

Esimerkkilaskelma

**3-nivelkaari (ympyrä)**

**31.05.2021**

Sisällys

[1 LÄHTÖTIEDOT 3](#_Toc73606865)

[2 KUORMAT 3](#_Toc73606866)

[3 MATERIAALI 4](#_Toc73606867)

[4 MITOITUS 5](#_Toc73606868)

[4.1 TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TAIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA 6](#_Toc73606869)

[4.2 PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA 7](#_Toc73606870)

[4.3 PURISTUSKESTÄVYYS HEIKOMPAAN POIKKILEIKKAUKSEN SUUNTAAN 7](#_Toc73606871)

[4.4 LEIKKAUSKESTÄVYYS MAKSIMI LEIKKAUSVOIMAN KOHDALLA 8](#_Toc73606872)

[4.5 YHDISTETTY TAIVUTUS- JA PURISTUSKESTÄVYYS 8](#_Toc73606873)

[4.6 POIKITTAINEN VETO 9](#_Toc73606874)

[4.7 KIEPAHDUSKESTÄVYYS 11](#_Toc73606875)

[4.7.1 YLÄREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus puristetulla reunalla) 12](#_Toc73606887)

[4.7.2 YLÄREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS 12](#_Toc73606888)

[4.7.3 ALAREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus vedetyllä reunalla) 13](#_Toc73606889)

[4.7.4 ALAREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS 13](#_Toc73606890)

[4.8 KAAREN SIIRTYMÄARVIO 14](#_Toc73606891)

[4.9 Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS 14](#_Toc73606892)

# LÄHTÖTIEDOT

Rakennuspaikka: Helsinki, teollisuusalue

Rakenne: Symmetrinen 3-nivelkaari, ympyrän muotoinen, 1-aukkoiset sekundäärit (orret,

elementissä)

Seuraamusluokka: CC3 => KFI = 1,1

Normit: Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1, DIN 1995-1-1/NA:2013, EN 14080

Kuormat: RIL 201-1-2017, SFS EN 1990, SFS EN 1991-1-1, SFS EN 1991-1-3

# KUORMAT



Lasketaan tässä esimerkissä kuormitustapaus: Omapaino 100 % + epäsymmetrinen lumi 100 %

LUMIKUORMA:

Lumikuorma maassa, sk = 2,75 kN/m² (ei pienennöstä tuen lähellä, koska kaaren kulma tuella 48,59° < 60°).

Katon muotokerroin epäsymmetriselle lumelle  = min (0,2 + 10 x f / L ; 2,0) => 2,0

* lumikuorma katolla qs,k =  x sk => 2,0 x 2,75 kN/m² = 5,5 kN/m²

Koska kaarijako 6000 mm ja kattorakenne (orret) 1-aukkoisia

* Lumikuorma kaarelle, pq,s,k = k/k x qs,k => 6 m x 5,5 kN/m² = 33,0 kN/m

OMAPAINO:

Omapaino kasvaa tukea lähestyttäessä. Tässä laskelmassa yksinkertaistettu mallia siten, että omapaino muuttuu suoraviivaisesti.

Vesikaton omapaino, gk,1 = 0,5 kN/m², lisäksi huomioidaan ripustuskuormat gk,2 = 0,3 kN/m².

Koska kaarijako 6000 mm ja kattorakenne (orret) 1-aukkoisia

* pg,k,1 = k/k x (gk,1 + gk,2) => 6 m x(0,5 kN/m² + 0,3 kN/m²) = 4,8 kN/m (kaaren lakipisteessä)

Arvioidaan liimapuukaaren omapaino eli korkeus 2,08 m ja leveys 0,240 m

* pg,k,2 = 2,08 m x 0,240 m x 5 kN/m³ = 2,5 kN/m (kaaren lakipisteessä)

Lopullinen omapainon kuorma kaarelle

* pg,k = pg,k,1 + pg,k,2 => 4,8 kN/m + 2,5 kN/m = 7,3 kN/m (tuella 7,3 kN/m / cos 48,59° = 11,0 kN/m)

**Murtorajatilan kuorma kaarelle:**

**lumi: pq,s,d = KFI x 1,5 x pq,s,k = 1,1 x 1,5 x 33,0 kN/m = 54,5 kN/m**

**omapaino: pg,d = KFI x 1,15 x pg,k = 1,1 x 1,15 x 7,3 kN/m = 9,2 kN/m (tuella 14,0 kN/m)**

# MATERIAALI

**Liimapuupalkki GL30c 240x2080 (lamellin paksuus t = 33 mm)**



palkin korkeus yli 600 mm

* taivutuslujuuden ominaisarvon korotuskerroin kh = 1,0

Jos lamellin paksuus alle 40 mm, liimapuun taivutuslujuutta saadaan korottaa kertoimella k:



**Aikaluokka: Keskipitkä**

**Käyttöluokka: 1**

* aika- ja käyttöluokka kerroin, kmod = 0,8
* virumaluku, kdef = 0,6

**Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet**

materiaalin osavarmuusluku, M = 1,25

**Ominaislujuus Suunnittelulujuus**

Taivutuslujuus: fm,k = 30,0 N/mm² fm,d= k x kh x kmod x fm,k /M = 19,6 N/mm²

Leikkauslujuus: fv,k = 3,5 N/mm² fv,d= kmod x fv,k /M = 2,24 N/mm²

Puristuslujuus (90°): fc,90,k = 2,5 N/mm² fc,90,d= kmod x fc,90,k /M = 1,60 N/mm²

Puristuslujuus (0°): fc,0,k = 24,5 N/mm² fc,0,d= kmod x fc,0,k /M = 15,7 N/mm²

Vetolujuus (90°): ft,90,k = 0,5 N/mm² ft,90,d= kmod x ft,90,k /M = 0,32 N/mm²

Kimmomoduuli: E0,mean = 13 000 N/mm² E0,05 = 10 800 N/mm²

Liukumoduuli: G0,mean = 650 N/mm² G0,05 = 540 N/mm²

Liimapuussa lamellien paksuus on enintään 45 mm (6…45 mm). Käyttöluokan 3 liimapuussa lamelli-paksuus saa olla enintään 35 mm. Kaarevassa liimapuussa lamellipaksuutta t rajoitetaan lisäksi kaare-vuussäteestä r ja lamellin sormijatkoksille ilmoitetusta taivutuslujuudesta fm,j,dc,k riippuen seuraavasti:



Sormijatkoksen taivutuslujuus määritetään valmistuslinjakohtaisessa sormijatkoksen alkutestauksessa. Minimivaatimuksena on 1,4 x lamellin vetolujuus. Lamellin vetolujuutta voi siis käyttää varmalla puolella olevana ”yleisarvona”. Liimapuulamellien vetolujuudet ja eri liimapuun lujuusluokissa käytettävät lamellit on esitetty EN 14080 standardissa.

GL30c: Ulkolamellit T22 ja sisälamellit T15. Valitaan T15 (heikoimman vaihtoehdon mukaan) => fm,j,k = 27 N/mm² ja ft,0,l,k = 15 N/mm². Lasketaan fm,j,dc,k = 1,4 x ft,0,l,k => fm,j,dc,k = 1,4 x 15 N/mm = 21,0 N/mm². r = rin = Rmid – 2080/2 = 38 960 mm

=> t = 33 mm < 45 mm OK!

# MITOITUS



Laskenta suoritettu Excel-pohjalla, jossa kaari jaettu L/100 –osiin. Tässä tapauksessa tarkasteluväli on 300 mm (vaakamitta). Tarkasteltava kohta x kasvaa A-tuelta B-tuella päin.

Tukireaktiot olivat seuraavat (murtorajatila):

vasen tuki: RA,X = 811,3 kN ja RA,Y = 960,3 kN

oikea tuki: RB,X = 811,3 kN ja RB,Y = 551,9 kN

Kriittiset mitoituskohdat ja niiden voimasuureet olivat seuraavat:

**x:n kohdassa voimasuure**

Leikkaus: 60 000 mm Qd = 243,3 kN

Taivutus: 15 900 mm Md = 2275,2 kNm

Puristus: 0 mm Nd = 1256,9 kN

Yhdistetty taivutus + puristus: 15 600 mm Nd = 872,6 kN ja Md = 2274,4 kNm

Syitä vastaan kohtisuora veto: 47 100 mm Md = 1857,2 kNm

Kiepahdus (+ yhdistetty puristus ja kiepahdus):

kaaren alareuna: 47 100 mm Md = 1857,2 kNm ja Nd = 898,1 kN (puristettu)

kaaren yläreuna: 15 900 mm Md = 2275,2 kNm ja Nd = 865,9 kN (puristettu)

## TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TAIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA

Maksimi taivutusmomentti löytyy kohdasta x = 15 900 mm ja momentin arvo Md = 2275,2 kNm

Lasketaan kl –kerroin:



r = rin + 0,5 x h2 ; rin = kaarevuussäde (sisä)

k1 = 1 + 1,4 x tan  + 5,4 x tan2

k2 = 0,35 – 8 x tan 

k3 = 0,6 + 8,3 x tan  - 7,8 x tan2

k4 = 6 x tan2

Tässä mitoitustapauksessa:



Lasketaan taivutusjännitys maksimi momentin kohdassa:



Lasketaan kr –kerroin (RIL 205-1-2017 s.88):

kaarevilla rakenteilla 

Käytetään lamellin paksuutena t = 33 mm ja tästä seuraa, että rin / t > 240 => kr = 1,0

**Mitoitusehto: **

## PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA

Maksimi puristus löytyy kohdasta x = 0 mm ja puristavan voiman arvo Nd = 1256,9 kN

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:



**Mitoitusehto: **

## PURISTUSKESTÄVYYS HEIKOMPAAN POIKKILEIKKAUKSEN SUUNTAAN

Valitaan puristusvoimaksi maksimi eli Nd = 1256,9 kN ja nurjahduspituudeksi yläpinnan kiepahdus-tukien väli eli L1 = 2 400 mm, koska lyhyempi tukiväli kuin alapinnan L2 = 6 000 mm.

Kaaren nurjahduspituus heikommassa suunnassa (kiepahdustukien väli): Lc,y = L1 => Lc,y = 2 400 mm

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



**Mitoitusehto: **

## LEIKKAUSKESTÄVYYS MAKSIMI LEIKKAUSVOIMAN KOHDALLA

Maksimi leikkausvoima löytyy kohdasta x = 60 000 mm ja leikkausvoiman arvo Qd = 243,3 kN

Koska käyttöluokka 1, niin on huomioitava tehollinen leveys: beff = 1.0 x b => beff = 1.0 x 240 = 240 mm

Lasketaan leikkausjännitys maksimi leikkauksen kohdalla:



**Mitoitusehto: **

## YHDISTETTY TAIVUTUS- JA PURISTUSKESTÄVYYS

Maksimi mitoittava kohta löytyy kohdasta x = 15 600 mm ja puristus Nd = 872,6 kN ja taivutus Md = 2274,4 kNm

Lasketaan kaaren keskuskulma:



Puolikkaan kaaren pituus (tuelta lakipisteeseen kaaren keskilinjaa pitkin):



Tarkistetaan ehto: 0,15 < f / L < 0,5 => 0,15 < 14 582 mm / 60 000 mm = 0,24 < 0,5

=> Voidaan käyttää alla olevaa nurjahduspituuden kaavaa.

Kaaren nurjahduspituus: Lc,z = 1,25 x Lkaari => Lc,z = 1,25 x 33 922 mm = 42 403 mm

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan taivutusjännitys:



Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:



## POIKITTAINEN VETO

Lasketaan puolikkaan kaaren tilavuus: Vb = b x h x Lkaari => Vb = 0,24 m x 2,080 m x 33,922 m = 16,93 m³

Lasketaan mitoitustilavuus: V = 2 / 3 x Vb => 2 / 3 x 16,93 m³ = 11,29 m³

Lasketaan kp -kerroin:



k5 = 0,2 x tan 

k6 = 0,25 – 1,5 x tan  + 2,6 x tan² 

k7 = 2,1 x tan  – 4 x tan² 



Lasketaan poikittainen vetojännitys:



Lasketaan tilavuuskerroin (liimapuu ja Kerto-S),



Lasketaan jännitysjakauma kerroin,



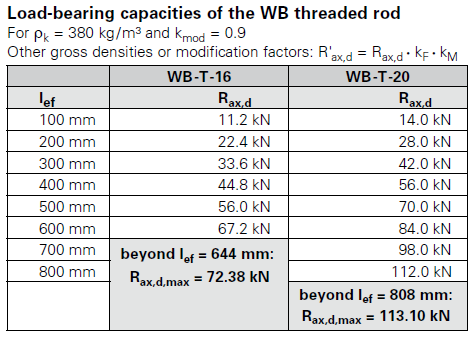
eli kaarella kdis = 1,4

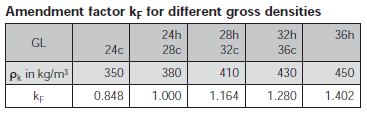
**Mitoitusehto:** 

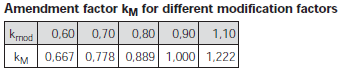
Kyseisiä kaaren alueita voidaan vahvistaa esimerkiksi porattavilla ruuvitangoilla (SFS Intec WB-T-20x2047), jotka porataan tehtaalla kaaren yläpuolelta.

Lasketaan ruuvitangon tehollinen pituus:

Koska tehollinen pituus suurempi kuin 808 mm, voidaan käyttää ruuvitangon maksimikapasiteettia Rax,d,max = 113,10 kN







Lisäksi on huomioitava puun tiheys (interpoloidaan => kF = 1,055) ja aika- ja kosteusluokkakerroin (0,9 => 0,8 eli kM = 0,889):



Lasketaan ruuvientankojen määrä (DIN 1995-1-1/NA:2013-08 mukaan):







## KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kaaren maksimi puristus kaaren alapinnassa ja vastaa-vasti maksimipuristus yläreunassa. Valitaan yläreunan kiepahdustukien väliksi L1 = 2400 mm ja alareunan kiepahdustukien väliksi L2 = 6000 mm. Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

**x:n kohdassa voimasuure**

kaaren alareuna: 47 100 mm Md = 1857,2 kNm ja Nd = 898,1 kN (alareuna puristettu)

kaaren yläreuna: 15 900 mm Md = 2275,2 kNm ja Nd = 865,9 kN (yläreuna puristettu)

Valitaan kerroin => c = 0,70



### YLÄREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus puristetulla reunalla)

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, Lef = L1 + 2 x h => 2400 mm + 2 x 2080 mm = 6560 mm

(Jos kuorma tulee kiepahdustukien kohdalta niin Lef = L1)

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:



Suhteellinen hoikkuus:



Lasketaan 

eli tässä tapauksessa:

Lasketaan taivutusjännitys: 

**Mitoitusehto:** 

### YLÄREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS

Kaaren nurjahduspituus heikommassa suunnassa (kiepahdustukien väli): Lc,y = L1 => Lc,y = 2 400 mm

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan yhdistetty kiepahdus ja puristus:



### ALAREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus vedetyllä reunalla)

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, Lef = L1 – 0,5 x h => 6000 mm - 0,5 x 2080 mm = 4 960 mm

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:



Suhteellinen hoikkuus:



Lasketaan 

eli tässä tapauksessa:

Lasketaan taivutusjännitys: 

**Mitoitusehto:** 

### ALAREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS

Kaaren nurjahduspituus heikommassa suunnassa (kiepahdustukien väli): Lc,y = L1 => Lc,y = 2 400 mm

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan yhdistetty kiepahdus ja puristus:



## KAAREN SIIRTYMÄARVIO

Kaaren siirtymäarvio kannattaa laskea statiikka ohjelman, jolloin tulee tarkemmat ja luotettavam-mat tulokset kuin käsin laskettuna.

## Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS

Rakenteesta tulee tarkastaa kiepahduksen/nurjahduksen 1. ja 2. muoto ja niistä aiheutuvat tukien voimat ja jousijäykkyydet.