei ole tarkasteltu
- KytKentäaukot aiheuttavat paikallisia jännityspiikkejä (KytKentäaukkojen vaikutuksia on tutkittu kuorimallilla ja tämän johdosta kahden kytKentäaukon väliä on kasvatettu Väyläviraston tyypipiirustussarjan mukaisesta.)

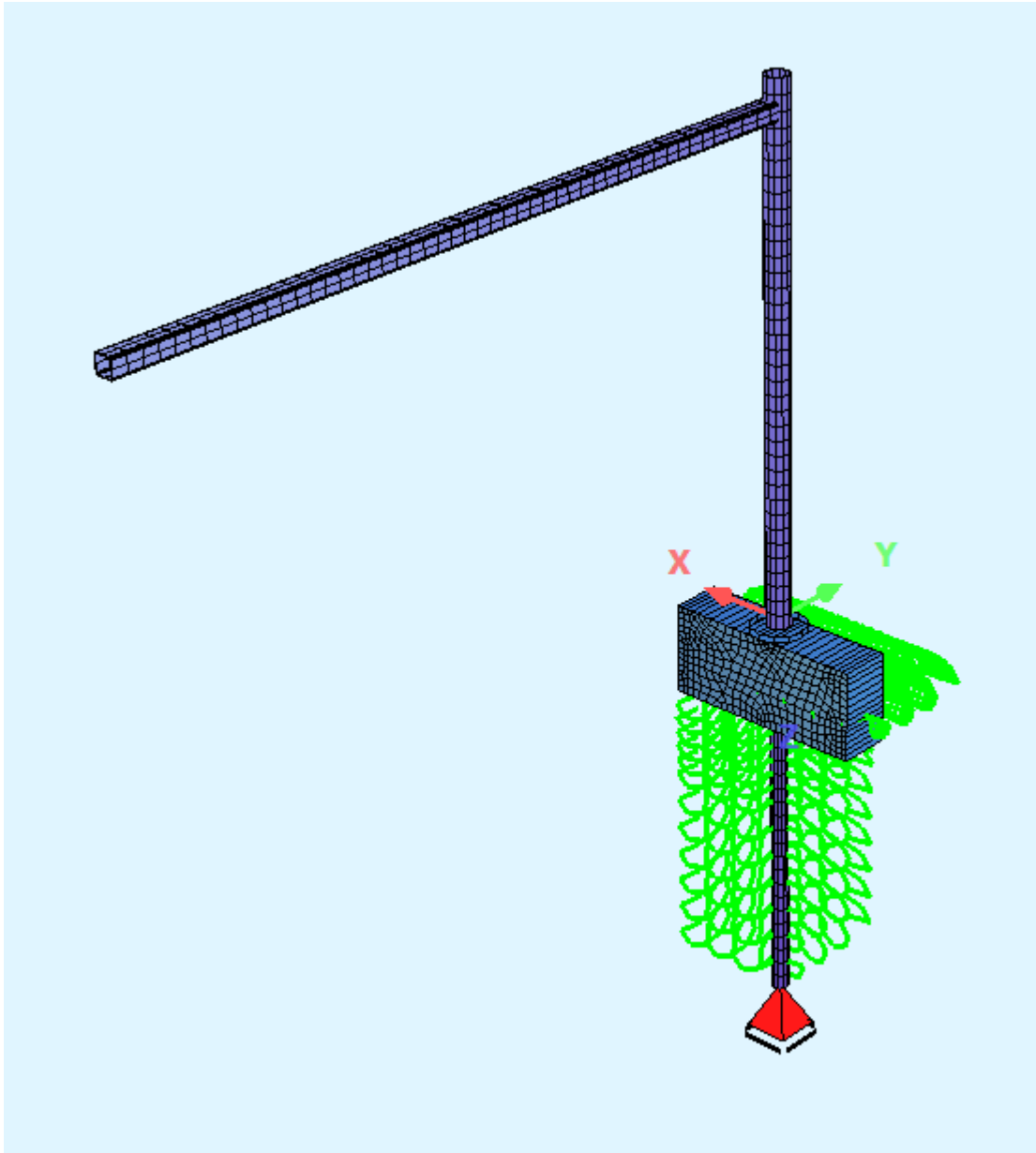
Rakenteellisesti oleelliset hitsit tehdään luokassa B (SFS-EN ISO 5817). Muut hitsit tehdään luokassa C. B-luokan hitsejä tulee käyttää väsytyksessä rakenteissa. Normaalia tuulikuormaa ei lueta väsyttäväksi kuormaksi tavallisissa tapauksissa. Ulokeportaalilla tuulikuorma on selvästi määräävin kuormitus. Lisäksi tuulikuorma voi aiheuttaa väsyttävää rasitusta portaaliin. Väsyttävää vaikutusta ei ole laskettu. Tämän johdosta liitoksissa käytetään ylimääräistä varmuutta.

## **1.2 Rakennemallit**

Ulkoportaali on staattisesti määrätty rakenne. Tämän johdosta mitoitusvoimasuureet on voitu laskea yksinkertaisesti käsin laskulla. Käsin laskun lisäksi voimasuureet on tarkistettu FEM-rakennemalleilla.

Esitellään FEM-rakennemalleja seuraavilla sivuilla.

## Paaluperustus

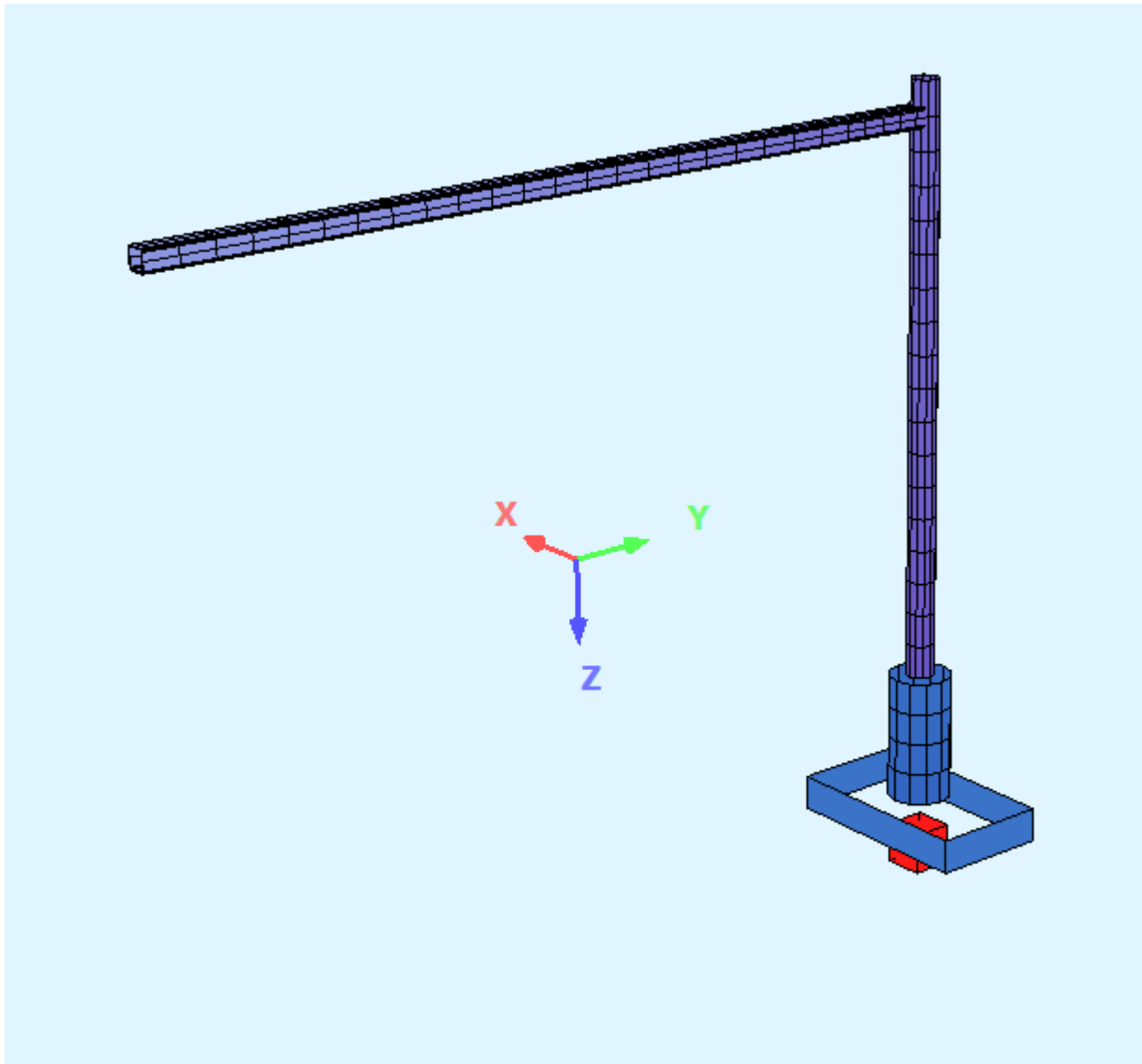


Pylväs, orsi ja paalu on mallinnettu palkkielementeillä. Paalu on tuettu alapäästään vain pystysuunnassa (kiertyminen ja siirtminen vapaata). Jalustaosan siipi on mallinnettu kuorielementtinä paalun ja pylvään väliin.

Maata kuvaavat jouset on mallinnettu pistejousina paalulle. Jalustaosalle on mallinnettu maata kuvaava viivajousi 2/3-osaa jalustaosan korkeudelle jalustaosan yläpinnasta lukien. Jouset on mallinnettu lineaarisina. Jalustaosan jouset on mallinnettu myös epälineaarisina bi-lineaarisen maanpaine-siirtymä-yhteyden mukaisesti.

Mallilla lasketaan paalun voimasuureet sekä siirtymät. Mallilla tarkastetaan osaltaan rakenteen siirtymiä.

## Anturaperustus

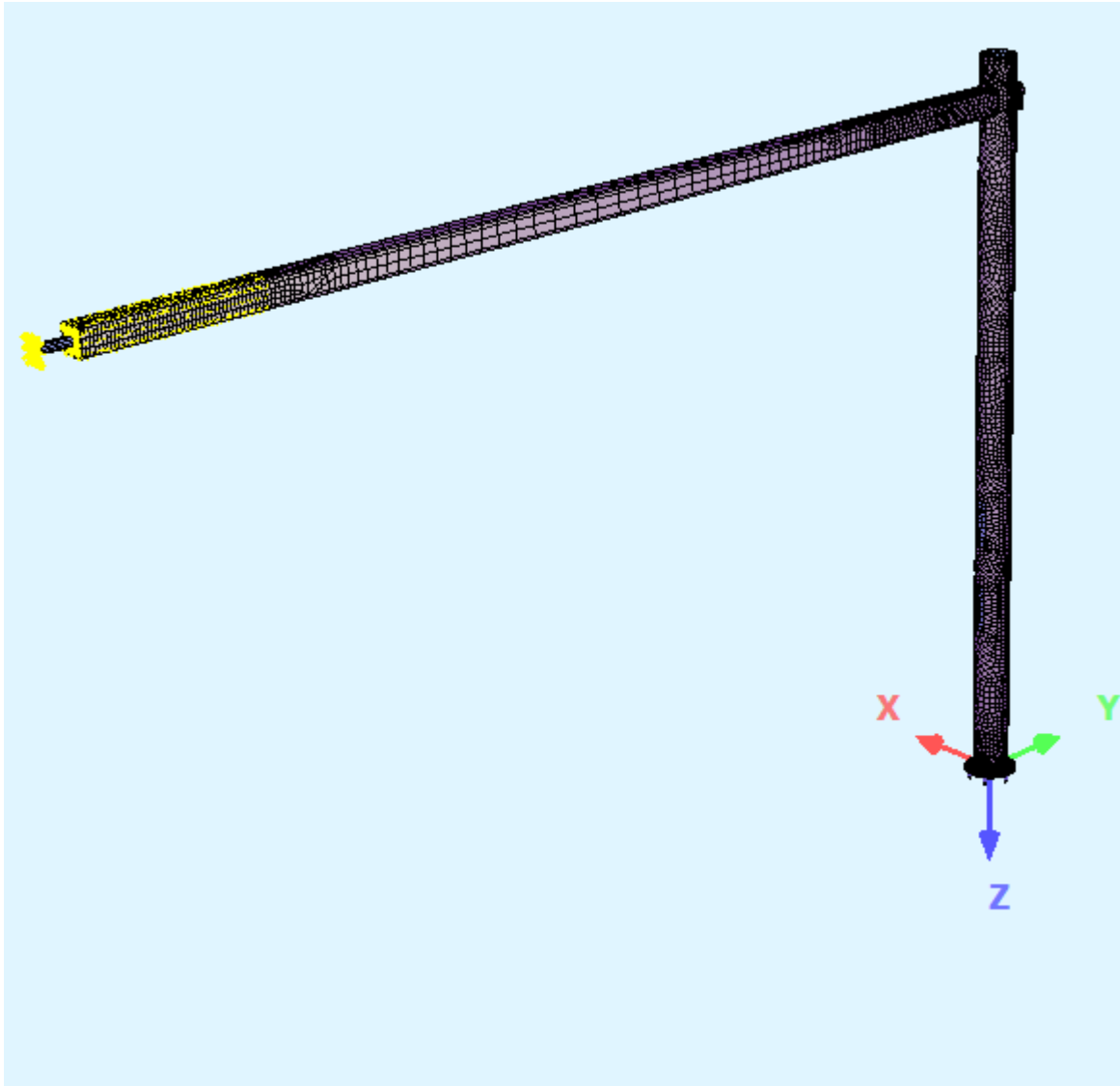


Kaikki osat on mallinnettu palkkielementeillä. Anturan alapinnassa on käytetty kaikkiin suuntiin jäykkää tukea.

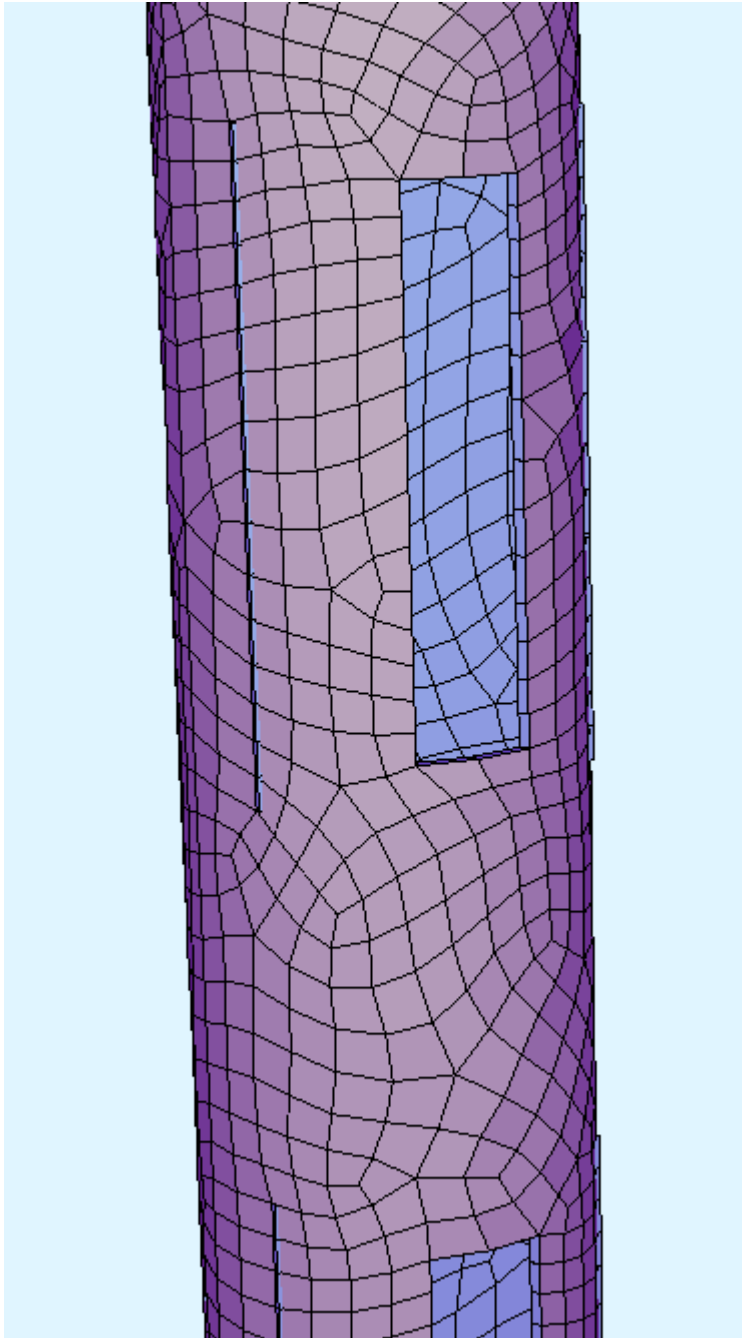
Mallilla tarkastetaan orren ja pylvään voimasuureita sekä osaltaan rakenteen siirtymiä.



## Kuorimalli



Kuorimallilla on tutkittu teräsrakenteiden jännityksiä ja erityisesti jännityksiä kytkentäaukkojen ympäristössä. Lisäksi kuorimallilla on tutkittu rakenteen siirtymiä ja niiden vastaavuutta palkkimalliin. Mallissa orren ja pylvään liitos on mallinnettu yksinkertaistaen viemällä orsi pylvään läpi.



KytKentäaukot on mallinnettu FEM-malliin ilman, että aukon kulmia on pyöristetty. Pyöristys on hankala toteuttaa FEM-malliin kaarevien pintojen johdosta. KytKentäaukkojen takaiset jäykistävät levyt on mallinnettu.

### **1.3 Vertailu käytössäoleviin ulokeportaaleihin**

Mitoituksellisesti ulokeportaalin teräsosia ei ole haluttu mitoittaa lähelle 100 % käyttöastetta. Tehdään vertailulaskentoja laskemalla olemassa olevien tyyppipiirustusten ulokeportaalien pylväiden ja orsien käyttöasteita. Esitetään seuraavalla sivulla olemassa olevien ulokeportaalien ja uuden tyyppipiirustuksen käyttöasteita.

## Olemassa olevin portaaleiden rasitukset ja käyttöasteet nyt käytetyillä laskentapohjilla

Lasketaan laskentapohjilla käytössä olevien vanhojen TIEL -tyyppiratkaisujen rasitukset ja käyttöasteet.

Lasketaan suurin 10 m<sup>2</sup> taulupinta-alan ulokeportaali sekä orren korkeudella 7,0 ja 9,2 m

Tässäkin on mukana taulujen pinta-alalle lisävarmuus 15 %, jolla on korotettu tuulen aiheuttamaa painetta.

### Taulut ulokkeen päässä (H=2,5 m; L = 4,0 m)

#### Ty 12/135

Amax [m<sup>2</sup>] 10 2,5 x 4,0

Hmax [m] 7

Lmax 8.3

	[profiili]	[Teräslaji]	[fy]	vM [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttöaste vM	Käyttöaste EN
Pylväs	355,6x10	235 JR	235	250	1.064	0.704
Orsi	250x10	355J2 + N	355	287	0.808	0.609

#### Ty 12/140

*Taulu (L x h)*

Amax [m<sup>2</sup>] 10 2,5 x 4,0

Hmax [m] 9.2

Lmax 8.3

	[profiili]	[Teräslaji]	[fy]	vM [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttöaste vM	Käyttöaste EN
Pylväs	355,6x10	355J2 + N	355	298	0.839	0.573
Orsi	250x10	355J2 + N	355	287	0.808	0.609

### Taulut ulokkeen päässä (H=4,0 m; L = 2,5 m)

#### Ty 12/135

Amax [m<sup>2</sup>] 10 4,0 x 2,5

Hmax [m] 7

Lmax 8.3

	[profiili]	[Teräslaji]	[fy]	vM [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttöaste vM	Käyttöaste EN
Pylväs	355,6x10	235 JR	235	276	1.174	0.832
Orsi	250x10	355J2 + N	355	320	0.901	0.677

#### Ty 12/140

Amax [m<sup>2</sup>] 10 4,0 x 2,5

Hmax [m] 9.2

Lmax 8.3

	[profiili]	[Teräslaji]	[fy]	vM [N/mm <sup>2</sup> ]	Käyttöaste vM	Käyttöaste EN
Pylväs	355,6x10	355J2 + N	355	325	0.915	0.62
Orsi	250x10	355J2 + N	355	320	0.901	0.677

#### Käyttöasteiden maksimit

Pylväs 0.832

Orsi 0.677

Lyhyemällä pylväällä, jossa materiaali on S235 käyttöasteet ovat hieman suuremmat.

Muuten käyttöasteet ovat sekä orella että pilarilla 0,6..0,7

		Käyttöaste vM	Käyttöaste EN	
Suunnitellulla 12 m ulokeportaalilla	Pylväs	0.808	0.493	
	Orsi 300x16	0.837	0.605	alku
	Orsi 300x12,5	0.856	0.629	loppu

## 1.4 Materiaaliominaisuudet

### Peruslaatta, betoni C30/37-2

Materiaaliominaisuudet (NCCI 2, taul. 3.2)

Puristuslujuus

$$f_{ck} := 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Pitkäaikaislujuuskerroin

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Betonin osavarmuusluvut

$$\gamma_c := 1.5$$

$$\gamma_{c,a} := 1.0$$

Puristuslujuuden mitoitusarvo

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{cd} = 17.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{cd,a} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,a}}$$

$$f_{cd,a} = 25.50 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkaukselle

$$f_{cd,V} := \begin{cases} f_{cd} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \alpha_{cc} \cdot \frac{50 \text{ MPa}}{\gamma_c} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases}$$

$$f_{cd,V} = 17.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimääräinen puristuslujuus

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{cm} = 38.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimääräinen vetolujuus

$$f_{ctm} := \begin{cases} 0.30 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2.12 \cdot \ln \left[ 1 + \left( \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right) \right] \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases}$$

$$f_{ctm} = 2.90 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vetolujuuden ominaisarvo

$$f_{ctk,0.05} := 0.7 \cdot f_{ctm} \quad f_{ctk,0.05} = 2.03 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vetolujuuden mitoitusarvo

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c}$$

$$f_{ctd} = 1.35 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkauskestävyyden laskennassa

$$f_{ctd,V} := \begin{cases} f_{ctd} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \frac{0.7 \cdot 0.30 \cdot (50)^{\frac{2}{3}} \text{ MPa}}{\gamma_c} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases}$$

$$f_{ctd,V} = 1.35 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimääräinen kimmokerroin

$$E_{cm} := 22 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10 \frac{N}{mm^2}} \right)^{0.3} \cdot GPa \quad E_{cm} = 32836.57 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Suppeusluku (ei -halkeillut betoni)

$$\nu := 0.2$$

## Betonin jännitys-muodonmuutosyhteys

Muodonmuutos lujuuden maksimiarvolla

$$\epsilon_{c2} := \begin{cases} 2.0 \cdot 10^{-3} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \left[ 2.0 + 0.085 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} - 50 \right)^{0.53} \right] \cdot 10^{-3} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases} \quad \epsilon_{c2} = 2.00 \cdot 10^{-3}$$

Murtopuristuma

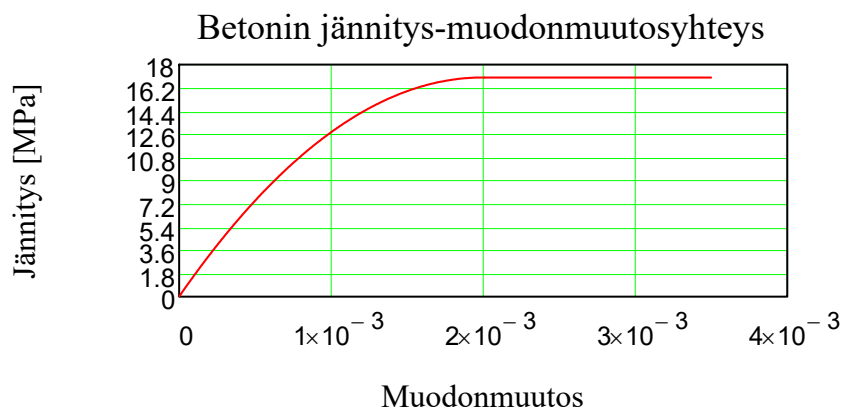
$$\epsilon_{cu2} := \begin{cases} 3.5 \cdot 10^{-3} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \left[ 2.6 + 35 \cdot \left( \frac{90 - \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-3} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases} \quad \epsilon_{cu2} = 3.50 \cdot 10^{-3}$$

Eksponentti

$$n := \begin{cases} 2 & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.4 + 23.4 \cdot \left( \frac{90 - \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}{100} \right)^4 & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases} \quad n = 2.00$$

Jännitys-muodonmuutosyhteys NCCI 2 kohta 3.1.7, kuva 3.6

$$\sigma_c(\epsilon) := \begin{cases} f_{cd} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right] & \text{if } 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{if } \epsilon_{c2} < \epsilon \leq \epsilon_{cu2} \end{cases} \quad \epsilon := 0, 1 \cdot 10^{-5} \dots 5\%$$



## Viruma ja kutistuma

### Tarvittavat lähtötiedot viruman ja kutistuman laskentaan

Ympäristön suhteellinen kosteus (peruslaatta maan alla)

$$RH := 100\%$$

Betonipoikkileikkauksen ala

$$A_C := \min(B, L) \cdot h$$

$$A_C = 1.10 \cdot \text{m}^2$$

Haihtumiselle altis piiri

$$u := 2 \cdot \min(B, L) + 2 \cdot h$$

Muunnettu paksuus

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_C}{u}$$

$$h_0 = 407.41 \cdot \text{mm}$$

Sementtityyppi

$$\text{sementtityyppi} := \text{"N"}$$

$$(R = \text{rapid}, N = \text{normaali}, S = \text{hidas})$$



Kutistuma ajan funktiona

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

, jossa  $t$  on betonin ikä tarkasteluhetkenä vuorokausina

$t_s$  on betonin ikä vuorokausina kuivumiskutistuman alkaessa (tavallisesti jälkihoitoajan pituus)

Lasketaan kutistuma lopputilanteessa

$$\varepsilon_{CS,00} := \varepsilon_{CS}(100\text{yr}, 14\text{day})$$

$$\varepsilon_{CS,00} = 0.05 \cdot 10^{-3}$$

Virumaluku betonille

$$\phi(t, t_0) := \beta_c(t, t_0) \cdot \varphi_{RH} \cdot \beta_{fcm} \cdot \beta_{t0}(t_0)$$

, jossa  $t$  on betonin ikä tarkasteluhetkenä vuorokausina

$t_0$  on betonin ikä vuorokausina kuormituksen alkaessa

Lasketaan virumaluku lopputilanteessa

$$\phi_{00} := \phi(100\text{yr}, 14\text{day})$$

$$\phi_{00} = 1.48$$

## Betoniteräs B500B

Materiaaliominaisuudet NCCI 2, kohta 3.2

Ominaislujuus

$$f_{yk} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Osavarmuusluvut

$$\gamma_s := 1.15$$

$$\gamma_{s.a} := 1.0$$

Mitoituslujuus

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

$$f_{yd} = 434.78 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoituslujuus onnettomuustilanteessa

$$f_{yd.a} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{s.a}}$$

$$f_{yd.a} = 500.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Kimmokerroin

$$E_s := 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$E_s = 200.00 \cdot \text{GPa}$$

Myötövenymä

$$\epsilon_{yk} := \frac{f_{yk}}{E_s}$$

$$\epsilon_{yk} = 2.50 \cdot 10^{-3}$$

Murtovenymä

$$\epsilon_{ud} := 10 \cdot 10^{-3}$$

Jännitys-muodonmuutosyhteys NCCI 2 kohta 3.2.7, kuva 3.11 B

$$\sigma_s(\epsilon) := \begin{cases} \epsilon \cdot E_s & \text{if } 0 \leq \epsilon \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \\ f_{yd} & \text{if } \frac{f_{yd}}{E_s} < \epsilon \leq \epsilon_{ud} \end{cases}$$

Betoniteräksen jännitys-muodonmuutosyhteys





## Jalustaosa, betoni C35/45-3

Materiaaliominaisuudet (NCCI 2, taul. 3.2)

Puristuslujuus

$$f_{ck} := 35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Pitkäaikaislujuuskerroin

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Betonin osavarmuusluvut

$$\gamma_c := 1.35$$

$$\gamma_{c,a} := 1.0$$

Puristuslujuuden mitoitusarvo

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{cd} = 22.04 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{cd,a} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,a}}$$

$$f_{cd,a} = 29.75 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkaukselle

$$f_{cd,V} := \begin{cases} f_{cd} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \alpha_{cc} \cdot \frac{50 \text{ MPa}}{\gamma_c} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases}$$

$$f_{cd,V} = 22.04 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimääräinen puristuslujuus

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{cm} = 43.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimääräinen vetolujuus

$$f_{ctm} := \begin{cases} 0.30 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2.12 \cdot \ln \left[ 1 + \left( \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right) \right] \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases}$$

$$f_{ctm} = 3.21 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vetolujuuden ominaisarvo

$$f_{ctk,0.05} := 0.7 \cdot f_{ctm} \quad f_{ctk,0.05} = 2.25 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vetolujuuden mitoitusarvo

$$f_{ctd} := \frac{f_{ctk,0.05}}{\gamma_c}$$

$$f_{ctd} = 1.66 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkauskestävyyden laskennassa

$$f_{ctd,V} := \begin{cases} f_{ctd} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \frac{0.7 \cdot 0.30 \cdot (50)^{\frac{2}{3}} \text{ MPa}}{\gamma_c} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases}$$

$$f_{ctd,V} = 1.66 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimääräinen kimmokerroin

$$E_{cm} := 22 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10 \frac{N}{mm^2}} \right)^{0.3} \cdot GPa \quad E_{cm} = 34077.15 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Suppeusluku (ei -halkeillut betoni)

$$\nu := 0.2$$

## Betonin jännitys-muodonmuutosyhteys

Muodonmuutos lujuuden maksimiarvolla

$$\epsilon_{c2} := \begin{cases} 2.0 \cdot 10^{-3} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \left[ 2.0 + 0.085 \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} - 50 \right)^{0.53} \right] \cdot 10^{-3} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases} \quad \epsilon_{c2} = 2.00 \cdot 10^{-3}$$

Murtopuristuma

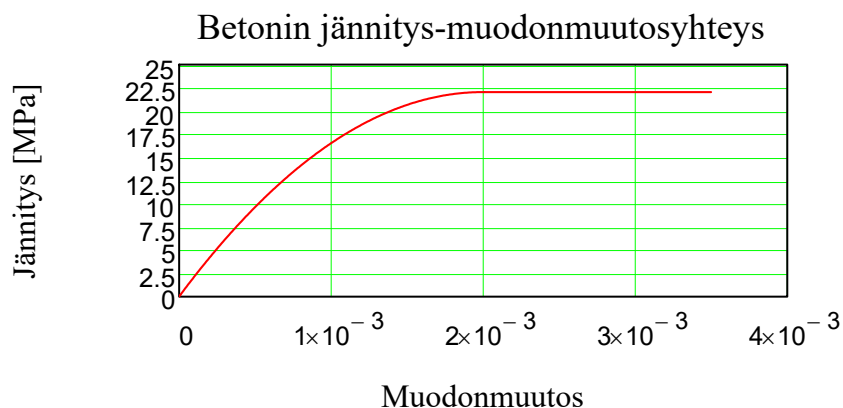
$$\epsilon_{cu2} := \begin{cases} 3.5 \cdot 10^{-3} & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \left[ 2.6 + 35 \cdot \left( \frac{90 - \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}{100} \right)^4 \right] \cdot 10^{-3} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases} \quad \epsilon_{cu2} = 3.50 \cdot 10^{-3}$$

Eksponentti

$$n := \begin{cases} 2 & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.4 + 23.4 \cdot \left( \frac{90 - \frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}{100} \right)^4 & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \end{cases} \quad n = 2.00$$

Jännitys-muodonmuutosyhteys NCCI 2 kohta 3.1.7, kuva 3.6

$$\sigma_c(\epsilon) := \begin{cases} f_{cd} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right] & \text{if } 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{if } \epsilon_{c2} < \epsilon \leq \epsilon_{cu2} \end{cases} \quad \epsilon := 0, 1 \cdot 10^{-5} \dots 5\%$$



## Viruma ja kutistuma

### Tarvittavat lähtötiedot viruman ja kutistuman laskentaan

Ympäristön suhteellinen kosteus (peruslaatta maan alla)

$$RH := 100\%$$

Betonipoikkileikkauksen ala

$$A_c := D_p^2$$

$$A_c = 0.81 \cdot m^2$$

Haihtumiselle altis piiri

$$u := 4 \cdot D_p$$

Muunnettu paksuus

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

$$h_0 = 450.00 \cdot mm$$

Sementtityyppi

$$\text{sementtityyppi} := "N"$$

$$(R = \text{rapid}, N = \text{normaali}, S = \text{hidas})$$



Kutistuma ajan funktiona

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

, jossa  $t$  on betonin ikä tarkasteluhetkenä vuorokausina

$t_s$  on betonin ikä vuorokausina kuivumiskutistuman alkaessa (tavallisesti jälkihoitoajan pituus)

Lasketaan kutistuma lopputilanteessa

$$\varepsilon_{cs,00} := \varepsilon_{cs}(100yr, 14day)$$

$$\varepsilon_{cs,00} = 0.06 \cdot 10^{-3}$$

Virumaluku betonille

$$\phi(t, t_0) := \beta_c(t, t_0) \cdot \varphi_{RH} \cdot \beta_{fcm} \cdot \beta_{t0}(t_0)$$

, jossa  $t$  on betonin ikä tarkasteluhetkenä vuorokausina

$t_0$  on betonin ikä vuorokausina kuormituksen alkaessa

Lasketaan virumaluku lopputilanteessa

$$\phi_{00} := \phi(100yr, 14day)$$

$$\phi_{00} = 1.35$$

## Betoniteräs B500B

Materiaaliominaisuudet NCCI 2, kohta 3.2

Ominaislujuus

$$f_{yk} := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Osavarmuusluvut

$$\gamma_s := 1.10$$

$$\gamma_{s.a} := 1.0$$

Mitoituslujuus

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$$

$$f_{yd} = 454.55 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoituslujuus onnettomuustilanteessa

$$f_{yd.a} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{s.a}}$$

$$f_{yd.a} = 500.00 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Kimmokerroin

$$E_s := 200000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$E_s = 200.00 \cdot \text{GPa}$$

Myötövenymä

$$\epsilon_{yk} := \frac{f_{yk}}{E_s}$$

$$\epsilon_{yk} = 2.50 \cdot 10^{-3}$$

Murtovenymä

$$\epsilon_{ud} := 10 \cdot 10^{-3}$$

Jännitys-muodonmuutosyhteys NCCI 2 kohta 3.2.7, kuva 3.11 B

$$\sigma_s(\epsilon) := \begin{cases} \epsilon \cdot E_s & \text{if } 0 \leq \epsilon \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \\ f_{yd} & \text{if } \frac{f_{yd}}{E_s} < \epsilon \leq \epsilon_{ud} \end{cases}$$

Betoniteräksen jännitys-muodonmuutosyhteys



## Paalu, betoni C30/37-3

Materiaaliominaisuudet (NCCI 2, taul. 3.2)

Puristuslujuus

$$f_{ck} := 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Pitkäaikaislujuuskerroin

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

Puristuslujuuden mitoitusarvo

$$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{cd} = 19 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Betonin osavarmuusluku, toteutusluokka 3

$$\gamma_c := 1.35$$

Keskimääräinen puristuslujuus

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{cm} = 38 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Keskimääräinen kimmokerroin

$$E_{cm} := 22 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \right)^{0.3} \cdot \text{GPa} \quad E_{cm} = 32837 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## Betoni

$$f_{ck} = 30 \cdot \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad f_{cd} = 19 \cdot \left( \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \quad E_{cm} = 32837 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

## Betonin virumaluvut

Lasketaan viruma NCCI 2 liitteen 1 mukaan

Suhteellinen kosteus

$$RH := 100\%$$

Kertoimet

$$\alpha_1 := \left( \frac{35 \text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.7} \quad \alpha_1 = 1 \quad \alpha_2 := \left( \frac{35 \text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.2} \quad \alpha_2 = 1 \quad \alpha_3 := \left( \frac{35 \text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.5} \quad \alpha_3 = 1$$

Lujuuden vaikutus virumalukuun

$$\beta_{fcm} := \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}}} \quad \beta_{fcm} = 3$$

Kuormituksen alkamisajankohta ja käyttöiän loppu

$$t_0 := 14 \text{day} \quad t := 100 \text{yr} \quad t = 36524 \cdot \text{day}$$

Kuormituksen alkamisajankohdan vaikutus

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

Betonipoikkileikkauksen ala

$$A_c := (0.2\text{m})^2 \cdot \pi \cdot 0.25$$

Haihtumiselle altis piiri

$$u := 0.001\text{m}$$

Muunnettu paksuus

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} \quad h_0 = 62832 \cdot \text{mm}$$

Kosteuden vaikutus virumalukuun

$$\varphi_{RH} := \left( 1 + \frac{1 - RH}{3 \sqrt{\frac{h_0}{\text{mm}}}} \cdot \alpha_1 \right) \cdot \alpha_2 \quad \varphi_{RH} = 1$$

Kuormituksen keston vaikutus virumalukuun

$$\beta_H := \min \left[ 1.5 \cdot \left[ 1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot \frac{h_0}{\text{mm}} + 250 \cdot \alpha_3, 1500 \cdot \alpha_3 \right] \quad \beta_H = 1440$$

$$\beta_c := \left( \frac{\frac{t}{\text{day}} - \frac{t_0}{\text{day}}}{\beta_H + \frac{t}{\text{day}} - \frac{t_0}{\text{day}}} \right) \quad \beta_c = 1$$

Virumaluku betonille

$$\phi_{oo} := \beta_c \cdot \varphi_{RH} \cdot \beta_{fcm} \cdot \beta_{t0} \quad \phi_{oo} = 1.44$$

*Virumaluku on sama  
riippumatta paalun  
betoniosan halkaisijasta*

## Teräsosat, S355

Osavarmuusluvut (kohta 6.1(1))

$$\gamma_{M0} := 1.0$$

$$\gamma_{M1} := 1.1$$

Teräsluokka S355:

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

$$E := 210000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}}$$

$$\nu := 0.3$$

$$\varepsilon = 0.81$$

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80769.23 \cdot \text{MPa}$$

Väsyminen

$$\gamma_{Ff} := 1.0$$

$$\gamma_{Mf} := 1.35$$

*Yleinen varman kestämissen  
periaate ja suuret seuraamukset*

Pulttien materiaalit esitetään pulttiliitosten mitoitusten yhteydessä.

## 2 Maan sivuvastukset

### 2.1 Paalujen sivuvastukset

Paalutettu vaihtoehto

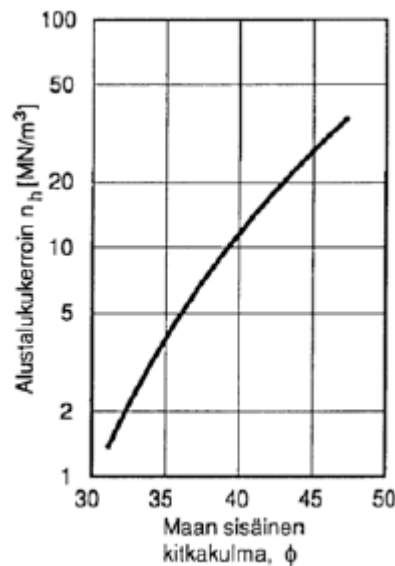
Lasketaan paalujen sivuvastukset lähellä maanpintaa tihennetyin välein FEM-malliin. Maanpinnan ajatellaan olevan tasolla 0 ja maan alle mentäessä käytetään positiivista etäisyyttä maanpinnasta.

Lasketaan jouset ohjeen NCCI 7 mukaan ottaen huomion ja ohjeen Sivukuormitettujen pylväspäristysten suunnitteluohjeen tarkennukset. Tuulikuorma on määräävä kuormitus paalujen jousien määrittelyssä koheesiomaassa (lyhytaikainen kuorma).

Perustettaessa ulokeportaali paalun varaan:

- Jalustaosan osalla maakerroksen kitkakulman tulee olla vähintään 34 deg
- Jalustan alapuolelle tulee olla kitkamaata, jonka maan sisäinen kitkakulma on vähintään 30 deg
- Pohjaveden pinnan tulee olla jalustaosan alapuolella
- Laskelmat on tehty oletuksella, että ulokeportaali ei ole luiskassa. Jos paalu on tien luiskassa tulee tämä tilanne tarkastella erikseen.

Alustelukukerroin arvioidaan kitkamaassa kokemusperäisellä arviointikaavalla (NCCI 7, kuva 5.7)



Passiivipainekertoimet määritetään eurokoodin nomogrammeista käyttämällä paalun ja maan välisen leikkauskestävyyskulman arvona 50 % maan leikkauskestävyyskulmasta (maan ja teräksen välinen kontakti). *Sivukuormitettujen pylväspäristysten suunnitteluohje, Liite 2 / 7*



Maan kestävyys-  
osavarmuusluku

$$\gamma_{Re} := 1.5$$

**Kitkamaan alustaluku lasketaan kaavasta**

$$k_s(z) = \min\left(n_h \cdot \frac{z}{d}, 10 \cdot n_h\right)$$

, missä

z on syvyys maan pinnasta

d on paalun ulkohalkaisija

$n_h$  on alustalukukerroin (leikkauskestävyysskulman funktio), PO-2016, kuva 4.17

Kitkamaan ollessa pohjaveden alapuolella alustalukukerroin on 60 % pohjavedenpinnan yläpuolisesta arvosta.

**Koheesiomaan alustaluku lyhytaikaisille kuormille lasketaan kaavasta**

$$k_s(z) = 50..150 \cdot \frac{c_u}{d}$$

, missä

d on paalun ulkohalkaisija

$c_u$  on suljettu leikkauslujuus

Paalujen halkaisija

$$d := 406.4 \text{ mm}$$

Maakerroksen paksuus  
paalun yläpuolella

$$z_p := 1900 \text{ mm}$$

Paalun pituus maassa

$$L_{\text{paalu}} := 5000 \text{ mm}$$

*Ilman paalun yläpuolella olevaa maata*

Jos paalu on luiskassa

Luiskan kaltevuus

$$\text{kaltevuus} := 0$$

*Annetaan suhteena*

$$\beta_1 := \begin{cases} \arctan(\text{kaltevuus}) & \text{if } \text{kaltevuus} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\beta_1 = 0.0 \text{ deg}$$

Luiskan pohjan etäisyys  
maanpinnasta paalun kohdalla

$$z_{\text{luiska}} := 0 \text{ mm}$$

## Maaparametrit

Lepopainekerroin

$$K_0(\varphi) := 1 - \sin(\varphi)$$

### Maalajikerros 1

Kitkakulma

$$\varphi_1 := 34\text{deg}$$

34deg

Tehokas tilavuuspaino

$$\gamma_1 := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

*pohjaveden  
pinnan yläpuolella*

Kerros alkaa

$$z_0 := 0$$

*Etäisyys maanpinnasta*

Kerros loppuu

$$z_1 := 1900\text{mm}$$

*Etäisyys maanpinnasta*

Maalajikerroksen paksuus

$$h_1 := z_1 - z_0 = 1.90\text{ m}$$

Alustalukukerroin

$$n_{h.1} := n_h(\varphi_1) = 3.31 \cdot \frac{\text{MN}}{\text{m}^3}$$

### TAI karkea silti pohjaveden pinnan alapuolella

Kitkakulma

$$\varphi_2 := 30\text{deg}$$

Tehokas tilavuuspaino

$$\gamma_2 := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

*pohjaveden  
pinnan alapuolella*

Alustalukukerroin

$$n_{h.2} := 0.6 \cdot n_h(\varphi_2) = 0.60 \cdot \frac{\text{MN}}{\text{m}^3}$$

Kerros alkaa

$$z_1 = 1900.00\text{ mm}$$

*Etäisyys maanpinnasta*

Kerros loppuu tai paalu loppuu

$$z_2 := z_p + L_{\text{paalu}} = 6.90\text{ m}$$

*Etäisyys maanpinnasta*

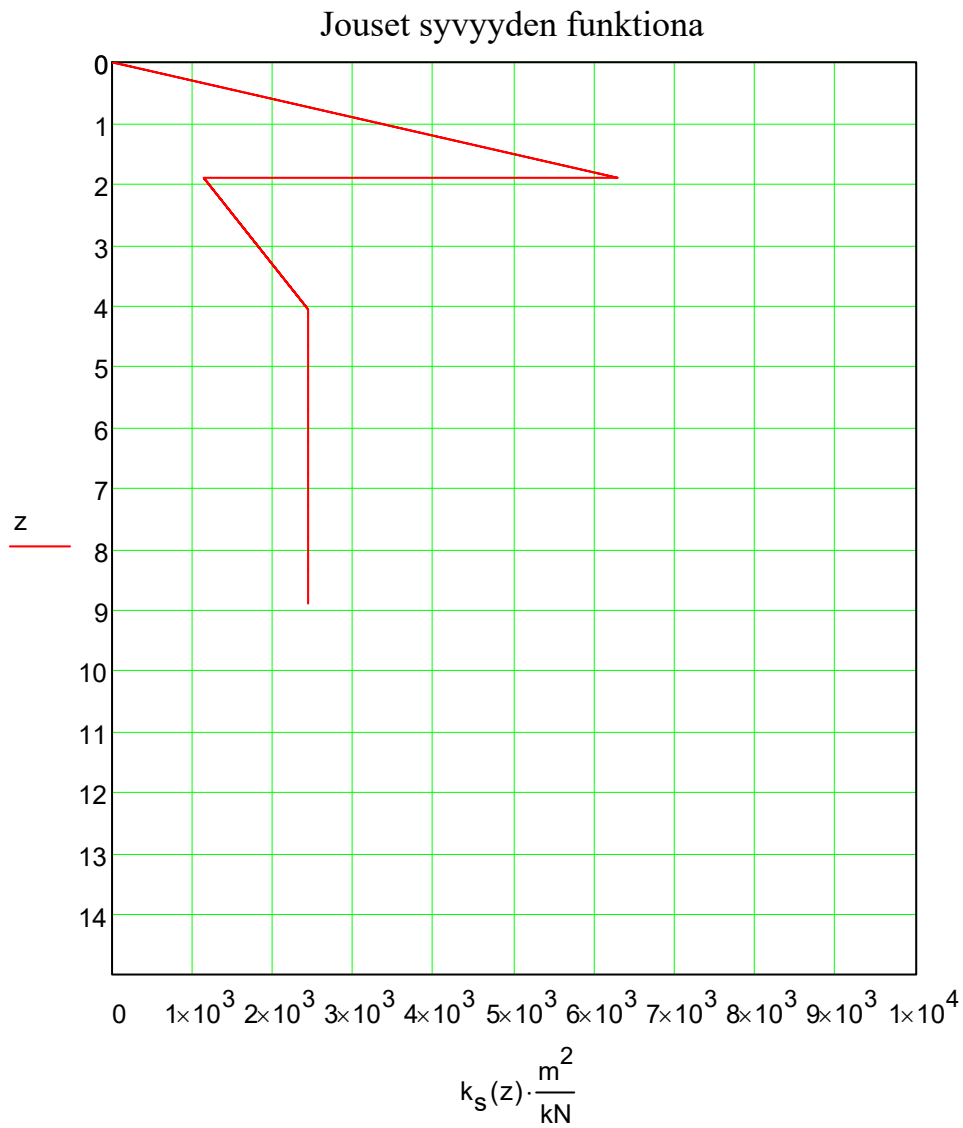
Maalajikerroksen paksuus

$$h_2 := z_2 - z_1 = 5.00\text{ m}$$

**Jousivakioksi maalajikerroksessa 2 määritetään heikompi vaihtoehtoista syvyyden mukaan (savi / karkea siltti)**

### Jousivakiot

$$k_s(z) := \begin{cases} \min\left(n_{h.1} \cdot \frac{z}{d}, 10 \cdot n_{h.1}\right) \cdot d & \text{if } 0 < z \leq z_1 \\ \min\left(k_{s.koh}(c_u) \cdot d, \min\left(n_{h.2} \cdot \frac{z}{d}, 10 \cdot n_{h.2}\right) \cdot d\right) & \text{if } z_1 < z \end{cases}$$



Ensimmäisen jousen etäisyys  
paalun yläpinnasta:

$$z_{j1} := 0.25\text{m}$$

Laitetaan paalun yläpään ensimmäisen jousen  
jälkeen seuraavat jouset esitetyllä välillä ja esitetty  
määrä

$$j_{ka} := 0.25\text{m}$$

$$j_a := 6$$

Viimeisen tihennetyn jousen etäisyys  
ensimmäisestä jousesta (tihennetty jako)

$$j_{n.a} := j_{ka} \cdot j_a = 1.50\text{m}$$

Laitetaan paalun yläpään jälkeen jousia jaolla  
(normaali jako)

$$j_{km} := 0.5\text{m}$$

Jousien lukumäärä alun  
tihennyksen jälkeen

$$j_m := \text{ceil}\left(\frac{L_{\text{paalu}} - j_{n.a} - j_{km}}{j_{km}}\right) = 6.00$$

Jousten kokonaismäärä

$$j_n := j_a + j_m = 12$$

## Jouset FEM-malliin

Jousen etäisyys maan pinnasta

Jousivakio

$$z_e =$$

	1
1	2.15
2	2.40
3	2.65
4	2.90
5	3.15
6	3.40
7	3.90
8	4.40
9	4.90
10	5.40
11	5.90
12	6.40

$$\text{m}$$

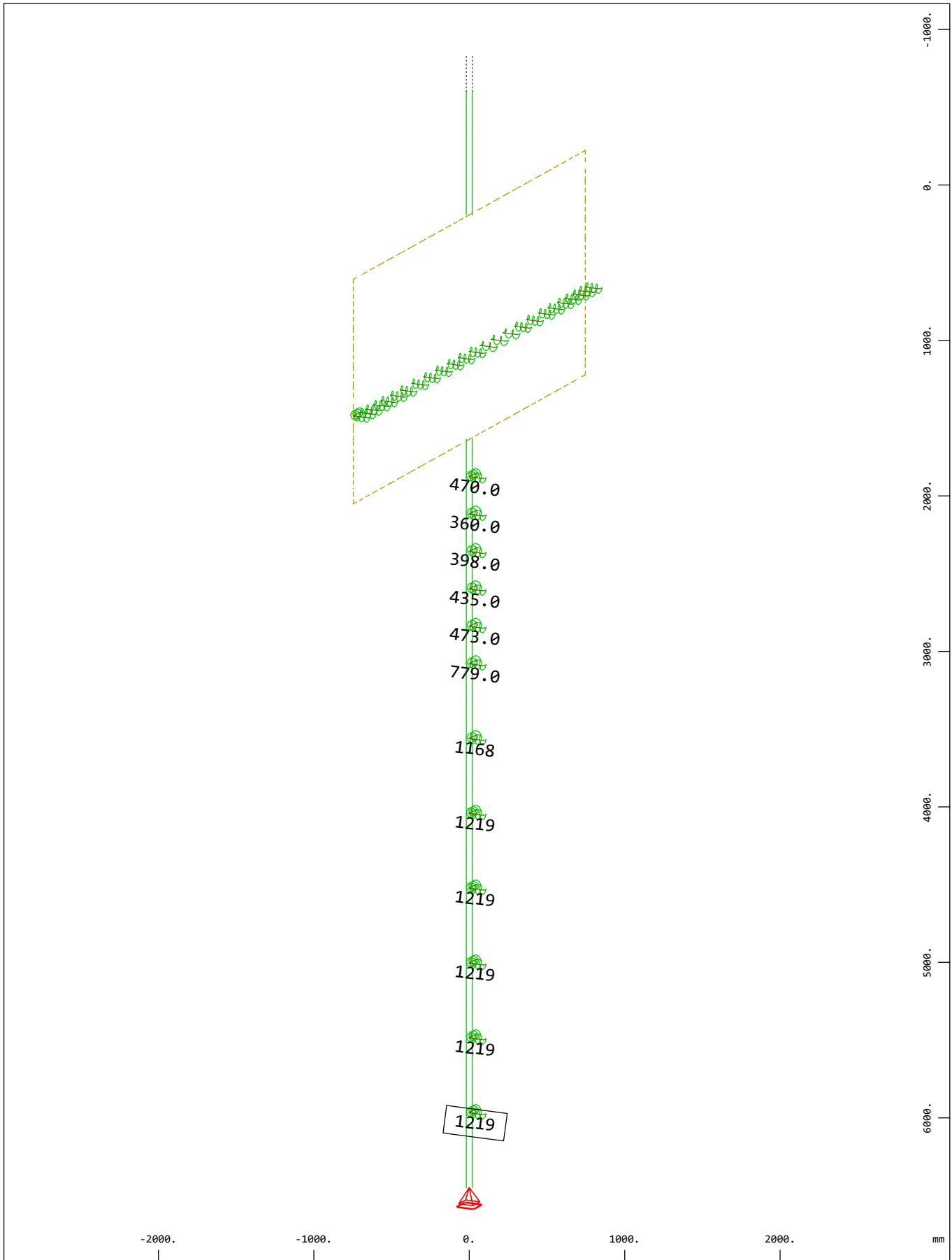
$$sp =$$

	1
1	470
2	360
3	398
4	435
5	473
6	779
7	1168
8	1219
9	1219
10	1219
11	1219
12	1219

$$\cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Portaali\_V01  
Rakennemalli

SOFiSTiK AG - www.sofistik.de



X  
Y  
Z

Sector of system Beam Elements, Spring Elements, Quadrilateral Elements  
Spring constant in kN/m (Max=1219.)

M 1 : 34  
X \* 0.502  
Y \* 0.906  
Z \* 0.962

## 2.2 Siipiosan sivuvastukset

Lasketaan paalun yläpään siipimäisen betonivalun jousivakiot. Siipimäisellä betonivalulla otetaan kiinni ennen kaikkea portaalin vääntö. Tehdään jousivakioiden määrittäminen ohjeen LO 13/2017, Geotekninen suunnittelu - NCCI 7 (21.4.2017) kohdan 5.6 mukaisesti. Passiivipaineen mahdollisesti nostavaa vaikutusta ei oteta laskennassa huomioon. Portaali mitoituksessa tällä ei ole merkitystä.

Käytetään jousia kuvaamaan maan passiivipainetta, kun ulokeportaali kiertyy ja siirtyy maata kohti. Käytetään laskettuja jousia muuttuville kuormille.

Yhden siiven korkeus

$$H_s := 1.5\text{m}$$

Siiven yläosan etäisyys maanpinnasta

$$e_{\text{maa}} := 0.4\text{m}$$

Siiven leveys yhdelle puolelle  
paalua (paalun keskeltä)

$$L_s := 1700\text{mm}$$

Siiven kokonaisleveys

$$2 \cdot L_s = 3.40\text{m}$$

Siiven paksuus

$$B_s := 900\text{mm}$$

Siipien lukumäärä

$$n_s := 2$$

Maaparametrit

$$\phi T_{\text{äyttö}} := 34\text{deg}$$

$$\gamma T_{\text{äyttö}} := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Maan kestävyysosavarmuusluku

$$\gamma_m := 1.5$$

Käytetään puskupalkkien / siipimuurien ja maan välisenä seinäkitkakulmana 0,5 -kertaista maan kitkakulman arvoa.

Passiivipainekertoimet

$$\phi T_{\text{äyttö}} = 34 \cdot \text{deg} \quad \rightarrow$$

$$K_{p,\text{vaaka}} := K_{p,50}(\phi T_{\text{äyttö}}) = 6.00$$

### PASSIIVIPAINES

Tehdään ohjeen *Sillan geotekninen suunnittelu liitteen 5/7 esimerkin mukaisesti*.

**Täyden passiivipaineen resultantti**

$$p_u := K_{p,\text{vaaka}} \cdot \int_{e_{\text{maa}}}^{H_s + e_{\text{maa}}} \gamma T_{\text{äyttö}} \cdot z \, dz$$

$$p_u = 176 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Passiivipaineen resultantin etäisyys maanpinnasta

$$h_u := \frac{K_{p,\text{vaaka}} \cdot \int_{e_{\text{maa}}}^{H_s + e_{\text{maa}}} \gamma T_{\text{äyttö}} \cdot z \cdot z \, dz}{K_{p,\text{vaaka}} \cdot \int_{e_{\text{maa}}}^{H_s + e_{\text{maa}}} \gamma T_{\text{äyttö}} \cdot z \, dz}$$

$$h_u = 1313 \cdot \text{mm}$$

Täysi passiivipaine kehittyy  
siirtymällä

$$y_{u,s} := 0.015 \cdot H_s$$

$$y_{u,s} = 22.50 \cdot \text{mm}$$

Puolikas passiivipaine  
0.25 x täysi siirtymä

$$y_{50,s} := 0.25 \cdot y_{u,s}$$

$$y_{50,s} = 5.63 \cdot \text{mm}$$

Siipien ottama maksimipassiivipaine

$$P_{Rd.u} := \frac{n_s \cdot p_u \cdot L_s}{\gamma_m} \quad P_{Rd.u} = 398.82 \cdot \text{kN}$$

Jos siivet ottavat vain momenttia, on suurin sallittava momentti

MRT

$$M_{p.Rd.u} := \frac{1}{2} \cdot \frac{n_s \cdot p_u \cdot L_s^2}{\gamma_m} \quad M_{p.Rd.u} = 339.00 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \geq \quad |M_{Ed.z}| = 287.92 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

**OK**

## JOUSIVAKIOT

Siiven korkeus on alle 3,5 m, joilloin voidaan käyttää passiivipaineen kehittymiseen vaadittavalle siirtymälle vakio arvoa.

Vaakakomponentti

Ensimmäiseen taiteeseen asti

$$k_{s.1} := \frac{0.5 \cdot p_u}{y_{50.s}} \quad k_{s.1} = 15640 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tämän jälkeen taiteeseen asti

$$k_{s.2} := \frac{0.5 \cdot p_u}{y_{u.s} - y_{50.s}} \quad k_{s.2} = 5213 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Epälineaariset jouset}$$

## SIIRTYMIEN TARKISTUS

Tarkistetaan ensin siirtymät lineaarisesta mallista, että vastaavat käsin laskulla saatavia siirtymiä.

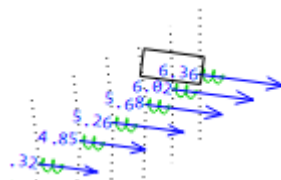
Betonisiiven pään siirtymä tein suuntaisesta tuulikuormasta

Tien suuntaisen tuulikuorman aiheuttama vääntö

$$M_{z.w.1} = -192 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$p_L := \frac{3 \cdot |M_{z.w.1}|}{2 \cdot L_s^2} = 99.63 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad s_L := \frac{p_L}{k_{s.1}} = 6.37 \cdot \text{mm}$$

FEM



**OK**

Siirtymät täydellä tien suuntaisella tuulikuormalla ylittävät ensimmäisen taitepisteen → Lasketaan epälineaarisesti siirtymät

Kun otetaan huomioon maan osavarmuus saadaan  $\frac{y_{u.s}}{\gamma_m} = 15.00 \cdot \text{mm}$

29



### 3 KUORMAT

#### Rakenteen mittoja

##### Orsi

Orren pituus  $L_o := 12\text{m}$  *pilarin keskilinjalta mitattuna*

Orren poikkileikkauksen korkeus  $h_o := 300\text{mm}$

Orren poikkileikkauksen leveys  $b_o := 300\text{mm}$

Orren poikkileikkauksen paksuus  $t_o := 16\text{mm}$

Kuuma tai kylmävalsattu putki  $\text{profiili}_o := \text{"kylmä\_putki"}$

Profilin pyöristyssäde

$$r_o := \begin{cases} 2.0t_o & \text{if } t_o \leq 6\text{mm} \wedge (\text{profiili}_o = \text{"kylmä\_putki"} \vee \text{profiili}_o = \text{"kuuma\_putki"}) \\ 2.5t_o & \text{if } 6\text{mm} < t_o \leq 10\text{mm} \wedge (\text{profiili}_o = \text{"kylmä\_putki"} \vee \text{profiili}_o = \text{"kuuma\_putki"}) \\ 3.0 \cdot t_o & \text{if } t_o \geq 10\text{mm} \wedge (\text{profiili}_o = \text{"kylmä\_putki"} \vee \text{profiili}_o = \text{"kuuma\_putki"}) \\ \text{"VIRHE"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Orren poikkileikkausala

$$r_o = 48.00 \cdot \text{mm} \quad A_o := h_o \cdot b_o - (h_o - 2 \cdot t_o) \cdot (b_o - 2 \cdot t_o)$$

Orren keskilinjan korkeus  
(perustuksen pinnasta orren keskilinjalle)

$$H := 8.2\text{m}$$

$(H' - H_o)$

$$A_o = 181.76 \cdot \text{cm}^2$$

##### Pilari

Pilarin pituus  $H_p := H + 0.5\text{m} = 8.70\text{m}$

Pilarin ulkohalkaisija  $d_p := 406.4\text{mm}$  *Pilarin poikkileikkausala*

Pilarin seinämän paksuus  $t_p := 12.5\text{mm}$   $A_p := \frac{\pi}{4} \cdot [d_p^2 - (d_p - 2 \cdot t_p)^2]$

Kuuma tai kylmävalsattu putki  $\text{profiili}_p := \text{"kylmä\_putki"}$

$$A_p = 154.68 \cdot \text{cm}^2$$

##### Taulut

**Taulujen maksimikoko on 12 m<sup>2</sup>**

Taulun korkeus

$$H_t := 5.0\text{m} \quad \text{Varmistettava taulujen suunnittelijalta}$$

Taulun leveys

$$B_t := 2.4\text{m} \quad \text{Varmistettava taulujen suunnittelijalta}$$

Taulun tehollinen paksuus  
(tuulikuorman laskemista varten)

$$t_t := 0.200\text{m} \quad \text{Kitkaa ei erikseen oteta huomioon}$$

Taulun alareunan etäisyys  
orren keskilinjasta  $e_{z,a}$  max

$$e_{z,a} := 275\text{mm}$$

Taulun keskik. epäkeskisyys suhteessa  
orren keskilinjaan pystysuunnassa

$$e_z := \frac{H_t}{2} - e_{z,a} = 2225 \cdot \text{mm} \quad \text{Positiivisella arvolla taulu on orren yläpuolella (suunnitelmiin 2000 mm)}$$

Taulun keskik. epäkeskisyys suhteessa  
orren keskilinjaan tien suunnassa

$$e_x := 300\text{mm}$$

Taulun reunan ylitys orren päästä

$$e_{y,a} := 400\text{mm} \quad \text{Positiivisella arvolla taulu menee orren ohi}$$

Taulun keskik. epäkeskisyys suhteessa  
pilarin keskilinjaan tien poikkisuunnassa

$$e_y := L_o - \frac{B_t}{2} + e_{y,a} = 11.20\text{m}$$

### 3.1 Pysyvät kuormat

#### Rakenteen oma paino

Rakenteet ovat rakennemallissa pääasiassa oikeilla dimensioillaan, joten ohjelma laskee itse rakenteen oman painon.

#### Teräsbetonin paino

$$\gamma_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

(NCCI 1, taulukko A.1)

#### Rakenneteräksen paino

$$\gamma_s := 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

(NCCI 1, taulukko A.1)

Orren paino

$$g_{\text{orsi}} := A_o \cdot \gamma_s$$

$$g_{\text{orsi}} = 1.40 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pilarin paino

$$g_{\text{pilari}} := A_p \cdot \gamma_s$$

$$g_{\text{pilari}} = 1.19 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### Taulujen ja kiinnitysosien paino

Talujen painona käytetään arviota

$$g_{\text{merkki}} := 0.05 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Viivakuorma FEM-malli

$$q_{\text{merkki.v}} := g_{\text{merkki}} \cdot H_t = 0.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mallinnetaan kiinnitysosat orelle viivakuormana

$$g_{\text{levyt}} := 20 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

## 3.2 Muut muuttuvat kuormat

### Lämpötilakuormat

Lämpötilakuormista ei aiheudu rakenteelle mitoituksellisesti merkittäviä rasituksia.

### Jää ja lumikuormat

Käytetään lumi- ja jääkuormien mallintamiseen rakennusten lumikuormien perusarvoa. Oletetaan, että tämä kattaa myös jääkuormien vaikutuksen. Portaalin päälle ei käytännössä pääse kertymään lunta vastaavasti kuin katoille. Ajatellaan lumikuorman rasittavan vain portaalin ortta ja että lumikuormaa tai jäätä voi kertyä puolet siitä, mitä on lumikuorman arvo katoille.

Viittaukset Ympäristöministeriön kansalliseen liitteeseen  
Lumen ominaispaino

$$s_k := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

(Kansallisen liitteen kuva 4.1)

Muotokerroin

$$\mu_1 := 0.8$$

(Kuva 5.6, kansallinen liite)

Katon lumikuorma tapauksessa (i)

$$s_l := \mu_1 \cdot s_k$$

$$s_l = 2.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

(Kaava 5.1)

Lumikuorma viivakuormana orrelle

$$q_{l,o} := 0.5 \cdot s_l \cdot b_o$$

$$q_{l,o} = 0.300 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### Tuulikuormat

Viittaukset eurokoodiin SFS-EN 1991-1-4

Tuulikuorma on laskettu Liikenneviraston ohjeen Liikennemerkkien rakenne ja pystytys ohjeen (Liikenneviraston ohjeita 20/2013) mukaisesti:

- Vertailutuulennopeuden arvo 21 m/s
- Maastoluokka II
- Tuulikuorman kuormia laskettaessa käytetään 15 % suurempaa tuulipinta-alaa kuin mitä suunnitelman mukaiset kilpimitoitukset edellyttävät
- Tuulikuorman resultantin epäkeskeisyys on vähintään 0,1 kertaa merkin korkeus tarkasteltaessa yksittäisen kilven kiinnitystä orteen.

### Tuulikuorma tauluille

Lasketaan ensin tuulikuorma kohtisuoraan taulun pintaa vasten

Tuulen nopeuden perusarvo

$$v_b := 21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tuulikuorman vaikutusala

$$A_{\text{ref}} := B_t \cdot H_t$$

$$A_{\text{ref}} = 12.00 \cdot \text{m}^2$$

Taulun alareunan etäisyys pilarin alaosasta

$$z_g := H - e_{z,a}$$

$$z_g = 7.92 \cdot \text{m}$$

Nopeuspainekorkeus

$$z_e := z_g + \frac{H_t}{2}$$

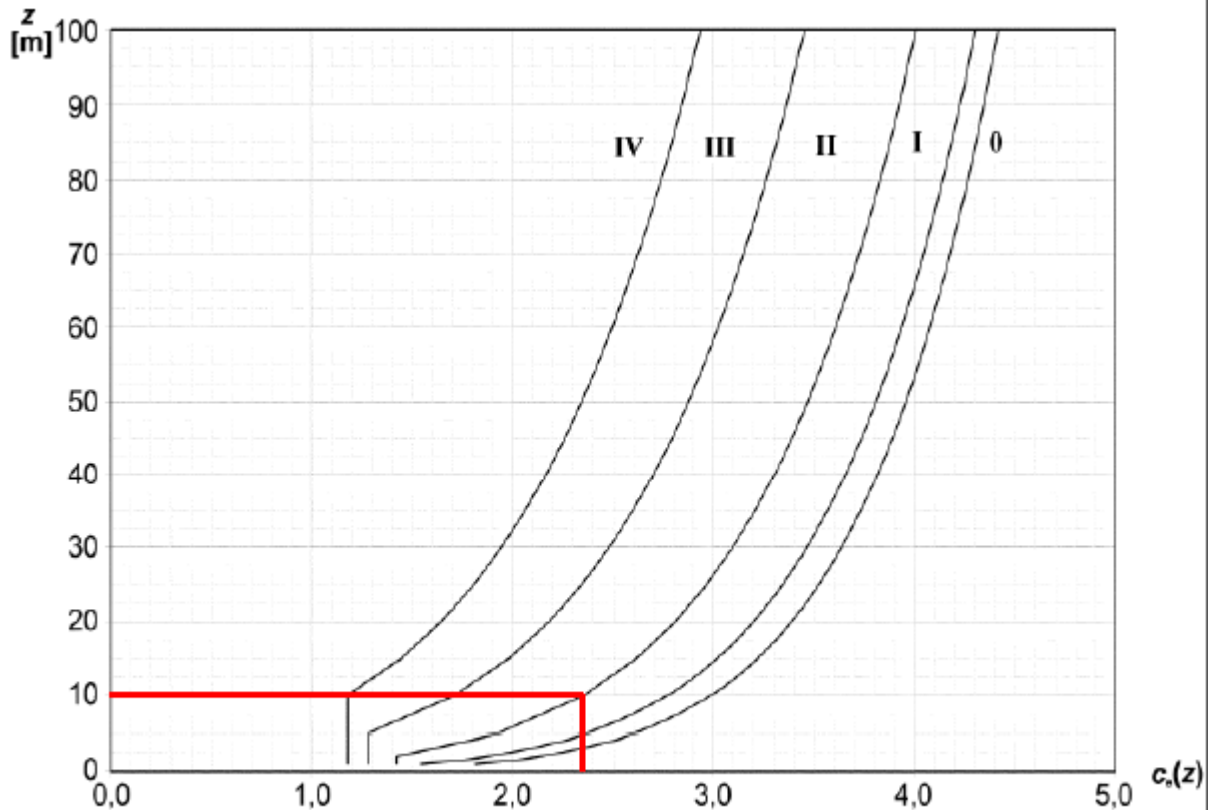
$$z_e = 10.42 \cdot \text{m}$$

Altistuskertoin

$$c_e := 2.35$$

(Kuva 4.2, maastoluokka II,  $z = 10 \text{ m}$ )

Alle 10 m korkeuksilla käytetään altistuskertoimen määrittämisessä 10 metriä



Kuva 4.2 Altistuskertoimen  $c_e(z)$  kuvaajia arvoilla  $c_0 = 1,0$ ,  $k_1 = 1,0$

Ilman tiheys

$$\rho := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(Kappale 4.5)

Nopeuspaineen perusarvo

$$q_b := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0.276 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

(Kaava 4.10)

Puuskanopeuspaine

$$q_{p,z} := c_e \cdot q_b$$

$$q_{p,z} = 0.65 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

(Kaava 4.8)

Rakennekerroin

$$c_{s,d} := 1.0$$

(Kappale 6.2)

Voimakerroin

Ulokeportaaleissa kilvet ovat aina korkeammalla kuin  $H_t/4$

$$z_g = 7.92 \text{ m} > \frac{H_t}{4} = 1.25 \text{ m}$$

$$c_f := 1.80$$

(Kaava 7.7)

Tuulikuorma taulua vasten kohtisuorassa eli tien suunnassa

Kerroin, jolla otetaan huomioon 15 % isommat taulut

$$k_{\text{suur}} := 1.15$$

$$q_{x,w} := k_{\text{suur}} \cdot c_{s,d} \cdot c_f \cdot q_{p,z}$$

$$q_{x,w} = 1.34 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

(Kaava 5.3)

Viivakuormana ja kokonaiskuorma

$$q_{x,w,v} := q_{x,w} \cdot H_t$$

$$F_{x,w} := q_{x,w} \cdot A_{\text{ref}}$$

$$q_{x,w,v} = 6.70 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{x,w} = 16.09 \cdot \text{kN}$$

Tuulikuorma poikkisuunnassa

Tuulikuorman vaikutusala

$$A_{\text{ref.y}} := H_t \cdot t_t$$

$$A_{\text{ref.y}} = 1.00 \cdot \text{m}^2$$

Käytetään voimakerrointa

$$c_{f,\text{po}} := 2.0$$

$$q_{y,w} := c_{\text{suur}} \cdot c_{s,d} \cdot c_{f,\text{po}} \cdot q_{p,z}$$

$$q_{y,w} = 1.49 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

(Kuva 7.22)

$$q_{y,w,v} := q_{y,w} \cdot H_t$$

$$q_{y,w,v} = 7.45 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{y,w} := q_{y,w} \cdot A_{\text{ref.y}}$$

$$F_{y,w} = 1.49 \cdot \text{kN}$$

### Tuulikuorma rakenteille

Tuulikuorma orrelle

Voimakerron, ilman että huomioidaan pyöristysten ja pään ohivirtauksen vaikutusta

$$c_{f,0,o} := c_{f,0} \cdot \left( \frac{b_o}{h_o} \right) = 2.10$$

(Kuva 7.23)

Redusointikerroin  $\psi_r$

Mikäli orren poikkileikkaus on neliö ja kulmat ovat pyöristettyjä, voidaan käyttää redusointikerrointa  $\psi_r$

$$\psi_{r,o} := \begin{cases} 1 & \text{if } h_o \neq b_o \\ 1 - 0.5 \cdot \frac{r_o}{0.2 \cdot b_o} & \text{if } h_o = b_o \wedge \frac{r_o}{b_o} \leq 0.2 \\ 0.5 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_{r,o} = 0.60$$

(Kuva 7.24)

$$\frac{r_o}{b_o} = 0.16$$

Päätevaikutuskerroin  $\psi_\lambda$

(Taulukko 7.16 ja kuva 7.36)

Käytetään päätevaikutuskertoimelle arvo 1. Näin siksi, että orteen kiinnitetään tauluja. Tämän takia rakenneosan hoikkuus ei käytännössä vastaa orren hoikkuutta, vaan on taulun ja orren muodostaman kokonaisuuden hoikkuus. Menettely on varman puolella.

$$\psi_{\lambda,o} := 1.0$$

Voimakerron orrelle

$$c_{f,o} := c_{f,0,o} \cdot \psi_{r,o} \cdot \psi_{\lambda,o}$$

$$c_{f,o} = 1.26$$

Tuulen aiheuttama viivakuorma orrelle

$$q_{w,o} := c_{s,d} \cdot c_{f,o} \cdot q_{p,z} \cdot h_o$$

$$q_{w,o} = 0.245 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## Tuulikuorma pilarille (pyöreä)

Ei oteta huomioon kohtisuoraan tuulen suuntaan nähden pilarin molemmille puolille symmetrisesti syntyviä tuulen paineita. Näillä ei ole vaikutusta portaalin mitoitukseen.

Voimakerron, ilman että huomioidaan  
pään ohivirtauksen vaikutusta

Reynoldsin luku

Kinemaattinen viskositeetti  $\nu := 15 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$  (Kuva 7.23)

Tuulen puuskanopeus  $v_{b\_z} := \sqrt{\frac{2 \cdot (q_{p\_z})}{\rho}} = 32.19 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$Re := \frac{d_p \cdot v_{b\_z}}{\nu} = 872199.16 \quad (\text{Kaava 7.15})$$

Käytetään päätevaikutuskertoimelle arvo 1. Näin siksi, että vaikutus on portaalin mitoituksessa pieni. Menettely on varman puolella.

$$\psi_{\lambda.p} := 1.0$$

Pinnan karheusmitta  
(Sinkitty teräs)

$$k := 0.2 \text{mm} \quad (\text{Taulukko 7.13})$$

Voimakerron, ilman että huomioidaan  
pyöristysten ja pään ohivirtauksen  
vaikutusta

$$c_{f.0.p} := 1.2 + \frac{0.18 \cdot \log\left(10 \cdot \frac{k}{d_p}\right)}{1 + 0.4 \cdot \log\left(\frac{Re}{10^6}\right)} \quad c_{f.0.p} = 0.77 \quad (\text{Kuva 7.28})$$

Voimakerron pilarille

$$c_{f.p} := c_{f.0.p} \cdot \psi_{\lambda.p} \quad c_{f.p} = 0.77$$

Tuulen aiheuttama viivakuorma pilarille

$$q_{w.p} := c_{s.d} \cdot c_{f.p} \cdot q_{p\_z} \cdot d_p \quad q_{w.p} = 0.204 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## Yhteenveto tuulikuormista

### Taulut

Viiivakuorma talun (taulujen) kohdalla sekä taulun koko ja epäkeskisyys suhteessa orteen

$$q_{x.w} = 1.341 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$F_{x.w} = 16.09 \cdot \text{kN}$$

$$B_t = 2.40 \text{ m}$$

$$H_t = 5.00 \text{ m}$$

$$e_{z.a} = 0.28 \text{ m}$$

Tuulikuorma poikkisuunnassa

Poikkisuunnassa

$$q_{y.w} = 1.490 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$F_{y.w} = 1.49 \cdot \text{kN}$$

### Orsi

Viivakuorma oreille

$$q_{w.o} = 0.245 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### Pilari

Viivakuorma pilarille

$$q_{w.p} = 0.204 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

### 3.3 Kuormien yhdistely

Kuormien yhdistely tehdään eurokoodien mukaan ottaen huomioon Liikenneviraston kansallisen liitteen mukaiset lisäykset (tässä tapauksessa ovat samat kuin Ympäristöministeriöllä). Kansallisen liitteen mukaan saadaan muuttuville kuormille seuraavat yhdistelykertoimet.

Käytettävät yhdistelykertoimet muuttuville kuormille

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	
Lumi	$\psi_{s.0} := 0.7$	$\psi_{s.1} := 0.4$	$\psi_{s.2} := 0.2$	$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$
Tuuli	$\psi_{w.0} := 0.6$	$\psi_{w.1} := 0.2$	$\psi_{w.2} := 0$	

Kuormien yhdistely tehdään FEM-mallissa tai käsin riippuen mitoitettavasta rakenneosasta. Käytetään seuraavia yhdistelyitä:

- MRT (murtorajatila)
- KRTa (käyttörajatilan ominaisyhdistelmä)
- KRTb (käyttörajatilan tavallinen yhdistelmä)
- KRTc (käyttörajatilan pitkäaikainen yhdistelmä)
- KRTd (pysyvä yhdistelmä)

MRT varmuuskertoimet

Pysyvät kuormat

1,35, kun vain pysyvää kuormaa

1,2 tai 0,9 muiden kuormien kanssa, määräävämpi valitaan

Muuttuvat kuormat

1,5

Muuttuvat kuormat valitaan mukaan, mikäli niiden vaikutus on rakenteelle epäedullinen.

Murtorajatilan yhdistelyt tehdään seuraavasti:

$1,35 \times G_{\text{pysyvät}}$

$1,15/0,9 G_{\text{pysyvät}} + 1,5 Q_{\text{määräävä, muuttuva}} + 1,5 \psi_{0,1} \times Q_{\text{muuttuva kuorma 1}} + \dots + 1,5 \psi_{0,i} \times Q_{\text{muuttuva kuorma i}}$

Käyttörajatilan ominaisyhdistelyt muodostetaan seuraavasti ovat:

$1,0 G_{\text{pysyvät}} + 1,0 Q_{\text{määräävä, muuttuva}} + 1,0 \psi_{0,1} \times Q_{\text{muuttuva kuorma 1}} + \dots + 1,0 \psi_{0,i} \times Q_{\text{muuttuva kuorma i}}$

Käyttörajatilan tavalliset yhdistelyt muodostetaan seuraavasti ovat:

$1,0 G_{\text{pysyvät}} + 1,0 \psi_{1,1} \times Q_{\text{määräävä, muuttuva}} + 1,0 \psi_{2,1} \times Q_{\text{muuttuva kuorma 1}} + \dots + 1,0 \psi_{2,i} \times Q_{\text{muuttuva kuorma i}}$

Käyttörajatilan pitkäaikaiset yhdistelyt muodostetaan seuraavasti ovat:

$1,0 G_{\text{pysyvät}} + 1,0 \psi_{2,1} \times Q_{\text{määräävä, muuttuva}} + 1,0 \psi_{2,1} \times Q_{\text{muuttuva kuorma 1}} + \dots + 1,0 \psi_{2,i} \times Q_{\text{muuttuva kuorma i}}$

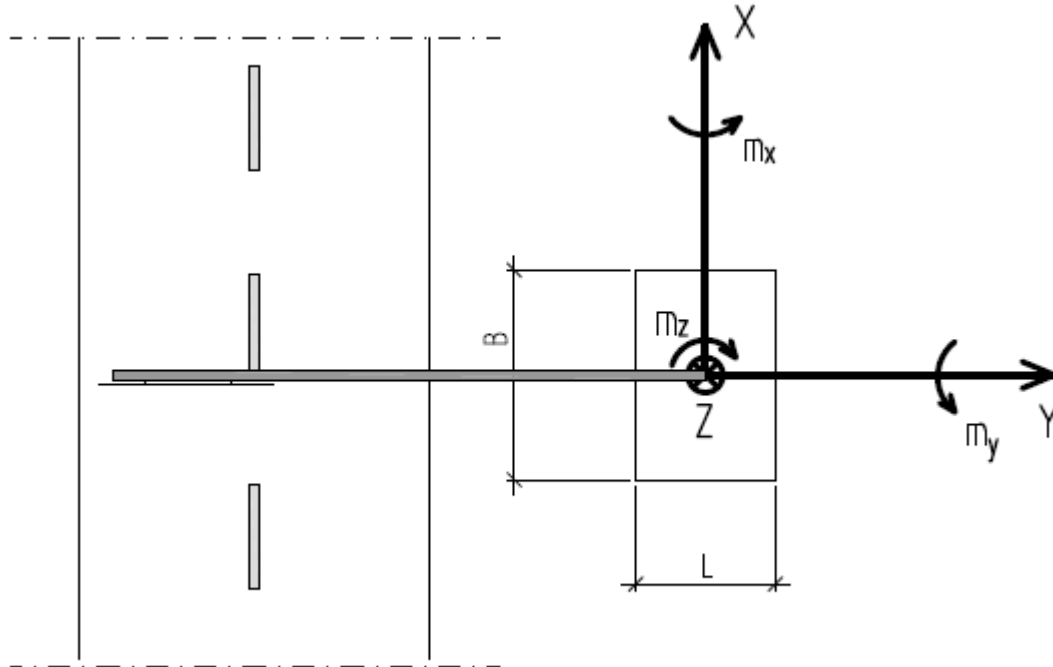
Pysyvä yhdistelmä muodostetaan seuraavasti

$1,0 G_{\text{pysyvät}}$



## 4 Voimasuureet pylvään juuressa

Lasketaan seuraavassa voimasuureet pilarin juuressa. Käytetään voimasuureille samoja suuntia kuin FEM-mallissa.



*Voimasuureiden suunnat*

## 4.1 Pysyvät kuormat

Pystykuorma

$$N_{p.1} := (g_{\text{orsi}} + g_{\text{levyt}}) \cdot (L_o - 0.5 \cdot d_p) + g_{\text{pilari}} \cdot H_p + q_{\text{merkki.v}} \cdot B_t$$

$$N_{p.1} = 27.7 \cdot \text{kN}$$

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.p.1} := -(g_{\text{orsi}} + g_{\text{levyt}}) \cdot (L_o - 0.5 \cdot d_p) \cdot \left[ \frac{(L_o - 0.5 \cdot d_p)}{2} + 0.5 \cdot d_p \right] \dots \\ + -(q_{\text{merkki.v}} \cdot B_t \cdot e_y)$$

$$M_{x.p.1} = -108.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentti tien suunnassa

$$M_{y.p.1} := q_{\text{merkki.v}} \cdot B_t \cdot e_x$$

$$M_{y.p.1} = 0.18 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntöä ja vaakavoimia ei synny pysyvistä kuormista

## 4.2 Muuttuvat kuormat

### Jää ja lumikuormat

Pystykuorma

$$N_{s.1} := q_{l.o} \cdot L_o$$

$$N_{s.1} = 3.6 \cdot \text{kN}$$

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.s.1} := -q_{l.o} \cdot \frac{L_o^2}{2}$$

$$M_{x.s.1} = -21.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusta tiensuunnassa, vääntöä ja vaakavoimia ei synny lumikuormasta.

### Tuulikuormat

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.w.1} := -F_{y.w} \cdot (e_z + H) + q_{w.p} \cdot \frac{H_p^2}{2}$$

$$M_{x.w.1} = -23.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentti tien suunnassa

$$M_{y.w.1} := F_{x.w} \cdot (e_z + H) + q_{w.p} \cdot \frac{H_p^2}{2} + q_{w.o} \cdot \left( L_o - B_t - \frac{d_p}{2} + e_{y.a} \right) \cdot H$$

$$M_{y.w.1} = 195.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{z.w.1} := -F_{x.w} \cdot e_y + -q_{w.o} \cdot 0.5 \cdot \left( L_o - B_t - \frac{d_p}{2} + e_{y.a} \right)^2$$

$$M_{z.w.1} = -191.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vaakavoima tien suunnassa

$$H_{x.w.1} := -F_{x.w} + -q_{w.p} \cdot H_p + -q_{w.o} \cdot \left( L_o - B_t - \frac{d_p}{2} + e_{y.a} \right)$$

$$H_{x.w.1} = -20.3 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoima kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$H_{y.w.1} := -F_{y.w} + -q_{w.p} \cdot H_p$$

$$H_{y.w.1} = -3.3 \cdot \text{kN}$$

### 4.3 Yhdistelyt

Yhdistellään käsin laskennassa vain etukäteen ajatellen määrävimmät tapaukset. Esitetään määrävimmiksi ajatellut yhdistelyt mitoitusyhteyksissä.

Tuulikuorma voi vaikuttaa vain yhteen suuntaan kerrallaan.

### 4.4 Voimasuureiden tarkistus

Tarkistetaan, että FEM-mallista saadaan samat voimasuureet pilarin juuressa kuin käsin laskulla.

#### Käsin laskulla

##### Pysyvät kuormat

Pystykuorma

$$N_{p.1} = 27.7 \cdot \text{kN}$$

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.p.1} = -108.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

*FEM-mallista saadaan hieman pienemmät kuormat, koska käsinlaskulla koko orsi on todellisuutta paksummalla seinämän vahvuudella.*

##### Jää ja lumikuormat

Pystykuorma

$$N_{s.1} = 3.6 \cdot \text{kN}$$

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.s.1} = -21.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

##### Tuulikuormat

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.w.1} = -23.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentti tien suunnassa

$$M_{y.w.1} = 195.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{z.w.1} = -191.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vaakavoima tien suunnassa

$$H_{x.w.1} = -20.3 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoima kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$H_{y.w.1} = -3.26 \cdot \text{kN}$$

#### FEM

$$N_{p.1.FEM} = 24.7 \cdot \text{kN}$$

$$M_{x.p.1.FEM} = -85.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{s.1.FEM} = 3.6 \cdot \text{kN}$$

$$M_{x.s.1.FEM} = -21.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{x.w.1.FEM} = -23.3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{y.w.1.FEM} = 195.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{z.w.1.FEM} = -192.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$H_{x.w.1.FEM} = -20.3 \cdot \text{kN}$$

$$H_{y.w.1.FEM} = -3.3 \cdot \text{kN}$$

OK

## 5 Peruslaatan geotekninen mitoitus

Antura on perustettu maanvaraisesti.

Lasketaan pohjapaine käyttörajatilan ja murtorajatilan yhdistelmällä. Käyttörajatilan ominaisyhdistelmä lasketaan, jotta voidaan laskea painumat. Murtorajatilasta sekä käyttörajatilan pohjapaineet lasketaan anturan rakenteellista mitoitusta varten.

Anturan kantokestävyys lasketaan olettaen, että anturaa ei perusteta luiskaan. Luiskaan perustettavan anturan tarkastelut on tehtävä tapauskohtaisesti. Tarkastetaan myös anturan liukumiskestävyys.

### 5.1 Peruslaatan ja jalustaosan mitat

Tien suuntaan	$B := 3200\text{mm}$	Poikkisuuntaan suhteessa tiehen	$L := 2200\text{mm}$
---------------	----------------------	---------------------------------	----------------------

Peruslaatan korkeus	$h := 500\text{mm}$
---------------------	---------------------

pilariosan mitat halkaisija	$D_p := 900\text{mm}$	Neliö
-----------------------------	-----------------------	-------

#### Perustamisen tiedot

pilariosan reunasta jätetään näkyviin luiskan korkeammalle reunalle (laitetaan maan alle)	$h_n := -400\text{mm}$	Pengerluiskan kaltevuus	$\text{kaltevuus} := 0$
---	------------------------	-------------------------	-------------------------

$\beta_1 := \begin{cases} \arctan(\text{kaltevuus}) & \text{if } \text{kaltevuus} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$		$\beta_1 = 0.0 \cdot \text{deg}$
---	--	----------------------------------

pilariosan yläpinnan etäisyys maanpinnasta keskellä pilaria	$D_0 := h_n + 0.5 \cdot \tan(\beta_1) \cdot D_p = -400.0 \cdot \text{mm}$
---	---

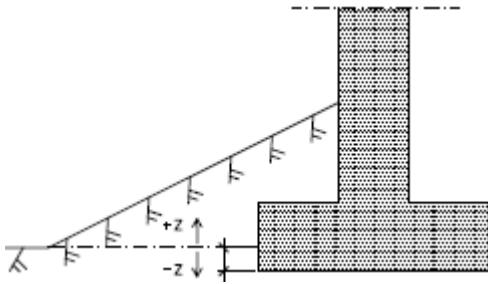
Pilariosan korkeus	$h_p := 1100\text{mm}$
--------------------	------------------------

Perustuksen kokonaiskorkeus	$h_{\text{tot}} := h + h_p$	$h_{\text{tot}} = 1600 \cdot \text{mm}$
-----------------------------	-----------------------------	---

Perustamissyvyys tapaus 1

$D_1 := h_p - D_0 - 0.5 \cdot \tan(\beta_1) \cdot L + h$	$D_1 = 2000.0 \cdot \text{mm}$
--	--------------------------------

Perustamissyvyys  $D_1$



Anturan alapinnan korkoasema suhteessa luiskän alaosan korkoon.  $z_0$  ollessa positiivinen on anturan alapinta luiskän alaosa korkeammalla. (Luiskän alaosan korko ajatellaan tässä olevan +0)

$$z_0 := -2000\text{mm}$$

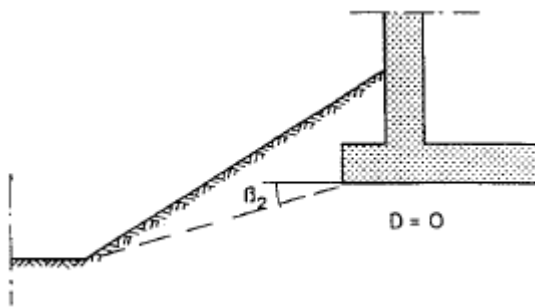
Anturan alapinnan etäisyys  $z$  luiskän pohjasta

Perustamissyvyys tapaus 2

$$D_2 := \begin{cases} D_1 & \text{if } \text{kaltevuus} = 0 \\ 0 & \text{if } z_0 \geq 0 \wedge \text{kaltevuus} \neq 0 \\ |z_0| & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D_2 = 2000.0 \cdot \text{mm}$$

Kaltevuus  $\beta_2$



$$\beta_2 := \begin{cases} \text{atan}\left(\frac{z_0 \cdot \tan(\beta_1)}{D_1 + z_0}\right) & \text{if } z_0 > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \beta_2 = 0.00 \cdot \text{deg}$$

Perustamissyvyys  $D_2$

Anturan yläpuolisen maan tehokas tilavuuspaino

$$\gamma'_{yp} := 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Anturan yläpuolisen maan leikkauskestävyysskulma

$$\varphi'_{yp} := 34\text{deg}$$

Osavarmuusluku kantavuus

$$\gamma_R := 1.55$$

Kitkamaa

$$c' := 0$$

Anturan alapuolisen maan leikkauskestävyysskulma

$$\varphi' := 30\text{deg}$$

Pohjan kaltevuuskulma

$$\alpha := 0$$

Maan tehokas tilavuuspaino perustamistason alapuolella

$$\gamma' := 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Osavarmuusluku liukuminen

$$\gamma_{R,h} := 1.10$$

Täytekerroksen

leikkauskestävyysskulma

(heti anturan alapuolella, liukuminen)

$$\varphi_k := 30\text{deg}$$

Anturan yläpuolisen maan paino

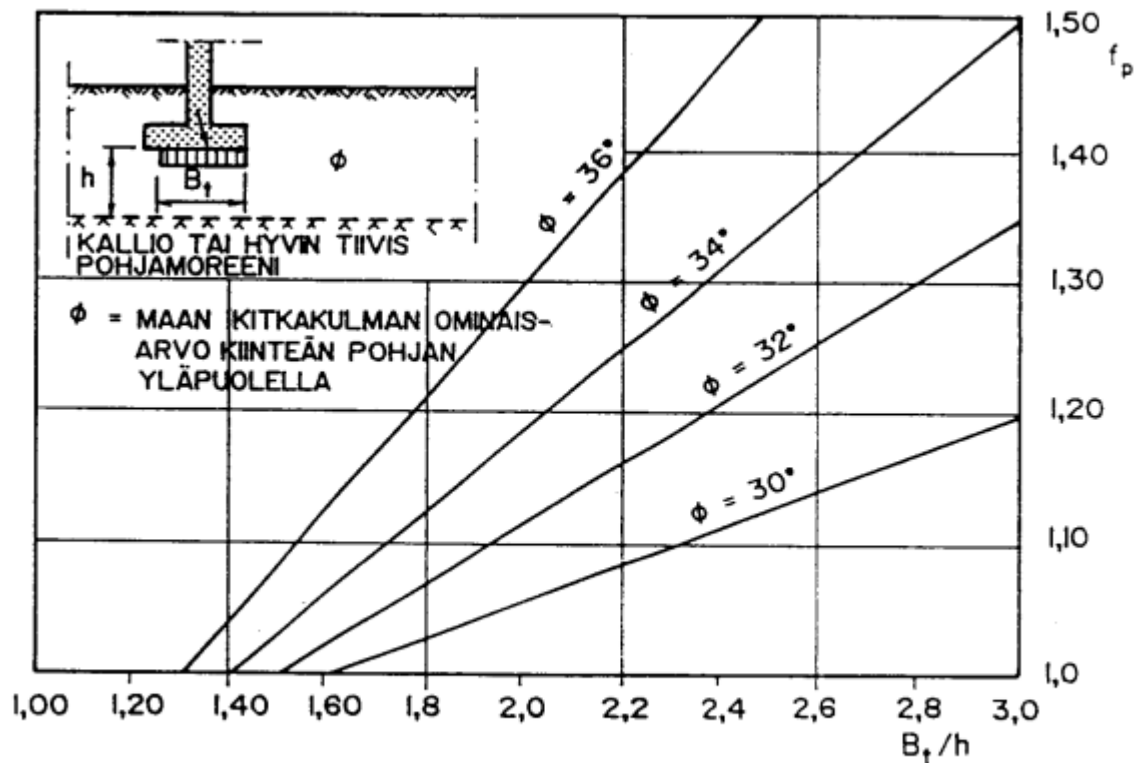
$$G_{\text{maa}} := \gamma'_{yp} \cdot \left[ (D_1 - h + 0.5 \cdot \tan(\beta_1 \cdot \text{apu}) \cdot B) \cdot B \cdot L - (h_p - D_0) \cdot D_p^2 \right]$$

$$G_{\text{maa}} = 158.9 \cdot \text{kN}$$

Anturan alapinnan etäisyys anturan alapuolella olevasta kiinteästä pohjasta. (Jos anturan alapuolella on kallio tai hyvin tiivis pohjamoreeni). Annetaan arvo 0, jos kiinteä pohja on kaukana. Otetaan kallion läheinen etäisyys huomioon kasvattamalla kantavuuskaavalla saatavaa kantavuutta.

$$h_e := 100000\text{mm}$$

$$su_0 := \frac{\min(B, L)}{h_e} = 0.02$$



Kuva 2. Kiinteän pohjan syvyyden vaikutus kantokykyyn. Korjauskerroin  $f_p$ .

Pohjarakennusohjeet sillan suunnittelussa, kohta 8.4.1.3 (17.11.1999)

$$f_p := f_p(\varphi') = 1.000$$

Käytetään korkeintaan arvoa 1,5.

## 5.2 Kuormat

Kuormat lasketaan perustuksen alapinnan tasolle. Perustuksen yläpuolisista rakenteista saatavat kuormat on laskettu kappaleessa 3 Kuormat.

### Pysyvät kuormat

Perustuksen yläpuolisten pysyvien rakenteiden paino

$$N_{p.1} = 27.7 \cdot \text{kN}$$

Peruslaatan paino

$$G_{\text{ant}} := B \cdot L \cdot h \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$G_{\text{ant}} = 88.0 \cdot \text{kN}$$

pilariosan  
paino

$$G_p := \pi \cdot \frac{D_p^2}{4} \cdot h_p \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$G_p = 17.5 \cdot \text{kN}$$

Anturan yläpuolisen maan paino

$$G_{\text{maa}} = 158.9 \cdot \text{kN}$$

Anturan yläpuolisen maan paino laskettuna luiskan puoleisen ulokeen maanpainon mukaan (anturan rakenteellista mitoitus varten, jos maan pinta on luiskattu)

$$G'_{\text{maa}} = 163.3 \cdot \text{kN}$$

### Maanpaine

Ulokeportaaliin ei stabiilissa luiskassa aiheudu merkittävää maanpainetta. Penkereen puolelta perustukseen kohdistuva maanpaine on perustusta tukeva kuorma. Toisaalta ulokeportaalin pyrkiessä kiertymään penkerettä kohti alkaa perustukseen penkereen puoleiseen reunaan muodostumaan passiivipainetta. Toiselle puolella perustusta vaikuttaa tällöin aktiivipaine.

Lasketaan maanpaineen vaikutus perustukselle perustuksen molemmin puoleisena lepopaineena. Huomioidaan luiskan vaikutus luiskan puoleiselle maanpaineelle.

Lepopainekerroin

$$K_{0.yp} := 1 - \sin(\varphi'_{yp})$$

$$K_{0.yp} = 0.441$$

Lepopaineen funktio

$$p_L(z) := \gamma'_{yp} \cdot K_{0.yp} \cdot (z)$$

Maanpainepinnan korkeus penkereen puolella

$$D_{L1} := h_p - h_n + h$$

$$D_{L1} = 2000 \cdot \text{mm}$$

Maanpainepinnan korkeus luiskan puolella

$$D_{L2} := D_{L1} - \tan(\beta_1) \cdot D_p$$

$$D_{L2} = 2000 \cdot \text{mm}$$

Luiskan puolella maanpainetta redusoidaan syvyydelle, joka on etäisyydelle  $4 \cdot D$  pilariosan pinnasta, jossa mitta  $D$  on pilariosan leveys tien poikkisuunnassa.

$$4 \cdot D_p = 3600.0 \cdot \text{mm}$$

Maan pinnasta etäisyydelle  $D_{L2,a}$  asti käytetään maanpaineelle luiskan johdosta redusointikerrointa

$$D_{L2,a} := \min[\tan(\beta_1) \cdot (4 \cdot D_p), D_1]$$

$$D_{L2,a} = 0.0 \cdot \text{mm}$$

Tämän jälkeisellä osuudella  $D_{L2,b}$  ei käytetä maanpaineelle redusointikerrointa

$$D_{L2,b} := \max(D_1 - D_{L2,a}, 0)$$

$$D_{L2,b} = 2000.0 \cdot \text{mm}$$

Luiskan puolella syvyydelle  $D_{L2,a}$  käytettävä maanpaineen redusointikerroin

$$g_{mp} := g_{0.mp}(\beta_1)$$

$$g_{mp} = 1.000$$

### Vaakavoima kohtisuorassa tien suuntaan nähden

Penkereen puolelta

Anturan osuus	$H_{y.1.a} = 21.0 \cdot \text{kN}$	
Pilariosan osuus	$H_{y.1.p} = 7.6 \cdot \text{kN}$	
Molemmat yhteensä	$H_{y.1} := H_{y.1.a} + H_{y.1.p}$	$H_{y.1} = 28.6 \cdot \text{kN}$

Luiskan puolelta

Anturan osuus	$H_{y.2.a} = -21.0 \cdot \text{kN}$	
Josta redusoitu osuus	$H_{y.2.a.red} = 0.0 \cdot \text{kN}$	
Josta redusioimaton	$H_{y.2.a.nor} = -20982.4 \text{ N}$	
Pilariosan osuus	$H_{y.2.p} = -7.6 \cdot \text{kN}$	
Josta redusoitu osuus	$H_{y.2.p.red} = 0.0 \cdot \text{kN}$	
Josta redusioimaton	$H_{y.2.p.nor} = -7587.4 \text{ N}$	
Molemmat yhteensä	$H_{y.2} := H_{y.2.a} + H_{y.2.p}$	$H_{y.2} = -28.6 \cdot \text{kN}$

Vaakavoima kohtisuorassa tien suuntaan nähden

Molemmat puolet yhteensä	$H_{y.mp.0} := H_{y.1} + H_{y.2}$	$H_{y.mp.0} = 0.0 \cdot \text{kN}$
--------------------------	-----------------------------------	------------------------------------

### Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

Penkereen puolelta

Anturan osuus	$M_{x.1.a} := e_{y.1.a} \cdot H_{y.1.a} = 5.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$ $e_{y.1.a} = 238.1 \cdot \text{mm}$	
Pilariosan osuus	$M_{x.1.p} := e_{y.1.p} \cdot H_{y.1.p} = 7.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$ $e_{y.1.p} = 1000.0 \cdot \text{mm}$	
Molemmat yhteensä	$M_{x.1} := M_{x.1.a} + M_{x.1.p}$	$M_{x.1} = 12.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$



Luiskan puolelta

Anturan osuus

$$M_{x.2.a} := e_{y.2.a.red} \cdot H_{y.2.a.red} + e_{y.2.a.nor} \cdot H_{y.2.a.nor} = -5.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$e_{y.2.a.red} = 0.0 \cdot \text{mm}$$

$$e_{y.2.a.nor} = 238.1 \cdot \text{mm}$$

Pilariosan osuus

$$M_{x.2.p} := e_{y.2.p.red} \cdot H_{y.2.p.red} + e_{y.2.p.nor} \cdot H_{y.2.p.nor} = -7.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$e_{y.2.p.red} = 0.0 \cdot \text{mm}$$

$$e_{y.2.p.nor} = 1000.0 \cdot \text{mm}$$

Molemmat yhteensä

$$M_{x.2} := M_{x.2.a} + M_{x.2.p}$$

$$M_{x.2} = -12.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Molemmat puolet yhteensä

$$M_{x.mp.0} := M_{x.1} + M_{x.2}$$

$$M_{x.mp.0} = 0.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## 5.3 Voimasuureet

### Pysyvät kuormat

Pystykuorma

$$N_{p.0} := N_{p.1} + G_{ant} + G_p + G_{maa}$$

$$N_{p.0} = 292.1 \cdot \text{kN}$$

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.p.0} := M_{x.mp.0} + M_{x.p.1}$$

$$M_{x.p.0} = -108.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentti tien suunnassa

$$M_{y.p.0} := M_{y.p.1}$$

$$M_{y.p.0} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vaakavoima tien suunnassa

$$H_{x.p.0} := 0 \text{ kN}$$

Vaakavoima kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$H_{y.p.0} := H_{y.mp.0}$$

$$H_{y.p.0} = 0.0 \cdot \text{kN}$$

### Jää ja lumikuormat

Pystykuorma

$$N_{s.0} := N_{s.1}$$

$$N_{s.0} = 3.6 \cdot \text{kN}$$

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.s.0} := M_{x.s.1}$$

$$M_{x.s.0} = -21.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

### Tuulikuormat

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.w.0} := M_{x.w.1} + H_{y.w.1} \cdot (D_0 + D_1)$$

$$M_{x.w.0} = -28.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentti tien suunnassa

$$M_{y.w.0} := M_{y.w.1} + -H_{x.w.1} \cdot (D_0 + D_1)$$

$$M_{y.w.0} = 227.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{z.w.0} := M_{z.w.1}$$

$$M_{z.w.0} = -191.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vaakavoima tien suunnassa

$$H_{x.w.0} := H_{x.w.1}$$

$$H_{x.w.0} = -20.3 \cdot \text{kN}$$

Vaakavoima kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$H_{y.w.0} := H_{y.w.1}$$

$$H_{y.w.0} = -3.3 \cdot \text{kN}$$

### Liikennekuormat

Perustuksen ollessa tasamaalla kaistojen välissä ei perustukseen kohdistus merkittäviä perustuksen mitoitukseen vaikuttavia kuormia.

Perustuksen ollessa pengerluiskassa tien sivussa, on mitoitus tehty Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohjeen (Liikenneviraston ohjeita 32/2016) mukaisesti. Tällöin ei edellä mainitun ohjeen mukaisesti liikennekuorman vaikutusta perustukseen tarvitse lisäksi tutkia. Liikennekuorman aiheuttama maanpaine on ulokeportaalin anturaperustukselle tukeva kuorma, eikä sitä tämän vuoksi huomioida.

## YHDISTELYT

Yhdistellään vain etukäteen ajatellen määrävimmät tapaukset:

1. Tuulikuorma tien suunnassa ja minimipystykuorma, ei lumikuormaa  
(Suuri momentti tien suunnassa, mutta mahdollisimman pieni pystykuorma)
2. Tuulikuorma tien suunnassa määräävä + lumi. Minimipystykuorma (pysyvät)  
(Suuri momentti tien suunnassa. Lisäksi momenttia poikkisuunnassa.)
3. Tuulikuorma tien poikkisuunnassa määräävä + lumi. Minimipystykuorma (pysyvät)  
(Suuri momentti tien poikkisuunnassa)
4. Lumikuorma tien poikkisuunnassa määräävä + tuuli. Minimipystykuorma (pysyvät)  
(Suuri momentti tien poikkisuunnassa)

Tuulikuorma voi vaikuttaa vain toiseen suuntaan kerrallaan.

### Yhdistelykertoimet

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	
Lumi	$\psi_{s.0} = 0.70$	$\psi_{s.1} = 0.40$	$\psi_{s.2} = 0.20$	$s_k < 2,75 \text{ kN/m}^2$
Tuuli	$\psi_{w.0} = 0.60$	$\psi_{w.1} = 0.20$	$\psi_{w.2} = 0.00$	

## YHDISTELY 1 - Tuuli tien suunnassa, ei lumikuormaa

Murtorajatilan kerroin pysyville kuormille

$$\gamma_G := 1.2$$

*laskettu myös kertoimella 0,9*

### MRT\_1

Pystykuorma	$N_{MRT\_1} := \gamma_G \cdot N_{p.0}$	$N_{MRT\_1} = 350.5 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.MRT\_1} := \gamma_G M_{x.p.0}$	$M_{x.MRT\_1} = -130.7 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.MRT\_1} := \gamma_G M_{y.p.0} + 1.5 \cdot M_{y.w.0}$	$M_{y.MRT\_1} = 341.5 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.MRT\_1} := \gamma_G H_{x.p.0} + 1.5 \cdot H_{x.w.0}$	$H_{x.MRT\_1} = -30.4 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.MRT\_1} := \gamma_G H_{y.p.0}$	$H_{y.MRT\_1} = 0.0 \cdot \text{kN}$

### KRT\_1a

Pystykuorma	$N_{KRT\_1a} := N_{p.0}$	$N_{KRT\_1a} = 292.1 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_1a} := M_{x.p.0}$	$M_{x.KRT\_1a} = -108.9 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_1a} := M_{y.p.0} + M_{y.w.0}$	$M_{y.KRT\_1a} = 227.7 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_1a} := H_{x.p.0} + H_{x.w.0}$	$H_{x.KRT\_1a} = -20.3 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_1a} := H_{y.p.0}$	$H_{y.KRT\_1a} = 0.0 \cdot \text{kN}$

### KRT\_1b

Pystykuorma	$N_{KRT\_1b} := N_{p.0}$	$N_{KRT\_1b} = 292.1 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_1b} := M_{x.p.0}$	$M_{x.KRT\_1b} = -108.9 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_1b} := M_{y.p.0} + \psi_{w.1} \cdot M_{y.w.0}$	$M_{y.KRT\_1b} = 45.7 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_1b} := H_{x.p.0} + \psi_{w.1} \cdot H_{x.w.0}$	$H_{x.KRT\_1b} = -4.1 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_1b} := H_{y.p.0}$	$H_{y.KRT\_1b} = 0.0 \cdot \text{kN}$

## YHDISTELY 2 - Tuuli tien suunnassa + lumi

### MRT\_2

Pystykuorma	$N_{MRT\_2} := \gamma_G \cdot N_{p.0} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot N_{s.0}$	$N_{MRT\_2} = 354.3 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.MRT\_2} := \gamma_G M_{x.p.0} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.0}$	$M_{x.MRT\_2} = -153.4 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.MRT\_2} := \gamma_G M_{y.p.0} + 1.5 \cdot M_{y.w.0}$	$M_{y.MRT\_2} = 341.5 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.MRT\_2} := \gamma_G H_{x.p.0} + 1.5 \cdot H_{x.w.0}$	$H_{x.MRT\_2} = -30.4 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.MRT\_2} := \gamma_G H_{y.p.0}$	$H_{y.MRT\_2} = 0.0 \cdot \text{kN}$

### KRT\_2a

Pystykuorma	$N_{KRT\_2a} := N_{p.0} + \psi_{s.0} \cdot N_{s.0}$	$N_{KRT\_2a} = 294.6 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_2a} := M_{x.p.0} + \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.0}$	$M_{x.KRT\_2a} = -124.0 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_2a} := M_{y.p.0} + M_{y.w.0}$	$M_{y.KRT\_2a} = 227.7 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_2a} := H_{x.p.0} + H_{x.w.0}$	$H_{x.KRT\_2a} = -20.3 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_2a} := H_{y.p.0}$	$H_{y.KRT\_2a} = 0.0 \cdot \text{kN}$

### KRT\_2b

Pystykuorma	$N_{KRT\_2b} := N_{p.0} + \psi_{s.2} \cdot N_{s.0}$	$N_{KRT\_2b} = 292.8 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_2b} := M_{x.p.0} + \psi_{s.2} \cdot M_{x.s.0}$	$M_{x.KRT\_2b} = -113.2 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_2b} := M_{y.p.0} + \psi_{w.1} \cdot M_{y.w.0}$	$M_{y.KRT\_2b} = 45.7 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_2b} := H_{x.p.0} + \psi_{w.1} \cdot H_{x.w.0}$	$H_{x.KRT\_2b} = -4.1 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_2b} := H_{y.p.0}$	$H_{y.KRT\_2b} = 0.0 \cdot \text{kN}$

### YHDISTELY 3 - Tuuli tien poikkisuunnassa + lumi

#### MRT\_3

Pystykuorma	$N_{MRT\_3} := \gamma_G \cdot N_{p.0} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot N_{s.0}$	$N_{MRT\_3} = 354.3 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.MRT\_3} := \gamma_G M_{x.p.0} + 1.5 \cdot (M_{x.w.0} + \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.0})$	$M_{x.MRT\_3} = -196.1 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.MRT\_3} := \gamma_G M_{y.p.0}$	$M_{y.MRT\_3} = 0.2 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.MRT\_3} := \gamma_G H_{x.p.0}$	$H_{x.MRT\_3} = 0.0 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.MRT\_3} := \gamma_G H_{y.p.0} + 1.5 \cdot H_{y.w.0}$	$H_{y.MRT\_3} = -4.9 \cdot \text{kN}$

#### KRT\_3a

Pystykuorma	$N_{KRT\_3a} := N_{p.0} + \psi_{s.0} \cdot N_{s.0}$	$N_{KRT\_3a} = 294.6 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_3a} := M_{x.p.0} + M_{x.w.0} + \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.0}$	$M_{x.KRT\_3a} = -152.5 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_3a} := M_{y.p.0}$	$M_{y.KRT\_3a} = 0.2 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_3a} := H_{x.p.0}$	$H_{x.KRT\_3a} = 0.0 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_3a} := H_{y.p.0} + H_{y.w.0}$	$H_{y.KRT\_3a} = -3.3 \cdot \text{kN}$

#### KRT\_3b

Pystykuorma	$N_{KRT\_3b} := N_{p.0} + \psi_{s.2} \cdot N_{s.0}$	$N_{KRT\_3b} = 292.8 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_3b} := M_{x.p.0} + \psi_{w.1} \cdot M_{x.w.0} + \psi_{s.2} \cdot M_{x.s.0}$	$M_{x.KRT\_3b} = -118.9 \cdot \text{kNm}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_3b} := M_{y.p.0}$	$M_{y.KRT\_3b} = 0.2 \cdot \text{kNm}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_3b} := H_{x.p.0}$	$H_{x.KRT\_3b} = 0.0 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_3b} := H_{y.p.0} + \psi_{w.1} \cdot H_{y.w.0}$	$H_{y.KRT\_3b} = -0.7 \cdot \text{kN}$

## YHDISTELY 4 - Lumi + tuuli tien poikkisuunnassa

### MRT\_4

Pystykuorma	$N_{MRT\_4} := \gamma_G \cdot N_{p.0} + 1.5 \cdot N_{s.0}$	$N_{MRT\_4} = 355.9 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.MRT\_4} := \gamma_G M_{x.p.0} + 1.5 \cdot (M_{x.s.0} + \psi_{w.0} \cdot M_{x.w.0})$	$M_{x.MRT\_4} = -188.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.MRT\_4} := \gamma_G M_{y.p.0}$	$M_{y.MRT\_4} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.MRT\_4} := \gamma_G H_{x.p.0}$	$H_{x.MRT\_4} = 0.0 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.MRT\_4} := \gamma_G H_{y.p.0} + 1.5 \cdot \psi_{w.0} \cdot H_{y.w.0}$	$H_{y.MRT\_4} = -2.9 \cdot \text{kN}$

### KRT\_4a

Pystykuorma	$N_{KRT\_4a} := N_{p.0} + N_{s.0}$	$N_{KRT\_4a} = 295.7 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_4a} := M_{x.p.0} + M_{x.s.0} + \psi_{w.0} \cdot M_{x.w.0}$	$M_{x.KRT\_4a} = -147.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_4a} := M_{y.p.0}$	$M_{y.KRT\_4a} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_4a} := H_{x.p.0}$	$H_{x.KRT\_4a} = 0.0 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_4a} := H_{y.p.0} + \psi_{w.0} \cdot H_{y.w.0}$	$H_{y.KRT\_4a} = -2.0 \cdot \text{kN}$

### KRT\_4b

Pystykuorma	$N_{KRT\_4b} := N_{p.0} + \psi_{s.1} \cdot N_{s.0}$	$N_{KRT\_4b} = 293.5 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_4b} := M_{x.p.0} + \psi_{s.1} \cdot M_{x.s.0} + \psi_{w.2} \cdot M_{x.w.0}$	$M_{x.KRT\_4b} = -117.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_4b} := M_{y.p.0}$	$M_{y.KRT\_4b} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_4b} := H_{x.p.0}$	$H_{x.KRT\_4b} = 0.0 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_4b} := H_{y.p.0} + \psi_{w.2} \cdot H_{y.w.0}$	$H_{y.KRT\_4b} = 0.0 \cdot \text{kN}$

## KRTc

Pystykuorma	$N_{KRT\_c} := N_{p.0} + \psi_{s.2} \cdot N_{s.0}$	$N_{KRT\_c} = 292.8 \cdot \text{kN}$
Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$M_{x.KRT\_c} := M_{x.p.0} + \psi_{s.2} \cdot M_{x.s.0}$	$M_{x.KRT\_c} = -113.2 \cdot \text{kN}$
Momentti tien suunnassa	$M_{y.KRT\_c} := M_{y.p.0}$	$M_{y.KRT\_c} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Vaakavoima tien suunnassa	$H_{x.KRT\_c} := H_{x.p.0}$	$H_{x.KRT\_c} = 0.0 \cdot \text{kN}$
Vaakavoima poikkisuunnassa tien suuntaan nähden	$H_{y.KRT\_c} := H_{y.p.0} + \psi_{w.2} \cdot H_{y.w.0}$	$H_{y.KRT\_c} = 0.0 \cdot \text{kN}$

## YHTEENVETO

Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4
Tuuli X	Tuuli X + lumi	Tuuli Y + lumi	Lumi + Tuuli y
$N_{MRT\_1} = 350.5 \cdot \text{kN}$	$N_{MRT\_2} = 354.3 \cdot \text{kN}$	$N_{MRT\_3} = 354.3 \cdot \text{kN}$	$N_{MRT\_4} = 355.9 \cdot \text{kN}$
$M_{x.MRT\_1} = -130.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.MRT\_2} = -153.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.MRT\_3} = -196.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.MRT\_4} = -188.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
$M_{y.MRT\_1} = 341.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.MRT\_2} = 341.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.MRT\_3} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.MRT\_4} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
$H_{x.MRT\_1} = -30.4 \cdot \text{kN}$	$H_{x.MRT\_2} = -30.4 \cdot \text{kN}$	$H_{x.MRT\_3} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{x.MRT\_4} = 0.0 \cdot \text{kN}$
$H_{y.MRT\_1} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{y.MRT\_2} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{y.MRT\_3} = -4.9 \cdot \text{kN}$	$H_{y.MRT\_4} = -2.9 \cdot \text{kN}$
$N_{KRT\_1a} = 292.1 \cdot \text{kN}$	$N_{KRT\_2a} = 294.6 \cdot \text{kN}$	$N_{KRT\_3a} = 294.6 \cdot \text{kN}$	$N_{KRT\_4a} = 295.7 \cdot \text{kN}$
$M_{x.KRT\_1a} = -108.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.KRT\_2a} = -124.0 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.KRT\_3a} = -152.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.KRT\_4a} = -147.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
$M_{y.KRT\_1a} = 227.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.KRT\_2a} = 227.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.KRT\_3a} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.KRT\_4a} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
$H_{x.KRT\_1a} = -20.3 \cdot \text{kN}$	$H_{x.KRT\_2a} = -20.3 \cdot \text{kN}$	$H_{x.KRT\_3a} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{x.KRT\_4a} = 0.0 \cdot \text{kN}$
$H_{y.KRT\_1a} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{y.KRT\_2a} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{y.KRT\_3a} = -3.3 \cdot \text{kN}$	$H_{y.KRT\_4a} = -2.0 \cdot \text{kN}$
$N_{KRT\_1b} = 292.1 \cdot \text{kN}$	$N_{KRT\_2b} = 292.8 \cdot \text{kN}$	$N_{KRT\_3b} = 292.8 \cdot \text{kN}$	$N_{KRT\_4b} = 293.5 \cdot \text{kN}$
$M_{x.KRT\_1b} = -108.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.KRT\_2b} = -113.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.KRT\_3b} = -118.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{x.KRT\_4b} = -117.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
$M_{y.KRT\_1b} = 45.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.KRT\_2b} = 45.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.KRT\_3b} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{y.KRT\_4b} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
$H_{x.KRT\_1b} = -4.1 \cdot \text{kN}$	$H_{x.KRT\_2b} = -4.1 \cdot \text{kN}$	$H_{x.KRT\_3b} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{x.KRT\_4b} = 0.0 \cdot \text{kN}$
$H_{y.KRT\_1b} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{y.KRT\_2b} = 0.0 \cdot \text{kN}$	$H_{y.KRT\_3b} = -0.7 \cdot \text{kN}$	$H_{y.KRT\_4b} = 0.0 \cdot \text{kN}$



## 5.4 Epäkeskisyydet ja pohjapaineet käyttörajatiloissa

### Tarkastetaan KRT\_1a

#### Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_1a}|}{|N_{KRT\_1a}|}$$

$$e_x = 779.7 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{B}{3} = 1066.7 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_1a}|}{|N_{KRT\_1a}|}$$

$$e_y = 372.9 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{L}{3} = 733.3 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_1a} := B - 2 \cdot e_x$$

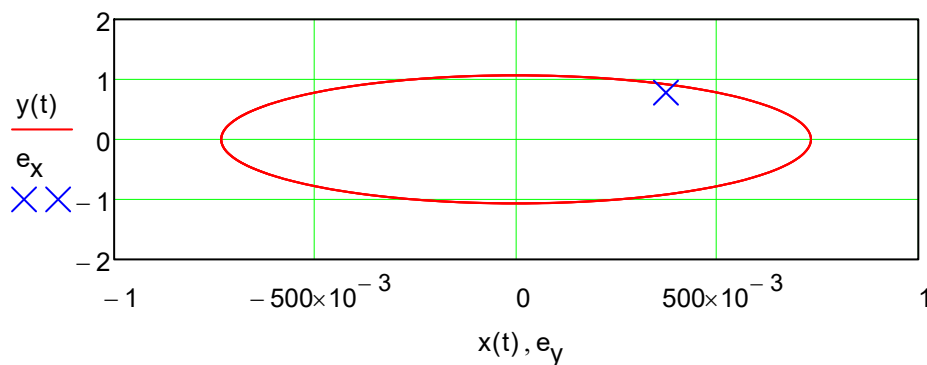
$$B_{t.KRT\_1a} = 1640.7 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_1a} := L - 2 \cdot e_y$$

$$L_{t.KRT\_1a} = 1454 \cdot \text{mm}$$

Pystykuorman resultantin tulee sijaita sellaisen ellipsin sisällä, jonka puoliakselit ovat anturan sivumittojen kuudennekset ja keskipiste anturan keskipiste.

$$x(t) := \frac{L}{3} \cdot \cos(t) \quad y(t) := \frac{B}{3} \cdot \sin(t)$$



$$\text{Epä}_{KRT\_1a} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{e_x^2}{\left(\frac{B}{3}\right)^2} + \frac{e_y^2}{\left(\frac{L}{3}\right)^2} \leq 1 \\ \text{"YLITTYY"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Epä}_{KRT\_1a} = \text{"OK"}$$

Pohjapaine käyttörajatilan ominaisyhdistelmästä painumien laskentaan

$$\sigma_{KRT\_1a} := \frac{|N_{KRT\_1a}|}{(B_{t.KRT\_1a} \cdot L_{t.KRT\_1a})}$$

$$\sigma_{KRT\_1a} = 122 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## Tarkastetaan KRT\_2a

### Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_2a}|}{N_{KRT\_2a}}$$

$$e_x = 773.0 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{B}{3} = 1066.7 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_2a}|}{|N_{KRT\_2a}|}$$

$$e_y = 421.0 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{L}{3} = 733.3 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_2a} := B - 2 \cdot e_x$$

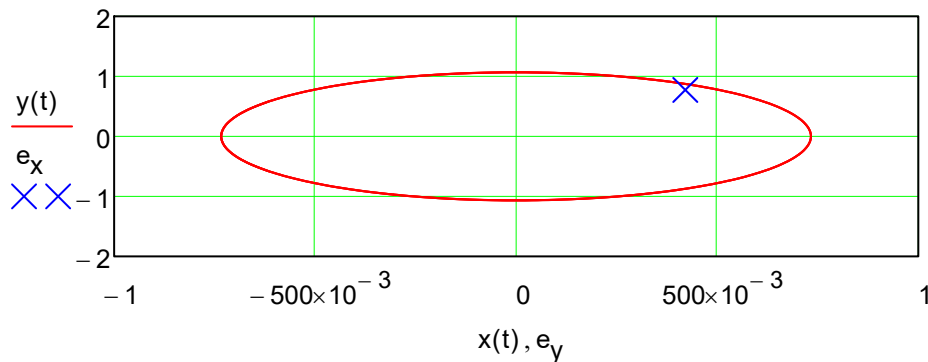
$$B_{t.KRT\_2a} = 1654.0 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_2a} := L - 2 \cdot e_y$$

$$L_{t.KRT\_2a} = 1358 \cdot \text{mm}$$

Pystykuorman resultantin tulee sijaita sellaisen ellipsin sisällä, jonka puoliakselit ovat anturan sivumittojen kolmannekset ja keskipiste anturan keskipiste.

$$x(t) := \frac{L}{3} \cdot \cos(t) \quad y(t) := \frac{B}{3} \cdot \sin(t)$$



$$\text{Epä}_{KRT\_2a} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{e_x^2}{\left(\frac{B}{3}\right)^2} + \frac{e_y^2}{\left(\frac{L}{3}\right)^2} \leq 1 \\ \text{"YLITTYY"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Epä}_{KRT\_2a} = \text{"OK"}$$

Pohjapaine käyttörajatilan ominaisyhdistelmästä painumien laskentaan

$$\sigma_{KRT\_2a} := \frac{|N_{KRT\_2a}|}{(B_{t.KRT\_2a} \cdot L_{t.KRT\_2a})}$$

$$\sigma_{KRT\_2a} = 131 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## Tarkastetaan KRT\_3a

### Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_3a}|}{|N_{KRT\_3a}|}$$

$$e_x = 0.6 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{B}{3} = 1066.7 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_3a}|}{|N_{KRT\_3a}|}$$

$$e_y = 517.6 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{L}{3} = 733.3 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_3a} := B - 2 \cdot e_x$$

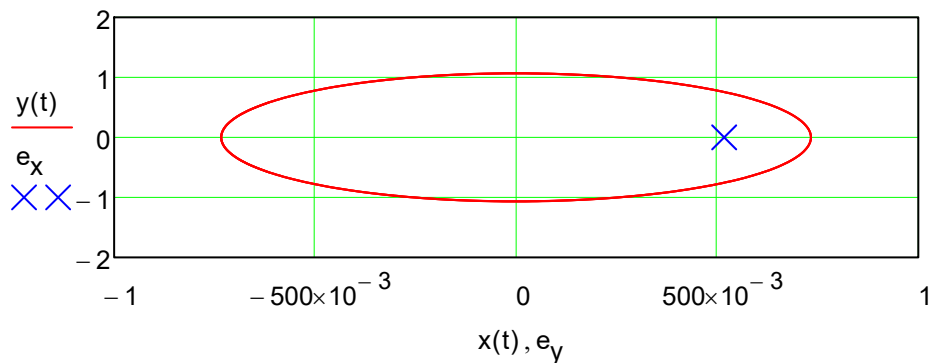
$$B_{t.KRT\_3a} = 3198.8 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_3a} := L - 2 \cdot e_y$$

$$L_{t.KRT\_3a} = 1165 \cdot \text{mm}$$

Pystykuorman resultantin tulee sijaita sellaisen ellipsin sisällä, jonka puoliakselit ovat anturan sivumittojen kolmannekset ja keskipiste anturan keskipiste.

$$x(t) := \frac{L}{3} \cdot \cos(t) \quad y(t) := \frac{B}{3} \cdot \sin(t)$$



$$\text{Epä}_{KRT\_3a} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{e_x^2}{\left(\frac{B}{3}\right)^2} + \frac{e_y^2}{\left(\frac{L}{3}\right)^2} \leq 1 \\ \text{"YLITTY"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Epä}_{KRT\_3a} = \text{"OK"}$$

Pohjapaine käyttörajatilan ominaisyhdistelmästä painumien laskentaan

$$\sigma_{KRT\_3a} := \frac{|N_{KRT\_3a}|}{(B_{t.KRT\_3a} \cdot L_{t.KRT\_3a})}$$

$$\sigma_{KRT\_3a} = 79 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## Tarkastetaan KRT\_4a

### Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_4a}|}{|N_{KRT\_4a}|}$$

$$e_x = 0.6 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{B}{3} = 1066.7 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_4a}|}{|N_{KRT\_4a}|}$$

$$e_y = 499.1 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{L}{3} = 733.3 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_4a} := B - 2 \cdot e_x$$

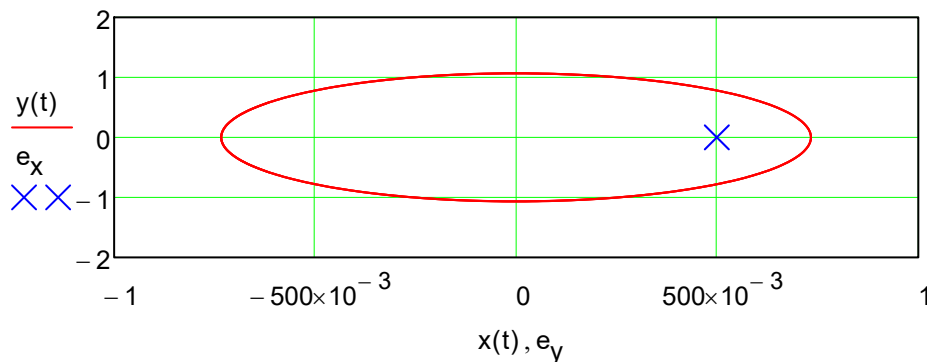
$$B_{t.KRT\_4a} = 3198.8 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_4a} := L - 2 \cdot e_y$$

$$L_{t.KRT\_4a} = 1202 \cdot \text{mm}$$

Pystykuorman resultantin tulee sijaita sellaisen ellipsin sisällä, jonka puoliakselit ovat anturan sivumittojen kolmannekset ja keskipiste anturan keskipiste.

$$x(t) := \frac{L}{3} \cdot \cos(t) \quad y(t) := \frac{B}{3} \cdot \sin(t)$$



$$\text{Epä}_{KRT\_4a} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{e_x^2}{\left(\frac{B}{3}\right)^2} + \frac{e_y^2}{\left(\frac{L}{3}\right)^2} \leq 1 \\ \text{"YLITTYY"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Epä}_{KRT\_4a} = \text{"OK"}$$

Pohjapaine käyttörajan ominaisyhdistelmästä painumien laskentaan

$$\sigma_{KRT\_4a} := \frac{|N_{KRT\_4a}|}{(B_{t.KRT\_4a} \cdot L_{t.KRT\_4a})}$$

$$\sigma_{KRT\_4a} = 77 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## Pohjapaine tavallisesta yhdistelmästä

### KRT\_1b

Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_1b}|}{|N_{KRT\_1b}|} \quad e_x = 156.4 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_1b}|}{|N_{KRT\_1b}|} \quad e_y = 372.9 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_1b} := B - 2 \cdot e_x \quad B_{t.KRT\_1b} = 2887.2 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_1b} := L - 2 \cdot e_y \quad L_{t.KRT\_1b} = 1454 \cdot \text{mm}$$

Pohjapaine käyttörajatilan tavallisesta yhdistelmästä

$$\sigma_{KRT\_1b} := \frac{|N_{KRT\_1b}|}{(B_{t.KRT\_1b} \cdot L_{t.KRT\_1b})} \quad \sigma_{KRT\_1b} = 70 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### KRT\_2b

Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_2b}|}{|N_{KRT\_2b}|} \quad e_x = 156.0 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_2b}|}{|N_{KRT\_2b}|} \quad e_y = 386.7 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_2b} := B - 2 \cdot e_x \quad B_{t.KRT\_2b} = 2887.9 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_2b} := L - 2 \cdot e_y \quad L_{t.KRT\_2b} = 1427 \cdot \text{mm}$$

Pohjapaine käyttörajatilan tavallisesta yhdistelmästä

$$\sigma_{KRT\_2b} := \frac{|N_{KRT\_2b}|}{(B_{t.KRT\_2b} \cdot L_{t.KRT\_2b})} \quad \sigma_{KRT\_2b} = 71 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### KRT\_3b

Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_3b}|}{|N_{KRT\_3b}|} \quad e_x = 0.6 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_3b}|}{|N_{KRT\_3b}|} \quad e_y = 406.1 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_3b} := B - 2 \cdot e_x \quad B_{t.KRT\_3b} = 3198.8 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_3b} := L - 2 \cdot e_y \quad L_{t.KRT\_3b} = 1388 \cdot \text{mm}$$

Pohjapaine käyttörajan tavallisesta yhdistelmästä

$$\sigma_{KRT\_3b} := \frac{|N_{KRT\_3b}|}{(B_{t.KRT\_3b} \cdot L_{t.KRT\_3b})} \quad \sigma_{KRT\_3b} = 66 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### KRT\_4b

Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_4b}|}{|N_{KRT\_4b}|} \quad e_x = 0.6 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{M_{x.KRT\_4b}}{|N_{KRT\_4b}|} \quad e_y = -400.5 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_4b} := B - 2 \cdot e_x \quad B_{t.KRT\_4b} = 3198.8 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_4b} := L - 2 \cdot e_y \quad L_{t.KRT\_4b} = 3001 \cdot \text{mm}$$

Pohjapaine käyttörajan tavallisesta yhdistelmästä

$$\sigma_{KRT\_4b} := \frac{|N_{KRT\_4b}|}{(B_{t.KRT\_4b} \cdot L_{t.KRT\_4b})} \quad \sigma_{KRT\_4b} = 31 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## Pohjapaine pitkäaikaisesta yhdistelmästä

Epäkeskisyydet

tien suuntaan

$$e_x := \frac{|M_{y.KRT\_c}|}{|N_{KRT\_c}|} \quad e_x = 0.6 \cdot \text{mm}$$

tien poikkisuuntaan

$$e_y := \frac{|M_{x.KRT\_c}|}{|N_{KRT\_c}|} \quad e_y = 386.7 \cdot \text{mm}$$

Tehokas pohjapinta-ala

$$B_{t.KRT\_c} := B - 2 \cdot e_x \quad B_{t.KRT\_c} = 3198.8 \cdot \text{mm}$$

$$L_{t.KRT\_c} := L - 2 \cdot e_y \quad L_{t.KRT\_c} = 1427 \cdot \text{mm}$$

Pohjapaine käyttörajan tavallisesta yhdistelmästä

$$\sigma_{KRT\_c} := \frac{|N_{KRT\_c}|}{(B_{t.KRT\_c} \cdot L_{t.KRT\_c})} \quad \sigma_{KRT\_c} = 64 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## 5.5 Kantokestävyys

### MRT\_1

Tarkastellaan kukin yhdistelmä erikseen samalla suurimmat vaakakuormat

$$\text{Vaakakuorma} \quad H_k := \sqrt{H_{y.KRT\_1a}^2 + H_{x.KRT\_1a}^2} \quad H_k = 20.3 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Pystykuorma} \quad V_k := |N_{KRT\_1a}| = 292.1 \cdot \text{kN} \quad V_k = 292.1 \cdot \text{kN}$$

Teholliset leveydet ja pituudet

$$B_t := B_{t.KRT\_1a} \quad B_t = 1640.7 \cdot \text{mm} \quad L_t := L_{t.KRT\_1a} \quad L_t = 1454.3 \cdot \text{mm}$$

Kantokestävyyskaava

$$\frac{R}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma$$

Kertoimet kantokestävyydelle

$$N_q := e^{\pi \cdot \tan(\varphi')} \cdot \tan\left(45\text{deg} + \frac{\varphi'}{2}\right)^2 \quad N_c := (N_q - 1) \cdot \cot(\varphi') \quad N_\gamma := 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\varphi')$$

$$N_q = 18.4$$

$$N_c = 30.1$$

$$N_\gamma = 20.1$$

Kertoimet pohjan kaltevuudelle

$$b_q := (1 - \alpha \cdot \tan(\varphi'))^2 \quad b_\gamma := b_q \quad b_c := b_q - \frac{(1 - b_q)}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$

$$b_q = 1.0$$

$$b_\gamma = 1.0$$

$$b_c = 1.0$$

Kertoimet perustuksen muodolle

$$s_q := 1 + \frac{B_t}{L_t} \cdot \sin(\varphi') \quad s_\gamma := 1 - 0.3 \cdot \frac{B_t}{L_t} \quad s_c := \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}$$

$$s_q = 1.564$$

$$s_\gamma = 0.662$$

$$s_c = 1.596$$

Vaakakuormien vaikutuskulma tien poikkisuunnassa

$$\theta := \begin{cases} 90\text{deg} & \text{if } H_{y.KRT\_1a} = 0 \\ \text{atan}\left(\frac{H_{x.KRT\_1a}}{H_{y.KRT\_1a}}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \theta = 90.0 \cdot \text{deg}$$

H vaikuttaa B:n suunnassa

$$m_B := \frac{2 + \frac{B_t}{L_t}}{1 + \frac{B_t}{L_t}} \quad m_B = 1.470$$

H vaikuttaa L:n suunnassa

$$m_L := \frac{2 + \frac{L_t}{B_t}}{1 + \frac{L_t}{B_t}} \quad m_L = 1.530$$



Jos kuorma H vaikuttaa kulmassa  $\theta$  perustuksen tehokkaan pituuden  $L'$ :n suunnan kanssa niin

$$m_{\theta} := m_L \cdot \cos(\theta)^2 + m_B \cdot \sin(\theta)^2 \quad m_{\theta} = 1.470 \quad m_{\theta} := \min(m_{\theta})$$

Kertoimet vaakakuorman H aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle

$$A_t := \overrightarrow{(B_t \cdot L_t)} \quad A_t = 2.4 \cdot \text{m}^2$$

$$i_q := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}} \quad i_{\gamma} := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}+1} \quad i_c := i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$

$$i_q = 0.900$$

$$i_{\gamma} = 0.837$$

$$i_c = 0.894$$

Yläpuolisen maakerroksen aiheuttama tehokas mitoituspainne perustuksen pohjan tasolla

$$q'_1 := D_1 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_1 = 34.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad q'_2 := D_2 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_2 = 34.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Huomioidaan maanpinnan kaltevuus kantokykyä pienentävällä kertoimella

$$g_{\text{kalt.1}} := g(\beta_1) \quad g_{\text{kalt.1}} = 1.000 \quad \text{Sivukuormitettujen pylväsperustusten suunnitteluohje (Liikenneviraston ohjeita 32/2016), taulukko 5.1}$$

$$g_{\text{kalt.2}} := g(\beta_2) \quad g_{\text{kalt.2}} = 1.00$$

## Kantokestävyys

Kantokestävyysominaisarvo

$$r_{k.1} := g_{kalt.1} \cdot \left[ c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_1 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right] = 971.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$r_{k.2} := g_{kalt.2} \cdot \left[ c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_2 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right] = 971.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Valitaan tapauksista suurempi, rajoitetaan kuitenkin pohjapaine korkeintaan NCCI 7 kohdan 5.2.2.1 mukaiseen arvoon.

$$r_k := \min \left( \max(r_{k.1}, r_{k.2}) \cdot f_p, 2000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 971.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kantokestävyysmitoitusarvo

$$r_{d.MRT\_1} := \frac{\overset{\rightarrow}{r_k}}{\gamma_R} = 626.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Suurin sallittu pystykuorma

$$R_d := \left( \overset{\rightarrow}{r_{d.MRT\_1} \cdot A_t} \right)$$

$$R_d = 1495.8 \cdot \text{kN}$$

Murtorajatilan kuormista

$$V_d := |N_{MRT\_1}|$$

$$V_d = 350.5 \cdot \text{kN}$$

Ominaisyhdistelmällä

$$V_k := |N_{KRT\_1a}|$$

$$V_k = 292.1 \cdot \text{kN}$$

Käyttöasteet

MRT pohjapaine

$$\sigma_{MRT\_1} := \frac{V_d}{A_t} = 146.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$ka_{MRT\_1.\sigma} := \frac{V_d}{R_d}$$

$$ka_{MRT\_1.\sigma} = 23. \%$$

KRTa pohjapaine

$$\sigma_{KRT\_1a} := \frac{V_k}{A_t} = 122.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## MRT\_2

Tarkastellaan kukin yhdistelmä erikseen samalla suurimmat vaakakuormat

$$\text{Vaakakuorma} \quad H_k := \sqrt{H_{y.KRT\_2a}^2 + H_{x.KRT\_2a}^2} \quad H_k = 20.3 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Pystykuorma} \quad V_k := |N_{KRT\_2a}| = 294.6 \cdot \text{kN} \quad V_k = 294.6 \cdot \text{kN}$$

Teholliset leveydet ja pituudet

$$B_t := B_{t.KRT\_2a} \quad B_t = 1654.0 \cdot \text{mm} \quad L_t := L_{t.KRT\_2a} \quad L_t = 1358.0 \cdot \text{mm}$$

Kantokestävyy skaava

$$\frac{R}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma$$

Kertoimet kantokestävyydelle

$$N_q := e^{\pi \cdot \tan(\varphi')} \cdot \tan\left(45\text{deg} + \frac{\varphi'}{2}\right)^2 \quad N_c := (N_q - 1) \cdot \cot(\varphi') \quad N_\gamma := 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\varphi')$$

$$N_q = 18.4$$

$$N_c = 30.1$$

$$N_\gamma = 20.1$$

Kertoimet pohjan kaltevuudelle

$$b_q := (1 - \alpha \cdot \tan(\varphi'))^2 \quad b_\gamma := b_q \quad b_c := b_q - \frac{(1 - b_q)}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$

$$b_q = 1.0$$

$$b_\gamma = 1.0$$

$$b_c = 1.0$$

Kertoimet perustuksen muodolle

$$s_q := 1 + \frac{B_t}{L_t} \cdot \sin(\varphi') \quad s_\gamma := 1 - 0.3 \cdot \frac{B_t}{L_t} \quad s_c := \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}$$

$$s_q = 1.609$$

$$s_\gamma = 0.635$$

$$s_c = 1.644$$

Vaakakuormien vaikutuskulma tien poikkisuunnassa

$$\theta := \begin{cases} 90\text{deg} & \text{if } H_{y.KRT\_2a} = 0 \\ \text{atan}\left(\frac{H_{x.KRT\_2a}}{H_{y.KRT\_2a}}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \theta = 90.0 \cdot \text{deg}$$

H vaikuttaa B:n suunnassa

$$m_B := \frac{2 + \frac{B_t}{L_t}}{1 + \frac{B_t}{L_t}} \quad m_B = 1.451$$

H vaikuttaa L:n suunnassa

$$m_L := \frac{2 + \frac{L_t}{B_t}}{1 + \frac{L_t}{B_t}} \quad m_L = 1.549$$

Jos kuorma H vaikuttaa kulmassa  $\theta$  perustuksen tehokkaan pituuden  $L'$ :n suunnan kanssa niin

$$m_{\theta} := m_L \cdot \cos(\theta)^2 + m_B \cdot \sin(\theta)^2 \quad m_{\theta} = 1.451 \quad m_{\theta} := \min(m_{\theta})$$

Kertoimet vaakakuorman H aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle

$$A_t := \overrightarrow{(B_t \cdot L_t)} \quad A_t = 2.2 \cdot \text{m}^2$$

$$i_q := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}} \quad i_{\gamma} := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}+1} \quad i_c := i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$

$$i_q = 0.902$$

$$i_{\gamma} = 0.840$$

$$i_c = 0.896$$

Yläpuolisen maakerroksen aiheuttama tehokas mitoituspainne perustuksen pohjan tasolla

$$q'_1 := D_1 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_1 = 34.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad q'_2 := D_2 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_2 = 34.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Huomioidaan maanpinnan kaltevuus kantokykyä pienentävällä kertoimella

$$g_{\text{kalt.1}} := g(\beta_1) \quad g_{\text{kalt.1}} = 1.000 \quad \text{Sivukuormitettujen pylväsperustusten suunnitteluohje (Liikenneviraston ohjeita 32/2016), taulukko 5.1}$$

$$g_{\text{kalt.2}} := g(\beta_2) \quad g_{\text{kalt.2}} = 1.00$$

## Kantokestävyys

Kantokestävyys ominaisarvo

$$r_{k.1} := g_{kalt.1} \cdot \left[ \overrightarrow{c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_1 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma} \right] = 996.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$r_{k.2} := g_{kalt.2} \cdot \left[ \overrightarrow{c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_2 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma} \right] = 996.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Valitaan tapauksista suurempi, rajoitetaan kuitenkin pohjapaine korkeintaan NCCI 7 kohdan 5.2.2.1 mukaiseen arvoon.

$$r_k := \min \left( \max(r_{k.1}, r_{k.2}) \cdot f_p, 2000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 996.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kantokestävyys mitoitusarvo

$$r_{d.MRT\_2} := \frac{\overrightarrow{r_k}}{\gamma_R} = 642.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Suurin sallittu pystykuorma

$$R_d := \overrightarrow{(r_{d.MRT\_2} \cdot A_t)}$$

$$R_d = 1443.8 \cdot \text{kN}$$

Murtorajatilan kuormista

$$V_d := |N_{MRT\_2}|$$

$$V_d = 354.3 \cdot \text{kN}$$

Ominaisyhdistelmällä

$$V_k := |N_{KRT\_2a}|$$

$$V_k = 294.6 \cdot \text{kN}$$

Käyttöasteet

MRT pohjapaine

$$k_{aMRT\_2.\sigma} := \frac{V_d}{R_d}$$

$$k_{aMRT\_2.\sigma} = 25. \%$$

$$\sigma_{MRT\_2} := \frac{V_d}{A_t} = 157.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

KRTa pohjapaine

$$\sigma_{KRT\_2a} := \frac{V_k}{A_t} = 131.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### MRT\_3

Tarkastellaan kukin yhdistelmä erikseen samalla suurimmat vaakakuormat

$$\text{Vaakakuorma} \quad H_k := \sqrt{H_{y.KRT\_3a}^2 + H_{x.KRT\_3a}^2} \quad H_k = 3.3 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Pystykuorma} \quad V_k := |N_{KRT\_3a}| = 294.6 \cdot \text{kN} \quad V_k = 294.6 \cdot \text{kN}$$

Teholliset leveydet ja pituudet

$$B_t := B_{t.KRT\_3a} \quad B_t = 3198.8 \cdot \text{mm} \quad L_t := L_{t.KRT\_3a} \quad L_t = 1164.8 \cdot \text{mm}$$

Kantokestävyyskaava

$$\frac{R}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma$$

Kertoimet kantokestävyydelle

$$N_q := e^{\pi \cdot \tan(\varphi')} \cdot \tan\left(45\text{deg} + \frac{\varphi'}{2}\right)^2 \quad N_c := (N_q - 1) \cdot \cot(\varphi') \quad N_\gamma := 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\varphi')$$

$$N_q = 18.4$$

$$N_c = 30.1$$

$$N_\gamma = 20.1$$

Kertoimet pohjan kaltevuudelle

$$b_q := (1 - \alpha \cdot \tan(\varphi'))^2 \quad b_\gamma := b_q \quad b_c := b_q - \frac{(1 - b_q)}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$

$$b_q = 1.0$$

$$b_\gamma = 1.0$$

$$b_c = 1.0$$

Kertoimet perustuksen muodolle

$$s_q := 1 + \frac{B_t}{L_t} \cdot \sin(\varphi') \quad s_\gamma := 1 - 0.3 \cdot \frac{B_t}{L_t} \quad s_c := \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}$$

$$s_q = 2.373$$

$$s_\gamma = 0.176$$

$$s_c = 2.452$$

Vaakakuormien vaikutuskulma tien poikkisuunnassa

$$\theta := \begin{cases} 90\text{deg} & \text{if } H_{y.KRT\_3a} = 0 \\ \text{atan}\left(\frac{H_{x.KRT\_3a}}{H_{y.KRT\_3a}}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \theta = 0.0 \cdot \text{deg}$$

H vaikuttaa B:n suunnassa

$$m_B := \frac{2 + \frac{B_t}{L_t}}{1 + \frac{B_t}{L_t}} \quad m_B = 1.267$$

H vaikuttaa L:n suunnassa

$$m_L := \frac{2 + \frac{L_t}{B_t}}{1 + \frac{L_t}{B_t}} \quad m_L = 1.733$$

Jos kuorma H vaikuttaa kulmassa  $\theta$  perustuksen tehokkaan pituuden  $L'$ :n suunnan kanssa niin

$$m_{\theta} := m_L \cdot \cos(\theta)^2 + m_B \cdot \sin(\theta)^2 \quad m_{\theta} = 1.733 \quad m_{\theta} := \min(m_{\theta})$$

Kertoimet vaakakuorman H aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle

$$A_t := \overrightarrow{(B_t \cdot L_t)} \quad A_t = 3.7 \cdot m^2$$

$$i_q := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}} \quad i_{\gamma} := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}+1} \quad i_c := i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$

$$i_q = 0.981$$

$$i_{\gamma} = 0.970$$

$$i_c = 0.980$$

Yläpuolisen maakerroksen aiheuttama tehokas mitoituspainne perustuksen pohjan tasolla

$$q'_1 := D_1 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_1 = 34.0 \cdot \frac{kN}{m^2} \quad q'_2 := D_2 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_2 = 34.0 \cdot \frac{kN}{m^2}$$

Huomioidaan maanpinnan kaltevuus kantokykyä pienentävällä kertoimella

$$g_{kalt.1} := g(\beta_1) \quad g_{kalt.1} = 1.000 \quad g_{kalt.2} := g(\beta_2) \quad g_{kalt.2} = 1.00$$

*Sivukuormitettujen pylväsperustusten suunnitteluohje (Liikenneviraston ohjeita 32/2016), taulukko 5.1*

## Kantokestävyys

Kantokestävyysominaisarvo

$$r_{k.1} := g_{kalt.1} \cdot \left[ c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_1 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right] = 1511.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$r_{k.2} := g_{kalt.2} \cdot \left[ c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_2 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right] = 1511.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Valitaan tapauksista suurempi, rajoitetaan kuitenkin pohjapaine korkeintaan NCCI 7 kohdan 5.2.2.1 mukaiseen arvoon.

$$r_k := \min \left( \max(r_{k.1}, r_{k.2}) \cdot f_p, 2000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 1511.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kantokestävyysmitoitusarvo

$$r_{d.MRT\_3} := \frac{r_k}{\gamma_R} = 975.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Suurin sallittu pystykuorma

$$R_d := \overline{(r_{d.MRT\_3} \cdot A_t)}$$

$$R_d = 3632.6 \cdot \text{kN}$$

Murtorajatilan kuormista

$$V_d := |N_{MRT\_3}|$$

$$V_d = 354.3 \cdot \text{kN}$$

Ominaisyhdistelmällä

$$V_k := |N_{KRT\_3a}|$$

$$V_k = 294.6 \cdot \text{kN}$$

Käyttöasteet

MRT pohjapaine

$$k_{aMRT\_3.\sigma} := \frac{V_d}{R_d}$$

$$k_{aMRT\_3.\sigma} = 10. \%$$

$$\sigma_{MRT\_3} := \frac{V_d}{A_t} = 95.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

KRTa pohjapaine

$$\sigma_{KRT\_3a} := \frac{V_k}{A_t} = 79.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$



## MRT\_4

Tarkastellaan kukin yhdistelmä erikseen samalla suurimmat vaakakuormat

$$\text{Vaakakuorma} \quad H_k := \sqrt{H_{y.KRT\_4a}^2 + H_{x.KRT\_4a}^2} \quad H_k = 2.0 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Pystykuorma} \quad V_k := |N_{KRT\_4a}| = 295.7 \cdot \text{kN} \quad V_k = 295.7 \cdot \text{kN}$$

Teholliset leveydet ja pituudet

$$B_t := B_{t.KRT\_4a} \quad B_t = 3198.8 \cdot \text{mm} \quad L_t := L_{t.KRT\_4a} \quad L_t = 1201.7 \cdot \text{mm}$$

Kantokestävyyskaava

$$\frac{R}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma$$

Kertoimet kantokestävyydelle

$$N_q := e^{\pi \cdot \tan(\varphi')} \cdot \tan\left(45\text{deg} + \frac{\varphi'}{2}\right)^2 \quad N_c := (N_q - 1) \cdot \cot(\varphi') \quad N_\gamma := 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\varphi')$$
$$N_q = 18.4 \quad N_c = 30.1 \quad N_\gamma = 20.1$$

Kertoimet pohjan kaltevuudelle

$$b_q := (1 - \alpha \cdot \tan(\varphi'))^2 \quad b_\gamma := b_q \quad b_c := b_q - \frac{(1 - b_q)}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$
$$b_q = 1.0 \quad b_\gamma = 1.0 \quad b_c = 1.0$$

Kertoimet perustuksen muodolle

$$s_q := 1 + \frac{B_t}{L_t} \cdot \sin(\varphi') \quad s_\gamma := 1 - 0.3 \cdot \frac{B_t}{L_t} \quad s_c := \frac{s_q \cdot N_q - 1}{N_q - 1}$$
$$s_q = 2.331 \quad s_\gamma = 0.201 \quad s_c = 2.407$$

Vaakakuormien vaikutuskulma tien poikkisuunnassa

$$\theta := \begin{cases} 90\text{deg} & \text{if } H_{y.KRT\_4a} = 0 \\ \text{atan}\left(\frac{H_{x.KRT\_4a}}{H_{y.KRT\_4a}}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \theta = 0.0 \cdot \text{deg}$$

H vaikuttaa B:n suunnassa

$$m_B := \frac{2 + \frac{B_t}{L_t}}{1 + \frac{B_t}{L_t}} \quad m_B = 1.273$$

H vaikuttaa L:n suunnassa

$$m_L := \frac{2 + \frac{L_t}{B_t}}{1 + \frac{L_t}{B_t}} \quad m_L = 1.727$$

Jos kuorma H vaikuttaa kulmassa  $\theta$  perustuksen tehokkaan pituuden  $L'$ :n suunnan kanssa niin

$$m_{\theta} := m_L \cdot \cos(\theta)^2 + m_B \cdot \sin(\theta)^2 \quad m_{\theta} = 1.727 \quad m_{\theta} := \min(m_{\theta})$$

Kertoimet vaakakuorman H aiheuttamalle kuorman kaltevuudelle

$$A_t := \overrightarrow{(B_t \cdot L_t)} \quad A_t = 3.8 \cdot \text{m}^2$$

$$i_q := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}} \quad i_{\gamma} := \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A_t \cdot c' \cdot \cot(\varphi')}\right)^{m_{\theta}+1} \quad i_c := i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan(\varphi')}$$

$$i_q = 0.989$$

$$i_{\gamma} = 0.982$$

$$i_c = 0.988$$

Yläpuolisen maakerroksen aiheuttama tehokas mitoituspainne perustuksen pohjan tasolla

$$q'_{1} := D_1 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_{1} = 34.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad q'_{2} := D_2 \cdot \gamma'_{yp} \quad q'_{2} = 34.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Huomioidaan maanpinnan kaltevuus kantokykyä pienentävällä kertoimella

$$g_{\text{kalt.1}} := g(\beta_1) \quad g_{\text{kalt.1}} = 1.000 \quad \text{Sivukuormitettujen pylväsperustusten suunnitteluohje (Liikenneviraston ohjeita 32/2016), taulukko 5.1}$$

$$g_{\text{kalt.2}} := g(\beta_2) \quad g_{\text{kalt.2}} = 1.00$$

## Kantokestävyys

Kantokestävyysominaisarvo

$$r_{k.1} := g_{kalt.1} \cdot \left[ c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_1 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right] = 1505.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$r_{k.2} := g_{kalt.2} \cdot \left[ c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q'_2 \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma' \cdot B_t \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \right] = 1505.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Valitaan tapauksista suurempi, rajoitetaan kuitenkin pohjapaine korkeintaan NCCI 7 kohdan 5.2.2.1 mukaiseen arvoon.

$$r_k := \min \left( \max(r_{k.1}, r_{k.2}) \cdot f_p, 2000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 1505.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kantokestävyysmitoitusarvo

$$r_{d.MRT\_4} := \frac{r_k}{\gamma_R} = 971.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Suurin sallittu pystykuorma

$$R_d := \overline{(r_{d.MRT\_4} \cdot A_t)}$$

$$R_d = 3733.1 \cdot \text{kN}$$

Murtorajatilan kuormista

$$V_d := |N_{MRT\_4}|$$

$$V_d = 355.9 \cdot \text{kN}$$

Ominaisyhdistelmällä

$$V_k := |N_{KRT\_4a}|$$

$$V_k = 295.7 \cdot \text{kN}$$

Käyttöasteet

MRT pohjapaine

$$k_{a.MRT\_4.\sigma} := \frac{V_d}{R_d}$$

$$k_{a.MRT\_4.\sigma} = 10. \%$$

$$\sigma_{MRT\_4} := \frac{V_d}{A_t} = 92.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

KRTa pohjapaine

$$\sigma_{KRT\_4a} := \frac{V_k}{A_t} = 76.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

## 5.6 Liukumiskestävyys

Liukumiskestävyys tarkastetaan rajatilassa STR/GEO DA2\*

$$\varphi_k = 30.0 \cdot \text{deg}$$

$$\gamma_{R,h} = 1.10$$

### MRT\_1

Liukumiskestävyys

$$H_{r\_MRT\_1} := \frac{|N_{MRT\_1}| \cdot \tan(\varphi_k)}{\gamma_{R,h}} = 184.0 \cdot \text{kN}$$

Maksimivaakakuorma

$$H_{d\_1} := \sqrt{H_{y\_MRT\_1}^2 + H_{x\_MRT\_1}^2} = 30.4 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste liukumiselle

$$ka_{MRT\_1.liuku} := \frac{H_{d\_1}}{H_{r\_MRT\_1}} = 16.5 \cdot \%$$

### MRT\_3

Liukumiskestävyys

$$H_{r\_MRT\_3} := \frac{|N_{MRT\_3}| \cdot \tan(\varphi_k)}{\gamma_{R,h}} = 185.9 \cdot \text{kN}$$

Maksimivaakakuorma

$$H_{d\_3} := \sqrt{H_{y\_MRT\_3}^2 + H_{x\_MRT\_3}^2} = 4.9 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste liukumiselle

$$ka_{MRT\_3.liuku} := \frac{H_{d\_3}}{H_{r\_MRT\_3}} = 2.6 \cdot \%$$

### MRT\_2

Liukumiskestävyys

$$H_{r\_MRT\_2} := \frac{|N_{MRT\_2}| \cdot \tan(\varphi_k)}{\gamma_{R,h}} = 185.9 \cdot \text{kN}$$

Maksimivaakakuorma

$$H_{d\_2} := \sqrt{H_{y\_MRT\_2}^2 + H_{x\_MRT\_2}^2} = 30.4 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste liukumiselle

$$ka_{MRT\_2.liuku} := \frac{H_{d\_2}}{H_{r\_MRT\_2}} = 16.3 \cdot \%$$

### MRT\_4

Liukumiskestävyys

$$H_{r\_MRT\_4} := \frac{|N_{MRT\_4}| \cdot \tan(\varphi_k)}{\gamma_{R,h}} = 186.8 \cdot \text{kN}$$

Maksimivaakakuorma

$$H_{d\_4} := \sqrt{H_{y\_MRT\_4}^2 + H_{x\_MRT\_4}^2} = 2.9 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste liukumiselle

$$ka_{MRT\_4.liuku} := \frac{H_{d\_4}}{H_{r\_MRT\_4}} = 1.6 \cdot \%$$

## 5.7 Yhteenveto

### Epäkeskisyys

$$Epä_{KRT\_1a} = \text{"OK"}$$

$$Epä_{KRT\_2a} = \text{"OK"}$$

$$Epä_{KRT\_3a} = \text{"OK"}$$

$$Epä_{KRT\_4a} = \text{"OK"}$$

### Pohjapaineet

#### MRT

##### Kapasiteetti

##### Rasitus

$$r_{d.MRT\_1} = 626.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{MRT\_1} = 146.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$r_{d.MRT\_2} = 642.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{MRT\_2} = 157.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$r_{d.MRT\_3} = 975.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{MRT\_3} = 95.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$r_{d.MRT\_4} = 971.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{MRT\_4} = 92.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{MRT\_max} := \max(\sigma_{MRT\_1}, \sigma_{MRT\_2}, \sigma_{MRT\_3}, \sigma_{MRT\_4})$$

$$\sigma_{MRT\_max} = 157.7 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Rakenteellista mitoitusta varten

$$\sigma_{MRT\_max\_rak} := \sigma_{MRT\_max} - \frac{1.25 \cdot (G'_{maa} + G_{ant})}{B \cdot L}$$

$$\sigma_{MRT\_max\_rak} = 113.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Käyttöaste kantokestävyydelle

$$ka_{MRT\_1.\sigma} = 23. \% \quad ka_{MRT\_2.\sigma} = 25. \% \quad ka_{MRT\_3.\sigma} = 10. \% \quad ka_{MRT\_4.\sigma} = 10. \%$$

$$ka_{MRT\_ \sigma} := \max(ka_{MRT\_1.\sigma}, ka_{MRT\_2.\sigma}, ka_{MRT\_3.\sigma}, ka_{MRT\_4.\sigma})$$

$$ka_{MRT\_ \sigma} = 24.5. \%$$

$$ka\_MRT = \text{"OK"}$$

### KRTa

$$\sigma_{KRT\_1a} = 122.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRT\_2a} = 131.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRT\_3a} = 79.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRT\_4a} = 76.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRTa\_max} := \max(\sigma_{KRT\_1a}, \sigma_{KRT\_2a}, \sigma_{KRT\_3a}, \sigma_{KRT\_4a})$$

$$\sigma_{KRTa\_max} = 131.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Rakenteellista mitoitusta varten

$$\sigma_{KRTa\_max\_rak} := \sigma_{KRTa\_max} - \frac{G'_{maa} + G_{ant}}{B \cdot L}$$

$$\sigma_{KRTa\_max\_rak} = 95.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### KRTb

$$\sigma_{KRT\_1b} = 69.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRT\_2b} = 71.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRT\_3b} = 66.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRT\_4b} = 30.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRTb\_max} := \max(\sigma_{KRT\_1b}, \sigma_{KRT\_2b}, \sigma_{KRT\_3b}, \sigma_{KRT\_4b})$$

$$\sigma_{KRTb\_max} = 71.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Rakenteellista mitoitusta varten

$$\sigma_{KRTb\_max\_rak} := \sigma_{KRTb\_max} - \frac{G'_{maa} + G_{ant}}{B \cdot L}$$

$$\sigma_{KRTb\_max\_rak} = 35.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

### KRTc

$$\sigma_{KRT\_c} = 64 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{KRTc\_max} := \max(\sigma_{KRT\_c})$$

$$\sigma_{KRTc\_max} = 64.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Rakenteellista mitoitusta varten

$$\sigma_{KRTc\_max\_rak} := \sigma_{KRTc\_max} - \frac{G'_{maa} + G_{ant}}{B \cdot L}$$

$$\sigma_{KRTc\_max\_rak} = 28.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

---

## Liukumiskestävyys

### Kapasiteetti

$$H_{r\_MRT\_1} = 184.0 \cdot \text{kN}$$

$$H_{r\_MRT\_2} = 185.9 \cdot \text{kN}$$

$$H_{r\_MRT\_3} = 185.9 \cdot \text{kN}$$

$$H_{r\_MRT\_4} = 186.8 \cdot \text{kN}$$

### Rasitus

$$H_{d\_1} = 30.4 \cdot \text{kN}$$

$$H_{d\_2} = 30.4 \cdot \text{kN}$$

$$H_{d\_3} = 4.9 \cdot \text{kN}$$

$$H_{d\_4} = 2.9 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste liukumiselle

$$ka_{MRT\_liuku\_max} := \max(ka_{MRT\_1.liuku}, ka_{MRT\_2.liuku}, ka_{MRT\_3.liuku}, ka_{MRT\_4.liuku})$$

$$ka_{MRT\_liuku\_max} = 16.5 \cdot \%$$

$$omapaino \times 0,9 \quad 22.0 \cdot \%$$

$$ka\_liuku = \text{"OK"}$$

## 6 Perustuksen kiertymät ja siirtymät

Lasketaan perustuksen kiertymät ja siirtymät. Viittaukset ohjeeseen *Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje* (Liikenneviraston ohjeita 32/2016), ellei toisin ole mainittu.

Pystykuorma on ulokeportaaleilla pieni. Siirtymät aiheutuvat perustuksen kiertymisestä. Lasketaan perustuksen siirtymät ja kiertymät käyttörajatilan ominaisyhdistelmällä. Laskennassa ei oteta huomioon maan sivusuunnan tukevaa vaikutusta.

Siirtymien ja kiertymien positiiviset suunnat ovat samat kuin voimilla ja momenteilla. Nämä on esitetty kappaleessa 4 *Voimasuureet portaalin pilarin juuressa*.

### 6.1 Maaparametrit

Anturan alapuolisen maan leikkauskestävyyskulma  $\varphi' = 30 \cdot \text{deg}$

Maan tehokas tilavuuspaino perustamistason alapuolella  $\gamma' = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Maan moduuliluku perustamistason alapuolella  $m := 100$

Maan jännitysekspONENTTI perustamistason alapuolella  $\beta := 0.3$

Maan jännitysekspONENTTI perustamistason alapuolella  $\nu := 0.2$

Lepopaine kerroin perustamistason alapuolella  $K_0 := 1 - \sin(\varphi')$   $K_0 = 0.5$

Perustamissyvyys (tapaus 1)  $D_1 = 2000 \cdot \text{mm}$



## Pohjamaan ja perustusten ominaisuudet

Maan kimmomoduuli

(Kuvan 5.4 mukaisena painotettuna keskiarvona)

Huom! Anturan sivumittojen symbolit L ja B ovat laskelmissa toisinpäin kuin Sivukuomitettujen pylväspäristysten laskentaohjeessa.

Pääjännitysten summa painotuskerroksen 1 keskellä

$$\theta_1 := (1 + 2 \cdot K_{0,yp}) \cdot \left( \gamma'_{yp} \cdot D_1 + \frac{0.75 \cdot L}{2} \cdot \gamma' \right) \quad \theta_1 = 79.5 \cdot \text{kPa}$$

Painotuskerroksen 1 keskimääräinen kimmomoduuli

$$E_{s,1} := m \cdot 100 \text{ kPa} \cdot \left( \frac{\theta_1}{100 \cdot \text{kPa}} \right)^\beta \quad E_{s,1} = 9.3 \cdot \text{MPa}$$

Pääjännitysten summa painotuskerroksen 2 keskellä

$$\theta_2 := (1 + 2 \cdot K_{0,yp}) \cdot \left( \gamma'_{yp} \cdot D_1 + \frac{1.125 \cdot L}{2} \cdot \gamma' \right) \quad \theta_2 = 87.3 \cdot \text{kPa}$$

Painotuskerroksen 2 keskimääräinen kimmomoduuli

$$E_{s,2} := m \cdot 100 \text{ kPa} \cdot \left( \frac{\theta_2}{100 \cdot \text{kPa}} \right)^\beta \quad E_{s,2} = 9.6 \cdot \text{MPa}$$

Pääjännitysten summa painotuskerroksen 3 keskellä

$$\theta_3 := (1 + 2 \cdot K_{0,yp}) \cdot \left( \gamma'_{yp} \cdot D_1 + \frac{1.75 \cdot L}{2} \cdot \gamma' \right) \quad \theta_3 = 100.2 \cdot \text{kPa}$$

Painotuskerroksen 3 keskimääräinen kimmomoduuli

$$E_{s,3} := m \cdot 100 \text{ kPa} \cdot \left( \frac{\theta_3}{100 \cdot \text{kPa}} \right)^\beta \quad E_{s,3} = 10.0 \cdot \text{MPa}$$

Pohjamaan painotettu kimmomoduuli

$$E_{s,p} := \frac{1}{6} (3 \cdot E_{s,1} + 2 \cdot E_{s,2} + E_{s,3}) \quad E_{s,p} = 9.5 \cdot \text{MPa}$$

Perustuksen muotokerroin  
tien suunnassa

$$I_{\theta,y} := g \left( \frac{B}{L} \right) \quad I_{\theta,y} = 4.08 \quad \frac{B}{L} = 1.45$$

Perustuksen muotokerroin  
poikkisuuntaan suhteessa tiehen

$$I_{\theta,x} := g \left( \frac{L}{B} \right) \quad I_{\theta,x} = 3.47 \quad \frac{L}{B} = 0.69$$

Perustuksen muodosta riippuva kerroin on interpoloitu lineaarisesti taulukon 5.2 mukaisia arvoja käyttäen.

## 6.2 Kiertymät ja siirtymät

Liikenneviraston ohjeissa ei anneta perustuksen kiertymiselle tai yläpinnan vaakasiirtymälle raja-arvoja tieliikenteen ulokerpotaaleille. Rautatien pylväsperustuksille raja-arvot annetaan. Lasketaan kiertymät ja siirtymät joka tapauksessa.

### Voimasuureet

Pysyvien kuormien aiheuttama momentti perustamistasossa

$$\text{Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden} \quad M_{x.G} := M_{x.p.1} \quad M_{x.G} = -108.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Momentti tien suunnassa} \quad M_{y.G} := M_{y.p.1} \quad M_{y.G} = 0.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Muuttuvien kuormien aiheuttama momentti perustamistasossa

Momentti poikkisuunnassa tien suuntaan nähden

$$\text{Tuuli määräävä} \quad M_{x.Q.w} := M_{x.w.0} + \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.0} = -43.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Lumi / jää määräävä} \quad M_{x.Q.s} := M_{x.s.0} + \psi_{w.0} \cdot M_{x.w.0} = -38.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{x.Q} := \begin{cases} \max(M_{x.Q.w}, M_{x.Q.s}) & \text{if } \max(M_{x.Q.w}, M_{x.Q.s}) \geq \min(|M_{x.Q.w}|, |M_{x.Q.s}|) \\ \min(M_{x.Q.w}, M_{x.Q.s}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{x.Q} = -43.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentti tien suunnassa

$$M_{y.Q} := M_{y.w.0} \quad M_{y.Q} = 227.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

### Maanvaraisen perustuksen kiertymät

Muuttuvien kuormien aiheuttama kiertymä

$$\text{Kiertymä poikkisuunnassa tien suuntaan nähden} \quad \phi_{x.Q} := \frac{M_{x.Q} \cdot (1 - \nu^2)}{B^2 \cdot L \cdot E_{s.p}} \cdot l_{\theta.x} \quad \phi_{x.Q} = -0.676 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Kiertymä tien suunnassa} \quad \phi_{y.Q} := \frac{M_{y.Q} \cdot (1 - \nu^2)}{B \cdot L^2 \cdot E_{s.p}} \cdot l_{\theta.y} \quad \phi_{y.Q} = 6.038 \cdot 10^{-3}$$

Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama kiertymä

$$\text{Kiertymä poikkisuunnassa tien suuntaan nähden} \quad \phi_{x.GQ} := \frac{(M_{x.G} + M_{x.Q}) \cdot (1 - \nu^2)}{B^2 \cdot L \cdot E_{s.p}} \cdot l_{\theta.x} \quad \phi_{x.GQ} = -2.364 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Kiertymä tien suunnassa} \quad \phi_{y.GQ} := \frac{(M_{y.G} + M_{y.Q}) \cdot (1 - \nu^2)}{B \cdot L^2 \cdot E_{s.p}} \cdot l_{\theta.y} \quad \phi_{y.GQ} = 6.042 \cdot 10^{-3}$$

## Maanvaraisen perustuksen vaakasiirtymät perustuksen yläpinnassa

### Muuttuvien kuormien aiheuttama siirtymä

Siirtymä poikkisuunnassa tien suuntaan nähden  $\Delta_{y.Q} := \phi_{x.Q} \cdot h_{tot}$   $\Delta_{y.Q} = -1.1 \cdot \text{mm}$

Siirtymä tien suunnassa  $\Delta_{x.Q} := -\phi_{y.Q} \cdot h_{tot}$   $\Delta_{x.Q} = -9.7 \cdot \text{mm}$

### Pysyvien ja muuttuvien kuormien aiheuttama siirtymä

Siirtymä poikkisuunnassa tien suuntaan nähden  $\Delta_{y.GQ} := \phi_{x.GQ} \cdot h_{tot}$   $\Delta_{y.GQ} = -3.8 \cdot \text{mm}$

Siirtymä tien suunnassa  $\Delta_{x.GQ} := -\phi_{y.GQ} \cdot h_{tot}$   $\Delta_{x.GQ} = -9.7 \cdot \text{mm}$

Kun verrataan saatuja arvoja rautatien pylväasperustuksille suunnittelussa sallittaviin arvoihin, voidaan todeta siirtymien olevan maltillisia.

*Taulukko 2.3. Rautatien pylväasperustuksen suunnittelussa käytettävät siirtymän ja kiertymän raja-arvot, kun perustuksen yläpinnan asema on tavanomainen.*

Mitattava suure	Raja-arvo (muuttuvat kuormat)	Raja-arvo (muuttuvat + pysyvät kuormat)
Perustuksen yläpinnan kiertymä $\perp$	$\pm 3 \text{ ‰}$	$\pm 4 \text{ ‰}$
Perustuksen yläpinnan kiertymä $\parallel$	$\pm 3 \text{ ‰}$	$\pm 4 \text{ ‰}$
Perustuksen yläpinnan vaakasiirtymä $\perp$	$\pm 10 \text{ mm}$	$\pm 15 \text{ mm}$
Perustuksen yläpinnan vaakasiirtymä $\parallel$	$\pm 10 \text{ mm}$	$\pm 15 \text{ mm}$

$\perp$  Kohtisuoraan rataa vastaan

$\parallel$  Radan suunnassa

## **7 Anturaperustuksen rakenteellinen mitoitus**

## 7.1 Peruslaatan rakenteellinen mitoitus

### Voimasuureet peruslaatan mitoitukseen

Lasketaan anturan mitoittamiseksi tarvittavat voimasuureet eli taivutusmomentit tien suunnassa ja tien poikkisuunnassa.

Alapinnan momentit saadaan tehollisen pohjapaineen tarkastelujen kautta. Voimasuureet jaetaan alapinnassa jalustaosan leveydelle  $+ 2 \times$  laatan paksuus.

Yläpinnan momentit lasketaan anturan päällä olevan maapainon kautta. Voimasuureet jaetaan yläpinnassa jalustaosan leveydelle.

Leikkaus- ja lävistysmitoitusta ei tarkastella. Voimasuureet ovat jäävät pieniksi.

## Peruslaatan mitat

Jalustaosan halkaisija

Tien suunnassa

$$B = 3.20 \text{ m}$$

Sillan poikkisuuntaan

$$L = 2.20 \text{ m}$$

$$D_p = 0.900 \text{ m}$$

Anturan reunan uloke  
tien suunnassa

$$b_1 := 0.5 \cdot (B - 1 \cdot D_p) = 1.15 \text{ m}$$

Anturan reunan uloke  
tien poikkisuunnassa

$$l_1 := 0.5 \cdot (L - 1 \cdot D_p) = 0.65 \text{ m}$$

## Peruslaatan mitoittavat momentit anturan alapinnassa

Momenttien suunnat menevät siten, että momentti  $M_x$  on taivutusmomentti anturan eli tien poikkisuunnassa eli mitoittaa anturan sivun  $L$  suuntaiset betoniteräksiset.

Vasttaavasti momentti  $M_y$  on taivutusmomentti anturan ja tien pituussuunnassa eli mitoittaa anturan sivun  $B$  suuntaiset betoniteräksiset.

Lasketaan momentit ajattelemalla pohjapaine koko anturan ulokkeelle, vaikka tehokaspohjapaine ei olisikaan koko ulokkeella.

$$M(\sigma, x, Y) := \frac{\sigma \cdot x^2 \cdot Y}{2}$$

$\sigma$  = pohjapaine  
 $x$  = ulokeen mitta  
 $Y$  = ulokkeen leveys

### Tien suunnassa

#### MRT

$$M_{y.Ed} := M(\sigma_{MRT\_max\_rak}, b_1, L)$$

$$M_{y.Ed} = 165 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTa

$$M_{y.KRTa} := M(\sigma_{KRTa\_max\_rak}, b_1, L)$$

$$M_{y.KRTa} = 139 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTb

$$M_{y.KRTb} := M(\sigma_{KRTb\_max\_rak}, b_1, L)$$

$$M_{y.KRTb} = 51 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTc

$$M_{y.KRTc} := M(\sigma_{KRTc\_max\_rak}, b_1, L)$$

$$M_{y.KRTc} = 41 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

### Tien poikkisuunnassa

#### MRT

$$M_{x.Ed} := M(\sigma_{MRT\_max\_rak}, l_1, B)$$

$$M_{x.Ed} = 76 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTa

$$M_{x.KRTa} := M(\sigma_{KRTa\_max\_rak}, l_1, B)$$

$$M_{x.KRTa} = 65 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTb

$$M_{x.KRTb} := M(\sigma_{KRTb\_max\_rak}, l_1, B)$$

$$M_{x.KRTb} = 24 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTc

$$M_{x.KRTc} := M(\sigma_{KRTc\_max\_rak}, l_1, B)$$

$$M_{x.KRTc} = 19 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Peruslaatan mitoittavat momentit anturan yläpinnassa

Mitoitetaan anturan yläpinnan teräkset yläpuolisen maan painolle. Menettely on hieman varman päälle. Mitoitetaan käyttörajatila samalla momenttien suhteella kuin alapinnan teräkset.

$$\sigma_{\text{MRT\_max\_rak.y}} := 1.25 \cdot [\gamma'_{\text{yp}} \cdot (D_1 - h) + h \cdot \gamma_c] = 47.50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{\text{KRT\_max\_rak.y}} := 1.0 \cdot [\gamma'_{\text{yp}} \cdot (D_1 - h) + h \cdot \gamma_c] = 38.00 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$M(\sigma, x, Y) := \frac{\sigma \cdot x^2 \cdot Y}{2}$$

$\sigma$  = Yläpuolisen maan paine  
 $x$  = ulokeen mitta  
 $Y$  = ulokkeen leveys

### Tien suunnassa

#### MRT

$$M_{y.\text{yp.Ed}} := M(\sigma_{\text{MRT\_max\_rak.y}}, b_1, L)$$

$$M_{y.\text{yp.Ed}} = 69 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTa

$$M_{y.\text{yp.KRTa}} := M(\sigma_{\text{KRT\_max\_rak.y}}, b_1, L)$$

$$M_{y.\text{yp.KRTa}} = 55 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTb

$$M_{y.\text{yp.KRTb}} := \frac{M_{y.\text{KRTb}}}{M_{y.\text{KRTa}}} \cdot M(\sigma_{\text{KRT\_max\_rak.y}}, b_1, L)$$

$$M_{y.\text{yp.KRTb}} = 20 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTc

$$M_{y.\text{yp.KRTc}} := \frac{M_{y.\text{KRTc}}}{M_{y.\text{KRTa}}} \cdot M(\sigma_{\text{KRT\_max\_rak.y}}, b_1, L)$$

$$M_{y.\text{yp.KRTc}} = 16 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

### Tien poikkisuunnassa

#### MRT

$$M_{x.\text{yp.Ed}} := M(\sigma_{\text{MRT\_max\_rak.y}}, l_1, B)$$

$$M_{x.\text{yp.Ed}} = 32 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTa

$$M_{x.\text{yp.KRTa}} := M(\sigma_{\text{KRT\_max\_rak.y}}, l_1, B)$$

$$M_{x.\text{yp.KRTa}} = 26 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTb

$$M_{x.\text{yp.KRTb}} := \frac{M_{x.\text{KRTb}}}{M_{x.\text{KRTa}}} \cdot M(\sigma_{\text{KRT\_max\_rak.y}}, l_1, B)$$

$$M_{x.\text{yp.KRTb}} = 10 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

#### KRTc

$$M_{x.\text{yp.KRTc}} := \frac{M_{x.\text{KRTc}}}{M_{x.\text{KRTa}}} \cdot M(\sigma_{\text{KRT\_max\_rak.y}}, l_1, B)$$

$$M_{x.\text{yp.KRTc}} = 8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Peruslaatan taivutus tien poikkisuunnassa - Alapinta

Betonin ominaislujuus

$$f_{ck} = 30.00 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_c = 1.50$$

Teräksen lujuus

$$f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_s = 1.15$$

Virumaluku

$$\phi_{00} = 1.48$$

### Poikkileikkausarvot ja rauditus

Peruslaatan korkeus

$$h = 0.50 \text{ m}$$

Peruslaatan pituus tien suuntaan

$$B = 3.20 \text{ m}$$

Toimivaleveys mitoituksessa

$$B_{\text{eff}} := D_p + 2 \cdot h = 1900.00 \cdot \text{mm}$$

Työterästen koko

$$\phi_{tt} := 12 \text{ mm}$$

Poikittaisen teräksen koko

$$\phi_p := 0 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 1  
koko ja määrä  
(tehollisella  
leveydellä)

$$\phi_{1.y} := 16 \text{ mm}$$

$$n_{1.y} := 9$$

Toimivan teräksen 2  
koko ja määrä  
(tehollisella  
leveydellä)

$$\phi_{2.y} := 0 \text{ mm}$$

$$n_{2.y} := 0$$

$$\phi_{\text{eq}} := \begin{cases} \frac{n_{1.y} \cdot \phi_{1.y}^2 + n_{2.y} \cdot \phi_{2.y}^2}{n_{1.y} \cdot \phi_{1.y} + n_{2.y} \cdot \phi_{2.y}} & \text{if } \phi_{2.y} > 0 \wedge n_{2.y} > 0 \\ \phi_{1.y} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_{\text{eq}} = 16.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s.y} := \begin{cases} n_{1.y} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.y})^2 + n_{2.y} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{2.y})^2 & \text{if } \phi_{2.y} > 0 \wedge n_{2.y} > 0 \\ n_{1.y} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.y})^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{s.y} = 1810 \cdot \text{mm}^2$$

### Betonipeitteet ja halkeamaleveysvaatimukset (Ro04, R4)

Nimellisarvo

$$c_{\text{nom}} := 50 \text{ mm}$$

Minimiarvo

$$c_{\text{min.dur}} := 35 \text{ mm}$$

$$c_{\text{min.dur}} = 35.00 \cdot \text{mm}$$

Todellinen betonipeite (lähinnä betonipintaa olevan halkelua rajoittavan raudituksen betonipeite)

$$c_{\text{true}} := c_{\text{nom}} + \phi_{tt} + \phi_p$$

$$c_{\text{true}} = 62.00 \cdot \text{mm}$$

Halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite

$$c := \min(c_{\text{true}}, 1.4 \cdot c_{\text{min.dur}}, 50 \text{ mm})$$

$$c = 49.00 \cdot \text{mm}$$

Korotuskerroin halkeamaleveydelle

$$k_{wk} := \min(c_{\text{min.dur}}^{-1} \cdot c, 1.4)$$

$$k_{wk} = 1.40$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan tavallisella yhdistelmällä

$$w_{k.\text{sall.KRTb}} := k_{wk} \cdot 0.20 \text{ mm}$$

$$w_{k.\text{sall.KRTb}} = 0.280 \cdot \text{mm}$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmällä

$$w_{k.\text{sall.KRTc}} := k_{wk} \cdot 0.15 \text{ mm}$$

$$w_{k.\text{sall.KRTc}} = 0.210 \cdot \text{mm}$$

### Vetorausoit

Tehokkaan raudituksen sijainti vedetystä reunasta

$$d_s := c_{\text{true}} + \frac{\phi_{\text{eq}}}{2}$$

$$d_s = 70.00 \cdot \text{mm}$$

Tehollinen korkeus

$$d := h - d_s$$

$$d = 430 \cdot \text{mm}$$

$$d_y := d$$



## Yhteenveto rasituksista ja kapasiteeteista



### MRT

$$M_{x.Rd} := \min(M_{x.Rd.0}, M_{x.pl.Rd}) \quad M_{x.Rd} = 329 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{x.Ed} = 76 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{mx.MRT}} := \frac{M_{x.Ed}}{M_{x.Rd}} = 23.3 \cdot \%$$



### Ad

$$M_{x.Rd.Ad} := (d - 0.5 \cdot y_{Ad}) \cdot A_{s.y} \cdot f_{y.d.a} \quad M_{x.Rd.Ad} = 381 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{x.Ad} = 0.00 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{mx.Ad}} := \frac{M_{x.Ad}}{M_{x.Rd.Ad}} = 0.0 \cdot \%$$



### KRTa

$$M_{x.KRTa.sall} := \min(M_{x.KRTa.s}, M_{x.KRTa.c}) \quad M_{x.KRTa.sall} = 296 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{x.KRTa} = 65 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{mx.KRTa}} := \frac{M_{x.KRTa}}{M_{x.KRTa.sall}} = 21.8 \cdot \%$$



### KRTb

$$M_{x.KRTb.sall} := \text{Find}(M_{x.KRTb}) \quad M_{x.KRTb.sall} = 119 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{x.KRTb} = 24 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Halkeamaleveys

$$w_{k.sall.KRTb} = 0.280 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTb} = 0.056 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{mx.KRTb}} := \frac{M_{x.KRTb}}{M_{x.KRTb.sall}} = 20.1 \cdot \%$$



### KRTc

$$M_{x.KRTc.sall} := \text{Find}(M_{x.KRTc}) \quad M_{x.KRTc.sall} = 87 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{x.KRTc} = 19 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$w_{k.sall.KRTc} = 0.210 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTc} = 0.047 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{mx.KRTc}} := \frac{M_{x.KRTc}}{M_{x.KRTc.sall}} = 22.2 \cdot \%$$

### Vähimmäisraudoitusmäärä

$$A_{s.min} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, 0.0013 \cdot d\right) \cdot B_{eff}$$

$$A_{s.min} = 1231 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s.y} = 1810 \cdot \text{mm}^2$$

vähimmäisraudoitus = "Täyttyy"

Terästen jako noin

$$k k_x = 211 \cdot \text{mm}$$

Käytetään raudoitusta T16k200 laatan alapinnassa poikkisuunnassa tiehen nähden.

## Peruslaatan taivutus tien suunnassa - Alapinta

Betonin ominaislujuus

$$f_{ck} = 30.00 \cdot \text{MPa}$$

Teräksen lujuus

$$f_{yk} = 500.00 \cdot \text{MPa}$$

Virumaluku

$$\phi_{00} = 1.48$$

## Poikkileikkausarvot ja rauditus

Peruslaatan korkeus

$$h = 0.50 \text{ m}$$

Peruslaatan pituus tien poikkisuunnassa

$$L = 2.20 \text{ m}$$

Toimivaleveys mitoituksessa

$$L_{\text{eff}} := D_p + 2 \cdot h = 1900.00 \cdot \text{mm}$$

Työterästen koko

$$\phi_{tt} := 12 \text{ mm}$$

Poikittaisen teräksen koko

$$\phi_p := 16 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 1 koko ja määrä (tehollisella leveydellä)

$$\phi_{1.x} := 16 \text{ mm}$$

$$n_{1.x} := 9$$

Toimivan teräksen 2 koko ja määrä (tehollisella leveydellä)

$$\phi_{2.x} := 0 \text{ mm}$$

$$n_{2.x} := 0$$

$$\phi_{eq} := \begin{cases} \frac{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x}^2 + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}^2}{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x} + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}} & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ \phi_{1.x} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_{eq} = 16.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s.x} := \begin{cases} n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 + n_{2.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{2.x})^2 & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{s.x} = 1810 \cdot \text{mm}^2$$

## Betonipeitteet ja halkeamaleveysvaatimukset (Ro04, R4)

Nimellisarvo

$$c_{\text{nom}} := 50 \text{ mm}$$

Minimiarvo

$$c_{\text{min.dur}} := 35 \text{ mm}$$

$$c_{\text{min.dur}} = 35.00 \cdot \text{mm}$$

Todellinen betonipeite (lähinnä betonipintaa olevan halkelua rajoittavan raudituksen betonipeite)

$$c_{\text{true}} := c_{\text{nom}} + \phi_{tt} + \phi_p$$

$$c_{\text{true}} = 78.00 \cdot \text{mm}$$

Halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite

$$c := \min(c_{\text{true}}, 1.4 \cdot c_{\text{min.dur}}, 50 \text{ mm})$$

$$c = 49.00 \cdot \text{mm}$$

Korotuskerroin halkeamaleveydelle

$$k_{wk} := \min(c_{\text{min.dur}}^{-1} \cdot c, 1.4)$$

$$k_{wk} = 1.40$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan tavallisella yhdistelmällä

$$w_{k.\text{sall.KRTb}} := k_{wk} \cdot 0.20 \text{ mm}$$

$$w_{k.\text{sall.KRTb}} = 0.280 \cdot \text{mm}$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmällä

$$w_{k.\text{sall.KRTc}} := k_{wk} \cdot 0.15 \text{ mm}$$

$$w_{k.\text{sall.KRTc}} = 0.210 \cdot \text{mm}$$

## Vetorausoit

Tehokkaan raudituksen sijainti vedetystä reunasta

$$d_s := c_{\text{true}} + \frac{\phi_{eq}}{2}$$

$$d_s = 86.00 \cdot \text{mm}$$

Tehollinen korkeus

$$d := h - d_s \quad d = 414 \cdot \text{mm} \quad d_x := d$$

## Yhteenveto rasituksista ja kapasiteeteista



### MRT

$$M_{y.Rd} := \min(M_{y.Rd.0}, M_{y.pl.Rd}) \quad M_{y.Rd} = 316 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.Ed} = 165 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.MRT}} := \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} = 52.0 \cdot \%$$



### Ad

$$M_{y.Rd.Ad} := (d - 0.5 \cdot y_{Ad}) \cdot A_{s.x} \cdot f_{yd.a} \quad M_{y.Rd.Ad} = 366 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.Ad} = 0.00 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.Ad}} := \frac{M_{y.Ad}}{M_{y.Rd.Ad}} = 0.0 \cdot \%$$



### KRTa

$$M_{y.KRTa.sall} := \min(M_{y.KRTa.s}, M_{y.KRTa.c}) \quad M_{y.KRTa.sall} = 284 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.KRTa} = 139 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTa}} := \frac{M_{y.KRTa}}{M_{y.KRTa.sall}} = 48.8 \cdot \%$$



### KRTb

$$M_{y.KRTb.sall} := \text{Find}(M_{y.KRTb}) \quad M_{y.KRTb.sall} = 114 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.KRTb} = 51 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Halkeamaleveys

$$w_{k.sall.KRTb} = 0.280 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTb} = 0.126 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTb}} := \frac{M_{y.KRTb}}{M_{y.KRTb.sall}} = 45.1 \cdot \%$$



### KRTc

$$M_{y.KRTc.sall} := \text{Find}(M_{y.KRTc}) \quad M_{y.KRTc.sall} = 83 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.KRTc} = 41 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$w_{k.sall.KRTc} = 0.210 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTc} = 0.104 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTc}} := \frac{M_{y.KRTc}}{M_{y.KRTc.sall}} = 49.7 \cdot \%$$

### Vähimmäisraudoitusmäärä

$$A_{s.min} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, 0.0013 \cdot d\right) \cdot L_{eff}$$

$$A_{s.min} = 1185 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s.x} = 1810 \cdot \text{mm}^2$$

vähimmäisraudoitus = "Täyttyy"

Terästen jako noin

$$kk_y = 211 \cdot \text{mm}$$

Käytetään raudoitusta T16k200 laatan alapinnassa tien suunnassa.

## Peruslaatan taivutus tien suunnassa - Yläpinta

Betonin ominaislujuus

$$f_{ck} = 30.00 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_c = 1.50$$

Teräksen lujuus

$$f_{yk} = 500.00 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_s = 1.15$$

Virumaluku

$$\phi_{oo} = 1.48$$

### Poikkileikkausarvot ja rauditus

Peruslaatan korkeus

$$h = 0.50 \text{ m}$$

Peruslaatan pituus tien poikkisuunnassa

$$L = 2.20 \text{ m}$$

Laatan toimivaleveys mitoituksessa (jalustan leveys)

$$L_{eff} := D_p = 900.00 \cdot \text{mm}$$

Työterästen koko

$$\phi_{tt} := 0 \text{ mm}$$

Poikittaisen teräksen koko

$$\phi_p := 12 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 1 koko ja määrä (toimivalla leveydellä)

$$\phi_{1.x} := 12 \text{ mm}$$

$$n_{1.x} := 6$$

Toimivan teräksen 2 koko ja määrä (toimivalla leveydellä)

$$\phi_{2.x} := 0 \text{ mm}$$

$$n_{2.x} := 0$$

$$\phi_{eq} := \begin{cases} \frac{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x}^2 + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}^2}{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x} + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}} & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ \phi_{1.x} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_{eq} = 12.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s.x} := \begin{cases} n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 + n_{2.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{2.x})^2 & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{s.x} = 679 \cdot \text{mm}^2$$

### Betonipeitteet ja halkeamaleveysvaatimukset (Ro04, R4)

Nimellisarvo

$$c_{nom} := 50 \text{ mm}$$

Minimiarvo

$$c_{min.dur} := 35 \text{ mm}$$

$$c_{min.dur} = 35.00 \cdot \text{mm}$$

Todellinen betonipeite (lähinnä betonipintaa olevan halkeilua rajoittavan raudituksen betonipeite)

$$c_{true} := c_{nom} + \phi_{tt} + \phi_p$$

$$c_{true} = 62.00 \cdot \text{mm}$$

Halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite

$$c := \min(c_{true}, 1.4 \cdot c_{min.dur}, 50 \text{ mm})$$

$$c = 49.00 \cdot \text{mm}$$

Korotuskerroin halkeamaleveydelle

$$k_{wk} := \min(c_{min.dur}^{-1} \cdot c, 1.4)$$

$$k_{wk} = 1.40$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan tavallisella yhdistelmällä

$$w_{k.sall.KRTb} := k_{wk} \cdot 0.20 \text{ mm}$$

$$w_{k.sall.KRTb} = 0.280 \cdot \text{mm}$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmällä

$$w_{k.sall.KRTc} := k_{wk} \cdot 0.15 \text{ mm}$$

$$w_{k.sall.KRTc} = 0.210 \cdot \text{mm}$$

### Vetorausitus

Tehokkaan raudituksen sijainti vedetystä reunasta

$$d_s := c_{true} + \frac{\phi_{eq}}{2}$$

$$d_s = 68.00 \cdot \text{mm}$$

Tehollinen korkeus

$$d := h - d_s$$

$$d = 432 \cdot \text{mm}$$

$$d_x := d$$

## Yhteenveto rasituksista ja kapasiteeteista



### MRT

$$M_{y.Rd} := \min(M_{y.Rd.0}, M_{y.pl.Rd}) \quad M_{y.Rd} = 125 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.yp.Ed} = 69 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.MRT}} := \frac{M_{y.yp.Ed}}{M_{y.Rd}} = 55.5 \cdot \%$$



### Ad

$$M_{y.Rd.Ad} := (d - 0.5 \cdot y_{Ad}) \cdot A_{s.x} \cdot f_{yd.a} \quad M_{y.Rd.Ad} = 144 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.yp.Ad} = 0.00 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.Ad}} := \frac{M_{y.yp.Ad}}{M_{y.Rd.Ad}} = 0.0 \cdot \%$$



### KRTa

$$M_{y.KRTa.sall} := \min(M_{y.KRTa.s}, M_{y.KRTa.c}) \quad M_{y.KRTa.sall} = 112 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.yp.KRTa} = 55 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTa}} := \frac{M_{y.yp.KRTa}}{M_{y.KRTa.sall}} = 49.4 \cdot \%$$



### KRTb

$$M_{y.KRTb.sall} := \text{Find}(M_{y.KRTb}) \quad M_{y.KRTb.sall} = 46 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.yp.KRTb} = 20 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Halkeamaleveys

$$w_{k.sall.KRTb} = 0.280 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTb} = 0.311 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTb}} := \frac{M_{y.yp.KRTb}}{M_{y.KRTb.sall}} = 44.3 \cdot \%$$



### KRTc

$$M_{y.KRTc.sall} := \text{Find}(M_{y.KRTc}) \quad M_{y.KRTc.sall} = 34 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.yp.KRTc} = 16 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$w_{k.sall.KRTc} = 0.210 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTc} = 0.256 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTc}} := \frac{M_{y.yp.KRTc}}{M_{y.KRTc.sall}} = 48.6 \cdot \%$$

### Vähimmäisraudoitusmäärä

$$A_{s.min} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, 0.0013 \cdot d\right) \cdot L_{eff}$$

$$A_{s.min} = 586 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s.x} = 679 \cdot \text{mm}^2$$

vähimmäisraudoitus = "Täyttyy"

Terästen jako noin

$$kk_y = 150 \cdot \text{mm}$$

Käytetään raudoitusta T12k150 laatan yläpinnassa tien suunnassa. Käytetään samaa raudoitusta myös vähemmän rasitetussa poikkisuunnassa.

## 7.2 Jalustaosan rakenteellinen mitoitus

Esitetään seuraavilla sivuilla jalustaosa rakenteellinen mitoitus.

Tarkastellaan taivutuskestävyys sekä vääntökestävyys.

Taivutuskestävyys tarkastellaan kahden suunnan taivutuksena varman yksinkertaistettuna mitoituksena (NCCI 2, kaava 5.14). Puristavaa normaalivoimaa ei oteta mitoituksessa huomioon. Puristus on pientä. Käytetään anturan pohjan tasolla saatavia voimasuureita. Tehdään tarkastelu murtorajatilassa. Käyttörajatarkasteluja ei tehdä. Jätetään käyttöaste MRT:ssä yhden suunnan taivutuksen suhteen riittävän pieneksi (käyttöaste alle 50 %).

### Voimasuureet (mitoitettava tilanne on tuuli tien suunnassa + lumi)

#### MRT

Momentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{x.Ed} := 1.25M_{x.p.0} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.0} \quad M_{x.Ed} = -159 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentti tien suunnassa

$$M_{y.Ed} := 1.25M_{y.p.0} + 1.5 \cdot M_{y.w.0} \quad M_{y.Ed} = 342 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$T_{Ed} := 1.5 \cdot M_{z.w.1} \quad T_{Ed} = -288 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Jalustaosan taivutuskestävyys

Betonin ominaislujuus

$$f_{ck} = 35.00 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_c = 1.35$$

Teräksen lujuus

$$f_{yk} = 500.00 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_s = 1.10$$

Virumaluku

$$\phi_{00} = 1.35$$

### Poikkileikkausarvot ja raudoitus

Jalustan leveys  
(neliö)

$$h := D_p = 0.90 \text{ m}$$

$$L := D_p = 0.90 \text{ m}$$

Työterästen koko

$$\phi_{tt} := 12 \text{ mm}$$

Poikittaisen teräksen koko

$$\phi_p := 12 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 1  
koko ja määrä  
(tehollisella  
leveydellä)

$$\phi_{1.x} := 20 \text{ mm}$$

$$n_{1.x} := 6$$

Toimivan teräksen 2  
koko ja määrä  
(tehollisella  
leveydellä)

$$\phi_{2.x} := 0 \text{ mm}$$

$$n_{2.x} := 0$$

$$\phi_{eq} := \begin{cases} \frac{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x}^2 + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}^2}{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x} + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}} & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ \phi_{1.x} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_{eq} = 20.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s.x} := \begin{cases} n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 + n_{2.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{2.x})^2 & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{s.x} = 1885 \cdot \text{mm}^2$$

### Betonipeitteet ja halkeamaleveysvaatimukset (Ro07, R2)

Nimellisarvo

$$c_{nom} := 45 \text{ mm}$$

Minimiarvo

$$c_{min.dur} := 40 \text{ mm}$$

$$c_{min.dur} = 40.00 \cdot \text{mm}$$

Todellinen betonipeite (lähinnä betonipintaa olevan halkeilua rajoittavan raudituksen betonipeite)

$$c_{true} := c_{nom} + \phi_{tt} + \phi_p$$

$$c_{true} = 69.00 \cdot \text{mm}$$

Halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite

$$c := \min(c_{true}, 1.4 \cdot c_{min.dur}, 50 \text{ mm})$$

$$c = 50.00 \cdot \text{mm}$$

Korotuskerroin halkeamaleveydelle

$$k_{wk} := \min(c_{min.dur}^{-1} \cdot c, 1.4)$$

$$k_{wk} = 1.25$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan tavallisella yhdistelmällä

$$w_{k.sall.KRTb} := k_{wk} \cdot 0.20 \text{ mm}$$

$$w_{k.sall.KRTb} = 0.250 \cdot \text{mm}$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmällä

$$w_{k.sall.KRTc} := k_{wk} \cdot 0.15 \text{ mm}$$

$$w_{k.sall.KRTc} = 0.188 \cdot \text{mm}$$

### Vetorausoit

Tehokkaan raudituksen sijainti vedetystä reunasta

$$d_s := c_{true} + \frac{\phi_{eq}}{2}$$

$$d_s = 79.00 \cdot \text{mm}$$

Tehollinen korkeus

$$d := h - d_s \quad d = 821 \cdot \text{mm} \quad d_x := d$$

## Yhteenveto rasituksista ja kapasiteeteista



### MRT



$$M_{Rd} := \min(M_{y.Rd.0}, M_{y.pl.Rd})$$

$$M_{Rd} = 685 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{x.Ed} = -159 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{y.Ed} = 342 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$ka_{my.MRT} := \frac{|M_{x.Ed}|}{M_{Rd}} = 23.2\%$$

$$ka_{my.MRT} := \frac{|M_{y.Ed}|}{M_{Rd}} = 49.9\%$$

### Kahden suunnan taivutuksen yhteisvaikutus

Puristusta ei oteta huomioon (pieni)

$$a := 1.0$$

$$\left( \frac{|M_{x.Ed}|}{M_{Rd}} \right)^a + \left( \frac{|M_{y.Ed}|}{M_{Rd}} \right)^a = 0.73$$

OK

NCCI 2, kaava 5.14

### Vähimmäisraudoitusmäärä

$$A_{s.min} := \max \left( 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, 0.0013 \cdot d \right) \cdot L$$

$$A_{s.min} = 1233 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s.x} = 1885 \cdot \text{mm}^2$$

vähimmäisraudoitus = "Täyttyy"

Terästen jako noin

$$kk_y = 150 \cdot \text{mm}$$

Käytetään raudoitusta 6T20 jalustan joka sivulla.



## Vääntökestävyys

Betonin ominaislujuus

$$f_{ck} = 35.00 \cdot \text{MPa}$$

Teräksen lujuus

$$f_{yk} = 500.00 \cdot \text{MPa}$$

Virumaluku

$$\phi_{oo} = 1.35$$

## Poikkileikkausarvot

Palkin korkeus

$$h := D_p$$

Palkin leveys

$$b := D_p$$

Väännölle tehollinen pinta-ala

$$A_{ef} := (b - 80\text{mm}) \cdot (h - 80\text{mm}) \quad A_{ef} = 0.67 \cdot \text{m}^2$$

Kotelon paksuus

$$h_{ef} := 30\% \cdot \frac{1}{2} \cdot \min(b - 80\text{mm}, h - 80\text{mm}) \quad h_{ef} = 123.00 \cdot \text{mm}$$

Kotelon piiri

$$u_{ef} := 2 \cdot [(b - 80\text{mm}) + (h - 80\text{mm})] \quad u_{ef} = 3280.00 \cdot \text{mm}$$

Vääntöhalkeilleen kotelopoikkileikkauksen vääntövastus

$$W_{tr} := 2 \cdot A_{ef} \cdot h_{ef} \quad W_{tr} = 0.17 \cdot \text{m}^3$$

## Vääntökestävyyden yläraja

$$T_{Rd,max} := 0.25 \cdot f_{cd} \cdot W_{tr} \quad T_{Rd,max} = 911.29 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Vääntökestävyys

Pituussuuntainen vääntöraudoitus, sijoitetaan tasaisesti ympäri poikkileikkausta

sivu + sivu + sivu + sivu

$$A_{sl} := 1 \cdot A_{\phi 20} + 1 \cdot A_{\phi 20} + 1 \cdot A_{\phi 20} + 1 \cdot A_{\phi 20} \quad A_{sl} = 1256.64 \cdot \text{mm}^2$$

Vääntöhaat

$$A_{st} := \frac{A_{\phi 12}}{150\text{mm}} \quad A_{st} = 753.98 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Ehdot rauditukselle

$$\frac{1}{3} = 0.33 < \frac{A_{sl}}{A_{st} \cdot u_{ef}} = 0.51 < 3$$

Vääntöraudoituksen kestävyys on

$$T_s := 2 \cdot A_{ef} \cdot f_{yd} \cdot \sqrt{A_{st} \cdot \frac{A_{sl}}{u_{ef}}} \quad T_s = 329 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \geq |T_{Ed}| = 288 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{OK}$$

465 kN·m      Jos käytetään 2T20 väännölle

Käytetään hakaraudoitusta T12k150. Huomioidaan, että vääntö vaatii vähintään yhden T20 teräksen verran betoniterästä jalustan jokaiselta sivulta.

## 8 Paaluperustuksen rakenteellinen mitoitus

Portaaliilta tulevat vääntö viedään siivelle ja taivutus paalulle.

Tarkastetaan paalun ensi paalun kestävyys liittorakenteena. Tämän jälkeen tarkistetaan siiven kestävyys.

## 8.1 Paalun mitoitus

Ulokeportaan paalu mitoitetaan puristettuna ja taivutettuna liittorakenteena. Tarkastellaan rasitetuimman kohdan eli liitoskohta betoniseinärakenteeseen.

Ensisijainen lähde:

SFS-EN 1994-1-1, kappale 6.7

BY 58 - Oppikirja, Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Eurocode 4

Viitaukset SFS-EN 1994-1-1 kaavoihin

RIL 254-1-2011 - Paalutusohje 2011

## MITOITUSVOIMAT

### Normaalivoima

Maksiminormaalivoima

$$N_{Ed} := 41 \text{ kN}$$

Pysyvä kuorma

$$N_{G.Ed} := 21 \text{ kN}$$

### Taivutusmomentti

*Yläosa*

$$M_{y.Ed.1} := 309 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{z.Ed.1} := 104 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

*Alaosa*

$$M_{y.Ed.2} := 297 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{z.Ed.2} := 88 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

### Leikkausvoima

$$V_{Ed.z} := 90 \text{ kN}$$

$$V_{Ed.y} := 50 \text{ kN}$$

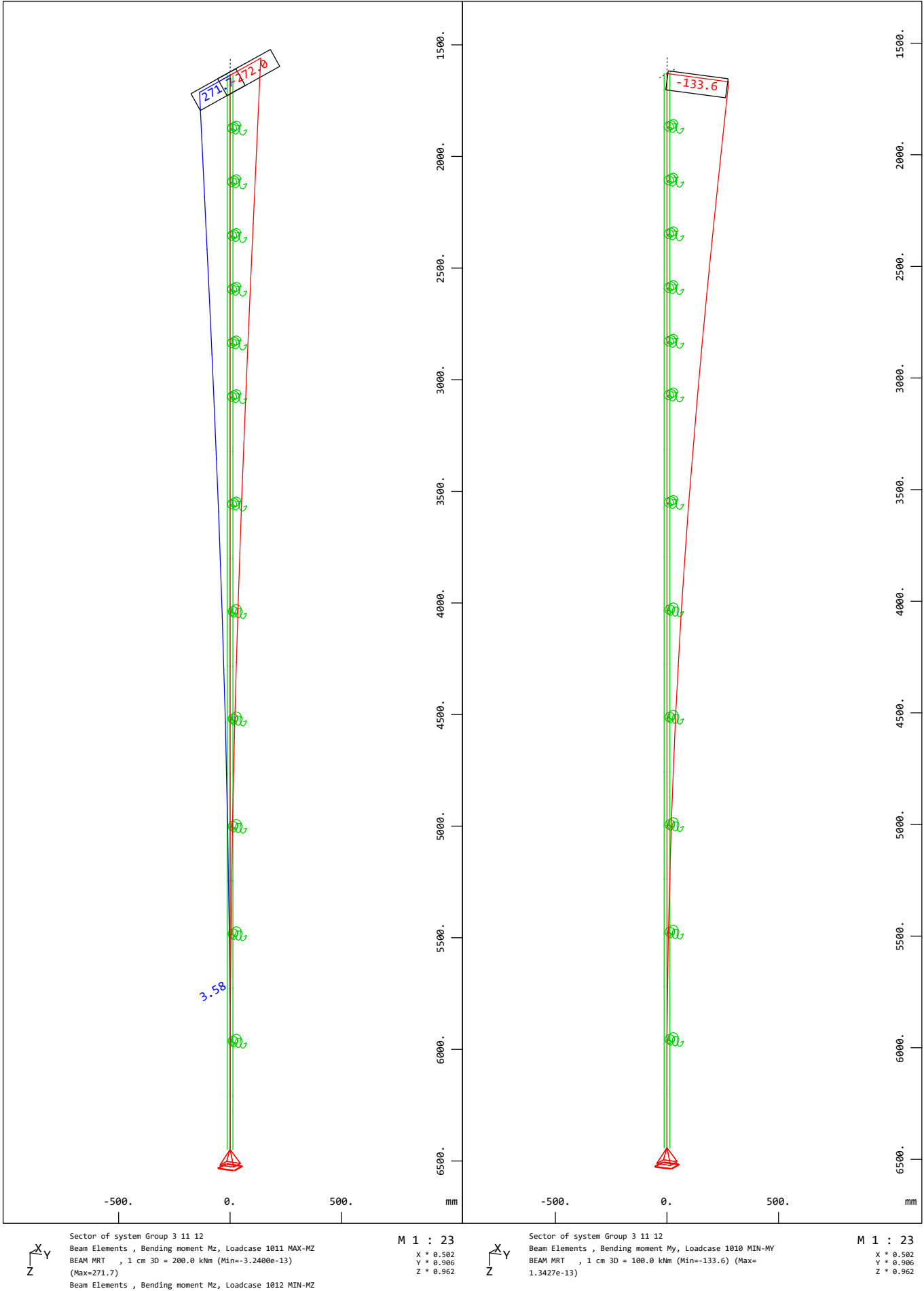
$$V_{Ed} := \sqrt{V_{Ed.z}^2 + V_{Ed.y}^2}$$

$$V_{Ed} = 103 \cdot \text{kN}$$

Esitetään seuraavilla sivuilla FEM-voimasuureet.

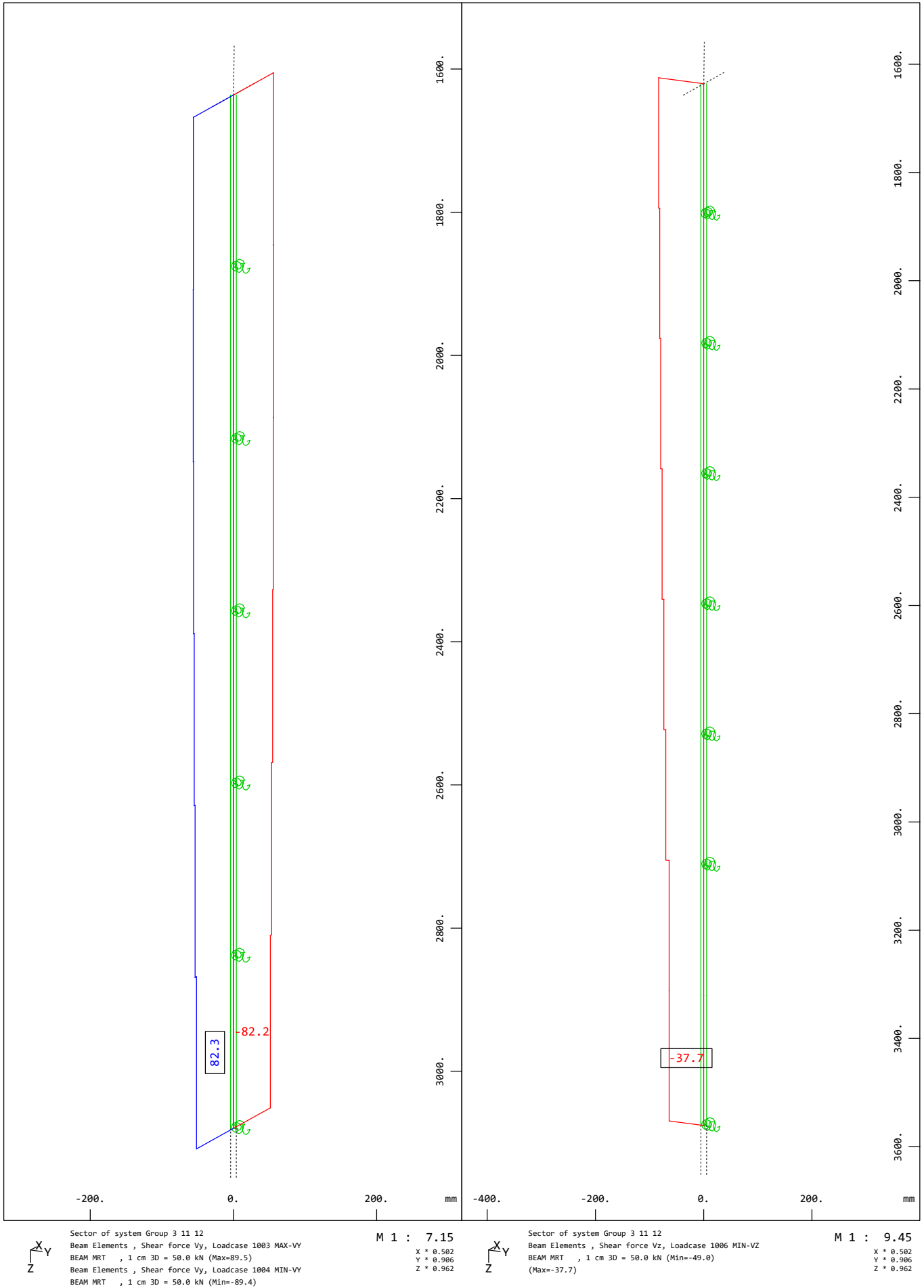
Portaali\_V01  
Paalu

**Normaali tilanne (määrämittainen paalu kitkamaassa 30 astetta)**

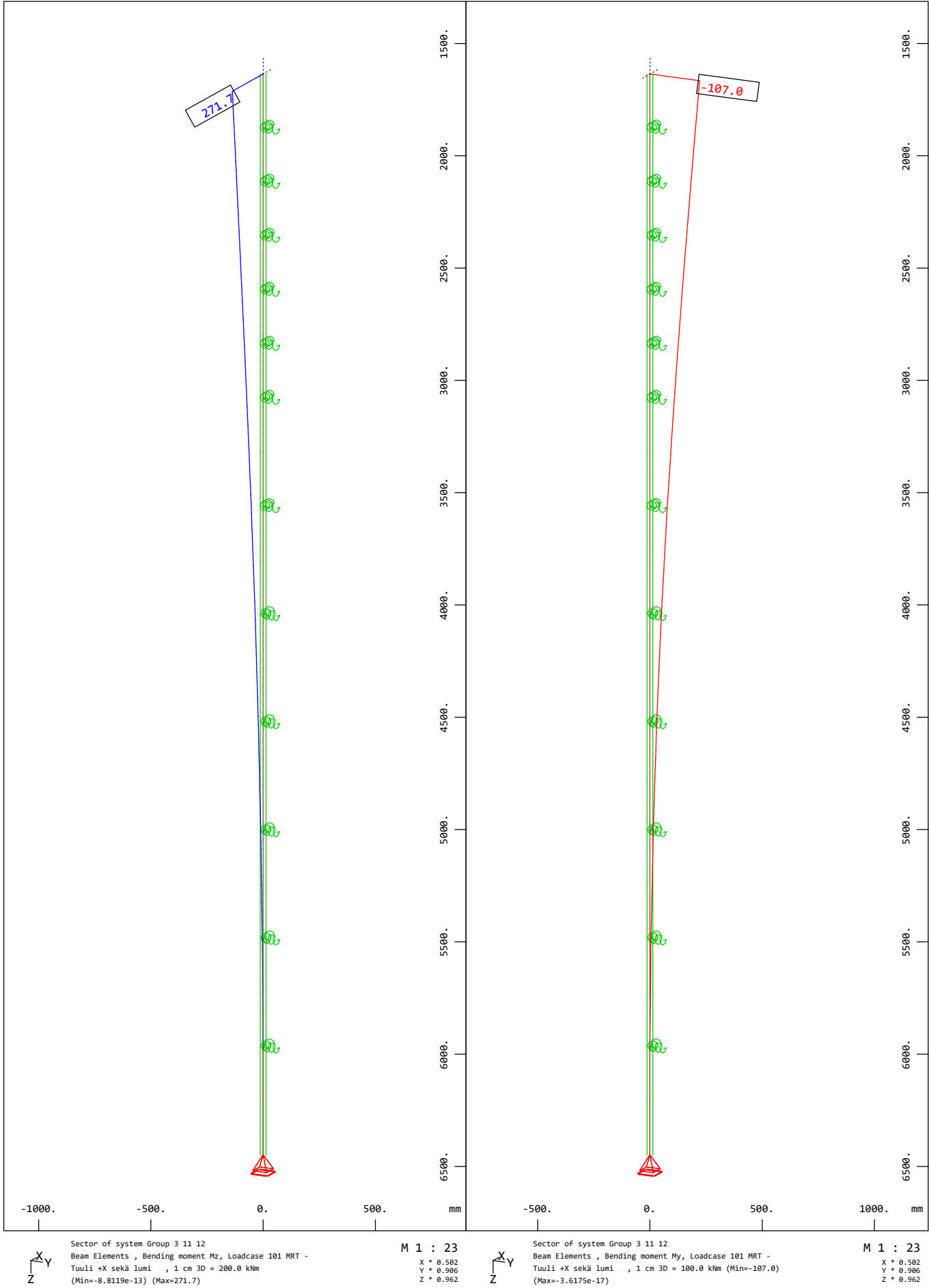


Portaali\_V01  
Paalu

SOFiSTiK AG - www.sofistik.de

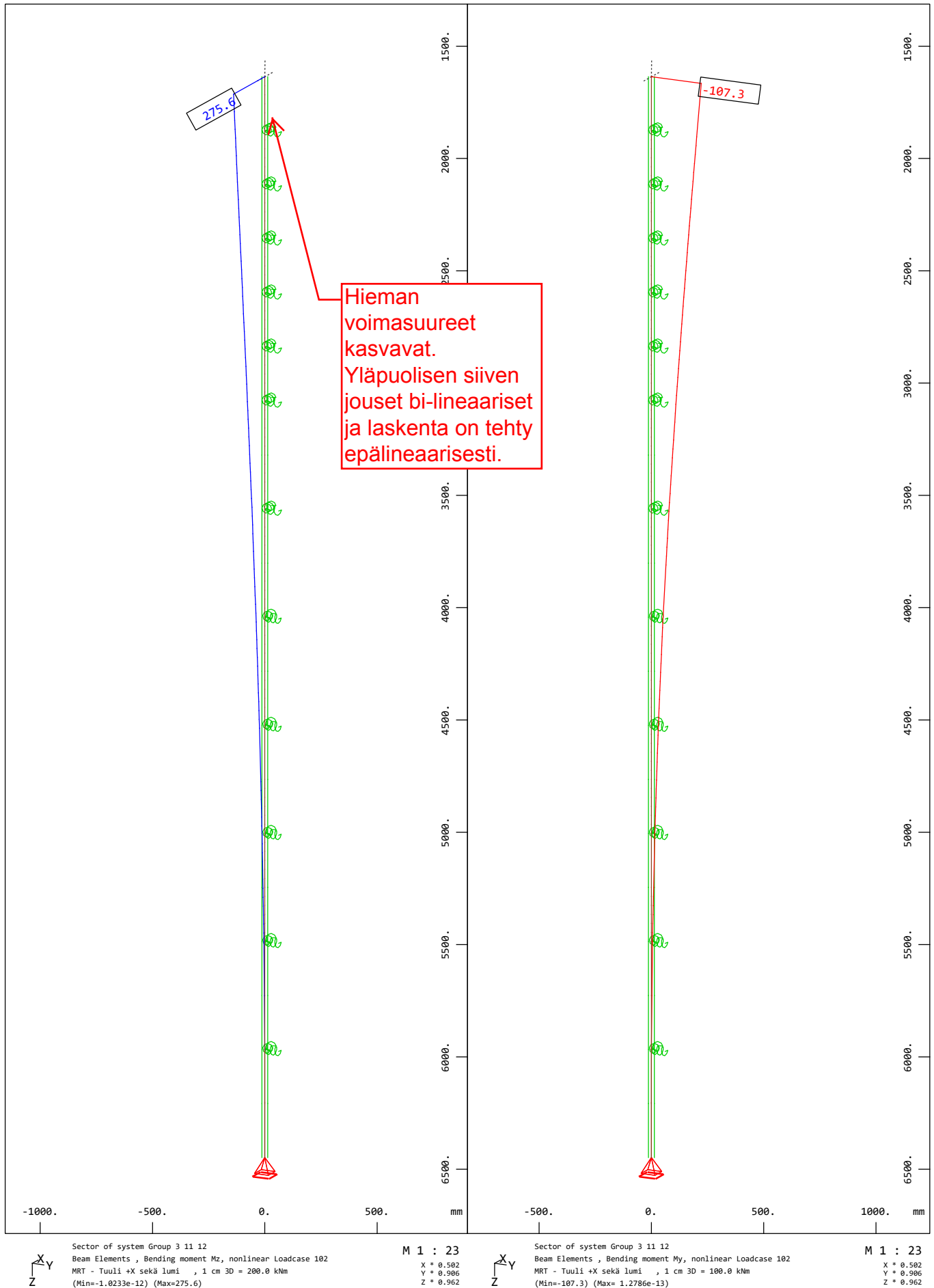


Portaali\_V01 MRT:n Määräävä yhdistelmä (poikittainen tuuli + lumi) - Lineaarinen laskenta  
Paalu



Portaali\_V01  
 Paalu

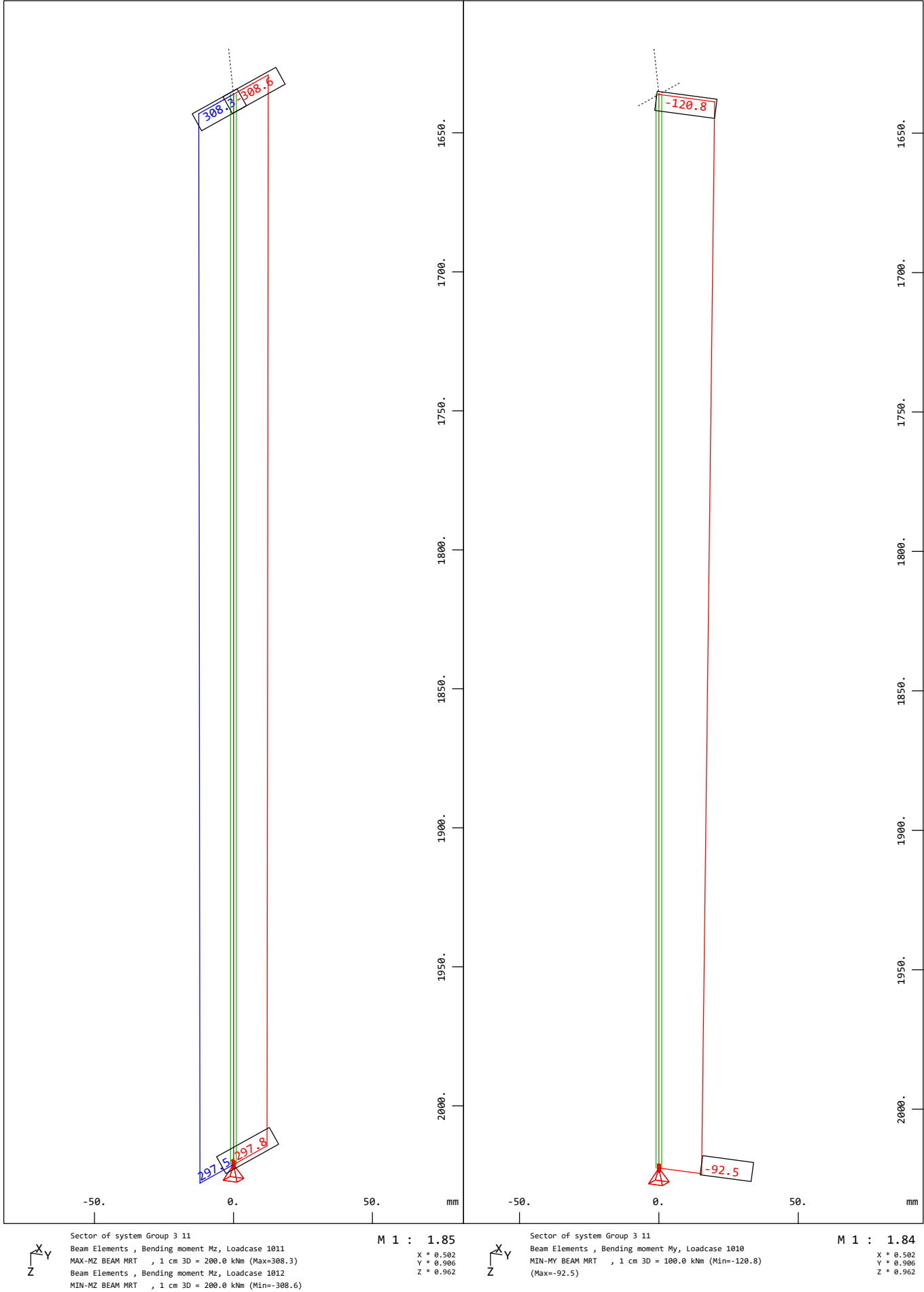
MRT:n Määrävä yhdistelmä (poikittainen tuuli + lumi) - Epälineaarinen laskenta





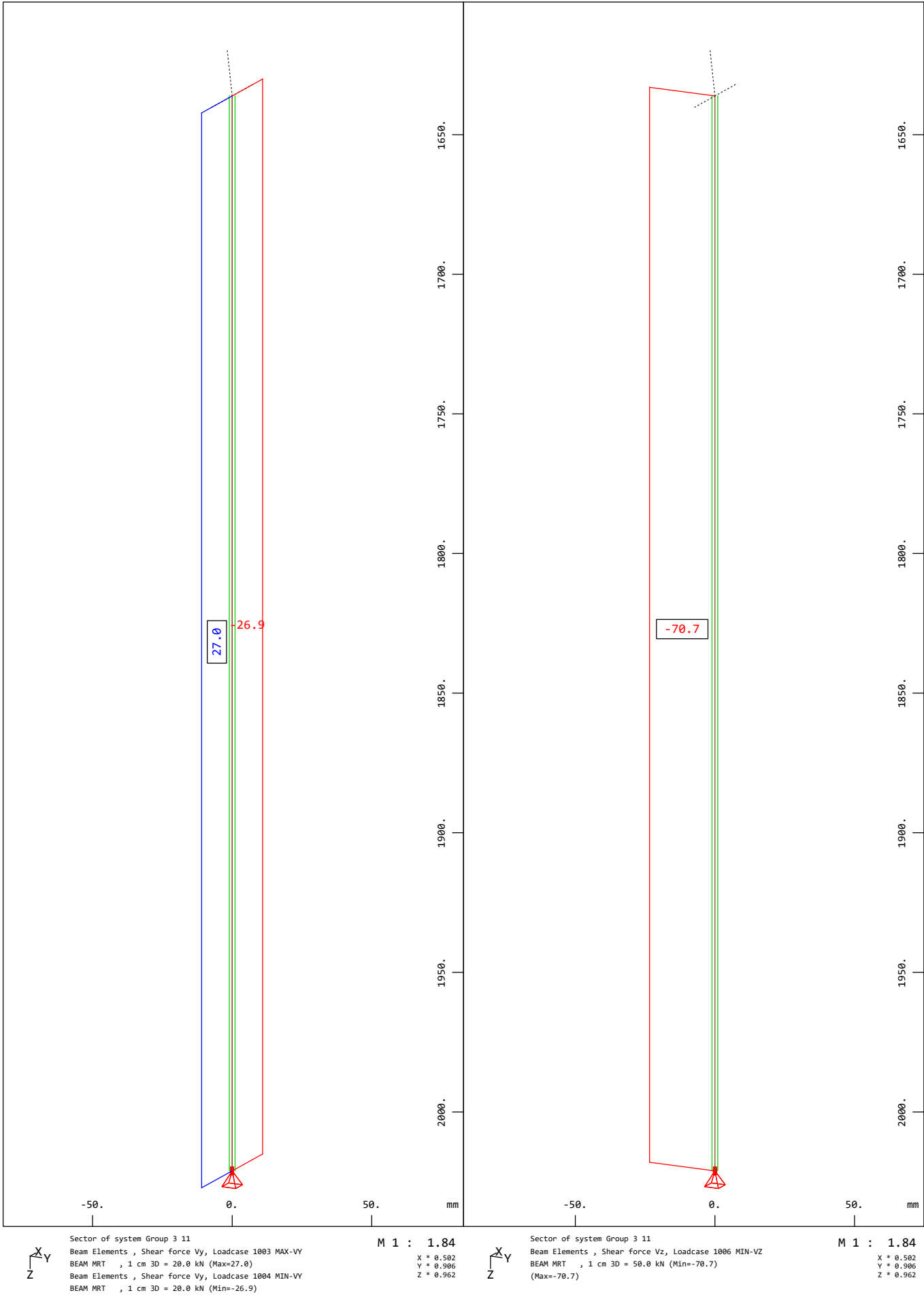
Portaali\_V01  
Paalu

Kallion pinta lähellä (heti paalun ja siipirakenteen liitoksesta)



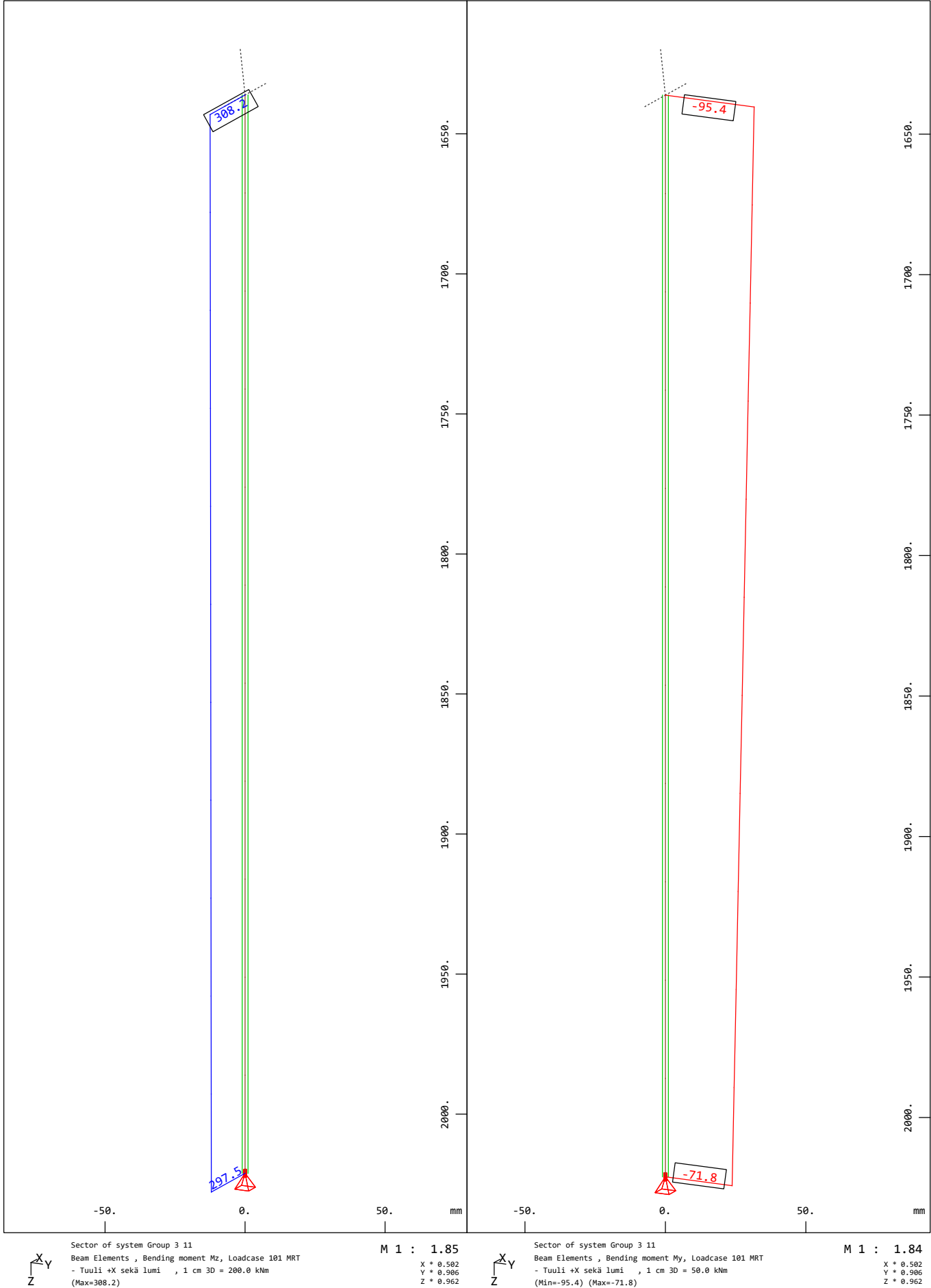
Portaali\_V01  
Paalu

SOFISTIK AG - www.sofistik.de



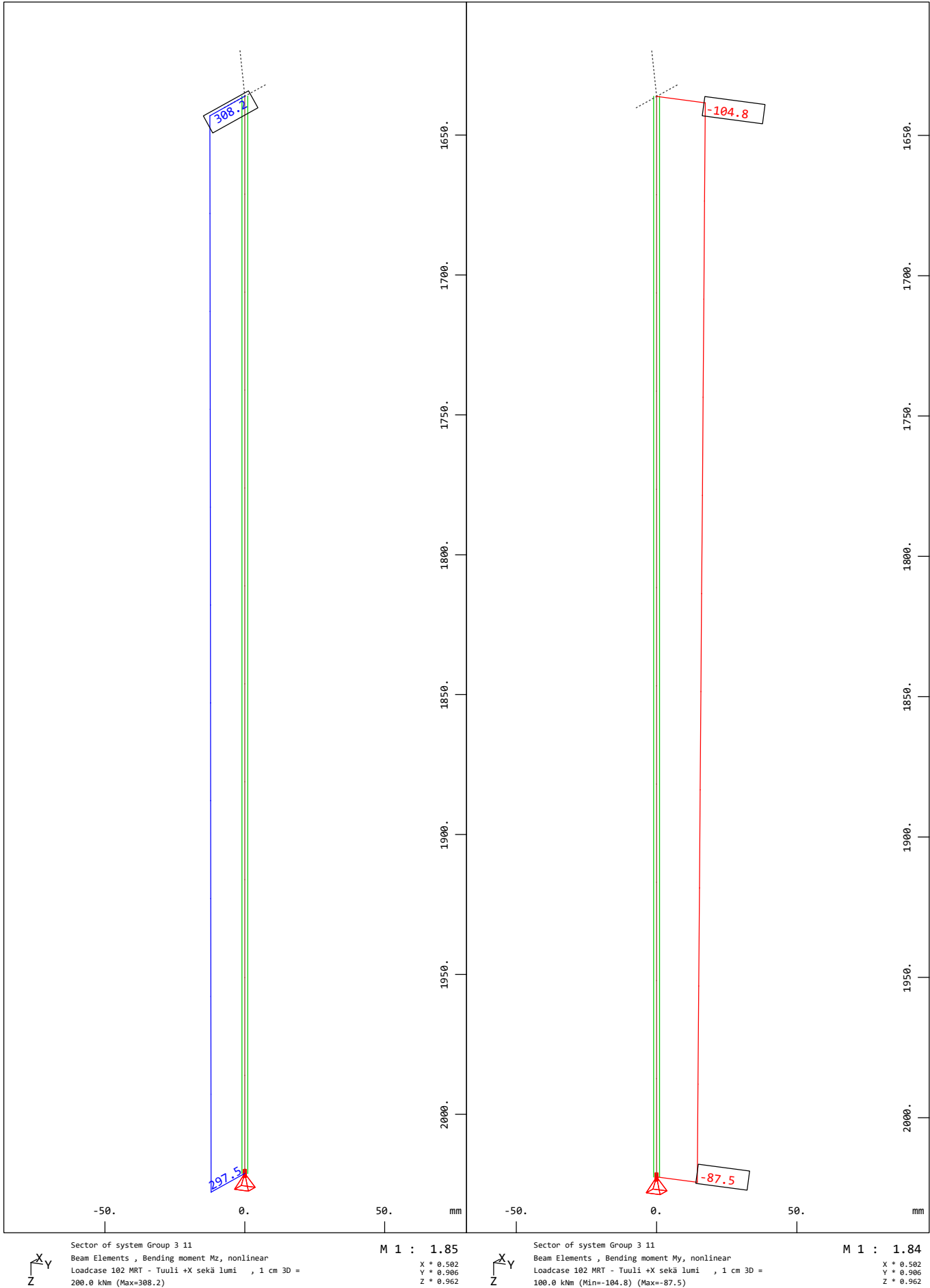
Portaali\_V01  
Paalu

MRT:n Määrävä yhdistelmä (poikittainen tuuli + lumi) - Lineaarinen laskenta



Portaali\_V01  
Paalu

MRT:n Määrävä yhdistelmä (poikittainen tuuli + lumi) - Lineaarinen laskenta



## POIKKILEIKKAUS

Paalun pituus

$$L := 6\text{m}$$

Teräspaalu

Korroosio ylimeritoitus

$$D := 406.4\text{mm}$$

$$t_0 := 12.5\text{mm}$$

$$t_{\text{kor.}} := 3.25\text{mm}$$

Käyttöikä 50 vuotta. Tiivistämättömät,  
aggressiiviset täytöt  
RIL 254-1-2016 taulkko 4.21

$$t := t_0 - t_{\text{kor.}} = 9.3\text{mm}$$

$$D_a := D - 2 \cdot t_{\text{kor.}} = 399.9\text{mm}$$

$$D_c := D - 2 \cdot t_0 = 381.4\text{mm}$$

Tarkastetaan pitääkö paikallisia lommahduksia ottaa huomioon

(kohta 6.7.1.(9))

$$\text{Putken\_paikalliset\_lommahdukset} := \begin{cases} \text{"Ei tarvitse tarkastella"} & \text{if } \frac{D}{t} \leq 90 \cdot \epsilon_a \\ \text{"On tarkasteltava"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Putken\_paikalliset\_lommahdukset = "Ei tarvitse tarkastella"

## Raudoitus

Betonipeitteen nimellisarvo

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

Haat:

$$\phi_{\text{haka}} := 1\text{mm}$$

Leikkausraudoituksen poikkipinta-ala

$$A_{\text{sv}} := 2 \cdot A_{\phi} \frac{\phi_{\text{haka}}}{\text{mm}}$$

$$A_{\text{sv}} = 2 \cdot \text{mm}^2$$

Nousu

$$s := 250\text{mm}$$

Leikkausraudoituksen  
ja pituusakselin  
välinen kulma

$$\alpha := 90\text{deg}$$

Perusraudoitus:

$$n_1 := 0$$

$$\phi_1 := 1\text{mm}$$

$$n_2 := 0$$

$$\phi_2 := 1\text{mm}$$

Raudoitusta tarvitaan vain paalun  
yläosassa

$$A_s := n_1 \cdot A_{\phi} \frac{\phi_1}{\text{mm}} + n_2 \cdot A_{\phi} \frac{\phi_2}{\text{mm}} = 0 \cdot \text{mm}^2$$

$$\phi_{\text{eq}} := \frac{n_1 \cdot (\phi_1)^2 + n_2 \cdot (\phi_2)^2}{n_1 \cdot \phi_1 + n_2 \cdot \phi_2} = 0.0\text{mm}$$

$$c_{\text{true}} := c_{\text{nom}} + \phi_{\text{haka}} = 41\text{mm}$$

Raudoituksen  
sisäinen  
maksimi  
momenttivarsi

$$D_s := D_c - 2 \left( c_{\text{true}} + \frac{1.1 \phi_{\text{eq}}}{2} \right) = 299\text{mm}$$

Terästen keskiöväli

$$r_s := \frac{D_s}{2} = 150\text{mm}$$

$$a_s := \frac{\pi \cdot D_s}{n_1 + n_2} = \text{mm}$$

Raudoitteen ja betonipeitteen ehto (RIL 254-1-2011 (4.65))

$$\text{RjaBP\_ehto} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } D_c - D_s \geq \max\left(60\text{mm}, \frac{D_c}{4}\right) \\ \text{"Ehto ei täyty"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

RjaBP\_ehto = "Ehto ei täyty"

Ei ongelma

## POIKKILEIKKAUSARVOT JA KRIITTINEN NURJAHDUSKUORMA

HUOM. Poiketen eurokoodista SFS-EN 1994-1-1 käytetään betoniteräkselle tunnusta  $f_y$  ja rakenneteräkselle  $f_a$ .

### Teräsputki

$$A_a := \frac{\pi}{4} \cdot (D_a^2 - D_c^2) = 11352 \cdot \text{mm}^2 \quad I_a := \frac{\pi}{64} \cdot (D_a^4 - D_c^4) = 21667 \cdot \text{cm}^4 \quad W_a := \frac{2I_a}{D_a} = 1084 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{pl.a} := \frac{1}{6} \cdot (D_a^3 - D_c^3) = 1412 \cdot \text{cm}^3 \quad M_{pl.a.Rd} := W_{pl.a} \cdot f_{ad} = 501 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Asennuksen aikana

koko poikkileikkaus käytössä:

$$A_{a.as} := \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_c^2) = 15468 \cdot \text{mm}^2$$

### Betoniteräs

Ekvivalentin putken halkasija (sama poikkileikkausala), joka sijoitetaan raudoituksen keskiölinjalle

Paksuus  $t_s := \frac{A_s}{2 \cdot \pi \cdot r_s} = 0.00 \cdot \text{mm}$

$$I_s := \frac{\pi}{4} \cdot \left[ \left( r_s + \frac{t_s}{2} \right)^4 - \left( r_s - \frac{t_s}{2} \right)^4 \right] = 0 \cdot \text{cm}^4$$

$$W_s := \frac{I_s}{\left( r_s + \frac{t_s}{2} \right)} = 0 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{pl.s} := \frac{4}{3} \cdot \left[ \left( r_s + \frac{t_s}{2} \right)^3 - \left( r_s - \frac{t_s}{2} \right)^3 \right] = 0 \cdot \text{cm}^3$$

### Betoni

$$A_c := \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 = 114249 \cdot \text{mm}^2$$

$$I_c := \frac{\pi}{64} \cdot D_c^4 = 103871 \cdot \text{cm}^4$$

Betonin raudoitussuhde:

$$\omega := \frac{A_s}{A_c} = 0.00 \cdot \% \quad < \quad 6\%$$

Raudoitussuhde := "OK" if  $\omega \leq 6\%$

"Liian paljon betoniterästä" otherwise

Raudoitussuhde = "OK"

## Teholliset jäykkyydet

Pitkäaikaisvaikutusten huomioon ottaminen

$$E_{c,eff} := E_{cm} \cdot \frac{1}{1 + \frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \phi_{\infty}} \quad E_{c,eff} = 18917 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (6.41)$$

Käytetään, kun lasketaan paalun nurjahdusta ja toisen kertaluvun vaikutukset on otettava huomioon (ks.  $\alpha_{cr}$ ).

$$EI_{eff} := E_a \cdot I_a + E_s \cdot I_s + 0.6 \cdot E_{c,eff} \cdot I_c = 57.29 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}^2 \quad (6.40)$$

Laskettaessa paalun voimasuureita ja nurjahdusta (ks.  $\alpha_{cr}$ ).

$$EI_{eff,II} := 0.9 \cdot (E_a \cdot I_a + E_s \cdot I_s + 0.5 \cdot E_{c,eff} \cdot I_c) = 49.79 \cdot \text{MN} \cdot \text{m}^2 \quad (6.42)$$

Käytetään aksiaalijäykkyytenä paaluille FEM-mallissa

$$EA_{eff} := E_a \cdot A_a + E_s \cdot A_s + E_{c,eff} \cdot A_c = 4545 \cdot \text{MN}$$

## Ekvivalentti teräspankki FEM-malliin

Käytetään tätä samaa myös nurjahduskuormien laskennassa.

Poikkileikkausala

$$A_{a,ekv} := \frac{EA_{eff}}{E_a} = 21644 \cdot \text{mm}^2$$

Ulkosäde ja -halkaisija

$$R_{ekv} := \sqrt{\left[ \frac{4EI_{eff,II}}{E_a \cdot \pi} + \left( \frac{A_{a,ekv}}{\pi} \right)^2 \right] \cdot \frac{\pi}{2 \cdot A_{a,ekv}}} = 159.2 \cdot \text{mm}$$

$$D_{ekv} := 2 \cdot R_{ekv} = 318 \cdot \text{mm}$$

Sisäsäde ja -halkaisija

$$r_{ekv} := \sqrt{R_{ekv}^2 - \frac{A_{a,ekv}}{\pi}} = 135.9 \cdot \text{mm}$$

$$d_{ekv} := 2 \cdot r_{ekv} = 272 \cdot \text{mm}$$

Eksvivalentin teräsputken tarkastus

$$EA_{a.ekv} := E_a \cdot \pi \cdot (R_{ekv}^2 - r_{ekv}^2) = 4545 \cdot MN \quad = \quad EA_{eff} = 4545 \cdot MN$$

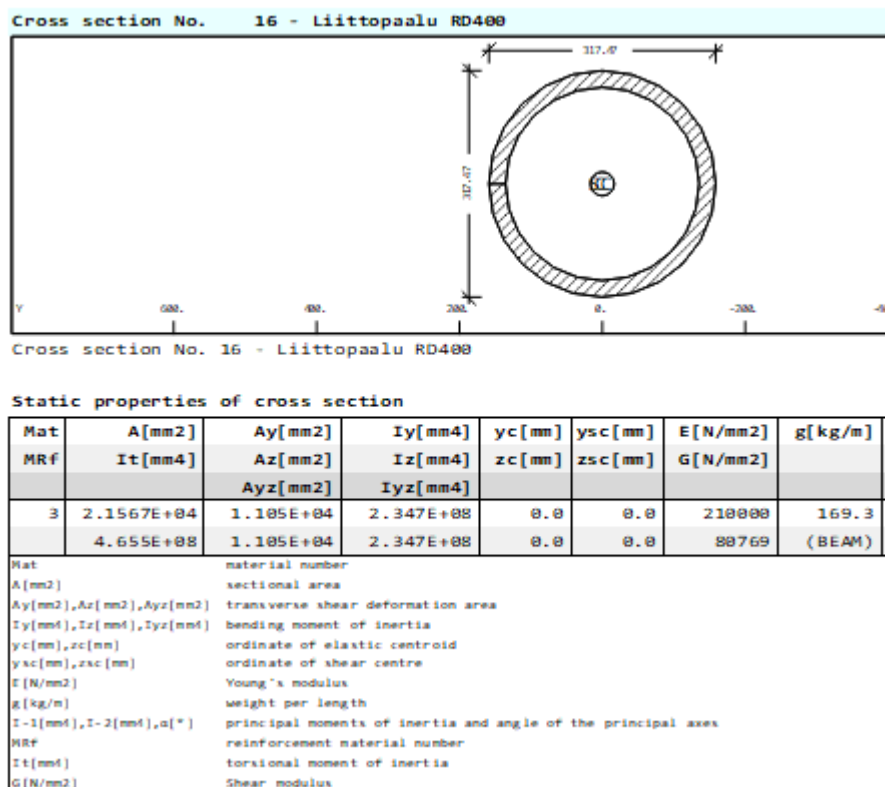
$$EI_{a.ekv} := E_a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (R_{ekv}^4 - r_{ekv}^4) = 50 \cdot MN \cdot m^2 \quad = \quad EI_{eff.II} = 50 \cdot MN \cdot m^2$$

OK

Ei kuitenkaan käytetä näitä poikkileikkausarvoja FEM-mallissa, vaan käytetään FEM

**Tarkastetaan poikkileikkausarvot FEM-mallista**

Paalun poikkileikkaus FEM-mallissa



Tarkastus Sofin kanssa

Perusraudoituksella

$$A_{a.ekv} = 2.164 \cdot mm^2 \cdot 10^4 \quad \text{Sofistikista} \quad 2.1567 \cdot mm^2 \cdot 10^4$$

$$\frac{EI_{eff.II}}{E_a} = 2.371 \cdot mm^4 \cdot 10^8 \quad 2.347 \cdot mm^4 \cdot 10^8$$

OK



### Poikkileikkausken normaaliveimakestävyyden ja teräsosakerroin

Plastinen puristuskestävyys:

Ominaisarvo  $N_{pl.Rk} := A_a \cdot f_{ak} + A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot f_{sk}$   $N_{pl.Rk} = 7457 \cdot \text{kN}$  (6.30 ja 6.39)

Suunnitteluarvo  $N_{pl.Rd} := A_a \cdot f_{ad} + A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd}$   $N_{pl.Rd} = 6188 \cdot \text{kN}$  (6.30)

Teräsosakerroin:

$$\delta := \frac{A_a \cdot f_{ad}}{N_{pl.Rd}} = 0.65$$

Teräsosakerroin :=  $\begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } 0.2 \leq \delta \leq 0.9 \\ \text{"EI TÄYTÄ VAATIMUKSIA"} & \text{otherwise} \end{cases}$   $\text{Teräsosakerroin} = \text{"OK"}$  (6.27)

### Toisen kertaluvun vaikutusten huomioon ottaminen

Toisen kertaluvun vaikutuksilla ei ole merkitystä. Pystykuormat paalulle ovat pieniä

$$L_0 := L = 6.00 \text{ m}$$

Momentin suurennuskertoimen toisen kertaluvun vaikutusten huomioon ottamiseksi:

$$k_m := 1$$

## Teräksen valmistuksesta johtuvien jännösjännityksien ja alkutaipuman huomioon ottaminen

Lasketaan yksinkertaisesti varman päälle menettelyllä, jossa kerrotaan epäkeskisyydellä suoraan mitoitusnormaalivoimaa. Ei ole tässä tapauksessa merkitystä, koska pystykuorma on olematon.

$$\delta_g := \begin{cases} \frac{L_0}{300} & \text{if } 0 \leq \omega \leq 3\% \\ \frac{L_0}{200} & \text{if } 3\% < \omega \leq 6\% \\ \text{"Raudoitussuhde on liian suuri"} & \text{otherwise} \end{cases} = 20 \cdot \text{mm} \quad (\text{taulukko 6.5})$$

Kierresaumattu teräsputki  $\delta_f := 0.0013 \cdot L_0 = 7.8 \cdot \text{mm}$  (RIL 254, taulukko 4.22)  
 -> ryhmä b

$$\delta_0 := \delta_g + \delta_f \quad \delta_0 = 28 \cdot \text{mm} \quad (\text{RIL 254, kaava (4.54)})$$

Otetaan huomioon määräävämmässä suunnassa:

Tuen nurjahduksen suunta on määräävämpi suunta

$$M_{y,\delta} := \delta_0 \cdot N_{Ed} = 1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Poikkileikkauksen taivutusmomenttikestävyys

Yksinkertaistettu menetelmä (BY58 s.200 tai RIL 254-1-2011 s.112)

Lujuussuhde: Apukertoimet  $k_1$  ja  $k_2$ :

$$p := 0.8 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{ad}} = 0.043 \quad k_1 := \frac{\pi \cdot \left( A_a + A_s \cdot \frac{f_{sd}}{f_{ad}} \right)}{A_a + \frac{D_s}{D_a} \cdot \frac{f_{sd}}{f_{ad}} \cdot A_s + \pi \cdot p \cdot \frac{D_c^2}{4}} = 2.199$$

$$\text{Puristuskartion} \quad k_2 := \frac{p \cdot D_c^2}{4 \cdot \left( A_a + A_s \cdot \frac{f_{sd}}{f_{ad}} \right)} = 0.136$$

$$\theta := k_1 \cdot k_2 \cdot \sin(k_1) + \frac{k_1}{2} = 1.342 \quad 2\theta = 2.685$$

Poikkileikkauksen sisäiset momenttivart:

$$e_a := \frac{\sin(\theta)}{3 \cdot \theta} \cdot \frac{D_a^3 - D_c^3}{D_a^2 - D_c^2} = 0.142 \text{ m} \quad e_c := \frac{2 \cdot D_c \cdot \sin(\theta)^3}{3 \cdot (2 \cdot \theta - \sin(2 \cdot \theta))} = 0.105 \text{ m}$$

Näennäinen momenttivarsi teräsojan plastiselle voimalle:

$$e_n := e_c + \frac{2 \cdot \theta}{\pi} \cdot (e_a - e_c) + \frac{0.85 \cdot \theta}{\pi} \cdot \frac{A_s}{A_a} \cdot \frac{f_{sd}}{f_{ad}} \cdot D_s = 0.136 \text{ m}$$

## MITOITUSMOMENTIT JA RAKENTEEEN KESTÄVYYS NORMAALIVOIMALLE JA MOMENTILLE

Mitoittavat momentit

$$M_{yEd} := k_m \cdot M_{yEd.1} + M_{y,\delta} = 310 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{zEd} := M_{zEd.1} = 104 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Lopullinen mitoittava momentti

$$M_{Ed} := \sqrt{M_{yEd}^2 + M_{zEd}^2} = 327 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Teräspuikkeen puristuskestävyys:

Puhdas taivutuskestävyys:

Betonin puristuskestävyys:

$$N_{a,Rd} := A_a \cdot f_{ad} = 4030 \cdot \text{kN}$$

$$M_{pl,Rd} := e_n \cdot N_{a,Rd} = 550 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

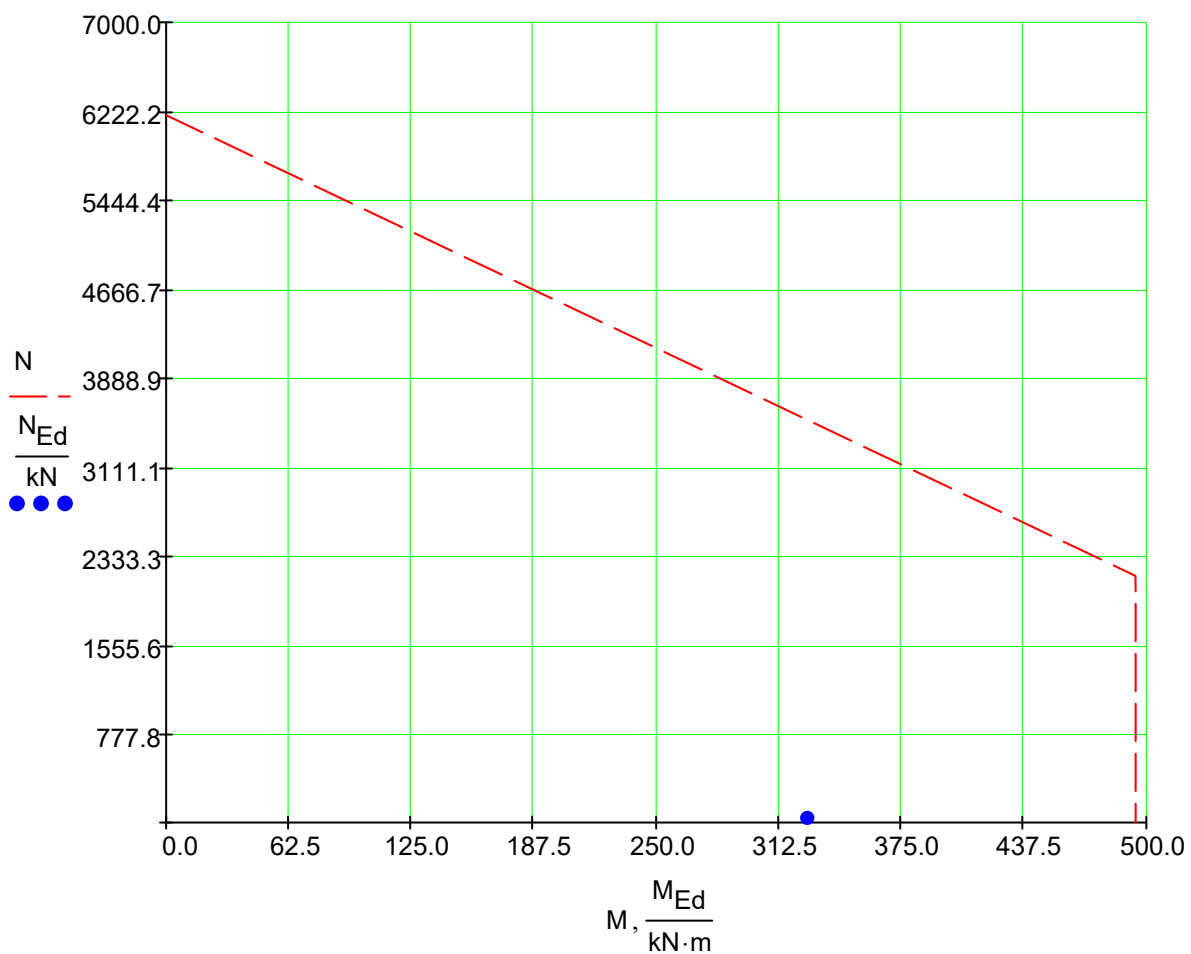
$$N_{pm,Rd} := f_{cd} \cdot A_c = 2158 \cdot \text{kN}$$

Teräslaji = "S235...S355"

→  $\alpha_M = 0.9$

Kapasiteetti ja rasitukset kuvaajana esitettynä

$$A_s \cdot f_{sd} = 0 \cdot \text{kN}$$



$$\chi_C := \frac{N_{pm.Rd}}{N_{pl.Rd}} = 0.349 \quad \chi_d := \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} = 0.007 \quad \mu_d := \min\left(\frac{\chi_d - 1}{\chi_C - 1}, 1\right) \quad \mu_d = 1.00$$

Nimellinen normaalivoimakkestävyys:

Nimellinen taivutuskestävyys:

$$M_{pl.N.Rd} := \mu_d \cdot M_{pl.Rd} = 550 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{Rd} := \left[ 1 + \frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} \cdot (\chi_C - 1) \right] \cdot N_{pl.Rd} = 3789 \cdot \text{kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl.N.Rd}} = 0.60$$

≤

$$\alpha_M = 0.90$$

Käyttöasteet

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl.N.Rd} \cdot \alpha_M} = 66. \%$$

**OK!**

$$M_{Ed} = 327 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = 1. \%$$

**OK!**

$$(\alpha_M) \cdot \mu_d \cdot M_{pl.Rd} = 495 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Paalu 323,9 olisi riittävä (>S420), mutta käyttöaste olisi yli 90 %. Valittu käytettäväksi yhtä kokoa isompi paalu, koska on haluttu ylimääräistä varmuutta maaparametreihin ja korroosiovaraan. Valittu paalu kestää todellisuudessa vielä 6 mm korroosion.

## KESTÄVYYS LEIKKAUKSELLE

Jaetaan leikkausvoima teräsprofiilin ja raudoitetun betonin osuuksiin. Yksinkertaisesti voidaan katsoa kestävyys myös pelkän teräsprofiilin kestävytenä.

Teräsprofiilin osuus  $V_{a.Ed} := V_{Ed} \cdot \frac{M_{pl.a.Rd}}{M_{pl.Rd}} = 94 \cdot \text{kN}$

Raudoitetun betonin osuus  $V_{c.Ed} := V_{Ed} - V_{a.Ed} = 9 \cdot \text{kN}$

### Teräsprofiilin leikkauskestävyys

Leikkauspinta-ala  $A_v := \frac{2 \cdot A_a}{\pi} = 7227 \cdot \text{mm}^2$  (SFS-EN 1993-1-1, kohta 6.2.6)

$$V_{pl.a.Rd} := \frac{A_v \cdot f_{ak}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 1481 \cdot \text{kN}$$

Tarvitseeko teräksen lujuutta pienentää leikkausvoiman johdosta taivutus / puristusmitoituksessa?

$$\text{Teräksen\_lujuuden\_pienennys} := \begin{cases} \text{"On tarpeen"} & \text{if } V_{a.Ed} > 0.5 \cdot V_{pl.a.Rd} \\ \text{"Ei ole tarpeen"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Teräksen\_lujuuden\_pienennys = "Ei ole tarpeen" (kohta 6.7.2)

## PAALUN JÄYKKÄ LIITOS SIIPIPALKKIIN

Mitoitetaan liitos betoniseen siipeen oletuksella, että siipi rakennetaan normaalista poikkeavasti poikittain tien suuntaan nähden. Näin paalun liitoskohtaan syntyy suurimmat voimasuureet siiven kapeammassa suunnassa.

Liitoskohdassa vaikuttava leikkausvoima

$$H_d := V_{Ed,z} = 90 \cdot \text{kN}$$

Liitoskohdassa vaikuttava momentti

$$M_{Ed} := My_{Ed} = 310 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Upotussyvyyden minimiarvo

$$t_{\min} := \begin{cases} 1.2 \cdot D & \text{if } \frac{M_{Ed}}{N_{Ed} \cdot m} \leq 0.15 \\ \left[ 1.2 \cdot D + 0.8 \cdot D \cdot \left( \frac{\frac{M_{Ed}}{N_{Ed} \cdot m} - 0.15}{2 - 0.15} \right) \right] & \text{if } 0.15 \leq \frac{M_{Ed}}{N_{Ed} \cdot m} \leq 2 \\ 2 \cdot D & \text{otherwise} \end{cases} = 813 \cdot \text{mm}$$

Valittu upotussyvyys

$$t_d := 700 \text{ mm}$$

*Käytetään hieman vähemmän*

Puristuspinnan korkeus

$$x_{\text{pur}} := 0.8 \cdot (0.5 \cdot t_d) = 280 \cdot \text{mm}$$

Sisäinen momenttivarsi

$$z_d := t_d - 2 \cdot (0.5 \cdot x_{\text{pur}}) = 420 \cdot \text{mm}$$

### Paalun yläosan raudoistus

Paalun yläosaan vaikuttava voima

$$H_u := \frac{M_{Ed}}{z_d} + \frac{1}{4} \cdot H_d = 761 \cdot \text{kN}$$

Paalun ympärille vaadittava teräsmäärä

$$A_{\text{us.min}} := \frac{H_u}{f_{sd}} = 1674 \cdot \text{mm}^2$$

Valittu teräsmäärä

$$A_{\text{us}} := 2 \cdot 5 \cdot (0.5 \cdot 16 \text{ mm})^2 \cdot \pi = 2011 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{OK}$$

Tarkistetaan betonin puristusjännitys paalun pintaa vasten

$$\sigma_{\text{cd.u}} := \frac{H_u}{x_{\text{pur}} \cdot D}$$

$$\sigma_{\text{cd.u}} = 6.69 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

<

$$f_{\text{cd}} = 18.9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

OK

### Paalun alaosan raudoistus

Paalun alaosaan vaikuttava voima

$$H_o := \frac{M_{Ed}}{z_d} + \frac{5}{4} \cdot H_d = 851 \cdot \text{kN}$$

Paalun ympärille vaadittava  
teräsmäärä

$$A_{os.min} := \frac{H_o}{f_{sd}} = 1872 \cdot \text{mm}^2$$

Valittu teräsmäärä

$$A_{os} := 2 \cdot 5 \cdot (0.5 \cdot 16 \text{mm})^2 \cdot \pi = 2011 \cdot \text{mm}^2$$

Tarkistetaan betonin puristusjännitys paalun pintaa vasten

$$\sigma_{cd.o} := \frac{H_o}{x_{pur} \cdot D}$$

$$\sigma_{cd.o} = 7.48 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

<

$$f_{cd} = 18.9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

OK

### Liitoksen raudoitus

Käytetään paalun kohdalla puskupalkissa T16 hakoja.

Paalun ala- ja yläosaan laitetaan molempiin 5T16 tankoa paalun molemmin puolin.

## 8.2 Siiven mitoitus

Mitoitetaan betonisiipirakenne täydelle maan passiivipaineelle MRT:ssa. Käyttörajalamitoitukset tehdään pylväässä vaikuttavan väännön kautta.

Maan murtokestävyydellä  
(tasainen maanpaineen jakautuminen eli maa murtuu koko siiven matkalta)

$$M_{y.Ed} := \frac{p_u \cdot L_s^2}{2} \quad M_{y.Ed} = 254 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Tarkistetaan todellisella mitoitusväännöllä siiven momentti

$$M_{y.Ed.t} := \frac{|1.5 \cdot M_{z.w.1}|}{2} = 144 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

OK

KRTa

$$M_{y.KRTa} := \frac{|1.0 \cdot M_{z.w.1}|}{2} = 96 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

KRTb

$$M_{y.KRTb} := \frac{|0.6 \cdot M_{z.w.1}|}{2} = 58 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

KRTc

$$M_{y.KRTc} := \frac{|0.2 \cdot M_{z.w.1}|}{2} = 19 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Jätetään tarkoituksellisesti varmuutta muillekin kuin väännön aiheuttamille rasituksille, joskin nämä ovat selvästi pienempiä verrattuna vääntöön.



## Seinän poikkittaiset teräkset

Betonin ominaislujuus

$$f_{ck} = 35.00 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_c = 1.35$$

Teräksen lujuus

$$f_{yk} = 500.00 \cdot \text{MPa}$$

$$\gamma_s = 1.10$$

Virumaluku

$$\phi_{oo} = 1.35$$

## Poikkileikkausarvot ja rauditus

Siiven paksuus

$$h := 900 \text{ mm}$$

Siiven korkeus

$$L := 1500 \text{ mm}$$

Työterästen koko

$$\phi_{tt} := 12 \text{ mm}$$

Poikkittaisen teräksen koko

$$\phi_p := 12 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 1  
koko ja määrä

$$\phi_{1.x} := 16 \text{ mm}$$

Toimivan teräksen 2  
koko ja määrä

$$\phi_{2.x} := 0 \text{ mm}$$

$$n_{1.x} := 10$$

$$n_{2.x} := 0$$

$$\phi_{eq} := \begin{cases} \frac{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x}^2 + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}^2}{n_{1.x} \cdot \phi_{1.x} + n_{2.x} \cdot \phi_{2.x}} & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ \phi_{1.x} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_{eq} = 16.00 \cdot \text{mm}$$

$$A_{s.x} := \begin{cases} n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 + n_{2.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{2.x})^2 & \text{if } \phi_{2.x} > 0 \wedge n_{2.x} > 0 \\ n_{1.x} \cdot \pi \cdot (0.5 \cdot \phi_{1.x})^2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_{s.x} = 2011 \cdot \text{mm}^2$$

## Betonipeitteet ja halkeamaleveysvaatimukset (Ro07, R2)

Nimellisarvo

$$c_{nom} := 45 \text{ mm}$$

Minimiarvo

$$c_{min.dur} := 40 \text{ mm}$$

$$c_{min.dur} = 40.00 \cdot \text{mm}$$

Todellinen betonipeite (lähinnä betonipintaa olevan halkelua rajoittavan raudituksen betonipeite)

$$c_{true} := c_{nom} + \phi_{tt} + \phi_p$$

$$c_{true} = 69.00 \cdot \text{mm}$$

Halkeamaleveyslaskennassa käytettävä betonipeite

$$c := \min(c_{true}, 1.4 \cdot c_{min.dur}, 50 \text{ mm})$$

$$c = 50.00 \cdot \text{mm}$$

Korotuskerroin halkeamaleveydelle

$$k_{wk} := \min(c_{min.dur}^{-1} \cdot c, 1.4)$$

$$k_{wk} = 1.25$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan tavallisella yhdistelmällä

$$w_{k.sall.KRTb} := k_{wk} \cdot 0.20 \text{ mm}$$

$$w_{k.sall.KRTb} = 0.250 \cdot \text{mm}$$

Sallittu halkeamaleveys käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmällä

$$w_{k.sall.KRTc} := k_{wk} \cdot 0.15 \text{ mm}$$

$$w_{k.sall.KRTc} = 0.188 \cdot \text{mm}$$

## Vetorausdoitus

Tehokkaan raudituksen sijainti vedetystä reunasta

$$d_s := c_{true} + \frac{\phi_{eq}}{2}$$

$$d_s = 77.00 \cdot \text{mm}$$

Tehollinen korkeus

$$d := h - d_s \quad d = 823 \cdot \text{mm}$$

## Yhteenveto rasituksista ja kapasiteeteista



### MRT

$$M_{y.Rd} := \min(M_{y.Rd.0}, M_{y.pl.Rd}) \quad M_{y.Rd} = 740 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.Ed} = 254 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.MRT}} := \frac{M_{y.Ed}}{M_{y.Rd}} = 34.4 \cdot \%$$



### Ad

$$M_{y.Rd.Ad} := (d - 0.5 \cdot y_{Ad}) \cdot A_{s.x} \cdot f_{yd.a} \quad M_{y.Rd.Ad} = 816 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.Ad} = 0.00 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.Ad}} := \frac{M_{y.Ad}}{M_{y.Rd.Ad}} = 0.0 \cdot \%$$



### KRTa

$$M_{y.KRTa.sall} := \min(M_{y.KRTa.s}, M_{y.KRTa.c}) \quad M_{y.KRTa.sall} = 633 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.KRTa} = 96 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTa}} := \frac{M_{y.KRTa}}{M_{y.KRTa.sall}} = 15.2 \cdot \%$$



### KRTb

$$M_{y.KRTb.sall} := \text{Find}(M_{y.KRTb}) \quad M_{y.KRTb.sall} = 235 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.KRTb} = 58 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Halkeamaleveys

$$w_{k.sall.KRTb} = 0.250 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTb} = 0.061 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTb}} := \frac{M_{y.KRTb}}{M_{y.KRTb.sall}} = 24.5 \cdot \%$$



### KRTc

$$M_{y.KRTc.sall} := \text{Find}(M_{y.KRTc}) \quad M_{y.KRTc.sall} = 173 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{y.KRTc} = 19 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$w_{k.sall.KRTc} = 0.188 \cdot \text{mm} \quad w_{k.KRTc} = 0.021 \cdot \text{mm}$$

Käyttöaste

$$k_{a_{my.KRTc}} := \frac{M_{y.KRTc}}{M_{y.KRTc.sall}} = 11.1 \cdot \%$$

### Vähimmäisraudoitusmäärä

$$A_{s.min} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d, 0.0013 \cdot d\right) \cdot L$$

$$A_{s.min} = 2061 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{s.x} = 2011 \cdot \text{mm}^2$$

vähimmäisraudoitus = "Ei täyty"

Todellisuudessa täyttyy, kun otetaan ylä- tai alapinnasa edes pieni osa mukaan. Lisäksi Kapasiteetti on yli 4x tod.rasitukseen nähden.

Terästen jako noin

$$k k_y = 150 \cdot \text{mm}$$

Käytetään raudoitusta T16k150 siiven pitkien sivujen suunnassa. Käytetään jakoraidoituksena T12k200

## 9 Pylvään mitoitus

Ulokeportaalin pylväs mitoitetaan puristettuna ja taivutettuna rakenteena, johon vaikuttaa vääntö. Tarkastellaan rasitetuimman kohdan eli pylvään alaosan kestävyyttä.

Viittaukset eurokoodiin SFS-EN 1993-1-1, ellei muuta ole mainittu.

### **SAUVAN KESTÄVYYS TAIVUTUKSELLE, LEIKKAUKSELLE, VÄÄNNÖLLE JA PURISTUKSELLE**

## 9.1 Poikkileikkaus- ja materiaalitiedot

profiili := profiili<sub>p</sub> = "kylmä\_putki"

Kylmämuokattu putkiprofiili tai  
Kuumamuokattu putkiprofiili

### Poikkileikkausarvot

$$d_p = 406.4 \cdot \text{mm}$$

$$t_p = 12.5 \cdot \text{mm}$$

$$L := H = 8200 \cdot \text{mm}$$

$$d_{p.0} := d_p - 2 \cdot t_p$$

$$d_{p.0} = 381 \cdot \text{mm}$$

$$A := \frac{\pi}{4} \cdot (d_p^2 - d_{p.0}^2)$$

$$A = 15468 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_v := A \cdot \frac{2}{\pi} = 9848 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{kohta 6.2.6 (g)}$$

$$A_v = 9848 \cdot \text{mm}^2$$

$$I := \frac{\pi}{64} \cdot (d_p^4 - d_{p.0}^4)$$

$$I = 30031 \cdot \text{cm}^4$$

$$W_{el} := \frac{2I}{d_p}$$

$$W_{el} = 1478 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{pl} := \frac{1}{6} \cdot (d_p^3 - d_{p.0}^3)$$

$$W_{pl} = 1940 \cdot \text{cm}^3$$

$$I_t := \frac{\pi}{32} \cdot (d_p^4 - d_{p.0}^4)$$

$$I_t = 60061 \cdot \text{cm}^4$$

$$W_t := \frac{2 \cdot I_t}{d_p}$$

$$W_t = 2956 \cdot \text{cm}^3$$

### Materiaaliominaisuudet

Osavarmuusluvut (kohta 6.1(1))

$$\gamma_{M0} := 1.0$$

$$\gamma_{M1} := 1.1$$

Teräsluokka S355:

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

$$E := 210000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}}$$

$$\nu := 0.3$$

$$\varepsilon = 0.81$$

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80769 \cdot \text{MPa}$$

Väsyminen

$$\gamma_{Ff} := 1.0$$

$$\gamma_{Mf} := 1.35$$

Yleinen varman kestämissen  
periaate ja suuret seuraamukset

## 9.2 Voimasuureet

Pylvään kannalta määräävin voimasuureyhdistelmä on tapaus, jossa tuuli tien suunnassa on määräävä muuttuva kuorma.

### MRT

Puristus

$$N_{Ed} := 1.25 \cdot N_{p.1} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot N_{s.1}$$

$$N_{Ed} = 38 \cdot \text{kN}$$

Taivutusmomentti tien suunnassa

$$M_{Ed.y} := 1.25 \cdot M_{y.p.1} + 1.5 \cdot M_{y.w.1}$$

$$M_{Ed.y} = 293 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusmomentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{Ed.x} := 1.25 \cdot M_{x.p.1} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.1}$$

$$M_{Ed.x} = -159 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\rightarrow M_{Ed} := \sqrt{M_{Ed.y}^2 + M_{Ed.x}^2}$$

$$M_{Ed} = 333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{Ed.z} := 1.5 M_{z.w.1}$$

$$M_{Ed.z} = -288 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Leikkausvoima tien suunnassa

$$V_{Ed.x} := 1.5 H_{x.w.1}$$

$$V_{Ed.x} = -30 \cdot \text{kN}$$

Leikkausvoima kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$V_{Ed.y} := 5 \text{ kN}$$

$$\rightarrow V_{Ed} := \sqrt{V_{Ed.x}^2 + V_{Ed.y}^2}$$

$$V_{Ed} = 31 \cdot \text{kN}$$

## Jännitykset

Normaalijännitys

$$\sigma_{x.Ed} := \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W_{el}} = 228 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{z.Ed} := 0$$

Leikkauksesta aiheutuva leikkausjännitys

$$\tau_{v.Ed} := \frac{V_{Ed}}{A_v} = 3 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys

$$\tau_{t.Ed} := \frac{|M_{Ed.z}|}{W_t} \quad \tau_{t.Ed} = 97 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{Ed} := \tau_{v.Ed} + \tau_{t.Ed} = 101 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_v := \sqrt{\sigma_{x.Ed}^2 + \sigma_{z.Ed}^2 - \sigma_{x.Ed} \cdot \sigma_{z.Ed} + 3 \cdot (\tau_{Ed})^2}$$

$$\sigma_v = 287 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

## Poikkileikkausluokka

SFS-EN 1993-1-1 luku 5.5

puristettu

$$\text{Class}_{\text{putki}} := \begin{cases} \text{"class1"} & \text{if } \frac{d_p}{t_p} \leq 50 \cdot \epsilon^2 \\ \text{"class2"} & \text{if } 50 \cdot \epsilon^2 < \frac{d_p}{t_p} \leq 70 \cdot \epsilon^2 \\ \text{"class3"} & \text{if } 70 \cdot \epsilon^2 < \frac{d_p}{t_p} \leq 90 \cdot \epsilon^2 \\ \text{"class4 Tämä laskentapohja ei toimi"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Class}_{\text{putki}} = \text{"class1"}$$

$$\text{Poikkileikkausluokka} := \begin{cases} \text{"class1"} & \text{if } \text{Class}_{\text{putki}} = \text{"class1"} \\ \text{"class2"} & \text{if } \text{Class}_{\text{putki}} = \text{"class2"} \\ \text{"class3"} & \text{if } \text{Class}_{\text{putki}} = \text{"class3"} \\ \text{"Tämä laskentapohja ei toimi"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Poikkileikkausluokka} = \text{"class1"}$$

### 9.3 Kapasiteetti

Poikkileikkauksen leikkauskestävyys (kohta 6.2.6)

Leikkauskestävyys ilman väännön vaikutusta

$$V_{pl.Rd} := A_v \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \quad V_{pl.Rd} = 2018 \cdot \text{kN}$$

Vääntökestävyys ilman leikkauksen vaikutusta

$$M_{z.pl.Rd} := \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \cdot W_t \quad M_{z.pl.Rd} = 606 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntömomentin pienentämä plastinen leikkauskestävyys

$$V_{pl.T.Rd} := \left[ 1 - \frac{\tau_{t.Ed}}{\left( \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right)} \right] \cdot V_{pl.Rd} \quad V_{pl.T.Rd} = 1059 \cdot \text{kN}$$

(kaava 6.28)

Poikkileikkaukseen vaikuttava leikkausvoima

$$V_{Ed} = 31 \cdot \text{kN}$$

Mitoitusehto leikkaukselle ja väännölle

$$\text{LEIKKAUS\_JA\_VÄÄNTÖ} := \begin{cases} \text{"KESTÄÄ"} & \text{if } V_{Ed} < V_{pl.T.Rd} \\ \text{"EI KESTÄ"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{LEIKKAUS\_JA\_VÄÄNTÖ} = \text{"KESTÄÄ"}$$

Leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen voidaan jättää huomiomatta, jos leikkausvoima on alle puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä. (kohta 6.2.8(2))

$$\text{VÄHENNYS} := \begin{cases} \text{"EI HUOMIOIDA"} & \text{if } V_{Ed} < 0.5 \cdot V_{pl.T.Rd} \\ \text{"HUOMIOIDAAN"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{VÄHENNYS} = \text{"EI HUOMIOIDA"}$$

Otetaan vähennys kuitenkin huomioon, mikäli leikkauksen ja väännön yhteen laskettu leikkajännitys ylittää 50 % kapasiteetista. Tehdään vähennys samalla analogialla kuin pelkän leikkauksen tapauksessa. Menettely on varman päälle.

$$\rho_v := \left[ \max \left[ \frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl.T.Rd}} - 1, \frac{2 \cdot \tau_{Ed}}{\left( \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right)} - 1, 0 \right] \right]^2 \quad \rho_v = 0.00 \quad (\text{kaava 6.29})$$

Leikkauuspinta-alalle käytettävä myötöraja. Käytetään tässä koko poikkileikkaukselle.

$$f_{y.v} := \max \left[ \min \left[ (1 - \rho_v) \cdot f_y, f_y \right], 0 \right] \quad f_{y.v} = 355 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



## Redusoidut taivutusvastukset

redusoitu elastinen taivutusvastukset

$$W_{el.r} := W_{el} \cdot \frac{f_{y.v}}{f_y}$$

$$W_{el.r} = 1478 \cdot \text{cm}^3$$

redusoitu plastinen taivutusvastus

$$W_{pl.r} := W_{pl} \cdot \frac{f_{y.v}}{f_y}$$

$$W_{pl.r} = 1940 \cdot \text{cm}^3$$

## Ominaiskestävyydet puristukselle ja taivutukselle

$$N_{Rk} := f_y \cdot A$$

$$N_{Rk} = 5491 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Rk} := \begin{cases} f_y \cdot W_{pl.r} & \text{if Poikkikeikkausluokka} = \text{"class1"} \vee \text{Poikkikeikkausluokka} = \text{"class2"} \\ f_y \cdot W_{el.r} & \text{if Poikkikeikkausluokka} = \text{"class3"} \\ \text{"LASKENTAPOHJA EI TOIMI POIKKILEIKKAUSLUOKALLE 4"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{Rk} = 689 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Mitoituskestävyydet puristukselle ja taivutukselle

$$N_{pl.Rd} := \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{pl.Rd} = 5491 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Rd} := \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{Rd} = 689 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Pienennystekijä puristukselle

(kohta 6.3.1)

$$\text{Nurjahduskäyrä} := \begin{cases} \text{"a0"} & \text{if } \text{profiili} = \text{"kuuma_putki"} \wedge f_y \geq 460 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \text{"a"} & \text{if } \text{profiili} = \text{"kuuma_putki"} \wedge f_y < 460 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \text{"c"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Epätarkkuustekijä

$$\text{Nurjahduskäyrä} = \text{"c"}$$

$$\alpha := \begin{cases} 0.13 & \text{if } \text{Nurjahduskäyrä} = \text{"a0"} \\ 0.21 & \text{if } \text{Nurjahduskäyrä} = \text{"a"} \\ 0.34 & \text{if } \text{Nurjahduskäyrä} = \text{"b"} \\ 0.49 & \text{if } \text{Nurjahduskäyrä} = \text{"c"} \\ 0.76 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha = 0.49$$

Nurjahduspituus

$$L_{cr} := 2.2L$$

$$L_{cr} = 18.040 \text{ m}$$

Eulerin nurjahduskuorma

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = 1913 \cdot \text{kN}$$

Muunnettu hoikkuus

$$\lambda_- := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \lambda_- = 1.694$$

$$\phi := 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_- - 0.2) + \lambda_-^2 \right] \quad \chi_0 := \min \left( 1, \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_-^2}} \right) \quad \chi_0 = 0.259$$

Mikäli muunnettu hoikkuus nurjahdukselle tai puristusrasitus on tarpeeksi pieni, ei nurjahdusta tarvitse ottaa huomioon (kohta 6.3.1.2(4))

Lasketaan lopulliset pienennystekijät nurjahdukselle

$$\chi := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_- \leq 0.2 \vee N_{Ed} \leq 0.04 \cdot N_{cr} \\ \chi_0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\chi = 1.000$$

## Pienennystekijä kiepahdukselle

(kohta 6.3.2)

Pyöreä putki ei voi kiepahtaa

$$\chi_{LT} := 1.0$$

$$\chi_{LT} = 1.000$$

## Normaalivoiman ja taivutuksen yhteisvaikutus

Kaavat (6.61 ja 6.62)

### Puristettu ja taivutettu sauva

#### Nurjahtavalle ja kiepahtavalle sauvalle

Liite B taulukko B.3

$$C_m := 1.0$$

Tasainen  
momenttipinta,  
varman päälle

Poikkileikkausluokissa 1-3

$$\Delta M_{Ed} := 0$$

Liite B taulukko B.1

$$k := \min \left[ C_m \cdot \left[ 1 + [(\lambda_-) - 0.2] \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right], C_m \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = 1.006$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_1 := \frac{N_{Ed}}{\left( \frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} + k \cdot \frac{|M_{Ed} + \Delta M_{Ed}|}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \quad \text{Yhteisvaikutus}_1 = 0.543$$

#### Jos kiepahdusta ja nurjahdusta ei tarvitse ottaa huomioon

Poikkileikkausluokissa 1 ja 2

$$M_{pl.Rd} := \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M0}} = 689 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{N.V.Rd} := M_{pl.Rd} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} \right)^{1.7} \right] = 689 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad (\text{kaava 6.41a})$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_2 := \frac{M_{Ed}}{M_{N.V.Rd}} \quad \text{Yhteisvaikutus}_2 = 0.484$$

Jos poikkileikkausluokassa 3

$$\text{Yhteisvaikutus}_3 := \frac{\frac{\sigma_v}{f_y}}{\gamma_{M0}} \quad \text{Yhteisvaikutus}_3 = 0.808$$

Poikkileikkausluokan mukainen yhteisvaikutus

$$\text{Yhteisvaikutus} = 0.543$$

Profiilin kestävyys

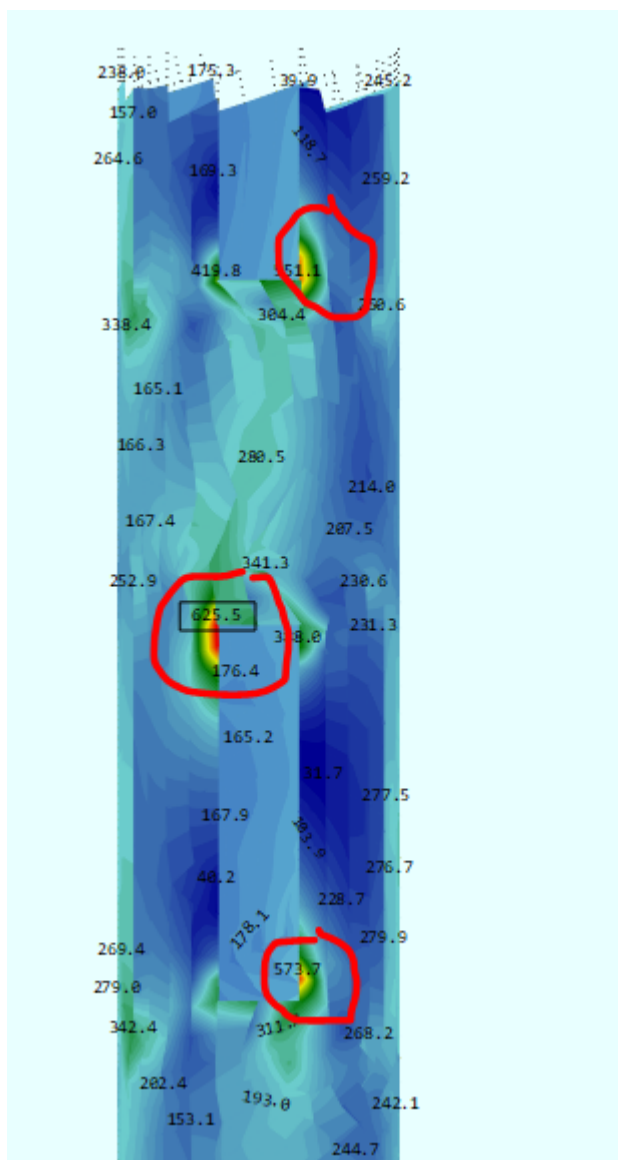
$$\text{Profiili} = \text{"KESTÄÄ"}$$

## 9.4 Kytkentäaukkojen vaikutukset

Kytentäaaukut aiheuttavat jännityspiikkejä aukon reunoille. Lisäksi aukkojen kohdalla levyn jäykkyys on pienempi kuin ehjällä rakenteella. Tutkitaan aukon kohdalle syntyviä jännityksiä kuorimallin avulla.

KytKentä aukon takana käytetään typpipiirustuksen Ty12/192 mukaista jäykistävää levyä, jolla viedään rasituksia aukon ohi. Ennen kaikkea vääntöjäykkyyden johdosta tarvitaan jäykistävää levyä. Jäykistävä levy on mallinnettu kuorimalliin.

Kuten alla olevasta FEM-mallista otetusta kuvakaappauksesta nähdään, syntyy kulmien kohdalle jännityspiikkejä. Kuormituksena on käytetty määräävää MRT:n yhdistelmää (tuuli tien suunnassa). Kuvassa esitetään kuoren von Misesin jännitys.



Kulmien jännityspiikit ylittävät myötörajan. Tähän auttaa kulmien pyöristys. FEM-mallista tätä ei pystytty toteuttamaan, koska pinta johon pyöristys tulisi tehdä on kaareva (putken pinta). Ohjeistetaan kulmiin suunnitelmissa pyöristykset ja käytetään hieman suurempaa pyöristyssädettä kuin tyyppipiirustuksessa (R30 → R40) paksumman seinämänpaksuuden johdosta.

Kytentäukot on viety normaali ylemmäksi (varsinkin vara-aukko, joka tehdään varsinaisen aukon yläpuolelle). Rasitukset pylväässä pienenevät, mitä ylempäs pylväässä mennään.

KytKentäaukkojen väliä on kasvatettu  
tyyppipiirustuksen 200 mm → 500 mm.  
Viereisessä kuvassa väli on 500 mm. Väliä  
on kasvatettu, koska muuten aukkojen  
välillä jännitykset kasvavat yli myötörajan.

Kun otetaan huomioon, että käytössä olevissa putkiportaaleissa vertailulaskennoilla saadut käyttöasteet ovat suurempia ja kytkentäaukot lähempänä toisiaan, hyväksytään aukkojen kulmiin syntyvät jännityspiikit.

## 10 Orren mitoitus

Ulokeportalin orsi mitoitettaan taivutettuna rakenteena, johon vaikuttaa vääntö. Tarkastellaan rasi-tetuimma kohdan eli orren kiinnityskohdan kestävyyttä.

Viittaukset eurokoodiin SFS-EN 1993-1-1, ellei muuta ole mainittu.

### **SAUVAN KESTÄVYYS TAIVUTUKSELLE, LEIKKAUKSELLE, VÄÄNNÖLLE JA PURISTUKSELLE**

Esitetään ensin orren alkuosan mitoitus ja tämän jälkeen jatkoksen jälkeinen osa (laippaliitoksen jälkeen)

## 10.1 ORREN ALKUOSA

### Poikkileikkaus- ja materiaalitiedot

Viittaukset eurokoodiin SFS-EN 1993-1-1, ellei muuta ole mainittu.

profiili := profiili<sub>0</sub> = "kylmä\_putki"

*Kylmämuokattu putkiprofiili tai Kuumamuokattu putkiprofiili  
Otetaan kertoimilla huomioon kulmien pyöristysten  
vaikutus profiilin poikkileikkausarvoihin*

#### Poikkileikkausarvot

$$L := L_0 - \frac{d_p}{2} = 11797 \cdot \text{mm}$$

$$k_{y,l} := 0.92$$

$$k_{z,l} := 0.92$$

$$k_t := 0.88$$

$$L_y := 2.2L = 25953 \cdot \text{mm}$$

$$t := t_0 = 16.0 \cdot \text{mm}$$

$$h := h_0 = 300 \cdot \text{mm}$$

$$b := h_0 = 300 \cdot \text{mm}$$

$$L_z := 2.2L = 25953 \cdot \text{mm}$$

$$h_w := h - 2 \cdot t$$

$$h_w = 268 \cdot \text{mm}$$

$$b_w := b - 2 \cdot t$$

$$b_w = 268 \cdot \text{mm}$$

$$A := 2t \cdot (h - 2t) + 2 \cdot b \cdot t$$

$$A = 18176 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_t := (h - 0.5t) \cdot (b - 0.5t)$$

$$A_t = 85264 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{v,z} := 2 \cdot t \cdot h_w$$

$$A_{v,z} = 8576 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{v,y} := 2 \cdot t \cdot b_w$$

$$A_{v,y} = 8576 \cdot \text{mm}^2$$

$$I_y := k_{y,l} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{t \cdot (h - 2t)^3}{12} + 2 \cdot \frac{b \cdot t^3}{12} + 2 \cdot b \cdot t \cdot \left( \frac{h - t}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_y = 22550 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_z := k_{z,l} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{b^3 \cdot t}{12} + 2 \cdot \frac{t^3 \cdot (h - 2t)}{12} + 2 \cdot [t \cdot (h - 2t)] \cdot \left( \frac{b - t}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_z = 22550 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_t := \frac{4 \cdot [(h - t) \cdot (b - t)]^2}{2 \left( \frac{h - t}{t} + \frac{b - t}{t} \right)}$$

$$I_t = 36650 \cdot \text{cm}^4$$

$$W_{el,y} := \frac{2I_y}{h} \quad W_{el,y} = 1503 \cdot \text{cm}^3 \quad W_{pl,y} := k_{y,l} \cdot \left[ 2 \cdot b \cdot t \cdot \frac{h - t}{2} + 4t \cdot \frac{(h - 2t)^2}{8} \right] \quad W_{pl,y} = 1783 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{el,z} := \frac{2I_z}{b} \quad W_{el,z} = 1503 \cdot \text{cm}^3 \quad W_{pl,z} := k_{z,l} \cdot \left[ 2 \cdot [t \cdot (h - 2t)] \cdot \left( \frac{b - t}{2} \right) + 4t \cdot \frac{(b - t)^2}{8} \right] \quad W_{pl,z} = 1783 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_t := k_t \cdot 2 \cdot A_t \cdot t$$

$$W_t = 2401 \cdot \text{cm}^3$$

#### Materiaaliominaisuudet

Osavarmuusluvut (kohta 6.1(1))

$$\gamma_{M0} := 1.0$$

$$\gamma_{M1} := 1.1$$

Teräsluokka S355:

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

$$E := 210000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}}$$

$$\nu := 0.3$$

$$\varepsilon = 0.81$$

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80769 \cdot \text{MPa}$$

Väsyminen

$$\gamma_{Ff} := 1.0$$

$$\gamma_{Mf} := 1.35$$

*Yleinen varman kestämissen  
periaate ja suuret seuraamukset*

## Voimasuureet

Orren kannalta määräävin voimasuureyhdistelmä on tapaus, jossa tuuli tien suunnassa on määräävä muuttuva kuorma.

### MRT

Suurin puristus

$$N_{Ed} := 0 \text{ kN}$$

Taivutusmomentti pystysuunnassa

$$M_{Ed,y} := 1.25 \cdot M_{x,p.1} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot M_{x,s.1}$$

$$M_{Ed,y} = -159 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusmomentti pilarin ympäri (vaakatasossa)

$$M_{Ed,z} := 1.5 \cdot \left[ -F_{x,w} \cdot \left( e_y - \frac{d_p}{2} \right) + -q_{w.o} \cdot 0.5 \cdot \left( L_o - B_t - \frac{d_p}{2} + e_{y.a} \right)^2 \right]$$

$$M_{Ed,z} = -283 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{Ed,x} := 1.25 \cdot M_{y,p.1} + 1.5 \cdot F_{x,w} \cdot (e_z)$$

$$M_{Ed,x} = 54 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Leikkausvoima pystysuunnassa

$$V_{Ed,z} := 1.25 \cdot (g_{orsi} + g_{levyt}) \cdot (L_o - 0.5 \cdot d_p) + q_{merkki.v} \cdot B_t + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot N_{s.1}$$

$$V_{Ed,z} = 25 \cdot \text{kN}$$

Leikkausvoima vaakasuunnassa

$$V_{Ed,y} := 1.5 \cdot \left[ -F_{x,w} + -q_{w.o} \cdot \left( L_o - B_t - \frac{d_p}{2} + e_{y.a} \right) \right]$$

$$V_{Ed,y} = -28 \cdot \text{kN}$$

## Jännitykset

$$\sigma_s(x, y) := \frac{M_{Ed,y} \cdot \left(\frac{h}{2} - x\right)}{I_y} + \frac{M_{Ed,z} \cdot \left(\frac{b}{2} - y\right)}{I_z} + \frac{-N_{Ed}}{A}$$

$$\sigma_{z,Ed} := 0$$

Jännitys ylälaipan yläreunassa

$$\sigma_1 := \sigma_s(h, b) = 294 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \sigma_2 := \sigma_s(h, 0) = -83 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Jännitys alalaipan alareunassa

$$\sigma_3 := \sigma_s(0, b) = 83 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \sigma_4 := \sigma_s(0, 0) = -294 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Itseisarvoltaan suurin normaali-jännitys

$$\sigma_{x,Ed} := \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|, |\sigma_4|) = 294 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Leikkauksesta aiheutuva leikkausjännitys

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys

Pystysuunnassa

$$\tau_{v,Ed,z} := \frac{V_{Ed,z}}{A_{v,z}} = 3.0 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{t,Ed} := \frac{|M_{Ed,x}|}{W_t} \quad \tau_{t,Ed} = 22.5 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Vaakasuunnassa

$$\tau_{v,Ed,y} := \frac{V_{Ed,y}}{A_{v,y}} = -3.2 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{Ed} := \max(|\tau_{v,Ed,z}|, |\tau_{v,Ed,y}|) + \tau_{t,Ed} = 25.7 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Suurin Von misesin jännitys poikkileikkauksessa

$$\sigma_v := \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3 \cdot (\tau_{Ed})^2}$$

$$\sigma_v = 297 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

**Uuman lommahduskerroin puristukselle, määräävämmän uuman mukaisesti**

$$\psi := \frac{\sigma_s(0.5t, b)}{\sigma_s(h - 0.5t, b)} = 0.3062$$

Lommahduskerroin

$$k_\sigma := \begin{cases} 5.98 \cdot (1 - \psi)^2 & \text{if } -3 < \psi \leq -1 \\ 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2 & \text{if } -1 < \psi \leq 0 \\ \frac{8.2}{1.05 + \psi} & \text{if } 0 < \psi \leq 1 \\ 4.0 & \text{otherwise} \end{cases} = 6.05$$

(taulukko 6.10  
/NCCI4)



## Poikkileikkausluokka

SFS-EN 1993-1-1 luku 5.5

$$r_0 := r_o$$

"Laippa"  
puristettu

$$c_1 := b - 2t - 2 \cdot r_0 = 172 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Class}_{\text{flange}} := \begin{cases} \text{"class1"} & \text{if } \frac{c_1}{t} \leq 33 \cdot \epsilon \\ \text{"class2"} & \text{if } 33 \cdot \epsilon < \frac{c_1}{t} \leq 38 \cdot \epsilon \\ \text{"class3"} & \text{if } 38 \cdot \epsilon < \frac{c_1}{t} \leq 42 \cdot \epsilon \\ \text{"class4 Tämä laskentapohja ei toimi"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class1"}$$

"Uuma", puristettu ja  
taivutettu

$$c_2 := h - 2 \cdot t - 2 \cdot r_0 = 172 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Class}_{\text{web}} := \begin{cases} \text{"class1"} & \text{if } \frac{c_2}{t} \leq 33 \cdot \epsilon \\ \text{"class2"} & \text{if } 33 \cdot \epsilon < \frac{c_2}{t} \leq 38 \cdot \epsilon \\ \text{"class3"} & \text{if } \begin{cases} 38 \cdot \epsilon < \frac{c_2}{t} \leq \frac{42 \epsilon}{0.67 + 0.33 \psi} & \text{if } \psi > -1 \\ 38 \cdot \epsilon < \frac{c_2}{t} \leq 62 \epsilon \cdot (1 - \psi) \sqrt{-\psi} & \text{if } \psi \leq -1 \end{cases} \\ \text{"class4"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Class}_{\text{web}} = \text{"class1"}$$

$$\text{Poikkileikkausluokka} := \begin{cases} \text{"class1"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class1"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class1"} \\ \text{"class2"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class1"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class2"} \\ \text{"class2"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class2"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class2"} \\ \text{"class2"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class2"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class1"} \\ \text{"class3"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class1"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class3"} \\ \text{"class3"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class2"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class3"} \\ \text{"class3"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class3"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class1"} \\ \text{"class3"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class3"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class2"} \\ \text{"class3"} & \text{if } \text{Class}_{\text{flange}} = \text{"class3"} \wedge \text{Class}_{\text{web}} = \text{"class3"} \\ \text{"Tämä laskentapohja ei toimi"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Poikkileikkausluokka} = \text{"class1"}$$

## Kapasiteetti

Tarkistetaan pitääkö leikkauslommahdus ottaa huomioon mitoituksessa.

(SFS-EN 1993-1-5, kohta 5.1(2))

$$\eta := \begin{cases} 1.2 & \text{if } f_y \leq 460 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ 1.0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \eta = 1.20$$

$$\text{Leikkauslommahdus} := \begin{cases} \text{"Ei tarvitse tarkastaa"} & \text{if } \frac{h_w}{t} < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \\ \text{"Täytyy tarkistaa"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Leikkauslommahdus = "Ei tarvitse tarkastaa"

Leikkauskestävyys ilman väännön vaikutusta pystysuunnassa (kohta 6.2.6)

$$V_{\text{pl.Rd.z}} := \frac{A_{\text{v.z}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{\text{M0}}} \quad V_{\text{pl.Rd.z}} = 1758 \cdot \text{kN}$$

Poikkileikkaukseen vaikuttava leikkausvoima

$$V_{\text{Ed.z}} = 25 \cdot \text{kN}$$

Leikkauskestävyys ilman väännön vaikutusta poikkisuunnassa (kohta 6.2.6)

$$V_{\text{pl.Rd.y}} := \frac{A_{\text{v.y}} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{\text{M0}}} \quad V_{\text{pl.Rd.y}} = 1758 \cdot \text{kN}$$

$$V_{\text{Ed.y}} = -28 \cdot \text{kN}$$

Vääntökestävyys ilman leikkauksen vaikutusta

$$M_{\text{x.pl.Rd}} := \frac{f_y}{\gamma_{\text{M0}} \cdot \sqrt{3}} \cdot W_t \quad M_{\text{x.pl.Rd}} = 492 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntömomentin pienentämä plastinen leikkauskestävyys pystysuunnassa

$$V_{\text{pl.T.Rd.z}} := \left[ 1 - \frac{\tau_{\text{t.Ed}}}{\left( \frac{f_y}{\gamma_{\text{M0}} \cdot \sqrt{3}} \right)} \right] \cdot V_{\text{pl.Rd.z}} \quad V_{\text{pl.T.Rd.z}} = 1565 \cdot \text{kN}$$

Poikkileikkaukseen vaikuttava leikkausvoima

$$V_{\text{Ed.z}} = 25 \cdot \text{kN}$$

Vääntömomentin pienentämä plastinen leikkauskestävyys poikkisuunnassa

$$V_{\text{pl.T.Rd.y}} := \left[ 1 - \frac{\tau_{\text{t.Ed}}}{\left( \frac{f_y}{\gamma_{\text{M0}} \cdot \sqrt{3}} \right)} \right] \cdot V_{\text{pl.Rd.y}} \quad V_{\text{pl.T.Rd.y}} = 1565 \cdot \text{kN}$$

Poikkileikkaukseen vaikuttava leikkausvoima

$$V_{\text{Ed.y}} = -28 \cdot \text{kN}$$

Mitoitusehto leikkaukselle ja väännölle

$$\text{LEIKKAUS\_JA\_VÄÄNTÖ} := \begin{cases} \text{"KESTÄÄ"} & \text{if } V_{Ed.z} < V_{pl.T.Rd.z} \wedge V_{Ed.y} < V_{pl.T.Rd.y} \\ \text{"EI KESTÄ"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{LEIKKAUS\_JA\_VÄÄNTÖ} = \text{"KESTÄÄ"}$$

Leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen voidaan jättää huomiomatta, jos leikkausvoima on alle puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä. (kohta 6.2.8(2))

$$\text{VÄHENNYS}_z := \begin{cases} \text{"EI HUOMIOIDA"} & \text{if } V_{Ed.z} < 0.5 \cdot V_{pl.Rd.z} \\ \text{"HUOMIOIDAAN"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{VÄHENNYS}_z = \text{"EI HUOMIOIDA"}$$

$$\text{VÄHENNYS}_y := \begin{cases} \text{"EI HUOMIOIDA"} & \text{if } V_{Ed.y} < 0.5 \cdot V_{pl.Rd.y} \\ \text{"HUOMIOIDAAN"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{VÄHENNYS}_y = \text{"EI HUOMIOIDA"}$$

Otetaan vähennys kuitenkin huomioon, mikäli leikkauksen ja väännön yhteen laskettu leikkausjännitys ylittää 50 % kapasiteetista. Tehdään vähennys samalla analogialla kuin pelkän leikkauksen tapauksessa. Menettely on varman päälle.

$$\rho_{v.z} := \left[ \max \left[ \frac{2 \cdot V_{Ed.z}}{V_{pl.T.Rd.z}} - 1, \frac{2 \cdot (\tau_{t.Ed} + \tau_{v.Ed.z})}{\left( \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right)} - 1, 0 \right], 0 \right]^2 \quad (\text{kaava 6.29})$$

$$\rho_{v.z} = 0.00$$

$$\rho_{v.y} := \left[ \max \left[ \frac{2 \cdot V_{Ed.y}}{V_{pl.T.Rd.y}} - 1, \frac{2 \cdot (\tau_{t.Ed} + \tau_{v.Ed.y})}{\left( \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \right)} - 1, 0 \right], 0 \right]^2$$

$$\rho_{v.y} = 0.00$$

Leikkauspinta-alalle käytettävä myötöraja.

Pystysuunnassa

$$f_{y.v.z} := \max \left[ \min \left[ (1 - \rho_{v.z}) \cdot f_y, f_y \right], 0 \right]$$

$$f_{y.v.z} = 355 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Poikkisuunnassa

$$f_{y.v.y} := \max \left[ \min \left[ (1 - \rho_{v.y}) \cdot f_y, f_y \right], 0 \right]$$

$$f_{y.v.y} = 355 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

## Redusoiut poikkileikkausarvot

$$A_{\text{tot.r}} := A - (\rho_{V.Z} \cdot A_{V.Z} + \rho_{V.Y} \cdot A_{V.Y})$$

$$A_{\text{tot.r}} = 18176 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{V.Z.r} := A_{V.Z} \cdot (1 - \rho_{V.Z})$$

$$A_{V.Z.r} = 8576 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{V.Y.r} := A_{V.Y} \cdot (1 - \rho_{V.Y})$$

$$A_{V.Y.r} = 8576 \cdot \text{mm}^2$$

reduoidut elastiset taivutusvastukset

$$W_{\text{el.y.r}} := \frac{2}{h} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{t \cdot (h - 2t)^3}{12} \cdot \frac{f_{y.v.z}}{f_y} + \left[ 2 \cdot \frac{b \cdot t^3}{12} + 2 \cdot b \cdot t \cdot \left( \frac{h - t}{2} \right)^2 \right] \cdot \frac{f_{y.v.y}}{f_y} \right]$$

$$W_{\text{el.y.r}} = 1634 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{\text{el.z.r}} := \frac{2}{b} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{b^3 \cdot t}{12} \cdot \frac{f_{y.v.y}}{f_y} + \left[ 2 \cdot \frac{t^3 \cdot (h - 2t)}{12} + 2 \cdot [t \cdot (h - 2t)] \cdot \left( \frac{b - t}{2} \right)^2 \right] \cdot \frac{f_{y.v.z}}{f_y} \right]$$

$$W_{\text{el.z.r}} = 1634 \cdot \text{cm}^3$$

reduoidut plastiset taivutusvastukset

$$W_{\text{pl.y.r}} := 2 \cdot b \cdot t \cdot \frac{h - t}{2} \cdot \frac{f_{y.v.y}}{f_y} + 4t \cdot \frac{(h - 2t)^2}{8} \cdot \frac{f_{y.v.z}}{f_y}$$

$$W_{\text{pl.y.r}} = 1938 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{\text{pl.z.r}} := 2 \cdot [t \cdot (h - 2t)] \cdot \left( \frac{b - t}{2} \right) \cdot \frac{f_{y.v.z}}{f_y} + 4t \cdot \frac{b^2}{8} \cdot \frac{f_{y.v.y}}{f_y}$$

$$W_{\text{pl.z.r}} = 1938 \cdot \text{cm}^3$$

### Ominaiskestävyydet puristukselle ja taivutukselle

$$N_{Rk} := f_y \cdot A_{tot.r}$$

$$N_{Rk} = 6452 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Rk.y} := \begin{cases} f_y \cdot W_{pl.y.r} & \text{if Poikkikeikkausluokka} = \text{"class1"} \vee \text{Poikkikeikkausluokka} = \text{"class2"} \\ f_y \cdot W_{el.y.r} & \text{if Poikkikeikkausluokka} = \text{"class3"} \\ \text{"LASKENTAPOHJA EI TOIMI POIKKILEIKKAUSLUOKALLE 4"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{Rk.y} = 688 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rk.z} := \begin{cases} f_y \cdot W_{pl.z.r} & \text{if Poikkikeikkausluokka} = \text{"class1"} \vee \text{Poikkikeikkausluokka} = \text{"class2"} \\ f_y \cdot W_{el.z.r} & \text{if Poikkikeikkausluokka} = \text{"class3"} \\ \text{"LASKENTAPOHJA EI TOIMI POIKKILEIKKAUSLUOKALLE 4"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M_{Rk.z} = 688 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

### Mitoituskestävyydet puristukselle ja taivutukselle

$$N_{Rd} := \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{Rd} = 6452 \cdot \text{kN}$$

$$M_{Rd.y} := \frac{M_{Rk.y}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{Rd.y} = 688 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd.z} := \frac{M_{Rk.z}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{Rd.z} = 688 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

## Pienennystekijä puristukselle

(kohta 6.3.1)

$$\text{Nurjhduskäyrä} := \begin{cases} \text{"a0"} & \text{if profiili} = \text{"kuuma_putki"} \wedge f_y \geq 460 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \text{"a"} & \text{if profiili} = \text{"kuuma_putki"} \wedge f_y < 460 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \text{"c"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Epätarkkuustekijä

Nurjhduskäyrä = "c"

$$\alpha := \begin{cases} 0.13 & \text{if Nurjhduskäyrä} = \text{"a0"} \\ 0.21 & \text{if Nurjhduskäyrä} = \text{"a"} \\ 0.34 & \text{if Nurjhduskäyrä} = \text{"b"} \\ 0.49 & \text{if Nurjhduskäyrä} = \text{"c"} \\ 0.76 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\alpha = 0.49$

Nurjhduspituus

$$L_{\text{cr.y}} := L_y$$

$$L_{\text{cr.y}} = 25.953 \text{ m}$$

Eulerin nurjhduskuorma

$$N_{\text{cr.y}} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{\text{cr.y}}^2} \quad N_{\text{cr.y}} = 694 \cdot \text{kN}$$

Muunnettu hoikkuus

$$\lambda_{-y} := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{\text{cr.y}}}} \quad \lambda_{-y} = 3.049$$

$$\phi_y := 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_{-y} - 0.2) + \lambda_{-y}^2 \right] \quad \chi_{y.0} := \min \left( 1, \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_{-y}^2}} \right) \quad \chi_{y.0} = 0.092$$

Nurjhduspituus

$$L_{\text{cr.z}} := L_z$$

$$L_{\text{cr.z}} = 25.953 \text{ m}$$

Eulerin nurjhduskuorma

$$N_{\text{cr.z}} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{\text{cr.z}}^2} \quad N_{\text{cr.z}} = 694 \cdot \text{kN}$$

Muunnettu hoikkuus

$$\lambda_{-z} := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{\text{cr.z}}}} \quad \lambda_{-z} = 3.049$$

$$\phi_z := 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\lambda_{-z} - 0.2) + \lambda_{-z}^2 \right] \quad \chi_{z.0} := \min \left( 1, \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_{-z}^2}} \right) \quad \chi_{z.0} = 0.092$$

Mikäli muunnettu hoikkuus nurjahdukselle tai puristusrasitus on tarpeeksi pieni, ei nurjahdusta tarvitse ottaa huomioon (kohta 6.3.1.2(4))

Lasketaan lopulliset pienennystekijät nurjahdukselle

$$\chi_y := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{-y} \leq 0.2 \vee N_{Ed} \leq 0.04 \cdot N_{cr,y} \\ \chi_{y,0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \chi_y = 1.000$$

$$\chi_z := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{-z} \leq 0.2 \vee N_{Ed} \leq 0.04 \cdot N_{cr,z} \\ \chi_{z,0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \chi_z = 1.000$$

## Pienennystekijä kiepahdukselle

(kohta 6.3.2)

Kiepahdustukipisteiden väli

$$L_{cr.kiep} := L = 11797 \cdot \text{mm}$$

Kiepahdustuennan ja momenttipinnan muodon mukaiset kertoimet

$$k := 1.0$$

$$C_1 := 1.132$$

$$C_2 := 0.459$$

*Ei merkitystä tässä tapauksessa*

Kuorman paikka suhteessa

$$z_g := \frac{h}{2} = 150 \cdot \text{mm}$$

Kriittinen kiepahdusmomentti

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L_{cr.kiep})^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{(k \cdot L_{cr.kiep})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right]$$

$$M_{cr} = 11028 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{LT\_} := \sqrt{\frac{M_{Rk.y}}{M_{cr}}}$$

$$\lambda_{LT\_} = 0.250$$

$$\text{Kiepahduskäyrä} := \begin{cases} \text{"b"} & \text{if profiili} = \text{"kuuma_putki"} \wedge \frac{h}{b} \leq 2 \\ \text{"c"} & \text{if profiili} = \text{"kuuma_putki"} \wedge 2 < \frac{h}{b} \leq 3.1 \\ \text{"c"} & \text{if profiili} = \text{"kylmä_putki"} \wedge \frac{h}{b} \leq 2 \\ \text{"d"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Kiepahduskäyrä} = \text{"c"}$$

$$\alpha_{LT} := \begin{cases} 0.13 & \text{if Kiepahduskäyrä} = \text{"a"} \\ 0.21 & \text{if Kiepahduskäyrä} = \text{"b"} \\ 0.34 & \text{if Kiepahduskäyrä} = \text{"c"} \\ 0.76 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha_{LT} = 0.34$$

$$\beta := 0.75 \quad \text{Suomessa sekä LiVi:n YM:n rakenteissa}$$

$$\lambda_{LT.0\_} := 0.4$$

$$\phi_{LT} := 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT\_} - 0.2) + \beta \cdot \lambda_{LT\_}^2 \right]$$

$$\phi_{LT} = 0.532$$

$$\chi_{LT.0} := \min \left( 1, \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT\_}^2}} \right)$$

$$\chi_{LT.0} = 0.983$$



Mikäli muunnettu hoikkuus kiepahdukselle tai taivutusrasitus pääsuunnassa on tarpeeksi pieni, ei kiepahdusta tarvitse ottaa huomioon (kohta 6.3.2.2(4))

Lasketaan lopullinen pienennystekijä kiepahdukselle

$$\chi_{LT} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{LT\_} \leq \lambda_{LT.0\_} \vee \frac{M_{Ed,y}}{M_{cr}} \leq \lambda_{LT.0\_}^2 \\ \chi_{LT.0} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\chi_{LT} = 1.000$$

## Normaalivoiman ja taivutuksen yhteisvaikutus

Kaavat (6.61 ja 6.62)

### Puristettu ja taivutettu sauva

#### Nurjahtavalle ja kiepahtavalle sauvalle

Liite B taulukko B.3

$$C_{my} := 1.0$$

Tasainen  
momenttipinta,  
varman päälle

$$C_{mz} := 1.0$$

Poikkileikkausluokissa 1-3

$$\Delta M_{Ed,y} := 0$$

$$\Delta M_{Ed,z} := 0$$

Liite B taulukko B.1

$$k_{yy} := \min \left[ C_{my} \cdot \left[ 1 + \left[ (\lambda_{-y}) - 0.2 \right] \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right], C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = 1.00$$

$$k_{zz} := \min \left[ C_{mz} \cdot \left[ 1 + \left[ (\lambda_{-z}) - 0.2 \right] \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right], C_{mz} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = 1.00$$

$$k_{yz} := 0.6 \cdot k_{zz} = 0.600$$

$$k_{zy} := 0.6 \cdot k_{yy} = 0.600$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1a} := \frac{N_{Ed}}{\left( \frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} + k_{yy} \cdot \frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\frac{M_{Rk,z}}{\gamma_{M1}}}$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1a} = 0.525$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1b} := \frac{N_{Ed}}{\left( \frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} + k_{zy} \cdot \frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\frac{M_{Rk,z}}{\gamma_{M1}}}$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1b} = 0.605$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1} := \max(\text{Yhteisvaikutus\_1a}, \text{Yhteisvaikutus\_1b})$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1} = 0.605$$

$$\text{Yhteisvaikutus} := \begin{cases} \text{"KESTÄÄ"} & \text{if } \text{Yhteisvaikutus\_1} \leq 1 \\ \text{"EI KESTÄ"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Yhteisvaikutus} = \text{"KESTÄÄ"}$$

Jos kiepahdusta ja nurjahdusta ei tarvitse ottaa huomioon

Poikkileikkausluokissa 1 ja 2

$$n_V := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$$

$$n_V = 0$$

$$a_{V,y} := \min\left(\frac{A_{V,y,r}}{A_{tot,r}}, 0.5\right)$$

$$a_{V,y} = 0.472$$

$$a_{V,z} := \min\left(\frac{A_{V,z,r}}{A_{tot,r}}, 0.5\right)$$

$$a_{V,z} = 0.472$$

$$M_{N,Rd,y} := \min\left(M_{Rd,y} \cdot \frac{1 - n_V}{1 - 0.5 \cdot a_{V,y}}, M_{Rd,y}\right)$$

$$M_{N,Rd,y} = 688 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{N,Rd,z} := \min\left(M_{Rd,z} \cdot \frac{1 - n_V}{1 - 0.5 \cdot a_{V,z}}, M_{Rd,z}\right)$$

$$M_{N,Rd,z} = 688 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha := \min\left(1.66, \frac{1.66}{1 - 1.13 \cdot n_V^2}\right) = 1.660$$

$$\beta := \alpha$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_2 := \left(\frac{|M_{Ed,y}|}{M_{N,Rd,y}}\right)^\alpha + \left(\frac{|M_{Ed,z}|}{M_{N,Rd,z}}\right)^\beta$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_2 = 0.317$$

Jos poikkileikkausluokassa 3

$$\text{Yhteisvaikutus}_3 := \frac{\frac{\sigma_v}{f_y}}{\gamma_{M0}}$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_3 = 0.837$$

Poikkileikkausluokan mukainen yhteisvaikutus

$$\text{Yhteisvaikutus} = 0.605$$

Profiilin kestävyys

$$\text{Profiili} = \text{"KESTÄÄ"}$$

## 10.2 Loppuosa

Viittaukset eurokoodiin SFS-EN 1993-1-1, ellei muuta ole mainittu.

profiili := profiili<sub>O</sub> = "kylmä\_putki"

Kylmämuokattu putkiprofiili tai Kuumamuokattu putkiprofiili

Otetaan kertoimilla huomioon kulmien pyöristysten vaikutus profiilin poikkileikkausarvoihin

### Poikkileikkausarvot

$$L := L_O - \frac{d_p}{2} - LL_e = 10297 \cdot \text{mm}$$

$$k_{y,I} := 0.92$$

$$k_{z,I} := 0.92$$

$$k_t := 0.88$$

$$L_y := 2.2L = 22653 \cdot \text{mm}$$

$$t := 12.5 \text{ mm}$$

$$h := h_O = 300 \cdot \text{mm}$$

$$b := h_O = 300 \cdot \text{mm}$$

$$L_z := 2.2L = 22653 \cdot \text{mm}$$

$$h_W := h - 2 \cdot t$$

$$h_W = 275 \cdot \text{mm}$$

$$b_W := b - 2 \cdot t$$

$$b_W = 275 \cdot \text{mm}$$

$$A := 2t \cdot (h - 2t) + 2 \cdot b \cdot t$$

$$A = 14375 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_t := (h - 0.5t) \cdot (b - 0.5t)$$

$$A_t = 86289 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{V,Z} := 2 \cdot t \cdot h_W$$

$$A_{V,Z} = 6875 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{V,Y} := 2 \cdot t \cdot b_W$$

$$A_{V,Y} = 6875 \cdot \text{mm}^2$$

$$I_y := k_{y,I} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{t \cdot (h - 2t)^3}{12} + 2 \cdot \frac{b \cdot t^3}{12} + 2 \cdot b \cdot t \cdot \left( \frac{h - t}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_y = 18253 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_z := k_{z,I} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{b^3 \cdot t}{12} + 2 \cdot \frac{t^3 \cdot (h - 2t)}{12} + 2 \cdot [t \cdot (h - 2t)] \cdot \left( \frac{b - t}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_z = 18253 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_t := \frac{4 \cdot [(h - t) \cdot (b - t)]^2}{2 \cdot \left( \frac{h - t}{t} + \frac{b - t}{t} \right)}$$

$$I_t = 29705 \cdot \text{cm}^4$$

$$W_{el,y} := \frac{2I_y}{h} \quad W_{el,y} = 1217 \cdot \text{cm}^3 \quad W_{pl,y} := k_{y,I} \cdot \left[ 2 \cdot b \cdot t \cdot \frac{h - t}{2} + 4t \cdot \frac{(h - 2t)^2}{8} \right] \quad W_{pl,y} = 1427 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{el,z} := \frac{2I_z}{b} \quad W_{el,z} = 1217 \cdot \text{cm}^3 \quad W_{pl,z} := k_{z,I} \cdot \left[ 2 \cdot [t \cdot (h - 2t)] \cdot \left( \frac{b - t}{2} \right) + 4t \cdot \frac{(b - t)^2}{8} \right] \quad W_{pl,z} = 1427 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_t := k_t \cdot 2 \cdot A_t \cdot t$$

$$W_t = 1898 \cdot \text{cm}^3$$

### Materiaaliominaisuudet

Osavarmuusluvut (kohta 6.1(1))

$$\gamma_{M0} := 1.0$$

$$\gamma_{M1} := 1.1$$

Teräsluokka S355:

$$f_y := 355 \text{ MPa}$$

$$E := 210000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}}$$

$$\nu := 0.3$$

$$\varepsilon = 0.81$$

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = 80769 \cdot \text{MPa}$$

Väsyminen

$$\gamma_{Ff} := 1.0$$

$$\gamma_{Mf} := 1.35$$

Yleinen varman kestämissen periaate ja suuret seuraamukset

## Voimasuureet

Orren kannalta määräävin voimasuureyhdistelmä on tapaus, jossa tuuli tien suunnassa on määräävä muuttuva kuorma.

$$L_o = 12000 \cdot \text{mm}$$

Kertoimia liitoskohdan voimasuureille

$$k_M := \frac{(L_o - LL_e)^2}{L_o^2} = 0.766$$

$$k_V := \frac{L_o - LL_e}{L_o} = 0.875$$

## MRT

Suurin puristus

$$N_{Ed} := 0 \text{ kN}$$

Taivutusmomentti pystysuunnassa

$$M_{Ed,y} := k_M \cdot (1.25 \cdot M_{x,p.1} + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot M_{x.s.1})$$

$$M_{Ed,y} = -122 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusmomentti pilarin ympäri (vaakatasossa)

$$M_{Ed,z} := 1.5 \cdot \left[ -F_{x,w} \cdot \left( e_y - \frac{d_p}{2} - LL_e \right) + -q_{w.o} \cdot 0.5 \cdot \left( L_o - B_t - \frac{d_p}{2} + e_{y.a} - LL_e \right)^2 \right]$$

$$M_{Ed,z} = -242 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{Ed,x} := 1.25 \cdot M_{y,p.1} + 1.5 \cdot F_{x,w} \cdot (e_z)$$

$$M_{Ed,x} = 54 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Leikkausvoima pystysuunnassa

$$V_{Ed,z} := k_V \cdot \left[ 1.25 \cdot (g_{orsi} + g_{levyt}) \cdot (L_o - 0.5 \cdot d_p) + q_{merkki.v} \cdot B_t + 1.5 \cdot \psi_{s.0} \cdot N_s \right]$$

$$V_{Ed,z} = 22 \cdot \text{kN}$$

Leikkausvoima vaakasuunnassa

$$V_{Ed,y} := 1.5 \cdot \left[ -F_{x,w} + -q_{w.o} \cdot \left( L_o - B_t - \frac{d_p}{2} + e_{y.a} - LL_e \right) \right]$$

$$V_{Ed,y} = -27 \cdot \text{kN}$$

## Normaalivoiman ja taivutuksen yhteisvaikutus

Kaavat (6.61 ja 6.62)

### Puristettu ja taivutettu sauva

#### Nurjahtavalle ja kiepahtavalle sauvalle

Liite B taulukko B.3

$$C_{my} := 1.0$$

Tasainen  
momenttipinta,  
varman päälle

$$C_{mz} := 1.0$$

Poikkileikkausluokissa 1-3

$$\Delta M_{Ed,y} := 0$$

$$\Delta M_{Ed,z} := 0$$

Liite B taulukko B.1

$$k_{yy} := \min \left[ C_{my} \cdot \left[ 1 + \left[ (\lambda_{-y}) - 0.2 \right] \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right], C_{my} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = 1.00$$

$$k_{zz} := \min \left[ C_{mz} \cdot \left[ 1 + \left[ (\lambda_{-z}) - 0.2 \right] \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right], C_{mz} \cdot \left( 1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right] = 1.00$$

$$k_{yz} := 0.6 \cdot k_{zz} = 0.600$$

$$k_{zy} := 0.6 \cdot k_{yy} = 0.600$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1a} := \frac{N_{Ed}}{\left( \frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} + k_{yy} \cdot \frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\frac{M_{Rk,z}}{\gamma_{M1}}}$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1a} = 0.533$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1b} := \frac{N_{Ed}}{\left( \frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} + k_{zy} \cdot \frac{|M_{Ed,y} + \Delta M_{Ed,y}|}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk,y}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{|M_{Ed,z} + \Delta M_{Ed,z}|}{\frac{M_{Rk,z}}{\gamma_{M1}}}$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1b} = 0.629$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1} := \max(\text{Yhteisvaikutus\_1a}, \text{Yhteisvaikutus\_1b})$$

$$\text{Yhteisvaikutus\_1} = 0.629$$

$$\text{Yhteisvaikutus} := \begin{cases} \text{"KESTÄÄ"} & \text{if } \text{Yhteisvaikutus\_1} \leq 1 \\ \text{"EI KESTÄ"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Yhteisvaikutus} = \text{"KESTÄÄ"}$$

Jos kiepahdusta ja nurjahdusta ei tarvitse ottaa huomioon

Poikkileikkausluokissa 1 ja 2

$$n_V := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$$

$$n_V = 0$$

$$a_{V,y} := \min\left(\frac{A_{V,y,r}}{A_{tot,r}}, 0.5\right)$$

$$a_{V,y} = 0.478$$

$$a_{V,z} := \min\left(\frac{A_{V,z,r}}{A_{tot,r}}, 0.5\right)$$

$$a_{V,z} = 0.478$$

$$M_{N,Rd,y} := \min\left(M_{Rd,y} \cdot \frac{1 - n_V}{1 - 0.5 \cdot a_{V,y}}, M_{Rd,y}\right)$$

$$M_{N,Rd,y} = 551 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{N,Rd,z} := \min\left(M_{Rd,z} \cdot \frac{1 - n_V}{1 - 0.5 \cdot a_{V,z}}, M_{Rd,z}\right)$$

$$M_{N,Rd,z} = 551 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha := \min\left(1.66, \frac{1.66}{1 - 1.13 \cdot n_V^2}\right) = 1.660$$

$$\beta := \alpha$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_2 := \left(\frac{|M_{Ed,y}|}{M_{N,Rd,y}}\right)^\alpha + \left(\frac{|M_{Ed,z}|}{M_{N,Rd,z}}\right)^\beta$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_2 = 0.337$$

Jos poikkileikkausluokassa 3

$$\text{Yhteisvaikutus}_3 := \frac{\frac{\sigma_v}{f_y}}{\gamma_{M0}}$$

$$\text{Yhteisvaikutus}_3 = 0.856$$

Poikkileikkausluokan mukainen yhteisvaikutus

$$\text{Yhteisvaikutus} = 0.629$$

Profiilin kestävyys

$$\text{Profiili} = \text{"KESTÄÄ"}$$

## 11 Liitosten mitoitus

Mitoitetaan ulokeportaalin liitokset:

1. Orren jatkoksen päätylevyliitos
2. Orren kiinnittyminen pylvääseen
3. Perustusliitos



## 11.1 Orren jatkoksen päätylevyliitos

Orsi koostuu kahdesta putkesta, jotka liitetään toisiinsa päätylevyliitoksella. Pylvääseen kiinnitetään osana pylvästä lyhyempi osuus. Lyhyempään osaan kiinnitetään tarvittavan mittainen jatko-osa työmaalla. Liitoksen mitoitus tehdään jatko-osan poikkileikkauksen avulla. Jatko-osassa käytetään ohuempiseinäistä putkea.

### Materiaaliominaisuudet

Putkien ja liitoslevyjen materiaali  
(levyjen paksuus  $t \leq 40$  mm)

$$f_y = 355 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_u := 510 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\beta_w := 0.9 \quad \text{S355}$$

$$\gamma_{M2} := 1.25$$

### Voimasuureet

Taivutusmomentti pystysuunnassa

$$M_{\text{Ed},y} = -122 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusmomentti pilarin ympäri (vaakatasossa)

$$M_{\text{Ed},z} = -242 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{\text{Ed},x} = 54 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Leikkausvoima pystysuunnassa

$$V_{\text{Ed},z} = 22 \cdot \text{kN}$$

Leikkausvoima vaakasuunnassa

$$V_{\text{Ed},y} = -27 \cdot \text{kN}$$

### Liitoslevyjen hitsien mitoitus

Jatko-osan poikkileikkausmitat

$$b = 300 \cdot \text{mm} \quad h = 300 \cdot \text{mm}$$

$$t = 12.5 \cdot \text{mm} \quad A = 14375 \cdot \text{mm}^2$$

Valitaan hitsin a-mitta

$$a := 12 \text{ mm}$$

Hitsin keskilinjan korkeus

$$h_{\text{we}} := h + a = 312 \cdot \text{mm}$$

Hitsin keskilinjan leveys

$$b_{\text{we}} := b + a = 312 \cdot \text{mm}$$

Hitsin tehokas pituus

$$l_{\text{eff}} := 2 \cdot b_{\text{we}} + 2 \cdot h_{\text{we}} = 1248 \cdot \text{mm}$$

Hitsin pinta-ala

$$A_{\text{we}} := l_{\text{eff}} \cdot a = 14976 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{\text{t},\text{we}} := (h_{\text{we}} - 0.5a) \cdot (b_{\text{we}} - 0.5a)$$

$$A_{\text{t},\text{we}} = 93636 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{\text{v},\text{z},\text{we}} := 2 \cdot a (h_{\text{we}} - a)$$

$$A_{\text{v},\text{z}} = 6875 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{\text{v},\text{y},\text{we}} := 2 \cdot a (b_{\text{we}} - a)$$

$$A_{\text{v},\text{y}} = 6875 \cdot \text{mm}^2$$

Hitsin kohdan jäyhyysmomentit hitsin keskilinjaan mukaan

$$I_{y.we} := k_{y.l} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{a \cdot (h_{we} - 2a)^3}{12} + 2 \cdot \frac{b_{we} \cdot a^3}{12} + 2 \cdot b_{we} \cdot a \cdot \left( \frac{h_{we} - a}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_{y.we} = 19904 \cdot \text{cm}^4$$

$$I_{z.we} := k_{z.l} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{b_{we}^3 \cdot a}{12} + 2 \cdot \frac{a^3 \cdot (h_{we} - 2a)}{12} + 2 \cdot [a \cdot (h_{we} - 2a)] \cdot \left( \frac{b_{we} - a}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_{z.we} = 19904 \cdot \text{cm}^4$$

Kertoimilla otetaan huomioon kulmien pyöristykset

$$k_{y.l} = 0.920 \quad k_{y.l} = 0.920 \quad k_t = 0.880$$

Vastaavasti taivutusvastukset ja vääntövastus

$$W_{el.y.we} := \frac{2I_{y.we}}{h_{we}}$$

$$W_{el.y.we} = 1276 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{el.z.we} := \frac{2I_{z.we}}{b_{we}}$$

$$W_{el.z.we} = 1276 \cdot \text{cm}^3$$

$$W_{t.we} := k_t \cdot 2 \cdot A_{t.we} \cdot a$$

$$W_{t.we} = 1978 \cdot \text{cm}^3$$

### Jännitykset

Hitsin normaalijännitykset (koordinaatiston origo alakulmassa)

$$\sigma_{s.we}(z, y) := \frac{M_{Ed.y} \cdot \left( \frac{h_{we}}{2} - z \right)}{I_{y.we}} + \frac{M_{Ed.z} \cdot \left( \frac{b_{we}}{2} - y \right)}{I_{z.we}} + \frac{-N_{Ed}}{A_{we}}$$

$$\sigma_{1.we} := \sigma_{s.we}(h_{we}, b_{we}) = 285 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{2.we} := \sigma_{s.we}(h_{we}, 0) = -94 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{3.we} := \sigma_{s.we}(0, 0) = -285 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{4.we} := \sigma_{s.we}(0, b_{we}) = 94 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Itseisarvoltaan suurin normaalijännitys

$$\sigma_L := \max(|\sigma_{1.we}|, |\sigma_{2.we}|, |\sigma_{3.we}|, |\sigma_{4.we}|)$$

$$\sigma_L = 285 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Leikkauksesta aiheutuva leikkausjännitys

Pystysuunnassa

$$\tau_{v.Ed.z.we} := \frac{V_{Ed.z}}{A_{v.z.we}} = 3.1 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Vaakasunnassa

$$\tau_{v.Ed.y.we} := \frac{V_{Ed.y}}{A_{v.y.we}} = -3.8 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys

$$\tau_{t.Ed.we} := \frac{|M_{Ed.x}|}{W_{t.we}} \quad \tau_{t.Ed.we} = 27.3 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

Mitoitettava leikkausjännitys

$$\tau_{II} := \max(|\tau_{v.Ed.z.we}|, |\tau_{v.Ed.y.we}|) + \tau_{t.Ed.we}$$

$$\tau_{II} = 31 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_L := \min(|\tau_{v.Ed.z.we}|, |\tau_{v.Ed.y.we}|)$$

$$\tau_L = 3 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

*Leikkausjännitys on jaettu, kuten poikkileikkauksen mitoituksessakin, kokonaan aina vain leikkauksen suunnan uumille*

**Valitun hitsin kestävyys**

$$\sqrt{\sigma_L^2 + 3 \cdot (\tau_L^2 + \tau_{II}^2)} = 290 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

≤

$$\frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 453 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

OK

$$\sigma_L = 285 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

≤

$$\frac{0.9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 367 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

OK

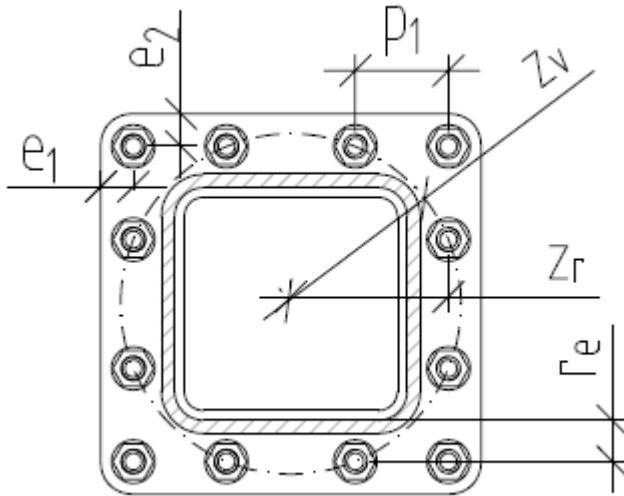
Hitsiä vastaan kohtisuora normaalijännitys mitoittaa

Käyttöaste

$$\max \left[ \frac{\sigma_L}{\frac{0.9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}}}, \frac{\sqrt{\sigma_L^2 + 3 \cdot (\tau_L^2 + \tau_{II}^2)}}{\left( \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \right)} \right] = 77.6 \cdot \%$$

**Hitsataan molempiin orsiin päätylevy kiinni profiilin ympäri tehtävällä pienahitsillä, jonka kokonaisvahvuus on 12 mm.**

## Liitoslevyjen ja ruuvien mitoitus



Kuva orren päätylevyliitoksesta

Levyn koko

$$b_l := 490\text{mm}$$

Kiinnityslevyn paksuus

$$t_{\text{levy}} := 40\text{mm}$$

Pultit lujuusluokkaa 8.8

$$f_{yb} := 0.8 \cdot 800\text{MPa} = 640 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ub} := 800\text{MPa}$$

Käytetään pultteja (hakaisija ja määrä)

$$d_M := 30\text{mm}$$

$$n_M := 12$$

Pultin kanta

$$d_m := 46\text{mm}$$

avainväli

Reijän halkaisija

$$d_0 := d_M + 3\text{mm} = 33 \cdot \text{mm}$$

SFS-EN 1090-2 + A1 kohta 6.6.1

Minimi reunaetäisyydet ja keksiövälit

Käytetyt reunaetäisyydet ja keksiövälit

$$e_{1,\min} := 1.2 \cdot d_0 = 40 \cdot \text{mm}$$

$$e_1 := 42\text{mm}$$

OK

$$e_{2,\min} := 1.2 \cdot d_0 = 40 \cdot \text{mm}$$

$$e_2 := 42\text{mm}$$

OK

$$p_{1,\min} := 2.2 \cdot d_0 = 73 \cdot \text{mm}$$

$$p_1 := 120\text{mm}$$

OK

$$p_2 := 120\text{mm}$$

Ruuvien etäisyydet orren keskipisteestä

$$z_r := 203\text{mm}$$

Ruuvien tehokas poikkipinta-ala

$$z_v := 219\text{mm}$$

$$A_b := 561\text{mm}^2$$

$$\alpha_v := 0.6$$

lujuus 8.8

## Leikkauskestävyys

Leikkausvoima

$$F_{Ed.v.0} := \sqrt{V_{Ed.y}^2 + V_{Ed.z}^2} = 35 \cdot \text{kN}$$

Leikkausvoima väännöstä  
(yksinkertaistetaan hieman varmalle puolelle  
ajattelemalla kaikki ruuvit säteelle  $z_r$ )

$$F_{Ed.v.mx} := \frac{M_{Ed.x}}{z_v} = 246 \cdot \text{kN}$$

Mitoittava leikkausvoima  
(ajatellaan yksinkertaisesti, että vääntö- ja  
leikkausvoima aiheuttavat leikkausta samaan  
suuntaan)

$$F_{Ed.v} := F_{Ed.v.0} + F_{Ed.v.mx} = 281 \cdot \text{kN}$$

## Leikkauskestävyys leikettä kohti

Yhden ruuvin kapasiteetti

$$F_{v.Rd.1} := \frac{\alpha_v f_{ub} \cdot A_b}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{v.Rd.1} = 215 \cdot \text{kN}$$

## Reunapuristuskestävyys

Reunimmainen ruuvi

$$\alpha_{b,r} := \min\left(\frac{f_{ub}}{f_u}, 1, \frac{e_1}{3 \cdot d_0}\right) = 0.42$$

$$k_{1,r} := \min\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) = 1.86$$

Muut ruuvi

$$\alpha_{b,m} := \min\left(\frac{f_{ub}}{f_u}, 1, \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}\right) = 0.96$$

$$k_{1,m} := \min\left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right) = 2.50$$

*Leikkauskestävyys ei ole ruuvien kannalta mitoittava → Lasketaan kapasiteetti ajattelemalla  
kaikki ruuvit reunan ruuveiksi*

Yhden ruuvin kapasiteetti

$$F_{b.Rd.1} := \frac{k_{1,r} \cdot \alpha_{b,r} \cdot f_u \cdot d_M \cdot t_{levy}}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b.Rd.1} = 387 \cdot \text{kN}$$

Koko liitoksen leikkauksen kapasiteetti

$$\text{Kestävyys } F_{v.Rd} := n_M \cdot \min(F_{v.Rd.1}, F_{b.Rd.1})$$

Käyttöaste

$$F_{v.Rd} = 2585 \cdot \text{kN} \geq$$

$$F_{Ed.v} = 281 \cdot \text{kN}$$

$$\frac{F_{Ed.v}}{F_{v.Rd}} = 11. \%$$

OK

## Taivutuskestävyys

### Vetokestävyys

Ruuvit normaaleja  
(ei uppokantaisia)

$$k_2 := 0.9$$

Yhden ruuvin vetokestävyys

$$F_{t.Rd.1} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_b}{\gamma_{M2}} = 323 \cdot \text{kN}$$

### Lävistymiskestävyys

$$B_{p.Rd.1} := \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 442 \cdot \text{kN}$$

### Taivutuskapasiteetti

Ruuvien lukumäärät riveissä ja näiden etäisyydet puristuskeskiöstä. Puristuskeskiöksi valitaan putkipalkin ulkoreuna. Ei oteta huomioon puristuskeskiön "väärällä" puolella olevia ruuveja.

	Pystyssä		Vaakasuunnassa	
Kauimpana	$n_{y.1} := 4$	$e_{y.1} := 2 \cdot z_r - r_e = 353 \cdot \text{mm}$	$n_{z.1} := 4$	$e_{z.1} := e_{y.1}$
	$n_{y.2} := 2$	$e_{y.2} := 2 \cdot z_r - p_1 - r_e = 233 \cdot \text{mm}$	$n_{z.2} := 2$	$e_{z.2} := e_{y.2}$
	$n_{y.3} := 2$	$e_{y.3} := p_1 - r_e = 67 \cdot \text{mm}$	$n_{z.3} := 2$	$e_{z.3} := e_{y.3}$
	$n_{y.4} := 4$		$n_{z.4} := 4$	

Taivutuskapasiteetti pystysuunnassa  
(lasketaan alimman rivin suhteen)

$$M_{Rd.y} := (n_{y.1} \cdot e_{y.1} + n_{y.2} \cdot e_{y.2} + n_{y.3} \cdot e_{y.3}) \cdot \min(F_{t.Rd.1}, B_{p.Rd.1})$$

$$M_{Rd.y} = 650 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \geq |M_{Ed.y}| = 122 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{|M_{Ed.y}|}{M_{Rd.y}} = 18.7\%$$

Taivutuskapasiteetti vaakasuunnassa  
(lasketaan reunimmaisen rivin suhteen)

$$M_{Rd.z} := (n_{z.1} \cdot e_{z.1} + n_{z.2} \cdot e_{z.2} + n_{z.3} \cdot e_{z.3}) \cdot \min(F_{t.Rd.1}, B_{p.Rd.1})$$

$$M_{Rd.z} = 650 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \geq |M_{Ed.z}| = 242 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{|M_{Ed.z}|}{M_{Rd.z}} = 37.2\%$$

Nyt on laskettuissa momenttikapasiteeteissa on käytetty samoja ruuveja osittain molempien suuntien kapasiteeteissa. Tarkistetaan tämän johdosta yhteisvaikutus varman päälle.

$$\frac{|M_{Ed.y}|}{M_{Rd.y}} + \frac{|M_{Ed.z}|}{M_{Rd.z}} = 0.559$$

$\leq$

1

OK

## Yhdistetty veto- ja leikkauskestävyys

Tarkistetaan varman päälle käyttäen momenttien yhteisvaikutusta

$$\frac{F_{Ed.v}}{F_{v.Rd}} + \frac{\frac{|M_{Ed.y}|}{M_{Rd.y}} + \frac{|M_{Ed.z}|}{M_{Rd.z}}}{1.4} = 0.508 \leq 1 \quad \text{OK}$$

## 11.2 Orren kiinnittyminen pylvääseen

Kiinnitetään orren putki läpihitseillä pylvääseen. Käytetään lisäksi kahta jäykistelevyä putkipalkin yläpuolella. Lasketaan jännitykset hitseissä.

Jäykisteiden hitsien korkeus  
ja leveys per jäykiste (väh. 5 mm piena ympäri)

$$h_{w,j} := 250\text{mm} \quad b_{w,j} := 10\text{mm}$$

$$A_{we} := 221\text{cm}^2$$

$$A_{v,z,we} := A_{v,z} + 2 \cdot h_{w,j} \cdot b_{w,j} = 136 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{v,y,we} := A_{v,y} = 86 \cdot \text{cm}^2$$

Hitsin kohdan jäyhyysmomentit hitsin keskilinjän mukaan

Pystysuunnassa

$$I_{y,we} := 53930 \text{ cm}^4$$

Etäisyys reunaan  
(pystysuunta)

$$z_{we,a} := (0.5 \cdot 550 - 62.3)\text{mm} = 213 \cdot \text{mm}$$

Poikkisuunnassa

$$I_{z,we} := 27080 \text{ cm}^4$$

Etäisyys reunaan  
(vaakasuunta)

$$z_{we,y} := -(550\text{mm} - z_{we,a}) = -337 \cdot \text{mm}$$

$$y_{we} := 0.5 \cdot (300)\text{mm} = 150 \cdot \text{mm}$$

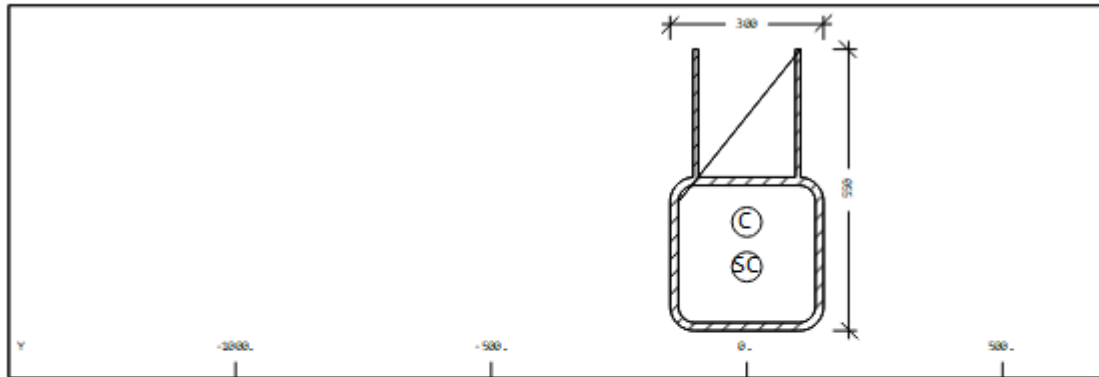
Vääntöjäyhyys

$$I_{t,we} := 37990 \text{ cm}^4$$

Käytetään vääntöjäykkyytenä putken vääntöjäykkyyttä

$$W_{t,we} := W_t = 2401 \cdot \text{cm}^3$$

Cross section No. 15 - Orren liitos pylvääseen



Cross section No. 15 - Orren liitos pylvääseen

Static properties of cross section

Mat	A [mm <sup>2</sup> ]	Ay [mm <sup>2</sup> ]	Iy [mm <sup>4</sup> ]	yc [mm]	ysc [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	g [kg/m]
MRf	It [mm <sup>4</sup> ]	Az [mm <sup>2</sup> ]	Iz [mm <sup>4</sup> ]	zc [mm]	zsc [mm]	G [N/mm <sup>2</sup> ]	
		Ayz [mm <sup>2</sup> ]	Iyz [mm <sup>4</sup> ]				
3	2.2078E+04	6.939E+03	5.393E+08	0.0	0.0	210000	173.3
2	3.799E+08	1.199E+04	2.708E+08	-62.3	25.1	80769	(BEAM)
			-9.253E+00				



## Voimasuureet

Taivutusmomentti pystysuunnassa

$$M_{Ed.y} = -159 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusmomentti pilarin ympäri (vaakatasossa)

$$M_{Ed.z} = -283 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{Ed.x} = 54 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Leikkausvoima pystysuunnassa

$$V_{Ed.z} = 25 \cdot \text{kN}$$

Leikkausvoima vaakasuunnassa

$$V_{Ed.y} = -28 \cdot \text{kN}$$

## Jännitykset

Hitsin normaalijännitykset (koordinaatiston origo painopisteessä)

$$\sigma_{s.we}(z, y) := \frac{M_{Ed.y} \cdot (z)}{I_{y.we}} + \frac{M_{Ed.z} \cdot (y)}{I_{z.we}}$$

$$\sigma_{1.we} := \sigma_{s.we}(z_{we.a}, y_{we}) = -219 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{alakulma}$$

$$\sigma_{2.we} := \sigma_{s.we}(z_{we.y}, 105\text{mm}) = -10 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{3.we} := \sigma_{s.we}(z_{we.y}, -105\text{mm}) = 209 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{4.we} := \sigma_{s.we}(z_{we.a}, -y_{we}) = 94 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Itseisarvoltaan suurin normaalijännitys

$$\sigma_L := \max(|\sigma_{1.we}|, |\sigma_{2.we}|, |\sigma_{3.we}|, |\sigma_{4.we}|)$$

$$\sigma_L = 219 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Leikkauksesta aiheutuva leikkausjännitys

Pystysuunnassa

$$\tau_{v.Ed.z.we} := \frac{V_{Ed.z}}{A_{v.z.we}} = 1.9 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vaakasuunnassa

$$\tau_{v.Ed.y.we} := \frac{V_{Ed.y}}{A_{v.y.we}} = -3.2 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys

$$\tau_{t.Ed.we} := \frac{|M_{Ed.x}|}{W_{t.we}} \quad \tau_{t.Ed.we} = 22.5 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Mitoitettava leikkausjännitys

$$\tau_{II} := \max\left(\left|\tau_{v.Ed.z.we}\right|, \left|\tau_{v.Ed.y.we}\right|\right) + \tau_{t.Ed.we}$$

$$\tau_{II} = 26 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_L := \min\left(\left|\tau_{v.Ed.z.we}\right|, \left|\tau_{v.Ed.y.we}\right|\right)$$

$$\tau_L = 2 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

*Leikkausjännitys on jaettu, kuten poikkileikkauksen mitoituksessakin, kokonaan aina vain leikkauksen suunnan uumille*

**Valitun hitsin kestävyys**

$$\sqrt{\sigma_L^2 + 3 \cdot (\tau_L^2 + \tau_{II}^2)} = 224 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$\leq$

$$\frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 453 \cdot \frac{N}{mm^2} \quad \text{OK}$$

$$\sigma_L = 219 \cdot \frac{N}{mm^2}$$

$\leq$

$$\frac{0.9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 367 \cdot \frac{N}{mm^2} \quad \text{OK}$$

Hitsiä vastaan kohtisuora normaalijännitys mitoittaa

Käyttöaste

$$\max \left[ \frac{\sigma_L}{\frac{0.9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}}}, \frac{\sqrt{\sigma_L^2 + 3 \cdot (\tau_L^2 + \tau_{II}^2)}}{\left( \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \right)} \right] = 59.7 \%$$

**Hitsataan molempiin orsiin kiinni pylvääseen läpihitsillä. Hitsataan lisäksi jäykisteen kiinni sekä orteen että pylvääseen 5 mm pienalla ympäri.**

## 11.3 Perustusliitos

### Voimasuureet

Puristus

Taivutusmomentti tien suunnassa

$$M_{Ed,y} = 293 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Taivutusmomentti kohtisuorassa tien suuntaan nähden

$$M_{Ed,x} = -159 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Mitoittava taivutusmomentti pääsuuntaan

$$M_{Ed} = 333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Vääntö

$$M_{Ed,z} = -288 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Mitoittava leikkausvoima pääsuuntaan

$$V_{Ed} = 31 \cdot \text{kN}$$

### Liitoslevyjen hitsien mitoitus

Pylväs

$$d_p = 406.4 \cdot \text{mm}$$

$$t_p = 12.5 \cdot \text{mm}$$

Valitaan hitsin a-mitta

$$a := 12.5 \text{ mm}$$

$$d_{p.we} := d_p + 2a = 431 \cdot \text{mm}$$

$$d_{p.0.we} := d_p$$

$$A_{we} := \frac{\pi}{4} \cdot (d_{p.we}^2 - d_{p.0.we}^2)$$

$$A_{we} = 16450 \cdot \text{mm}^2$$

$$I_{we} := \frac{\pi}{64} \cdot (d_{p.we}^4 - d_{p.0.we}^4)$$

$$I_{we} = 36115 \cdot \text{cm}^4$$

$$W_{el.we} := \frac{2I_{we}}{d_{p.we}}$$

$$W_{el.we} = 1674 \cdot \text{cm}^3$$

$$I_{t.we} := \frac{\pi}{32} \cdot (d_{p.we}^4 - d_{p.0.we}^4)$$

$$I_{t.we} = 72230 \cdot \text{cm}^4$$

$$W_{t.we} := \frac{2 \cdot I_{t.we}}{d_{p.we}}$$

$$W_{t.we} = 3349 \cdot \text{cm}^3$$

## Jännitykset

Normaalijännitys

$$\sigma_L := \frac{N_{Ed}}{A_{we}} + \frac{M_{Ed}}{W_{el.we}}$$

$$\sigma_L = 201 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Leikkauksesta aiheutuva leikkausjännitys

$$\tau_{v.Ed.we} := \frac{V_{Ed}}{A_{we}} = 2 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys

$$\tau_{t.Ed.we} := \frac{|M_{Ed.z}|}{W_{t.we}} = 86 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{Ed.we} := \tau_{v.Ed.we} + \tau_{t.Ed.we} = 88 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Mitoitettava leikkausjännitys

$$\tau_{II} := \max(|\tau_{v.Ed.z.we}|, |\tau_{v.Ed.y.we}|) + \tau_{t.Ed.we} \quad \tau_{II} = 89 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Valitun hitsin kestävyys

$$\sqrt{\sigma_L^2 + 3 \cdot (\tau_L^2 + \tau_{II}^2)} = 254 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$\leq$

$$\frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 453 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{OK}$$

$$\sigma_L = 201 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$\leq$

$$\frac{0.9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 367 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{OK}$$

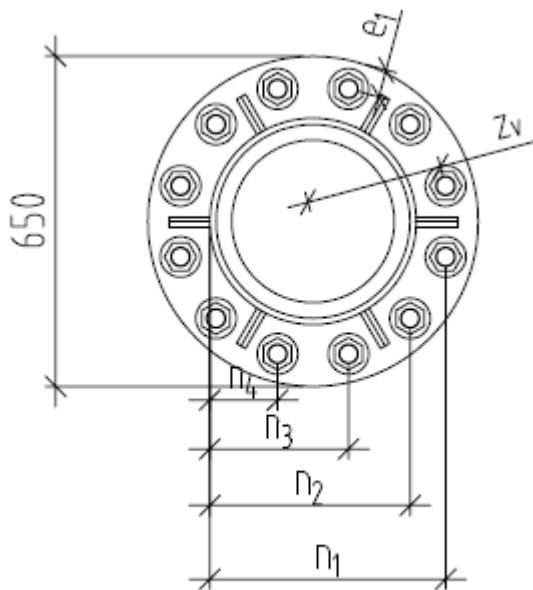
Hitsiä vastaan kohtisuora normaalijännitys mitoittaa

Käyttöaste

$$\max \left[ \frac{\sigma_L}{0.9 \cdot f_u}, \frac{\sqrt{\sigma_L^2 + 3 \cdot (\tau_L^2 + \tau_{II}^2)}}{\left( \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \right)} \right] = 56.0 \%$$

Hitsataan päätylevy kiinni profiilin ympäri tehtävällä läpihitsillä (kokonaisvahvuus on 12,5) mm. Lisäksi käytetään vahvikelevyä pilarin juuressa. Vahvikelevyt hitsataan päätylevyyn 7 mm pienalla. Mitoituksellisesti ei hyödynnetä vahvikelevyjä.

## Liitoslevvien ja ruuvien mitoitus



Kuva perustusliitoksesta. Käytetään hieman suurempaa pohjalevyä kuin kuvassa (650 → 730)

Levyn koko

$$b_l := 730 \text{ mm}$$

Levyn paksuus

$$t_{\text{levy}} := 40 \text{ mm}$$

Pultit lujuusluokkaa 8.8

$$f_{yb} := 640 \text{ MPa} = 640 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ub} := 800 \text{ MPa}$$

Käytetään pultteja (hakaisija ja määrä)

$$d_M := 36 \text{ mm}$$

$$n_M := 12$$

Pultin kanta

$$d_m := 55 \text{ mm}$$

avainväli

Reijän halkaisija

$$d_0 := d_M + 8 \text{ mm} = 44 \cdot \text{mm}$$

SFS-EN 1090-2 + A1 kohta 6.6.1

Minimi reunaetäisyydet ja keksiövälit

Käytetyt reunaetäisyydet ja keksiövälit

$$e_{1,\min} := 1.2 \cdot d_0 = 53 \cdot \text{mm}$$

$$e_1 := 55 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

$$e_{2,\min} := 1.2 \cdot d_0 = 53 \cdot \text{mm}$$

$$e_2 := 55 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

$$p_{1,\min} := 2.2 \cdot d_0 = 97 \cdot \text{mm}$$

$$p_1 := 160 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

$$p_2 := 160 \text{ mm}$$

$$r_e := \frac{b_l - h_0 - 2 \cdot e_1}{2} = 160 \cdot \text{mm}$$

Ruuvien momenttivarret

$$z_V := 310 \text{ mm}$$

$$A_b := 817 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_V := 0.6 \quad \text{lujuus 8.8}$$

## Leikkauskestävyys

Leikkausvoima

$$F_{Ed.v.0} := \sqrt{V_{Ed.y}^2 + V_{Ed.z}^2} = 26 \cdot \text{kN}$$

Leikkausvoima väännöstä  
(yksinkertaistetaan hieman varmalle puolelle  
ajattelemalla kaikki ruuvit säteelle  $z_r$ )

$$F_{Ed.v.mx} := \frac{|M_{Ed.z}|}{z_v} = 929 \cdot \text{kN}$$

Mitoittava leikkausvoima  
(ajatellaan yksinkertaisesti, että vääntö- ja  
leikkausvoima aiheuttavat leikkausta samaan  
suuntaan)

$$F_{Ed.v} := F_{Ed.v.0} + F_{Ed.v.mx} = 955 \cdot \text{kN}$$

### Leikkauskestävyys leikettä kohti

EN 1993-1-8 osan 6.2.2 (7)

$$F_{v.Rd.1} := \frac{\left( 0.44 - 0.0003 \cdot \frac{f_{yb}}{\frac{N}{\text{mm}^2}} \right) f_{ub} \cdot A_b}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{v.Rd.1} = 130 \cdot \text{kN}$$

### Reunapuristuskestävyys

Reunimmainen ruuvi

$$\alpha_{b,r} := \min \left( \frac{f_{ub}}{f_u}, 1, \frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) = 0.42$$

$$k_{1,r} := \min \left( 2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) = 1.80$$

Muut ruuvi

$$\alpha_{b,m} := \min \left( \frac{f_{ub}}{f_u}, 1, \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} \right) = 0.96$$

$$k_{1,m} := \min \left( 1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1.7, 2.5 \right) = 2.50$$

Reunapuristuskestävyys ei ole ruuvien kannalta mitoittava. Lasketaan kapasiteetti  
ajattelemalla kaikki ruuvit reunan ruuveiksi

Yhden ruuvin kapasiteetti

$$F_{b.Rd.1} := \frac{k_{1,r} \cdot \alpha_{b,r} \cdot f_u \cdot d_M \cdot t_{levy}}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b.Rd.1} = 441 \cdot \text{kN}$$

Reunapuristuskestävyys ei rajoita ruuvien kestävyttä, vaikka käytettäisiin ylisuuria reikiä:

$$0.8 \cdot F_{b.Rd.1} = 353 \cdot \text{kN}$$

Koko liitoksen leikkaukskapasiteetti

$$\text{Kestävyys} \quad F_{v.Rd} := n_M \cdot \min(F_{v.Rd.1}, F_{b.Rd.1})$$

Käyttöaste

$$F_{v.Rd} = 1556 \cdot \text{kN}$$

$\geq$

$$F_{Ed.v} = 955 \cdot \text{kN}$$

$$\frac{F_{Ed.v}}{F_{v.Rd}} = 61\cdot\%$$

OK

Levyn alapuolisia leikkausliittimiä ei ole käytetty hyväksi mitoituksessa

## Taivutuskestävyys

### Vetokestävyys

Ruuvit normaaleja  
(ei uppokantaisia)

$$k_2 := 0.9$$

Yhden ruuvin vetokestävyys

$$F_{t.Rd.1} := \min\left(\frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_b}{\gamma_{M2}}, 436 \text{ kN}\right) = 436 \cdot \text{kN}$$

### Lävistymiskestävyys

$$B_{p.Rd.1} := \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 529 \cdot \text{kN}$$

### Taivutuskapasiteetti

Ruuvien lukumäärät riveissä ja näiden etäisyydet puristuskeskiöstä. Puristuskeskiöksi valitaan putkipalkin ulkoreuna. Ei oteta huomioon puristuskeskiön "väärällä" puolella olevia ruuveja.

Pystyssä

Kauimpana

$n_1 := 2$	$e_1 := 503 \text{ mm}$
$n_2 := 2$	$e_2 := 422 \text{ mm}$
$n_3 := 2$	$e_3 := 283 \text{ mm}$
$n_4 := 2$	$e_4 := 123 \text{ mm}$

Taivutuskapasiteetti pystyssuunnassa  
(lasketaan alimman rivin suhteen)

$$M_{Rd.y} := (n_1 \cdot e_1 + n_2 \cdot e_2 + n_3 \cdot e_3 + n_4 \cdot e_4) \cdot \min(F_{t.Rd.1}, B_{p.Rd.1})$$

$$M_{Rd.y} = 1300 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \geq |M_{Ed}| = 333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{|M_{Ed}|}{M_{Rd.y}} = 25.6 \cdot \%$$

### Yhdistetty veto- ja leikkauskestävyys

$$\frac{F_{Ed.v}}{F_{v.Rd}} + \frac{\frac{|M_{Ed}|}{M_{Rd.y}}}{1.4} = 0.796$$

$\leq$

1

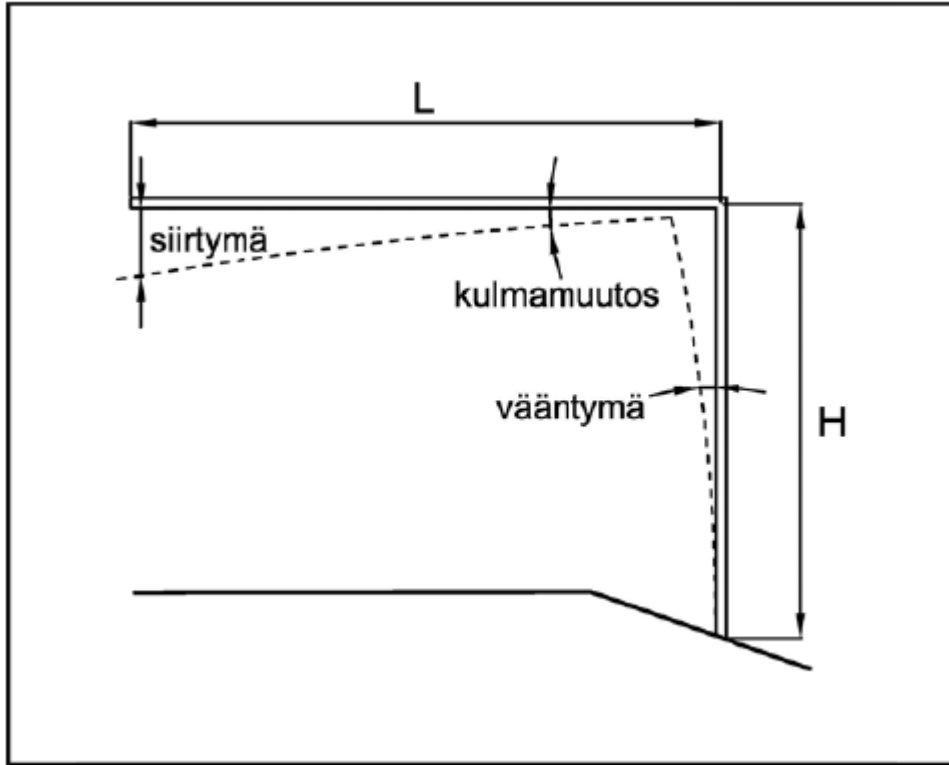
OK

Ankkuripulttien keskinäinen etäisyys täyttää juuri minimivaatimuksen. Minimivaatimus on 160 mm ja pulttien keskinäinen etäisyys on nyt 162 mm. 10 pultilla kapasiteetti vielä riittää. Ei viedä kuitenkaan mitoitusliian tiukille ja käytetään tämän johdosta 12 pulttia. Käytetään betonin murtokartiolla raudotteita. Vääntö mitoittaa. Käytetään lisäksi pohjalevyssä alapuolisia lattateräksiä, joilla viedään alustavalun kautta vääntöä suoraan pulteille ilman, että pulteille syntyy leikkausrasitusta pohjalevystä kierteiden osalle. Kierteiden osan väsytykskestävyys leikkaukselle on huono. Vastaavaa tapaa käytetään käytössä olevissa ristikkorakenteisissa tyypilokeportaaleissa.

## 12 Siirtymätarkastelut

Tarkasteellaan ulkoportaalin siirtymät Liikenneviraston ohjeen Liikennemerkkien rakenne ja pystytys ohjeen (Liikenneviraston ohjeita 20/2013) mukaisesti.

Ulokeportaalin kaikki siirtymät tarkistetaan käyttämällä esitetyn ohjeen mukaisesti käyttämällä 0,49-kertaista tuulenpainetta.



*Tarkasteltavat muodonmuutokset ohjeen Liikennemerkkien rakenne ja pystytys mukaan*



## Siirtymät rakenteen omasta painosta

Siirtymät paaluperustuksella perustuksen siirtymät huomioon ottaen ja anturaperustuksella ilman perustusten siirtymien huomioon ottamista.

	<i>Paaluperustus</i>	<i>(Anturaperustus)</i>
Tien suunnassa	$\delta_{x_p} := 0\text{mm}$	
Kohtisuorassa tien suuntaan	$\delta_{y_p} := 74\text{mm}$	(52 mm)
Pystysuunnassa	$\delta_{z_p} := 239\text{mm}$	(212 mm)

Käytettävä esikohotus (kappale 5.3, portaalien sallitut toleranssit)

Sallitut vaihteluvälit ja käytettävät esikohotukset

Pylvään ennakkovinouttaminen

0...

$$0.02 \cdot H = 164 \cdot \text{mm}$$

→

Käytetään ennakkovinoutta **150 mm**, jolloin portaalin pylväs jää vinoon  $\sim 150 - 74 = 76 \text{ mm}$  (0...164 mm)

Ulokkeen kärjen asema suhteessa vaakatasoon (esikohotus)

0...

$$0.04 \cdot L_o = 480 \cdot \text{mm}$$

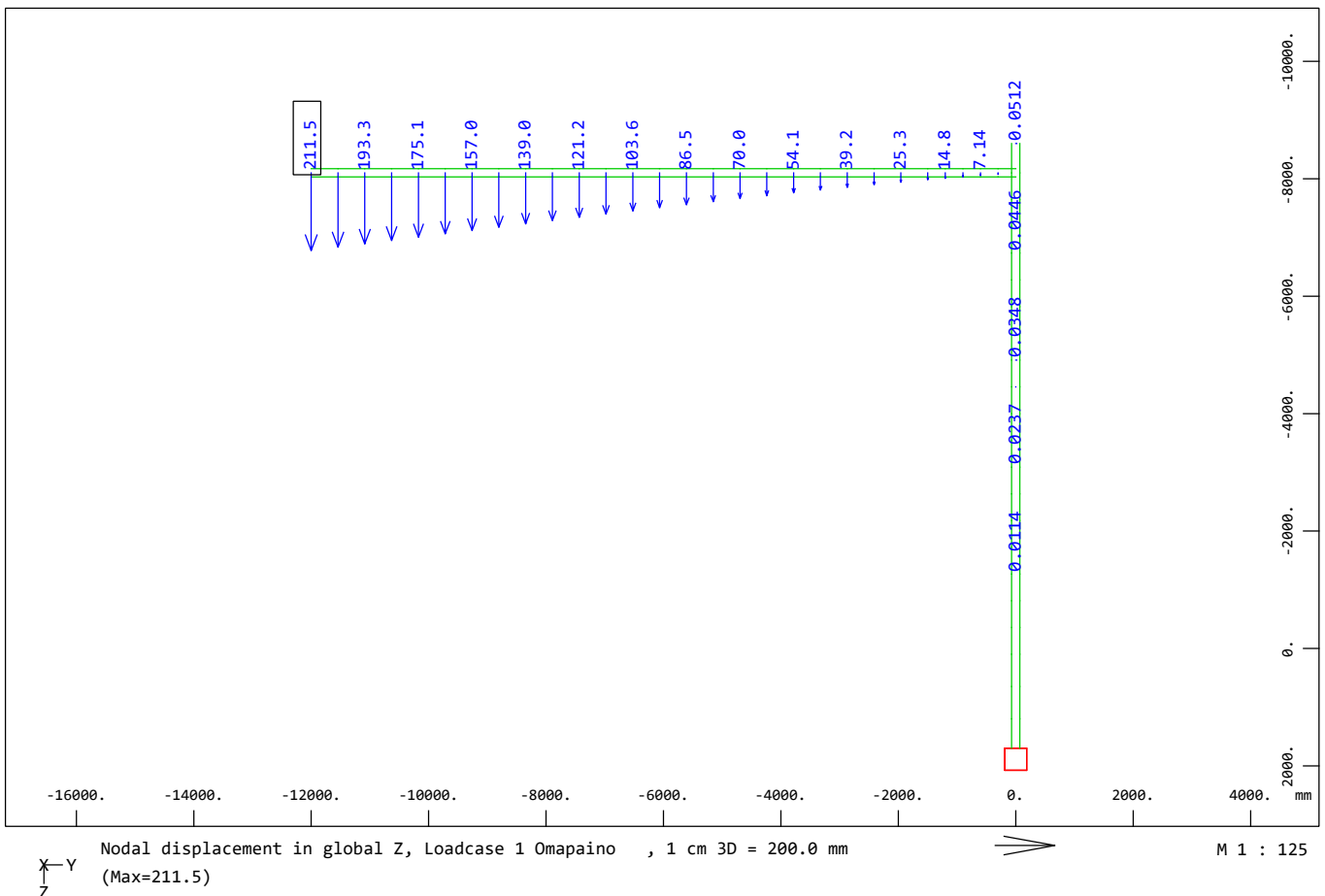
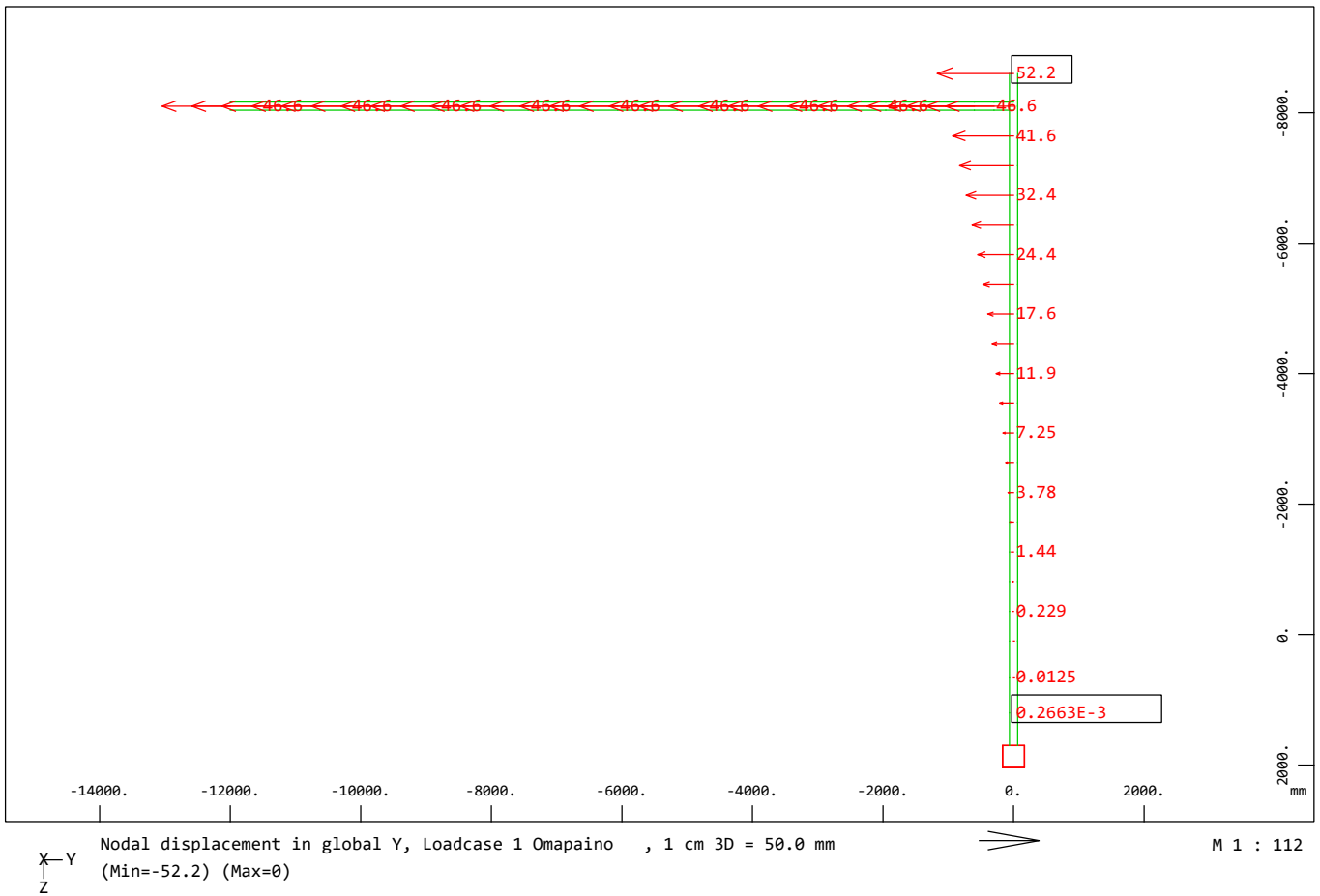
→

Käytetään esikohotusta **350 mm**, jolloin portaalin kärki jää koholle  $\sim 350 - 240 = 110 \text{ mm}$  (0...480 mm)

Esitetään seuraavilla sivuilla FEM-siirtymäkuvaajat.

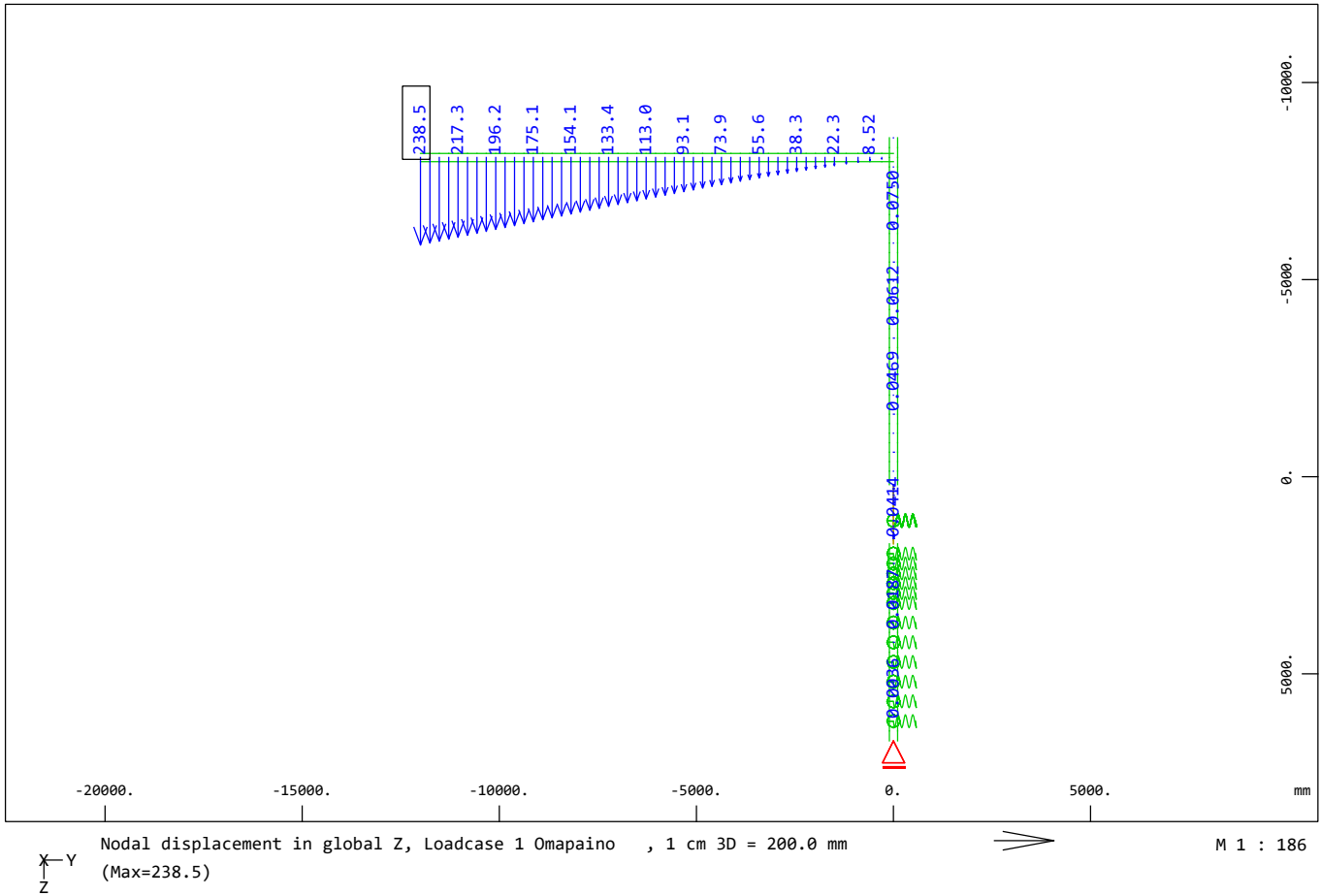
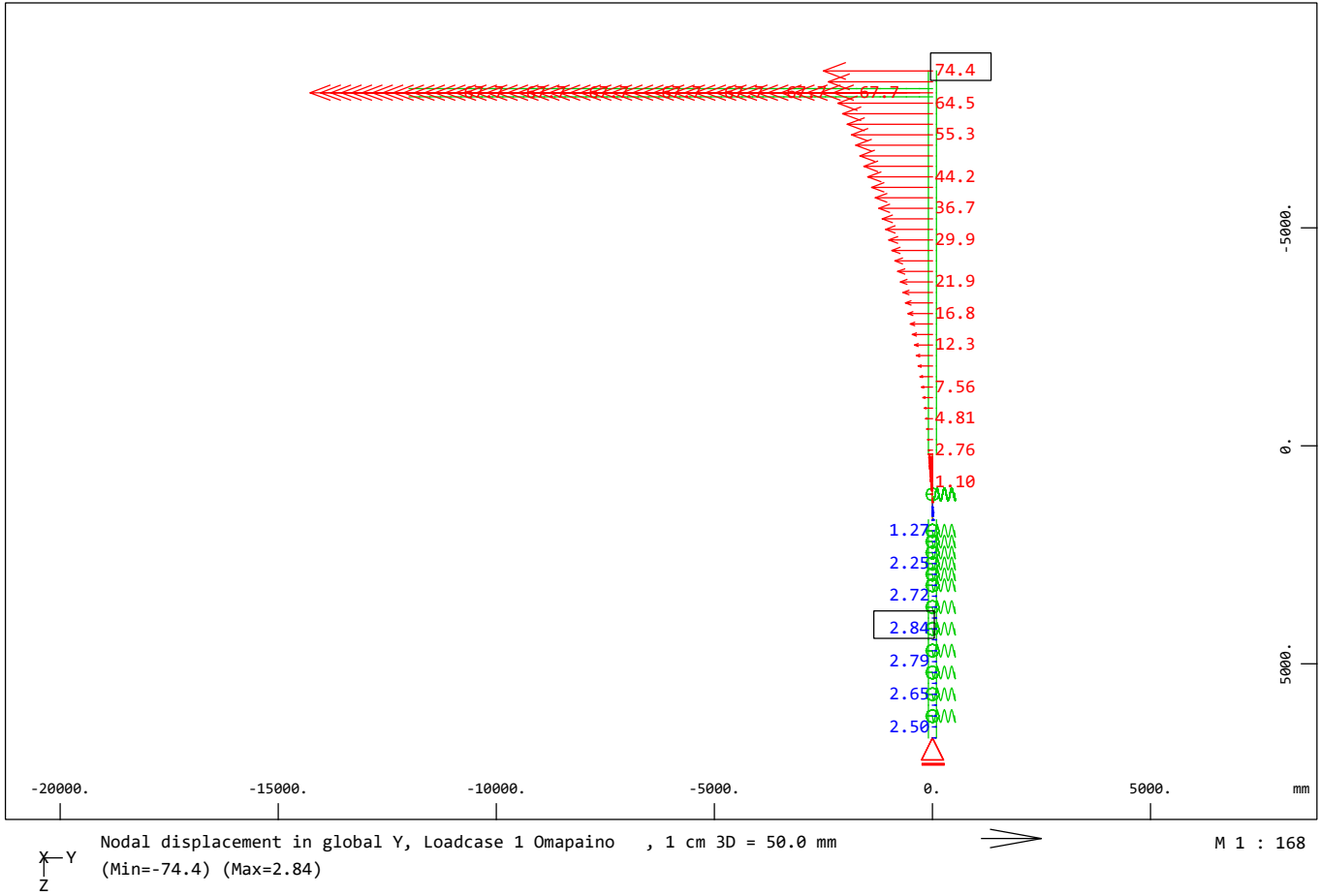
Portaali\_V01  
 Siirtymät

## Rakenteen omapaino - Anturaperustus



Portaali\_V01  
Siirtymät

**Rakenteen omapaino - Paaluperustus**



## Siirtymät tuulikuormalla

Siirtymät FEM-mallissa (tuulikuorma x 0,49) ulokeen päässä. Paaluperustus määräävä. Suluissa maanvarainen perustus

Tien suunnassa	$\delta_{x\_w} := 411\text{mm}$	(337 mm)
----------------	---------------------------------	----------

Kohtisuorassa tien suuntaan	$\delta_{y\_w} := 8.04\text{mm}$	(4,6 mm)
-----------------------------	----------------------------------	----------

Pystysuunnassa	$\delta_{z\_w} := 16.5\text{mm}$	(12,3 mm)
----------------	----------------------------------	-----------

Ulokkeen pään siirtymä saa olla korkeintaan:

$$\delta_{\text{sall\_w}} := 0.1 \cdot (L_o + H) \quad \delta_{\text{sall\_w}} = 2020 \cdot \text{mm}$$

Ulokkeen pituus	$L_o = 12000 \cdot \text{mm}$
-----------------	-------------------------------

Korkeus perustuksen yläpinnasta orren keskilinjalle	$H = 8200 \cdot \text{mm}$
--	----------------------------

Ulokkeen pään siirtymän käyttöaste

$$\delta_1 := \frac{\max(\delta_{x\_w}, \delta_{y\_w}, \delta_{z\_w})}{\delta_{\text{sall\_w}}} \quad \delta_1 = 0.203$$

Siirtymät on nyt tarkistettu siten, että missään suunnassa (x,y,z) ei sallita raja-arvoa suurempaa siirtymää. Liikennemerkkien rakenne ja pystytys -ohjeessa ei käy yksiselitteisesti ilmi tarkoitetaanko kyseisessä ohjeessa kaikkien suuntien siirtymiä, vai vain pystysuuntaista siirtymää (z).

Ohjeen siirtymäraja-arvot ovat liian suuret. Näitä ei voi todellisuudessa käyttää. Tehdään vertailulaskelmat olemassa olevilla tyypipiirustuksilla ja käytetään samaa suuruusluokkaa olevia siirtymäraja-arvoja.

$$\frac{(L_o + H)}{150} = 135 \cdot \text{mm} \quad \frac{(L_o + H)}{300} = 67 \cdot \text{mm}$$

Siirtymä tien suunnassa suhteessa orren ja pylvään yhteen laskettuun pituuteen.

$$\frac{(L_o + H)}{\delta_{x\_w}} = 49$$

## Kulmanmuutos

Orren kulmamuuтокset FEM-mallissa (tuulikuorma x 0,49)

Tien suunnassa	$\theta_{x\_w} := \text{atan}\left(\frac{\delta_{z\_w}}{L_o}\right)$	$\theta_{x\_w} = 0.079 \cdot \text{deg}$
----------------	--	--

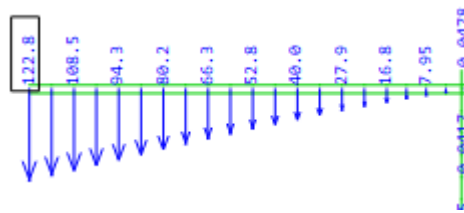
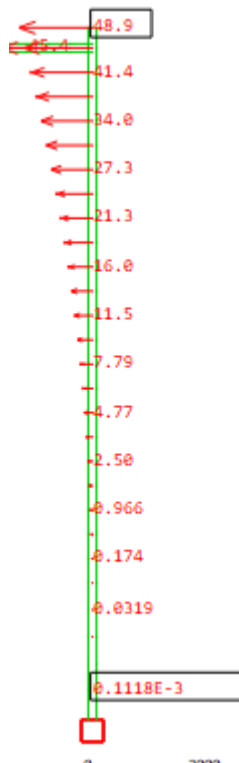
Kohtisuorassa tien suuntaan

Orren kulmamuuтокs saa olla korkeintaan:

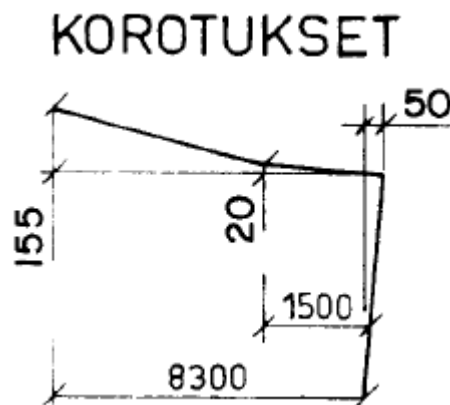
$$\theta_{\text{sall\_w}} := 1.150 \frac{\text{deg}}{\text{m}} \cdot L_o \quad \theta_{\text{sall\_w}} = 13.8 \cdot \text{deg}$$

## Vertailulaskenta tyyppiulokeportaalilla Ty 12/140

Siirtymät FEM-mallissa rakenteen omasta painosta. Uloke 8,3 m, max taulu 10 m2.



Siirtymät vastaavat melko hyvin tyypipiirustuksen esikohotusta:



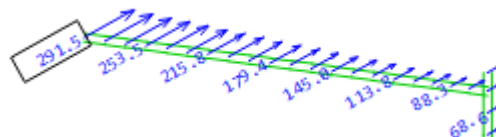
$$\delta_{x\_p.ty} := 0\text{mm}$$

$$\delta_{y\_p.ty} := 122.8\text{mm}$$

$$\delta_{z\_p.ty} := 48.9\text{mm}$$

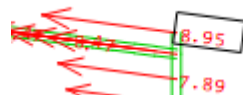
Siirtymät FEM-mallissa (tuulikuorma x 0,49) ulokeen päässä

Tien suunnassa



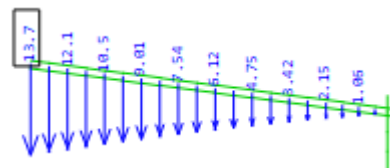
$$\delta_{x\_w.ty} := 292\text{mm}$$

Kohtisuorassa  
tien suuntaan



$$\delta_{y\_w.ty} := 8.95\text{mm}$$

Pystysuunnassa



$$\delta_{z\_w.ty} := 13.7\text{mm}$$

Siirtymät tuulesta ovat maltillisia pois lukien poikkisuunta

$$\frac{(8.3\text{m} + 9.2\text{m})}{150} = 117\text{mm}$$

Siirtymä tien suunnassa suhteessa oreen ja pylvään yhteen laskettuun pituuteen.

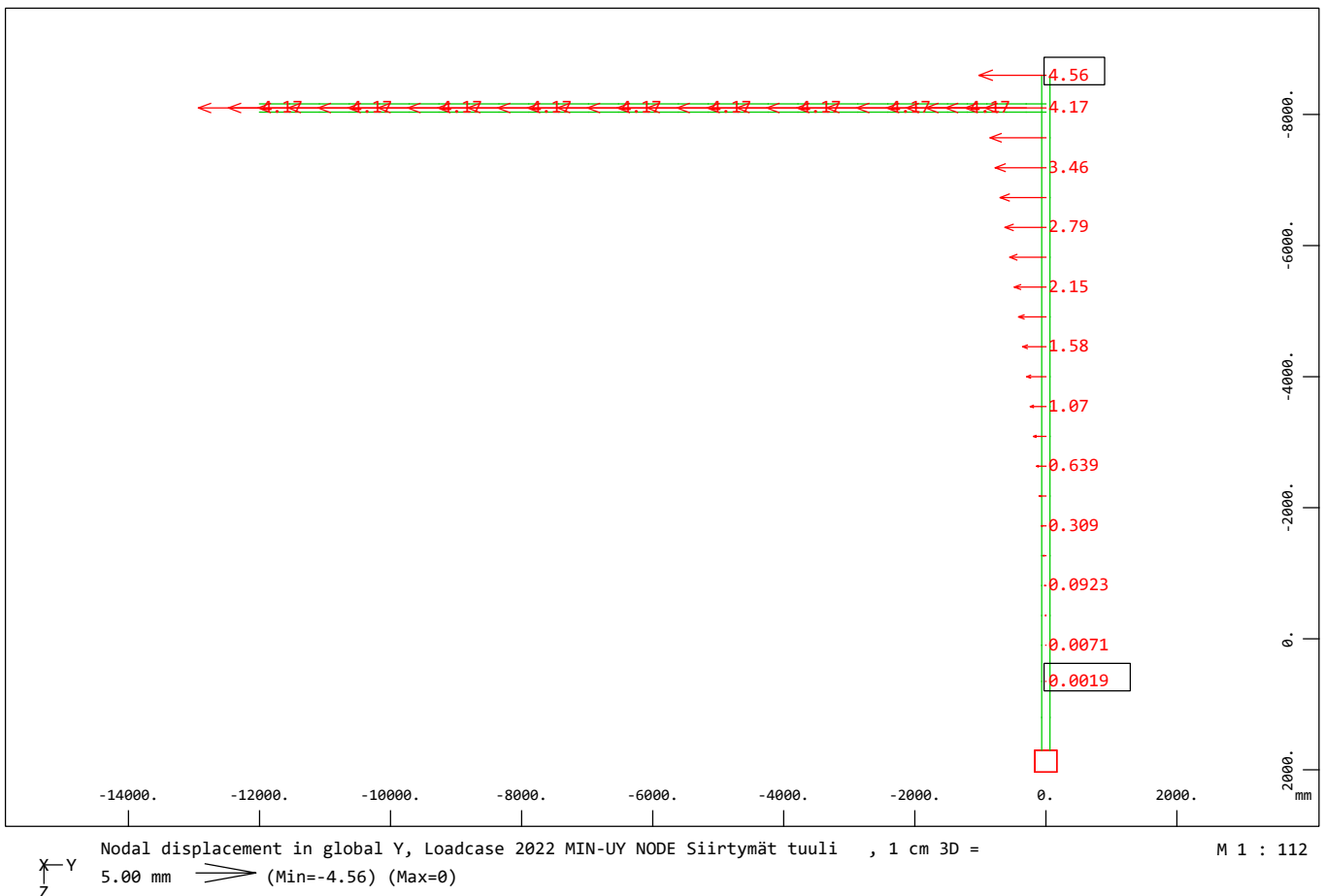
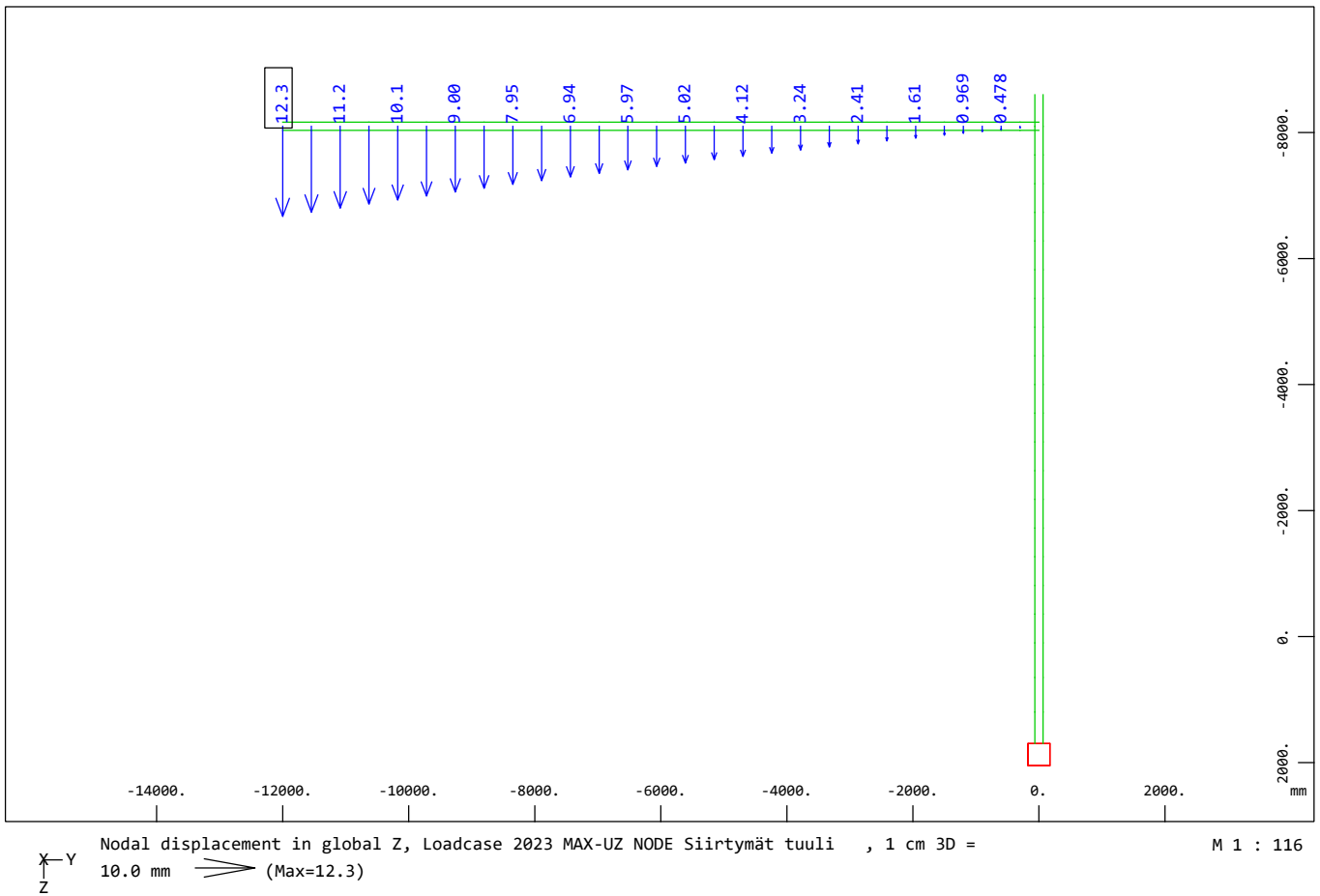
$$\frac{(8.3\text{m} + 9.2\text{m})}{\delta_{x\_w.ty}} = 60$$

Suhteessa siirtymät ovat hieman suuremmat kuin vanhoilla tyyppiulokeportaaleilla.

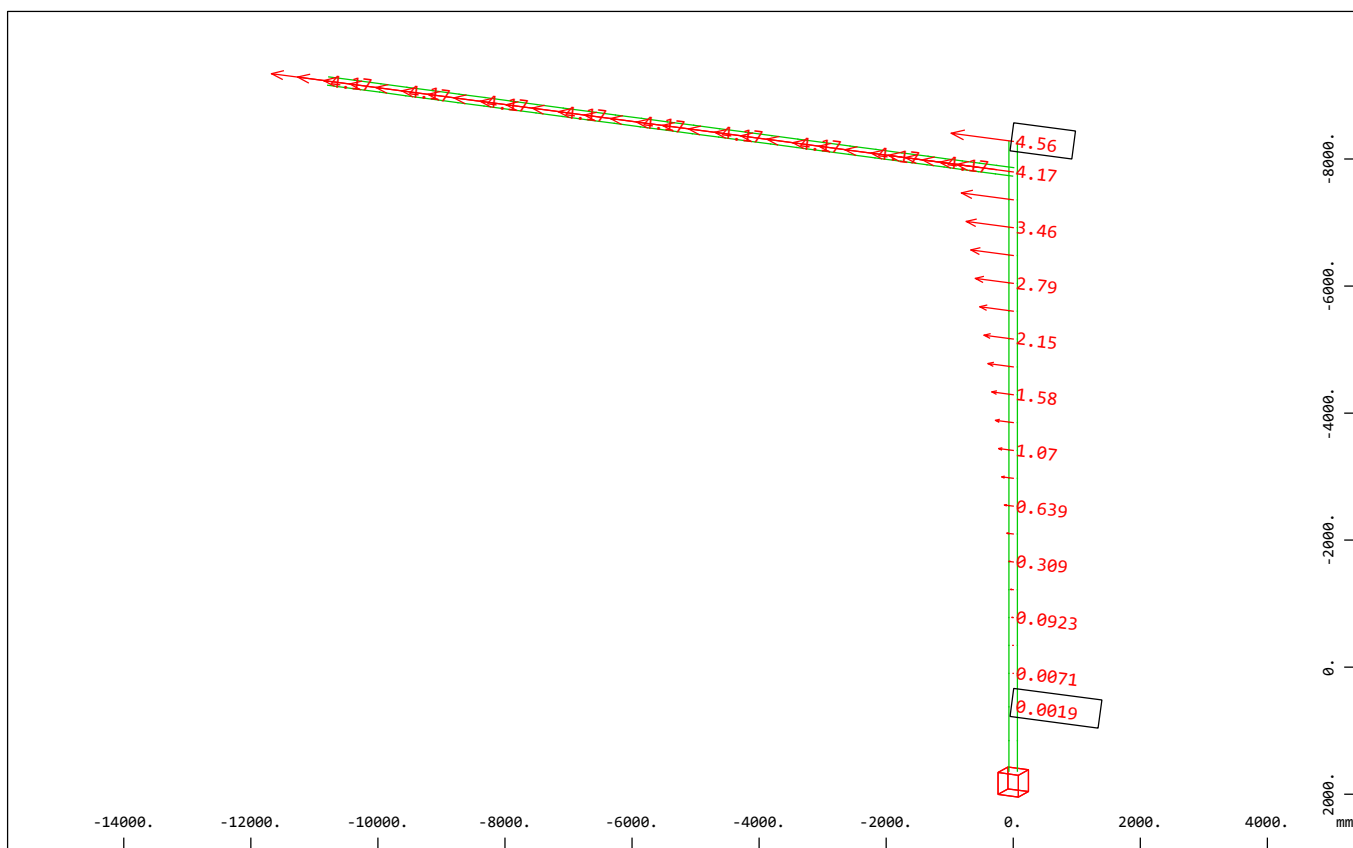
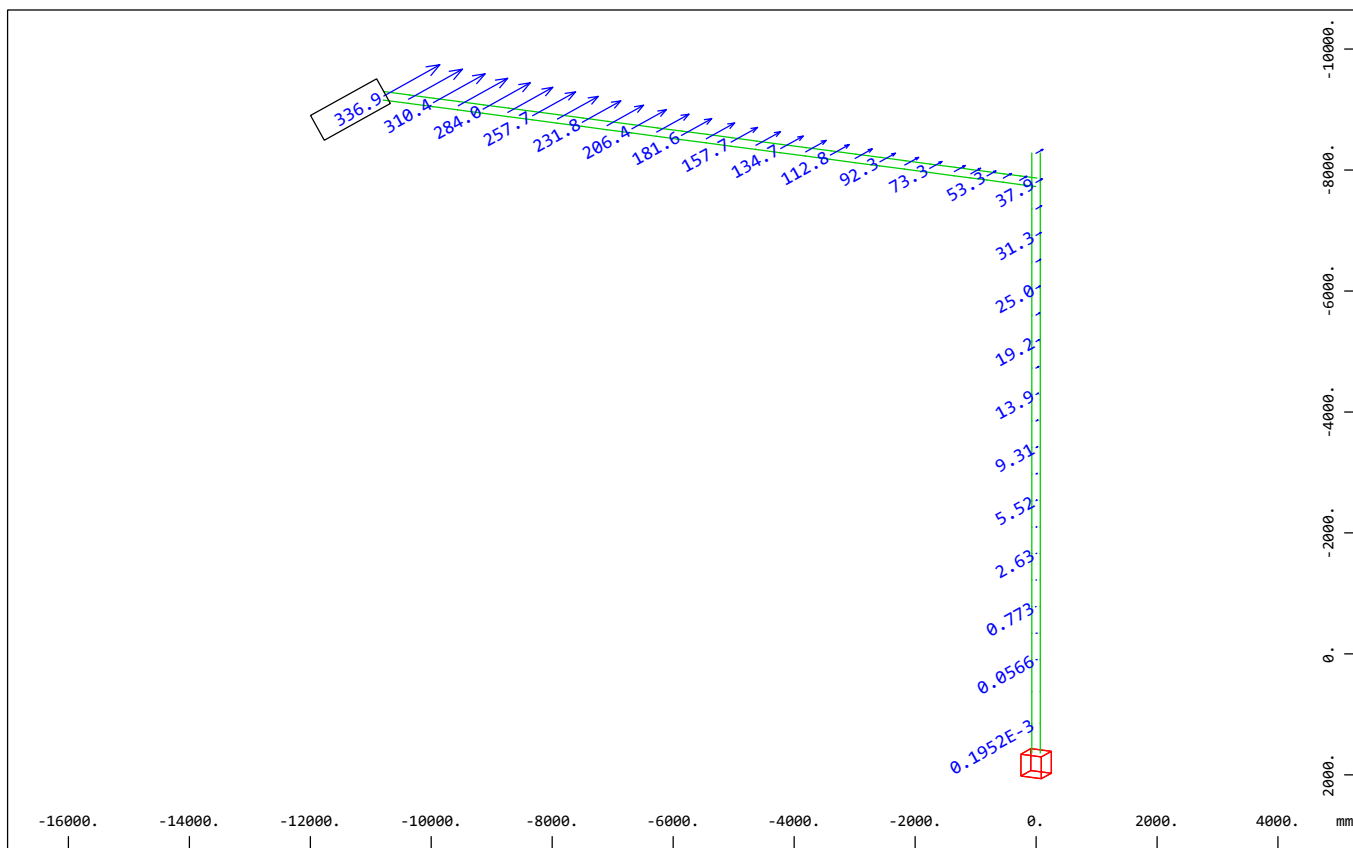
Esitetään seuraavilla sivuilla FEM-siirtymäkuvaajat.

Portaali\_V01  
 Siirtymät

### Siirtymät tuulikuormasta - Anturaperustus

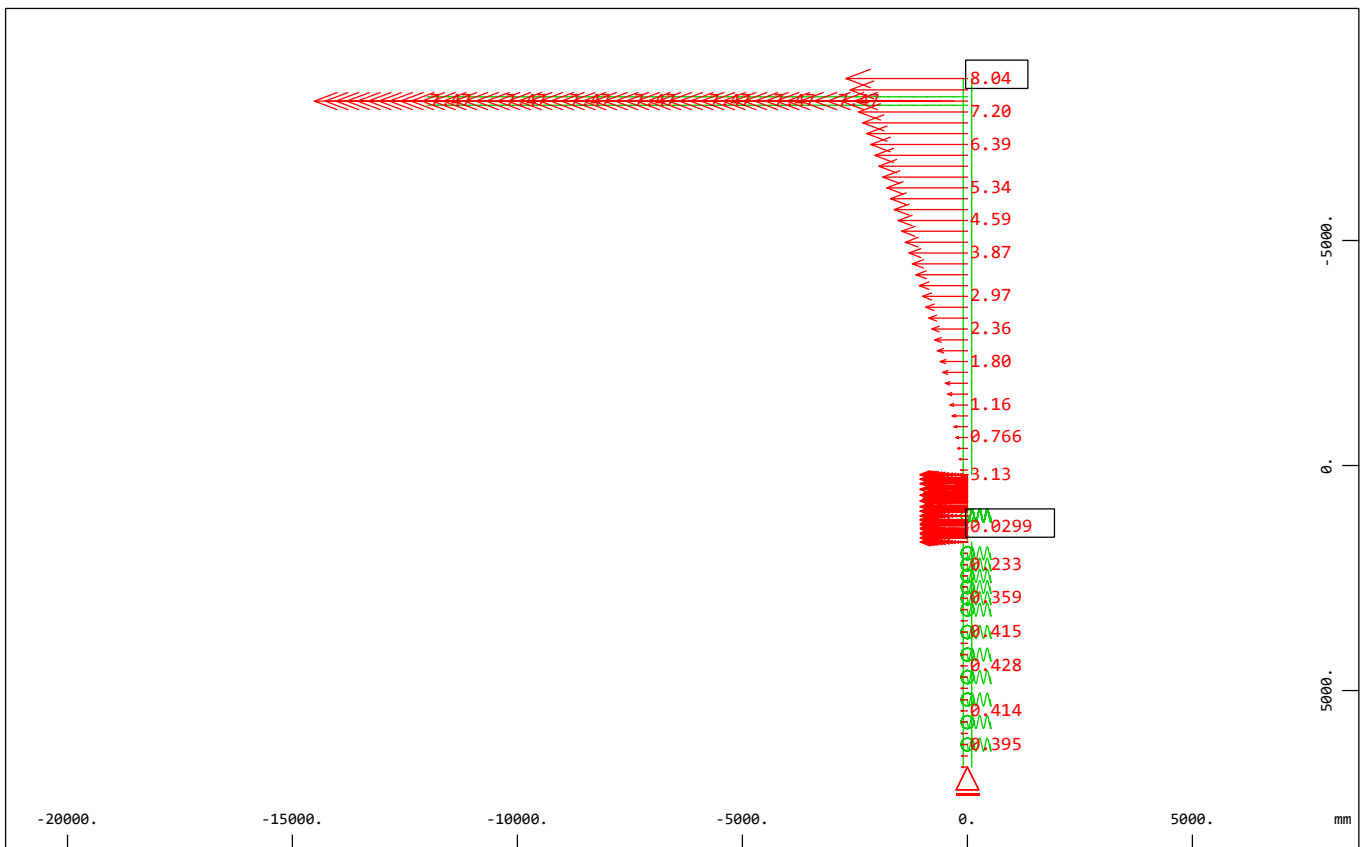
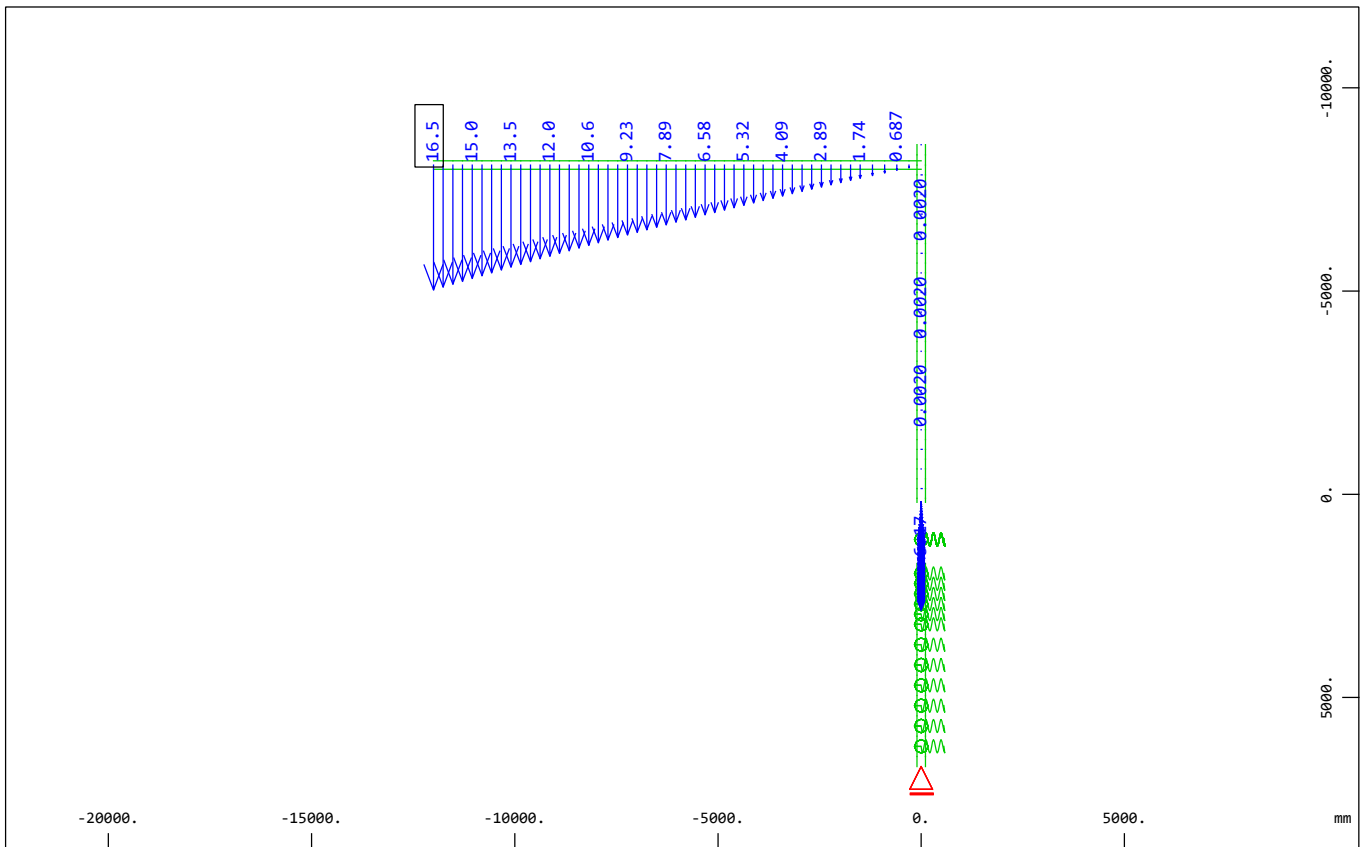


Portaali\_V01  
 Siirtymät



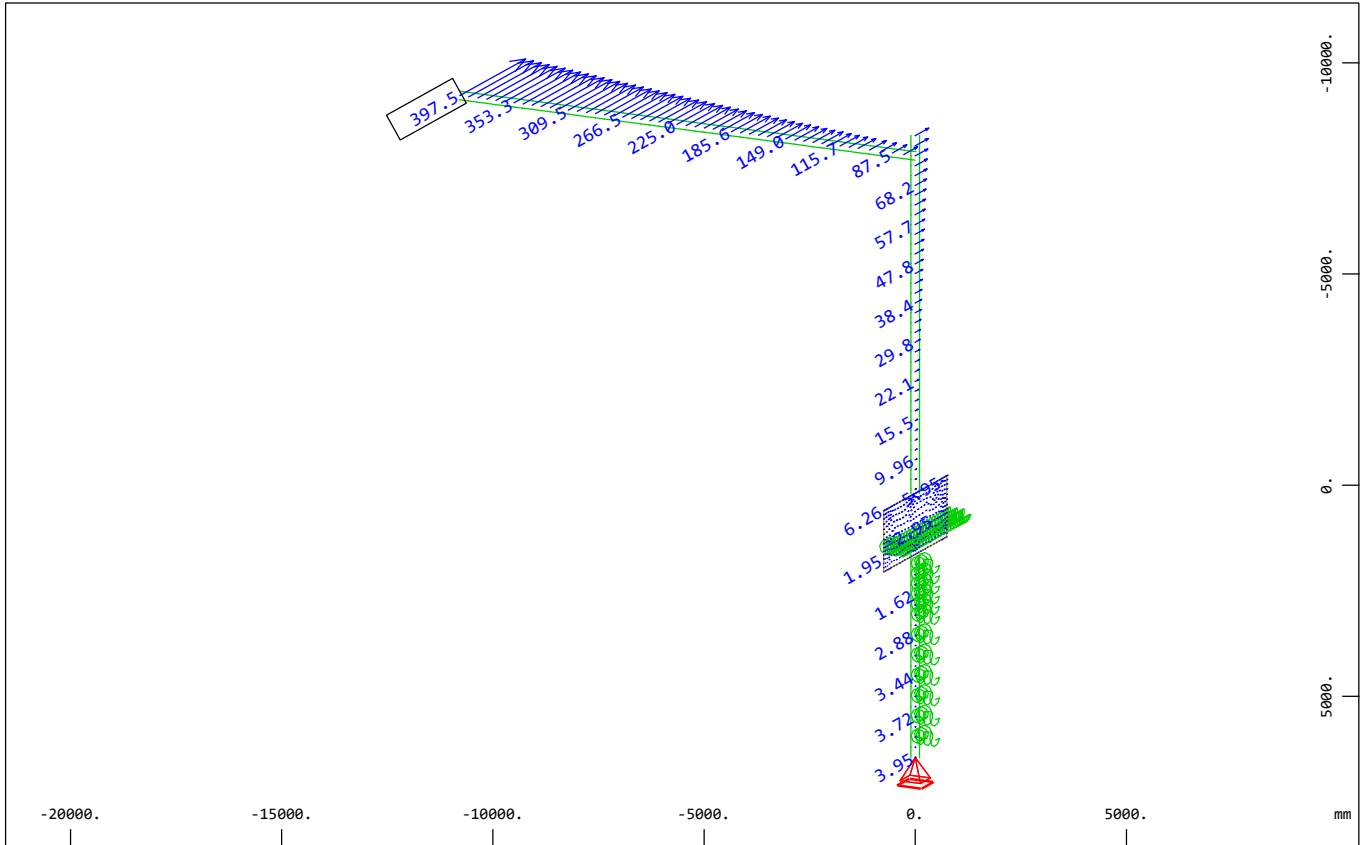
Portaali\_V01  
 Siirtymät

## Siirtymät tuulikuormasta - Paaluperustus



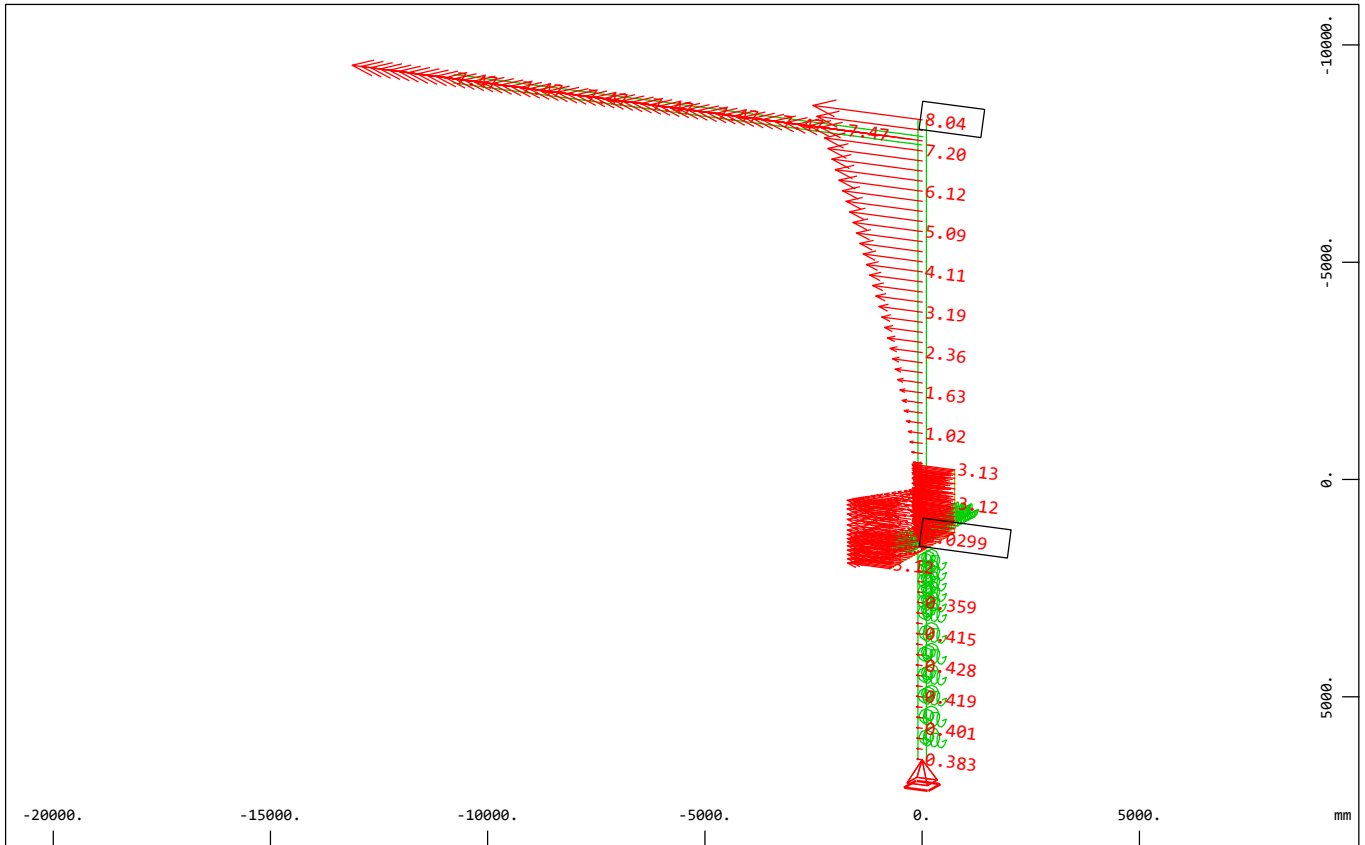


Portaali\_V01  
Siirtymät



Nodal displacement in global X, Loadcase 2019 MAX-UX NODE Siirtymät tuuli , 1 cm 3D =  
200.0 mm  $\Rightarrow$  (Max=397.5)

M 1 : 179  
X \* 0.502  
Y \* 0.906  
Z \* 0.962



Nodal displacement in global Y, Loadcase 2022 MIN-UY NODE Siirtymät tuuli , 1 cm 3D =  
5.00 mm  $\Rightarrow$  (Min=-8.04) (Max=-0.0299)

M 1 : 174  
X \* 0.502  
Y \* 0.906  
Z \* 0.962

## Värähtelyt tuulesta

Tutkitaan rakenteen herkkyyttä taivutusvärähtelylle.

Lasketaan aluksi yksinkertaisella tavalla käsin laskettuna ajatellen portaali ulokkeeksi, jonka päässä on massa. Lasketaan ominaistaajuus:

Raketeen pään siirtymä pystysuunnassa omasta painosta

$$x_{2\_z} := \delta_{z\_p} = 239 \text{ mm}$$

Ominaistaajuus pystysuuntaiselle värähtelylle

$$n_{\text{käsin\_z}} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{x_{2\_z}}} = 1.020 \cdot \text{Hz}$$

SFS-EN  
1991-1-4,  
kohta F.2  
kaava  
(F.1)

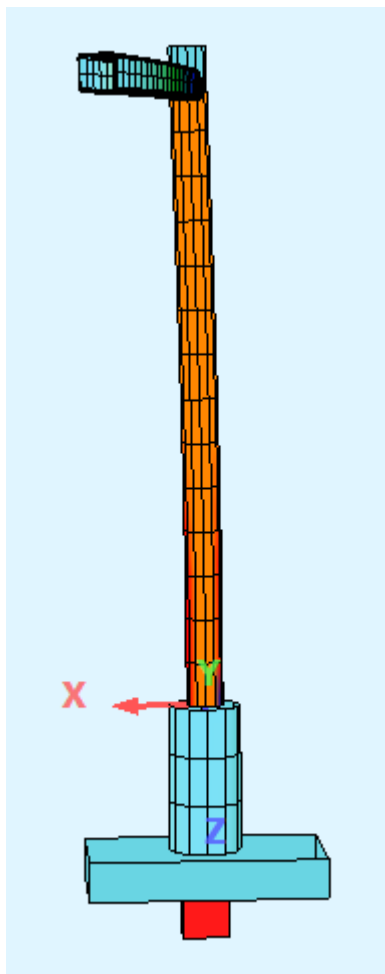
Laskettaessa rakenteen ominaismuodot FEM-mallilla huomataan, että portaalin pystysuuntainen värähtely on rakenteen toinen ominaismuoto.

FEM-mallista saatavat alimmat ominaistaajuudet (anturaperustuksen arvot on esitetty alla)

Poikkisuunta

$$n_{1.\text{FEM\_y}} := 1.06 \text{ Hz}$$

1.19 Hz

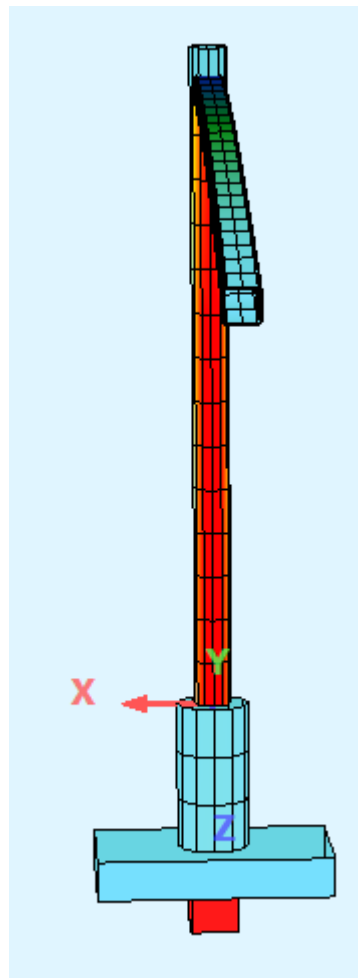


Ensimmäinen ominaismuoto - liike poikittaista eli tien suuntaista

Pystysuunta

$$n_{2.\text{FEM\_z}} := 1.14 \text{ Hz}$$

1.29 Hz



Toinen ominaismuoto - liike tapahtuu pystysuunnassa

Vertailulaskenta

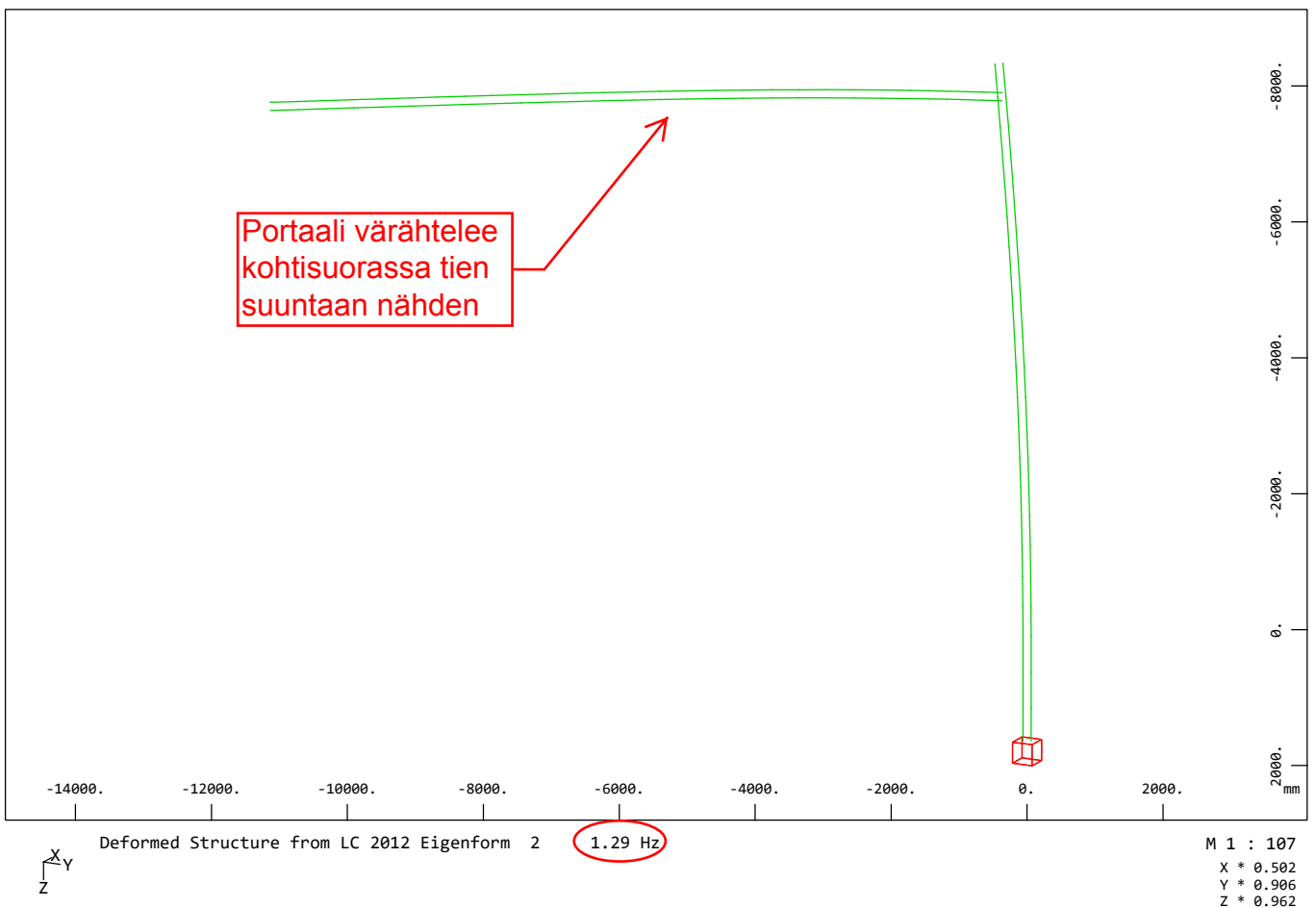
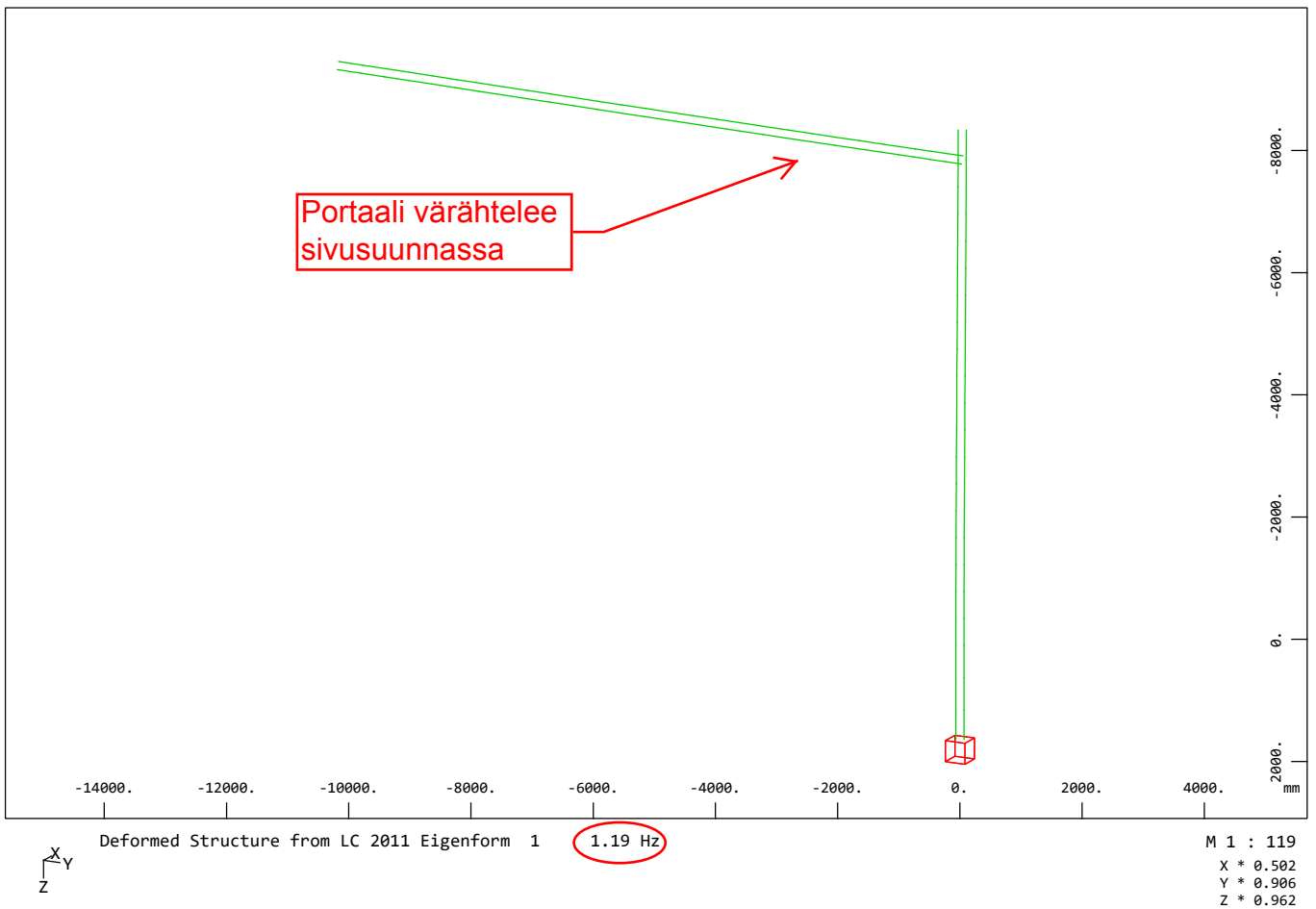
Ty 12/140

$$n_{1.\text{FEM\_y.ty}} := 1.64 \text{ Hz}$$

$$n_{2.\text{FEM\_z.ty}} := 1.71 \text{ Hz}$$

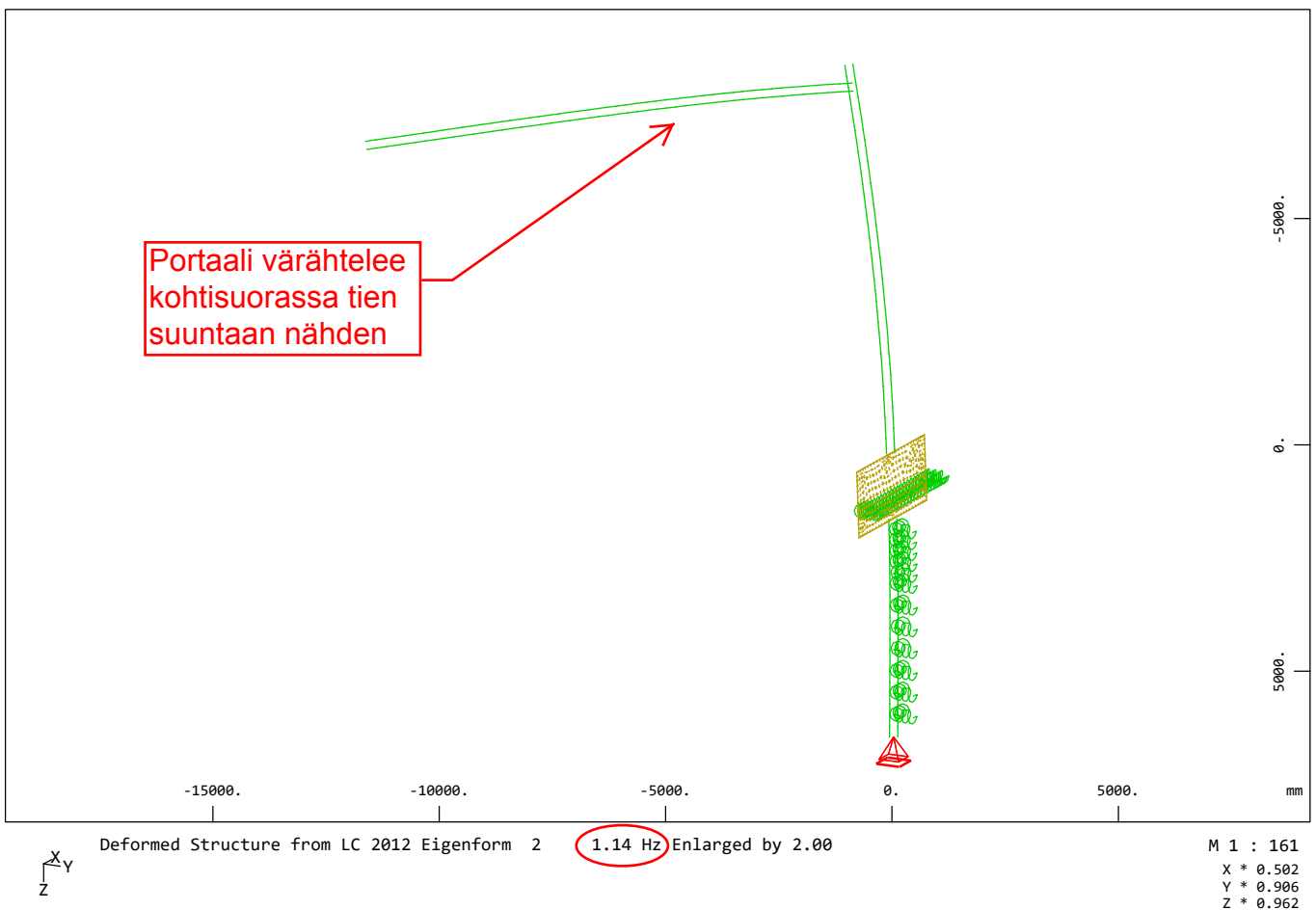
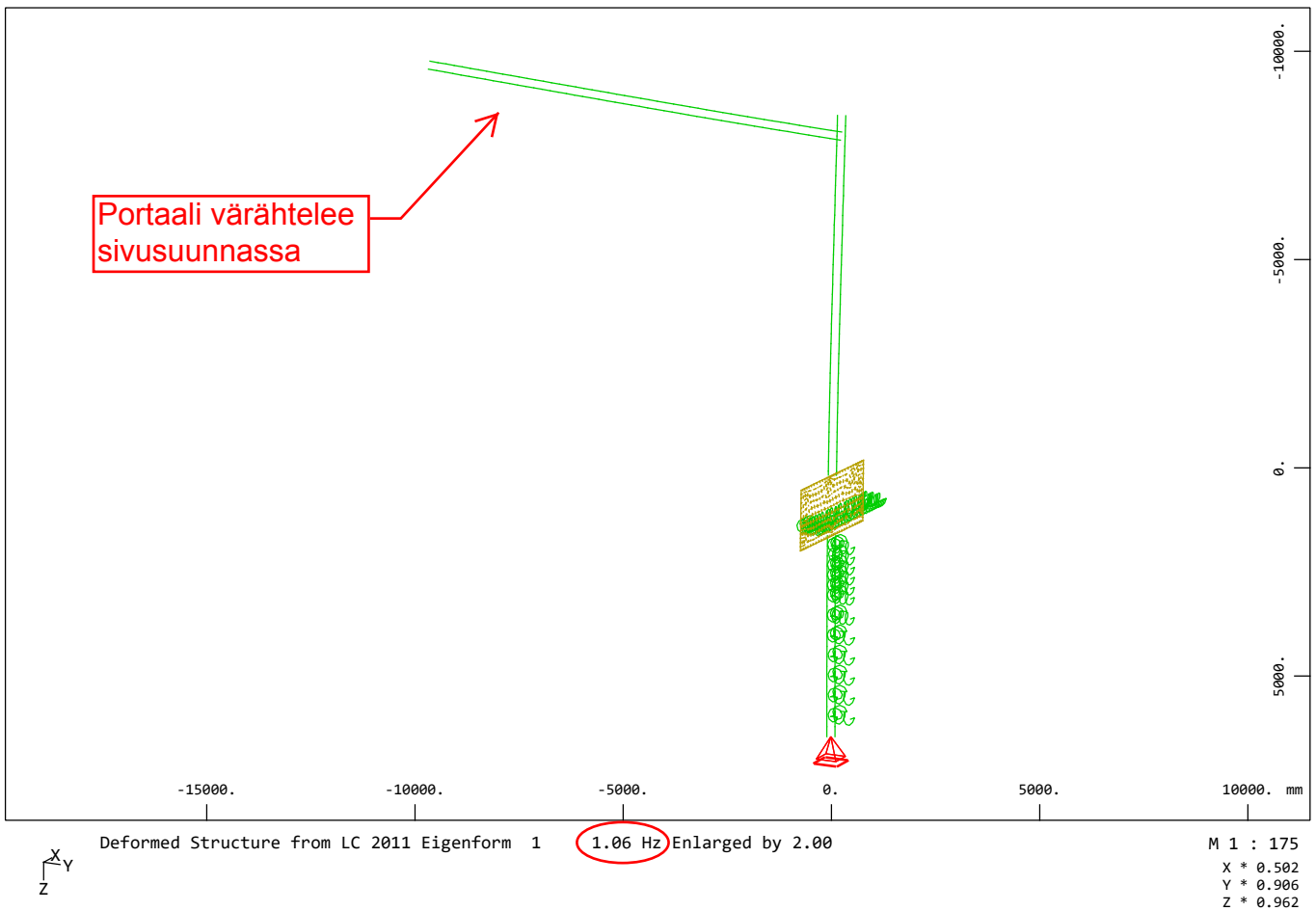
Portaali\_V01  
 Graphical Output

# Rakenteen ominaismuodot - Anturaperustus



Portaali\_V01  
 Graphical Output

# Rakenteen ominaismuodot - Paaluperustus



## Ulokkeen alttius laukkaamiselle

Tutkitaan yksinkertaistetusti, onko mahdollisesta, että ulokeportaali käy värähtelemään pystysuunnassa eli laukkaamaan tuulen vaikutuksesta.

$$b_o = 300 \cdot \text{mm} \quad H_t = 5000 \cdot \text{mm}$$

$$h_o = 300 \cdot \text{mm}$$

SFS-EN  
1991-1-4,  
E.2

Laukkaamisen heräämisparametri  $a_G$

$$a_{G,1} := 1.2$$

*Arvo yleensä välillä 1...10. Kun ei tiedetä, voidaan käyttää arvoa 10. Käytetään nyt arvoa 1,2 koska orren poikkileikkaus on suorakaide ja sivujen suhde on 1. Yksinkertaistaen, mitä ohuempi ja leveämpi kappale on, sitä alttiimpi kappale on pystysuuntaiselle värähtelylle poikittaisessa tuulella. (SFS-EN 1991-1-4. taulukko E.7)*

Rakenteellinen vaimennuskertoin  
(todennäköisesti välillä 0,5...2 %)

$$\zeta_s := 0.5\%$$

Sisäisen vaimennuksen logaritmisin dekrementin  $\delta_s$  likimääräinen arvo

$$\delta_s := 2\pi \cdot 0.5\% = 0.031$$

Ekvivalentti massa  $e$

$$m_e := 108 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

*Käytetään orren loppuosan painoa*

Scrutonin luku  $Sc$

$$Sc(d) := \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_e}{1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot d^2} \quad , \text{ missä } d \text{ on poikkileikkauksen leveys tuulen suunnassa}$$

Laukkaamisen herättävä tuulennopeus, laukkaaminen tapahtuu pystysuunnassa

$$v_{CG}(d, n) := \frac{2 \cdot Sc(d)}{a_{G,1}} \cdot n \cdot d \quad v_{CG}(b_o, n2.FEM\_z) = 34.38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Suurin sallittava modifioimaton tuulennopeuden perusarvo,  
joka voitaisiin sallia

$$v_{m,max} := \frac{v_{CG}(b_o, n2.FEM\_z)}{1.25} = 27.51 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Verrataan tyyppiirustuksella Ty12/140 saataviin arvoon

$$\frac{2 \cdot 2 \cdot \delta_s \cdot \left(59.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}}\right)}{1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (250\text{mm})^2 \cdot a_{G,1}} \cdot \frac{n2.FEM\_z.ty \cdot (250\text{mm})}{1.25} = 27.09 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Tulosten perusteella on epätodennäköistä, että ulokeportaali käy värähtelemään tuulella pystysuunnassa. Yksinkertaisen vertailulaskelman perusteella uloke ei ole alttiimpi laukkaamiselle kuin nykyiset käytössä olevat ulokeportaalit. Kuitenkin on huomioitava, että taulujen vaikutusta ei ole otettu tässä tarkastelussa huomioon. Taulujen vaikutusten huomioon ottaminen on hyvin hankalaa.**