

RakMK B4:n kohta
2.2.5.4 Hoikat rakenneosat

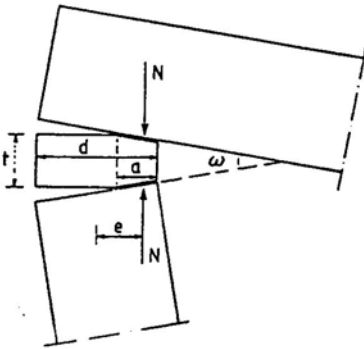
RAKMK B4
painos (julkaisuvuosi)
6. painos (1993)

Hakijan yhteystiedot Parma Betonila Oy
Olli Aho
PL 99
Hakijan allekirjoitus 03101 NUMMELA


Heikki Sarin

Lyhyt selostus menetelmästä, käyttöalue ja mahdollinen kuva

MASTOPILARIN MITOITUSMENETELMÄ



Mitoitusmenetelmä koskee jäykästi tuettua, yksikerroksista teräsbetonipilaria, jonka yläpään tukeutuu palkki tasauslevyn välityksellä. Laskennassa otetaan huomioon pilarin ja palkin pään kiertymäerosta aiheutuva palkin tukireaktion siirtyminen pilarin yläpäässä.

Pilari jaetaan pituussuunnassa jako-osiin ja muodonmuutokset lasketaan ulkoisten rasitusten ja materiaalilähtötietojen perusteella. Pilarin taipuma iteroidaan muodonmuutostilaa vastaavaksi. Laskennassa otetaan huomioon betonin halkeilu ja viruma. Kuormitus jaetaan keston mukaisesti pitkä- ja lyhytaikaiseksi.

Kuva Tasauslevyllinen pilari-palkkiliitos.

Menetelmän rajoitukset

Tukea lukuunottamatta pilarin sivusiirtymää ei ole estetty. Tasauslevyn materiaali on neopreenikumi, jonka kimmokerroin saa olla korkeintaan 500 MPa, jotta kaikki liitoksen muodonmuutokset voidaan olettaa tapahtuvan tasauslevyssä. Menetelmässä oletetaan mastopilari jäykästi tuetuksi. Menetelmä soveltuu sellaisenaan runkoihin, jotka perustetaan tavanomaisille maanvaraisille anturoille tai tukipaaluille. Muissa tapauksissa on perustusten kiertymistä johtuva lisätaipuma ja -rasitus arvioitava erikseen.


Betoniyhdistyksen toimikunta on käynyt läpi ehdotuksen ja todennut sen täyttävän RakMK:n betonirakenteita koskevien määräysten vaatimukset. Kortiston käyttäjällä on vastuu kortiston ohjeiden käytöstä sekä siitä että RakMK:n betonirakenteita koskevia määräyksiä noudatetaan.

Tämä ohje on voimassa yhtä kauan kuin ylläoleva Rakennusmääräyskokoelman B4:n asianomainen kohta. Tämä ohje voidaan peruuttaa Suomen Betoniyhdistys - Finska Betongföreningen r.y.:n harkinnan perusteella.

Helsingissä joulukuun 12 pnä 1997

SUOMEN BETONIYHDISTYS - FINSKA BETONGFÖRENINGEN r.y.


Bengt Jansson


Klaus Söderlund

1. MASTOPILARIN MITOITUSMENETELMÄ

1.1 Käyttökohteet

Mitoitusmenetelmä soveltuu ensisijaisesti yksiläiväisen, yksikerroksisen mastojäykistetyin teräsbetonikehän tarkkaan analysointiin. Menetelmän soveltamisessa tarvitaan tietokoneohjelmaa laskennan iteratiivisen luonteen vuoksi. Menetelmässä määritetään kehän

- pilareiden taipumamuoto,
- pilareiden momenttipinta,
- pilareiden betonin reunajännitykset ja terästen jännitykset,
- pilareita yhdistävän palkin välittämä aksiaalinen voima ja
- pilareihin tukeutuvan palkin tukireaktion epäkeskisyys.

Menetelmää voidaan käyttää sekä käyttö- että murtorajatilan laskentaan. Kehän pilarit voivat olla eri pituisia ja kokoisia. Pilarin päähän voi tukeutua myös kaksi palkkia, joilla on erilaiset tukipinnat ja tukireaktiot. Näin ollen menetelmää voi käyttää myös moniläiväisen kehän analysointiin.

Mitoitusmenetelmästä käytöstä saatava hyöty perustuu teräsbetonipilarin taipuman tarkkaan laskentaan sekä pilarin yläpäähän syntyvän stabiloivan momentin edulliseen vaikutukseen. Nämä yhdessä pienentävät pilarin maksimimomentin arvoa normilaskentaan verrattuna, jolloin pilarin pääterästen määrää voidaan pienentää (katso Liitteen 1 laskentaesimerkki). Laskennasta saatava hyöty on suurimmillaan hoikissa pilareissa, joissa vaikuttaa suuret pystykuormat.

1.2 Mitoitusmenetelmän yleiskuvaus

Menetelmän perusajatuksena on analysoida mastopilareista muodostettu kehä valituilla materiaali- ja poikkileikkausarvoilla. Tarkastelukohteena on rakenteen siirtymät ja jännitykset eli rakenteen kestävyys. Teräsbetonisten mastopilareiden muodostaman kehän analysointiin liittyy seuraavat ominaisuudet, jotka otetaan menetelmässä huomioon.

1. Sekä betoni että teräs käyttäytyvät murtotilanteessa materiaaliominaisuuksiltaan epälineaarisesti.
2. Jokainen muodonmuutostila vastaa uutta kuormitustilannetta kehälle palkin ja pilarin liitoksessa tapahtuvan tukireaktion siirtymisen aiheuttaman momenttikuoormituksen takia.
3. Liitoksen kosketuspinnassa tapahtuvien ilmiöiden laskenta sisältyy analyysiin.

Rakenteen tasapainotilat ratkaistaan luvun 2. mukaisista perusotaksumista. Ratkaisua haetaan pilareiden taipumamuodon ja poikkileikkausten käyritysmien välisestä yhteydestä.

1.3 Pilareiden epäkeskisyyksien ja alkukiertymien huomioon ottaminen

Menetelmässä otetaan huomioon pilareiden epäkeskisyys betoninormien /1/ mukaisesti siten, että kehän pilarit muodostavat kulman α pystysuunnan kanssa. Ellei tarkempia arvioita tehdä, valitaan α siten, että $\tan\alpha = 1/150$. Vinoudesta johtuva vaakavoima on siten $N/150$, missä N on pilariin vaikuttava pystykuorma.

Palkin pään kiertymä johtuu suurimmaksi osaksi ulkoisesta kuormituksesta (oma paino ja hyötykuorma) ja mahdollisesta palkin esi- tai jälkijännityksestä. Yleensä palkin päiden tukikiertymät ovat itseisarvoltaan yhtä suuria, mutta erimerkkisiä (koska palkin kuormitus on yleensä symmetrinen). Näin ollen palkin tukireaktioista johtuvat vaaka-voimat kumoavat toisensa.

Pilarin päiden alkukiertymät, jotka johtuvat valmistustoleransseista ja joiden ei katsota sisältyvän pilarin alkuepäkesisyyteen, otetaan huomioon antamalla kullekin pilarille toleransseista /2/ laskettu alkukiertymä siten, että kiertymien suunnat ovat rakenteelle epäedullisia.

2. PILARIN ANALYSOINTI

Pilarin analysoimiseksi rakenne jaetaan jako-osiin pilarin pituussuunnassa. Yleensä 10 jako-osan käyttäminen antaa riittävän tarkkoja tuloksia. Pilarin laskenta suoritetaan jako-osittain, joissa lasketaan ulkoisista kuormituksista poikkileikkausta rasittavat normaalivoimat ja taivutusmomentit.

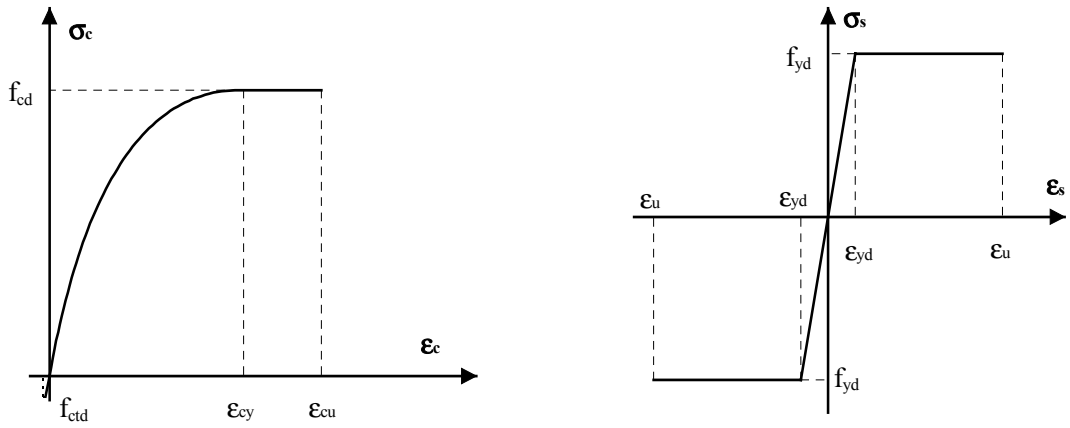
Laskennassa myös pilarin poikkileikkaus jaetaan jako-osiin, joissa poikkileikkauksen jännitykset ja muodonmuutokset lasketaan. Jako-osan sisällä jännitykset ovat lineaarisia ja koko poikkileikkauksen jännitys jakauma muodostuu jako-osien murtoviivasta. Riittävä tarkkuus saavutetaan, kun poikkileikkaus jaetaan 10 jako-osaan.

Reunamuodonmuutosten laskennassa otetaan huomioon betonin ja terästen jännitysten ja muodonmuutosten väliset yhteydet sekä halkeilun ja viruman vaikutus. Analysoinnissa käytetään seuraavia perusotaksimia.

1. Pilarin poikkileikkaustasot säilyvät tasoina kuormituksen vaikuttaessa eli Bernoullin hypoteesi on voimassa.
2. Taipumafunktion ensimmäisen derivaatan vaikutusta käyristymän ja momentin väliin yhteyteen ei oteta huomioon. Samoin leikkausvoimista aiheutuvat taipumat jätetään pois tarkasteluista.
3. Betonin ja teräksen jännitysten ja muodonmuutosten väliset yhteydet otaksutaan kuvan 1 mukaisiksi. Betonin vetojännitykset otetaan laskennassa huomioon vain, jos vedetty puoli ei halkea lainkaan. Halkeilun tapahduttua halkeaman otaksutaan etenevän heti neutraaliakselille asti. Betonin epälineaarinen jännitys-muodonmuutoskuvaaja on muotoa

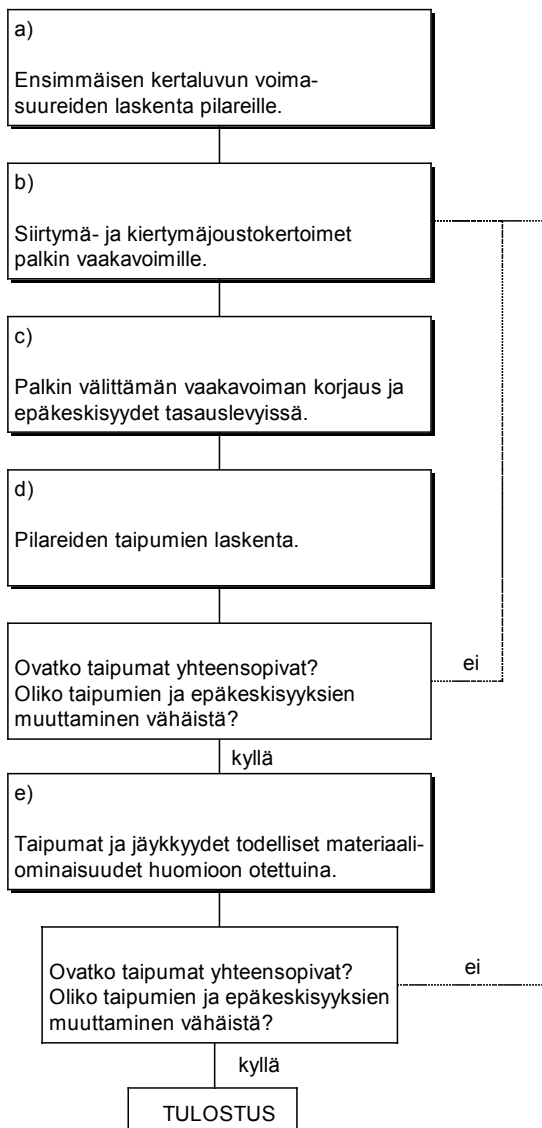
$$\sigma(\varepsilon) = E_c \varepsilon \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cy}} \right)^2 \left(1 - 2 \frac{f_{cd}}{E_c \varepsilon_{cy}} \right) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cy}} \right) \left(3 \frac{f_{cd}}{E_c \varepsilon_{cy}} - 2 \right) + 1 \right].$$

4. Betonin viruma otetaan huomioon käyttämällä laskennassa kimmoisella alueella kimmokertoimelle arvoa $E_{cc} = E_c / (1 + \phi)$, missä E_c on betonin alkukimmokerroin ja ϕ on virumaluku.
5. Betonin vedetyllä puolella halkeamien välisen halkeamattoman osan jäykistävää vaikutusta ei oteta huomioon.
6. Betonin kutistuman vaikutusta ei huomioida.



Kuva 1. Betonin ja teräksen jännitys-venymä kuvaajat.

Pilarin tasapaino- ja muodonmuutostila ratkaistaan kuvan 2 mukaisella algoritmilla. Käydään seuraavaksi läpi algoritmin vaiheet.



Kuva 2. Pilarin mitoituksen lohkokaavio.

- a) Aluksi kehän kummankin pilarin taipuma on nolla kaikissa poikkileikkauksissa. Poikkileikkausten taivutusjäykkyydet lasketaan alkuvaiheessa betonin alkukimmokertoimen avulla kimmoteorian mukaisesti. Ulkoisista kuormista lasketaan poikkileikkauksissa vaikuttavat normaalivoimat ja ensimmäisen kertaluvun taivutusmomentit.
- b) Seuraavaksi lasketaan kummankin pilarin yläpään joustokertoimet palkin vaakavoimalle käyttäen edellä laskettuja poikkileikkausten jäykkyyksiä (joustokerroin kuvaa pilarin taipumaa pilarin päähän vaikuttavasta yksikkövoimasta). Pilareihin vaikuttavat normaalivoimat otetaan myös huomioon joustokertoimien laskennassa. Siten normaalivoiman aiheuttama lisätaipuma tulee huomioiduksi.
- c) Palkissa vaikuttavaa vaakavoimaa korjataan joustokertoimien avulla. Samalla lasketaan muuttuneesta muodonmuutostilasta johtuvat liitoksen epäkeskisyyshmomentit (katso luku 3).
- d) Pilarien taipumat voidaan laskea ottaen huomioon ulkoiset kuormitukset ja kohdan c mukaiset lisärasitukset. Iterointia jatketaan kohtien b-d välillä, kunnes riittävä tarkkuus on saavutettu. Iteroinnin tuloksena saadaan pilarien kimmoteorian mukaiset taipumamuodot ja poikkileikkausten rasitukset.
- e) Seuraavaksi tutkitaan edellä laskettujen poikkileikkausten käyttäytymistä todellisilla materiaaliominaisuuksilla eli otetaan huomioon betonin ja terästen epälineaariset ominaisuudet sekä betonin halkeilu.
- f) Epälineaaristen materiaaliominaisuuksien mukaanotto aiheuttaa yleensä kehän pilareihin toisistaan poikkeavat taipumat, joten uusilla poikkileikkausten jäykkyyksarvoilla tasapainoiterointi suoritetaan uudelleen kohtien b-d välillä. Iteroinnin jälkeen tulokseksi saadaan pilareille taipumamuodot ja rasitustilat, jotka ovat käytettyjen epälineaaristen materiaaliominaisuuksien mukaiset.

Menetelmän kohdassa b lasketaan kummankin pilarin joustokertoimet palkin yksikkövaakavoimalle siten, että normaalivoiman vaikutus otetaan myös huomioon. Tämän tarkia prosessi onnistuu vain, jos yksittäisen pilarin normaalivoima ei ylitä sen nurjahduskuormaa. Kohdan c epäkeskisyyshmomentteja tarvitaan, kun arvioidaan liitoksen toimintaa kehässä. Liitoksen toimintaa tarkastellaan luvussa 3.

Betonin viruma huomioidaan menetelmässä siten, että laskenta suoritetaan kahdessa vaiheessa. Ensin lasketaan pilarien muodonmuutos materiaalien ja kuormien pitkäaikaisarvoille. Pysyvä muodonmuutos saadaan poistamalla pitkäaikaiskuorman vaikutus (virumasta johtuva taipuma jää pysyväksi muodonmuutokseksi).

Lopullinen muodonmuutostila saadaan kuormittamalla rakennetta sekä lyhyt- että pitkäaikaisella kokonaiskuormalla käyttäen lyhytaikaisia materiaali- ja kuormitusarvoja. Pitkäaikaiskuormista aiheutunut pysyvä muodonmuutos otetaan lopullisen laskennan lähtöarvoissa huomioon.

3. TASAUSLEVYLLINEN PILARI-PALKKILIITOS

3.1 Liitoksen kiertymäero

Liitoksen kiertymäerolla tarkoitetaan tässä pilarin yläpäähän kiertymän ja palkin tukikiertymän erotusta. Kiertymäeron avulla lasketaan palkin tukireaktion epäkeskisyyden, jonka avulla saadaan pilarin yläpäässä vaikuttava momentti.

Pilarin yläpäähän kiertymä on pilarin pään vinouden ja ulkoisesta kuormituksesta (yleensä tuulikuorma + palkin tukireaktio) aiheutuvan kiertymän summa. Pilarin pään vinous voi suuntautua mielivaltaisesti. Vinoudelle on asetettu valmistustoleranssit rakenneosan mittatarkkuusluokan perusteella.

Palkin pään kiertymä muodostuu pääasiassa ulkoisesta kuormituksesta (oma massa ja hyötykuorma) ja mahdollisesta palkin esi- tai jälkijännityksestä.

3.2 Tasauslevyn mallintaminen

Koska pilari-palkkiliitoksessa käytettävän tasauslevyn kimmomoduuli on yleensä 2 - 4 %o betonin kimmomoduulista, voidaan olettaa, että pilarin ja palkin välisen liitoksen kaikki muodonmuutokset tapahtuvat tasauslevyssä.

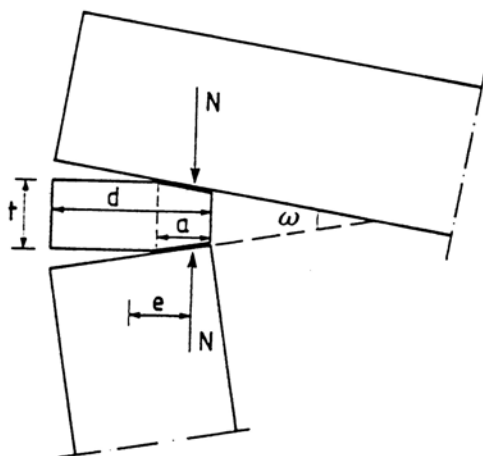
Kun lisäksi oletetaan, että kontaktipintojen puristusjännitykset jakautuvat lineaarisesti, saadaan kuvan 3 perusteella tasauslevyn pituuden puolikas $d/2$ palkin tukireaktion epäkeskisyyden e ja puristuspuunnan pituuden a avulla:

$$d/2 = e + a/3$$

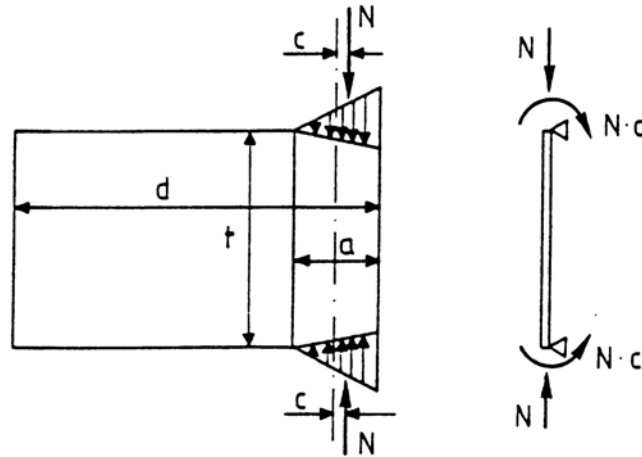
josta puristetun pinnan pituudeksi saadaan:

$$a = (3/2)d - 3e$$

Kaava on voimassa vain, kun palkin tukireaktio on tukipinnan sydänalueen ulkopuolella, eli epäkeskisyyden e tulee olla $e \geq d/6$.



Kuva 3. Tasauslevyllinen pilari-palkkiliitos.



Kuva 4. Tasauslevyn kuormitetun osan mallintaminen palkiksi.

Tasauslevy voidaan mallintaa palkiksi, jota kuormitetaan päistä lineaarisesti jakautuneella kuormalla (kuva 4). Kuvitellun palkin pituus vastaa tasauslevyn paksuutta ja päiden lineaarisesti jakautunut kuormitus on korvattu keskisellä normaalivoimalla momentilla.

Koska 'palkin' pään kiertymä vastaa puolta liitoksen kiertymäerosta ω , saadaan:

$$\frac{\omega}{2} = \frac{Mt}{2EI}$$

jossa M on 'palkin' päässä vaikuttava momentti $N \cdot c$, kun $c = a/6$
 t on 'palkin' pituus eli tasauslevyn paksuus
 E on tasauslevyn kimmomoduuli
 I on 'palkin' jäykkyys $b \cdot a^3/12$, kun b on puristetun pinnan leveys

Liitoksen kiertymäeroksi saadaan $\omega = Mt/EI$. Sijoittamalla momentin ja jäykkyyden lausekkeet saadaan kiertymäeroksi:

$$\omega = \frac{Nct}{Eba^3/12} = \frac{2Nt}{Eb \left(\frac{3}{2}a - 3e\right)^2}$$

Supistamalla saadaan:

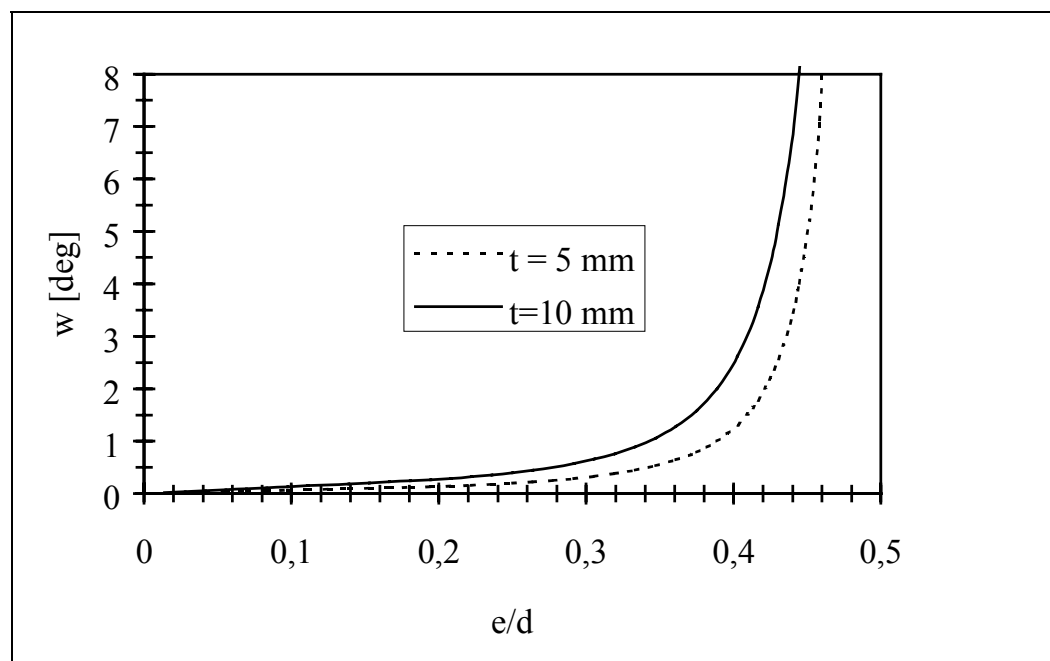
$$\omega = \frac{8Nt}{Ebd^2 \left(3 - 6 \frac{e}{d}\right)} \quad \left(\frac{d}{6} \leq e \leq \frac{d}{2}\right)$$

jossa N on palkin tukireaktio,
 d on tasauslevyn pituus ja
 e on voiman N etäisyys tasauslevyn keskipisteestä.

Kun palkin tukireaktio N vaikuttaa tasauslevyn sydänalueella, kiertymäero $\omega = Mt/EI$ voidaan kirjoittaa:

$$\omega = \frac{Net}{Ebd^3/12} = \frac{12Net}{Ebd^3} \quad (0 \leq e \leq \frac{d}{6})$$

Kuvassa 5 kiertymäero ω on esitetty suhteellisen epäkeskisyyden e/d funktiona. Palkin tukireaktio N_k on 500 kN, tasauslevyn ala $350 \times 350 \text{ mm}^2$, kimmokerroin $E = 60 \text{ MPa}$ ja paksuus $t = 5$ ja 10 mm . Kuvasta nähdään, että suhteellinen epäkeskisyyden e/d suurenee nopeasti jo pienellä kiertymäerolla ω . Vastaavasti palkin tukireaktiosta pilarin yläpäähän aiheutuvan momentin kehää stabiloiva vaikutus suurenee nopeasti.



Kuva 5. Kiertymäero ω suhteellisen epäkeskisyyden e/d funktiona.

Tampereella 14.11.1997

Prof. Ralf Lindberg

Dipl. ins. Jari Hietala

VIITTEET

- /1/ Betoninormit, RakMK B4 ja korkealujuuksisten betonien lisäohjeet By 15. Jyväskylä 1993.
- /2/ Betonielementtien toleranssit, Julkaisu 1.20 Vaatimukset. Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö, Lahti 1993.

KIRJALLISUUTTA

Lindberg, R., Actual Behaviour of a Beam to Column Connection in a Reinforced Concrete Portal Frame. TTKK Julkaisuja 46, 1987.

Keronen, A., Effect of Semi-rigid Connections in RC Portal Frame: Load tests. TTKK Julkaisuja 69, 1996.

LIITTEET

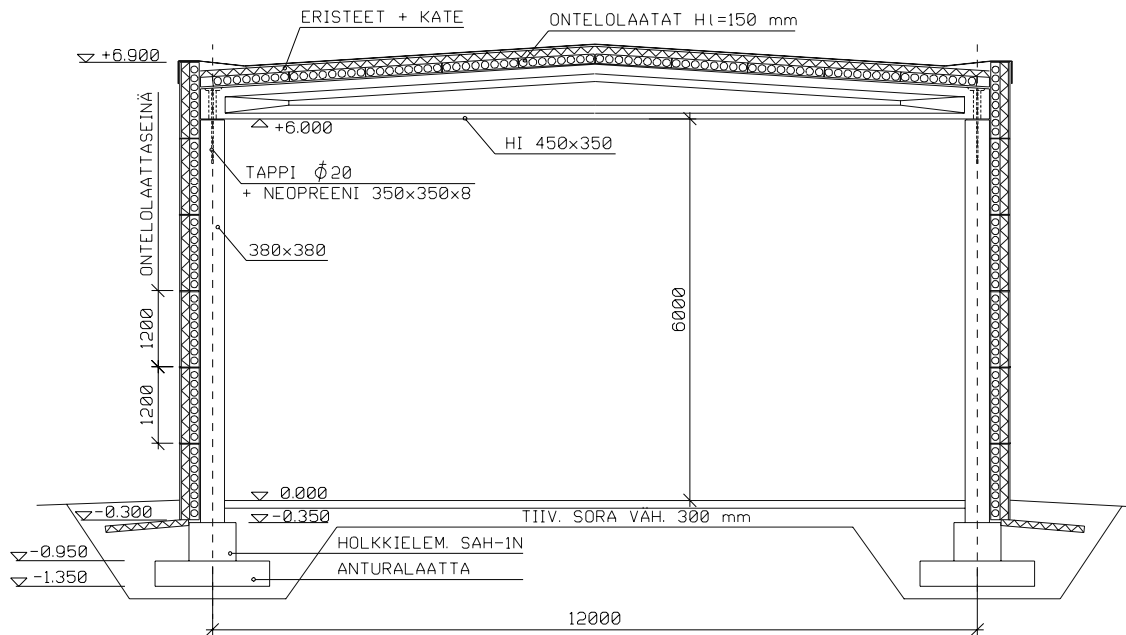
Liite 1: Laskentaesimerkki

1-LAIVAINEN TB-KEHÄ (k 6000, jv 12000)

1 Lähtötiedot

Kehän pilarit mitoitetaan rakennetta jäykistävinä mastopilareina, joille kehää rasittavat vaakavoimat jaetaan jäykkyyksien suhteessa tasan.

Rungon kehäväli on 6 m ja vesikatossa käytetään ontelolaattoja. Ontelolaataston paksuudeksi valitaan 150 mm.



Kuva L1. Yksilaivainen teräsbetonikehä, kehäväli 6.0 m ja jänneväli 12.0 m.

Vesikatolta tulevasta ominaiskuormista kertyy palkille kuormaa:

$$p_k = (2.15 + 0.3 + 1.7) \text{ kN/m}^2 \cdot 6.0 \text{ m} = 24.9 \text{ kN/m}$$

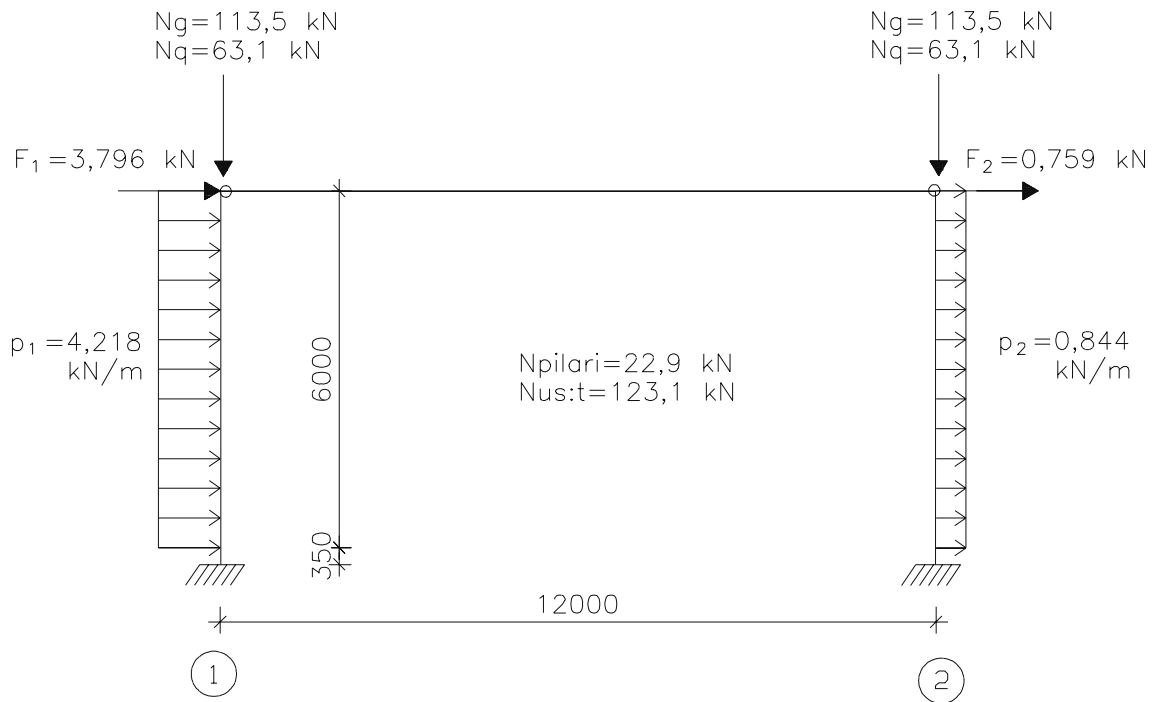
=> vesikaton pääkannattaja on HI-jännebetonipalkki HI 450x350.

Palkin pään nimelliskorkeus on 450 mm ja harjakorkeus n. 860 mm. Palkin massa on n. 45 kN.

Mitoittavaksi tuulenpaineen ominaisarvoksi saadaan kaavan (24) mukaan:

$$q_w = 1.3 \cdot 0.6 \left(\frac{6.9}{10}\right)^{0.28} = 0.703 \text{ kN/m}^2$$

Kehän kuormien ominaisarvot on esitetty kuvassa L2.



Kuva L2. Kuormien ominaisarvot.

Lasketaan tuulen aiheuttamat tukimomentit ja pilarin alapään vaakavoimat.

Koska $F_2 = 0.2 \cdot F_1$ ja $p_2 = 0.2 \cdot p_1$, saadaan laskettua F_h seuraavasti:

$$F_h = \left(\frac{p_1 \cdot c (2l - c)}{2 \cdot l} - \frac{p_1}{2 \cdot l^3} \left(\frac{l^2 c^2}{2} - \frac{c^4}{4} \right) + F_1 \right) \cdot 1.2 = 16.605 \text{ kN},$$

jossa $F_1 = 3.796 \text{ kN}$
 $p_1 = 4.218 \text{ kN/m}^2$
 $c = 6.0 \text{ m}$
 $l = 6.35 \text{ m}$

$$M_{10} = \frac{p_1}{2 \cdot l^2} \left(\frac{l^2 \cdot c^2}{2} - \frac{c^4}{4} \right) = 5 \cdot M_{20}$$

$$M_{11} = M_{21} = \frac{l}{2} \cdot F_h \cdot l$$

$$H_{10} = \frac{p_1 \cdot a^2}{2 \cdot l} - \frac{p}{2 \cdot l^3} \left(\frac{l^2 \cdot c^2}{2} - \frac{c^4}{4} \right) = 5 \cdot H_{20}$$

$$M_1 = M_{10} + M_{11} = 73.733 \text{ kNm}$$

$$M_2 = M_{20} + M_{21} = 56.921 \text{ kNm}$$

$$H_1 = H_{10} + F_h/2 = 25.568 \text{ kN}$$

$$H_2 = H_{20} + F_h/2 = 11.355 \text{ kN}$$

2 Pilareiden mitoitus

Valitaan pilarikooksi 380 x 380, jossa pilarin sivumitta on lähellä vesikattopalkin leveyttä 350 mm. Pilarin holkin yläpuolisen osan pituus $L = 6350$ mm, josta nurjahduspituudeksi saadaan $L_o = 13970$ mm, kun $k_o = 2.2$. Pilarin hoikkuudeksi tulee $\lambda = 127$, perusepäkeskisyydeksi $e_a = 47$ mm ja lisäepäkeskisyydeksi $e_2 = 293$ mm. Yhteenlaskemalla saadaan epäkeskisyyden laskenta-arvoksi $e_d = 340$ mm.

Mitoitus normaalivoimalle ja tukimomentille

Kuormitustapauksessa **oma massa + lumi + tuuli** saadaan tuulen puoleisen pilarin normaalivoimalle ja tukimomentille laskenta-arvot:

- a) $N_d = 264.6$ kN $M_d = 139.6$ kNm (täysi lumi + puolikas tuuli)
 b) $N_d = 214.2$ kN $M_d = 181.5$ kNm (puolikas lumi + täysi tuuli)

Kuormitustapauksessa **oma massa + tuuli** saadaan vastaavasti:

- c) $N_d = 122.8$ kN $M_d = 152.7$ kNm

Runko-BES -julkaisun nro 8, Teräsbetonipilarit¹, kuvaajista saadaan 380x380 pilarille teräsmäärä (betoni on K40-1, teräs A500HW, palonkestoluokka A60, ympäristöluokka Y3 ja pääterästen suojaetäisyys 25 mm):

$$A_s = 2512 \text{ mm}^2 (8 \text{ } \varnothing 20), \text{ haat } \varnothing 6 \text{ k } 300$$

3 Pilareiden mitoitus tarkempaa laskentamenettelyä käyttäen

Valitaan tarkastelun kohteeksi kuormitustapaus b), jossa poikkileikkaukseen vaikuttaa suurin taivutusmomentti. Pilarin perusepäkeskisyyden pidetään samana eli $e_a = 47$ mm. Lasketaan kehä tasauslevyn vaikutus huomioiden. Laskennassa otetaan virumasta johtuva lisätaipuma huomioon, kun kuormituksena on pitkäaikaiskuormat (pystykuorma + epäkeskisyyden vaikutus). Laskennassa on käytetty virumalukuna $\phi = 2.5$. Pilarin pään alkukiertymä saadaan valmistustoleransseista. Normaaliluokassa pään kulmapoikkeama saa olla 5 mm, joten $\omega_0 = 5/380 = 0.0136$ rad.

Pilarin rauditusmäärää laskettiin normilaskennan mukaisesta arvosta eli

$$A_s = 1962 \text{ mm}^2 (4 \text{ } \varnothing 25)$$

Tasauslevyn kimmomoduulin arvo oli 60 MPa ja tasauslevyn mitat olivat 350 mm x 350 mm x 8 mm. Laskennan tulokset on taulukoituna seuraavilla sivuilla.

¹ Runko-BES, Julkaisu 8, Teräsbetonipilarit, Suomen Betoniteollisuuden Keskusliitto.

*****Vertailu*****

M A T E R I A A L I T I E D O T

BETONI(MPa,%.)	TERÄS(MPa,%.)	KUMILEVY(MPa)
Fc = 20.70	Fy = 454	E = 60
Fct = 1.73	Es = 200000	
ϕ = 2.50	\hat{u} = 10	
\hat{icy} = -2.00		
\hat{icu} = -3.50		
Ec = 31600		

P I L A R I 0

MITAT (mm)	KUORMITUS (kN,m)		P-A	L-A	P-A	L-A	P-A	L-A
			(X= 6350)		(X= 0)		(X= 0)	
L = 6350	N = -163.70	-50.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B = 380	H = 0.00	6.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H = 380	M = 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d' = 38, 0	W = 0.00	6.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

PALKIN JA KUMILEVYN TIEDOT

PALKIN Kiertymä pitkäaikaisista kuormista	=	0.014
PALKIN Kiertymä pitkä- ja lyhytaik. kuormista	=	0.000
PALKIN tukireaktio pitkäaikaisista kuormista	=	-163.70
PALKIN tukireaktio lyhytaikaisista kuormista	=	-50.50
PALKIN kontaktipinnan suuruus	b*h	= 350* 350
KUORMITUKSEN epäkeskisyys	=	47.00
KUMILEVYN paksuus	=	8.0

P I L A R I 1

MITAT (mm)	KUORMITUS (kN,m)		P-A	L-A	P-A	L-A	P-A	L-A
			(X= 6350)		(X= 0)		(X= 0)	
L = 6350	N = -163.70	-50.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B = 380	H = 0.00	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H = 380	M = 0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d' = 38, 0	W = 0.00	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

PALKIN JA KUMILEVYN TIEDOT

PALKIN Kiertymä pitkäaikaisista kuormista	=	0.014
PALKIN Kiertymä pitkä- ja lyhytaik. kuormista	=	0.000
PALKIN tukireaktio pitkäaikaisista kuormista	=	-163.70
PALKIN tukireaktio lyhytaikaisista kuormista	=	-50.50
PALKIN kontaktipinnan suuruus	b*h	= 350* 350
KUORMITUKSEN epäkeskisyys	=	47.00
KUMILEVYN paksuus	=	8.0

PITKAAIKAISET KUORMAT

3: S ITEROINTIKIERROS

PALKIN VAAKAVOIMA -0.00

KESKIMÄÄRÄINEN EPÄKESKISYYS: VASEN PIL= 159.66

OIKEA PIL= 159.66

P I L A R I 0

COORD,	As	TAIP.,	KIERT.,	1.MOM.,	2.MOM,	KOK.MOM,	BETONIN MM.,		TERÄKSEN MM.	
/mm	/mm ²	/mm	/rad	/kNm	/kNm	/kNm	y-/%.	y+	y-/%.	y+
6350	981	33.3	0.0100	-26.1	0.0	-26.1	0.12	-0.31	0.08	-0.27
5715	981	27.2	0.0092	-26.1	-1.0	-27.1	0.19	-0.34	0.14	-0.29
5080	981	21.6	0.0083	-26.1	-1.9	-28.0	0.21	-0.35	0.15	-0.29
4445	981	16.6	0.0073	-26.1	-2.7	-28.9	0.22	-0.36	0.16	-0.30
3810	981	12.3	0.0064	-26.1	-3.4	-29.6	0.23	-0.37	0.17	-0.31
3175	981	8.6	0.0054	-26.1	-4.0	-30.2	0.24	-0.37	0.18	-0.31
2540	981	5.5	0.0043	-26.1	-4.6	-30.7	0.25	-0.38	0.19	-0.31
1905	981	3.1	0.0033	-26.1	-4.9	-31.1	0.26	-0.38	0.20	-0.32
1270	981	1.4	0.0022	-26.1	-5.2	-31.4	0.26	-0.38	0.20	-0.32
635	981	0.3	0.0011	-26.1	-5.4	-31.5	0.27	-0.39	0.20	-0.32
0	981	0.0	0.0000	-26.1	-5.5	-31.6	0.27	-0.39	0.20	-0.32

P I L A R I 1

COORD,	As	TAIP.,	KIERT.,	1.MOM.,	2.MOM,	KOK.MOM,	BETONIN MM.,		TERÄKSEN MM.	
/mm	/mm ²	/mm	/rad	/kNm	/kNm	/kNm	y-/%.	y+	y-/%.	y+
6350	981	33.3	0.0100	-26.1	0.0	-26.1	0.12	-0.31	0.08	-0.27
5715	981	27.2	0.0092	-26.1	-1.0	-27.1	0.19	-0.34	0.14	-0.29
5080	981	21.6	0.0083	-26.1	-1.9	-28.1	0.21	-0.35	0.15	-0.29
4445	981	16.7	0.0074	-26.1	-2.7	-28.9	0.22	-0.36	0.16	-0.30
3810	981	12.3	0.0064	-26.1	-3.4	-29.6	0.23	-0.37	0.17	-0.31
3175	981	8.6	0.0054	-26.1	-4.1	-30.2	0.24	-0.37	0.18	-0.31
2540	981	5.5	0.0043	-26.1	-4.6	-30.7	0.25	-0.38	0.19	-0.31
1905	981	3.1	0.0033	-26.1	-4.9	-31.1	0.26	-0.38	0.19	-0.32
1270	981	1.4	0.0022	-26.1	-5.2	-31.4	0.26	-0.38	0.20	-0.32
635	981	0.3	0.0011	-26.1	-5.4	-31.5	0.27	-0.39	0.20	-0.32
0	981	0.0	0.0000	-26.1	-5.5	-31.6	0.27	-0.39	0.20	-0.32

PITKA- JA LYHYTAIKAISET KUORMAT

2: S ITEROINTIKIERROS

PALKIN VAAKAVOIMA -9.74

KESKIMÄÄRÄINEN EPÄKESKISYYS: VASEN PIL= -16.63

OIKEA PIL= -41.22

P I L A R I 0

COORD,	As	TAIP.,	KIERT.,	1.MOM.,	2.MOM,	KOK.MOM,	BETONIN MM.,		TERÄKSEN MM.	
/mm	/mm ²	/mm	/rad	/kNm	/kNm	/kNm	y-/%.	y+	y-/%.	y+
6350	981	69.8	0.0151	3.6	0.0	3.6	-0.02	-0.21	-0.04	-0.19
5715	981	60.3	0.0148	4.5	-2.0	2.5	-0.01	-0.21	-0.03	-0.19
5080	981	51.1	0.0144	2.7	-4.0	-1.3	0.00	-0.23	-0.02	-0.21
4445	981	42.0	0.0140	-1.7	-5.9	-7.7	0.03	-0.26	0.00	-0.23
3810	981	33.3	0.0134	-9.0	-7.8	-16.8	0.08	-0.30	0.04	-0.26
3175	981	25.1	0.0126	-18.9	-9.6	-28.5	0.18	-0.36	0.13	-0.31
2540	981	17.4	0.0115	-31.5	-11.2	-42.8	0.35	-0.45	0.27	-0.37
1905	981	10.6	0.0099	-46.9	-12.7	-59.6	0.62	-0.56	0.51	-0.44
1270	981	5.1	0.0075	-65.0	-13.9	-78.9	0.98	-0.68	0.82	-0.52
635	981	1.3	0.0042	-85.8	-14.6	-100.5	1.39	-0.83	1.17	-0.61
0	981	0.0	0.0000	-109.4	-14.9	-124.3	1.85	-1.00	1.56	-0.72

P I L A R I 1

COORD,	As	TAIP.,	KIERT.,	1.MOM.,	2.MOM,	KOK.MOM,	BETONIN MM.,		TERÄKSEN MM.	
/mm	/mm ²	/mm	/rad	/kNm	/kNm	/kNm	y-/%.	y+	y-/%.	y+
6350	981	70.0	0.0160	8.8	0.0	8.8	-0.05	-0.18	-0.06	-0.17
5715	981	59.9	0.0157	1.6	-2.2	-0.5	-0.00	-0.23	-0.02	-0.21
5080	981	50.1	0.0152	-6.2	-4.2	-10.4	0.04	-0.27	0.01	-0.24
4445	981	40.6	0.0146	-14.5	-6.3	-20.7	0.11	-0.32	0.07	-0.27
3810	981	31.6	0.0138	-23.3	-8.2	-31.5	0.21	-0.38	0.15	-0.32
3175	981	23.2	0.0126	-32.7	-10.0	-42.7	0.34	-0.45	0.27	-0.37
2540	981	15.7	0.0111	-42.7	-11.6	-54.3	0.53	-0.52	0.43	-0.42
1905	981	9.3	0.0091	-53.2	-13.0	-66.1	0.75	-0.60	0.61	-0.47
1270	981	4.3	0.0066	-64.2	-14.0	-78.2	0.97	-0.68	0.81	-0.52
635	981	1.1	0.0036	-75.8	-14.7	-90.5	1.20	-0.76	1.01	-0.57
0	981	0.0	0.0000	-87.9	-15.0	-102.8	1.44	-0.85	1.21	-0.62

4 Laskentatulosten tarkastelu

Laskentatuloksista havaitaan, että kuorman epäkeskisyydestä ja pilarin pään alkukiertymästä kehän taipumaksi tulee 33.3 mm pitkäaikaiskuormilla. Maksimimomentti tuella on -31.6 kNm. Palkki ei välitä vaakavoimaa, koska molemmilla pilareilla on samanlainen kuormitus. Pilareiden keskimääräinen epäkeskisyys on 159.7 mm.

Lyhytaikaisten kuormien vaikutus lisää pilareiden taipumaa. Maksimitaipumaksi tulee 70 mm. Palkin välittämä vaakavoima on -9.74 kN (puristusta). Tuen maksimimomentit ovat -124.3 kNm (vasen) ja -102.8 kNm (oikea). Tasauslevyistä johtuvat stabiloivat taivutusmomentit aiheuttavat positiiviset kokonaismomentit pilareiden yläpään, suuruudeltaan 3.6 kNm ja 8.8 kNm.

Tarkastetaan vielä kehän toiminta käsin laskien. Tarkastellaan kehän vasenta pilaria ja viimeistä kuormitustapausta, jossa on kaikki kuormat mukana.

Laskennasta saatava keskimääräinen epäkeskisyys on $e = 16.63 \text{ mm} < d/6 = 58.3 \text{ mm}$.

Pilarin yläpään momentti on siten $M = Ne = 214.2 \text{ kN} \cdot 0.0166 \text{ m} = 3.56 \text{ kNm}$, ok.

Laskentatulokset antavat pilarin yläpään kiertymäksi 0.0151 rad ja alkukiertymäksi oli annettu 0.0136 rad, joten tasauslevyn kiertymä on näiden erotus eli $\omega = 0.0151 - 0.0136 = 0.0015 \text{ rad}$. Pilarin epäkeskisyys on muuttunut alkuepäkeskisyydestä $e_0 = 47 \text{ mm}$ arvoon $e = -16.6 \text{ mm}$ eli pystykuorman vaikutuspiste on siirtynyt matkan $s = 47 + 16.6 = 63.6 \text{ mm}$. Tätä vastaava tasauslevyn kiertymä on siten

$$\omega = \frac{Net}{Ebd^3 / 12} = \frac{12Net}{Ebd^3} = \frac{12 \cdot 214.2 \cdot 10^3 \cdot 63.6 \cdot 8}{60 \cdot 350 \cdot 350^3} = 0.0015 \text{ rad}$$

joka vastaa edellä laskettua kiertymien erotusta, ok.

Näin ollen tasauslevystä johtuva stabiloiva momentti on $M_{\text{stab}} = Ns = 214.2 \text{ kN} \cdot 0.063 \text{ m} = 13.5 \text{ kNm}$. Pilarin yläpään kokonaismomentti saadaan yhtälöstä $M = M_0 + M_{\text{stab}} = -214.2 \cdot 0.047 + 13.5 = 3.4 \text{ kNm} \approx 3.56 \text{ kNm}$, ok.

Tarkistetaan vielä vasemman pilarin momenttitasapaino. Momentti pilarin juuressa on

$$\begin{aligned} M_T &= - (H - F_h)L - wL^2/2 + M_{\text{ylä}} - Nv \\ &= - (6.1 - 9.74) \cdot 6.35 - 6.75 \cdot 6.35^2/2 + 3.56 - 214.2 \cdot 0.0698 \\ &= -124.4 \text{ kNm} \quad \text{ok.} \end{aligned}$$

Kun verrataan tulosta aiempaan normin mukaiseen ”käsin” laskentaan, niin huomataan, että pilarin juurta rasittava kokonaismomentti on pudonnut arvosta 181.5 kNm arvoon 124.4 kNm eli vähennyistä on noin 31 %. Rakenteen taipuma on pienentynyt normin 340 mm:n epäkeskisyydestä tarkemman laskennan 70 mm:iin, jolloin rakenteen rasitukset pienentyvät huomattavasti. Tarkemman laskennan ansiosta pilareiden teräsmäärää voitiin pienentää noin 22 %. Teoriassa teräsmäärää voitaisiin vieläkin pienentää, koska terästen maksimivenymät eivät ole vielä lähellä myötörajaa. Käytännössä pilarin teräsmäärää ei voi valita mielivaltaisesti, vaan tankokoot rajoittavat vaihtoehtojen määrää.