

TRY 50
1971-2021



Teräsrakenneyhdistys

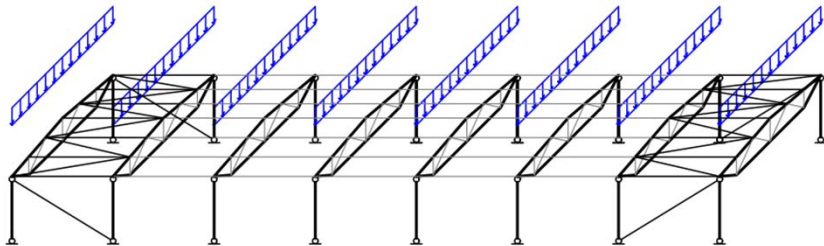
Finnish Constructional Steelwork Association

Nurjahdustuennan jäykkyys ja kestävyys

24.8.2023

T&K-päivät

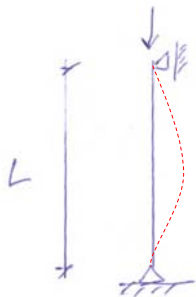
Nurjaldustuenta taustaa



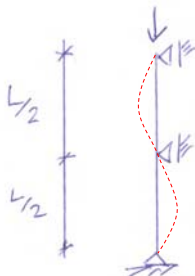
Kuva/animaatio Eki Lehtimäki (LinkedIn-päivitys 21.8.2023)

Nurjhdustuenta taustaa

- Puristettuja sauvoja tuetaan monesti nurjhduspituuden lyhentämiseksi ja kantokyvyn kasvattamiseksi



$$N_{cr0} = \pi^2 EI / L^2$$



$$N_{cr} = \pi^2 EI / (0,5L)^2 \\ = 4N_{cr0}$$

Taustaa: standardien vaatimukset

- Kumottu RakMK B7 (ja puulle tarkoitettu B5):

Kestävyys: vähintään 2 %
puristavasta voimasta

Jäykkyys: ei vaatimusta



11

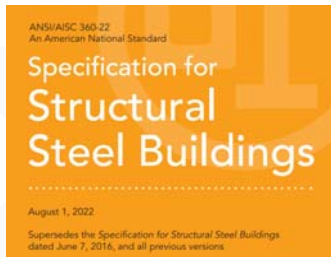
4.3.2 Sivuttaistukien mitoitus

Sivuttaistuki mitoitetaan kohtisuorassa taivutusosaa vastaan puristetun laipan kohdalla vaikuttavalle voimalle F_1 . Voiman suuruudeksi otaksutaan 2 % tuettavan poikkileikkauksen toimivassa puristetussa osassa vaikuttavasta voimasta. Toimiva puristettu osa lasketaan kohdan 4.4.3 mukaan.

Edellä olevaa ohjetta noudatetaan myös puristetuille sauvoille siten, että puristetussa laipassa vaikuttava voima korvataan sauvassa vaikuttavalla puristusvoimalla.

Taustaa: standardien vaatimukset

- AISC 360: vaatimus sekä jäykkyydelle että kestävyydelle



2. Point Bracing

In the direction perpendicular to the longitudinal axis of the column, the required strength of end and intermediate point braces is

$$P_{br} = 0.01P_r \quad (\text{A-6-3})$$

and the required stiffness of the brace is

$$\beta_{br} = \frac{1}{\phi} \left(\frac{8P_r}{L_{br}} \right) \quad (\text{LRFD}) \quad (\text{A-6-4a})$$

$$\beta_{br} = \Omega \left(\frac{8P_r}{L_{br}} \right) \quad (\text{ASD}) \quad (\text{A-6-4b})$$

$$\phi = 0.75 \quad (\text{LRFD}) \quad \Omega = 2.00 \quad (\text{ASD})$$

where

L_{br} = unbraced length adjacent to the point brace, in. (mm)

P_r = largest of the required axial strengths of the column within the unbraced lengths adjacent to the point brace using LRFD or ASD load combinations, kips (N)

Taustaa: standardien vaatimukset

- EN 1993-1-1, ekvivalentti stabiloiva voima

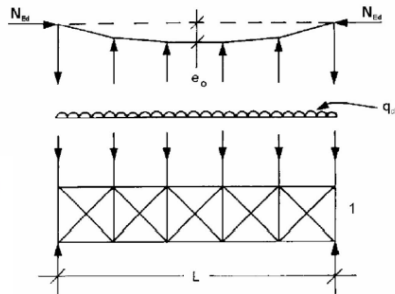
(2) Jäykistysjärjestelmien tukemien sauvojen alkukaarevuuden muodossa olevien alkuepäätarkkuuksien vaikutukset voidaan korvata käyttämällä kuvan 5.6 mukaista ekvivalenttia stabiloivaa voimaa, joka lasketaan kaavasta:

$$q_d = \sum N_{Ed} \delta \frac{e_0 + \delta q}{L^2} \quad (5.13)$$

missä δ on jäykistysjärjestelmän taipuma tasossa, joka aiheutuu kuormasta q_d ja ulkoisista kuormista, jotka lasketaan ensimmäisen kertaluvun teorian mukaan.¹⁾

¹⁾ Suomentajan huomautus:

Kaavan (5.13) käyttö edellyttää iteratiivisia laskelmia. Oikea merkintä on q_{Ed} .



e_0 Epätarkkuus

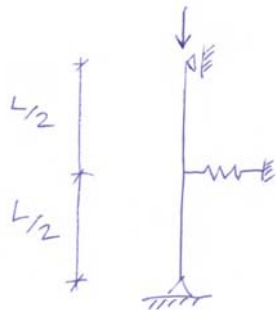
q_d Ekvivalentti voima pituusyksikköä kohti²⁾

1 Jäykistysjärjestelmä

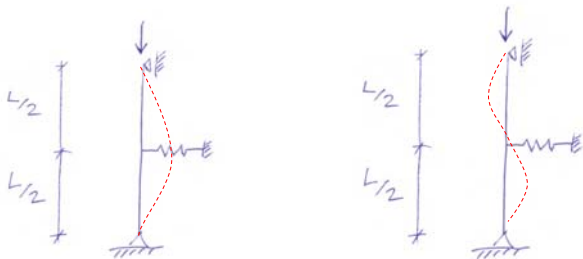
aman N_{Ed} oletetaan olevan vakio jäykistysjärjestelmän pituudella L .
Jos N_{Ed} ei ole vakio, menetelmä on jonkin verran varmallu puolella.

Pistemäisesti tuettu sauva

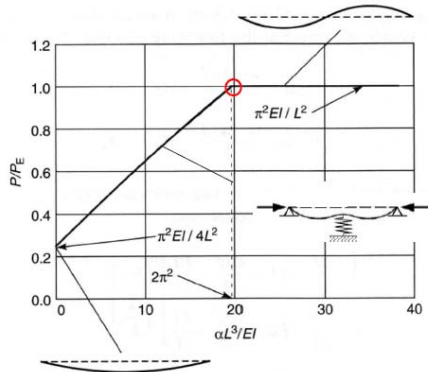
- Tarkastellaan yksittäistä nivelellisesti päistään tuettua pilaria, joka on keskeltä tuettu jousella (jäykkyys k)
- Numeerisesti tai analyyttisesti voidaan ratkaista ideaalisen sauvan tukemiseen riittävä jäykkyys k_{id}



Pistemäisesti tuettu sauva



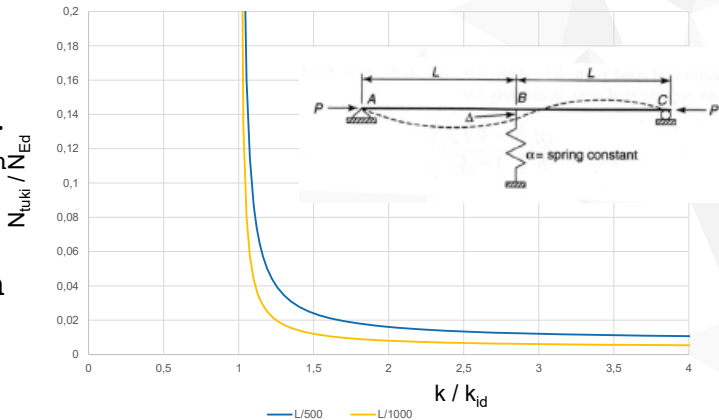
$$k_{id} = 2\pi^2 EI / (L/2)^3$$



Pistemäisesti tuettu sauva

- Otetaan mukaan alkukäyryys
- Analyytisesti johdettu jo n. 60 vuotta sitten (johto ohitetaan tässä, löytyy esim. Galambos, 2008)
- Tulos: tuennassa vaikuttava voima on jousen jäykkyyden funktio

$$F_{\text{tuki}} = \Delta [k_{\text{id}} / (1 - k_{\text{id}}/k)]$$



Pistemäisesti tuettu sauva

- AISC-sääntö johdettu 2x ideaalijäykkyyteen perustuen analyttisesti ja siitä tulee n. 1 % kestävyysvaatimus
- RakMK 2 % kestävyys ei välttämättä riitä, jos tuenta ei kovin jäykkä
- Eurokoodin ekvivalentin voiman kaava toimii hyvin (J. Hietalan luennot esim. eurokoodiseminaari 2022 ja TRY:n kurssilla)

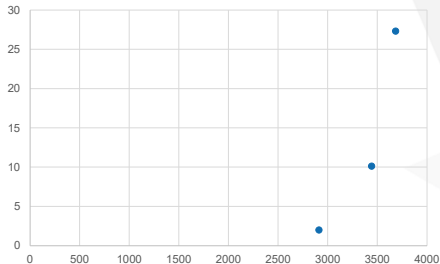
Useita pistemäisiä tukia

- Edellä esitetysti voitaisiin laskea analyttinen tulos myös useammalle pistemäiselle tuelle
- Tässä laskettu ideaalisia jousijäykkyyksiä useammalle tuelle
- Ideaalijousijäykkyys ei kasva lineaarisesti sauvan puristuskestävyyden kanssa

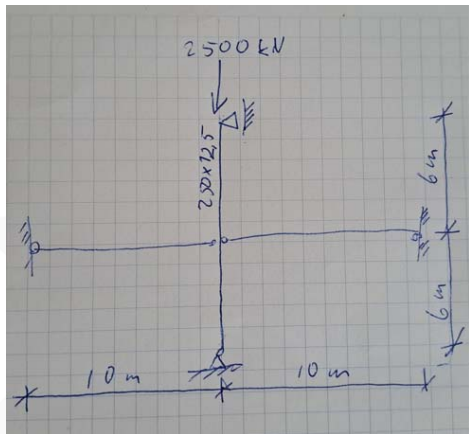
Critical load factor $\lambda_{cr} = 2.4674$ (LC 1)



Critical load factor $\lambda_{cr} = 39.4871$ (LC 1)



Esimerkki: vetotangoin tuettu pilari



- Vetotangot valittu $f_y=700$ N/mm² kestävään 2 % kuormasta, $A= 71 \text{ mm}^2$
- Vetotangon jäykkyys tuolloin $EA/L= 1,5 \cdot 10^6$
- Edellisten kalvojen perusteella laskettu $k_{id} = 1,95 \cdot 10^6$

=>Laskettu jäykkyys ei ole edes ideaalijäykkyyden suuruinen

Lopuksi

- Nurjahdustuentaan kehittyvä voima riippuu (myös) tuennan jäykkyydestä
- Systemillä ei välttämättä riittävää jäykkyyttä, vaikka normin mukainen kestävyys olisi tarkastettu
- Laskenta voi tehdä epälineaarilla numeerisella mallilla, mutta ei automaattisesti lineaarisella FEMillä
- TRY:n ryhmissä tekeillä ohjeistusta aiheeseen

Kirjallisuutta

- Winter, G. (1958), “Lateral Bracing of Columns and Beams,” Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 84, No. ST3, March, pp. 1,561-1–1,561-22.
- Winter, G. (1960), “Lateral Bracing of Columns and Beams,” Transactions of the ASCE, Vol. 125, Part 1, pp. 809–825.
- Galambos & Surovek (2008), Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers, Wiley.
- ANSI/AISC 360-22 (2022) Specification for Structural Steel Buildings, saatavissa <https://www.aisc.org/Specification-for-Structural-Steel-Buildings-ANSIAISC-360-22-Download>
- SFS-EN 1993-1-1 (2005), Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
- RakMK B7 (1988), Teräsrakenteet, ohjeet, ympäristöministeriö.