

Esimerkkilaskelma

**Kaareva nurkkainen 3-nivelkehä**

**31.05.2021**

Sisällys

[1 LÄHTÖTIEDOT 3](#_Toc73621407)

[2 KUORMAT 3](#_Toc73621408)

[3 MATERIAALI 4](#_Toc73621409)

[4 MITOITUS 5](#_Toc73621410)

[4.1 TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TOIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA 8](#_Toc73621411)

[4.2 PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA 9](#_Toc73621412)

[4.3 KEHÄJALKA 9](#_Toc73621413)

[4.2.1 LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA 9](#_Toc73621420)

[4.2.2 TUKIPAINE TUELLA (HORISONTAALIVOIMA) 9](#_Toc73621421)

[4.2.3 PURISTUSKESTÄVYYS TUELLA (VERTIKAALI VOIMA) 10](#_Toc73621422)

[4.2.4 YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (TASON SUUNNASSA) 10](#_Toc73621423)

[4.2.5 HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA) 11](#_Toc73621424)

[4.2.6 KIEPAHDUSKESTÄVYYS 12](#_Toc73621425)

[4.4 KAAREVA OSA 14](#_Toc73621426)

[4.4.1 YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (NURJAHDUS TASOSSA) 14](#_Toc73621429)

[4.4.2 HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA) 15](#_Toc73621430)

[4.4.3 KIEPAHDUSKESTÄVYYS 16](#_Toc73621431)

[4.5 KEHÄPALKKI 17](#_Toc73621432)

[4.5.1 LEIKKAUSKESTÄVYYS HARJALLA 17](#_Toc73621434)

[4.5.2 PURISTUSKESTÄVYYS HARJALLA 17](#_Toc73621435)

[4.5.3 YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS 17](#_Toc73621436)

[4.5.4 HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA) 19](#_Toc73621437)

[4.5.5 KIEPAHDUSKESTÄVYYS 20](#_Toc73621438)

[4.6 KEHÄN SIIRTYMÄARVIOT 21](#_Toc73621439)

[4.7 Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS 21](#_Toc73621440)

# LÄHTÖTIEDOT

**Rakennuspaikka:** Helsinki, teollisuusalue

**Rakenne:** Symmetrinen 3-nivelkehä (jänneväli 24,23 m), 3-aukkoiset sekundäärit (orret, elementissä)

**Seuraamusluokka:** CC3 => KFI = 1,1 (oletus tässä laskelmassa)

**Normit:** Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1, Liimapuukäsikirja 2015, RIL

153-1984

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

# KUORMAT



Tässä esimerkkilaskelmassa tarkastetaan **vain kaksi** kuormitustapausta:

* KT1: Omapaino + symmetrinen lumi
* KT2: Omapaino + epäsymmetrinen lumi

Myös muut kuormitustapaukset tulee tarkistaa, kuten tuulen aiheuttamat kuormitustapaukset.

LUMIKUORMA:

Lumikuorma maassa, sk = 2,75 kN/m² (ei pienennöstä tuen lähellä).

Katon muotokerroin lumelle  = 0,8 ja epäsymmetriselle 0,5 x  = 0,4

* lumikuorma katolla qs,k =  x sk => 0,8 x 2,75 kN/m² = 2,2 kN/m²

Koska kehäjako 5000 mm ja kattorakenne (orret) 3-aukkoisia

* Lumikuorma kehälle, pq,s,k = 1,1 x k/k x qs,k => 1,1 x 5 m x 2,2 kN/m² = 12,1 kN/m

OMAPAINO:

Omapaino kasvaa tukea lähestyttäessä. Tässä laskelmassa yksinkertaistettu mallia siten, että omapaino pysyy vakiona koko kehän matkalla.

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

Koska palkkijako 5000 mm ja kattorakenne (orret) 3-aukkoisia

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

Arvioidaan liimapuukehän omapaino eli korkeus 1,001 m ja leveys 0,190 m

pg,2,k = 1,001 m x 0,190 m x 5 kN/m³ = 0,95 kN/m (palkkiosan kolmannespisteessä).

Oletetaan kuorma koko kehän matkalle (Harjalla olisi vähemmän ja tuella enemmän)

Lopullinen omanpainon kuorma kehälle

* pg,k = pg,k,1 + pg,k,2 => 4,4 kN/m + 0,95 kN/m = 5,4 kN/m

**Murtorajatilan kuorma kehälle:**

**lumi: pq,s,d = KFI x 1,5 x pq,s,k = 1,1 x 1,5 x 12,1 kN/m = 20,0 kN/m**

**omapaino: pg,d = KFI x 1,15 x pg,k = 1,1 x 1,15 x 5,3 kN/m = 6,7 kN/m**

# MATERIAALI

**Liimapuupalkki GL30c 190x1221…594**



kehän korkeus pääsääntöisesti yli 600 mm

=> taivutuslujuuden ominaisarvon korotuskerroin kh = 1,0

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

* 

**Aikaluokka: Keskipitkä**

**Käyttöluokka: 2**

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

**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 = 20,2 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

# MITOITUS

jänneväli, L = 24 230 mm lamellin paksuus, t = 10 mm

kattokaltevuus,  = 14° kehän leveys, b = 190 mm

kehäjalan korkeus, hf = 1 221 mm kaarevan osan korkeus, h = 1 221 mm

kehäpalkin korkeus harjalla, ht = 594 mm kaarevan osan keskilinjan säde, rm = 3 000 mm

sisäkaaren säde, rin = r = 2 390 mm kehäpalkin ”rautalangan” kaltevuus, p = 14,93° (< 20°)

rakennuksen räystäskorkeus, Hside = 4 000 mm

rakennuksen harjakorkeus, Htop = 7 021 mm

Tarkistetaan lamellin maksimipaksuus (RIL 205-2017):

Liimapuussa lamellien paksuus on enintään 45 mm. Käyttöluokan 3 liimapuussa lamellipaksuus saa olla enintään 35 mm. Kaarevassa liimapuussa lamellipaksuutta t rajoitetaan lisäksi kaarevuussäteestä r ja lamellin sormijatkoksille ilmoitetusta taivutuslujuudesta fm,j,dc,k riippuen seuraavasti:



Sormijatkoksen taivutuslujuus määritetään valmistuslinjakohtaisessa sormijatkoksen alkutestauksessa. Minimivaatimuksen 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.



Harjan keskilinjan korkeus tukitasosta:



Tukireaktiot olivat seuraavat (murtorajatila):

Kuormitus 1: Symmetrinen lumi

**tuilla (tukitasossa):**

pystytukireaktiot:



vaakatukireaktiot:



**harjalla:**

pystyvoima:



vaakavoima:



Kuormitus 2: Epäsymmetrinen lumi

**tuilla (tukitasossa)**

pystytukireaktiot:





vaakatukireaktiot:



**harjalla:**

pystyvoima:



vaakavoima:



Kriittiset mitoituskohdat, niiden voimasuureet ja kuormitustapaus olivat seuraavat (koordinaatiston origo (0,0) vasen tuki).

Laskenta suoritettu Excel-pohjalla, jossa yksi kehän puolikas on jaettu kolmeen osaan: Kehäjalka, kaareva osa ja kehäpalkki:

* Kehäjalka on jaettu kymmeneen osaan (Y-akseli)
* kaareva osa ja kehäpalkki on jaettu kymmeneen osaan (X-akseli).

**x:n kohdassa voimasuure / kuormitus**

Taivutus: 910 mm Md = 689,7 kNm / kuormitus 1

Puristus: 0 mm Nd = 323,5 kN / kuormitus 1

**Kehäjalka:**

Leikkaus tuella: 0 mm Qd = 291,8 kN / kuormitus 1

Normaalivoima tuella: 0 mm Nd = 323,5 kN / kuormitus 1

Yhdistetty taivutus + puristus: y=1 179 mm Nd = 323,5 kN ja Md = 344,5 kNm / kuormitus 1

**Kaareva osa:**

Yhdistetty taivutus + puristus: 910 mm Nd = 418,3 kN ja Md = 689,7 kNm / kuormitus 1

**Kehäpalkki:**

Leikkaus harjalla: 12 115 mm Qd = 90,5 kN / kuormitus 2

Normaalivoima harjalla: 12 115 mm Nd = 281,9 kN / kuormitus 1

Yhdistetty taivutus + puristus: 10 147 mm Nd = 235,4 kN ja Md = 132,5 kNm / kuormitus 2

Maksimi puristus: 2 274 mm Nd = 350,1 kN / kuormitus 1

Kiepahdus:

* kehän alareuna: 910 mm Md = 689,7 kNm / kuormitus 1 (alareuna puristettu)
* kehän yläreuna: 10 147 mm Md = 132,5 kNm / kuormitus 2 (yläreuna puristettu)

## TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TOIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA

Maksimi taivutusmomentti löytyy kohdasta x = 910 mm ja momentin arvo Md = 689,7 kNm (kaareva osa)

Lasketaan taivutusjännitys maksimi momentin kohdassa:



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

kaarevilla rakenteilla 

Käytetään lamellin paksuutena t = 10 mm ja tästä seuraa, että rin / t < 240 => kr = 0,999

**Mitoitusehto: **

## PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA

Maksimi puristus löytyy kohdasta x = 0 mm ja puristavan voiman arvo Nd = 323,5 kN (kehäjalka)

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:



**Mitoitusehto: **

## KEHÄJALKA



### LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA

Maksimi leikkausvoima löytyy kohdasta x = 0 mm ja leikkausvoiman arvo Qd = 291,8 kN

tehollinen leveys beff = b = 190 mm

Lasketaan leikkausjännitys tuen kohdalla:



**Mitoitusehto: **

### TUKIPAINE TUELLA (HORISONTAALIVOIMA)

Tässä laskelmassa ei ole otettu kantaa tukiliitokseen. Siinä tuli muistaa mitoittaa vaakavoiman aiheuttama tukipaine (riippuu liitoksen mallista). Vastaavasti mahdollisen nosteen aiheuttamat rasitukset liitoksessa tulee muistaa tarkistaa.



### PURISTUSKESTÄVYYS TUELLA (VERTIKAALI VOIMA)

Tuen puristavan voiman arvo Nd = 323,5 kN

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:



**Mitoitusehto: **

### YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (TASON SUUNNASSA)

Jotta saadaan kehäjalan nurjahduspituus selville, joudutaan selvittämään seuraavat asiat:

Palkin pituus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, S = 12 538 mm => 0,65 x S = 8 150 mm (kts. RIL 205-1-2017 s.81) => palkin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, hR = 1 096 mm

Pilarin korkeus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, H = 3 523 mm => 0,65 x H = 2 290 mm (kts. RIL 205-1-2017 s.81) => pilarin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, hS = 1 221 mm

Palkin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:



Pilarin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:



Kehäpalkissa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), NR = 350,1 kN

Kehäjalassa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), NS = 323,5 kN

Kehäjalan nurjahduspituus:



Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan taivutusjännitys:



Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:



### HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)

Oletetaan nurjahduspituudeksi kiepahdustukien väli eli Lc,y = 1 179 mm.

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan taivutusjännitys (vahvemman suunnan):



Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:



### KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Kehäjalan puristuspinta on kehän sisäpuolella. Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kehäjalan maksimi puristus kehän sisäpinnassa. Valitaan alareunan kiepahdustukien väliksi L1 = 1 179 mm (tuki kaarevan kohdan alkupisteessä).

Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

**y:n kohdassa voimasuure**

kehän alareuna: 1 179 mm Md = 344,5 kNm / kuormitus 1

Valitaan kerroin => c = 0,70

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, Lef = L1 = 1 179 mm (Jalan taivutus tulee pääosin sen päiden voimasuureista ~ keskilinjalta).

Suorakaidepoikkileikkauksen kriittinen taivutusjännitys:



Suhteellinen hoikkuus:



Lasketaan 

eli tässä tapauksessa:

Lasketaan taivutusjännitys: 

**Mitoitusehto:** 

Lisäksi tarkistetaan yhdistetty puristus ja kiepahdus:



## KAAREVA OSA



### YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (NURJAHDUS TASOSSA)

Kaarevan osan nurjahduspituus (RIL 153-1984 Liimapuurakenteet s. 105):



Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan taivutusjännitys:



Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:



### HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)

Oletetaan nurjahduspituudeksi kiepahdustukien väli eli Lc,y = 3 170 mm (kaareva osa tuettu alku ja loppupisteestä).

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan taivutusjännitys (vahvemman suunnan):



Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:



### KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Kaarevan osan puristuspinta on kehän sisäpuolella. Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kaarevan osan maksimi puristus kehän sisäpinnassa. Valitaan alareunan kiepahdustukien väliksi L1 = 3 170 mm (tuki kaarevan kohdan alku- ja loppupisteessä).

Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

**x:n kohdassa voimasuure**

kehän alareuna: 910 mm Md = 689,7 kNm / kuormitus 1

Valitaan kerroin => c = 0,70

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, Lef = L1 = 3 170 mm mm (Kaarevan osan taivutus tulee pääosin sen päiden voimasuureista ~ keskilinjalta).

Suorakaidepoikkileikkauksen kriittinen taivutusjännitys:



Suhteellinen hoikkuus:



Lasketaan 

eli tässä tapauksessa: 

Lasketaan taivutusjännitys: 

**Mitoitusehto:** 

Lisäksi tarkistetaan yhdistetty puristus ja kiepahdus:



## KEHÄPALKKI



### LEIKKAUSKESTÄVYYS HARJALLA

**Kehäpalkki:**

Leikkaus harjalla: 12 115 mm Qd = 90,5 kN / kuormitus 2

Normaalivoima harjalla: 12 115 mm Nd = 281,9 kN / kuormitus 1

Yhdistetty taivutus + puristus: 10 147 mm Nd = 235,4 kN ja Md = 132,5 kNm / kuormitus 2

Harjan leikkausvoiman arvo Qd = 90,5 kN (kuormitus 2)

Koska käyttöluokka 2, niin tehollinen leveys beff = b = 190 mm

Lasketaan leikkausjännitys tuen kohdalla:



**Mitoitusehto: **

### PURISTUSKESTÄVYYS HARJALLA

Harjan normaalivoiman arvo Nd = 282,3 kN

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:



**Mitoitusehto: **

### YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS

Jotta saadaan kehäpalkin nurjahduspituus selville, joudutaan selvittämään seuraavat asiat:

Palkin pituus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, S = 12 538 mm => 0,65 x S = 8 150 mm (kts. RIL 205-1-2017 s.81) => palkin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, hR = 1 096 mm

Pilarin korkeus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, H = 3 523 mm => 0,65 x H = 2 290 mm (kts. RIL 205-1-2017 s.81) => pilarin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, hS = 1 221 mm

Palkin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:



Pilarin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:



Kehäpalkissa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), NR = 350,1 kN

Kehäjalassa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), NS = 323,9 kN

Kehäpalkin nurjahduspituus:



Palkin korkeus kohdassa 10 147 mm => h = 719 mm

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan taivutusjännitys:

Kehäpalkin yläpinnan kaltevuus 1 = 3,52°

Kerroin km, lasketaan seuraavasti:

kun viistetty reuna on puristettu:







Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:



### HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)

Oletetaan nurjahduspituudeksi kiepahdustukien väli eli Lc,y = 6 000 mm. Määräävä momentti ja normaalivoima löytyvät kohdasta x = 2 274 mm => Md = 527,6 kNm ja Nd = 350,1 kN (jossa poikkileikkaus 190 x 1221).

Lasketaan jäyhyyssäde: 

Lasketaan kaaren hoikkuus: 

Lasketaan muunnettu hoikkuus:

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: 

Lasketaan nurjahduskerroin:





Lasketaan puristusjännitys:



Lasketaan taivutusjännitys (vahvemman suunnan):



Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:



### KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Kehäpalkin puristuspinta vaihtuu momentin 0-kohdassa. Kaarevan osan lähellä sisäpinta on puristettu ja harjan lähellä ulkopinta on puristettu. Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kehäpalkin maksimi taivutus. Valitaan alareunan kiepahdustukien väliksi L1 = 6 000 mm.

**Nurjahdustuet sijoitetaan aina puristetulle puolelle!**

Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

**x:n kohdassa voimasuure**

kehän alareuna: 2 274 mm Md = 527,6 kNm / kuormitus 1

Valitaan kerroin => c = 0,70

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, Lef = L1 – 0,5 x h => 6000 mm – 0,5 x 1221 mm = 5389,5 mm (kuorma vedetyllä reunalla).

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:



Suhteellinen hoikkuus:



Lasketaan 

eli tässä tapauksessa: 

Lasketaan taivutusjännitys: 

**Mitoitusehto:** 

Lisäksi tarkistetaan yhdistetty puristus ja kiepahdus:



Kiepahduskestävyystarkasteluissa ei tarvitse huomioida km, -kerrointa. Tämä siksi, että kriittinen taivutusjännitys on laskettu pääsuunnan ominaisuuksilla. kcrit olisi suurempi, jos lasketaan  = 3,5° ominaisuuksilla.

## KEHÄN SIIRTYMÄ ARVIOT

Kehän siirtymäarvio kannattaa laskea statiikka ohjelman, jolloin tulee tarkemmat ja luotettavammat 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.