

Miki Salli

PILARILAATAN TAIVUTUSMITOITUS KAISTAMENETELMÄLLÄ

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Tammikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Miki Salli: Pilarilaatan taivutusmitoitus kaistamenetelmällä (Flexural Design of Flat Plates using the Strip Method)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Tammikuu 2019

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan pilarilaatan rakenneanalyysiä kaistamenetelmällä taivutusmitoitusta varten. Taustatietoina esitellään pilarilaatan ominaispiirteet rakenneratkaisuna ja eurokoodien asettamat vaatimukset rakenneanalyysille ja raudoituksen suunnittelulle.

Pilarilaatan keskeiset ominaisuudet runkoratkaisuna ovat rakenteen selkeys, muuntojoustavuus, vapaa geometria ja tasainen, palkiton välipohjan alapinta. Jännevälin taloudellinen yläraja jännittävämmällä pilarilaatalla on 7,5–8,5 m ja suositeltavia ovat säännölliset, neliömäiset pilarijat.

Eurokoodin mukaisessa taivutusmitoituksessa käytetään rajatilamitoitusta osavarmuusluvuihin. Rakenteen varmuus murtumista vastaan tarkistetaan murtorajatilassa ja pääraudoitus mitoitetaan tämän perusteella. Rakenneanalyysi voidaan perustaa plastisille menetelmille, kuten kaistamenetelmälle, jos rakenteella on riittävä plastinen muodonmuutoskyky.

Työssä esitellään, mihin kaistamenetelmä perustuu ja tarkastellaan sen soveltamista pilarilaatan rakenneanalyysiin. Lopuksi käsitellään esimerkkitapaus, jolle määritetään mitoitusmomenttijakaumat kaistamenetelmällä. Kaistamenetelmän mukaista momenttijakaumaa vertaillaan lyhyesti elementtimenetelmäohjelmiston antamiin tuloksiin.

Avainsanat: pilarilaatta, kaistamenetelmä, pilarilaatan suunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Tampereen teknillisessä yliopistossa osana kandidaatinopin-
tojeni. Betonirakentaminen ja -rakenteet ovat aina kiinnostaneet minua, joten aihepiirin
valinta oli helppoa. Vaikka työssä käsitellään pilarilaattoja, tutustuin samalla myös muun-
laisten laattojen analyysiin. Tästä on varmasti hyötyä tulevaisuudessa.

Kandidaatintyön tekemisen lomassa olen kehittänyt omia taitojani erityisesti ajankäytön
suunnittelussa, tutkimustavoitteiden asettamisessa, tieteellisessä kirjoittamisessa, tiedon-
haussa ja omien tutkimustuloksien esittelyssä.

Kiitän erityisesti ohjaajaani yliopistonlehtori Olli Kerokoskea antamastaan palautteesta,
jonka myötä työstäni on tullut parempi. Kiitän myös kandidaatintyöseminaarin pienryh-
män jäseniä heidän antamastaan tuesta ja palautteesta kirjoitusprosessin aikana.

Tampereella, 18. tammikuuta 2019

Miki Salli

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	PILARILAATTA RAKENTEENA	2
2.1	Sovelluskohteet ja pilarilaattarakaisun edut.....	3
2.2	Tuotantoteknisiä näkökulmia	3
2.3	Suosittelut rakennemitat	4
3.	LAATTOJEN MITOITUSSÄÄNNÖT EUROKOODISSA	7
3.1	Erilaiset laattarakenteet	7
3.2	Suunnittelun perusteet	8
3.3	Kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät	11
3.4	Pilarilaatan murtorajatilamitoitus	14
3.5	Pilarilaatan käyttörajatilamitoitus	15
3.6	Laattojen raudoitussäännöt.....	15
4.	PILARILAATAN RAKENNEANALYYSI.....	17
4.1	Kaistamenetelmän esittely	18
4.2	Mihin kaistamenetelmä perustuu	19
4.3	Laatan kuormitusalueet ja -kaistat	20
4.4	Keskimääräiset taivutusmomentit ja laattaelementit.....	21
4.5	Mitoitusmomenttien määrittäminen	21
4.6	Kaistamenetelmän soveltaminen pilarilaattoihin	22
5.	ESIMERKKITAPPAUS	28
6.	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET.....	35

LIITE A: YLEISIMPIÄ YKSISUUNTAISIA LAATTAELEMENTTEJÄ

LIITE B: ESIMERKKI SIVUILTAAN TUETUSTA LAATASTA

LIITE C: ESIMERKKITAPAUKSEN MITOITUSLASKELMAT

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CC1	seuraamusluokka 1
CC2	seuraamusluokka 2
CC3	seuraamusluokka 3
EQU	staattisen tasapainon rajatila
EC	eurokoodi
EC0	standardi SFS-EN 1990: Suunnitteluperusteet
EC1	standardi SFS-EN 1991: Rakenteiden kuormat
EC2	standardi SFS-EN 1992: Betonirakenteiden suunnittelu
STR	kestävyyden rajatila
$A_{s, min}$	raudoituksen vähimmäispinta-ala
$A_{s, vaadittu}$	vaadittu raudoituksen poikkipinta-ala
c	laattaelementin sivun pituus
d	poikkileikkauksen tehollinen korkeus
E_d	kestävyyden mitoitusarvo
f_{cd}	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
f_{ctm}	betonin puristuslujuuden keskiarvo
f_{yd}	betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo
f_{yk}	betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
$G_{k, sup}$	pysyvän kuorman suurin ominaisarvo
$G_{k, inf}$	pysyvän kuorman pienin ominaisarvo
g_k	pysyvän kuorman ominaisarvo
h	laatan paksuus
K_{FI}	kuormakerroin
L	pilareiden vapaa väli
L_1	mitoitusmomentin suuremman arvon vaikutusalueen pituus
m_1	tukimomentti tuella 1
m_2	tukimomentti tuella 2
m_{Ed}	taivutusmomentin mitoitusarvo
m_k	keskimääräinen taivutusmomentti
m_{Rd}	taivutuskestävyyden mitoitusarvo
m_x	taivutusmomenttitiheys
m_y	taivutusmomenttitiheys
m_{xy}	vääntömomenttitiheys
m_{xs}	taivutusmomentti tuella
m_{xf}	taivutusmomentti kentässä
Q_k	muuttuvan kuorman ominaisarvo
p	laatan kuormitus
p_d	laatan kuormituksen mitoitusarvo
q	hyötykuorma
$S_{max, slabs}$	laattojen raudoitustankojen maksimiväli
X_d	kuormien vaikutuksen mitoitusarvo
α	mitoitusmomenttijakauman suhdeluku
β	tehollisen puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus
η	tehollisen lujuuden kerroin
μ	suhteellinen momentti

μ_b	tasapainoraudoituksen suhteellisen momentin raja-arvo
ρ	kuorman jakosuhte
ψ_0	yhdistelykerroin
ψ_1	tavallisen arvon yhdistelykerroin
ψ_2	pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin
ω	mekaaninen raudoitussuhde

1. JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan taivutusmomentin jakautumista jännittämättömässä pilarilaatassa. Laatan kuormitukset aiheuttavat laatasta sisäisen jännitys jakauman, jonka määrittäminen on lähtökohtana laatan pääraudoituksen mitoittamiselle. Siten kyseessä on rakennesuunnittelun ja -analyysin ydinalueeseen kuuluva ongelma, joka tulee vastaan aina, kun rakennuksen runkoratkaisuksi valitaan pilarilaatta.

Työssä keskitytään laatan taivutusmomenttien käsinlaskentaan soveltuvan kaistamenetelmän soveltamiseen säännöllisiin pilarilaattoihin. Kaistamenetelmään liittyvät ensimmäiset tieteelliset artikkelit on julkaistu 1950-luvulla ja sitä laajasti käsitteleviä kirjoja ovat esimerkiksi Strip Method of Design (1975) ja Strip Method Design Handbook (1996), jotka molemmat ovat menetelmän alun perin kehittäneen ruotsalaisen Arne Hillerborgin kirjoittamia.

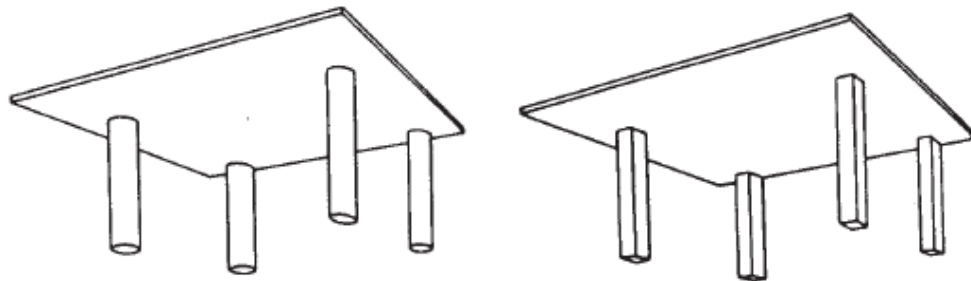
Kantavien rakenteiden ja siten myös teräsbetoni-laattojen mitoittamisen on Suomessa ja muissa Euroopan unionin jäsenmaissa pohjaututtava kansallisella liitteellä täydennettyihin eurooppalaisiin standardeihin SFS-EN 1990–1999, joita kutsutaan lyhyemmin eurokoodeiksi. Kyseessä on 58 osaa ja tuhansia sivuja laaja kokonaisuus, minkä takia mukaan tähän työhön on otettu vain perusasiat ja pilarilaattoja koskevat kohdat.

Eurokoodien esittelyn jälkeen selostetaan kaistamenetelmän perusperiaatteet ja pilarilaattoja koskevat soveltamisohjeet. Lopuksi tutkitaan esimerkkitapausta, joka on toimistorakennuksen moniaukkoinen välipohjalaatta. Kaistamenetelmän perusteella laskettuja tuloksia vertaillaan lyhyesti elementtimenetelmällä saatuihin tuloksiin.

2. PILARILAATTA RAKENTEENA

Runkojärjestelmällä tarkoitetaan rakennuksen kantavien osien muodostamaa kokonaisuutta, joka muodostuu erilaisista rakenneosista, joita ovat esimerkiksi laatat, palkit ja pilarit. Yleisimmät runkojärjestelmät koostuvat näistä rakenneosista. [1, s. 231.]

Pilarien, palkkien ja laattojen muodostamaa runkojärjestelmää sanotaan kehärungoksi. Kantavina pystyosina voivat pilarien ja palkkien asemesta olla myös kantavat seinät, pelkät pilarit tai seinien ja pilarien yhdistelmä. Pilarilaataksi sanotaan runkoa, jossa laatta tukeutuu suoraan pilarien varaan. [1, s. 231–232.] Kuva 1 esittää pyöreillä ja nelikulmaisilla pilareilla varustettuja pilarilaattoja.



Kuva 1. Pilarilaatta, osa lähteen [2, s. 10] kuvasta.

Pilarilaatta voidaan toteuttaa jännittämättömänä tai jälkijännitettynä rakenteena. Jännittäminen mahdollistaa suuremmat jännevälit ja ohuemman rakennepaksuuden verrattuna jännittämättömään rakenteeseen. Jännitettyssä rakenteessa myös taipumat ja halkeamat ovat pieniä ja laatta on vesitiivis. Jännitettyssä laatta voi myös olla 3–4 m pitkiä ulokeosia, jotka eivät ole mahdollisia jännittämättömällä laattalla. [3, s. 54, 105.]

Pilarilaatan laattaosa on yleensä tasapaksu ja pilarien halkaisijat vakioita. Laatan paksuuden valinnassa kiinnitetään huomiota taloudellisuuteen, taipumiin, akustisiin ominaisuuksiin ja palonkestävyyteen. Pilarilaatan lävistyskapasiteetin perusteella määräytyvä paksuus on kuitenkin yleensä mitoituksessa määräävä. [1, s. 294, 332–333.]

Lävistyskapasiteettia voidaan parantaa laatan paksuntamisen ohella myös käyttämällä pilarin kohdalla vahvistuslaattaa tai erityistä lävistysraudoitusta. Pilarin tukivoima voidaan myös jakaa suuremmalle osalle laattaa pilarinhuippua kartiomaiseksi muotoilemalla eli käyttämällä niin kutsuttuja sienipilareita. Valuteknisien ja taloudellisten seikkojen takia

on kuitenkin edullisempaa käyttää joka kohdasta yhtä paksua laattaa ja vakiokokoisia pilareita. [1, s. 332.] Yksi ratkaisu on myös kasvattaa pilarin poikkileikkauksen kokoa, jolloin pilarin tukireaktio jakaantuu suuremmalle osalle laattaa.

2.1 Sovelluskohteet ja pilarilaattaratkaisun edut

Pilarilaattarunko soveltuu käytettäväksi asuinkerrostaloissa, liike-, toimisto- ja pienteollisuusrakennuksissa sekä julkisissa rakennuksissa. Kyseeseen tulevat siis rakennustyytit, joissa kuormitukset ja jännevälit ovat yleensä pilarilaatalle sopivia. [2, s. 2.][3, s. 9, 54.] Pilarilaatan valintaa puoltaa erityisesti tarve muuntojoustavalle runkoratkaisulle tai matlalle välipohjan rakennekorkeudelle ja samalla suuremmalle huonekorkeudelle.

Pilarilaatan ominaisuuksiin kuuluvat vapaa reunojen muotoilu, pieni rakennekorkeus ja tasaiset laatan alapuoliset pinnat. Kantavia pystyrakenteita on myös vähän verrattuna muihin runkotyyppisiin, mikä mahdollistaa tilojen helpon muunneltavuuden. Rakenne on myös nopea suunnitella ja toteuttaa. [4, s. 405.]

Rakennuksessa voi sijaita eri kerroksissa erilaisia toimintoja, jotka asettavat erilaisia vaatimuksia esimerkiksi rakenteiden mitoille ja kuormituksille [3, s. 9–13]. Rakentamisaikana kaikkien tilojen käyttötarkoitus ja erityisvaatimukset eivät välttämättä ole vielä selvillä. Toisaalta käyttötarkoitus voi muuttua rakennuksen elinkaaren aikana, jolloin pilarilaattarungon tarjoamasta muuntojoustavuudesta on etua. Väliseinien sijaintia voidaan muuttaa tarpeen mukaan toisin kuin esimerkiksi kantavia seiniä sisältävässä rakennuksessa. [3, s. 23, 56.]

Taloteknisten järjestelmien vaatimien putkistojen, johdotusten ja muiden vastaavien osien sovittaminen runkorakenteisiin vaakatasossa on helppoa, koska niiden asentaminen ei vaadi läpivientejä kantavista rakenneosista, kuten palkistoista. Taloteknisten järjestelmien pystysuuntaiset nousut sen sijaan vaativat suunniteltuja aukotuksia. [3, s. 56, 82.]

2.2 Tuotantoteknisiä näkökulmia

Pilarilaatan muottityö ja betonointi on yksinkertaisempaa ja nopeampaa kuin muiden runkorakenteiden, koska yksi työvaihe, palkkien tai kantavien seinien rakentaminen, jää pois. Toistuvat ja tasapaksut laattakentät nopeuttavat rakentamista, mikä säästää kustannuksia verrattuna monimutkaisempaan ja paljon yksityiskohtia sisältävään rakenteeseen [3, s. 54, 86]. Pilareiksi soveltuvat pyöreät pilarit, joiden muotti- ja raudoitustyö on yksinkertaisempaa verrattuna muunlaisiin pilareihin [3, s. 60].

Rakenne- ja työmaasuunnittelun huolellisuus ja yksityiskohtaisuus on edellytys rakentamisen etenemiselle aikataulussa. Valualueet suunnitellaan siten, että muottikalusto riittää niiden toteuttamiseen. Edellisen valualueen laatan kovettuessa muotitetaan, raudoitetaan

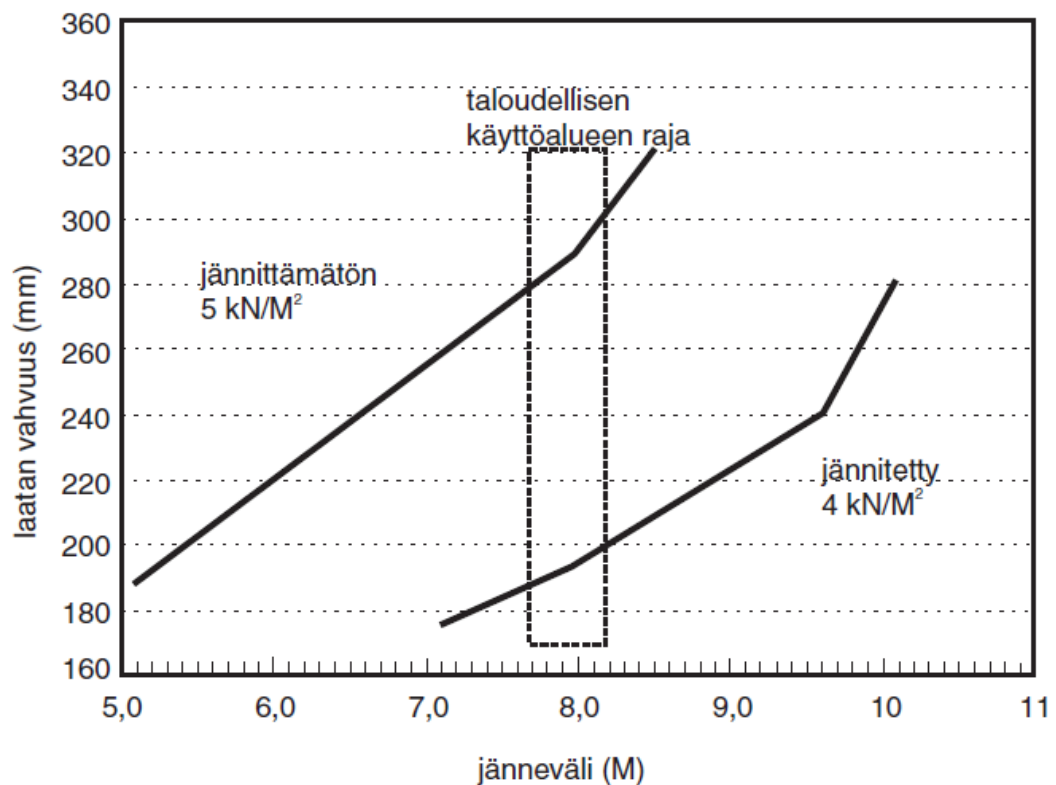
ja valetaan seuraavan valualueen pystyrakenteet. Työsaumat on myös huomioitava suunnitelmissa. [3, s. 86–88.]

Raudoitus on syytä toteuttaa pääsääntöisesti esivalmistettujen teollisten raudoitteiden avulla. Irtotankoja käytetään ainoastaan lisätankoina. Näin raudoittaminen on nopeaa ja sujuvaa. Raudoituksen järjevä suunnittelu ja yhteensopivuus täytyy huomioida rakennesuunnitelmissa. Raudoitteiden on sovittava yhteen ja niiden asennusjärjestys on suunniteltava etukäteen. [3, s. 86, 98.]

Suunnittelussa on siis otettava huomioon myös tuotantotekniset asiat, jotta päästään taloudellisesti järkevään ratkaisuun. Toistuvat ja selkeät rakenneratkaisut alentavat suunnittelu- ja toteutuskustannuksia ja näiden vaiheiden kestoa.

2.3 Suositellut rakennemitat

Jännittämättömän pilarilaatan jännevälin taloudellinen yläraja on noin 8 m, kun taas jännitetyllä pilarilaatalla se on noin 10 m ilman palkkikaistoja. Kuvassa 2 esitetään pilarilaatan jännevälin ja paksuuden välinen riippuvuus sekä taloudellinen raja-alue, joka sijoittuu jännevälille 7,5–8,5 m. [2, s. 2.] Kuvan 2 mukaan raja-alueen 7,5–8,5 m alapuolella on järkevää käyttää jännittämätöntä laattaa, kun taas yläpuolella on perusteltua aloittaa jännitetyn laatan käyttö.



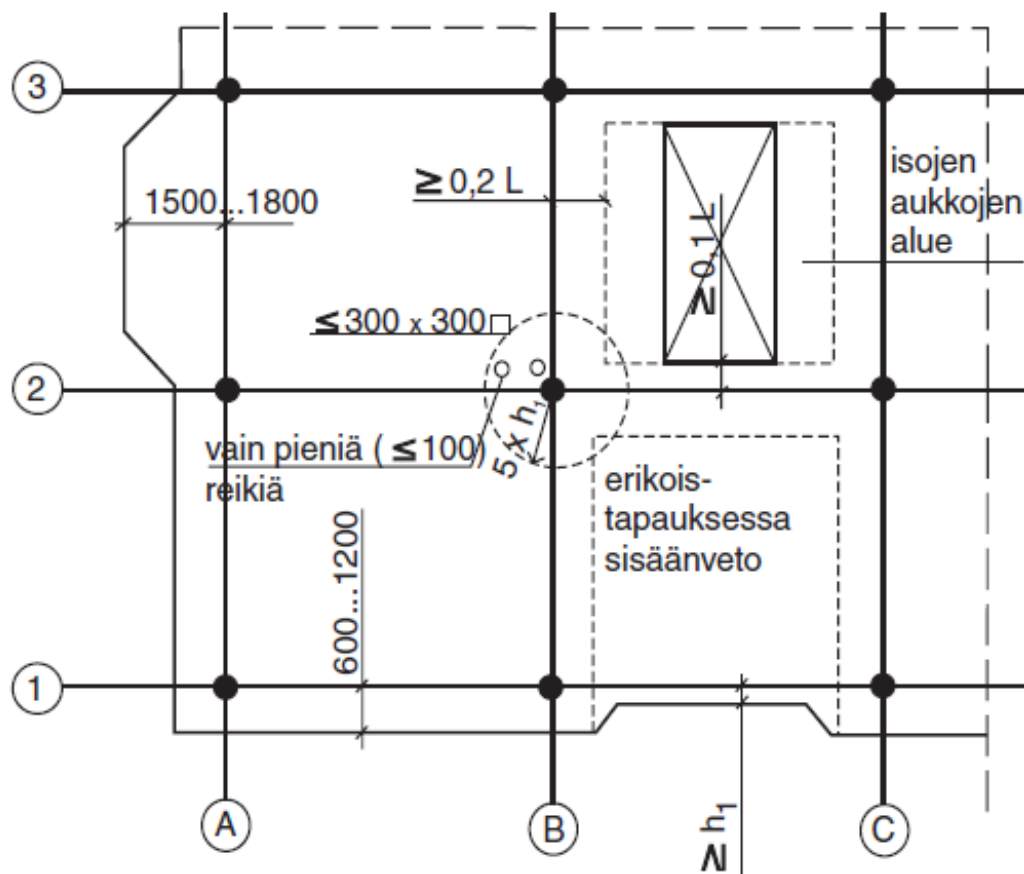
Kuva 2. Taloudellisen jännevälin rajat [2, s. 11].

Edullisin laattakenttien muoto on likimain neliö, mutta jos käytetään suorakulmiokenttiä, niiden sivusuhteiden tulisi olla 0,7–1,5. Pilari on edullista sijoittaa laatan reunasta vähintään etäisyydelle $2d$, jossa d on laatan tehollinen korkeus. [4, s. 148–149, 405–407.]

Pilarilaatan paksuus on Pilarilaattaohjeen [3] taulukoiden mukaan käytännössä 200–380 mm. Paksuuden valintaan vaikuttavat taipumien rajoittaminen ja lävistyskestävyys [3, s. 54–71]. Asuinkerrostaloissa myös akustiset seikat voivat tulla määrääviksi laatan paksuudelle [2, s. 2].

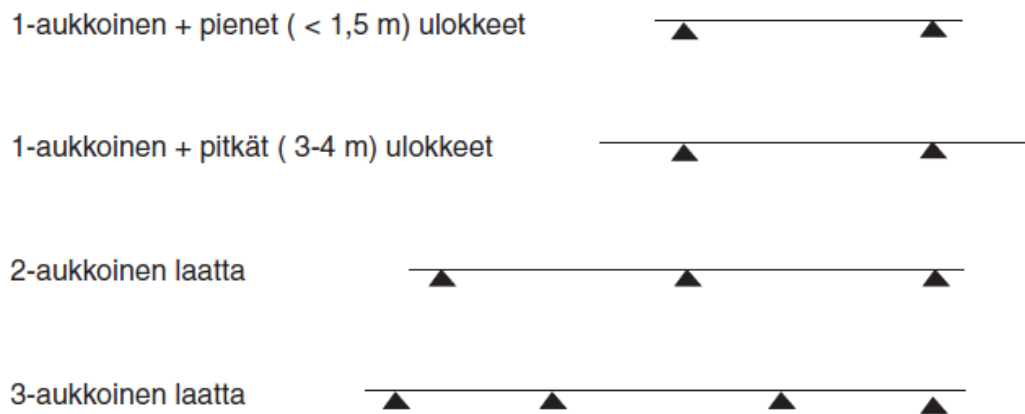
Pilareiden poikkileikkausmitat valitaan kerrosten lukumäärän, pilarikenttien koon ja lävistyskapasiteetin perusteella. Pilareiden mitat kannattaa valita samaksi koko rakennuksessa, sillä pilareiden kantokykyä voidaan muuttaa teräsmääriä ja betonin lujuutta muuttamalla. Pilarilaattaohjeessa esitettyjen valintataulukoiden perusteella pilarin halkaisija voi olla 380–730 mm, 50 mm askelin. [3, s. 60, 62–67.]

Kuvassa 3 on esitetty aukkojen sijoitteluperiaate pilarilaattarungossa. Kuvasta nähdään, että pilareiden lähetyville ei tule sijoittaa suuria aukkoja, vaan ne on sijoitettava keskelle laattakenttää.



Kuva 3. Aukkojen sijoittelu pilarilaatassa [2, s. 4].

Suositteluja vaihtoehtoisia runkotyyppejä rakennuksen syvyys suunnassa on kuvassa 4. Voidaan todeta, että moniaukkoinen rakenne on neliökustannusten perusteella edullisempi kuin yksiaukkoinen. On myös huomattava, että pitkillä ulokkeilla varustettu laatta joudutaan toteuttamaan jännitettynä laattana. Kolmiaukkoista laattaa käytettäessä keskikentän pituudeksi suositellaan 20 % enemmän kuin reunakenttien. [2, s. 12.]



Kuva 4. Pilarilaatan toteutusvaihtoehtoja [2, s. 12].

3. LAATTOJEN MITOITUSSÄÄNNÖT EUROKOODISSA

Eurokoodit ovat Euroopan unionin jäsenmaissa käytössä olevia kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia standardeja, joiden tavoitteena on yhdenmukaistaa rakenteiden suunnitteluperiaatteet ja turvallisuusvaatimukset Euroopan talousalueella [5]. Eurokoodit sisältävät 10 standardia, joissa on yhteensä 58 osaa [6]. Betonirakenteiden suunnittelussa käytettävät standardit ovat [4, s. 19]:

- SFS-EN 1990 Eurokoodi 0: Suunnitteluperusteet (EC0)
- SFS-EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat (EC1)
- SFS-EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu (EC2).

Kaikkia materiaaleja koskevissa standardeissa SFS-EN 1990–1991 [7, 8] määritellään, millä periaatteilla ja vaatimuksilla rakenteiden kestävyys, luotettavuus ja käytettävyys varmistetaan ja millaisia kuormituksia rakenteisiin kohdistuu. Esimerkiksi lumi-, tuuli- ja hyötykuormien laskenta on selostettu standardin SFS-EN 1991 eri osissa.

3.1 Erilaiset laattarakenteet

Eurokoodin 2 mukaan rakenne jaetaan erilaisiin rakenneosiin niiden tyyppin ja toiminnan mukaan rakennemallin muodostamista varten. Laataksi määritellään rakenneosa, jonka sivumitta on vähintään 5 kertaa laatan paksuus. [9, s. 57.]

Laatat voidaan luokitella yhteen suuntaan tai kahteen suuntaan kantaviksi. Yhteen suuntaan kantava laatta käyristyy merkittävästi vain yhdessä suunnassa ja kuormituksien ajatellaan aiheuttavan taivutusmomenttia vain yhden akselin suhteen. Kahteen suuntaan eli ristiin kantavassa laatasta taivutusmomenttia on kahdessa pääsuunnassa ja molemmat on huomioitava mitoituksessa. Laatalta on myös merkittävästi vääntöjäykkyyttä, joten osan kuormituksesta välittää aina vääntömomentti.

Pääosin tasaisesti kuormitettu laatta voidaan mitoittaa yhteen suuntaan kantavana, jos sillä on kaksi yhdensuuntaista tukematonta reunaa tai jos kyseessä on yhdessä suunnassa pitkän, neljältä reunaltaan tuetun laatan keskiosa [9, s. 57]. Muussa tapauksessa laatta on ristiin kantava ja sille on näin ollen ainakin tarkistettava pääraudoituksen tarve kahdessa suunnassa.

Pilarilaatan osat kantavat kuormia useammassa kuin yhdessä suunnassa, joten sillä on pääraudoitus ainakin kahdessa, yleensä toisiaan vastaan kohtisuorassa, suunnassa. Lisäksi

siinä esiintyy paikallinen jännityskeskittymä pilarin kohdalla, joten myös lävistyskestävyys on tarkistettava taivutuskestävyyden lisäksi. Eurokoodissa 2 on annettu joitakin erityisesti pilarilaattoja koskevia määräyksiä, joita käsitellään myöhemmin tässä luvussa.

3.2 Suunnittelun perusteet

Eurokoodien mukaisessa suunnittelussa käytetään rajatilamitoitusta, jossa rakenteen käyttäytymistä tutkitaan erilaisissa rajatiloissa. Tutkittavia rajatiloja ovat murto- ja käyttörajatilat. Murtorajatilassa oleva rakenne on menettänyt kantavuutensa tai stabiiliutensa esimerkiksi materiaalin murtumisen, väsymisen tai rakenteen tasapainon menettämisen seurauksena. Käyttörajatilaan joutunut rakenne puolestaan ei aiheuta välitöntä turvallisuusriskiä, vaan rakenteen toimintaan, säilyvyyteen ja ulkonäköön liittyviä haittoja. [10, s. 20.]

Rajatilatarkasteluissa rakennetta tarkastellaan tietyssä mitoitustilanteessa, joita ovat normaalisti vallitsevat ja tilapäiset olosuhteet sekä onnettomuus- ja maanjäristystilanteet. Onnettomuustilanteita ovat tulipalot, räjähdykset ja törmäykset. [10, s. 21.]

Rajatilatarkasteluissa sovelletaan osavarmuuslukumenetelmää, jossa kuormituksille, niiden vaikutuksille ja materiaalien kestävyyksille on määritelty omat osavarmuuslukunsa. Näin varmuus voidaan tietyssä mitoitustilanteessa ja rajatilassa kohdentaa epävarmuustekijöihin tilastollisesti perustellulla tavalla ja säätää rajatilan ylittymisen todennäköisyys riittävän pieneksi. [10, s. 21.]

Rajatilaan liittyvä mitoitusehto on muotoa [10, s. 21]

$$X_d \leq E_d \quad (3.1)$$

missä X_d on kuormien vaikutuksen mitoitusarvo ja E_d on kestävyuden mitoitusarvo. Kyseisten suureiden määrittäminen on selostettu hyvin yksityiskohtaisesti eurokoodeissa, mutta betonirakenteiden taivutusmitoituksen kannalta riittää yleensä tieto siitä, miten betonin puristuslujuuden mitoitusarvo f_{cd} ja raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo f_{yd} lasketaan.

Puristuslujuuden mitoitusarvo on

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (3.2)$$

jossa α_{cc} on pitkäaikaisvaikutukset ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät huomioiva kerroin, f_{ck} on betonin puristuslujuuden ominaisarvo ja γ_c on betonin osavarmuusluku [9, s. 35]. Suomen kansallisen liitteen mukaiset arvot ovat

$\alpha_{cc} = 0,85$ ja $\gamma_c = 1,5$ normaalisti vallitsevassa ja tilapäisessä mitoitustilanteessa ilman pienennyksiä [11, s. 15].

Betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo on

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \quad (3.3)$$

jossa f_{yk} on betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo ja γ_s on betoniteräksen osavarmuusluku, jonka tavallinen arvo on 1,15 [11, s. 15]. Tyypillinen harjateräksen myötölujuuden ominaisarvo on 500 MPa, jota vastaava mitoitusarvo on edellisen kaavan perusteella 434,8 MPa.

Rajatilamitoitus osavarmuusluvun ei ota huomioon rakennuskohteen luonnetta, minkä takia käyttöön on otettu vielä kuormitusten suuruuteen liittyvät kuormakertoimet, joiden suuruus vaihtelee eri seuraamusluokkiin kuuluvissa rakennuksissa. Kuormakertoimet otetaan huomioon, kun muodostetaan rakenteille tulevia kuormitusyhdistelmiä, jolloin seuraamusluokkaan CC3 kuuluva rakennus saa suuremman varmuuden murtumista vastaan kuin tavanomainen luokan CC2 rakennus. [10, s. 23.]

Taulukossa 1 on esitetty seuraamusluokat rakennuksille Suomen kansallisen liitteen mukaan. Taulukossa 2 on puolestaan esitetty seuraamusluokkiin liittyvät kuormakertoimien arvot.

Taulukko 1. Rakennuksien seuraamusluokat [12, s. 23].

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten - yli 8-kerroksiset ²⁾ asuin-, konttori- ja liikerakennukset - konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot - raskaasti kuormitettut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset. Erikoisrakenteet, kuten esimerkiksi korkeat tornit. Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet, jotka sijaitsevat siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä erityisesti hienorakeisten maalajien alueilla.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristö-vahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset ²⁾ rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä ³⁾ kuten esim. pienehköt varastot ja maatalouden tuotantorakennukset, joiden pinta-ala on enintään 300 m ² tai suurin jänneväli enintään 6 metriä. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten - matalalla olevat terassit ja alapohjat, ilman kellaritiloja - ryömintätalaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne - sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana.

¹⁾ pienehköt rakennusrungosta erilliset välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2 elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena.

²⁾ kellarikerrokset mukaan luettuina.

³⁾ tilapäisenä oleskeluna pidetään päivittäistä käymistä rakennuksessa, mutta ei siellä pidempään viipymistä.

Taulukko 2. Kuormakertoimien arvot [7, s. 138].

Seuraamusluokka	Kuormakerroin K_{FI}
CC1	0,9
CC2	1,0
CC3	1,1

Rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen laatu vaikuttavat myös saavutettavaan luotettavuuteen. Tämän takia suunnittelutehtävät on jaettu eri vaativuusluokkiin, jotka vaikuttavat suunnittelijalta vaadittuun pätevytyteen. [10, s. 24.]

Betonirakenteiden toteutusstandardissa (SFS-EN 13670) on määritelty kolme eri toteutusluokkaa, jonka valintaan vaikuttavat seuraamus-, toleranssi- ja betoniluokka. Toleranssiluokka liittyy vaadittuun mittatarkkuuteen ja betoniluokka betonin lujuusluokkaan. Valettua toleranssi- ja toteutusluokkaa vaikuttavat osavarmuuslukujen suuruuteen: vaativimmassa toleranssi- ja toteutusluokassa voidaan käyttää pienennettyjä osavarmuuslukuja. [10, s. 24–25.] Sallituista pienennyskertoimien arvoista on tarkemmin määrätty Suomen betonirakenteita koskevassa kansallisessa liitteessä.

3.3 Kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät

Rakenteille tulevat kuormat voidaan luokitella monella eri tavalla. Kuormitukset voidaan jakaa vaikutusaikansa perusteella pysyviin kuormiin, muuttuviin kuormiin ja onnettomuuskuormiin. Kuormat voivat olla luonteeltaan staattisia tai dynaamisia ja ne voivat olla liikkuvia tai kohdistua aina samaan paikkaan. Taulukossa 3 on esitelty erilaisia kuormia. [10, s. 26–27.]

Taulukko 3. *Kuormien luokittelu [10, s. 27] mukaan.*

Pysyvä kuorma	Muuttuva kuorma	Onnettomuuskuorma
oma paino	hyötykuorma	räjähdys
esijännitysvoima	lumikuorma	tulipalo
veden ja maan paino	tuulikuorma	ajoneuvon törmäys
perustusten painuminen (epäsuora kuorma)	lämpötilakuorma (epäsuora kuorma)	

Käytännössä kuormat eivät esiinny yksinään, vaan erilaisina yhdistelminä. Tiettyyn kuormitusyhdistelmään otetaan mukaan kuormat, jotka voivat vaikuttaa samanaikaisesti. Kuormien yhdistämisessä muuttuvien kuormien suuruuksia kuitenkin muutetaan kertoimilla, koska on tilastollisesti epätodennäköistä, että kaikki kuormat vaikuttaisivat yhtä aikaa täysimääräisinä. Esimerkiksi lumi- ja tuulikuormien arvot on määritelty niin, että maksimiarvot esiintyvät keskimäärin kerran 50 vuodessa. Kuormitusyhdistelmien laskentakaavoissa näkyvät myös edellä selostettu kuormakerroin K_{FI} ja kuormitusten osavarmuusluvut. [10, s. 27.] Taulukossa 4 on esitetty muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet Suomen kansallisen liitteen mukaan.

Taulukko 4. Muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet [12].

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6 ^{**})
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3 ^{**})
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3 ^{*)} kun			
$s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{***)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huomautus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. ^{**)} Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$ ^{***)} Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia			

Laatoille tulevista kuormista tavallisimpia ovat hyötykuormat ja laatan tai muiden rakennosien painoista aiheutuva kuorma. Taulukossa 5 ovat Suomen kansallisen liitteen mukaiset rakennuksien hyötykuormat.

Taulukko 5. Hyötykuormat rakennuksissa [13].

Kuormitettujen tilojen luokat	q_k [kN/m ²]			Q_k [kN] (portaat suluissa)
	Välipohjat	Portaat	Parvekkeet	
Luokka A Asunto- ja majoitustilat	2,0	2,0	2,5	2,0 (2,0 [*])
Luokka B Toimistotilat	2,5	3,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka C Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua	2,5	3,0	2,5	3,0 (2,0)
– C1	3,0	3,0	3,0	3,0 (2,0)
– C2	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
– C3	5,0	3,0	5,0	4,0 (2,0)
– C4	6,0	6,0	6,0	4,0 (2,0)
– C5				
Luokka D Myyvälätilat				
– D1	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
– D2	5,0	6,0	5,0	7,0 (2,0)
* Asunnon sisäiset portaat $Q_k = 1,5$ kN				

Murtorajatilassa rakennusten betonirakenteita koskevat rajatilat ovat staattisen tasapainon (EQU) ja kestävyuden (STR) rajatilat [10, s. 27]. Rakenneosien kestävyuden eli esimerkiksi taiputus- ja leikkauskestävyyden osoittamisessa käytetään kestävyuden rajatilan mukaisia kuormien yhdistelysääntöjä.

Kestävyuden rajatilassa kuormitusten arvot lasketaan lausekkeilla [12, s. 20]

$$\begin{cases} 1,15K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI}\sum_{i>1}\psi_{0,i}Q_{k,i} \\ 1,35K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} \end{cases} \quad (3.4)$$

joista rakenteelle epäedullisempi on määräävä ja jossa

- K_{FI} on kuormakerroin
- $G_{kj,sup}$ ovat epäedullisia pysyviä kuormia
- $G_{kj,inf}$ ovat edullisia pysyviä kuormia
- $Q_{k,1}$ on määräävä muuttuva kuorma
- $\psi_{0,i}$ on muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ja
- $Q_{k,i}$ ovat muita muuttuvia kuormia.

Käyttörajatilaa voidaan pitää ääritilana, jossa käyttökelpoisuusvaatimuksien täytyy vielä toteutua. Erilaisia käyttörajatiiloja ovat esimerkiksi taipuma-, halkeilu-, myötö- ja värähtelyrajatila. [4, s. 18–19.]

Käyttörajatilamitoituksessa käytetään erilaisia kuormitusyhdistelmiä kuin murtorajatilassa. Pysyvät kuormat otetaan mukaan ominaisarvoisina ja muuttuville kuormille käytetään erilaisia yhdistelykertoimia sen mukaan, minkälaisesta käyttörajatilatarkastelusta on kyse. Kuormitusyhdistelmät ovat ominaisyhdistelmä, tavallinen yhdistelmä ja pitkäaikaisyhdistelmä. Taulukossa 6 on esitetty kuormien yhdistely käyttörajatilassa. [10, s. 30–31.]

Taulukko 6. Kuormien yhdistäminen käyttörajatiiloissa [10, s. 31] mukaan.

Kuormitusyhdistelmä	Kuormien kertoimet		
	Pysyvä kuorma	1. muuttuva kuorma	Muut muuttuvat kuormat
Ominaisyhdistelmä	1,0	1,0	ψ_0
Tavallinen yhdistelmä	1,0	ψ_1	ψ_2
Pitkäaikainen yhdistelmä	1,0	ψ_2	ψ_2

Käytettävä kuormitusyhdistelmä valitaan sen mukaan, millaisia vaikutuksia tarkastellaan. Esimerkiksi jännittämättömien teräsbetonirakenteiden taipuma- ja halkeamaleveysrajatilassa käytetään pitkäaikaista yhdistelmää. [10, s. 31.] Kertoimien ψ arvot saadaan taulukosta 4.

3.4 Pilarilaatan murtorajatilamitoitus

Pilarilaatalle on tarkistettava murtorajatilassa taivutus-, leikkaus- ja lävistyskestävyys. Taivutusmitoituksen perusteella määritetään tarvittava pääraudoitus molemmissa raudoitussuunnissa, jotka yleensä ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa. Leikkausmitoitus tulee kyseeseen, jos laatta on tuettu viivamaisesti [14, s. 58], siis esimerkiksi jos laatta tukeutuu joltakin kohtaa seinään. Lävistysmurtuminen tarkoittaa paikallista laattarakenteen murtumista pistemäisen kuormituksen tai tukireaktion kohdalla [14, s. 64].

Tässä työssä ei käsitellä lävistysmitoitusta, joka on oma erillinen kokonaisuutensa, vaan keskitytään taivutusmitoitukseen. Pilarilaatalla lävistysmurtuminen on kuitenkin aina tarkistettava pilarin ympäristössä.

Taivutusmitoituksen lähtötietoina tunnetaan seuraavat suureet [14, s. 48]:

- mitoitusmomentti m_{Ed} rakenneanalyysin tuloksena
- poikkileikkauksen tehollinen korkeus d
- betonin puristuslujuuden mitoitusarvo f_{cd}
- tehollisen lujuuden kerroin η .

Tehollisen lujuuden kerroin η liittyy korkealujuusbetoneiden käyttöön. Tässä työssä käsiteltyjä ja myöhemmin esiteltävällä kaistamenetelmällä analysoituja laattoja ei valmisteta korkealujuusbetonista.

Lähtötietojen avulla saadaan laskettua suhteellinen momentti

$$\mu = \frac{m_{Ed}}{\eta f_{cd} d^2} \leq \mu_b, \quad (3.5)$$

jossa μ_b on tasapainoraudoituksen mukainen suhteellinen momentti. Ehdon täytyy toteutua, jotta poikkileikkauksesta ei tule yliraudoitettua.

Tehollisen puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus β saadaan yhtälöstä

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu}. \quad (3.6)$$

Mekaaninen raudoitussuhde ω on suuruudeltaan

$$\omega = \beta. \quad (3.7)$$

Vaadittu raudoituksen poikkipinta-ala saadaan nyt yhtälöstä

$$A_{s,vaadittu} = \omega d \frac{\eta f_{cd}}{f_{yd}}, \quad (3.8)$$

jossa f_{yd} on teräksen myötölujuuden mitoitusarvo.

On vielä tarkistettava, että laskettu rauditusmäärä ei ole alle minimiraudoituksen. Kun vaadittu raudoituksen pinta-ala on selvillä, voidaan valita tangot. Tämän jälkeen täytyy tarkistaa, että laatoille määrätty maksimitankoväli ei ylity. [14, s. 48–49.] Edellä kuvattu mitoitus tehdään erikseen tuki- ja kenttämomenteille molemmissa suunnissa.

3.5 Pilarilaatan käyttörajatilamitoitus

Laattojen käyttörajatilassa kyseeseen tulevat yleisimmät rajatilat ovat halkeamaleveyden ja taipumien rajoittaminen. Halkeamaleveyksiä ei yleensä tarvitse erikseen tarkistaa rakennuksissa käytettävissä enintään 200 mm paksuisissa laatoissa, kun laataan ei kohdistu merkittävää vetävää normaalivoimaa ja laatta on raudoitettu standardin raudoitussääntöjen mukaan. Taipumarajatila on laatoilla usein määräävä rajatila ja sitä voidaan pienentää laatan paksuutta kasvattamalla. Taipumien laskenta on kuitenkin haastavaa. [14, s. 88–89.]

Tässä työssä ei käsitellä tarkemmin halkeilu- ja taipumalaskelmia, mutta käyttörajatilat täytyy ottaa huomioon pilarilaattojen mitoituksessa murtorajatilojen ohella. Alustavaksi pilarilaatan paksuudeksi voidaan valita $L/30 \dots L/27$, missä L on laataston suurin jänneväli [4, s. 405–406].

3.6 Laattojen raudoitussäännöt

Laattojen raudoittamisessa huomioitavia asioita ovat ainakin vähimmäisraudoitus, jako-raudoitus, tankovälit, katkaisukohdat, ankkurointi tuille ja tukialueiden raudoitus sekä raudoituksen yksityiskohdat. Osa raudoitussäännöistä perustuu standardin SFS-EN 1992 (EC2) vaatimukseen ja osa vakiintuneisiin käytäntöihin. [14, s. 79.]

Vähimmäisraudoitusmäärä on [14, s. 80]

$$A_{s,min} = \begin{cases} 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} d \\ 0,0013d, \end{cases} \quad (3.9)$$

jossa f_{ctm} on betonin keskimääräinen vetolujuus.

Ristiin kantavissa laatoissa minimivaatimus koskee kenttäraudoitusta molemmissa suunnissa. Yhteen suuntaan kantavissa laatoissa vaaditaan minimimäärän sijaan poikittaisessa suunnassa jakoraudotus, joka on vähintään 20 % pääraudoituksen määrästä. [14, s. 80–81.]

Standardissa EC 2 on määritelty laattojen raudoitustangoille suurin mahdollinen jakoväli $s_{max,slabs}$, jonka suuruus saadaan taulukosta 7. Tankovälin vähimmäisarvo riippuu laatan paksuudesta ja siitä, mistä raudoituksesta ja millä alueella on kyse.

Taulukko 7. Tankovälien maksimiarvon määräytyminen, muokattu lähteestä [14, s. 81].

	Pääraudoitus	Jakoraudotus
Maksimimomentin ja pistekuormien alueet	$\min\{2h, 250 \text{ mm}\}$	$\min\{3h, 400 \text{ mm}\}$
Muut alueet Maksimimomentin	$\min\{3h, 400 \text{ mm}\}$	$\min\{4h, 600 \text{ mm}\}$

Raudoitustankojen ankkuroinnista ja katkaisupituuksista sekä tukialueiden raudoittamisesta on määrätty EC 2:ssa. Myös raudoituksen yksityiskohtista, kuten taivutuksista, jatkoksista ja tankonipuista on määräykset standardissa. Laatan vapaalle reunalle tulee sijoittaa reunaraudoitus. Aukot tarvitsevat myös omanlaisensa raudoituksen. [14, s. 81–87.] Koska raudoituksen yksityiskohtien suunnittelu oma erillinen aiheensa, ei tässä kandidaattityössä selosteta siihen liittyviä yksityiskohtia tämän enempää.

4. PILARILAATAN RAKENNEANALYYSI

Pilarilaatta eroaa ristiin kantavasta laatasta (ks. kohta 3.1) monella tavalla. Taivutusmomentit jakautuvat pilarilaatassa eri tavalla, taipumat ovat suurempia ja lävistyskapasiteetti täytyy tarkistaa pilarien kohdalla. [15, s. 389] Toiminnallisesti pilarilaatta koostuu pilari- ja keskikaistoista, joista pilarikaista toimii tukikaistana ja kantaa suurimman osan kuormasta [4, s. 148].

Eurokoodin 2 opastavan liitteen I mukaan pilarilaattojen analyysissä voidaan käyttää ainakin seuraavia menetelmiä [9, s. 212]:

- kaistamenetelmä
- elementtimenetelmä
- myötöviivamenetelmä ja
- ekvivalenttien kehien menetelmä.

Tässä työssä keskitytään kaistamenetelmän soveltamiseen erityisesti pilarilaattoihin. Seuraavassa luvussa on esimerkkilaskelman lopuksi vertailun vuoksi myös esitelty elementtimenetelmäohjelmiston antamia tuloksia käsiteltävästä pilarilaatasta.

Eurokoodin 2 luvussa 5 esitetyt betonirakenteiden rakenneanalyysiä koskevat määräykset koskevat myös pilarilaattojen analyysiä. Yleisissä vaatimuksissa mainitun periaatesäännön mukaan selvitetään joko voimasuurejakaumat tai jännitysten, muodonmuutosten ja siirtymien jakaumat koko rakenteessa tai rakenteen osassa. [9, s. 53.] Kaistamenetelmällä saadaan selville taivutusmomenttijakauma (voimasuurejakauma), jolle pääraudoituksen mitoitus voidaan suoraan perustaa.

Esimerkiksi elementtimenetelmäohjelmistolla saadaan puolestaan selville rakenteen jännitys-, muodonmuutos- ja siirtymäkentät halutulla tarkkuudella käytettävän analyysityypin rajoissa. Tulosten tulkinnassa tarvitaan niin kutsuttua jälkiprosessointia, koska betonirakenteiden mitoitus on perinteisesti tehty poikkileikkauksessa vallitsevien jännitysjaakaudien resultanttien perusteella. Esimerkiksi poikkileikkauksen taivutusjännitysjaakauden resultantti on taivutusmomentti. Tämän takia myös mitoitusohjeet on muotoiltu ja todettu käytännössä toimiviksi nimenomaan näiden resultanttien pohjalta. Toisaalta raudoituksen määrää ei voida myöskään muuttaa rakenteessa jatkuvasti. Teräsbetonin halkeilu ja muut betonin epälineaariset ilmiöt eivät myöskään ole helppoja mallintaa. Eurokoodissa on myös periaatesääntö, jonka mukaan rakenneanalyysissä tulee idealisoida sekä rakenteen toiminta että geometria tarkasteltavan ongelman kannalta tarkoituksenmukaisella tavalla [9, s. 53]. Mikä on milloinkin tarkoituksenmukaista, on mielenkiintoinen kysymys.

Plastisten menetelmien käyttämisen ehdot on esitetty eurokoodin EC2 kohdassa 5.6.1, jossa mainittujen periaatesääntöjen mukaan plastisia menetelmiä käytetään ainoastaan murtorajatilojen tarkistamiseen, määrävillä poikkileikkauksilla tulee olla riittävä sitkeys ja muodonmuutoskyky ja että analyysissa käytetään joko plastisuusteorian alarajalauseetta tai ylärajalauseetta [9, s. 61]. Eurokoodin 2 kohdassa 5.6.2 annetaan palkkien, kehien ja laattojen analyysiä koskeva periaatesääntö, jonka mukaan plastista analyysiä voidaan käyttää ilman suoraa kiertymiskyvyn tarkistusta, mikäli määrävien poikkileikkausten sitkeys on riittävä tarkasteltavien mekanismien muodostumiselle [9, s. 61]. Eurokoodissa on myös annettu ohjeita, milloin sitkeysvaatimusten voidaan katsoa täyttyvän. Näitä vaatimuksia ei tarkastella yksityiskohtaisesti tässä työssä, mutta lähteen [16] mukaan vähän raudoitetuilla, muilla kuin korkealujuusbetonista valetuilla laatoilla yleensä on riittävä kiertymiskyky, kun käytetään kaistamenetelmää ja siihen liittyviä suositeltuja mitoitusmomenttijakaumia, jotka on esitetty pilarilaatalle myöhemmin.

Eurokoodin 2 luku 9 koskee rakenteiden yksityiskohtien suunnittelua ja erityisiä sääntöjä. Luku 9.4 koskee erityisesti pilarilaattoja. Kohdan (1) mukaan raudoitus on järjesteltävä pilarilaatoissa käyttötilan mukaan, mikä yleensä johtaa raudoituksen keskittymiseen pilareiden kohdalle. Kohdissa (2) ja (3) annetaan ohjeita raudoituksen sijoittelemisesta pilarilaatassa välipilareiden kohdalla. Kohta 9.4.2 koskee raudoitusta, jota tarvitaan momentin siirtämiseksi reuna- ja nurkkapilareille. Kohta 9.4.3 koskee lävistymisleikkausraudoituksen järjestelyä. [9, s. 157–159.] Raudoituksen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon nämä ohjeet. Laajuuden takia näitä ohjeita ei ole mahdollista esitellä tässä työssä yksityiskohtaisesti.

4.1 Kaistamenetelmän esittely

Hillerborgin kaistamenetelmä on plastinen laattojen mitoitusmenetelmä, joka näin ollen soveltuu laatan murtorajatilan tarkasteluun. Menetelmällä saadaan laskettua laatan taivutusmomenttijakaumat, joiden perusteella pääterästen mitoitus on mahdollista.

Yksinkertaisessa kaistamenetelmässä (engl. simple strip method) laatta jaetaan pintansa suunnassa vaaka- ja pystysuuntaisiin kaistoihin, jotka välittävät kuormia tuille vain yhdessä suunnassa. Laatan kuormat voidaan periaatteessa jakaa näille kaistoille missä suhteessa tahansa. Yksinkertainen ja toimiva valinta on kuitenkin sijoittaa tiettyssä osassa laattaa vaikuttava kuorma aina vain toiselle alueen läpi kulkevista kaistoista. [16, s. 10.]

Yksinkertaisimpia laattaelementtejä menetelmässä ovat yhteen suuntaan kantavat laatta-elementit, joita käsitellään seuraavissa aliluvuissa kaistamenetelmän idean esittelemiseksi. Pilarilaatan analyysiin tarvitaan monimutkaisempi laattaelementti. Menetelmän soveltaminen pilarilaataan on myös monivaiheisempi kuin tavanomaiseen reunoiltaan tuettuun laataan.

4.2 Mihin kaistamenetelmä perustuu

Jos löydetään rakenteelle tasapainoyhtälöt toteuttava taivutusmomenttijakauma, jossa taivutusmomentit ovat jokaisessa kohdassa rakennetta plastista momenttia pienempiä, ei rakenne plastisuusteorian alarajalauseen mukaan ole vielä saavuttanut rajakuormaansa [4, s. 111]. Hillerborgin kaistamenetelmän ideana on löytää tällainen tasapainoehdot toteuttava taivutusmomenttijakauma ja suunnitella rakenteen pääraudoitukset näiden taivutusmomenttien mukaisesti. Menetelmää voidaan käyttää, jos teräsbetonirakenteella on riittävä plastinen muodonmuutoskyky. Yleensä tavanomaisesti raudoitetut laatat täyttävät tämän vaatimuksen. Jos laatan raudoitussuhde on korkea ja se on valmistettu korkealujuusbetonista, on plastinen kiertymiskyky rajoittunut ja menetelmän käyttäminen ei välttämättä ole turvallista. [16, s. 1–3.]

On huomattava, että kaistamenetelmällä voidaan mitoittaa vain murtorajatilassa tapahtuvaa taivutusmurtoa vastaan. Erilaiset käyttörajatilatarkastelut ja esimerkiksi lävistysmitoitus on tehtävä erikseen.

Kaistamenetelmän mukaiseen mitoittamiseen liittyy useita suosituksia, jotka vaikuttavat lopputuloksena saataviin taivutusmomenttijakaumiin. Näiden suositusten mukaan toimitaessa laatan toiminta myös käyttörajatilassa on yleensä järkevä. Halkeilun ja muodonmuutosten kannalta kimmoteorian mukaista mitoitusmomenttien jakautumaa jäljittelevä ratkaisu on suositeltava. Kimmoteorian mukaista jakaumaa ei kuitenkaan tarvitse seurata tarkasti, vaan keskimääräisten momenttien mukainen yhteensopivuus riittää. [16, s. 5–7.]

Laatta-alkion tasapainoyhtälö on muotoa [4, s. 143]

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial y^2} = -p_z(x, y), \quad (4.1)$$

jossa

m_x, m_y ovat taivutusmomenttitiheydet ja
 m_{xy} on vääntömomenttitiheys.

Hillerborgin kaistamenetelmässä valitaan vääntömomenteiksi $m_{xy} = 0$ ja oletetaan, että osa ρ kuormituksesta jakaantuu x-akselin suuntaisille kaistoille ja loppuosa $1 - \rho$ y-akselin suuntaisille kaistoille. Tällöin saadaan yhtälöt

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 m_x}{\partial x^2} &= -\rho p(x, y) \\ \frac{\partial^2 m_y}{\partial y^2} &= -(1 - \rho) p(x, y), \end{aligned} \quad (4.2)$$

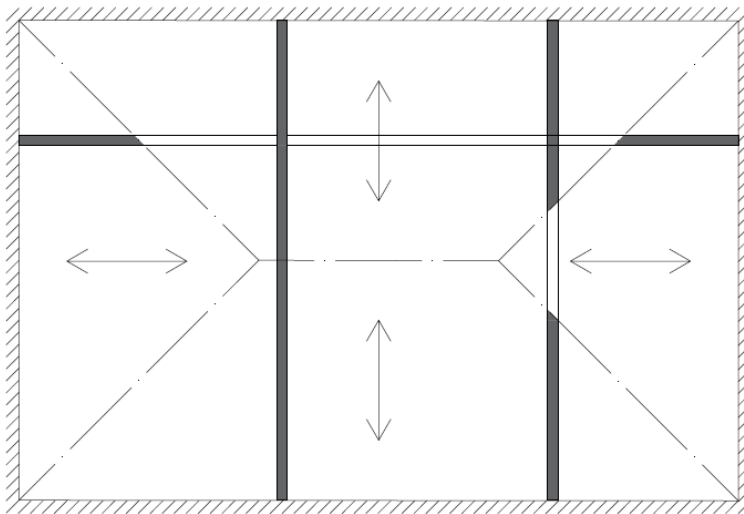
joissa $0 < \rho \leq 1$ ja $p(x, y)$ on laatan kuormitusfunktio [4, s. 143].

4.3 Laatan kuormitusalueet ja -kaistat

Kuormitusalueiden määrittämisessä käytettävä periaate on, että kuormat siirtyvät aina lähimpänä niitä sijaitsevalle tuelle. Myös laatan reunojen kiinnitysasteella on merkitystä kuormien jakautumiselle, joten on suositeltua noudattaa seuraavia sääntöjä [16, s. 11–12]:

- Jos nurkassa kohtaavat kaksi kiinnitettyä reunaa, jakoviiva puolittaa nurkkakulman.
- Jos reunat ovat vapaasti tuetut, jakoviiva muodostaa pienemmän kulman laatan lyhyemmän sivun kanssa.
- Jos toinen reunoista on vapaasti tuettu ja toinen kiinnitetty, jakoviiva muodostaa pienemmän kulman vapaasti tuetun reunan kanssa.

Kuvassa 5 on esitetty suorakulmion muotoinen laatta, joka on jaettu neljään osaan. Kuvassa on merkitty, missä suunnassa kukin alue välittää kuormia. Kuvassa on esitetty myös eräät vaaka- ja pystysuuntaiset kaistat, joille kohdistuvat tummennetun alueen kuormitukset. Koko laatan alue saadaan katetuksi, kun tällaisia kaistoja on molemmissa suunnissa koko laatan leveydellä riittävä määrä.



Kuva 5. Laatan jakoviivat ja erisuuntaiset kaistat.

Kuormitusalueiden rajaviivat otaksutaan leikkausvoiman nollaviivoiksi, joiden kohdalla sijaitsevat kenttämomenttien maksimi-arvot. Kuvan 5 kaistat voidaan analysoida palkkeina, jotka on tuettu päistään jäykästi. [16, s. 12–14.]

Vaakakaistan taivutusmomenttijakauma vaihtelee pystysuunnassa, koska kaistan kuormitetun osan pituus muuttuu. Kun tarkastellaan vaakakaistojen taivutusmomentin maksimi-arvoa, pienin arvo saadaan luonnollisesti laatan yläreunalla sijaitsevalla vaakakaistalla

ja suurin keskellä, koska tällöin kaistalla on eniten kuormitusta. Taivutusmomentin poikittainen jakauma ei siis yleensä ole tasainen, vaan riippuu laatan kuormitusfunktiosta ja siitä, minkä muotoisia kuormitusalueet ovat.

4.4 Keskimääräiset taivutusmomentit ja laattaelementit

Laatan taivutusmomenttijakauman tarkan poikittaisen vaihtelun selvittämiseksi kuormitusalueella joudutaan integroimaan rajaton määrä kaistoja. Käytännössä raudoitusta ei voida mitoittaa tällaiselle jatkuvalla vaihtelulle. Tämän takia kaistamenetelmän mukaisessa analyysissä käytetään tällaisten epätasaisten poikittaisjakaumien keskimääräisiä taivutusmomentteja apuna mitoitusmomenttien määrittämisessä. [16, s. 12.]

Keskimääräiset taivutusmomentit on laskettu valmiiksi muodoltaan erilaisille ja eri tavoin kuormitetuille alueille, joita kutsutaan laattaelementeiksi. Yksinkertaisimpia laattaelementeistä ovat yhteen suuntaan kuormia välittävät elementit, jotka on tuettu yhdeltä reunaltaan. [16, s. 12–13.]

Esimerkiksi kuvassa 5 laatta on jaettu leikkausvoiman nollaviivoin neljään laattaelementtiin, joista kaksi on kolmion ja kaksi puolisuunnikkaan muotoisia. Taulukoista saadaan kyseisten laattaelementtien keskimääräiset taivutusmomentit, joiden avulla laatan raudoituksen mitoitusmomentit määritetään. Liitteessä A on esitetty tavallisimmin esiintyviä yksisuuntaisia laattaelementtejä ja niiden keskimääräisiä taivutusmomentteja.

4.5 Mitoitusmomenttien määrittäminen

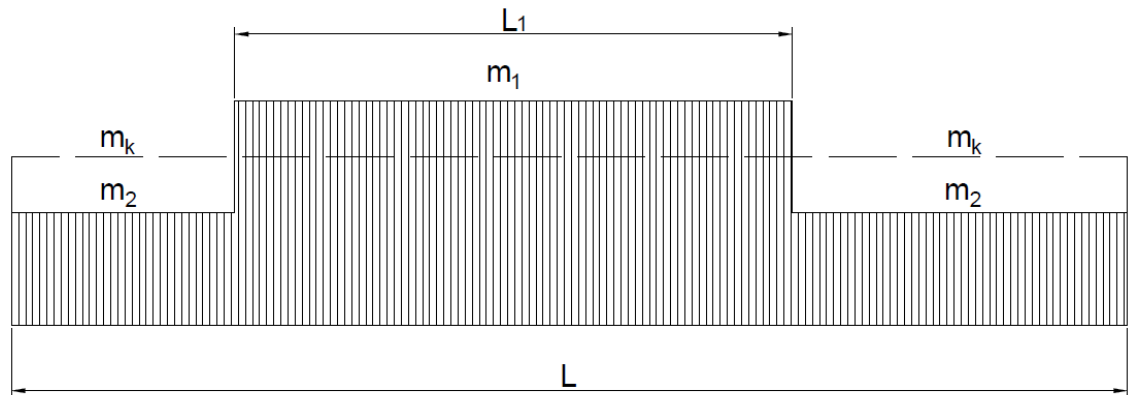
Momenttien suhteen on otettava huomioon kaksi jakaumaa [16, s. 27]:

1. Tuki- ja kenttämomenttien jakautuminen toisiinsa nähden eli raudoituksen suuntainen jakautuminen ja
2. poikittainen jakautuminen raudoitusta vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Mitoitusmomenttien määrittäminen laatan eri alueille tehdään laatalle laskettujen keskimääräisten momenttien perusteella. Periaatteessa momentit voidaan jakaa miten tahansa, mutta tiettyjä sääntöjä noudattaen raudoituksesta tulee kustannuksiltaan kohtuullinen, riittävän yksinkertainen toteuttaa ja käyttörajatilassa toimiva. [16, s. 27.]

Raudoitus toimii aktiivisimmin alueilla, joilla laatan kaarevuus raudoitteen suunnassa on suuri. Toisaalta tukien kanssa yhdensuuntaiset ja lähellä tukia sijaitsevat raudoitteet eivät ole kovin aktiivisia. Yleensä järkevintä on jakaa taivutusmomentti laatan alueelle siten, että teoreettisesti suuren taivutusmomentin vaikutusalueelle määritellään tasainen, keskimääräistä korkeampi mitoitusmomentti ja tämän alueen ulkopuolelle määritellään tasai-

nen, keskimääräistä pienempi mitoitusmomentti. [16, s. 28.] Periaatteessa siis yleensä valitaan raudoitussuunnassa kaksi eri mitoitusmomentin arvoa sopiville alueille ja mitoiteetaan pääraudoitus kyseissä suunnassa näille momenteille ja alueille.



Kuva 6. Mitoitusmomenttien määrittäminen, perustuu lähteeseen [16, s. 29].

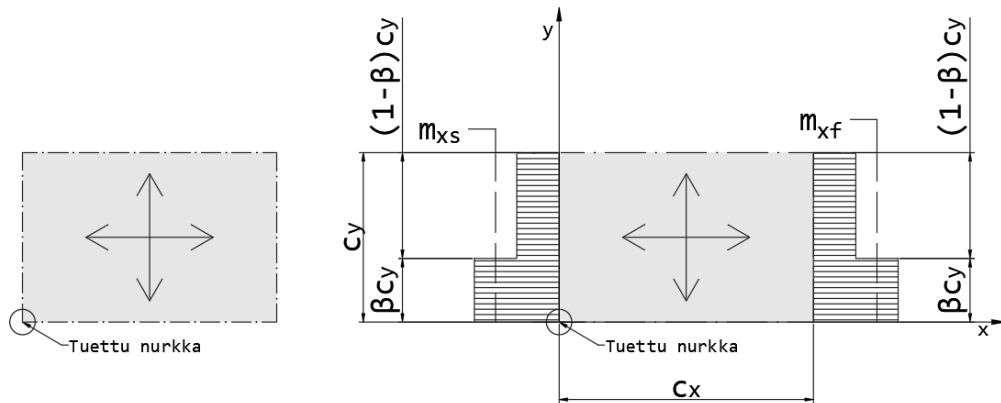
Kuvassa 6 on esitetty mitoitusmomentit m_1 ja m_2 ja keskimääräinen taivutusmomentti m_k . Kun on päätetty suhdeluvut L_1 / L ja m_2 / m_1 , saadaan mitoitusmomentti m_1 laskettua kaavalla [16, s. 28]

$$m_1 = \frac{m_k}{\frac{L_1}{L} + \frac{m_2}{m_1} \left(1 - \frac{L_1}{L}\right)}. \quad (4.3)$$

Liittessä B on esitetty kahdelta reunaltaan kiinnitetyn ja kahdelta reunaltaan vapaasti tuetun laatan taivutusmomenttien laskenta Hillerborgin kaistamenetelmällä. Esimerkissä on käytetty kolmio- ja puolisuunnikaselementtejä ja valittu $m_2 / m_1 = 0,5$.

4.6 Kaistamenetelmän soveltaminen pilarilaattoihin

Jotta kaistamenetelmää voitaisiin soveltaa pilarilaattoihin, tarvitaan uudentyyppinen laattaelementti, joka on tuettu yhdestä nurkastaan. Elementin reunat ovat leikkausvoimien ja vääntömomenttien nollaviivoja. Nurkasta tuettu elementti kantaa useaan suuntaan ja sen alueella täytyy olla rauditus ainakin kahteen suuntaan. Tavallisin nurkasta tuettu elementti on suorakulmion muotoinen ja tasaisesti kuormitettu. Tällainen elementti on esitetty kuvassa 7. Kaistamenetelmään on kehitetty myös vinokulmaisia ja kolmion muotoisia elementtejä. [16, s. 29–30.]



Kuva 7. Nurkasta tuettu elementti, perustuu lähteeseen [16, s. 30].

Kuvassa 7 esiintyvän, kokoa $c_x \times c_y$ olevan ja tasaisesti kuormitetun elementin tukilinjalla on keskimääräinen taivutusmomentti m_{xs} ja reunalinjalla keskimääräinen taivutusmomentti m_{xf} . Arvot sijoitetaan etumerkkeineen, siis taivutusmomentti m_{xs} on negatiivinen. Elementti on tasapainossa y-akselin suhteen, kun

$$m_{xf} - m_{xs} = \frac{qc_x^2}{2}, \quad (4.4)$$

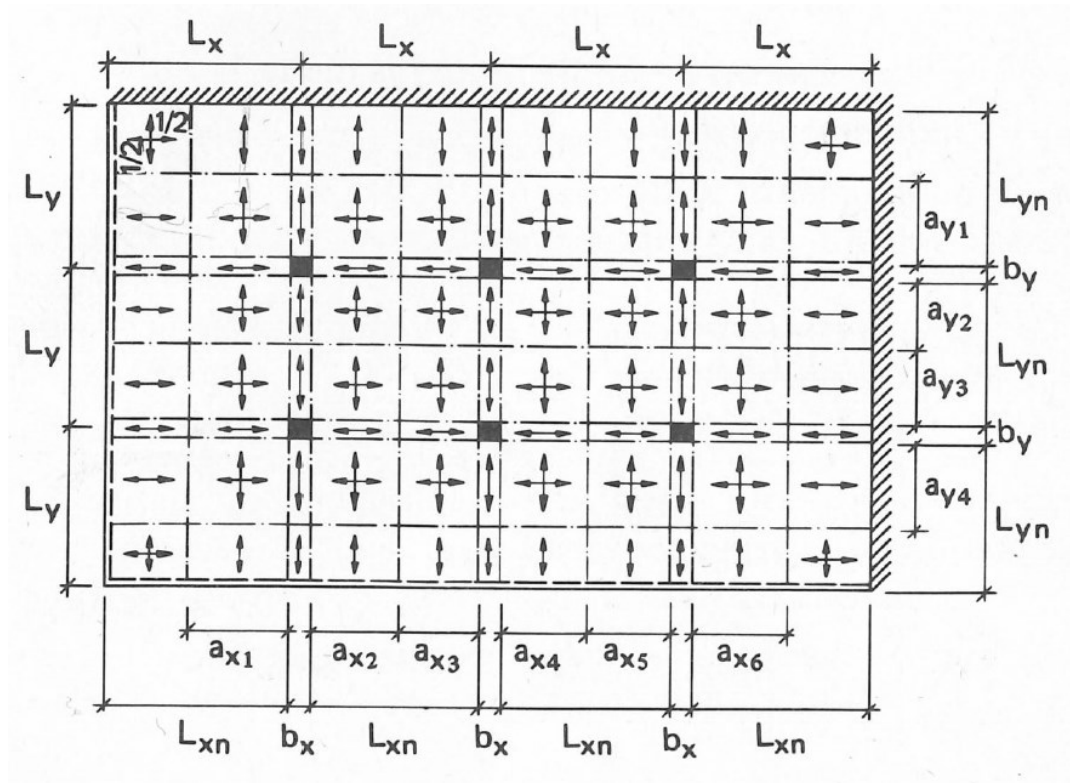
jossa q on tasainen neliökuorma. [16, s. 31.]

Taivutusmomentit jaetaan vaakasuunnassa pilari- ja palkkikaistoille, joiden leveydet ovat βc_y ja $(1-\beta)c_y$. Määritellään yksikötön kerroin

$$\alpha = \frac{m}{m_{xf} - m_{xs}}, \quad (4.5)$$

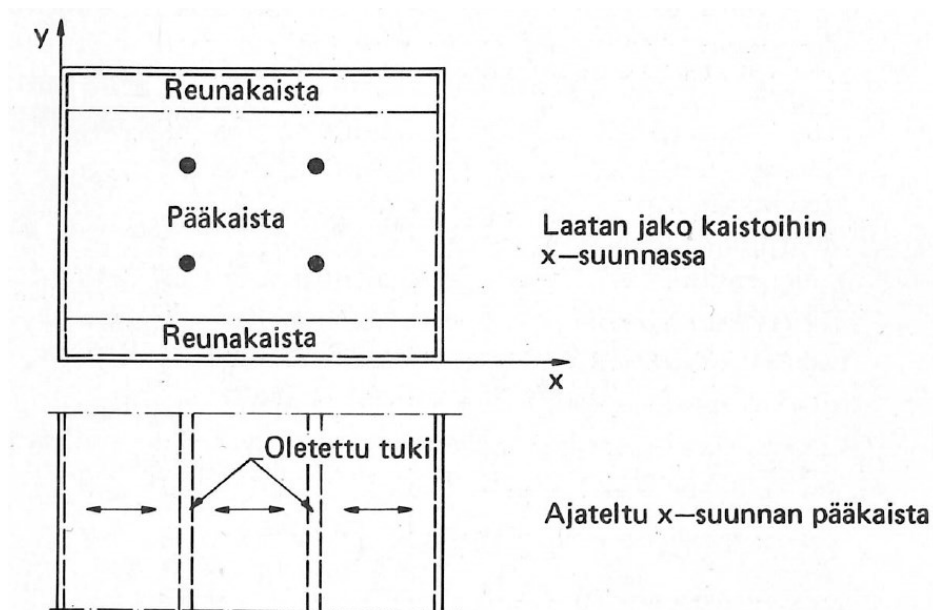
jossa m on keskikaistan taivutusmomenttien itseisarvojen summa. Mitoitusmomenttien jakauman on täytettävä ehto $0,5(1-\beta) \leq \alpha \leq 0,7$, jossa $\beta \leq 0,5$. Ehto liittyy nurkastaan tuetun elementin toimintaan ja varmistaa sen, että pilarikaistalle keskittyy enemmän raudoitusta. Soveltamisen kannalta riittää, että käytetty mitoitusmomenttien jakauma täyttää ehdon. [16, s. 30–33.]

Käytännössä pilarilaatan analyysi alkaa sillä, että laatta jaetaan osiin. Kuvassa 8 on esitetty, miten laatan ositus tehdään. Nuolten suunnista nähdään, missä suunnassa kunkin osan oletetaan toimivan. [15, s. 393.]

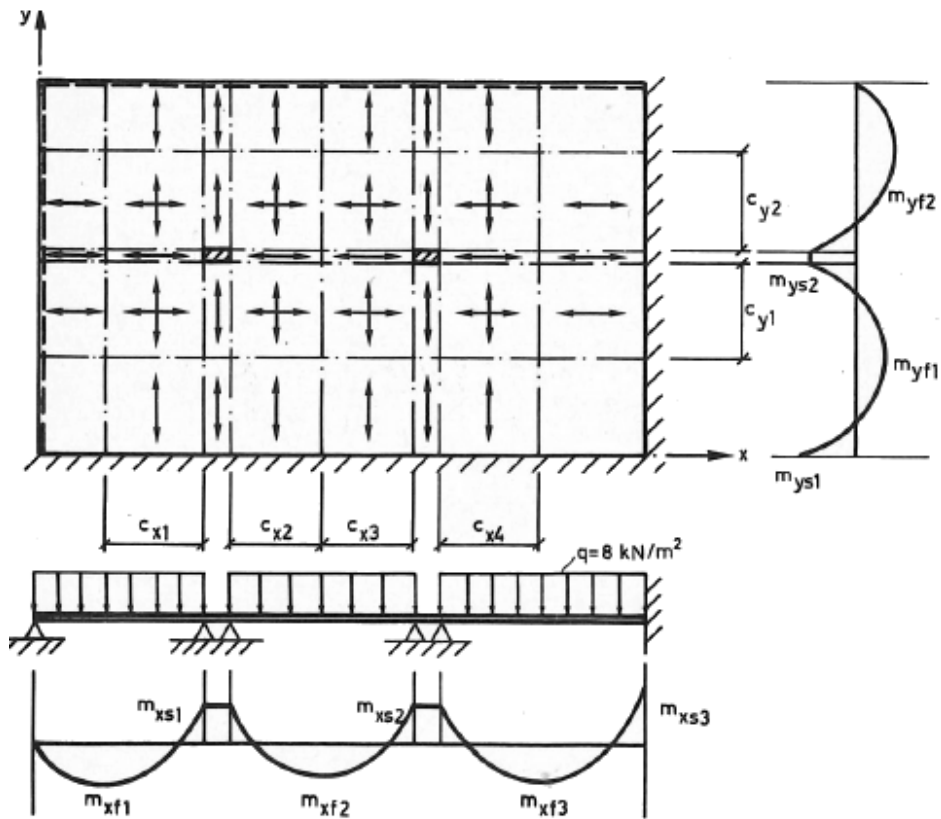


Kuva 8. Pilarilaatan jakaminen osiin [15, s. 393].

Varsinaiset mitat a_x ja a_y saadaan tarkastelemalla laatan pääkaistojen tasapainoa, kun jakoviivat ovat leikkausvoiman nolaviivoja. Pääkaista x-akselin suunnassa on määritelty kuvassa 9. Pääkaista y-akselin suunnassa määritellään vastaavalla tavalla. Pääkaistoja voidaan pitää tukien yli jatkuvana palkkina. Kuvassa 10 on havainnollistettu taivutusmomenttien jakautumista pääkaistoilla. [15, s. 393.]



Kuva 9. Pää- ja reunakaistat pilarilaatassa [15, s. 392].



Kuva 10. Palkkikaistojen momenttijakaumat, poistettu kuvasta laatan numeeriset mitat, lähteestä [17, s. 222].

Jos tiedetään tukimomentit jollakin osavälillä, esimerkiksi tukimomentit m_{xs1} ja m_{xs2} , kuten kuvassa 10 on merkitty, niin kyseistä kenttää koskeva mitta c_{x2} eli leikkausvoiman nollakohdan ja taivutusmomentin maksimikohdan etäisyys tuelta m_{xs1} saadaan laskettua lausekkeesta [16, s. 40]

$$c_{x2} = \frac{L}{2} - \frac{m_{xs1} - m_{xs2}}{p_d L}, \quad (4.6)$$

jossa

L on jänneväli,

m_{xs1} on tukimomentti tuella 1,

m_{xs2} on tukimomentti tuella 2 ja

p_d on kuormitusfunktio.

Leikkausvoiman nollakohtaa vastaava kenttämomentin arvo m_{xf2} saadaan tämän jälkeen lausekkeesta [16, s. 40]

$$m_{xf2} = \frac{p_d c_{x2}^2}{2} + m_{xs1}. \quad (4.7)$$

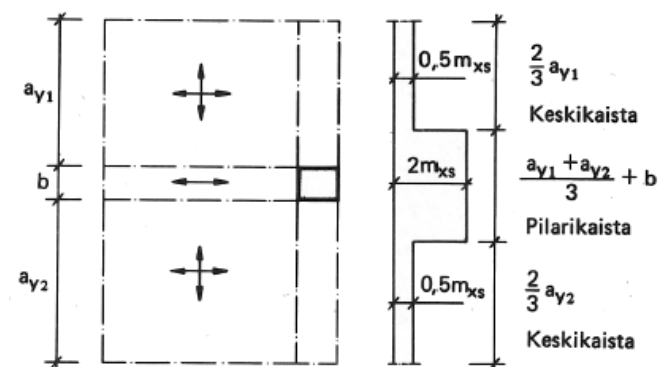
Kaavoja (4.6) ja (4.7) voidaan käyttää kaikkien jännevälien kenttämomenttien ja leikkausvoiman nollakohtien laskentaan. Taulukossa 8 on esitetty tukimomenttien suositeltavat arvot. Jos tukimomentiksi tuen eri puolilla saadaan eri arvot, käytetään tukimomenttina niiden keskiarvoa [15, s. 394].

Taulukko 8. Käytettävät tukimomentit [15, s. 394].

Tapaus	Tukimomentin arvo
1. Vastakkainen tuki kiinnitetty jäykästi	$-p_d L^2 / 16$
2. Vastakkainen tuki vapaasti tuettu	$-p_d L^2 / 10$
3. Vastakkainen tuki pilari, jonka yli laatta jatkuu	$-p_d L^2 / 14$

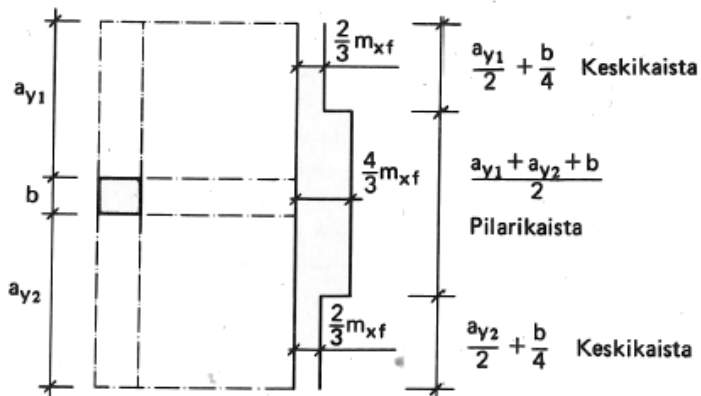
Kun on saatu määritettyä tukimomentit, kenttien mitat ja kenttämomentit, määritetään mitoitusmomenttijakaumat, joiden perusteella pääraudoitukset molempiin suuntiin lasketaan. Tätä varten pääkaista jaetaan pilari- ja keskikaistaan, joille määritetään erilaiset mitoitusmomenttien jakaumat. [15, s. 395.]

Kuvassa 11 on esitetty eräs tapa laskea tukiraidoituksen mitoitusmomentit keskimääräisen momentin m_{xs} avulla. Raudoitus mitoitetaan pilarikaistalla momentille $2m_{xs}$ ja keskikaistalla pienemmälle momentille $0,5m_{xs}$ [15, s. 396].



Kuva 11. Tukiraidoituksen mitoitusmomenttijakauma [15, s. 396].

Kuvassa 12 on puolestaan esitetty tapa jakaa kenttäraudoituksen mitoitusmomentit keskimääräisen kenttämomentin m_{xf} avulla pilari- ja keskikaistoille. Raudoitus mitoitetaan pilarikaistalla momentille $4m_{xf} / 3$ ja keskikaistalla momentille $2m_{xf} / 3$ [15, s. 396].



Kuva 12. Kenttäraudoituksen mitoitusmomenttijakauma [15, s. 396].

Pilarilaatan analyysi kaistamenetelmällä voidaan siis jakaa seuraaviin edellä läpikäytyihin vaiheisiin [15, s. 392–393]:

1. Jaetaan laatta reuna- ja pääkaistoihin.
2. Valitaan tukimomenttien arvot.
3. Jaetaan laatta osiin, joiden reunoilla leikkausvoima on nolla.
4. Lasketaan kenttämomentit.
5. Määritetään mitoitusmomentit kaistoille poikittaisessa suunnassa.

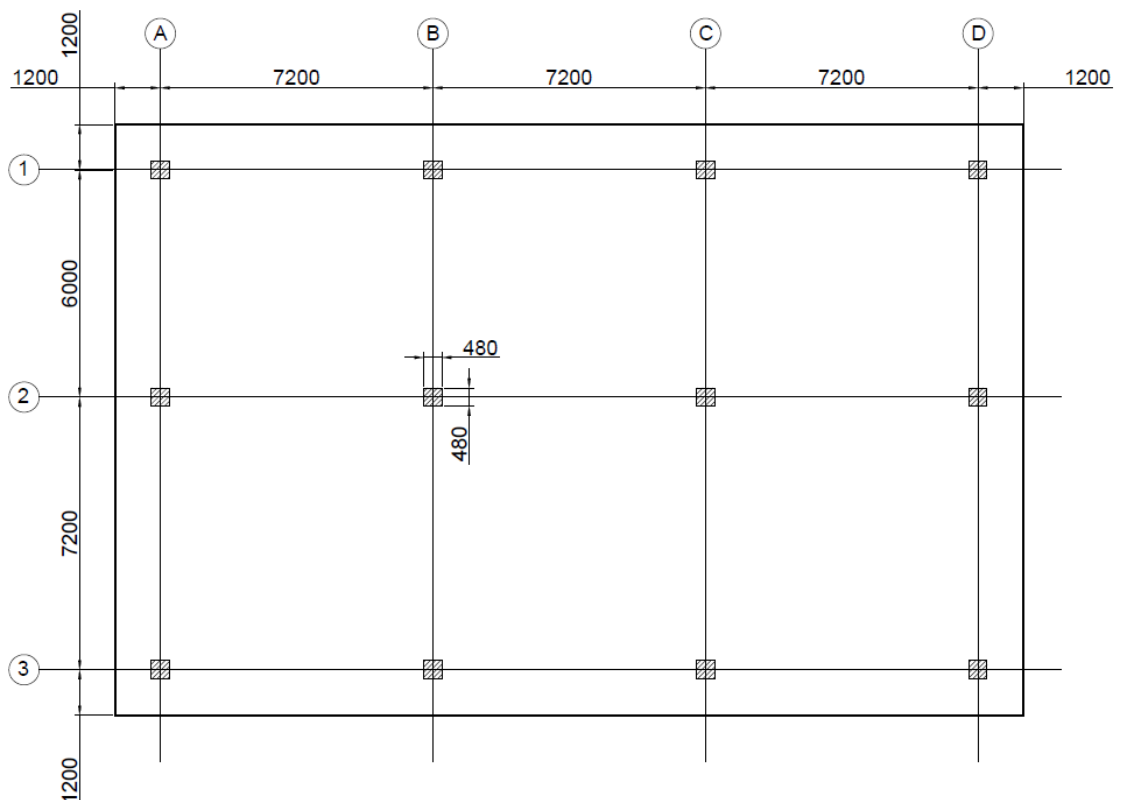
Lisätietoja kaistamenetelmän soveltamisesta erityyppisiin laattoihin on teoksessa [16]. Kaistamenetelmän teoriaa on käsitelty yksityiskohtaisesti kirjassa [17].

5. ESIMERKKITAPPAUS

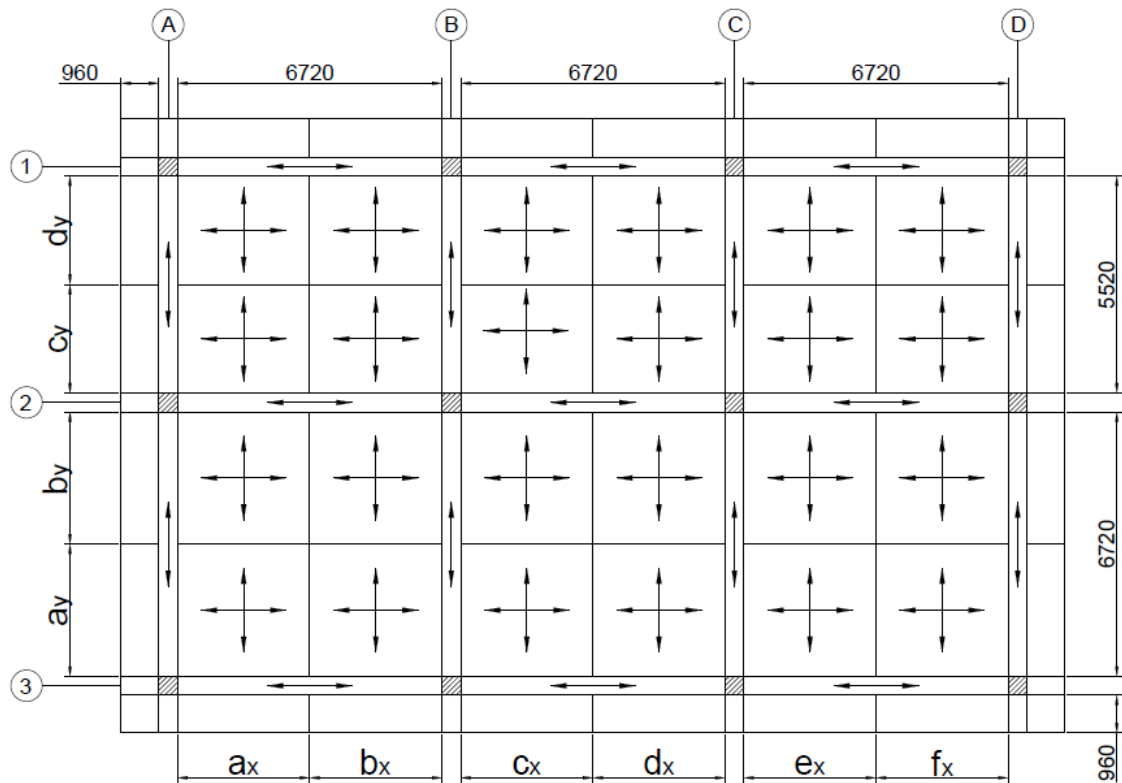
Tämän esimerkkilaskelman tarkoituksena on esitellä pilarilaatan taivutusmitoitusta kaistamenetelmän avulla. Kuva 13 esittää mitoitettavaa pilarilaattaa, joka koostuu 7200 mm x 6000 mm ja 7200 mm x 7200 mm laattaruuduista. Ruutujen sivusuhteet ovat näin ollen suositelluissa rajoissa. Laatta on toimistorakennuksen välipohjalaatta ja sen oletetaan olevan seuraamusluokan CC2 rakenne.

Laatta mitoitetaan toimistorakennuksen välipohjan hyötykuormalle, jonka ominaisarvo on $q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$. Laatan alustavaksi paksuudeksi on arvioitu 240 mm ja pilarien alustavaksi kooksi 480 mm x 480 mm.

Rakenteen rasitusluokka on sijaintinsa perusteella XC1 ja betonin lujuusluokaksi voidaan valita C20/25. Kaistamenetelmän soveltamiseksi laatta voidaan jakaa osiin edellisessä luvussa esitettyjen sääntöjen mukaisesti, esimerkiksi kuvan 14 osoittamalla tavalla.



Kuva 13. Laatan mitat.



Kuva 14. Laatan jako osiin.

Liitteessä C on esitetty esimerkkitapaukseen liittyvät mitoituslaskelmat. Esitetään seuraavaksi taulukoituna saadut tulokset.

Laattaa tarkastellaan molemmissa suunnissa erikseen. Tavoitteena on ensin määrittää taivutusmomenttien keskimääräiset jakaumat rakenteessa. Kuvassa 14 näkyvät laattakenttien mitat a_x, b_x, \dots, f_x ja a_y, b_y, \dots, d_y saadaan sen perusteella, että viivat kulkevat leikkausvoimien nollakohdassa eli taivutusmomenttien maksimikohdissa. Laskennassa valitaan ensin tukimomenteille sopivat arvot ja lasketaan tämän jälkeen edellä mainitut kenttien mitat ja keskimääräiset kenttämomentit edellisen luvun kaavoilla (4.6) ja (4.7). Tukimomenttien suuruudet valitaan edellisen luvun taulukosta 8.

Taulukoissa 9 on esitetty saadut keskimääräiset taivutusmomentit laatan eri kentissä. Arvot x-suunnassa tarkoittavat taivutusmomentteja y-akselin ympäri ja arvot y-suunnassa x-akselin ympäri. Suunnalla tarkoitetaan siis kyseisiin taivutusmomentteihin liittyvän raudituksen suuntaa.

Taulukko 9. Keskimääräiset tuki- ja kenttämomentit x - ja y -suunnassa.

x-suunta	A	A-B	B	B-C	C	C-D	D
Tukimomentit m_{xs} [kNm/m]	-4,9		-41,2		-41,2		-4,9
Kenttämomentit m_{xf} [kNm/m]		+38,4		+18,9		+38,4	

y-suunta	1	1-2	2	2-3	3
Tukimomentit m_{ys} [kNm/m]	-4,9		-33,4		-4,9
Kenttämomentit m_{yf} [kNm/m]		+22,7		+41,8	

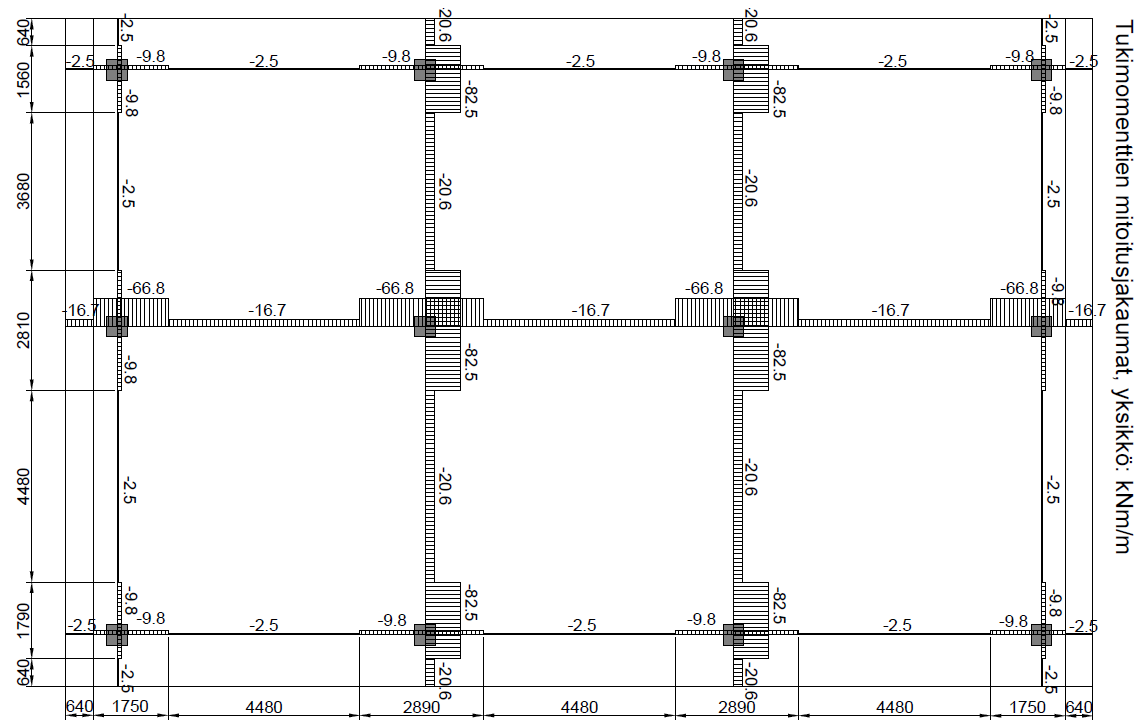
Taulukko 10. Laattakenttien mitat.

Kenttien mitat, suunta x	Kenttien mitat, suunta y
$a_x = f_x = 2850$ mm	$a_y = 2960$ mm
$b_x = e_x = 3870$ mm	$b_y = 3760$ mm
$c_x = d_x = 3360$ mm	$c_y = 3240$ mm
	$d_y = 2280$ mm

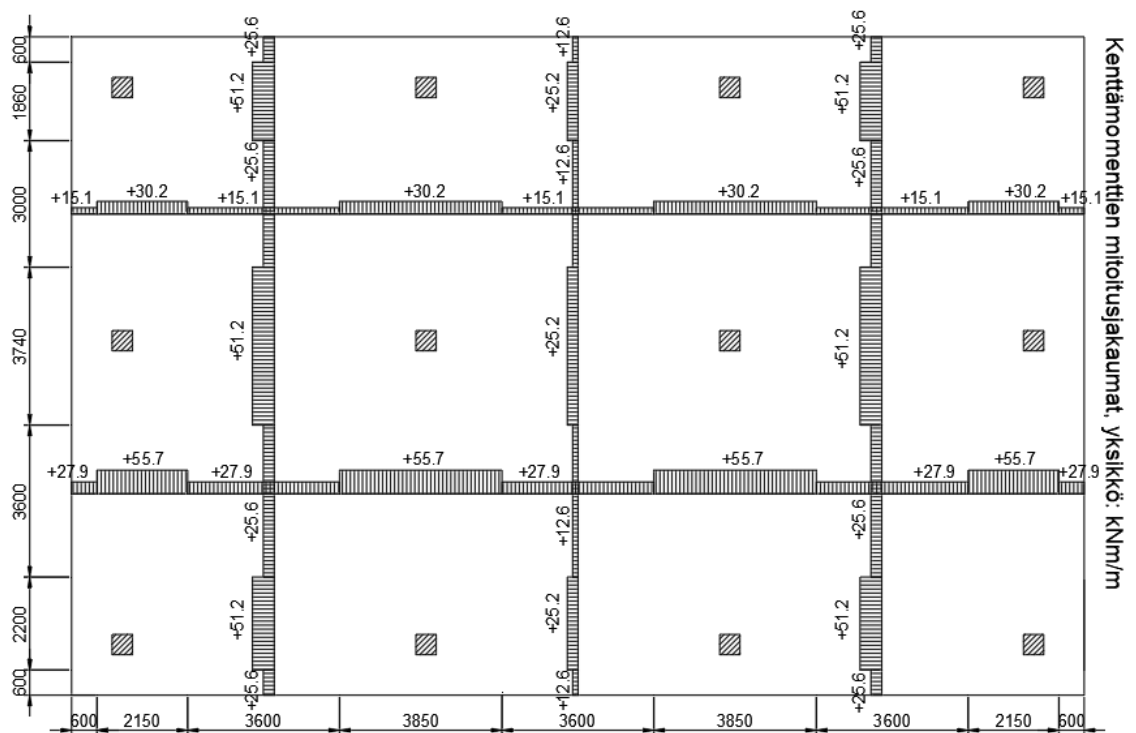
Seuraava vaihe on laskea mitoitusmomenttien jakaumat. Laskennassa käytetään edellä saatuja keskimääräisiä taivutusmomenteja ja laattakenttien mittoja. Mitoitusmomenttijakaumat lasketaan erikseen jokaisessa kentässä pilari- ja keskikaistoille, joiden korkeudet tai leveydet määräytyvät käytettävän mitoitusmomenttijakauman mukaan. Tässä esimerkissä on käytetty edellisen luvun kuvissa 11 ja 12 esitettyjä tuki- ja kenttämomenttien jakaumia. Näiden perusteella saadaan tuki- ja kenttämomenttien jakaumille erilaiset pilari- ja keskikaistat.

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty saadut tuki- ja kenttämomenttien mitoitusjakaumat sekä pilari- ja keskikaistojen mitat. Suurempi taivutusmomentin arvo liittyy aina pilarikaistaan ja pienempi keskikaistaan. Jakaumien suunnat on piirretty siten, että se osoittaa kyseiselle taivutusmomentille tulevan raudoituksen suunnan.

Pääraudoitus lasketaan tämän jälkeen mitoitusjakaumien mukaisesti molemmille raudoitussuunnille. Raudoituksen ulottumista on EC 2:ssa omat sääntönsä ja näiden mukaan määräytyy, miten pitkälle kenttä- ja tukiraidoituksut ulotetaan. Liitteessä C on laskettu malliksi suurinta tukimomenttia vastaava pääraudoituksen määrä.

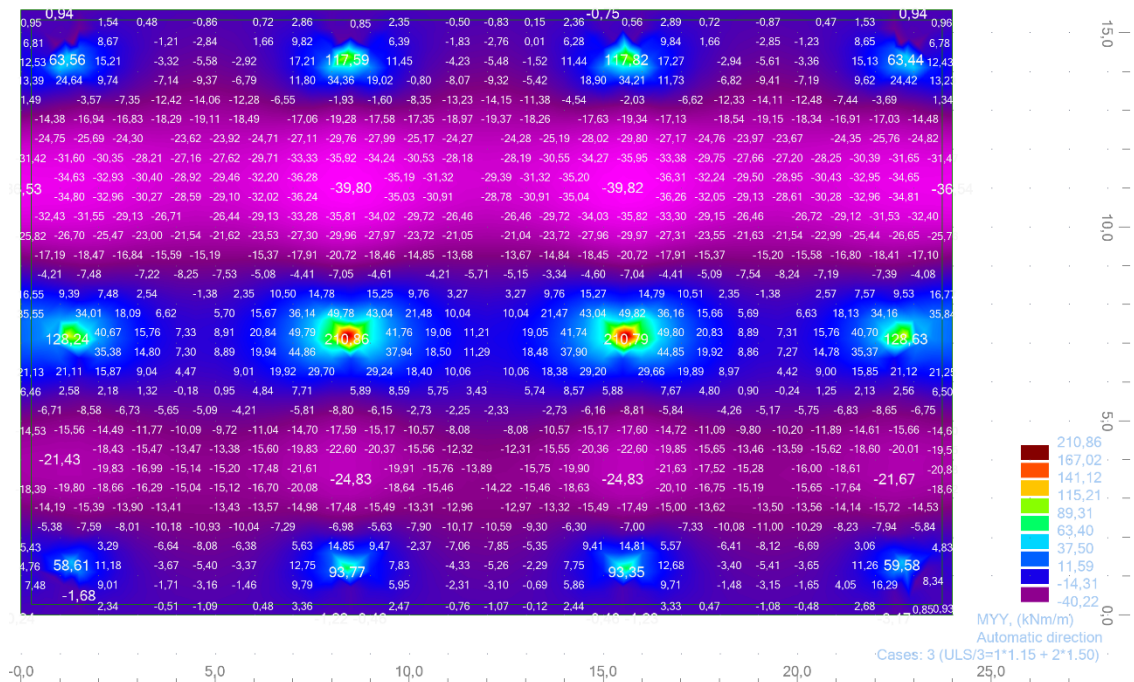


Kuva 15. Tukimomenttien mitoitusjakaumat.



Kuva 16. Kenttämomenttien mitoitusjakaumat.

Kuvassa 17 on vertailun vuoksi esitetty laatan taivutusmomentit y-akselin ympäri Auto-desk Robot Structural Analysis -ohjelmalla laskettuna. Laatta on kuvassa ylösalaisin eli pystysuunnassa suurempi jänneväli on ylempi jänneväleistä. Elementtimenetelmäpohjainen analyysi on tehty lineaarisena staattisena analyysinä. Kuvasta voidaan todeta, että pilarien kohdille näyttää muodostuvan suuret jännityskeskittymät. Kuvaavampia ovat arvot, joita saadaan pilarien lähiympäristön ulkopuolella. Todellisuudessa jännitys jakautuu pilareiden kohdalla suuremmalle alueelle kuin mitä analyysissä oletetaan, joten rauditus voidaan mitoittaa pienemmälle taivutusmomentille kuin kuva antaa ymmärtää.



Kuva 17. Esimerkkilaskelman laatan taivutusmomentit y-akselin ympäri.

Kun vertaillaan esimerkiksi kenttämomenteja y-akselin ympäri, huomataan että tulokset ovat samansuuntaisia. Pienemmässä 6,0 m jännevälin kentässä suurimmat taivutusmomentit ovat FEMin mukaan noin 25 kNm/m keskittyen pilarikaistoille. Kaistamenetelmän mukaan on raudoitusten mitoitusmomenteiksi vastaavalle pilarikaistalle saatu noin 30 kNm/m. Keskikaistojen momentiksi on kaistamenetelmällä saatu noin 15 kNm/m, joka vastaa elementtimenetelmän mukaisia arvoja hyvin.

Jos taas tarkastellaan pidemmän jännevälin 7,2 m mukaisia kenttämomenteja jälleen y-akselin ympäri, on FEMillä saatu pilarikaistoille arvoksi noin 40 kNm/m ja keskikaistojen alueelle noin 30 kNm/m. Kaistamenetelmän mukaiset mitoitusarvot ovat noin 55 kNm/m ja 28 kNm/m.

Kuvia tarkastelemalla voidaan todeta, että myös tukimomenttien jakaumat ovat samankaltaiset, kun tarkastellaan tilannetta pilarien kohdan ulkopuolella. Näin ollen vaikuttaa siltä, että tulokset tukevat toisiaan.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä on tarkasteltu pilarilaattaa monelta eri kannalta. Aluksi käsiteltiin sitä, millainen rakenneratkaisu pilarilaatta on. Vaikka pilarilaatalla voidaan periaatteessa toteuttaa monipuolisesti erilaisia rakennusrunkoja, on kuitenkin tehokkainta sekä aikataulun että kustannusten kannalta, jos suositaan geometrialtaan toistuvia ja yksinkertaisia ratkaisuja.

Eurokoodit asettavat pilarilaatan analyysille ja raudoitukselle vaatimuksia, joiden pitää toteutua. Osa säännöistä koskee kaikkia teräsbetonilaattoja, osa pelkästään pilarilaattoja. Näistä säännöistä osa on velvoittavia, osa opastavia. Eurokoodit muodostavat laajan kokonaisuuden, eikä ole välttämättä helppoa käsittää, mitkä säännöt koskevat minkäkin rakenteen mitoittamista ja mitkä eivät.

Kaistamenetelmän käyttö on sallittu eurokoodin SFS-EN 1991-1-1 (EC2) opastavassa liitteessä I, mutta juuri mitään muuta tietoa ei sen soveltamisesta ole annettu. Toisaalta EC 2:ssa vaaditaan, että raudoituksen järjestelyn tulee noudattaa toimintaa käyttötilassa. Tämän takia kaistamenetelmässä on käytettävä mitoitusmomenttijakaumia, joissa raudoitus keskittyy pilarikaistoille. On kuitenkin huomattava, että kaistamenetelmä on plastinen laattojen mitoitusmenetelmä ja näin ollen sen tarkoitus on varmistaa, että rakenteella on riittävä varmuus murtumista vastaan murtorajatilassa. Tarvittaessa on käyttörajatilan taipuma- ja halkeamatarkistuksissa käytettävä muita menetelmiä kaistamenetelmän lisäksi.

Vaikka tässä kandidaatintyössä ei tarkasteltu lävistysmitoitusta, täytyy lävistyskapasiteetti pilarilaatan mitoituksessa aina tarkistaa taiputusmitoituksen lisäksi. Momentinsiirto laatan ja pilarin välillä täytyy myös ottaa huomioon, vaikka kaistamenetelmän mukaisessa rakenneanalyysissä reunapilari oletettiin esimerkkilaskelmassa yläpäästään momenttivapaasti tuetuksi.

Rakenneanalyysin kulku kaistamenetelmällä on periaatteessa selkeä. Kuitenkin erilaisia taiputusmomenteja saadaan paljon. Pilari- ja keskikaistojen leveydet ja korkeudet myös vaihtelevat eri kentissä ja ovat erilaisia tuki- ja kenttämomenteille. Tämän takia saadaan menetelmän tuloksena vaihtelevat mitoitusmomenttijakaumat eri alueiden raudoituksille. Raudoituksen mitoituksessa on tästä syystä tärkeää järkeistää laatalle tuleva raudoitus ja tarvittaessa käyttää suurempia yhtenäisiä raudoitusalueita.

Toisaalta kaistamenetelmällä saadaan suoraan määritettyä mitoitusmomentit laatan eri alueille. Muilla menetelmillä ei välttämättä saada selville käyttökelpoisia mitoitusmomenttien jakaumia tai saadaan vain yksittäinen arvo, jonka perusteella koko laatan raudoitus on määritettävä. Tämä johtaa suureen määrään raudoitusta myös laatan vähemmän taiputetuilla osilla, joilla riittäisi pienempikin määrä.

Kaistamenetelmä on plastisuusteorian alarajalauseen mukainen menetelmä, joten periaatteessa sillä saatavat ratkaisut ovat varmalla puolella. Betonirakenteella täytyy kuitenkin olla riittävä sitkeys ja muodonmuutoskyky, jotta plastisuusteorian mukainen jännitysjaakauma voi murtorajatilassa kehittyä ennen rakenteen murtumista. Jos murtuminen tapahtuu aiemmin kuin on mitoituksessa oletettu, on varmuus murtumista vastaan murtorajatilassa pienempi kuin sen pitäisi olla.

Esimerkkilaskelman lopussa kaistamenetelmällä saatuja tuloksia verrattiin lyhyesti Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelman antamiin tuloksiin. Tarkasteltavana olivat taivutusmomentit pysty akselin suhteen. Kuvia vertailemalla todettiin, että tulokset tukevat toisiaan. Kuvista nähdään myös selkeästi, että suurimmat taivutusmomentit todella keskittyvät pilarikaistoille. Koska käytettiin lineaarisesti staattista analyysiä, pitäisi ohjelman tuloksien myös kuvata hyvin momenttien jakautumista käyttötilassa. Voidaan siis todeta, että kaistamenetelmässä valittu mitoitusmomenttijakauma on myös käyttötilan kannalta järkevä ainakin esimerkkilaskelman tapauksessa.

Epäsäännöllisen muotoisten tai aukkoja sisältävien laattojen mitoitusta ei käsitelty työssä lainkaan. Varsinkin erilaiset aukot ovat kuitenkin tavallisia välipohjalaatoissa, joten myös niihin liittyvät asiat olisivat olennaisia pilarilaatan suunnittelussa. Aiheesta kiinnostunut lukija voi tutustua lähteeseen [16], jossa käsitellään laajasti kaistamenetelmän soveltamista erilaisiin laattoihin. Ruotsinkielisessä teoksessa [17] puolestaan on käsitelty kaistamenetelmän teoriaa ja siitä on saatavilla myös englanninkielinen käännös *Strip Method of Design* (1975).

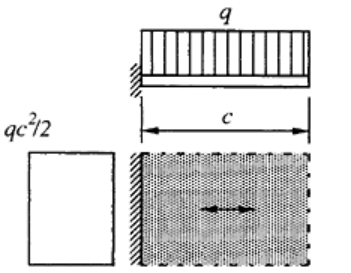
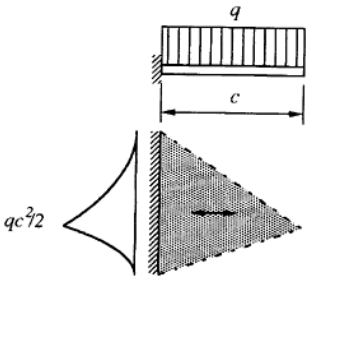
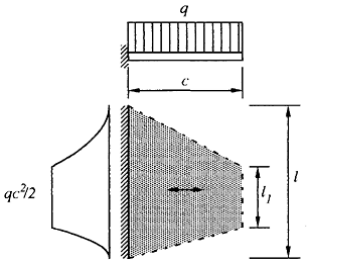
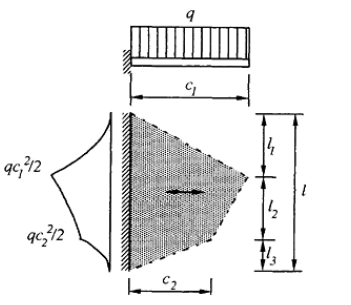
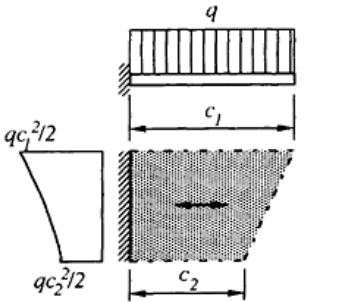
LÄHTEET

- [1] Teräsbetonirakenteet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, RIL 125, 1986, 438 s.
- [2] Paikallavaletut betonirunkorakenteet, Rakennustietosäätiö, RT 82-10814, 2004, 15 s.
- [3] Pilarilaattaohje, Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestö ry, Helsinki, 1989, 119 s.
- [4] BY 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, Suomen betoniyhdistys ry, Helsinki, 2008, 711 s.
- [5] About the EN Eurocodes, Joint Research Centre, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2018): <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=1>.
- [6] EN Eurocode Parts, Joint Research Centre, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.11.2018): <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=13>.
- [7] Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet, Suomen standardoimisliitto, SFS-EN 1990 + A1 + AC, Helsinki, 2006, 186 s.
- [8] Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, omat paino ja rakennusten hyötykuormat, Suomen standardisoimisliitto, SFS-ISO 1991-1-1 + AC, Helsinki, 2002, 73 s.
- [9] Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto, SFS-ISO 1992-1-1 + A1 + AC, Helsinki, 2015, 220 s.
- [10] BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – Osa 1, Suomen betoniyhdistys ry, Helsinki, 2013, 251 s.
- [11] Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Betonirakenteet, Ympäristöministeriö, 2016, 35 s. Saatavissa (viitattu 17.12.2018): <http://www.ym.fi/download/noname/%7B3F5DE241-F74B-4EA0-9F0E-18B81A7C0EC3%7D/125119>.
- [12] Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus, Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet, Ympäristöministeriö, 2016, 24 s. Saatavissa (viitattu 20.11.2018): <http://www.ym.fi/download/noname/%7BC352472F-E7C4-4653-BF44-1AB47FB50CB0%7D/137127>.

- [13] Ympäristöministeriön asetus rakenteiden tilavuuspainoa, omaa painoa ja rakennusten hyötykuormia koskevista kansallisista valinnoista sovellettaessa standardia SFS-EN 1991-1-1, A 1.1.2017/4/16, 2017. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/700001/42822>.
- [14] BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – Osa 2, Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 2015, 215 s.
- [15] BY 202 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – Osa 2, Suomen betoni-yhdistys ry, Helsinki, 1983, 225 s.
- [16] A. Hillerborg, Strip Method Design Handbook, E & FN Spon, London, 1996, 302 p.
- [17] A. Hillerborg, Dimensionering av armerade betongplattor enligt strimlemetoden, Almqvist & Wiksell, Stockholm, 1974, 327 s.

LIITE A: YLEISIMPIÄ YKSISUUNTAISIA LAATTAELEMENTTEJÄ

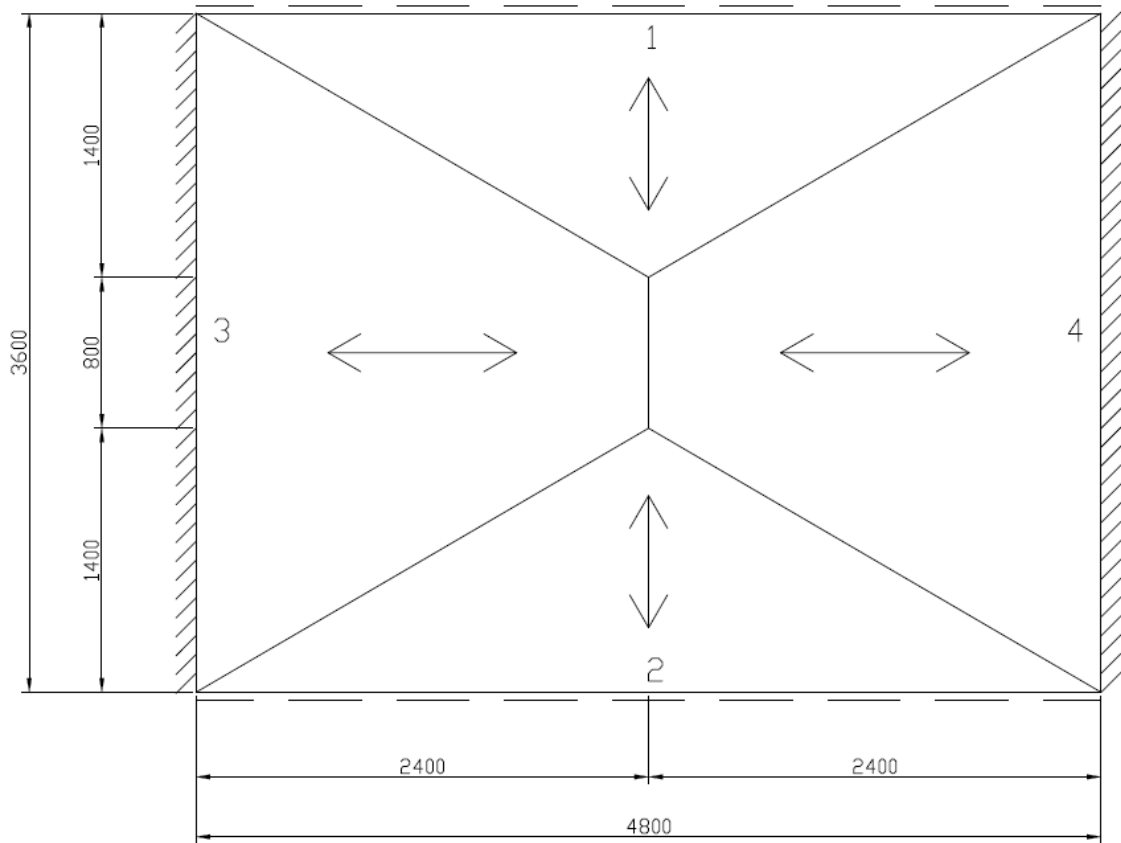
Taivutusmomentit etumerkkeineen, tukimomentit $m_{xs} < 0$.

<p>1</p>		<p>Suorakulmioelementti</p> $m_{xf} - m_{xs} = \frac{qc^2}{2}$
<p>2</p>		<p>Kolmioelementti</p> $m_{xf} - m_{xs} = \frac{qc^2}{6}$
<p>3</p>		<p>Puolisuunnikaselementti 1</p> $m_{xf} - m_{xs} = \frac{qc^2(l + 2l_1)}{6l}$
<p>4</p>		<p>Monikulmioelementti</p> $m_{xf} - m_{xs} = \frac{q}{6l}(c_1^2 l_1 + (c_1^2 + c_1 c_2 + c_2^2) l_2 + c_2^2 l_3)$
<p>5</p>		<p>Puolisuunnikaselementti 2</p> $m_{xf} - m_{xs} = \frac{q}{6}(c_1^2 + c_1 c_2 + c_2^2)$

Kuvat ja niihin liittyvät kaavat ovat teoksesta A. Hillerborg: Strip Method Design Handbook, E. & F.N. Spon, 1996, lähteissä [16].

LIITE B: ESIMERKKI SEINIIN TUETUSTA LAATASTA

Kuvassa esitetty laatta on jaettu laattaelementteihin 1, 2, 3 ja 4 edellä esitetyn mukaisesti. Oletetaan, että laatta mitoitetaan tasaiselle kuormalle $q = 4,5 \text{ kN/m}^2$. Seuraavissa laskelmissa esiintyvien taivutusmomenttien yksikkö on kNm/m .



Liitteestä A saadaan kyseisten kolmio- ja puolisuunnikkaselementtien alueen keskimääräiset taivutusmomentit:

$$m_{3, \text{ kenttä}} - m_{3, \text{ tuki}} = \frac{4,5 \cdot 2,4^2 (3,6 + 2 \cdot 0,8)}{6 \cdot 3,6} = 6,24$$

$$m_{4, \text{ kenttä}} - m_{4, \text{ tuki}} = \frac{4,5 \cdot 2,4^2 (3,6 + 2 \cdot 0,8)}{6 \cdot 3,6} = 6,24$$

$$m_{1, \text{ kenttä}} = m_{2, \text{ kenttä}} = \frac{4,5 \cdot 1,4^2}{6} = 1,47$$

Valitaan seuraavat keskimääräiset taivutusmomenttien arvot:

$$m_{3, \text{ kenttä}} = m_{4, \text{ kenttä}} = 2,00$$

$$m_{3, \text{ tuki}} = m_{4, \text{ tuki}} = -4,12$$

Tuki- ja kenttämomenttien suhteeksi tulee noin 2. Jos määritellään kaksiosaiset poikittaiset mitoitusmomentit ja valitaan suuremman mitoitusmomenttialueen pituudeksi 2,0 m pystysuunnassa ja 2,4 m vaakasuunnassa sekä suuremman mitoitusmomentin olevan kaksinkertainen pienempään nähden, saadaan mitoitusmomenteiksi

$$m_{y, \text{ tuki, isompi}} = \frac{-4,12}{\frac{2,0}{3,6} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2,0}{3,6}\right)} = -5,3$$

$$m_{y, \text{ tuki, pienempi}} = \frac{-5,3}{2} = -2,65$$

$$m_{y, \text{ kenttä, isompi}} = \frac{2,00}{\frac{2,0}{3,6} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2,0}{3,6}\right)} = 2,6$$

$$m_{y, \text{ kenttä, pienempi}} = \frac{2,6}{2} = 1,3$$

$$m_{x, \text{ kenttä, isompi}} = \frac{1,47}{\frac{2,4}{4,8} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2,4}{4,8}\right)} = 2,0$$

$$m_{x, \text{ kenttä, pienempi}} = \frac{2,0}{2} = 1,0$$

LIITE C: ESIMERKKITAPAUKSEN MITOITUSLASKELMAT

VÄLIPOHJALAATTA

RAKENNEANALYYSI PÄÄRAUDOITUSTA VARTEN

Lähtötiedot

Seuraamusluokka: CC2
 Rasitusluokka: XC1
 Suunniteltu käyttöikä: 100 vuotta
 Betonin lujuusluokka: C20/25

Kuormakerroin: $K_{FI} := 1.0$
 Betonin osavarmuusluku: $\gamma_c := 1.50$
 Teräksen osavarmuusluku: $\gamma_s := 1.15$

Laatan paksuus: $h := 0.24 \text{ m}$

Laatan oma paino: $g_k := h \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 6.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Hyötykuorma: $q_k := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Suojabetonin paksuudet:

(tartunta) $c_{min.b} := 12 \text{ mm}$

(ympäristörasitus) $c_{min.dur} := 10 \text{ mm}$

$c_{min} := \max(c_{min.b}, c_{min.dur}, 10 \text{ mm}) = 12.00 \text{ mm}$

(mittapoikkeama) $\Delta c_{dev} := 10 \text{ mm}$

(nimellisarvo) $c_{nom} := c_{min} + \Delta c_{dev} = 22.00 \text{ mm}$

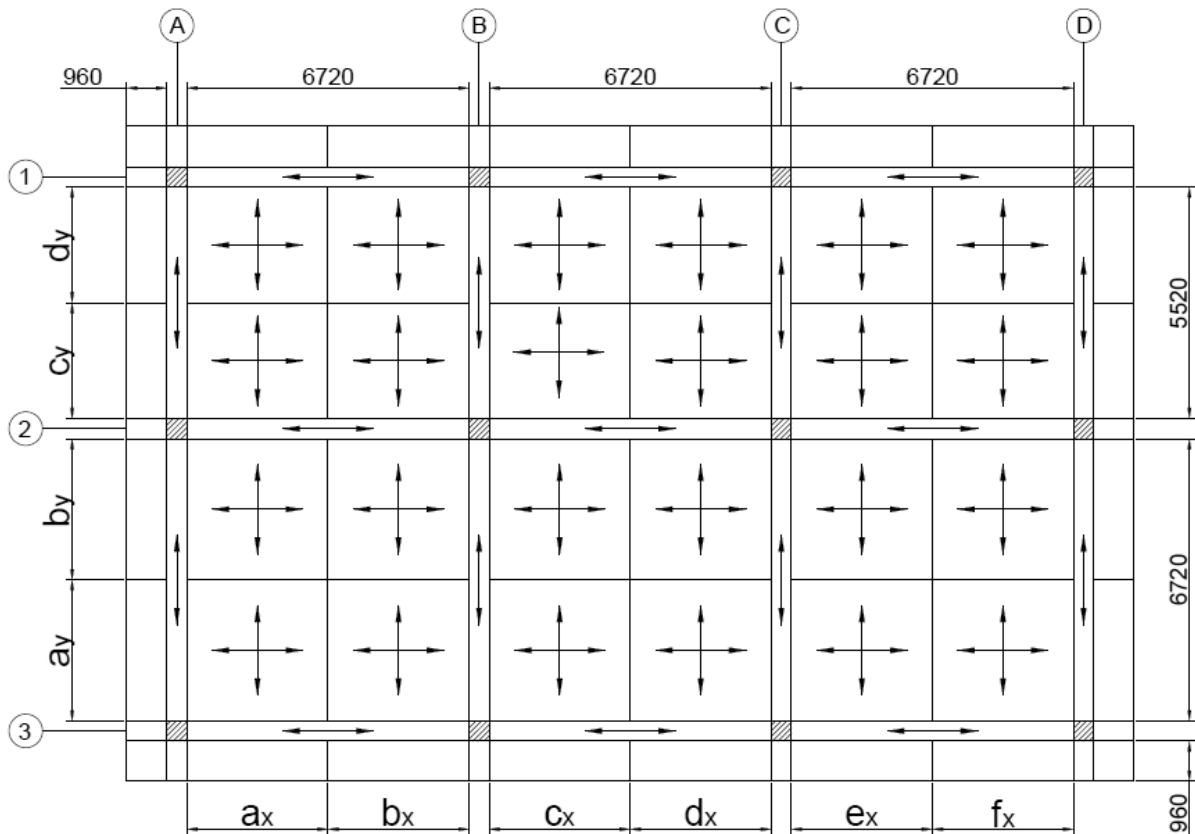
Kuormitusyhdistelmät (STR):

$p_{d.1} := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot g_k + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot q_k = 10.65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

$p_{d.2} := 1.35 \cdot K_{FI} \cdot g_k = 8.10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Valitaan mitoituskuormaksi:

$p_d := \max(p_{d.1}, p_{d.2}) = 10.65 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$



Kuva. Laatan jako osiin ja mitat.

Määritetään laatalle keskimääräiset taivutusmomentit x-suunnassa ja y-suunnassa kaistamenetelmällä.

Laatan mitat:

$$\begin{aligned}
 L_{u1oke} &:= 0.96 \text{ m} & L_{x,AB} &:= 6.72 \text{ m} & L_{y,12} &:= 5.52 \text{ m} \\
 & & L_{x,BC} &:= 6.72 \text{ m} & L_{y,23} &:= 6.72 \text{ m} \\
 & & L_{x,CD} &:= 6.72 \text{ m} & b_p &:= 0.48 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Keskim. taivutusmomentit x-suunnassa

- Tukimomentit:

$$m_A := -\frac{P_d \cdot L_{u1oke}^2}{2} = -4.91 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_B := -\frac{1}{2} \left(\frac{P_d \cdot L_{x,AB}^2}{10} + \frac{P_d \cdot L_{x,BC}^2}{14} \right) = -41.22 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_C := -\frac{1}{2} \left(\frac{p_d \cdot L_{x.BC}^2}{14} + \frac{p_d \cdot L_{x.CD}^2}{10} \right) = -41.22 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_D := -\frac{p_d \cdot L_{uuloke}^2}{2} = -4.91 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- **Kenttien mitat:**

$$a_x := \frac{L_{x.AB}}{2} + \frac{-m_A + m_B}{p_d \cdot L_{x.AB}} = 2.85 \text{ m}$$

$$b_x := L_{x.AB} - a_x = 3.87 \text{ m}$$

$$c_x := \frac{L_{x.BC}}{2} + \frac{-m_B + m_C}{p_d \cdot L_{x.BC}} = 3.36 \text{ m}$$

$$d_x := L_{x.BC} - c_x = 3.36 \text{ m}$$

$$e_x := \frac{L_{x.CD}}{2} + \frac{-m_C + m_D}{p_d \cdot L_{x.CD}} = 3.87 \text{ m}$$

$$f_x := L_{x.CD} - e_x = 2.85 \text{ m}$$

- **Kenttämomentit:**

$$m_{AB} := \frac{p_d \cdot a_x^2}{2} + m_A = 38.42 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_{BC} := \frac{p_d \cdot c_x^2}{2} + m_B = 18.89 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_{CD} := \frac{p_d \cdot e_x^2}{2} + m_C = 38.42 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Keskim. taivutusmomentit y-suunnassa

- **Tukimomentit:**

$$m_1 := -\frac{p_d \cdot L_{uuloke}^2}{2} = -4.91 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_2 := -\frac{1}{2} \left(\frac{p_d \cdot L_{y.12}^2}{10} + \frac{p_d \cdot L_{y.23}^2}{14} \right) = -33.40 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_3 := -\frac{p_d \cdot L_{uloke}^2}{2} = -4.91 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- **Kenttien mitat:**

$$d_y := \frac{L_{y.12}}{2} + \frac{-m_1 + m_2}{p_d \cdot L_{y.12}} = 2.28 \text{ m}$$

$$c_y := L_{y.12} - d_y = 3.24 \text{ m}$$

$$b_y := \frac{L_{y.23}}{2} + \frac{-m_2 + m_3}{p_d \cdot L_{y.23}} = 3.76 \text{ m}$$

$$a_y := L_{y.23} - b_y = 2.96 \text{ m}$$

- **Kenttämomentit:**

$$m_{12} := \frac{p_d \cdot d_y^2}{2} + m_1 = 22.66 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_{23} := \frac{p_d \cdot b_y^2}{2} + m_2 = 41.81 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

MITOITUSMOMENTTIJAKAUMAT

Kenttämomenttien mitoitusarvot:

- **Kenttä AB**

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{AB.P} := \frac{4}{3} m_{AB} = 51.23 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{AB.K} := \frac{2}{3} m_{AB} = 25.62 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- **Kenttä BC**

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{BC.P} := \frac{4}{3} m_{BC} = 25.19 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{BC.K} := \frac{2}{3} m_{BC} = 12.60 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- **Kenttä CD**

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{CD.P} := \frac{4}{3} m_{CD} = 51.23 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{CD.K} := \frac{2}{3} m_{CD} = 25.62 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- Kenttä 12

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{12.P} := \frac{4}{3} m_{12} = 30.21 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{12.K} := \frac{2}{3} m_{12} = 15.11 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

- Kenttä 23

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{23.P} := \frac{4}{3} m_{23} = 55.74 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{23.K} := \frac{2}{3} m_{23} = 27.87 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

Tukimomenttien mitoitusarvot:**- Tukilinja A**

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{A.P} := 2 m_A = -9.82 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{A.K} := 0.5 m_A = -2.45 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

- Tukilinja B

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{B.P} := 2 m_B = -82.45 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{B.K} := 0.5 m_B = -20.61 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

- Tukilinja C

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{C.P} := 2 m_C = -82.45 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{C.K} := 0.5 m_C = -20.61 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

- Tukilinja D

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{D.P} := 2 m_D = -9.82 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{D.K} := 0.5 m_D = -2.45 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

- Tukilinja 1

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{1.P} := 2 m_1 = -9.82 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{1.K} := 0.5 m_1 = -2.45 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

- Tukilinja 2

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{2,P} := 2 \quad m_2 = -66.80 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{2,K} := 0.5 \quad m_2 = -16.70 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

- Tukilinja 3

$$\text{Pilarikaistalla: } m_{3,P} := 2 \quad m_3 = -9.82 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{Keskikaistalla: } m_{3,K} := 0.5 \quad m_3 = -2.45 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

PILARI- JA KESKIKAIKISTOJEN KORKEUDET JA LEVEYDET

A. Kenttämomenttien X-suuntaisten kaistojen korkeudet ylhäältä luettuna:

$$b_{1,y} := \frac{1}{2} L_{uloke} + \frac{1}{4} b_P = 0.60 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{2,y} := \frac{1}{2} L_{uloke} + b_P + d_y = 3.24 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{3,y} := \frac{1}{2} d_y + \frac{1}{4} b_P = 1.26 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{4,y} := \frac{1}{2} c_y + \frac{1}{4} b_P = 1.74 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{5,y} := \frac{1}{2} (c_y + b_P + b_y) = 3.74 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{6,y} := \frac{1}{2} b_y + \frac{1}{4} b_P = 2.00 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{7,y} := \frac{1}{2} a_y + \frac{1}{4} b_P = 1.60 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{8,y} := \frac{1}{2} (a_y + b_P + L_{uloke}) = 2.20 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{9,y} := \frac{1}{2} L_{uloke} + \frac{1}{4} b_P = 0.60 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

B. Tukimomenttien X-suuntaisten kaistojen korkeudet ylhäältä luettuna:

$$b_{11.y} := \frac{2}{3} L_{uloke} = 0.64 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{21.y} := \frac{1}{3} (L_{uloke} + d_y) + b_P = 1.56 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{31.y} := \frac{2}{3} d_y = 1.52 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{41.y} := \frac{2}{3} c_y = 2.16 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{51.y} := \frac{1}{3} (c_y + b_y) + b_P = 2.81 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{61.y} := \frac{2}{3} b_y = 2.51 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{71.y} := \frac{2}{3} a_y = 1.97 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{81.y} := \frac{1}{3} (a_y + L_{uloke}) + b_P = 1.79 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{91.y} := \frac{2}{3} L_{uloke} = 0.64 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

C. Kenttämomenttien Y-suuntaisten kaistojen leveydet vasemmalta luettuna:

$$b_{1.x} := \frac{1}{2} L_{uloke} + \frac{1}{4} b_P = 0.60 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{2.x} := \frac{1}{2} (L_{uloke} + b_P + a_x) = 2.15 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{3.x} := \frac{1}{2} a_x + \frac{1}{4} b_P = 1.55 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{4.x} := \frac{1}{2} b_x + \frac{1}{4} b_P = 2.05 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{5.x} := \frac{1}{2} (b_x + b_P + c_x) = 3.85 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{6.x} := \frac{1}{2} c_x + \frac{1}{4} b_P = 1.80 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{7.x} := \frac{1}{2} d_x + \frac{1}{4} b_P = 1.80 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{8.x} := \frac{1}{2} (d_x + b_P + e_x) = 3.85 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{9.x} := \frac{1}{2} e_x + \frac{1}{4} b_P = 2.05 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{10.x} := \frac{1}{2} f_x + \frac{1}{4} b_P = 1.55 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{11.x} := \frac{1}{2} (f_x + b_P + L_{uloke}) = 2.15 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{12.x} := \frac{1}{2} L_{uloke} + \frac{1}{4} b_P = 0.60 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

D. Tukimomenttien Y-suuntaisten kaistojen leveydet vasemmalta luettuna:

$$b_{11.x} := \frac{2}{3} L_{uloke} = 0.64 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{21.x} := \frac{1}{3} (L_{uloke} + a_x) + b_P = 1.75 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{31.x} := \frac{2}{3} a_x = 1.90 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{41.x} := \frac{2}{3} b_x = 2.58 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{51.x} := \frac{1}{3} (b_x + c_x) + b_P = 2.89 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{61.x} := \frac{2}{3} c_x = 2.24 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{71.x} := \frac{2}{3} d_x = 2.24 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{81.x} := \frac{1}{3} (d_x + e_x) + b_P = 2.89 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{91.x} := \frac{2}{3} e_x = 2.58 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{101.x} := \frac{2}{3} f_x = 1.90 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

$$b_{111.x} := \frac{1}{3} (f_x + L_{uloke}) + b_p = 1.75 \text{ m} \quad (\text{Pilarikaista})$$

$$b_{121.x} := \frac{2}{3} L_{uloke} = 0.64 \text{ m} \quad (\text{Keskikaista})$$

TAIVUTUSMITOITUS SUURIMALLE TUKIMOMENTILLE

- Suurin tukimomentin mitoitusarvo on määritetty pilarilinjojen B ja C pilarikaistoille:

$$m_{B.P} = -82.45 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$m_{C.P} = -82.45 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Betonin lujuusluokka: C20/25 $f_{ck} := 20 \text{ MPa}$

$$\alpha_{cc} := 0.85 \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 11.33 \text{ MPa}$$

$$\eta := 1.0 \quad f_{ctm} := 2.2 \text{ MPa}$$

Raudoitus: B500A $f_{yk} := 500 \text{ MPa}$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.78 \text{ MPa}$$

Laatan paksuus: $h = 240.00 \text{ mm}$

Betonipeitteen
nimellisarvo: $c_{nom} = 22.00 \text{ mm}$

Tukilinja B / C: Pilarikaista

Arvioitu
tankopaksuus: $D := 12 \text{ mm}$

Tehollinen korkeus: $d := h - c_{nom} - \frac{1.1 \cdot D}{2} = 211.40 \text{ mm}$

Mitoitusmomentti: $m_{Ed} := |m_{B.P}| = 82.45 \frac{\mathbf{kN \cdot m}}{\mathbf{m}}$

Suhteellinen momentti: $\mu := \frac{m_{Ed}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot d^2} = 0.16$

Puristusvyöhykkeen
suhteellinen korkeus: $\beta := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} = 0.18$ $\beta_b := 0.493$

Mekaaninen
raudoitussuhde: $\omega := \beta$

$$A_{s.vaadittu} := \omega \cdot d \cdot \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = 985.05 \frac{\mathbf{mm}^2}{\mathbf{m}}$$

Vähimmäisraudoitus: $A_{s.min.1} := 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d = 241.84 \frac{\mathbf{mm}^2}{\mathbf{m}}$

$$A_{s.min.2} := 0.0013 \cdot d = 274.82 \frac{\mathbf{mm}^2}{\mathbf{m}}$$

$$A_{s.min} := \max(A_{s.min.1}, A_{s.min.2}) = 274.82 \frac{\mathbf{mm}^2}{\mathbf{m}}$$

$$A_s := \max(A_{s.vaadittu}, A_{s.min}) = 985.05 \frac{\mathbf{mm}^2}{\mathbf{m}}$$

Tangon valinta: $D = 12.00 \mathbf{mm}$

$$A_t := \frac{\pi}{4} D^2 = 113.10 \mathbf{mm}^2$$

Jakoväli: $k := \frac{A_t}{A_s} = 114.81 \mathbf{mm}$

Suurin jakoväli: $s_{max.slabs} := \min(2 \cdot h, 250 \mathbf{mm}) = 250.00 \mathbf{mm}$

> Valitaan tukiraudotus T12-K110.