



Tutkimusprojekti

Esijännitetyn pilarin suunnittelun kehitystyö

Eurokoodiseminaari 2023
28.9.2023

DI Jukka Haavisto
prof. TkT Anssi Laaksonen

Sisältö

- Tausta
- Mitoitusmallin kehittäminen
- Mallin käyttö



Tausta

- Miksi pilariin halutaan esijännitys?

- Poikkileikkauksen halkeilumomentti on suurempi
- ⇒ Momentti-käyritymä –yhteys eroaa teräsbetonipilarista
- Halkeilematon pilari huomattavasti jäykempi kuin halkeillut => 2.kl vaikutusten kautta merkittäväkin vaikutus hoikkien pilarien kapasiteettiin
- Hyödyt pilarin kuljetuksen ja asennuksen aikaisessa käsittelyssä

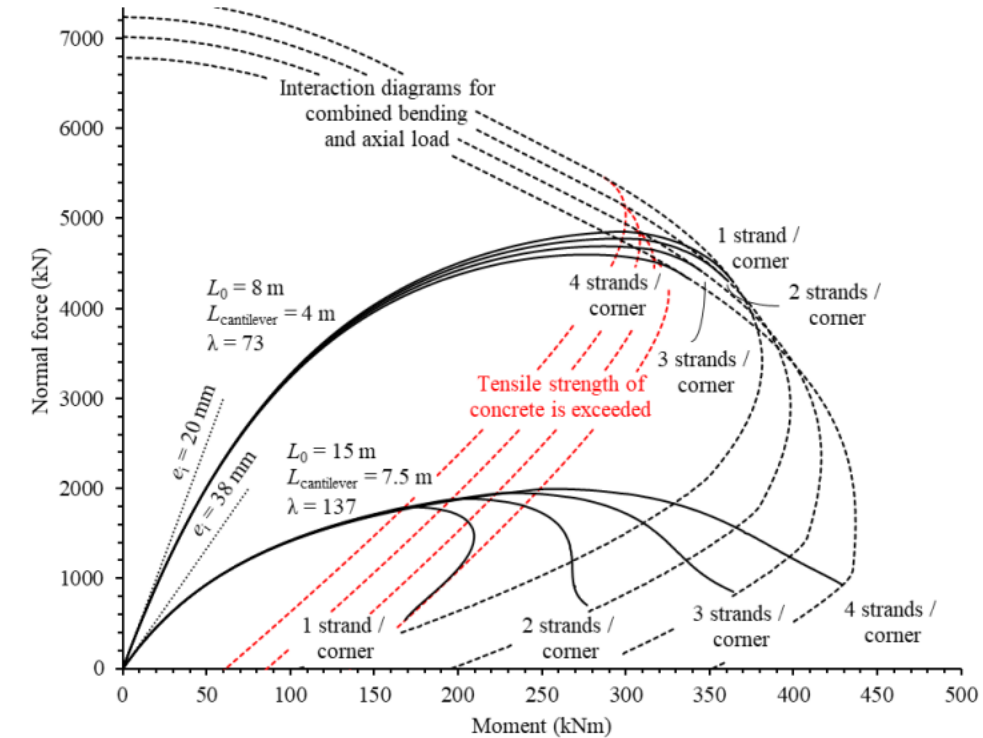


Lähde: Rodgers, Thomas E. Jr. 1984. Prestressed Concrete Poles: State-of-the-Art. PCI Journal Paper. V29, I5, pp. 52-103

Tausta

- Projekti jännitetyn pilarin toiminnasta

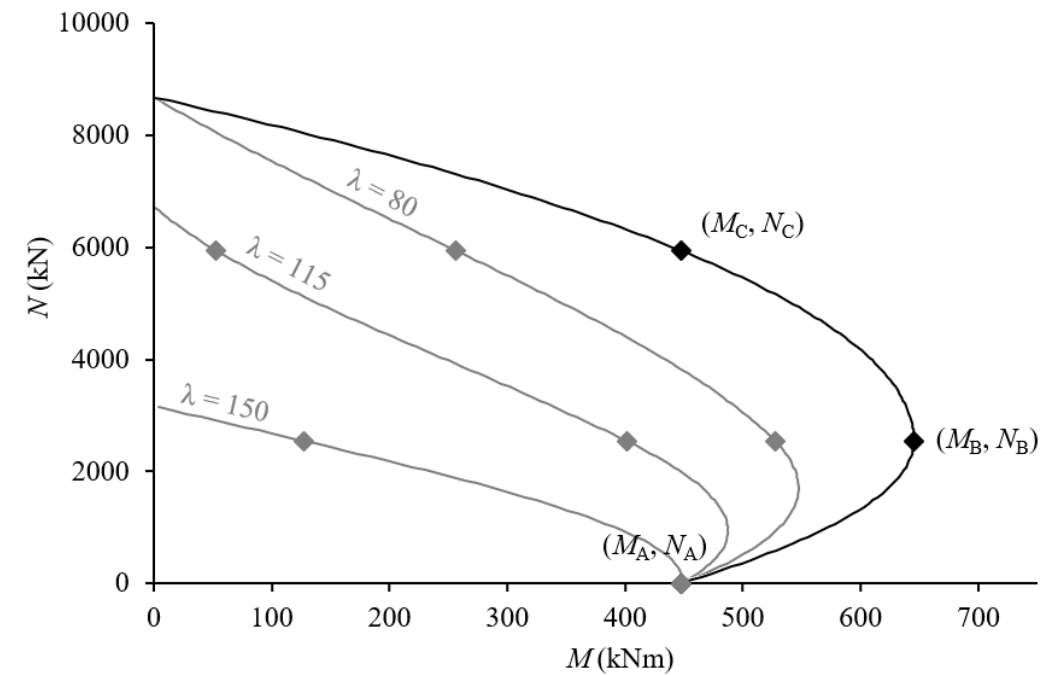
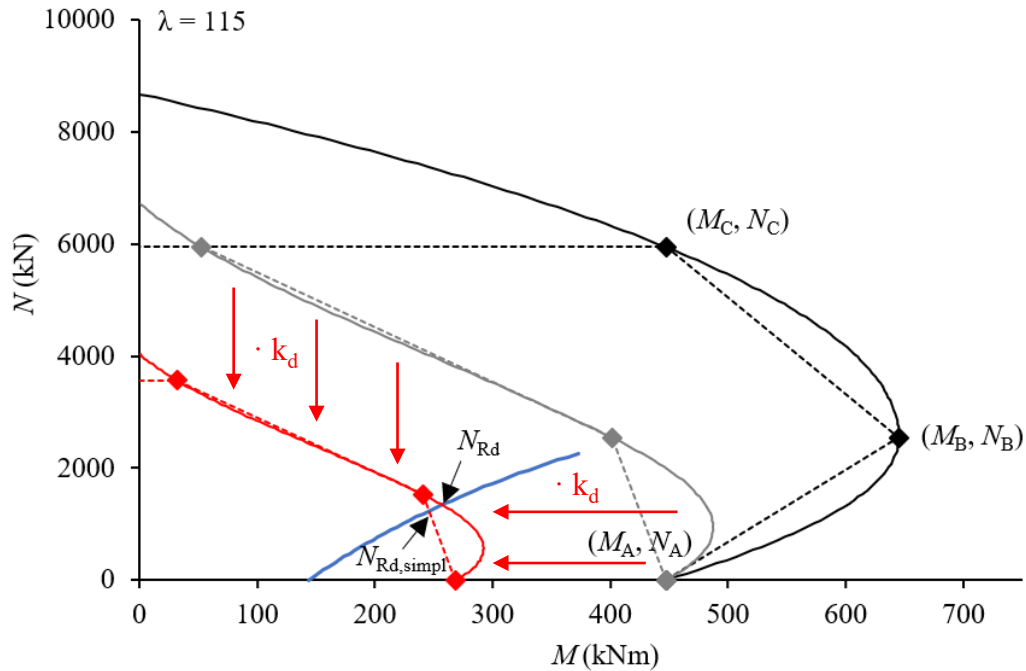
- Esijännitetyn betonipilarin käyttö on ollut Suomessa suhteellisen vähäistä
- Toiminnan selvittämiseksi käynnistettiin prof. A. Laaksosen ohjauksessa monivaiheinen tutkimushanke, jonka lopputuloksena on ollut tavoitteena saada suunnittelukäyttöön soveltuva mitoitusmalli
 - Esiselvitysvaihe 2017
 - Nurjahduskokeet ja siirtymäperusteisen mallin kehittäminen 2019
 - [Haavisto, J., Kerokoski, O., & Laaksonen, A. \(2019\). Second-order analysis of prestressed concrete columns. Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures \(pp. 1068-1074\)](#)
 - [Filatoff, A. \(2020\). Diplomityö: Hoikan esijännitetyn pilarin rakenteellinen toiminta: nurjahduskoe ja siirtymäperustainen laskenta](#)
 - Ensimmäinen versio mitoitusmallista 2021
 - Julkaistava versio mitoitusmallista 2023



Mitoitusmallin kehittäminen -Periaate

- Hoikkuusredusoidaan yv-diagrammia (käänteinen momentinsuurennusmenetelmä)

$$M_R(N) = M(N) \cdot \left(1 - \frac{N}{N_{cr,red}}\right)$$



- Kohdistetaan kapasiteetin varmuus yhteisvaikutusdiagrammin “pienennyskertoimella” k_d
- Määritetään 2.kl sisältävä mitoitusmomentti normaalivoimalle, jossa e_2

$$M_{Ed} = M_{1Ed} + N_{Ed} \cdot (e_\infty + e_2)$$

$$e_\infty = e_i \cdot \frac{1 - \frac{N_{Eqp}}{N_{cr}}}{1 - \frac{N_{Eqp} \cdot (1 + \varphi \cdot \chi)}{N_{cr}}}$$

$$e_2 = \left(\frac{M_{1Ed}}{N_{Ed}} + e_\infty\right) \cdot \frac{1}{\frac{N_{cr,red}}{N_{Ed}} - 1}$$

Mitoitusmallin kehittäminen

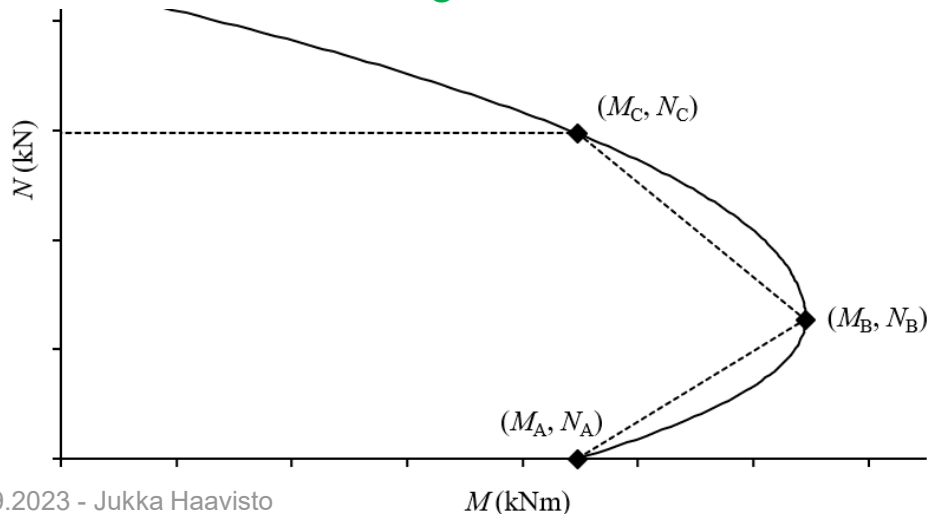
-Taustalaskelmat

- Eurokoodin mukaan yleistä epälineaarista menettelyä voidaan käyttää normaalivoiman rasittamien rakenteiden toisen kertaluvun rakenteellisessa analyysissä
 - Kehitettävä mitoitusmalli on yhteensopiva tämän kanssa
 - Mitoitusmallin taustalle laadittiin siirtymäperusteisella laskennalla 2700 laskentatulosten datapankki
 - Osa lähtötiedoista valittiin ennalta tehdyn herkkyystarkastelun perusteella vakioksi
 - Osin tämän perusteella mitoitusmallille määräytyi käyttöalue
 - Betonin materiaalmalli ja kimmokerroin Eurokoodin (EN 1992-1-1:2005) mukaisesti
 - Taipumaviiva otaksuttu sinimuotoiseksi
 - Poikkileikkauksen sivumitta $b = h = 580\text{mm}$
 - Betonin puristuslujuus (ja kimmokerroin), $f_c = 50\text{ MPa}$, $E_c = 35.7\text{ GPa}$
 - Terästen esijännitys käyttöalueen yläraja $\sigma_{pe} = 1200\text{ MPa}$, jolla herkkyystarkasteluissa mallin hajonta suurimmillaan, ja epävarmin yksittäinen tulos
 - (5) Betonin esijännitys: $\sigma_{ce} = 3.00 ; 4.75 ; 6.50 ; 8.25 ; 10.00\text{ MPa}$
 - Punosten pinta-ala σ_{ce} ja σ_{pe} perusteella
 - (3) Punosten painopisteen etäisyys $d' = h_c/4 ; 3/16 * h_c ; h_c/10$
 - (5) Alkuepäkeskisyys (sis.viruma): $e_0 = L_0/400 ; L_0/282 ; L_0/218 ; L_0/178 ; L_0/150$
 - (4) Hoikkuusluku $\lambda = 75 ; 100 ; 125 ; 150$
 - Lisämomentti
 - (9) $M_1 = 0.0 ; 0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8 * M_{R,0}$
- => Epälineaaraisia laskentatapauksia $5*3*5*4*9=2700$,
joista mallin käyttöalueella 1890 kpl

Mitoitusmallin kehittäminen

-Mitoituskaavat

- Datapankin tulosten avulla kehitettiin mitoituskaavat, jotka monilta osin pohjautuvat analyttisiin kaavoihin ja jotka ovat säädetty mahdollisimman hyvin “tarkkoja” kapasiteetteja vastaaviksi
 - Poikkileikkauksen taivutuskestävyys
 - Murtorajatilaa vastaava taivutusjäykkyys
 - Yhteisvaikutusdiagrammi



$$M_{R,0} = \left(d - \frac{y_{u,est}}{2} \right) \cdot \frac{A_{p,tot}}{2} \cdot f_{p0,1k}$$

$$y_{u,est} = \frac{P + 0.5 \cdot A_{p,tot} \cdot f_{p0,1k}}{b_c \cdot f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}$$

$$EI_{eq} = (0.75 \cdot E_{cm} \cdot I_c + E_p \cdot I_p) \cdot \left(1.6 - \frac{M_{1Ed}}{M_{R,0}} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{nr}}{\lambda}} \cdot \left(1 - \frac{e_{\infty}}{h_c} \right)^2 \leq EI_{el}$$

$$N_A = 0$$

$$M_A = M_{R,0}$$

$$N_B = 0,4 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck} \cdot b_c \cdot h_c - P$$

$$M_B = 0,9 \cdot \left(0,12 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck} \cdot b_c \cdot h_c^2 + 2 \cdot A_{p,tot} \cdot E_p \cdot \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d^2}{h_c} - d + \frac{1}{4} \cdot h_c \right) \right)$$

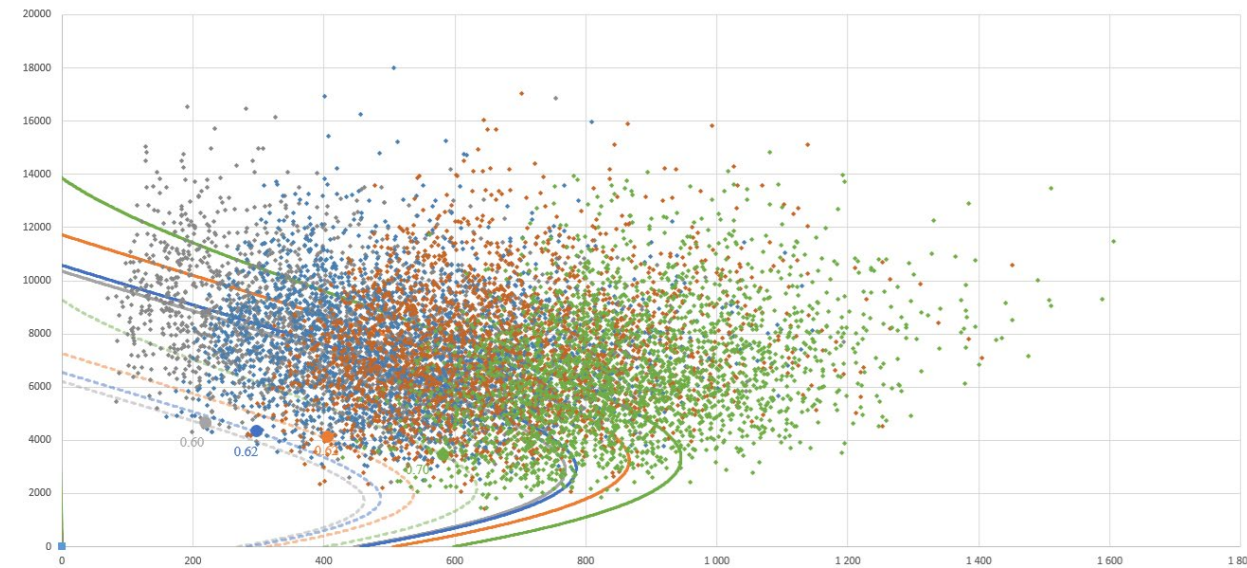
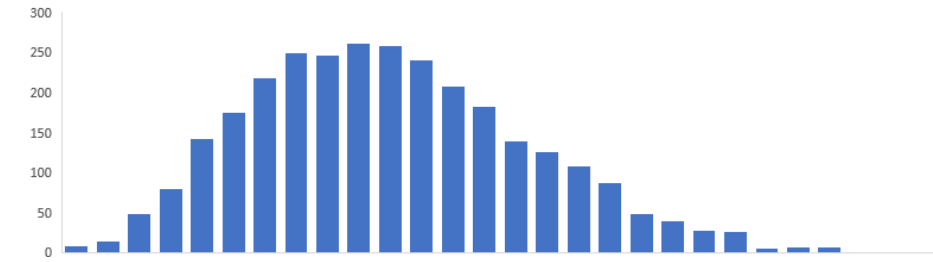
$$N_C = \frac{7}{3} \cdot N_B$$

$$M_C = M_A$$

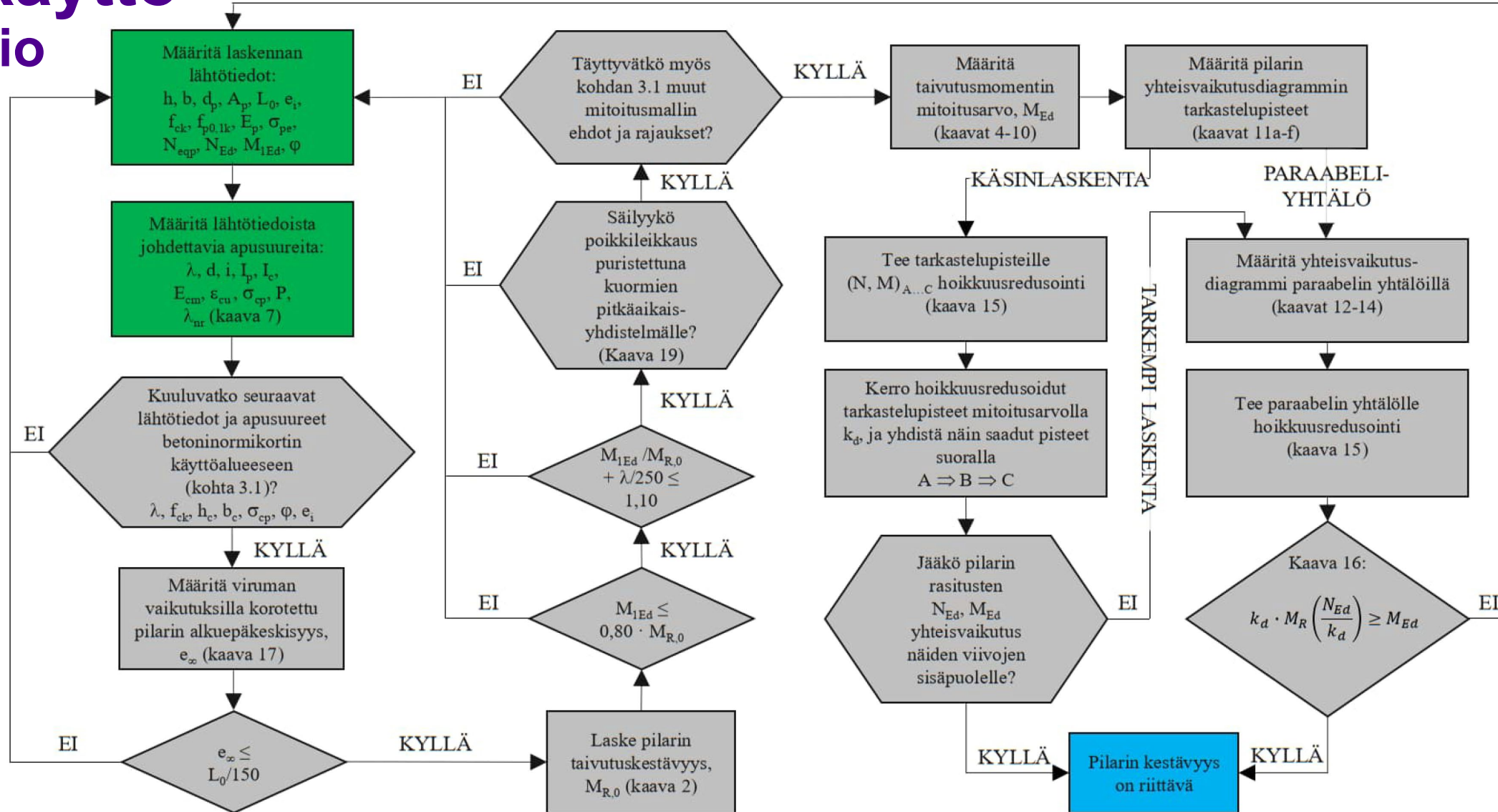
Mitoitusmallin kehittäminen

-Mitoitusvarmuus

- Nurjahdus murtotapana ei toimi hyvin yhteen Eurokoodin osavarmuuslukujen kanssa
 - Mallissa kehitettiin uudenlaisia kaavoja, jolloin osavarmuuslukujen vaikutusta niihin ei tunneta
- ⇒ Riittävä varmuustaso oli tarpeen varmistaa omana laskentanaan
- Varmuusluvun määrittäminen useiden Monte Carlo –simulaatioiden perusteella
 - Satunnaismuuttujina h , f_c , e_0 , f_p , A_p , t , P_e , E_p , φ
 - Lisäksi malliepävarmuus



Mallin käyttö -Vuokaavio



Mallin käyttö -Betoinormikortti

- Mitoitusmallista julkaistaan BY:n betoinormikortti
- Betoinormikortti oli kommentointikierroksella 2022
- Kommenttien perusteella mallin käyttöaluetta laajennettiin
- Ohjeistus myös riittävälle raudoitemäärälle tyven jäykkyyden kannalta
- Päivitetty betoinormikortti ollut normikorttitoimikunnan käsittelyssä 22.9.

Betoinormikortti:
ESIJÄNNITETYN PILARIN MITOITUSMALLI

13.9.2023
1

380x380 mm²
M_{1Ed} = 0 kNm
e_{sp} = l₀/400

— NEd MEd -polku
--- Yhteisvaikutusdiagrammit
--- 3 punosta / nurkka
..... 2 punosta / nurkka

$\lambda = 75$
 $\lambda = 100$
 $\lambda = 125$
 $\lambda = 150$

SISÄLLYS

Kaarvoissa käytetyt merkinnät 2

1. Yleiset rajaukset 5

2. Taustaa 5

3. Esijännitetyn pilarin mitoitus 6

3.1 Rajaukset ja otaksumat 6

3.2 Esijännitetyn pilarin taruuskäyttäytyminen, M_{Ed} 6

3.3 Esijännitetyn pilarin mitoitus hoikkusredusoitu yhteisvaikutusdiagrammia käyttäen 7

3.3.1 Laskokohdat 7

3.3.2 Taruuskäytön mitoitusarvo 7

3.3.3 Yhteisvaikutusdiagrammin laatiminen 8

3.3.4 Pilarin normaali-voimakäyttäytyksen tarkistaminen 8

3.4 Pitkäaikaisvaikutukset 9

4. Rakenteelliset ohjeet 11

4.1 Punojen ankkurointi ja normaali-voiman kohdistuminen pilariin 11

4.2 Punojen sijoitus 13

4.3 Pilarikengät 14

Lähteet 14

Liite A: Laskentaesimerkki 14

Liite B: Kapasiteettikäyriä 16

Liite C: Viokaavio 24

17

24

40

13.9.2023
22

Yhtälöiden yhtiöryhmien ratkaisuna:

$$v_{ab} := \begin{pmatrix} \frac{M_A}{\text{kNm}} \\ \frac{M_B}{\text{kNm}} \\ \frac{M_C}{\text{kNm}} \end{pmatrix}$$

$$v_{ab} := \begin{pmatrix} \frac{N_A}{\text{kN}} \\ \frac{N_B}{\text{kN}} \\ \frac{N_C}{\text{kN}} \end{pmatrix}$$

$$v_{ab} := \begin{pmatrix} \frac{M_{Ed}}{\text{kNm}} \\ \frac{M_B}{\text{kNm}} \\ \frac{M_C}{\text{kNm}} \end{pmatrix}$$

$$v_{ab} := \begin{pmatrix} \frac{N_{Ed}}{\text{kN}} \\ \frac{N_B}{\text{kN}} \\ \frac{N_C}{\text{kN}} \end{pmatrix}$$

$$\text{Solve}(YV_{ab}, v_{ab}) = \begin{pmatrix} -0.00004210 \\ 0.19844345 \\ 236.75863757 \end{pmatrix}$$

$$\text{Solve}_{ab} := \text{Solve}(YV_{ab}, v_{ab}) = \begin{pmatrix} -0.00002368 \\ 0.11162444 \\ 339.06615754 \end{pmatrix}$$

$$M_{YV}(N_0) := \begin{cases} \text{Solve}_{ab} \cdot \frac{m}{\text{kN}} \cdot N_0^2 + \text{Solve}_{ab} \cdot N_0 \cdot m + \text{Solve}_{ab} \cdot \text{kNm} & \text{if } N_0 \geq N_0 \\ \text{Solve}_{ab} \cdot \frac{m}{\text{kN}} \cdot N_0^2 + \text{Solve}_{ab} \cdot N_0 \cdot m + \text{Solve}_{ab} \cdot \text{kNm} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Hoikkusredusoitu yhteisvaikutusdiagrammi:

$$M_{YV,red}(N_0) := M_{YV}(N_0) \cdot \left(1 - \frac{N_0}{N_{0,red}}\right)$$

Muutusuvarmuuden huomioon ottaminen:

$$k_{d,ab} := 0.60$$

$$M_{Ed}(N_0) := k_{d,ab} \cdot M_{YV,red}\left(\frac{N_0}{k_{d,ab}}\right)$$

Kiitoksia!

Kysymyksiä?

JP04