



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

**TERÄSRAKENTEIDEN MITOITUS JATKUVALLE SORTUMALLE,
ESIMERKKILASKELMA**

Toni Alaruikka

**KANDIDAATINTYÖ
2016**

Ohjaaja: Matti Kangaspuoskari

TIIVISTELMÄ

Kandidaatintyön otsikko: Teräsrakenteiden mitoitus jatkuvalle sortumalle, esimerkkilaskelma

Tekijän Etunimi Sukunimi: Toni Alaruikka

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2016, 25 s. + 8 s. liite

Työn ohjaaja: Matti Kangaspuoskari

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on käydä läpi teräsrakenteiden mitoituksessa jatkuvalle sortumalle vaaditut asiat, sekä esittää esimerkkilaskelma. Työ suoritetaan tuomalla esille olennaisimmat jatkuvan sortuman mitoituksessa vaaditut asiat, esimerkiksi paikallisen vaurion laajuuden rajoittaminen, vaaka- ja pystysiteet sekä mitoitus avainasemassa olevalle rakenneosalle.

Laskuesimerkissä käsitellään yksikerroksista teräsrakenteista hallimaista rakennusta, jonka oletetaan kuuluvan seuraamusluokkaan 2b.

Asiasanat: jatkuva sortuma, paikallinen vaurio, onnettomuuskuorma

ABSTRACT

Title of the bachelor's thesis: Structural steel design for progressive collapse, example calculation

Author's First name Family name: Toni Alaruikka

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2016, 25 p. + 8 p. appendix

Supervisor: Matti Kangaspuoskari

The aim of this bachelor's thesis is to show what is needed to take into consideration when designing structural steel for progressive collapse and do an example calculation. The work is carried out by disclosing most essential things in design for progressive collapse. For example localized failure, horizontal and vertical bracing and design for key element.

In the example calculation is one-storied steel frame large-bay building which is assumed to be in consequence class 2b.

Keywords: progressive collapse, localized failure, accidental action

ALKUSANAT

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on esittää huomioitavia asioita teräsrakenteiden mitoituksessa jatkuvalle sortumalle, sekä esittää esimerkkilaskelma. Haluan kiittää Matti Kangaspuoskaria kandidaatintyöhön liittyvistä neuvoista, sekä ohjauksesta.

Oulu, 29.02.2016

Toni Alaruikka

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 ONNETTOMUUSTILANTEET	8
2.1 Seuraamusluokat	9
2.2 Vaurioitumisen hyväksyttävät rajat.....	14
3 MÄÄRITELTÄVISSÄ OLEVAT ONNETTOMUUSKUORMAT.....	17
3.1 Kuormitusyhdistelmät onnettomuustarkastelussa.....	17
4 PAIKALLISEN VAURION LAAJUUDEN RAJOITTAMINEN	19
4.1 Vaakasiteet	19
4.1.1 Rengas- ja sisäpuoliset siteet	19
4.1.2 Seinien ja pilareiden sidonta välipohjaan	20
4.2 Pystysiteet	21
4.3 Yhden rakenneosan kantokyvyn menetys.....	21
4.4 Avainasemassa oleva rakenneosa	21
4.5 Riskianalyysi	22
5 YHTEENVETO	24
6 LÄHDELUETTELO.....	25

LIITE

MERKINNÄT

A_d	Onnettomuuskuorma
A_L	Lattiapinta-ala kerrosta kohti
G_k	Pysyvä kuorma
T_i	Rengas- ja sisäpuolinen sidevoima
T_{tie}	Seinien ja pilareiden sidevoima välipohjaan
s	Sidevoiman kertymisleveys

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on esittää huomioitavia asioita teräsrakenteiden mitoituksessa jatkuvalla sortumalle, sekä esittää laskuesimerkki. Kandidaatintyön aihe on valittu tukemaan teräsrakenteiden suunnittelu opintoja. Tavoitteena on esittää määriteltävissä olevat onnettomuuskuormat ja paikallisen vaurion laajuden rajoittamiseen liittyvät toimintaperiaatteet.

Liitteenä olevassa laskuesimerkissä käsitellään teräsrakenteista hallimaista rakennusta, joka on yksikerroksinen. Rakennuksen oletetaan kuuluvan seuraamusluokkaan 2b, jotta saadaan esitettyä tarpeelliset onnettomuustilanteen erityistarkasteluun liittyvät toimintaperiaatteet. Seuraamusluokka 2b edellyttää vaaka- ja pystysiteet tai paikallisen vaurion tarkastamisen tai suunnittelun avainasemassa olevana rakenneosana.

2 ONNETTOMUUSTILANTEET

Onnettomuustilanteiden mitoituksessa tarkastellaan poikkeuksellisten tapahtumien esiintymistä ja niistä muodostuvia kuormavaikutuksia yhdessä pysyvien ja muuttuvien kuormien vaikutuksien kanssa. Onnettomuustilanteiden kuormavaikutuksien esiintymistodennäköisyys on yleensä pieni, vaikutukset ovat lyhytkestoisia, sekä niillä on vakavia seurauksia. Onnettomuuden seurausten vakavuus määrittää onnettomuustilanteiden käsittelyn laajuuden. Seurausten vakavuutta voidaan mitata mm. henkilövahinkojen ja kuolunuhrien määrällä, ympäristölle aiheutuvien haittavaikutuksien laajuudella ja taloudellisilla menetyksillä.

Onnettomuusmitoitustilanteet voidaan jakaa kahteen eri toimintaperiaatteeseen: määriteltävissä ja määrittelemättömissä oleviin onnettomuusmitoituskuormiin perustuviin toimintaperiaatteisiin. Määriteltävissä olevia onnettomuuskuormia ovat mm. räjähdykset ja törmäykset. Määrittelemättömissä olevien onnettomuuskuormien toimintaperiaatteet perustuvat paikallisen vaurion laajuuden rajoittamiseen. Paikallisella vauriolla tarkoitetaan rakenteen osaa, jonka oletetaan sortuneen tai vaurioituneen pahasti onnettomuustapauksessa. Mikäli paikallisen vaurion laajuuden rajoittaminen epäonnistuu, tapahtuu jatkuva sortuma, jolla tarkoitetaan paikallisen vaurion seurauksena ketjureaktiona tapahtuvaa sortumaa, jossa rakennus kokonaisuudessaan tai merkittävä osa rakennuksesta sortuu ja josta seuraa huomattavan suuri henkilövahinkojen vaara. (SFS-EN 1991-1-7: 24; Betoninormikortti N:o 23: 3.)

2.1 Seuraamusluokat

Eurokoodi 1, Osa 1-7: Yleiset kuormat, Onnettomuuskuormat esittää paikallisen vaurion laajentumisen rajoittamiseksi neljä vaihtoehtoista toimintaperiaatetta. Onnettomuusmitoitusta varten on laadittu rakennusten seuraamusluokitukset, joiden perusteella sovellettavat toimintaperiaatteet määräytyvät. Seuraamusluokat onnettomuusrajatilassa liittyvät Taulukko 1:ssä esitettyihin seuraamusluokkiin CC1, CC2 ja CC3. Taulukko 2:ssa on esitetty Suomen kansallisessa liitteessä oleva seuraamusluokkiin jaottelu, joka poikkeaa Taulukko 3:ssa esitettyyn standardin SFS-EN 1991-1-7 jaottelusta.

Taulukko 1. Seuraamusluokkien määrittely (SFS-EN 1990: 136).

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä maa- ja vesirakennuskohteita koskevia esimerkkejä.
CC3	Suuret seuraamukset hengenmenetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	Pääkatsomot; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat suuret. Esimerkiksi konserttitalo.
CC2	Keskisuuret seuraamukset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret. Esimerkiksi toimistorakennus.
CC1	Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.	Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä. Esimerkiksi varastorakennukset ja kasvihuoneet.

Taulukko 2. Rakennusten jaottelu seuraamusluokkiin onnettomuusrajatilassa Suomen kansallisen liitteen mukaisesti (NA SFS-EN 1991-1-7).

Seuraamusluokka	Rakennuksen tyyppin ja käyttötarkoituksen mukainen luokitus.
1	1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä.
2a Melko pienen riskin ryhmä.	Rakennukset, joissa on korkeintaan neljä maanpäällistä kerrosta ¹⁾ tai joiden korkeus on enintään 16 m.
2b Melko suuren riskin ryhmä.	Kaikki muut rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu seuraamusluokkiin 1,2a tai 3.
3a	9-15 kerroksiset ²⁾ asuin-, konttori-, ja liikerakennukset ja muut 9-15 kerroksiset käyttötarkoitukseltaan ja rungoltaan samantyyppiset rakennukset.
3b	Muut yli 8-kerroksiset ²⁾ rakennukset. Esim. konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot (yli 1000 henkeä), raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset.

¹⁾ Asuinrakennukset, joissa on korkeintaan kaksi maanpäällistä kerrosta, voidaan suunnitella kuitenkin onnettomuusrajatilassa seuraamusluokan 1 mukaisesti.

²⁾ Kellarikerrokset mukaan luettuina.

Taulukko 3. Seuraamusluokkien jaottelu (SFS-EN 1991-1-7: 54).

Seuraamusluokka	Rakennuksen tyyppin ja käyttötarkoituksen mukainen luokitus.
1	Rivitalon tyyppiset rinnakkaisia huoneistoja käsittävät enintään nelikerroksiset talot. Maatalousrakennukset. Rakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä ja jos mikään rakennuksen osa ei ole muuta rakennusta tai ihmisten käyttämää tilaa rakennuksen puolitoistakertaista korkeutta lähempänä.
2a Melko pienen riskin ryhmä.	Rivitalon tyyppiset rinnakkaisia huoneistoja käsittävät 5-kerroksiset talot. Enintään 4-kerroksiset hotellit, asuintalot ja toimistot. Enintään 3-kerroksiset teollisuusrakennukset ja vähittäismyymälät, joiden jokaisen kerroksen lattiapinta-ala on alle 1000 m ² . Yksikerroksiset oppilaitokset. Kaikki enintään kaksi kerrosta käsittävät julkiset rakennukset, joiden $A_L \leq 2000 \text{ m}^2$.
2b Melko suuren riskin ryhmä.	Enintään 15-kerroksiset hotellit, asuinrakennukset, toimistot, oppilaitosrakennukset ja vähittäismyymälät. Enintään 3-kerroksiset sairaalat. Enintään 6 kerrosta käsittävät pysäköintilaitokset. Kaikki julkiset rakennukset, joissa $2000 \text{ m}^2 \leq A_L \leq 5000 \text{ m}^2$.
3	Kaikki edellä seuraamusluokkaan 2a tai 2b määritellyt rakennukset, jotka ylittävät kerroksen pinta-alaa tai lukumäärää koskevat rajat. Kaikki rakennukset, joihin kokoontuu suuria yleisöitä. Stadionit, joille mahtuu yli 5000 katsojaa. Rakennukset, jotka sisältävät vaarallisia aineita tai joissa käytetään vaarallisia prosesseja.

Moneen erityyppiseen tarkoitukseen käytettävän rakennuksen ”seuraamusluokka” valitaan suurimman riskin ryhmään kuuluvan osan mukaan. Taulukko 3 ei ole kattava ja sitä voidaan muuttaa. Taulukossa 3 esiintyvä A_L tarkoittaa lattiapinta-alaa kerrosta kohti. Kerrosten lukumäärää laskettaessa pohjakerroksia ei tarvitse laskea mukaan, mikäli pohjakerrokset täyttävät ”seuraamusluokan 2b melko suuren riskin ryhmän” vaatimukset. (SFS-EN 1991-1-7: 54.)

Merkittävin ero Taulukko 2:n ja Taulukko 3:n välillä on, että Suomen kansallisessa liitteessä (*Taulukko 2*) 9-15 kerroksiset rakennukset kuuluvat luokkaan 3a. Luokan 3a rakenteille sovelletaan luokan 2b toimintaperiaatteita. Eurokoodin (*Taulukko 3*) mukaisen määrittelyn mukaan alle 15 kerroksiset rakennukset kuuluvat seuraamusluokkaan 2b.

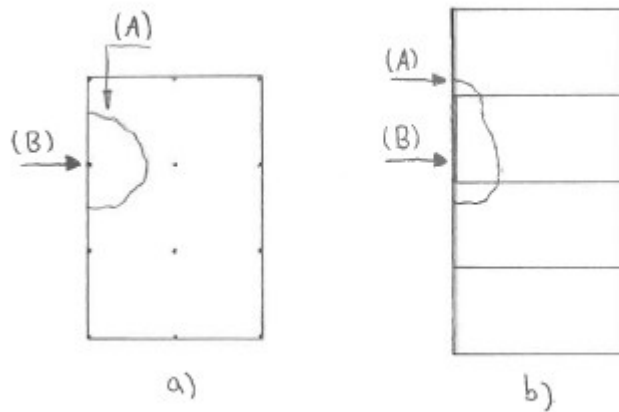
Toimintaperiaatteet vaurion laajenemisen rajoittamiseksi on esitetty Taulukko 4:ssä, jossa seuraamusluokat ovat Suomen kansallisen liitteen mukaisia.

Taulukko 4. Toimintaperiaatteet vaurion laajenemisen rajoittamiseksi.

Seuraamusluokka	Toimintaperiaatteet
Luokka 1	Onnettomuustilanteen erityistarkastelua ei tarvita.
Luokka 2a	Vaakasiteet tai välipohjien ankkurointi seiniin.
Luokka 2b	Vaaka- ja pystysiteet tai paikallisen vaurion tarkastaminen tai suunnittelu avainasemassa olevana rakenneosana.
Luokka 3a	Samat vaatimukset kuin luokassa 2B.
Luokka 3b	Riskianalyysi. Riskiarvioinnin tuloksesta riippumatta tulee tarkistaa paikallisen vaurion seuraukset sekä avainasemassa olevat rakenneosat.

2.2 Vaurioitumisen hyväksyttävät rajat

Onnettomuustilanteessa paikallisen vaurion syntyminen on hyväksyttävää. Hyväksyttävä raja paikallisessa vaurioitumisessa riippuu rakennetyypistä. *Kuva 1* koskee monikerroksisia rakennuksia ja *Kuva 2* hallimaisia rakennuksia.



Selite

(A) Paikallinen vaurio, joka on enintään 15% kummankin päällekkäisen kerroksen lattiapinta-alasta.

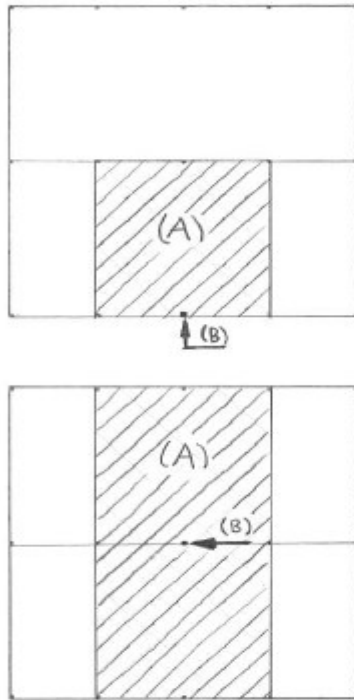
(B) Poistettavaksi ajateltu pilari.

a) Tasopiirros

b) Poikkileikkaus

Kuva 1. Hyväksyttävän vaurioitumisen suositusraja monikerroksissa rakennuksissa (SFS-EN 1991-1-7: 52).

Suomen kansallisen liitteen mukaan paikallisen vaurion laajuus saa olla yhdessä kerroksessa enintään 15% kyseisen kerroksen lattiapinta-alasta ja enintään 100m^2 / kerros. Eurokoodin mukaan paikallisen vaurion laajuus saa olla kummassakin kahdessa päällekkäisessä kerroksessa 15% lattiapinta-alasta tai 100m^2 sen mukaan, kumpi on pienempi.



Kuvassa 2 (A) kuvaa paikallista vauriota ja (B) poistettavaksi ajateltua pilaria.

Kuva 2. Hyväksyttävän vaurioitumisen laajuus hallimaisissa rakennuksissa (NA SFS-EN 1991-1-7: 23).

Paikallisen vaurion laajuus saa olla pääkannattajan vaurioituessa pääkannattajien pituus kertaa pääkannattajien väli kerrottuna kahdella. Pääkannattajan ollessa ulkoseinälinjalla hyväksyttävä vaurioalueen laajuus saa olla puolet edellä mainitusta pinta-alasta (ks. *Kuva 2*). Vaurio saa tapahtua vain yhdessä kerroksessa. (NA SFS-EN 1991-1-7: 23.)

Liitteenä olevassa laskuesimerkissä on osoitettu, että kattoristikon vaurioituessa kattorakenteet eivät pysty kantamaan kattoon kohdistuvaa kuormitusta. Näin ollen kattorakenteiden liitokset tulee suunnitella niin, että paikallinen vaurio pääsee tapahtumaan, eikä jatkuvaa sortumaa pääse syntymään. Laskuesimerkissä ei ole suunniteltu liitoksia, vaan osoitettu että rakenne kestää onnettomuuskuorman A_d .

3 MÄÄRITELTÄVISSÄ OLEVAT ONNETTOMUUS- KUORMAT

Huomioon otettavat onnettomuuskuormat määriteltävissä olevien onnettomuuskuormien varalta riippuvat useista eri tekijöistä. Määriteltävissä olevan onnettomuuskuorman esiintymistodennäköisyys on yksi tekijöistä. Myös vaurioiden seuraamukset, hyväksyttävä riskitaso, yleinen suhtautuminen vaurioitumiseen ja toimenpiteet, joihin on ryhdytty onnettomuuskuorman estämiseksi tai sen vaikutusten pienentämiseksi ovat vaikuttavia tekijöitä. (SFS-EN 1991-1-7: 24.)

Paikalliset vauriot, jotka aiheutuvat onnettomuuskuormista, voidaan hyväksyä mikäli ne eivät ole vaaraksi koko rakenteelle tai rakenteen kantokyky säilyy välttämättömien hätätoimenpiteiden ajan. Onnettomuuskuormien vaikutuksia voidaan pienentää suunnittelun avulla usealla eri tavalla. Rakenteet voidaan suunnitella kestävämmän onnettomuuskuorman vaikutukset. Rakenteet voidaan suunnitella myös niin, että vahingoittunut alue voidaan kannattaa vaihtoehtoisella rakenteella. Onnettomuuskuorman esiintymistodennäköisyyttä tai suuruutta voidaan pienentää (esim. paineenpurkausluukuilla räjähdysten vaikutusten pienentämiseksi). Rakenteet voidaan suojata esim. suojatolpilla tai betoniporsailta, jolloin törmäyskuorman vaikutus rakenteeseen on pienempi. (SFS-EN 1991-1-7: 26.)

3.1 Kuormitusyhdistelmät onnettomuustarkastelussa

Onnettomuustilanteessa rakenteen tulee kestää pysyvien ja muuttivien kuormien lisäksi myös onnettomuuskuorma. Kuormitusyhdistelmä onnettomuustarkastelussa edellyttää eri kertoimien käyttöä muuttuville kuormille. Kertoimet ovat pienempiä verrattuna normaali mitoitustilanteessa käytettäviin kertoimiin.

Taulukko 5. Onnettomuuskuormien yhdistelmissä käytettävät kuormien mitoitusarvot (SFS-EN 1990: 92).

Mitoitustilanne	Pysyvät kuormat		Määrävä onnettomuuskuorma tai maanjäristyskuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat	
	Edulliset	Epäedulliset		Pääasiallinen	Muut
Onnettomuus (*) (Yht.6.11a/b)	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	A_d	$\Psi_{1.1}$ tai $\Psi_{2.1}Q_{k,1}$	$\Psi_{2,i}Q_{k,i}$
(*) Onnettomuustilanteessa määrävälle muuttuvalle kuormalle voidaan antaa sen tavallinen arvo tai kuten maanjäristyskuormayhdistelmässä, sen pitkäaikaisarvo. Valinta tehdään kansallisessa liitteessä, tarkasteltavasta onnettomuuskuormasta riippuen.					

4 PAIKALLISEN VAURION LAAJUUDEN RAJOITTAMINEN

4.1 Vaakasiteet

4.1.1 Rengas- ja sisäpuoliset siteet

Jokainen väli- ja yläpohja varustetaan sen ympäri kiertävillä rengassiteillä ja kohtisuorasti toisiaan vastaan olevilla sisäpuolisilla siteillä. Siteistä tehdään jatkuvia ja ne sijoitetaan mahdollisimman lähelle pilari- ja seinälinjoja sekä välipohjien reunoja. Vähintään 30% siteistä sijoitetaan pilarien ja seinien ruudukkolinjojen välittömään läheisyyteen. Vaakasiteet voivat olla puuta, teräs- tai alumiiniprofiileja, betoni-teräs – liittolaatoissa olevia verkkoraudotteita, betonirakenteissa olevia betoniteräksiä tai teräsohutlevystä valmistettuja liittolevyraudoituksia, jos leikkausliittimet yhdistävät ne suoraan teräspalkkeihin. Siteinä voidaan käyttää erilaisia yhdistelmiä edellä mainituista. Jokaiselta jatkuvalta siteeltä ja sen pääteankkuroinneilta edellytetään, että ne pystyvät siirtämään onnettomuusrajatilassa yhtälön (1) tai yhtälön (2) mukaiset sidevoimat T_i . Käytettävä yhtälö riippuu pysyvän kuorman ominaisarvosta. Seuraamusluokan 3a sidevoimien laskentakaavassa on useampi muuttuja kuin seuraamusluokassa 2.

Seuraamusluokka 2

Kun vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo $G_k \geq 2,0 \text{ kN/m}^2$

$$T_i = s * 20 \text{ kN/m tai } 70 \text{ kN sen mukaan, kumpi on suurempi.} \quad (1)$$

Kun vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo $G_k \leq 1,0 \text{ kN/m}^2$

$$T_i = s * 3 \text{ kN/m tai } 10 \text{ kN sen mukaan, kumpi on suurempi.} \quad (2)$$

missä s on sisäpuolisilla siteilla siteiden väli keskeltä keskelle ja rengassiteillä rengassiteen ja lähimmän sisä-puolisen siteen väli jaettuna kahdella lisättynä etäisyydellä rakenteen reunaan.

Vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvon G_k ollessa välillä 1,0 – 2,0 kN/m² sidevoiman arvot voidaan interpoloida (NA SFS-EN 1991-1-7: 16). Liitteenä olevassa laskuesimerkissä on ratkaistu sidevoimat ja katto-orsien kestävyys sidevoimille on osoitettu riittäväksi.

4.1.2 Seinien ja pilareiden sidonta välipohjaan

Reunapilarit ja –seinät sidotaan kaikkiin väli- ja yläpohjatasoon. Vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo G_k määrittää käytettävät sidevoimat. Siteiden on pystyttävä kantamaan onnettomuusrajatilassa yhtälön (3) tai yhtälön (4) mukaiset voimat.

Seuraamusluokka 2

Kun vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo $G_k \geq 2,0$ kN/m²

$$T_{tie} = s * 20 \text{ kN/m.} \quad (3)$$

Kun vaakarakenteen pysyvän kuorman ominaisarvo $G_k \leq 1,0$ kN/m²

$$T_{tie} = s * 3 \text{ kN/m,} \quad (4)$$

mutta kuitenkin enintään $T_{tie} = 150$ kN.

missä s on sidevoiman kertymisleveys, joka lasketaan pystyrakenteiden välisten vapaiden etäisyyksien puolestavälistä puoleenväliin tai pystyrakenteen ollessa ulkonurkassa rakenteen ulkoreunaan saakka. (NA SFS-EN 1991-1-7: 16.)

4.2 Pystysiteet

Pilarit ja seinät on varustettava jatkuvalla sidonnalla perustuksista yläpohjaan asti. Pilareiden ja kantavien seinien tulee kestää onnettomuusmitoitustilanteessa esiintyvä vetovoima, jonka mitoitusarvo on suurin pystysuuntaisen pysyvän ja muuttuvien kuormien mitoitusarvon reaktio, joka kertyy pilarille tai seinälle yhdestä kerroksesta. Vetovoima on ankkuroitava yläpuoliseen kerrokseen. Kantavan seinärakenteen pystysiteet voivat olla enintään kuuden metrin etäisyydellä toisistaan ja ne saavat olla enintään kolmen metrin etäisyydellä seinän vapaasta päästä. (NA SFS-EN 1991-1-7: 21.)

4.3 Yhden rakenneosan kantokyvyn menetys

Tapauksessa missä rakenneosan kohdalla ei voida soveltaa sidevoimia on tutkittava voidaanko osaa ympäröivä rakenne suunnitella niin, että kun rakenneosa menettää kantokykynsä on muu rakennus edelleen vakaa, eikä paikallinen vaurio ylitä sallittua raja-arvoa. Yleensä on riittävää kun voidaan osoittaa, että rakenneosan kantokyvyn menetyksen jälkeen sitä ympäröivä rakenne kantaa siihen kohdistuvat lisäkuormat korvaavan rakennesysteemin avulla.

4.4 Avainasemassa oleva rakenneosa

Avainasemassa olevalla rakenneosalla tarkoitetaan rakenneosaa, jonka poistamisesta seuraa hyväksyttävän rajan ylittävä vaurio. Tällainen rakenneosa sekä sitä tukevat rakenteet tulee mitoittaa kestäämään onnettomuuskuorma A_d . Suomen kansallisessa liitteessä onnettomuuskuorman mitoitusarvoksi on määritelty 50 kN ja kuorman

oletetaan vaikuttavan vaakasuunnassa vapaan kerroskorkeuden puolessa välissä. Eurokoodin mukainen mitoituskorman suositusarvo on 34 kN/m^2 . Pilareiden mitoituksessa käytetään 50 kN pistekuormaa ja seinissä kuorma jaetaan viivakuormaksi kolmen metrin leveydelle (NA SFS-EN 1991-1-7: 21). Liitteessä esitetyssä laskuesimerkissä käytetään 50 kN pistekuormaa pilarin korkeuden puolessa välissä. Esimerkin pileri kestää onnettomuuskuorman A_d , mikä on ratkaisevan tärkeää, sillä vaihtoehtoiset toimintaperiaatteet eivät toimineet sidevoimia lukuunottamatta.

4.5 Riskianalyysi

Riskianalyysiä edellytetään seuraamusluokassa 3b, silloin rakenne on tyypillisesti vaativa ja vaurion seuraukset ovat suuret. Riskianalyysissä huomioidaan ennakoitavissa olevat sekä ennakoimattomat vaaratilanteet. Riskianalyysimenetelmiin kuuluu kvalitatiivinen (kuvaileva) osio ja kvantitatiivinen (numeerinen) osio, jos se on oleellinen ja käytännössä tehtävissä. *Kuva 3:ssa* on esitetty riskianalyysin yleiskatsaus. (SFS-EN 1991-1-7: Liite B.)



Kuva 3. Riskianalyysin yleiskatsaus (SFS-EN 1991-1-7: 66).

5 YHTEENVETO

Eurokoodi 1:n sisältämän liitteen A sijasta Suomessa käytetään kansallisen liitteen jäljessä olevaa ristiriidatonta asiakirjaa ”Rakennusten suunnittelu määrittelemättömästä syystä aiheutuvan paikallisen vaurion seuraamusten varalta”. Siinä esitettävillä periaatteilla saadaan aikaan rakennus, joka sietää paikallista vaurioitumista sortumisen etenemättä rakennuksessa suhteettoman laajalle.

Teräsrakenteiden mitoitus jatkuvalle sortumalle edellyttää eri toimenpiteitä seuraamusluokasta riippuen. Seuraamusluokassa 1 ei vaadita onnettomuustilanteen erityistarkastelua. Luokka 2a edellyttää vaakasiteet tai välipohjien ankkuroinnin seiniin. Luokka 2b edellyttää vaaka- ja pystysiteet tai paikallisen vaurion tarkastaminen tai suunnittelu avainasemassa olevana rakenneosana. Luokassa 3a on samat toimintaperiaatteet kuin luokassa 2b ja luokassa 3b vaaditaan riskianalyysi. Riskiarvioinnin tuloksesta riippumatta tulee tarkistaa paikallisen vaurion seuraukset, sekä avainasemassa olevat rakenneosat.

Sidevoimien laskemiseen on olemassa selkeät ohjeet, mutta Eurokoodi ei anna ohjeita siitä, miten liitokset mitoitetaan sidevoimille. Paikallisen vaurion tarkastamisen yhteydessä puhutaan ainoastaan sallituista rajoista. Paikallisen vaurion laajuuden rajoittaminen voidaan suunnitella mm. niin, että liitokset mahdollistavat sallitun kokoisen alueen sortumisen, ilman että ympärillä olevat rakenteet sortuvat. Kyseinen ratkaisu ei kuitenkaan sovellu kaikkiin tapauksiin, sillä se aiheuttaa riskitilanteet sortumishetkellä. Kuormien siirtäminen vaihtoehtoisen rakennesysteemin avulla on työläämpi, mutta turvallisempi ratkaisu. Suunnittelu avainasemassa olevana rakenneosana on selkeä tapa osoittaa rakenteen kestävyys.

Eurokoodin mukainen mitoitus on esitetty liitteenä olevassa laskuesimerkissä ja sen perusteella voidaan sanoa, että teoria toimii.

6 LÄHDELUETTELO

Betoninormikortti 23EC (2012) Liitosten mitoitus onnettomuuskuormille. Suomen Betoniyhdistys ry. 48 s.

NA SFS-EN-1991-1-7 (2009) Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-7. Rakennusten suunnittelu määrittelemättömästä syystä aiheutuvan paikallisen vaurion seuraamusten varalta. Ympäristöministeriö: 23 s.

Ongelin P & Valkonen I (2012) Rakenneputket EN 1993 –käsikirja. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.

SFS-EN-1991-1-7 + A1 + AC (2014) Eurokoodi 1. Osa 1-7: Yleiset kuormat - Onnettomuuskuormat. Suomen Standardisoimisliitto: 116 s.

SFS-EN 1990 + A1 + AC (2010) Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto. 184 s.

SFS-EN 1993-1-1 (2005) Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto. 99 s.

LIITE

Alkuarvot

Pilarin pituus $H := 7r$

Hallin leveys $B := 22.5r$

Kehäväli $k := 7.2r$

Kehien lukumäärä 8

Kattokaltevuus $\alpha := \frac{1}{3}$

Lumikuorma

$$s_k := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \gamma := 0.8$$

$$s_{k, \text{lu}} := s_k \cdot \gamma = 2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Viivakuorma lumesta

$$Q_{k1} := s \cdot k = 14.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Lumesta aiheutuva pistevoima pilarin päässä

$$Q_{k, \text{lumi}} := \frac{Q_{k1} \cdot B}{2} = 162 \text{ kN}$$

Kattorakenteen omapaino

$$G_{k1} := g_{k1} \cdot k = 2.16 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \quad g_{k1} := 0.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Ristikön omapaino

$$G_{k2} := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Rakenteen omapaino yhteensä

$$G_k := G_{k1} + G_{k2} = 3.16 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Rakenteen omapainosta aiheutuva pistevoima pilarin päässä

$$G_{kj} := \frac{G_k \cdot B}{2} = 35.55 \text{ kN}$$

Tuulikuorma voimakerron menetelmällä

$$c_s := 1 \quad c_d := 1 \quad A_{\text{ref}} := H \cdot B = 157.5 \text{m}^2$$

$$c_f := 1.3 \quad \text{umpinainen rakennus}$$

$$q_p := 0.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Maastoluokka II, korkeus 7m}$$

$$F_w := c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p \cdot A_{\text{ref}} = 122.85 \text{kN}$$

Viivakuorma tuulesta

$$Q_{kw} := \frac{F_w}{k} = 17.063 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kuormitusyhdistelmät

$$K_{FI} := 1$$

Käsitellään tuulikuorma ja omapaino sekä lumikuorma erillisinä, koska kyseiset voimat vaikuttavat erisuuntiin.

Murtorajatila

$$\text{Lumikuorma määräävä} \quad \psi_{0w} := 0.6$$

$$N_{Ed1} := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k.lumi} = 283.882 \text{kN}$$

$$W_{Ed1} := 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0w} \cdot Q_{kw} = 15.356 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Tuulikuorma määräävä} \quad \psi_{0l} := 0.7$$

$$N_{Ed2} := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \psi_{0l} \cdot Q_{k.lumi} = 210.982 \text{kN}$$

$$W_{Ed2} := 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{kw} = 25.594 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pelkkä omapaino

$$1.35 \cdot K_{FI} \cdot G_{kj} = 47.992 \text{kN}$$

Tämä arvo on pienin, joten sitä ei huomioida

Käyttörajatila

Lumikuorma määräävä

$$N_{Ed3} := K_{FI} \cdot G_{kj} + K_{FI} \cdot Q_{k,lumi} = 197.55 \text{ kN}$$

$$W_{Ed3} := K_{FI} \cdot \psi_{0w} \cdot Q_{kw} = 10.238 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tuulikuorma määräävä

$$N_{Ed4} := K_{FI} \cdot G_{kj} + K_{FI} \cdot \psi_{0l} \cdot Q_{k,lumi} = 148.95 \text{ kN}$$

$$W_{Ed4} := K_{FI} \cdot Q_{kw} = 17.063 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pelkkä omapaino

$$K_{FI} \cdot G_{kj} = 35.55 \text{ kN}$$

Tämä arvo on pienin, joten sitä ei huomioida

Pilarin mitoitus

$$\phi_0 := \frac{1}{200} \quad \text{sivusiirtymän perusarvo}$$

$$\alpha_h := \frac{2}{\sqrt{7}} = 0.756 \quad \text{korkeuden pienennystekijä}$$

$$m_1 := 2 \quad \text{peräkkäisten pilareiden lukumäärä}$$

$$\alpha_m := \sqrt{0.5 \left(1 + \frac{1}{m_1} \right)} = 0.866$$

$$\phi := \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 3.273 \times 10^{-3}$$

$$V_{Ed} := N_{Ed2} = 210.982 \text{ kN}$$

$$H_{eq} := \phi \cdot V_{Ed} = 690.602 \text{ N}$$

Ekvivalentista vaakavoimasta aiheutuva momentti

$$M_1 := H_{eq} \cdot H = 4.834 \text{ kNm}$$

Tuulikuormasta aiheutuva momentti

$$M_2 := \frac{W_{Ed2} \cdot H^2}{2} = 627.047 \text{ kNm}$$

Kokonaismomentti pilarin kannassa

$$M_3 := M_1 + M_2 = 631.881 \text{ kNm}$$

Valitaan profiiliksi 300*300*10

Putkipalkkikäsikirjan taulukosta saadaan arvot:

$$W_{el} := 1035 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl} := 1211 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$N_{cRd} := 3996 \text{ kN}$$

$$M_{cRd} := 429.9 \text{ kNm}$$

$$I := 1551910^4 \text{ mm}^4$$

$$A := 11260 \text{ mm}^2$$

$$f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nurjahduskestävyys

$$E := 210 \text{ GPa} \quad L_n := 2 \cdot H = 14 \text{ m}$$

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_n^2} = 1.641 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Hoikkuusluku

$$\lambda := \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = 1.561$$

Lasketaan pienennystekijä. käsik s71

$$\alpha := 0.4$$

$$\Phi := 0.5 \left[1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2 \right] = 2.051$$

$$\chi := \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = 0.296$$

Kyseessä on neliöprofiili, joten se ei kiepahda.

$$\chi_{LT} := 1$$

Nurjaldustaivutus

$$M_t := 0$$

$$\psi := \frac{M_t}{M_3} = 0$$

$$q := W_{Ed2}$$

$$M_s := \frac{M_1 + M_2}{2} - q \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{H}{4} = 159.179 \text{ kNm}$$

$$\alpha_s := \frac{M_s}{M_3} = 0.252$$

$$c_{my} := 0.2 + 0.8 \cdot \alpha_s = 0.402$$

$$k_{yy.1} := c_{my} \left[1 + (\lambda - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed2}}{\chi \cdot N_{cRd}} \right] = 0.499$$

$$k_{yy.2} := c_{my} \left(1 + 0.8 \frac{N_{Ed2}}{\chi \cdot N_{cRd}} \right) = 0.459$$

$$k_{yy} := \begin{cases} k_{yy.1} & \text{if } k_{yy.1} \leq k_{yy.2} \\ k_{yy.2} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.459$$

Yhteisvaikutusyhtälö

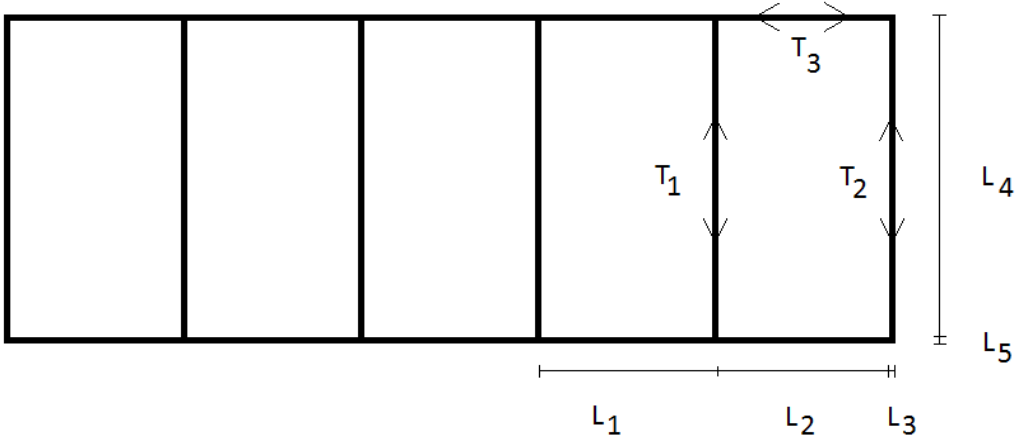
$$M_{Ed} := M_3 \quad N_{Ed} := N_{Ed2}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{cRd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{cRd}} \leq 1 = 1 \quad \text{OK}$$

Käyttöaste

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{cRd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{cRd}} = 0.853$$

Sidevoimat



$$L_1 := k \quad L_2 := L_1 \quad L_3 := 0.3\text{m} \quad L_4 := B \quad L_5 := 0.3\text{m} \quad L_1 = 7.2\text{m} \quad L_4 = 22.5\text{m}$$

$$s_1 := \frac{L_1 + L_2}{2} = 7.2\text{m}$$

$$s_2 := \frac{L_2}{2} + L_3 = 3.9\text{m}$$

$$s_3 := \frac{L_4}{2} + L_5 = 11.55\text{m}$$

$$T_1 := \begin{cases} s_1 \cdot 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} & \text{if } s_1 \cdot 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \geq 10\text{kN} \\ (10\text{kN}) & \text{otherwise} \end{cases} = 21.6\text{kN}$$

$$T_2 := \begin{cases} s_2 \cdot 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} & \text{if } s_2 \cdot 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \geq 10\text{kN} \\ (10\text{kN}) & \text{otherwise} \end{cases} = 11.7\text{kN}$$

$$T_3 := \begin{cases} s_3 \cdot 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} & \text{if } s_3 \cdot 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \geq 10\text{kN} \\ (10\text{kN}) & \text{otherwise} \end{cases} = 34.65\text{kN}$$

Valitaan vaakasiteeksi (katto-orisi) teräsprofiili 90x90x5

$$A_1 := 1636\text{mm}^2 \quad I_1 := 192.910^4\text{mm}^4 \quad W_{p11} := 51.4110^3\text{mm}^3 \quad \gamma_{M1} := 1 \quad \gamma_{M0} := 1 \quad m_1 := 12.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$N_{cRd1} := 580.6\text{kN} \quad M_{cRd1} := 18.25\text{kNm}$$

$$L_{n1} := L_1$$

$$L_{n2} := L_{n1}$$

$$b := 90\text{mm}$$

$$h := 90\text{mm}$$

$$t := 5\text{mm}$$

$$M_{pl,Rd1} := \frac{W_{pl1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 18.25 \text{ kNm}$$

Taivutuskestävyys

$$n_{\text{orssi}} := 30$$

katto-orsien kappalemäärä

$$g_0 := m_1 \cdot g = 125.525 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

katto-orren omapaino

$$q_0 := s \cdot \frac{B}{n_{\text{orssi}} - 1} + g_0$$

viivakuorma lumikuormasta ja katto-orren omapainosta

$$M_{Ed1} := \frac{1}{8} \cdot q_0 \cdot k^2 = 10.869 \text{ kNm}$$

$$\frac{B}{n_{\text{orssi}} - 1} = 0.776 \text{m} \quad \text{katto-orsien jakoväli}$$

$$\frac{M_{Ed1}}{M_{cRd1}} \leq 1 = 1$$

$$\frac{M_{Ed1}}{M_{cRd1}} = 0.596$$

Vetokestävyys

$$N_{t,Rd} := \frac{A_1 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 580.7 \text{ kN}$$

$$\frac{T_1}{N_{t,Rd}} \leq 1 = 1$$

$$\frac{T_2}{N_{t,Rd}} \leq 1 = 1$$

$$\frac{T_3}{N_{t,Rd}} \leq 1 = 1$$

Valittu profiili kestää sidevoimat. Suunnissa T1 ja T2 sidevoimat kohdistuvat kattoristikon alapaarteeseen, joka on tässä esitettyä profiilia vahvempi, joten ollaan varmallalla puolella.

Tarkastetaan kestäkö katto-orret, kun poistetaan yksi pilari, jolloin kattoristikko jää katto-orsien varaan.

Taivutuskestävyys

$$n_{\text{orssi}} := 30$$

katto-orsien kappalemäärä

$$g_0 := m_1 \cdot g = 125.525 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

katto-orren omapaino

$$q_0 := s \cdot \frac{B}{n_{\text{orssi}} - 1} + g_0 = 1.677 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

viivakuorma lumikuormasta ja katto-orren omapainosta

$$P_0 := \frac{G_{k2} \cdot B}{n_{\text{orssi}} - 1} = 775.862 \text{N}$$

kattoristikosta aiheutuva pistevoima yhdelle katto-orrelle

$$M_{Ed2} := \frac{1}{8} \cdot q_0 \cdot (2k)^2 + P_0 \cdot 2k = 54.647 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed2}}{M_{cRd1}} \leq 1 = 0 \qquad \frac{M_{Ed2}}{M_{cRd1}} = 2.994$$

Muutetaan liitoksia niin, että katto-orret eivät kannata kattoristikkoa

$$M_{Ed3} := \frac{1}{8} \cdot q_0 \cdot (2k)^2 = 43.474 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed3}}{M_{cRd1}} = 2.382$$

Katto-orret eivät pysty kantamaan lumikuormaa ilman kattoristikkoa. Rakenteiden liitokset on suunniteltava niin, että kattoristikon vaurioituessa kuormat eivät siirry viereisille ristikoille. Tällä tavalla paikallinen vaurio ei etene laajemmalle ja vain pieni osa katosta sortuu.

Mikäli kattorakenteiden liitoksia ei voida toteuttaa edellä mainitulla tavalla, yhden pilarin vaurioituminen voi johtaa jatkuvaan sortumaan. Tässä tapauksessa pilari on mitoitettava avainasemassa olevana rakenneosana.

Kuormitusyhdistelmät onnettomuustilanteessa, esitetään ainoastaan kohdat jotka poikkeavat aikaisemmin esitetystä pilarin mitoituksesta.

$$\psi_{1.1} := 0.5 \qquad \psi_{2.2} := 0 \qquad A_d := 50 \text{ kN}$$

Lumikuorma määräävä

$$N_{Ed.A1} := G_{kj} + \psi_{1.1} \cdot Q_{k.lumi} = 116.55 \text{ kN}$$

$$W_{Ed.A1} := A_d + \psi_{2.2} \cdot Q_{kw} = 50 \text{ kN}$$

$$H_{eqA} := \phi \cdot N_{Ed.A1} = 381.499 \text{ N}$$

Ekvivalentista vaakavoimasta aiheutuva momentti

$$M_{1A} := H_{eqA} \cdot H = 2.67 \text{ kNm}$$

$$M_1 = 4.834 \text{ kNm}$$

Tuulikuormasta aiheutuva momentti, huom. kuormitusyhdistelmän kertoimet jättävät tuulivoiman huomiomatta.

$$M_{2A} := A_d \cdot \frac{H}{2} = 175 \text{ kNm}$$

$$M_2 = 627.047 \text{ kNm}$$

Kokonaismomentti pilarin kannassa

$$M_{3A} := M_{1A} + M_{2A} = 177.67 \text{ kNm}$$

$$M_3 = 631.881 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{3A}}{M_3} = 0.281$$

Kokonaismomentti on normaalikuormitusyhdistelmästä saatuun kokonaismomenttiin verrattuna hyvin pieni. Todetaan, että pilari kestää viemättä mitoitusta tämän pidemmälle.