

---

# Teräsrunkoisen hallin jännitysten mittaus



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Rakennustekniikka

HAMK Visamäki, kevät 2017

*Olli Vihonen*

Olli Vihonen



HAMK Visamäki  
Rakennustekniikka  
Rakennesuunnittelu

---

**Tekijä** Olli Vihonen

**Vuosi** 2017

**Työn nimi** Teräsrunkoisen hallin jännitysten mittaus

---

## TIIVISTELMÄ

Lopputyö tehtiin Hämeen ammattikorkeakoulun Ohutlevykeskuksen tutkimusyksikölle. Työssä valmistettiin venymäliuskamittausmenetelmä valmiiseen teräsrunkohalliin. Mittauspisteet valittiin Jani Hyyryläisen opinnäytetyössään luoman kehäristikkomallin perusteella. Työssä sovellettiin Autodesk Robot Analysis -ohjelmaa. Mittauspisteiksi valittiin mastopilari, seinä- ja kattopaneeli sekä kattoristikko.

Työssä simuloitiin mittauspisteiden jännitykset mitoittavien tuuli- ja lumikuormien mukaan, jolloin saatiin teoreettiset arvot tuleville mittauksille. Työssä sovellettiin eurokoodistoa jännitysten ja kuormien laskentaan sekä mittauslaitteiston valmistajan toimittamia aineistoja.

Järjestelmän toimivuus ja tarkkuus todennettiin suorittamalla 1-aukkoinen palkki, jossa käytettiin vastaavaa venymäliuskaa asennettuna. Testaus toteutettiin Hämeen ammattikorkeakoulun Ohutlevykeskuksen koestusradalla.

### Avainsanat

venymäliuska, teräshalli, tuulikuorma, lumikuorma

**Sivut** 32 s. + liitteet 8 s.

Visamäki  
Degree Programme in Construction Engineering  
Structural Engineering

---

**Author** Olli Vihonen **Year** 2017

**Subject of Bachelor's thesis** Measuring stresses of steel framed hall

---

ABSTRACT

This Bachelor's thesis was commissioned by Häme University of Applied Sciences Sheet Metal Centre research department in Hämeenlinna. The purpose of the thesis was to make a strain gauge measurement system for a steel frame hall. The measurement points were chosen according to the structural model of a steel hall developed in the thesis by Jani Hyyryläinen. Autodesk Robot Analysis was used for modeling stresses in the structure. As measurement points were chosen the mast column, wall and roof panel and bottom chord of the truss.

Stresses caused by wind and snow loads were simulated and from those the theoretical values were defined for future measurements. Eurocodes were used in the thesis to calculate the stresses and loads. In addition, the materials provided by the equipment supplier were used.

The accuracy and functionality of the strain gauge was tested by a single span beam using a similar strain gauge. The test was conducted in the testing frame of Sheet Metal Centre in Häme University of Applied Sciences.

**Keywords** strain gage, strain gauge, steel frame, wind load, snow load

**Pages** 32 p. + appendices 8 p.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	4
2	RAKENNUS JA KUORMAT.....	5
2.1	Rakennuksen esittely.....	5
2.2	Mittauspaikat ja perusteet.....	6
2.3	Tuulikuorma.....	7
2.4	Lumikuorma.....	10
3	MITTAUSMENETELMÄ.....	12
3.1	Venymäliuskan valinta.....	12
3.2	Venymäliuskan rakenne.....	13
3.3	Wheatstonen silta.....	14
3.4	Häkki- ja siltavakio sekä lämpötila.....	15
3.5	Venymäliuskan asennus.....	16
3.6	Datan tallennuslaitteisto.....	17
3.7	Kytkenät venymäliuskastasta vahvistimeen.....	18
3.8	Mittaustulosten muuntaminen mittauspisteiden jännityksiksi.....	19
3.9	Mittauslaitteistoin varmennus.....	21
4	KUORMISTA AIHEUTUVAT JÄNNITYKSET.....	24
4.1	Mastopilari, tuulikuorma.....	24
4.2	Mastopilari, lumikuorma katolta.....	26
4.3	Kattoristikon alapaarre, lumikuorma.....	28
4.4	Seinäpaneeli, tuulikuorma.....	29
	LÄHTEET.....	31
LIITE 1	Tuulenpaineen laskeminen mitoitustuulella 21 m/s	
LIITE 2	Tuulenpaineen laskeminen tuulennopeudella 10 m/s	
LIITE 3	Mittauslaitteiston varmennuksen laskenta, 1-aukkoisen palkki	
LIITE 4	Mastopilarin mittauspisteen jännitys 21 m/s -tuulennopeutta vastaavalla tasisaisella tuulikuormalla	
LIITE 5	Mastopilarin mittauspisteen jännitys 21 m/s -tuulennopeutta vastaavalla kolmiotuuikuormalla	
LIITE 6	Mastopilarin jännitys katon lumikuormasta 2,0 kN/m <sup>2</sup>	
LIITE 7	Kattoristikon alapaarteen jännitys katon lumikuormalla 2,0 kN/m <sup>2</sup>	
LIITE 8	Seinäpaneelin jännitys 21 m/s -tuulta vastaavalla kuormalla	

## 1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli toteuttaa venymäliuskamittausjärjestelmä ja todentaa venymäliuskamittauksen toimivuus. Järjestelmän asennuskohteeksi valittiin Hämeen ammattikorkeakoulun Ohutlevykeskuksen teräsrunkohalli Hämeenlinnasta.

Työn tarkoituksena oli valmistaa mittausjärjestelmä, jolla voidaan tutkia suunniteltujen rakenteiden todellisia jännityksiä. Järjestelmällä voidaan todentaa suunnitteluperusteet ja suunnittelussa käytettävät kuormat. Työn tarkoitus oli tuottaa järjestelmä tulevaa tutkimusta varten.

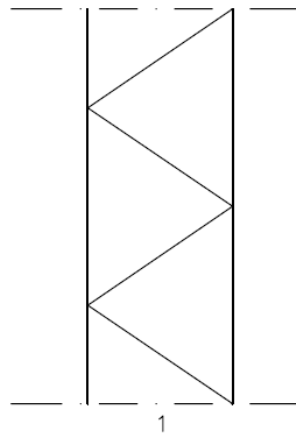
Työssä hyödynnettiin Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmaan luotua kehärakennemallia, jonka Jani Hyyryläinen oli tehnyt lopputyössään. Kehämallin perusteella valittiin sopivat mittauspisteet, joihin venymäliuskat asennettiin.

## 2 RAKENNUS JA KUORMAT

### 2.1 Rakennuksen esittely

Järjestelmän toteutuskohteeksi valittiin Hämeen ammattikorkeakoulun omistama rakennus Hämeenlinnan Visamäessä. Rakennuksessa toimivat Hämeen ammattikorkeakoulun Ohutlevykeskus-tutkimusyksikkö ja Ruukin teknologiakeskus. Kyseinen rakennus on Suomen ensimmäinen lähes nollaenergiarahalli.

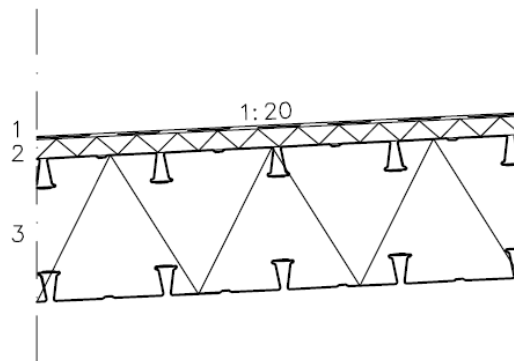
Hallin runko koostuu yhdeksästä moduulilinjasta, jotka muodostuvat kolmesta teräspilarista ja kahdesta kattoristikkorakenteesta. Rakennuksen pohjakuva esitellään luvussa 2.2. Teräspilarit ovat kiinnitettyinä paalunturoiden paaluihin. Ulkovaippana toimii tiivis teräs-villa-teräs-seinäelementti (Kuva 1) sekä kantava kattoelementti (Kuva 2). (Ruukki n.d.)



230 mm 1 Sandwich-paneeli SPA E LIFE ENERGY

U-arvo  
W/m<sup>2</sup> K  
0,16

Kuva 1. Ulkoseinän US 1 -rakenne (Lanki 2014).



	1	PVC-kate
30 mm	2	Jäykkä mineraalivilla, esim. OL-TOP
230 mm	3	Kattoelementti

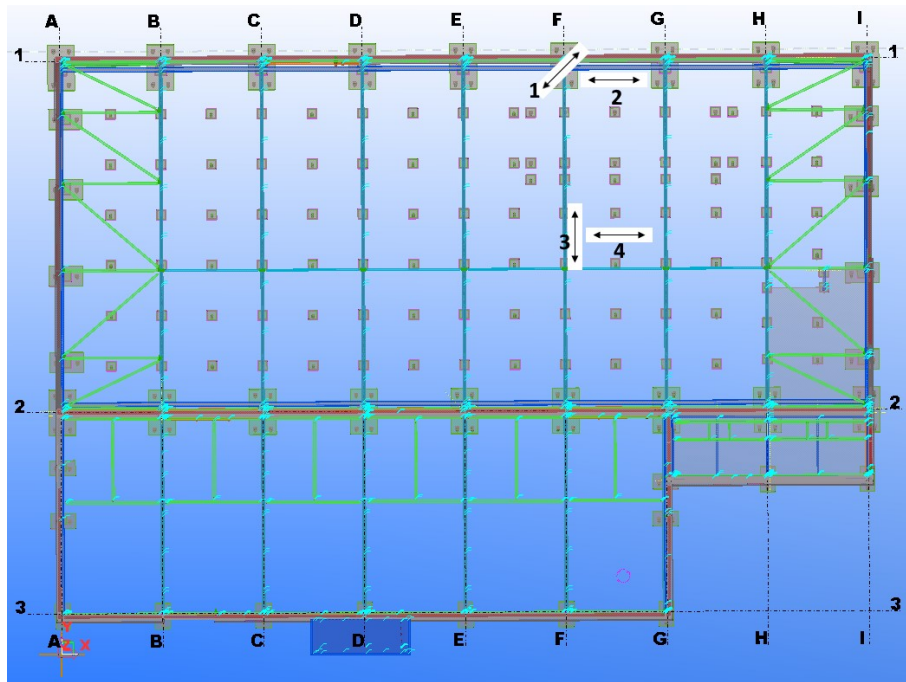
U-arvo  
W/m<sup>2</sup> K  
0,12

Kuva 2. Yläpohjan YP 1 -kattopaneeli (Lanki 2014).

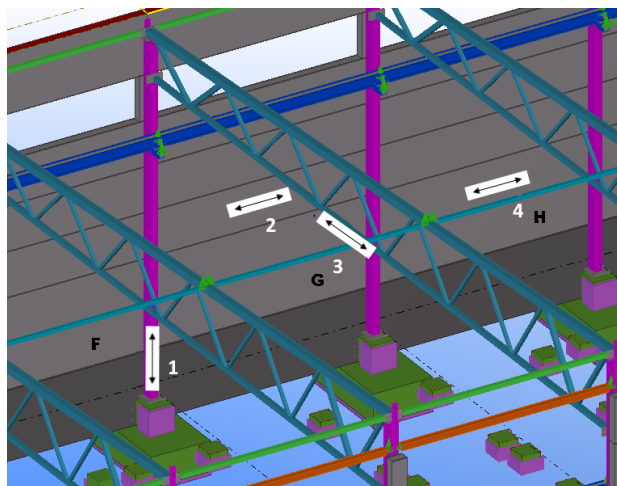
Mastopilari on kylmämuovattu suorakaideputki, jonka mitat ovat CFRHS300X200X10, ja kattoristikon alapaarteen putken mitat ovat CFRHS120X120X6.

### 2.2 Mittauspaikat ja perusteet

Venymäliuskat asennettiin kuvien 3 ja 4 mukaisesti Ohutlevykeskuksen rakennukseen linjojen F ja G välille. Venymäliuskat 2 ja 4 asennettiin seinä- ja kattopaneeleihin, ja linjaan F asennettiin venymäliuskat 1 ja 3 mastopilariin ja kattoristikoon. Venymäliuskat asennettiin ennen rakennuksen käyttöönottoa.



Kuva 3. Rakennuksen pohjakuva ja venymäliuskojen sijainnit.



Kuva 4. Venymäliuskojen asennuspaikat, linjat F ja G.

Venymäliuskojen 1 ja 3 paikat valittiin Jani Hyyryläisen tekemän kehämallin avulla määriteltyjen rakenteiden rasitettuimpien kohtien perusteella. Venymäliuskat 2 ja 4 valittiin tämän jälkeen ottaen huomioon johdinten kulukema reitti, jossa esiintyisi mahdollisimman vähän ulkoista häiriötä signaalikululle. Lisäksi mittauslaitteistolle valittiin paikka, missä ne saisivat olla aiheuttamatta häiriötä muulle toiminnalle.

### 2.3 Tuulikuorma

Valittujen mittauspisteiden perusteella määritetään pitkään sivuun vaikuttava tuulikuorma. Kun tuulen nopeus tunnetaan paikallisesti ja sen suunta on luotettavasti tiedossa, voidaan rakennukseen kohdistuvan tuulikuorman määrittäminen toteuttaa eurokoodin 1991-1-4 mukaisesti.

Eurokoodin kansallinen liite antaa maa- ja merialueille perustuulennopeudet, joille rakennukset suunnitellaan (Ympäristöministeriö 2016, 22).



Tuulen nopeuden perusarvo suunnan ja vuodenajan perusteella lasketaan eurokoodin 1991-1-4 kaavasta 4.1

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b0} \quad (1),$$

missä

$v_b$  on tuulennopeuden perusarvo

$v_{b0}$  on perustuulennopeus, mitattu 21 m/s

$c_{dir}$  on suuntakerroin eri suunnasta puhaltaville tuulille. Suomessa arvo 1,0

$c_{season}$  on vuodenaikakerroin. Suomessa arvo 1,0.

Maastoluokka löytyy eurokoodin 1991-1-4 liitteestä 1. Hallin alueelle valitaan maastoluokaksi luokka 3.

Hallin pitkällä sivulla rakennuksen leveys  $b = 48,74$  m ja korkeus räystäään  $h = 9,641$  m.

Koska hallin leveys on suurempi kuin korkeus on  $z_e = h = 9,641$  m ja koska maastoluokaksi on valittu 3, on  $z_{min} = 5$  m ja  $z_{max} = 200$  m (1991-1-4, 4.3.2). Kun tapauksessa rakennuksen korkeus on suurempi kuin eurokoodin 1991-1-4 antama minimiarvo  $z_{min}$ , mutta kuitenkin pienempi kuin  $z_{max}$ , käytetään rosoisuuskertoimen  $c_r$  määrittämiseen eurokoodin 1991-1-4 kaavaa 4.4

$$c_r = k_r * \ln \frac{z}{z_0}, \text{ Kun } z_{min} < z < z_{max} \quad (2)$$

Maastoluokan mukaisesti valitaan referenssimitoiksi  $z_0 = 0,3$  m ja  $z_{0II} = 0,05$  m.

Tuulen nopeusprofiili  $v_m$  lasketaan eurokoodin 1991-1-4 kaavan 4.3 mukaan

$$v_m = c_r * c_0 * v_b \quad (3),$$

missä

$c_r$  on rosoisuuskertoimen

$c_0$  on pinnanmuotokerroin, jolle valitaan suositusarvo 1,0

$v_b$  on tuulennopeuden perusarvo suunnan ja vuodenajan perusteella.

Maastokerroin  $k_r$  on riippuvainen rosoisuuskertoimesta, joka lasketaan eurokoodin 1991-1-4 kaavan 4.5 mukaan

$$k_r = 0,19 * \left( \frac{z_0}{z_{0II}} \right)^{0,07} \quad (4),$$

missä  $z_0$  ja  $z_{0II}$  ovat eurokoodin 1991-1-4 mukaisia referenssimittoja.

Hallin ympäröivämaasto on tasaista, joten valitaan eurokoodin 1991-1-4 Liite A.3:n mukaisesti  $c_0 = 1,0$ .

Tuulen turbulenssien keskihajonta lasketaan eurokoodin 1991-1-4 kaavan 4.6 mukaan

$$\sigma_v = k_r * v_b * k_I \quad (5),$$

missä

$k_r$  on laskettu rosoisuuskerroin

$v_b$  on tuulennopeuden perusarvo

$k_I$  on pyörteisyyserroin, jolle annetaan suositusarvo 1,0.

Tuulenpuuskien intensiteetti  $I_{v(z)}$  määritetään eurokoodin 1991-1-4 kaavan 4.7 mukaan

$$I_{v(z)} = \frac{k_I}{c_{0(z)}} * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = \frac{\sigma_v}{v_m} \quad (6),$$

missä

$k_I$  on pyörteisyyserroin, jolle annetaan suositusarvo 1,0

$c_0$  on pinnanmuotokerroin, jolle annetaan arvo 1,0

$z_0$  on maastoluokan referenssi 0,3 m

$z$  on hallin korkeus

$\sigma_v$  on turbulenssin keskihajonta

$v_m$  on tuulen nopeusprofiili.

Tuulen puuskanopeuspaine lasketaan korkeudella  $z$  eurokoodin 1991-1-4 kaavan 4.8 mukaan, koska kyseessä ei ole kansallisen liitteen mukainen hoikka erikoisrakenne.

$$q_p = (1 + 7 * I_v) * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2 \quad (7),$$

missä

$\rho$  on ilman tiheys, jolle annetaan suositusarvo 1,25 kg/m<sup>3</sup>

$v_m$  on tuulen nopeusprofiili

$I_v$  on tuulenpuuskan intensiteetti.

Tuulennopeuden laskennasta tuotettiin Mathcad-pohja. Liitteessä 1 on laskenta tuulen nopeudelle 21 m/s ja liitteessä 2 tuulen nopeudelle 10 m/s. Taulukkoon 1 on kerätty muutamien eri tuulennopeuksien aiheuttamat pintapaineet.

Taulukko 1. Tuulennopeuksia ja pintapaineita.

Tuulennopeus, m/s	Pintapaine, kN/m <sup>2</sup>
5	0,026
10	0,105
15	0,237
21	0,465

## 2.4 Lumikuorma

Lumikuormat ovat Suomessa yleisesti mitoitettavimmat kuormat kattojen kestävyuden osalta. Lumikuorman laskentaan ja jakaumaan vaikuttavat rakenteen fyysiset ominaisuudet kuten sijainti, katon muoto ja tuulen suojaisuus sekä katon lämmönläpäisy.

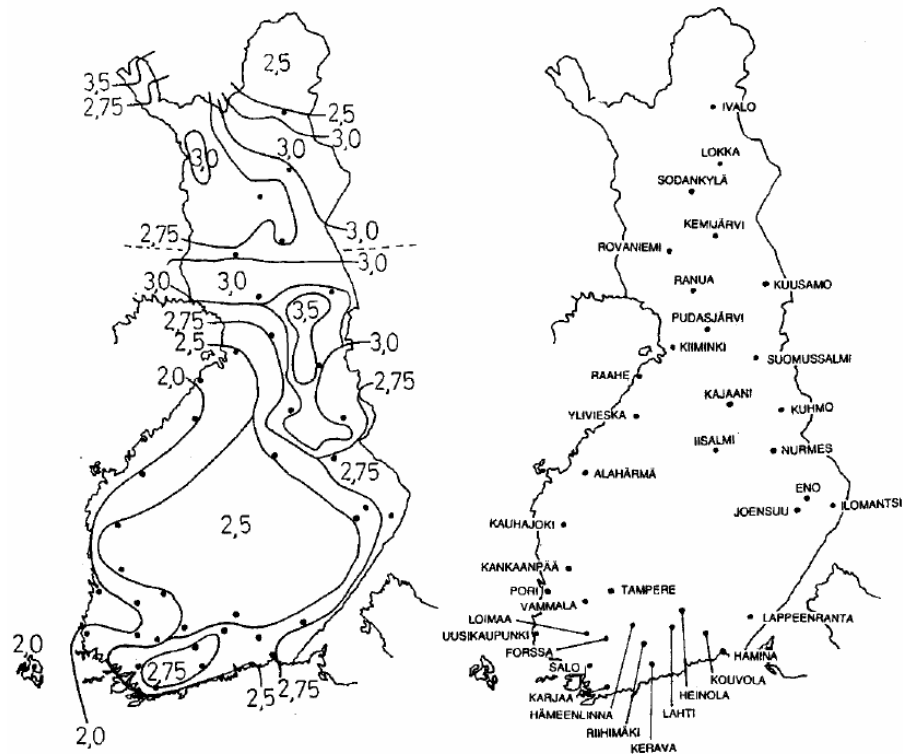
Eurokoodi SFS-EN 1991-1-3 5.3 Lumikuormat antaa katon kaltevuuden mukaisesti muotokertoimen  $\mu = \mu_1$ , joka pienentää katolle kertyvää lumikuormaa. Taulukosta 2 nähdään muotokertoimen arvon muodostuminen katon kaltevuuden funktiona.

Taulukko 2. Lumikuorman muotokertoimen muodostuminen (SFS 1991-1-3/2015, 32).

Katon kaltevuuskulma $\alpha$	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0^\circ) \geq 0,8$	$\mu_1(0^\circ) \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0,8 \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_3(\alpha)$	$0,8 + 0,8 \alpha/30^\circ$	1,6	–

Hallin kattokaltevuus on 1:20 eli alle  $30^\circ$ . Tällöin saadaan taulukon 2 perusteella muotokertoimelle arvo  $\mu=0,8$ .

Rakennuksen sijainnin perusteella valitaan Eurokoodin 1991-1-3 kansallisen liitteen kohdan 4.1(1) perusteella (Kuva 5) lumen ominaisarvo maan pinnalla  $s_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$ . Kartan arvot ovat minimiarvoja, joita voidaan tapauskohtaisesti suurentaa.



Kuva 5. Lumikuorman ominaisarvo maan pinnalla (Ympäristöministeriö 2016, 15).

Lumikuorman ominaisarvosta lasketaan eurokoodin 1991-1-3 kaavan 5.2 mukaan lumikuorman suunnitteluarvo  $s_d$  normaalisti vallitseville mitoitus-tilanteille.

$$s_d = \mu * C_e * C_t * s_k \quad (8),$$

missä

$C_e$  on tuulensuojaiskerroin, jolle annetaan suositusarvo 1,0

$C_t$  on lämpökerroin, jolle annetaan suositusarvo 1,0

$\mu$  on katon muotokerroin, jolle valitaan arvo 0,8

$s_k$  on lumikuorman ominaisarvo, jolle valitaan arvo 2,5 kN/m<sup>2</sup>

Eurokoodin 1991-1-3 kansallisen liitteen kohta 5.2(7) antaa tuulensuojaiskerroin  $C_e$  suositeltavia arvoja eri maastotyyppien mukaisesti, kuten taulukossa 3 on kuvattu. Yleisin tilanne on se, jossa ympäröivä maasto luokitellaan normaaliksi, eli tuuli ei maaston tai muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta, ja täten käytetään arvoa  $C_e = 1,0$ .

Taulukko 3. Katon tuulensuojaisuskertoimen arvot (Ympäristöministeriö 2016, 17).

Maastotyyppi	$C_e$
Tuulinen	0,8 (1,0, mikäli lyhyempi sivumitta > 50 m)
Normaali	1
Suojainen	1,2

Tuulinen maasto: laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän.  
 Normaali maasto: alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden huomattavasti poista lunta.  
 Suojainen maasto: alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana ympäröimä.

Eurokoodi 1991-1-3 5.2(8) antaa lämpötilakertoimelle  $C_t$  arvon 1,0.

Käyttämällä annettuja arvoja ja soveltamalla kaavaa 8 ilman varmuuskertoimia saadaan lumikuorman suunnitteluarvolle  $s_d = 2,0 \text{ kN/m}^2$ .

### 3 MITTAUSMENETELMÄ

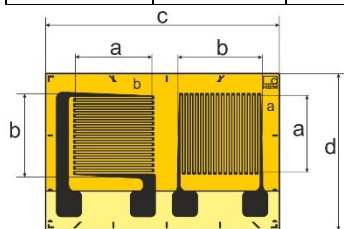
#### 3.1 Venymäliuskan valinta

Venymäliuska valittiin Ohutlevykeskuksen testitarpeen perusteella. Liuskan tuli olla käytännöllinen, ja sen käyttö tuli olla mahdollista myös muissa teräsrakenteisiin liittyvissä testijärjestelyissä, joita Ohutlevykeskuksella suoritetaan.

Venymäliuskaksi valittiin 6 mm pitkä  $350\Omega$  T-rosette eli liuska, jossa on valmiina kaksi mittausjohdinta  $90^\circ$ :n kulmissa toisiinsa nähden. Venymäliuskassa oli valmiit johtimet, joiden pituus oli 0,5 m. Venymäliuskan toimittajaksi valittiin HBM. Taulukossa 4 esitetään venymäliuskan mitat ja kuvassa 6 selitteet.

Taulukko 4. Venymäliuskan mitat (HBM n.d.d).

	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	Runkomateriaali	Mittausmateriaali
1-XY31-6/350	6	5,7	18	12	polyimide (muovi)	konstantan

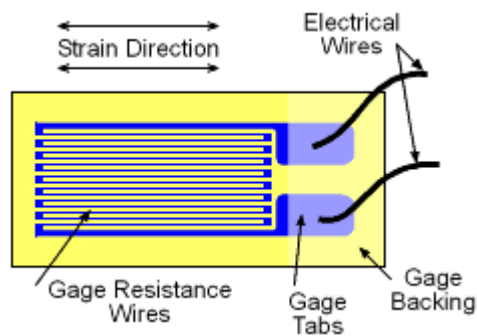


Kuva 6. Venymäliuskan mittojen selitteet (HBM n.d.d).

Valinnan taustalla on kyseisen venymäliuskan monikäyttöisyys myös muissa sovelluskohteissa, jolloin sen toimintaa voidaan testata ja todentaa lopputyön aikana. Venymäliuska on kooltaan 6\*12 mm, jolloin sen käsittely asennuksen aikana on helppoa. Venymäliuska on kuitenkin riittävän pieni asennettavaksi yleisimpiin testauskappaleisiin, joita Ohutlevykeskuksella on testattu. Lisäksi esijohdotus auttaa johdinten kytkentää edelleen mittauslaitteelle, eikä venymäliuskaan tarvitse suoraan juottaa johtimia. Kytkentä voidaan tarvittaessa suorittaa erillisellä kytkentärimalla.

### 3.2 Venymäliuskan rakenne

Venymäliuska koostuu kannattimesta, johtimesta, juotostermiinaaleista ja liimasta (Efunda 2017).



Kuva 7. Venymäliuskan rakenne (Gramol n.d.).

Venymäliuskan runko (Kuvassa 7 Gage Backing) tarvitaan johdinten suojaksi, sillä muutoin mittausjohdinten käsittely olisi mahdotonta. Runko on sähköä johtamatonta materiaalia, ja riippuen kohteesta joko polyimideä eli hyvin lämpöä kestävä muovia tai epoksia, joka on mahdollisesti vahvistettu lasikuidulla (Efunda 2017).

Mittausjohdin (Kuvassa 7 Gage Resistance Wires) on yleensä kromi-nikkelioksesta (karma), kupari-nikkelioksesta (konstantan) tai platinaseoksesta muodostettu yhdensuuntainen verkko, joka taipuessaan tai puristuksessaan muuttaa rakenteen sähkövastusta (Efunda 2017).

Mittausjohtimen materiaali valitaan siten, että johtimen vastuksen muutoksen,  $\Delta R$ , ja venymän,  $\epsilon$ , suhde on likimain kaksi koko elastisella alueella. Tätä suhdetta merkataan kirjaimella  $s$ , slope, ja se voidaan kirjoittaa kaavan 9 muotoon. (Hoffmann 1989, 13.)

$$s = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon} = 2 \quad (9)$$

Mittausjohdin on liimattu venymäliuskan runkoon siten, että liima ja mittausjohdin toimivat yhdessä muutoksien kanssa. Liimana käytetään yleisimmin ohutta kerrosta epoksiliimaa. (Omega n.d.)

Kuvassa 7 esitetyt johtimet (Electrical Wires) ovat kunkin tapauksen mukaisesti poikkipinta-alaltaan riittävät mittaussignaalin kulkemiseen. Johtimet juotetaan venymäliuskalla oleviin juotospintoihin (Kuvassa 7 Gage Tabs), jotka ovat mittausjohtimen päät. (Efunda 2017.)

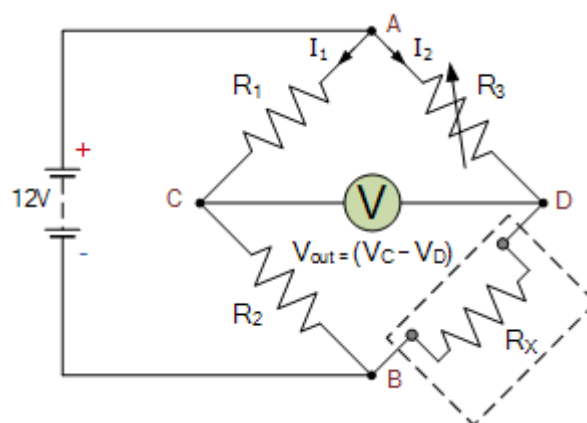
Venymäliuska liimataan rungostaan mitattavaan kappaleeseen. Liuskan liimaamiseen käytetään yleisesti kaksikomponenttista epoksiliimaa tai pika-liiman tapaista syaaniakrylaattia. (Efunda 2017.)

### 3.3 Wheatstonen silta

Antureiden mittaamiseen tulee käyttää tapaa, jolla voidaan eliminoida ulkoiset häiriöt tarkan mittauksen saavuttamiseksi. Anturilta saatu mittaussignaali, -virta tai vastuksen muutos on yleisesti hyvin pieni, joten tätä muutosta halutaan tarkentamisen vuoksi vahvistaa erillisellä vahvistimella. Mitattava signaali sisältää yleisesti jo ennestään kohinaa, joka vahvistuu käytettäessä signaalin vahvistinta. Vahvistimen laadulla voidaan vähentää kohinan vaikutusta signaalista, mutta lisäksi voidaan käyttää kytkentää kuten Wheatstonen siltaa.

Wheatstonen sillan keksijä on Hunter Christie 1800-luvulla. Keksintöä kehitti ja julkaisi Charles Wheatstone, jonka nimellä kytkentä tunnetaan. (Kenyon College n.d.) Wheatstonen siltaa käytetään matalan vastuksen mitauksessa. Kytkennällä voidaan laskea kolmen tunnetun vastuksen mukaan neljännen vastuksen arvo. (Electronics Tutorial n.d.b)

Wheatstonen silta muodostuu kahdesta rinnakkain olevasta haarasta, joissa molemmissa on kaksi vastusta sarjassa. Kuvassa 8 on esitetty Wheatstonen sillan periaate.



Kuva 8. Wheatstonen silta -kytkentä (Electronics Tutorial n.d.a).

Nimetään vastukset, joiden vastusarvot ovat tiedossa, ensimmäisessä haarassa  $R_1$ :ksi ja  $R_2$ :ksi. Haaran kaksi vastukset nimetään vastuksiksi  $R_3$  ja  $R_x$ , joiden arvot muuttuvat. Ideaalitilanteessa silta on tasapainossa eli  $R_1 = R_2 = R_3 = R_x$ , jolloin vastushaarojen, pisteiden C ja D kuvassa 8, välillä ei ole jännite-eroa. Oletetaan että vastus  $R_x$  on tuntematon ja muuttuva, jolloin tasapainon saavuttamiseksi on vastusta  $R_3$  säädettävä, jotta saavutetaan tilanne, jossa vastusten suhteet ovat 1.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} = 1 \quad (10)$$

Kun jännitteet ovat tasapainossa molempien haarojen yli, voidaan johtaa lauseke vastusten suhteeksi, jolla saadaan tuntematon  $R_x$  laskettua tunnettujen vastusten  $R_1$  ja  $R_2$  avulla.

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (11)$$

Wheatstonen sillan joutuessa epätasapainoon muuttuu vastusten suhde, jolloin sillan varsien, pisteiden C ja D kuvassa 8, välille syntyy jännite-ero,  $V_{\text{Out}}$ . Koska mittausmateriaalin venymän ja vastuksen muutoksen suhde tiedetään, voidaan laskennallisesti esittää rakenteessa esiintyvä venymä.

Ulkoiset häiriöt vaikuttavat aina signaalin kulkiessa johtimessa. Ulkoista häiriötä voidaan pienentää johdinten häiriösuojauksella, kuten kierrettyparilla, suojaverkolla sekä foliokäärinnällä tai näiden yhteisvaikutuksella. On muistettava, että johdinta kytkiessä häiriösuojaelementit kytketään vain toisesta päästä mittaavalle vahvistimelle. Tällöin vahvistin maadoittaa suojaelementit ja poistaa mahdolliset häiriöt. Suojaelementtien kytkeminen molemmista päistä muodostaa ylimääräisen johtimen, joka voi pahimmillaan aiheuttaa laitteen hajoamisen.

### 3.4 Häkki- ja siltavakio sekä lämpötila

Gage factor eli häkkivakio on vakio, jolla korjataan Wheatstonen sillasta saadun venymän arvoa. Kerroin on riippuvainen venymäliuskan materiaalista, ja esimerkiksi yleisesti käytetty metallilanka saa arvon lähelle 2. (Hoffmann n.d., 1.)

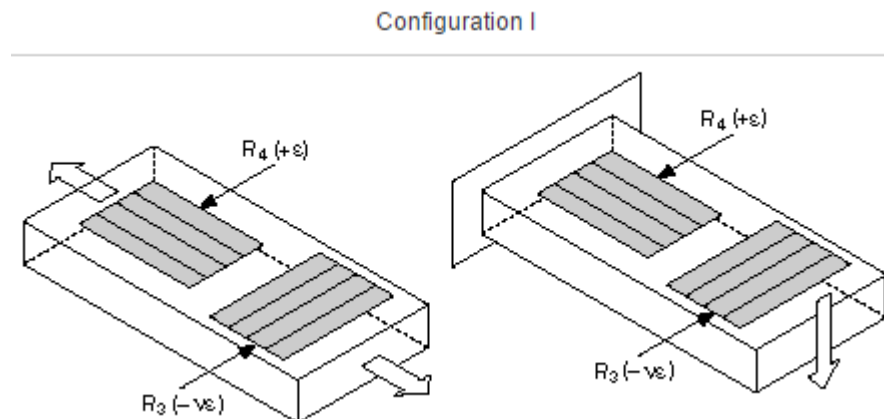
Bridge factor B eli siltavakio on vakio, jolla korjataan Wheatstonen sillassa esiintyvää järjestelmällistä virhettä. Virhe muodostuu 2,6-kertaiseksi käytettäessä neljää mittaavaa venymäliuskaa. Tällöin Poissonin vakio,  $\nu$ , joka saa teräksellä arvon lähelle 0,3, kertautuu kunkin mittaavan venymäliuskan kohdalla. Käytettäessä puolisiltakytkentää siltavakiolle annetaan arvo  $B = 1,3$ . (Hoffmann n.d., 20.)

Lämpötilan vaikutus vastukseen tai testattavaan kappaleeseen on huomioitava. Lämpötilan muutos aiheuttaa materiaalissa lämpölaajenemista tai -kutistumista. Näin ollen laajetessa tai kutistuessa materiaalin ominaisvastus muuttuu ja testauskappaleeseen vaikuttava lämpötilan muutos venyttää samassa suhteessa myös venymäliuskaa, jolloin siihen aiheutuu alkuvienymää. (Hoffmann n.d., 14.)

Lämpötilan vaikutus kompensoidaan omalla venymäliuskillaan, kuten kuvassa 9 on esitetty. Tällöin venymäliuska asennetaan samaan materiaaliin lähelle aktiivista venymäliuskaa, jolloin siihen vaikuttavat lämpötilan vaikutukset samoin kuin aktiiviseen venymäliuskaan. Kompensaatiovenymäliuskillalla tulee olla samat mittaustekniset ominaisuudet kuin aktiivisella venymäliuskillalla. Kompensaatiovenymäliuskaan ei saa vaikuttaa testattavan



kappaleen mitattavat venymämuutokset tai sen sivuvaikutukset. (Hoffmann n.d., 15.)



Kuva 9. Lämpötilan muutoksen kompensointi puolisiltakytkennässä. (National Instruments n.d.).

Suoritetussa mittauksessa lämpötilakompensaatio on toteutettu siten, että mittauksessa käytettiin samalla venymäliuskalla venymän suuntaista mittaushjohtinta aktiivisena ja kompensoationa venymää kohtisuoraa olevaa mittaushjohtinta. Tätä kytkentää voidaan käyttää kyseisessä mittauksessa sillä olettamalla, että rakennus on pituussuunnassa riittävän jäykkä, jolloin sivuttaista eli lämpötilakompensaation suuntaista jännitystä ei esiinny.

### 3.5 Venymäliuskan asennus

Venymäliuskan asennuksessa sovelletaan HBM:n tuottamaa asennusviideota, joka on vapaasti suomennettu seuraavasti: Venymäliuska tulee valmistella ennen asennusta. Mikäli kyseessä ei ole valmiiksi johdotettu venymäliuska, on mittaushjohtinten jalkoihin asennettava juotospinnat, joihin voidaan asennuksen jälkeen juottaa johtimet kiinni. Venymäliuskan päälle, ei liimauspinnalle, laitetaan teippi asennuksen helpottamiseksi. Teippi pitää venymäliuskaa paikallaan liimauksen aikana, ja se on myös helpompi kohdistaa paikalleen.

Venymäliuskan asennus aloitetaan merkkamalla asennuspaikka ja kohdistusristikko merkkamaan keskikohtaa. Asennuspaikka ja sen ympäristö hiotaan hiomakoneella, kulmahiomakoneella tai käsin. Hiontatavan valinta riippuu asennuspaikasta. Kyseisessä asennuksessa käytettiin hiomakonetta ja kulmahiomakonetta, jossa käytettiin lamellilaikkaa.

Merkatun paikan ympäriltä hiotaan maali- ja sinkkipinnoitteet siten, että rakenne, tässä tapauksessa teräs, tulee näkyviin. Aluetta hiotaan noin yksi tai kaksi millia isommaksi kuin mitä asennettava venymäliuska on.

Hiottu alue puhdistetaan alkoholipohjaisella puhdistusaineella käyttäen nukkaantumaton paperia tai kangasta. Puhdistusliina kastellaan puhdistusaineessa, minkä jälkeen yhdensuuntaisilla vedoilla pyyhitään koko hio-

tun alueen yli alkaen jo pinnoitteen päältä. On huomattava, ettei puhdistukseen saa käyttää samaa puhdistuspintaa, eli puhdistusliina tulee vaihtaa jokaisen vedon jälkeen.

Venymäliuska asennetaan ripeästi puhdistuksen jälkeen. Liian pitkä aika puhdistuksen ja asennuksen välillä kerryttää pinnalle pölyä ja muita epäpuhtauksia, jotka vaikuttavat liimaukseen ja liuskan toimintaan. Venymäliuska asennetaan teipin varaan merkatun keskikohdan suuntaisesti huomioiden mittausjohdinten ja oletetun jännityksen suunta.

Teipin varassa ollessaan venymäliuskan alle hiotulle ja puhdistetulle pinnalle pudotetaan tippa notkeaa liimaa, joka levitetään yhdellä vedolla koko venymäliuskan alueelle käyttäen apuna pehmeää muovia. Levityksen jälkeen tulee venymäliuskan päälle laittaa teflonpaperi, jonka päältä voidaan venymäliuska laittaa paikalleen peukalolla painaen. Venymäliuskan päällä pidetään painetta noin minuutin verran, jolloin liima on kovettunut riittävästi.

Venymäliuskan annetaan liimaantua noin 10–15 minuuttia ennen teippien poistoa. Teippien poisto tapahtuu siten, että viimeinen kosketus teipillä on venymäliuskan päädyssä juotospintojen kohdalla.

Mikäli venymäliuskaan tulee juottaa johtimet, voidaan se aloittaa noin 30 minuutin jälkeen liimauksen alusta.

Johtimille tehdään vedonpoistaja, jossa johtimet lähtevät venymäliuskasta pois päin ja kiertävät sen vierestä kohden mittauslaitteistoa. Vedonpoistaja voidaan tehdä liimaa hyväksikäyttäen tai muulla vastaavalla kohteen sallimalla tavalla. Mikäli vedonpoistajan teossa käytetään liimaa, tulee muistaa levittää sitä myös johdinten alle ja antaa sen kuivua riittävän pitkään.

Vedonpoistajan tekemisen jälkeen koko venymäliuska ja johdin suojataan ulkoiselta kosteudelta sekä ilman vaikutukselta. Suojaaminen toteutetaan joko suojakitillä tai silikonilla. (HBMmeasurement 2011.)

### 3.6 Datan tallennuslaitteisto

Työssä käytettiin Ohutlevykeskukseen hankittuja laitteita, jotka tilattiin HBM Finland -yritykseltä.

Datantallennukseen käytettiin CX22B-W:n itsenäistä keskusyksikköä, jonka kautta voidaan lukea mittaustuloksia, käynnistää mittaus ja käsitellä tuloksia. Taulukkoon 5 on kerätty laitteen ominaisuudet ja liitännät.

Taulukko 5. Datatallennin CX22B-W -liitännät (HBM n.d.b).

Sisäinen tallennustila	32GB	(eSSD)
Ulkoinen tallennustila	8GB	
Ethernet-liitännät	3 kpl	(2 x Gigabit RJ45, Wlan)
FireWire	2 kpl	Data + jännite
Multipoint connector	1 kpl	Lisälaitteen kytkentään

USB	3 kpl	1 x USB 3.0, 2 x USB 2.0
DVI-D	1 kpl	
Digitaalinen sisääntulo	3 kpl	
Digitaalinen lähtö	3 kpl	
RS232	1 kpl	

Virtalähteenä käytetään 10-30V DC -lähdettä, jonka voi kytkeä kolmeen lisälaitteeseen FireWire-liitännän kautta.

Yhteys laitteeseen toteutetaan joko langattomasti WiFi-verkolla tai langallisesti RJ-45-verkkokaapelilla. Laitteeseen on asennettu Windows XP:n su-lautettu järjestelmä sekä HBM:n oma mittausohjelmisto Catman Easy.

Mittauksen tulokset CX22B-W-datatalleinnin tallentaa sisäiseen tai ulkoi-seen muistiin valinnan mukaan.

Mittaukseen käytettiin MX1615B-mittausvahvistinta, johon mittalaitteet kytetään. Laitteessa ei itsessään ole mittausohjelmistoa, vaan se vaatii eril-lisen keskusyksikön, joko tietokoneen tai CX22B-W-datatalleintimen. Tau-lukkoon 6 on kerätty MX1615B:n liitännät.

Taulukko 6. MX1615B-vahvistimen liitännät (HBM n.d.a).

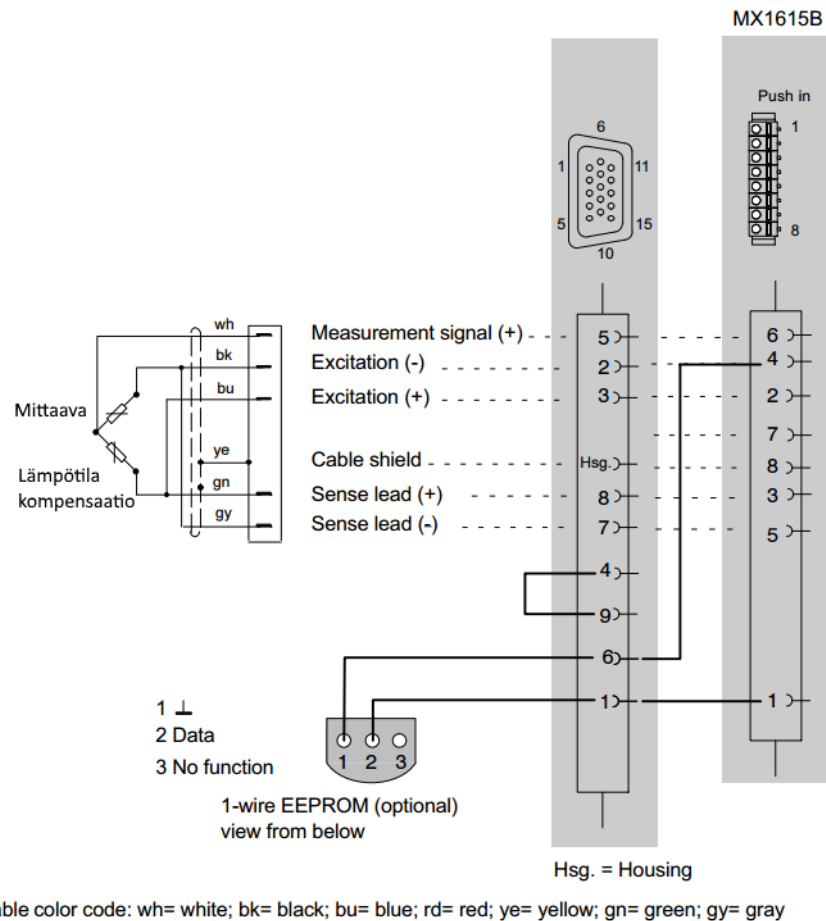
Ethernet-liitännät	3 kpl	(2 x Gigabit RJ45, Wlan)
FireWire	2 kpl	Data + jännite
Kanavia	16 kpl	

Virtalähteenä käytetään 10-30V DC -lähdettä, joka voidaan jakaa FireWire-liitännällä kolmeen muuhun laitteeseen.

Vahvistimeen voidaan kytkeä venymäliuskoja neljännes-, puoli- tai koko-siltana, samoin potentiometrejä tai lämpötilavastuksia.

### 3.7 Kytkennät venymäliuskasta vahvistimeen

Venymäliuskojen kytkentä toteutettiin kuvan 10 mukaan. Kuvassa olevat kaksi vastusta edustavat venymäliuskoja puolisiltakytkennässä. Kuvassa 10 olevista säätövastuksista ylempi on mittaava, eli mittausjohdin on oletetun jännityksen suuntainen, ja kuvassa 10 oleva alempi säätövastuksen mittaus-johdin on kohtisuoraan oletettua jännitystä vastaan ja toimii lämpötilakompensaationa.



Kuva 10. Venymäliuskan kytkentä puolisiltaan (HBM n.d.c., 141).

Ohutlevykeskuksessa käytössä olevassa MX1615-vahvistimessa käytetään riviliitintä, johon johtimen päät kytkettiin puristukseen. Muissa HBM-laitteissa on mahdollista käyttää myös juotettavaa D-sub-liitintä. Riviliittimen käyttö helpottaa useasti muuttuvien testien tekoa, sillä liitännän juotosvaihe jää kokonaan pois.

### 3.8 Mittaustulosten muuntaminen mittauspisteiden jännityksiksi

Laskenta toteutetaan statiikan kaavojen avulla. Momentin maksimi lasketaan, josta voidaan laskea poikkileikkauksen pinnalla vallitseva veto- tai puristusjännitys kaavalla

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_{ely}} + \frac{N}{A} \quad (12),$$

missä

$M_{max}$  on kuormasta aiheutunut maksimimomentti

$W_{ely}$  on joko laskettu tai taulukkoarvo kimmoiselle taivutusvastukselle

$A$  on putken poikkileikkauspinta-ala

$N$  on kuormasta aiheutunut normaalivoima.

Mikäli mittauspisteessä olevan normaalivoiman ja maksimimomentin suhde on suuri, voidaan se jättää huomiotta laskennan kannalta.

Jännityksen ja venymän välillä käytetään Hooken lakia elastisella alueella.

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (13),$$

missä

$\varepsilon$  on venymä

$E$  on kimmokerroin, joka on teräkselle 210 GPa.

Kaavasta 13 voidaan johtaa kaava venymälle seuraavasti:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (14)$$

Venymäliuskasta saatu venymän arvo esitetään yleensä kertoimella  $10^{-6}$ . Mikäli kohteessa esiintyy pelkästään taivutusta, sovelletaan mitattuun venymänarvoon taulukon 7 rivin 5 puolisillan kaavaa, jossa mitattu arvo  $\varepsilon_i$  on kaksinkertainen.

Taulukko 7. Taivutetun palkin venymän korjauskaavat (Hoffmann 1989, 210).

Bridge arm	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	Result	Notes
Bridge equation	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_i$					1
Simple quarter bridge	SG1	$R_C$	$R_C$	$R_C$	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$	2
	SG2	$R_C$	$R_C$	$R_C$	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bbo}$	
Quarter bridge with comp. strain gage	SG1	K	$R_C$	$R_C$	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$	3
	SG2	K	$R_C$	$R_C$	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bbo}$	
Half bridge	SG1	SG2	$R_C$	$R_C$	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_b$	4
Diagonal bridge	SG1	$R_C$	SG3	$R_C$	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{bu}$	5
	SG2	$R_C$	SG4	$R_C$	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{bbo}$	
Diagonal bridge with 2 comp. strain gages	SG1	K	SG3	K	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{bu}$	6
	SG2	K	SG4	K	$\varepsilon_i = 2\varepsilon_{bbo}$	
Full bridge	SG1	SG2	SG3	SG4	$\varepsilon_i = 4\varepsilon_b$	7

Taulukon 7 rivin 5 viimeisellä sarakkeella olevan huomion 4 mukaan jännitys lasketaan taivutetulla palkilla mitatusta venymän arvosta kaavalla

$$\sigma = \frac{1}{2} * \varepsilon_i * E \quad (15),$$

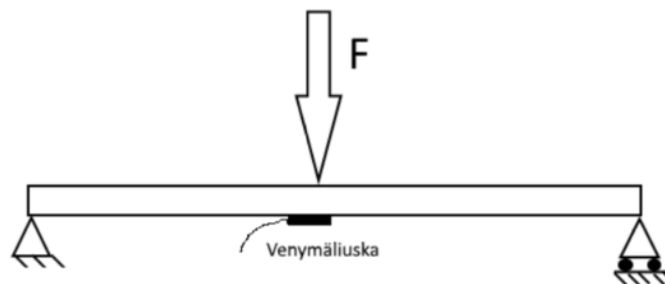
missä

$\varepsilon_i$  on mittaamalla saadun venymän korjattu arvo.

### 3.9 Mittauslaitteiston varmennus

Mittauslaitteiston toiminnalle toteutettiin staattinen testi Hämeen ammatti-  
korkeakoulun Ohutlevykeskuksen koestusradalla. Testausjärjestelyissä to-  
teutettiin yksiaukkoisen palkin kuormitustesti, jossa voidaan todeta mittaus-  
laitteiston toiminta.

Palkiksi valittiin kooltaan 50 mm x 30 mm x 3 mm oleva suorakaideputki,  
jonka pituus oli 1500 mm. Koestusjärjestelyn tuennasta johtuen todellinen  
tukiväli on 1400 mm. Venymäliuska asennettiin palkin jänteen puolenvälin  
vedettyyn pintaan, kuten kuvassa 11 on esitetty.



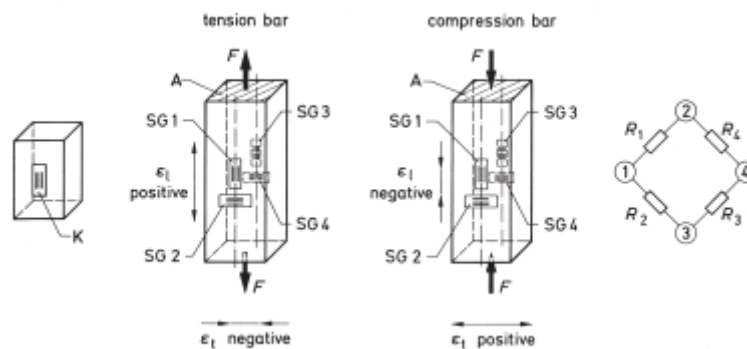
Kuva 11. Varmennuksen periaatekuva.

Testikappaleen materiaali on S355-rakenneteräs. Palkkia kuormitettiin si-  
ten, etteivät jännitykset ylittäneet teräksen myötörajasta 80 %, jolloin on  
oletettavaa, ettei testikappaleeseen muodostu pysyviä muodonmuutoksia ja  
että kappaletta voidaan käyttää jatkossa Ohutlevykeskuksen esittelytilai-  
suuksissa.

Kun myötöraja  $f_y = 355 \text{ Mpa}$ , saadaan sallituksi jännitykseksi  $f_{y,\text{sallittu}} = 284$   
MPa. Momentin maksimi lasketaan tällöin kaavan 12 avulla. Voima  $F_{\text{sallittu}}$   
 $= 4,16 \text{ kN}$ , jolla testikappaletta kuormitetaan koestusradalla, lasketaan kaa-  
valla

$$F = \frac{4 \cdot M_{\text{max}}}{L} = 4,16 \text{ kN} \quad (16)$$

Testissä on tilanne, jossa venymäliuskan kohdalla esiintyy pääsääntöisesti  
pelkkää puristusta tai vetoa, kuten kuvassa 12 on esitelty.



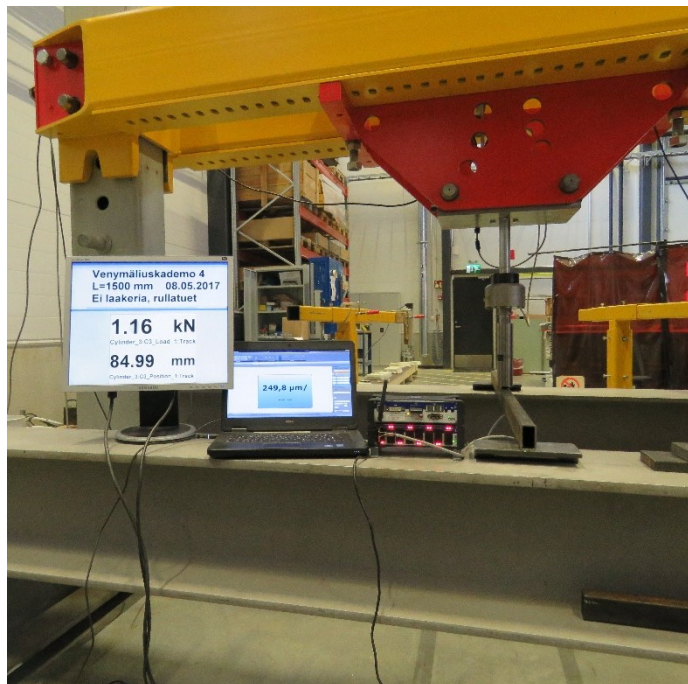
Kuva 12. Puristus- ja vetosauvojen kytkentämallit (Hoffmann 1989, 207).

Kuvan 12 perusteella venymäliuskan näyttämä arvo  $\epsilon_1$  kerrotaan taulukon 8 rivin 5 mukaisesti kertoimella  $(1+\gamma)$ , missä  $\gamma$  on Poissonin vakio  $\gamma = 0,3$ .

Taulukko 8. Venymän korjaus eri siltakytkennöillä (Hoffmann 1989, 207).

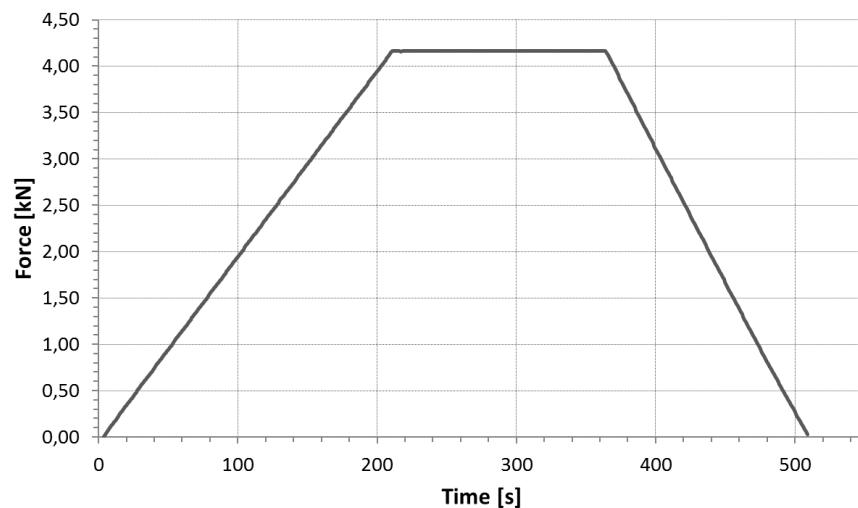
Bridge arm	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	Result	Notes
Bridge equation	$\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \epsilon_i$					1
Simple quarter bridge	SG1	$R_C$	$R_C$	$R_C$	$\epsilon_i = \epsilon_1$	2
Quarter bridge with comp. strain gage	SG1	K	$R_C$	$R_C$	$\epsilon_i = \epsilon_1$	3
Half bridge	SG1	SG2	$R_C$	$R_C$	$\epsilon_i = \epsilon_1 + \epsilon_q = (1 + \nu) \cdot \epsilon_1$	4
Diagonal bridge	SG1	$R_C$	SG3	$R_C$	$\epsilon_i = 2 \cdot \epsilon_1$	5
Diagonal bridge with 2 comp. strain gages	SG1	K	SG3	K	$\epsilon_i = 2 \cdot \epsilon_1$	6
Full bridge	SG1	SG2	SG3	SG4	$\epsilon_i = 2(\epsilon_1 + \epsilon_q) = 2(1 + \nu)\epsilon_1$	7

Kuvassa 13 on esitelty mittausjärjestely ja mittalaitteisto kokeen ollessa käynnissä. Kuvassa 13 olevissa näytöissä vasemmanpuoleinen näyttö esittää sylinterin voimaa sekä siirtymää ja oikeanpuoleinen esittää venymäliuska-asta mitattua venymää  $\epsilon_1$ .

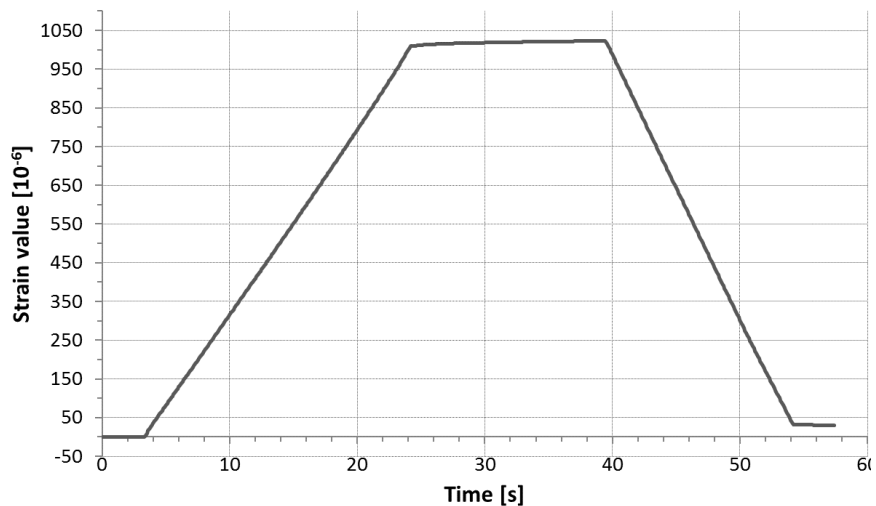


Kuva 13. Koejärjestelyt ja mittalaitteisto, kun koe on käynnissä.

Koeradalla testi suoritettiin siten, että kappaletta kuormitettiin pistekuorman nostamalla kuorman arvoa tasaisesti 0,2 kN/s haluttuun voiman tasoon  $F_{sallittu} = 4,16$  kN voima-aika-kuvaajalla, kuten kuvassa 14 on esitetty. Kun voima saavutettiin, asetettiin 15 sekunnin tasainen jakso, jolloin voima ja muodonmuutokset tasaantuivat ja voima poistettiin nopeudella 0,2 kN/s takaisin lähtöarvoon. Näytteenottonopeus oli 10 Hz. Kuvaan 15 on kerätty venymäliuskan mittaustiedot venymä-aika-kuvaajaan.



Kuva 14. Koestusradan voima-aika-kuvaaja mittauslaitteiston varmennuksesta.



Kuva 15. Venymä-aika-kuvaaja mittauslaitteiston varmennuksesta.

Taulukossa 9 on esitetty koekappaleeseen kohdistuva voima  $F$  ja mitattu venymä  $\epsilon_{\text{mitattu}}$ . Lisäksi taulukkoon 9 on lisätty voimaa vastaava laskettu venymä  $\epsilon_{\text{laskettu}}$  liitteen 3 mukaisesti sekä laskennan ja mitatun venymän erotus prosentteina.

Taulukko 9. Kokeesta saadut ja lasketut arvot.

$\sigma_{\text{mitattu}}$ , Mpa	$\epsilon_{\text{mitattu}}$ , $10^{-6}$	$F$ , kN	$\epsilon_{\text{laskettu}}$ , $10^{-6}$	$\sigma_{\text{laskettu}}$ , Mpa	Erotus, %
279,23	1022,83	4,163	1040,29	284,00	-1,68

Taulukon 9 perusteella mitattu arvo on prosentuaalisesti 1,68 % pienempi kuin laskettu arvo. Tällöin voidaan todeta, että tulos on varmemmalla puolella, mutta kuitenkin erittäin lähellä laskettua arvoa.



Tulosten ero johtuu laskennassa käytetyn elastisen taivutusvastuksen  $W_{el,y}$  arvosta. Laskennassa käytettiin Ruukin rakenneputken käsikirjan mukaisia taulukkoarvoja, mutta todellisuudessa putken valmistuksessa sallitaan tietyt valmistustoleranssit, jotka vaikuttavat paikallisesti muuttaen taivutusvastuksen arvoa. Laskennat ovat esitettynä tarkemmin liitteessä 3.

## 4 KUORMISTA AIHEUTUVAT JÄNNITYKSET

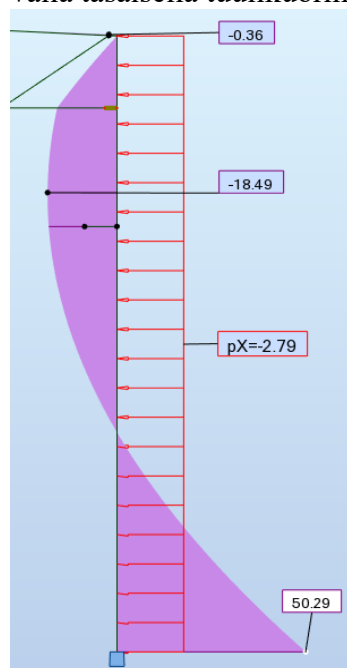
Rakennuksesta oli luotu kehämalli Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmaan Jani Hyyryläisen lopputyössä. Hyyryläisen luomaa mallia hyödyntäen simuloitiin mastopilarin mittauspisteeseen 1 aiheutuva jännitys kahdella erilaisella tuulikuormalla (tasainen ja kolmiokuorma) sekä lumi-kuormalla. Kattoristikon mittauspisteeseen 3 jännitys määritettiin lumi-kuormalla. Seinäpaneelin mittauspisteeseen 2 jännitys määritettiin tuulikuormalla.

Kattopaneelin jännitysten laskenta rajattiin tästä lopputyöstä pois laskennan laajuuden vuoksi. Kattopaneelin laskennassa tulisi ottaa huomioon tarkemmin paneelin muoto, joka toisin kuin seinäpaneelissa on aaltomainen. Lisäksi kattopaneelissa oleva muotoiltu eriste vaikuttaa paneelin taivutukseen enemmän kuin seinäpaneelin suorapintainen eriste. Kattopaneeliin on kuitenkin asennettu valmiiksi venymäliuska sopivaan mittauspisteeseen.

### 4.1 Mastopilari, tuulikuorma

Mastopilarin mittauspisteen momentti laskettiin Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmalla tuulennopeudella 21 m/s mallintaen tuulikuorma tasaisena kuormana sekä kolmiokuormana.

Kuvassa 16 on mastopilarin kuormituksen momenttikuvaaja 21 m/s vastavalla tasaisella tuulikuormalla 2,79 kN/m.



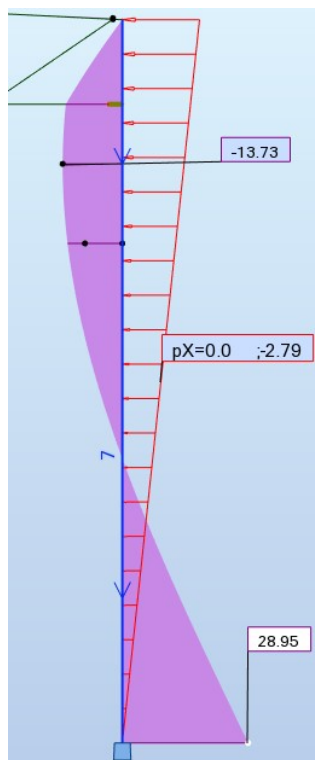
Kuva 16. Mastopilarin momenttikuvaaja tasaisella kuormalla 21m/s.

Taulukossa 10 on esitetty kuvan 16 simuloinnin tulokset mittauspisteessä, joka sijaitsee 0,53 m nivelpisteen yläpuolella.

Taulukko 10. Tuulennopeutta 21 m/s vastaavan tasaisen tuulikuorman maksimi ja mittauspisteen momentti.

Bar / Point (m)	MY (kNm)
Current value	50,29
for bar:	7
in point:	x=0,0 (m)
7 / origin	50,29
7 / user x=0,530	40,30
7 / end	0,00

Kuvassa 17 on mastopilarin momenttikuvaaja, kun 21 m/s tuulennopeutta vastaava tuulikuorma on mallinnettu kolmiokuormana 2,79 kN/m – 0 kN/m.



Kuva 17. Mastopilarin momenttikuvaaja kolmiokuormalla 21 m/s.

Taulukossa 11 on esitetty kuvan 17 simuloinnin tulokset mittauspisteessä, joka sijaitsee 0,53 m nivelpisteen yläpuolella.

Taulukko 11. Tuulenopeutta 21m/s vastaavan kolmiotuulikuorman momentit.

Bar / Point (m)	MY (kNm)
Current value	28,95
for bar:	7
in point:	x=0,0 (m)
7 / origin	28,95
7 / user x=0,530	24,48
7 / end	-0,00

Mittauspisteen momentista voidaan laskea kaavan 12 mukaisesti jännitys, josta voidaan laskea pisteessä esiintyvä venymä. Taulukkoon 12 on kerätty molempien simulointitapausten arvot mittauspisteessä.

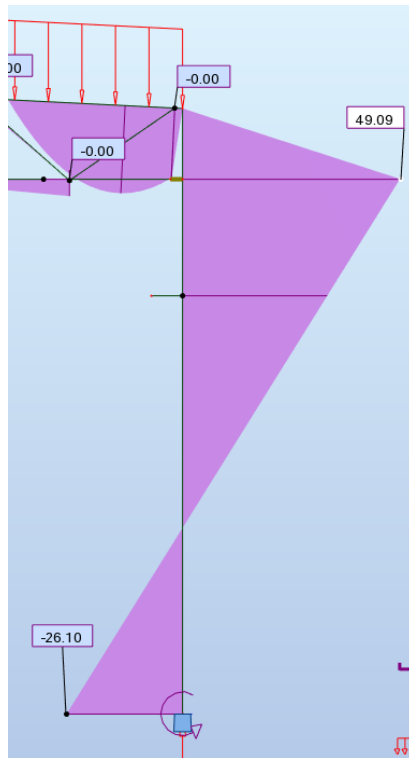
Taulukko 12. Mastopilarin tuulikuormituksen laskennalliset arvot.

tuuli m/s	Kuorman tyyppi	M, kNm	$\epsilon, 10^{-6}$	$\sigma, \text{Mpa}$
21	Tasainen	40,30	254,45	53,43
	Kolmio	24,48	154,56	32,46

Kuormitustapausten laskennat on esitelty tasaiselle kuormalle liitteessä 4 ja kolmiokuormalle liitteessä 5.

#### 4.2 Mastopilari, lumikuorma katolta

Mastopilarin mittauspisteen momentti simuloitiin katolla olevan maksimilumikuorman seurauksena. Kuvassa 18 on mastopilarin momenttikuvaaja lumikuormalla  $2,0 \text{ kN/m}^2$ .



Kuva 18. Mastopilarin momenttikuvaaja, kun lumikuorma katolla on 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

Mittauspisteen momentti kohdassa 0,53 m nivelen yläpuolella on esitetty taulukossa 13 ja taulukkoon 14 on kerätty lumikuorman vaikutuksen laskennalliset arvot mastopilarin mittauspisteestä.

Taulukko 13. Mastopilarin mittauspisteen momentti lumikuormasta 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

Bar / Point (m)	MY (kNm)
Current value	-26,10
for bar:	7
in point:	x=0,0 (m)
7 / origin	-26,10
7 / user x=0,530	-21,36
7 / end	0,00

Taulukko 14. Mastopilarin laskennalliset arvot lumikuormasta 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

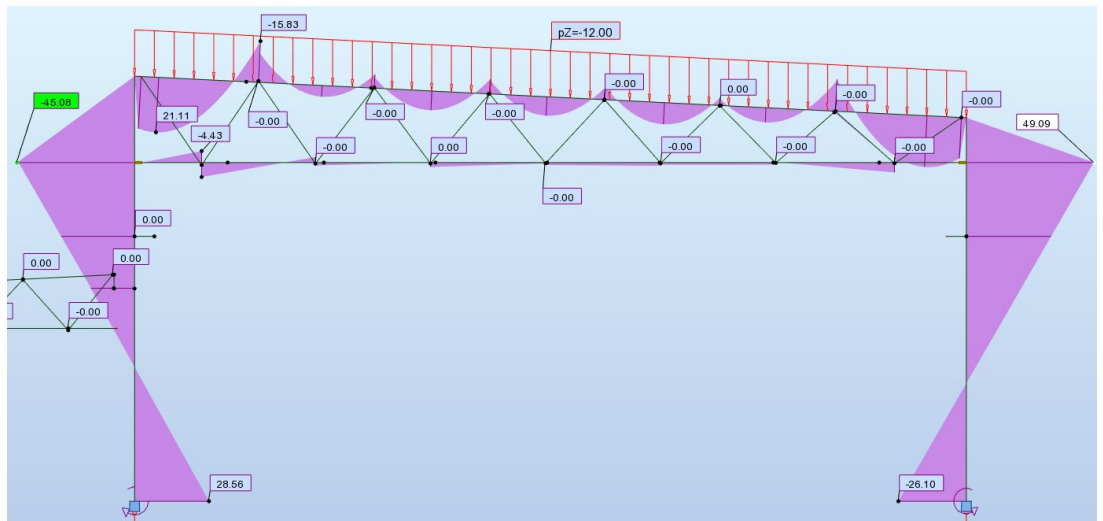
Lumikuorma , s <sub>k</sub> , kN/m <sup>2</sup>	M, kNm	ε, 10 <sup>-6</sup>	σ, Mpa
2,0	-21,36	-134,86	-28,32

Lumikuorman mastopilariin aiheuttaman jännityksen laskenta on esitetty liitteessä 6.

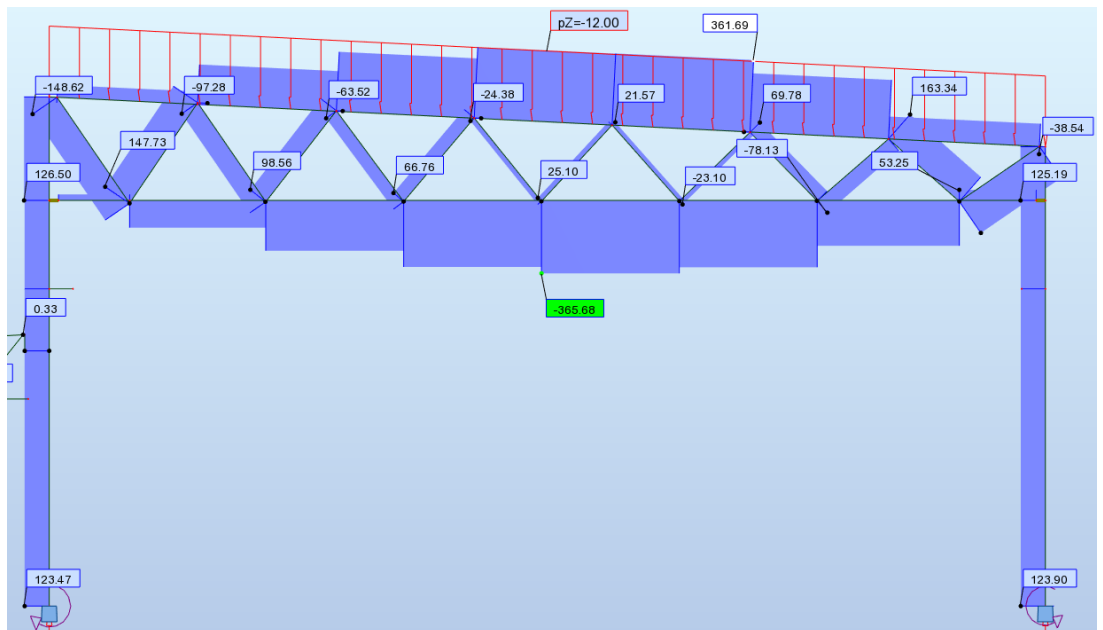
4.3 Kattoristikon alapaarre, lumikuorma

Kattoristikon alapaarteen venymä simuloitiin maksimilumikuormalla 2,0 kN/m<sup>2</sup>. Alapaarreputken mitat ovat 120 x 120 x 6 mm.

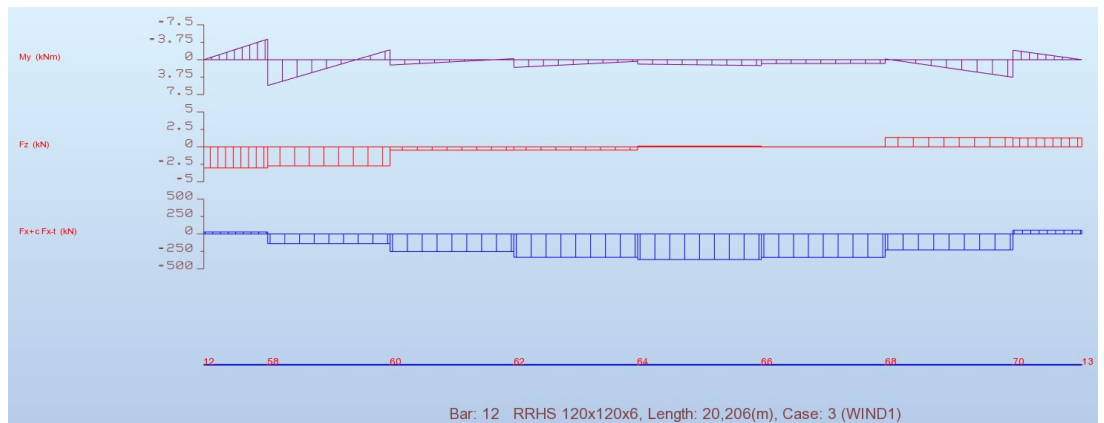
Kuvassa 19 on koko ristikon momenttikuvaaja, kuvassa 20 koko ristikon leikkausvoimakuvaaja ja kuvassa 21 alapaarteen momentti- ja leikkausvoimakuvaajat.



Kuva 19. Ristikon momenttikuvaaja lumikuormasta 2,0 kN/m<sup>2</sup>.



Kuva 20. Koko ristikon leikkausvoimakuvaaja lumikuormasta 2,0 kN/m<sup>2</sup>.



Kuva 21. Alapaarteen momentti- ja leikkausvoimakuvaajat 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

Mittauspiste sijaitsee kattoristikon alapaarteen puolivälissä eli noin 10,10 metrin kohdalla tuesta. Taulukossa 15 on esitetty Autodesk Robot -simuloinnin arvot mittauspisteessä. Taulukosta 15 nähdään, ettei pisteessä esiinny suurta momenttia, mutta pisteen leikkaus- eli normaalivoima on erittäin suuri, jolloin momentin vaikutus voidaan jännityksen laskennasta jättää huomiotta. Taulukkoon 16 on kerätty kattoristikon voimat, jännitykset ja venymät. Kattoristikon alapaarteen laskennat ovat esitetty liitteessä 7.

Taulukko 15. Kattoristikon alapaarteen voimat mittauspisteessä lumikuormalla 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

Bar / Point (m)	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
Current value	-365,68	0,11	0,96
for bar:	12		
in point:	x=10,103 (m)		

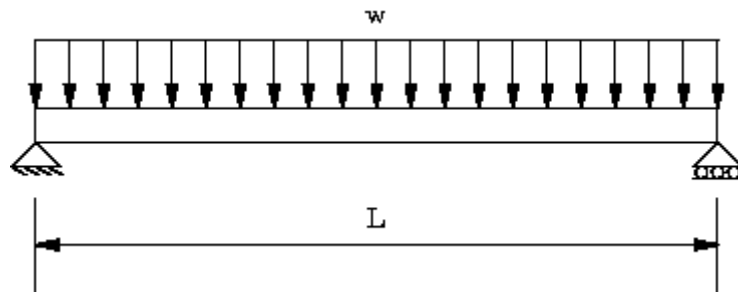
Taulukko 16. Kattoristikon alapaarteen laskennalliset arvot lumikuormasta 2,0 kN/m<sup>2</sup>.

Lumikuorma , s <sub>k</sub> , kN/m <sup>2</sup>	N, kN	M, kNm	ε, 10 <sup>-6</sup>	σ, Mpa
2,0	-365,68	0,96	658,85	138,36

#### 4.4 Seinäpaneeli, tuulikuorma

Seinäpaneelin venymä laskettiin tuulenopeudella 21 m/s, jolloin seinään kohtisuorasti vaikuttava tuulen nopeuspaine on 0,465 kN/m<sup>2</sup>.

Seinäpaneelin oletetaan olevan päistään nivelletty palkki, jota kuormitetaan tasaisella viivakuormalla q<sub>p</sub>, kuten kuvassa 23 on esitetty. Palkin korkeus on sama kuin paneelin paksuus eli b = 235 mm.



Kuva 22. Seinäpaneelin kuormitus (Wikibooks n.d.).

Venymäliuska on asennettu paneelin jänteen ja leveyden puoleen väliin. Tällöin paneelin maksimimomentti voidaan laskea statiikan kaavoja hyväksikäyttäen.

$$M_{maks,paneeli} = \frac{q_p * L^2}{8} \quad (17)$$

Kaavalla 17 laskemalla saadaan momentin maksimi, jolloin voidaan laskea sitä vastaava jännitys kaavalla 12 ja venymä kaavalla 14. Taulukkoon 17 on kerätty laskennan tulokset mitoitustuulikuormalla 21 m/s sekä 10 m/s.

Taulukko 17. Seinäpaneelin laskennalliset arvot tuulen nopeuksilla 10 ja 21 m/s.

tuuli m/s	Pintapaine, kN/m <sup>2</sup>	M, kNm	$\epsilon, 10^{-6}$
10	0,105	0,57	16,30
21	0,465	2,51	72,21

Kimmokertoimen E seinäpaneelille oletetaan olevan sama kuin teräksen sillä oletuksella, että paneelissa oleva eriste vaikuttaa erittäin heikosti paneelin taivutusvastukseen. Seinäpaneelin laskennat ovat esitetty liitteessä 8.

## LÄHTEET

- Efunda (2017). Strain Gages, Selection, Gage Materials. Haettu 3.4.2017 osoitteesta [http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain\\_gages/strain\\_gage\\_selection\\_matl.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain_gages/strain_gage_selection_matl.cfm)
- Electronics Tutorials (n.d.a). Wheatstone Bridge Circuit. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>
- Electronics Tutorials (n.d.b). Wheatstone Bridge. Haettu 3.4.2017 osoitteesta <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>
- Gramol, K. (n.d.). Basic Linear Strain Gage. Haettu 30.3.2017 osoitteesta [https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap\\_sec=08.3&page=theory](https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap_sec=08.3&page=theory)
- HBM (2011). HBM Strain Gauge Installation Video. Youtube-video. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <https://www.youtube.com/>
- HBM (n.d.a). HBM-shop intra. MX1615B Strain Gauge bridge amplifier Data Sheet. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3899.pdf>
- HBM (n.d.b). HBM-shop intra, CX22B-W, CX22B Data Recorder Data Sheet. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b4391.pdf>
- HBM (n.d.c). HBM-shop intra, QuantumX Operation Manual. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/i3031.pdf>
- HBM(n.d.d). HBM-shop, 1-XY31-6/350 Product details. Haettu 30.3.2017 osoitteesta [https://b2bstore.hbm.com/myHBM/app/displayApp/%28cpgnum=1&layout=7.01-16\\_150\\_6\\_9\\_70\\_34\\_65\\_73\\_131\\_6&uiarea=6&ci-tem=679B0B4E540ACD18E1000000AC109934484A494869EF3C62E1000000AC10A039&care=679B0B4E540ACD18E1000000AC109934&rd-b=0&cpgsize=0%29/.do?rf=y](https://b2bstore.hbm.com/myHBM/app/displayApp/%28cpgnum=1&layout=7.01-16_150_6_9_70_34_65_73_131_6&uiarea=6&ci-tem=679B0B4E540ACD18E1000000AC109934484A494869EF3C62E1000000AC10A039&care=679B0B4E540ACD18E1000000AC109934&rd-b=0&cpgsize=0%29/.do?rf=y)
- Hoffmann, K. (1989). *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
- Hoffman, K. (n.d.). *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <https://www.hbm.com/en/3193/tips-and-tricks-applying-the-wheatstone-bridge-circuit/>
- Hyyryläinen, J. (2015). *Ohutlevykeskuksen kehän analyysi, Ristikkoliitoksen kestävyys eurokoodin, FEM-laskennan sekä kuormituskokeen perusteella*. Opinnäytetyö. Rakennustekniikka. Hämeen ammattikorkeakoulu.



Haettu 18.5.2017 osoitteesta <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2015061113219>

Lanki J. (2014). Rakennepiirustus RAK-1. Ohutlevykeskus-piirustukset. Insinööritoimisto TasoPlan Oy.

Kenyon College (n.d.). Instruments for Natural Philosophy, Electrical Measurements, Wheatstone Bridge. Haettu 3.4.2017 osoitteesta [http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Electrical\\_Measurements/Wheatstone\\_Bridge/Wheatstone\\_Bridge.html](http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Electrical_Measurements/Wheatstone_Bridge/Wheatstone_Bridge.html)

National Instruments (n.d.). Half-Bridge Strain Gage Configuration 1. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>

Omega (n.d.). The Strain Gage. Haettu 3.4.2017 osoitteesta <http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>

Ruukki (n.d.). Referenssit, lähes nollaenergiahalli. Haettu 3.4.2017 osoitteesta <http://www.ruukki.com/fin/b2b/referenssit/1%C3%A4hes-nollaenergiahalli>

SFS 1991-1-4 (2011). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. SFS Online, Haettu 30.3.2017 osoitteesta <https://online.sfs.fi/fin/index.html.stx>

SFS 1991-1-3 (2015). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. SFS Online. Haettu 30.3.2017 osoitteesta <https://online.sfs.fi/fin/index.html.stx>

Wikibooks (n.d.). Strength of materials, loading of beams, Beam with continuous loading. Haettu 4.4.2017 osoitteesta [https://en.wikibooks.org/wiki/Strength\\_of\\_Materials/Loading\\_of\\_Beams](https://en.wikibooks.org/wiki/Strength_of_Materials/Loading_of_Beams)

Ympäristöministeriö (2016) Rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus, Kuormat, säännökset ja ohjeet 2016. Haettu 30.3.2017 osoitteesta [http://www.ym.fi/fin-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden\\_lujuus\\_ja\\_vakaus](http://www.ym.fi/fin/FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus)

$$v_{b0} := 21 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Perustuulennopeus}$$

$$c_{\text{dir}} := 1 \quad \text{Suuntakerroin erisuunnasta puhaltaville tuulille. Suomessa arvo 1,0}$$

$$c_{\text{season}} := 1 \quad \text{Vuodenaikakerroin, Suomessa arvo 1,0}$$

Tuulennopeuden perusarvo suunnan ja vuodenajan perusteella:

$$v_b := c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b0} = 21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Rakennuksen mitat

$$b := 48.74 \text{m} \quad h := 9.641 \text{m}$$

koska  $b > h$  niin

$$z_e := h = 9.641 \text{m}$$

Maatoluokan valinta toteutetaan EN1991-1-4 liitteen 1 mukaan

koska maastoluokaksi on valittu 3 niin

$$z_{\text{min}} := 5 \text{m} \quad z_{\text{max}} := 200 \text{m}$$

koska rakennuksen korkeus on suurempi kuin standardin asettama  $z_{\text{min}}$  ja pienempi kuin

$z_{\text{max}}$  niin rosoisuuskertoimen määrittämiseen käytetään EN 1991.1.4 kaavaa 4.4

$$z_0 := 0.3 \text{m} \quad \text{Rosoisuuskerroin taulukosta}$$

$$z_{0II} := 0.05 \text{m} \quad \text{Rosoisuuskerroin taulukosta}$$

$$k_T := 0.19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0II}} \right)^{0.07} = 0.215 \quad \text{Maastokerroin EN 1991-1-4 kaava 4.5}$$

$$c_T := k_T \cdot \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right) = 0.747 \quad \text{Rosoisuuskerroin EN1991-1-4 mukaan}$$

Koska hallin ympäristö on tasainen valitaan EN1991-1-4 A.3 mukaan

$$c_0 := 1 \quad \text{Pinnanmuotokerroin EN1991-1-4 mukaan}$$

$$v_m := c_T \cdot c_0 \cdot v_b = 15.695 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Tuulen nopeusprofiili EN1991-1-4 kaava 4.3 mukaan}$$

Tuulen turbulenssien keskihajonta EN1991-1-4 kaavan 4.6 mukaan

$$k_T := 1 \quad \text{Pyörteisyyskerroin, EN1991-1-4 suositusarvo}$$

$$\sigma_v := k_T \cdot v_b \cdot k_T = 4.523 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tuulenpuuskien intensiteetti EN1991-1-4 kaavan 4.7 mukaan

$$I_v := \frac{k_T}{c_0 \cdot \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right)} = 0.288$$

Koska kyseessä ei ole kansallisen liitteen mukainen hoikka erikoisrakenne niin puuskanopeuspaine lasketaan EN1991-1-4 kaavan 4.8 mukaan

$$\rho := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Ilmantiheys EN1991-1-4 suositusarvo}$$

$$q_p := \left( 1 + 7 \cdot I_v \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 = 0.465 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$v_{b0} := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Perustuulennopeus}$$

$$c_{\text{dir}} := 1 \quad \text{Suuntakerroin erisuunnasta puhaltaville tuuilille. Suomessa arvo 1,0}$$

$$c_{\text{season}} := 1 \quad \text{Vuodenaikakerroin, Suomessa arvo 1,0}$$

Tuulennopeuden perusarvo suunnan ja vuodenajan perusteella:

$$v_b := c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot v_{b0} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Rakennuksen mitat

$$b := 48.74\text{m} \quad h := 9.641\text{m}$$

koska  $b > h$  niin

$$z_e := h = 9.641\text{m}$$

Maatoluokan valinta toteutetaan EN1991-1-4 liitteen 1 mukaan

koska maastoluokaksi on valittu 3 niin

$$z_{\text{min}} := 5\text{m} \quad z_{\text{max}} := 200\text{m}$$

koska rakennuksen korkeus on suurempi kuin standartin asettama  $z_{\text{min}}$  ja pienempi kuin

$z_{\text{max}}$  niin rosoisuuskertoimen määrittämiseen käytetään EN 1991.1.4 kaavaa 4.4

$$z_0 := 0.3\text{m} \quad \text{Rosoiuuskerroin taulukosta}$$

$$z_{0\text{II}} := 0.05\text{m} \quad \text{Rosoiuuskerroin taulukosta}$$

$$k_T := 0.19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0\text{II}}} \right)^{0.07} = 0.215 \quad \text{Maastokerroin EN 1991-1-4 kaava 4.5}$$

$$c_T := k_T \cdot \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right) = 0.747 \quad \text{Rosoiuuskerroin EN1991-1-4 mukaan}$$

Koska hallin ympäristö on tasainen valitaan EN1991-1-4 A.3 mukaan

$$c_0 := 1 \quad \text{Pinnanmuotokerroin EN1991-1-4 mukaan}$$

$$v_m := c_T \cdot c_0 \cdot v_b = 7.474 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Tuulen nopeusprofiili EN1991-1-4 kaava 4.3 mukaan}$$

Tuulen turbulensien keskihajonta EN1991-1-4 kaavan 4.6 mukaan

$$k_I := 1 \quad \text{Pyörteisyyskerroin, EN1991-1-4 suositusarvo}$$

$$\sigma_v := k_I \cdot v_b \cdot k_I = 2.154 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tuulenpuuskien intensiteetti EN1991-1-4 kaavan 4.7 mukaan

$$I_v := \frac{k_I}{c_0 \cdot \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right)} = 0.288$$

Koska kyseessä ei ole kansallisen liitteen mukainen hoikka erikoisrakenne niin

puuskanopeuspaine lasketaan EN1991-1-4 kaavan 4.8 mukaan

$$\rho := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Ilmantiheys EN1991-1-4 suositusarvo}$$

$$q_p := (1 + 7 \cdot I_v) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 = 0.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$b := 30\text{mm}$	demoputken mitat
$h := 50\text{mm}$	
$t := 3\text{mm}$	
$L_{\text{koko}} := 1500\text{mm}$	demoputken kokonaispituus
$L_{\text{tukiväli}} := 1400\text{mm}$	Tukien välinen etäisyys testijärjestelyissä
$E := 210000\text{MPa}$	Teräksen kimmomoduuli
$I_y := 12.83 \cdot 10^4 \text{mm}^4$	Rakenneputket EN 1993 käsikirja 2012
$W_{\text{ely}} := 5.13 \cdot 10^3 \text{mm}^3$	
$f_y := 355\text{MPa}$	Rakenneteräksen myötöraja
$\nu := 0.3$	Poissonin vakio

Valitaan teräksen myötörajasta 80%, jolloin demokappaleen käyttö voidaan toistaa

$$\sigma_{y,\text{sallittu}} := 0.8 \cdot f_y = 284 \cdot \text{MPa}$$

$$M_{\text{max}} := \sigma_{y,\text{sallittu}} \cdot W_{\text{ely}} = 1.457 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\epsilon_{0.8x f_y, \text{venymä}} := \frac{\sigma_{y,\text{sallittu}}}{E} = 1.3524 \times 10^{-3} \quad 0.8x f_y - \text{jännitystä vastaava venymän arvo}$$

$$\epsilon_{\text{venymä, korjattu}} := \frac{\epsilon_{0.8x f_y, \text{venymä}}}{1 + \nu} = 1.04029 \times 10^{-3} \quad \text{Karl Hoffmann Taulukko 8.4-1 s.207 Venymäliuskan oletettu arvo}$$

$$F_{\text{sallittu}} := \frac{4 \cdot M_{\text{max}}}{L_{\text{tukiväli}}} = 4.163 \cdot \text{kN} \quad \text{Kappaleeseen kohdistettu pistekuorma, jolla venymä mitataan putken alapinnasta}$$

$$f_{\text{sallittu}} := \frac{F_{\text{sallittu}} \cdot L_{\text{tukiväli}}^3}{48 \cdot E \cdot I_y} = 8.832 \cdot \text{mm}$$

$$\epsilon_{\text{mitattu}} := 1022.83 \cdot 10^{-6} \quad \text{Mittausdatasta saatu arvo}$$

$$\text{Ero} := \left( 1 - \frac{\epsilon_{\text{mitattu}}}{\epsilon_{\text{venymä, korjattu}}} \right) \cdot 100 = 1.679 \quad \text{Ero prosentteina}$$

$$\epsilon_{\text{mitattu, korjattu}} := \epsilon_{\text{mitattu}} \cdot (1 + \nu) = 1.32968 \times 10^{-3} \quad \text{Mitatun venymänarvon korjaus luvulla 1+poissonin vakio}$$

$$\sigma_{\text{mitattu}} := \epsilon_{\text{mitattu, korjattu}} \cdot E = 279.233 \text{MPa}$$

$$\text{vertailu}_{\text{MPa}} := \left( 1 - \frac{\sigma_{\text{mitattu}}}{\sigma_{y,\text{sallittu}}} \right) \cdot 100 = 1.679 \quad \text{Tulisi olla sama erotus kuin venymillä}$$

Mastopilarin mittauspisteen jännitys 21 m/s tuulenopeutta vastaavalla tasaisella tuulikuormalla

$$M_{21ms} := 40.30 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$b := 200 \text{ mm}$$

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

$$t := 10 \text{ mm}$$

$$W_{ely} := 754.2 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

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

$$\sigma := \frac{M_{21ms}}{W_{ely}} = 53.434 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{21ms} := \frac{\sigma}{E} = 254.448 \cdot \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

Robot malli, tuuli 21m/s = 2,79kN/m tasainen kuorma, mittauspisteessä 0,53m nivelen yläpuolella

Mastopilarin mitat, CFRHS300X200X10

Rakenneputket EN 1993 käsikirja 2012

Teräksen kimmomoduuli

Mitoitusarvo

Mastopilarin mittauspisteen jännitys 21 m/s tuulennopeutta vastaavalla kolmiotuulikuormalla

$$M_{21ms} := 24.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$b := 200 \text{ mm}$$

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

$$t := 10 \text{ mm}$$

$$W_{ely} := 754.2 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

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

$$\sigma := \frac{M_{21ms}}{W_{ely}} = 32.458 \cdot \text{MPa}$$

$$\varepsilon_{21ms} := \frac{\sigma}{E} = 154.563 \cdot \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

Robot malli, tuuli 21m/s = 2,79kN/m kolmiokuorma.  
mittauspisteessä 0,53m nivelen yläpuolella

Mastopilarin mitat, CFRHS300X200X10

Rakenneputket EN 1993 käsikirja 2012

Teräksen kimmomoduuli

$$M_{\text{lumikuorma}} := -21.36 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Robot malli, lumikuorma 2,0kn/m<sup>2</sup>, mastopilarin  
mittauspisteessä 0,53m nivelen yläpuolella

$$b := 200 \text{ mm}$$

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

$$t := 10 \text{ mm}$$

Mastopilarin mitat, CFRHS300X200X10

$$W_{\text{ely}} := 754.2 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

Rakenneputket EN 1993 käsikirja 2012

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

Teräksen kimmomoduuli

$$\sigma := \frac{M_{\text{lumikuorma}}}{W_{\text{ely}}} = -28.321 \cdot \text{MPa}$$

Mitoitusarvo

$$\epsilon_{\text{mittauspiste}} := \frac{\sigma}{E} = -134.864 \cdot \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

Mittapiste puristuksella

$$M_{\text{lumikuorma}} := 0.96 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$N_{\text{lumikuorma}} := -365.68 \text{ kN}$$

Robot malli, lumikuorma  $2,0 \text{ kN/m}^2 = 12 \text{ kN/m}$   
tasainenkuorma

$$b := 120 \text{ mm}$$

$$h := 120 \text{ mm}$$

$$t := 6 \text{ mm}$$

Kattoristikon alapaarteiden mitat

$$W_{\text{ely}} := 93.69 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^3$$

Rakenneputket EN 1993 käsikirja 2012

$$A_{\text{alapaarre}} := 26.43 \cdot 10^2 \cdot \text{mm}^2$$

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

Teräksen kimmomoduuli

$$\frac{M_{\text{lumikuorma}}}{N_{\text{lumikuorma}} \cdot 1 \text{ m}} = -2.625 \times 10^{-3} \text{ Momenttikuorman ja leikkausvoiman vertailu.}$$

Momenttikuorman vaikutus erittäin pieni!

$$\sigma := \frac{N_{\text{lumikuorma}}}{A_{\text{alapaarre}}} = -138.358 \cdot \text{MPa}$$

$$\epsilon_{\text{lumikuorma}} := \frac{\sigma}{E} = -6.5885 \times 10^{-4}$$



$b := 1.2\text{m}$	Paneelin korkeus
$t := 0.6\text{mm}$	Paneelin suojateräksen paksuus
$h := 230\text{mm}$	Paneelin paksuus
$l_{\text{paneeli}} := 6\text{m}$	Paneelin pituus
$E := 210000\text{MPa}$	Teräksen kimmomoduuli
$q_n := 0.465 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	Neliökuorma 17m/s tuulella
$q_p := q_n \cdot b = 0.558 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	Neliökuorman muuttaminen viivakuormaksi
$M := \frac{q_p \cdot l_{\text{paneeli}}^2}{8} = 2.511 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$	Maksimimomentin laskeminen
$\sigma := \frac{M}{t \cdot b \cdot h} = 15.163 \cdot \text{MPa}$	Maksimimomentin aiheuttama jännitys
$\epsilon_1 := \frac{\sigma}{E} = 72.205 \cdot 10^{-6}$	Laskennallinen aiheutunut venymä