

Tiitus Toukola

TERÄSBETONIPALKIN LOVIPÄÄN RAU- DOITTEIDEN MITOITUS

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Tiitus Toukola: Teräsbetonipalkin lovipään raudoitteiden mitoitus
Dimensioning of rebar in a dapped reinforced concrete beam
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
5/2024

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on perehtyä lovipäisiin teräsbetonipalkkeihin ja niiden raudoitustapoihin. Työssä esitellään teräsbetonipalkin lovipää tarkasteltuna eurokoodin EN 1992-1-1 hyväksyttämällä analyysimenetelmällä eli ristikkoanalyysillä. Tämän jälkeen työ esittelee raudoitteiden ankkurointipituuksiin liittyviä asioita, jonka jälkeen esitetään kirjallisuudesta löytyviä tapoja raudoittaa lovipää. Yhdistäen ristikkoanalyysillä saatujen voimien suuruudet raudoitteiden mitoitukseen, laaditaan kaavat, joista saadaan laskettua tarvittavat pinta-alat tarvittaville raudoitteille. Näillä kaavoilla sitten tarkastellaan esimerkkilaskuja kahdelle eri ristikkomallille. Esimerkkilaskuissa on valittu palkille dimensiot sekä kuormitukset, jotka voisivat olla realistisesti käytössä. Näiden esimerkkilaskujen antamia tuloksia ja rautamääriä on esitetty 2D- ja 3D-kuvina, ja niiden tuloksia sekä käyttökelpoisuutta on pohdittu.

Ristikkoanalyysissä rakenteille mallinnetuissa ristikkomalleissa puristusvyöhykkeet ovat yhtä tärkeitä, ja yhtä suuressa osassa kuin vetovyöhykkeet. Tämä työ on kuitenkin rajattu niin, että tässä työssä keskitytään vain vetovyöhykkeisiin ja niihin kuuluviin raudoitteisiin. Tässä työssä ei esimerkiksi tarkastella, kestäkö betoni puristusvyöhykkeissä olevaa painetta tietyillä lovipään dimensioilla tai betonin vahvuuksilla.

Työn tuloksena oli, että raudoitustavoissa ei esiintynyt selkeitä eroja mikä on paras. Tässä kandidaatintyössä tuodaan esille ajatuksia siitä, mitä hyötyjä ja haittoja löytyy mistäkin raudoitustavasta. Tulokseksi tuli se, että suunnittelijan on puntaroitava tapauskohtaisesti minkä raudoitustavan hän valitsee. Tässä työssä läpikäytyt eri ristikkomalleihin asennettavat raudoitteet ovat keskenään eri näköisiä mutta lopullisessa rakenteessa ne ovat kummatkin käyttökelpoisia.

Avainsanat: Lovipää, Raudoitus, Teräsbetonipalkki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LOVETUN TERÄSBETONIPALKIN SISÄISET VOIMAT JA LOVEN MITOITUS ...	2
2.1 Voimien määrittäminen	2
2.1.1 Ristikkomalli 1	2
2.1.2 Ristikkomalli 2	4
2.1.3 Ristikkomallien yhdistelmä	5
2.2 Lovetun palkin mittoja	7
3. TERÄSBETONIPALKIN LOVIPÄÄN RAUDOITUSTAVAT	8
3.1 Raudoitteiden käyttö teräsbetonirakenteessa	8
3.1.1 Ankkurointipituudet	8
3.1.2 Rautamäärän mitoitus	10
3.2 Eri raudoitustavat lovetulle palkin päälle	11
3.3 Tarvittava rautamäärä	13
4. TUTKIMUKSEN TULOKSET	15
4.1 Esimerkkilaskelmat	15
4.1.1 Ristikkomalli 1	18
4.1.2 Ristikkomalli 2	20
4.1.3 Tulosten tulkinta	23
5. YHTEENVETO	25
LÄHTEET	26

1. JOHDANTO

Teräsbetonipalkin pää saatetaan loveta siitä syystä, että pilariin kiinnitetyn konsolin sekä sen päälle asetetun palkin rakenneyhdistelmän paksuus pidettäisiin mahdollisimman pienenä (VTT 1985, s. 106). Vaikkakin tätä lovipäistä rakenneratkaisua käytetään useasti silloissa, teollisuusrakennuksissa, toimisto- ja asuintiloissa, parkkitiloissa sekä muussa infrastruktuurissa, ei lovipäisen teräsbetonipalkin raudoitukselle Suomessa ole selkeää ohjetta. Miten paljon rautaa lovipäää vaatii ja kuinka ne olisi hyvä sinne sijoitella? Suomessa julkaistu aineisto antaa esitettyihin kysymyksiin vain viitekehystä (Lindberg et al. 1982, s. 7). Tässä tutkimuksessa tutkitaan palkin lovipään sisäisiä vetovoimia ristikkoanalyysillä ja ristikkomallin vetovoimiin esitellään raudoitusratkaisuja. Tavoitteena on ottaa kantaa, missä tilanteessa minkälainen raudoitusvaihtoehto olisi varteenotettava. Työssä tuodaan esille eri raudoitusratkaisujen soveltuvuuksia sekä niiden haasteita.

Tutkimuskysymyksenä tässä työssä tulee olemaan seuraava:

- Millaisen raudoituksen teräsbetonipalkin lovipäää vaatii?

Tähän päätutkimuskysymykseen alakysymyksinä ovat seuraavat:

- Kuinka paljon raudoitteita teräsbetonipalkin lovipäää tarvitsee?
- Mitenkä raudoitteet tulisi asettaa sinne?

Työssä esitellään teräsbetonipalkin lovipäää tarkasteltuna eurokoodin EN 1992-1-1 hyväksyttämällä analyysimenetelmällä, ristikkoanalyysillä. Tämän jälkeen työ esittelee raudoitteiden ankkurointipituuksiin liittyviä asioita, jonka jälkeen esitetään kirjallisuudesta löytyviä tapoja raudoittaa lovipäää. Yhdistäen ristikkoanalyysillä saatujen voimien suuruudet raudoitteiden mitoitukseen, laaditaan kaavat, josta saadaan laskettua tarvittavat pinta-alat tarvittaville raudoitteille. Näillä kaavoilla sitten tarkastellaan esimerkkilaskuja kahdelle eri ristikkomallille.

Työssä käsitellään vain teräsbetonipalkin lovipäätä ja sen raudoitusta, eikä palkin muita osia. Työssä ei myöskään tarkastella pilaria eikä siinä olevaa mahdollista konsolia. Ristikkoanalyysin esittämistä voimista keskitytään vain vetovoimiin, eli työssä ei tarkastella

ristikkoanalyysin betoniin tuottamia puristussauvoja, eikä betonin kestävyttä niissä. Tutkimus toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, jonka lähdemateriaalina toimivat kyseiseen aiheeseen liittyvät julkaisut, artikkelit, yliopistojen tai korkeakoulujen tutkimukset sekä ulkomailta löytyvät aineistot.

2. LOVETUN TERÄSBETONIPALKIN SISÄISET VOIMAT JA LOVEN MITOITUS

2.1 Voimien määrittäminen

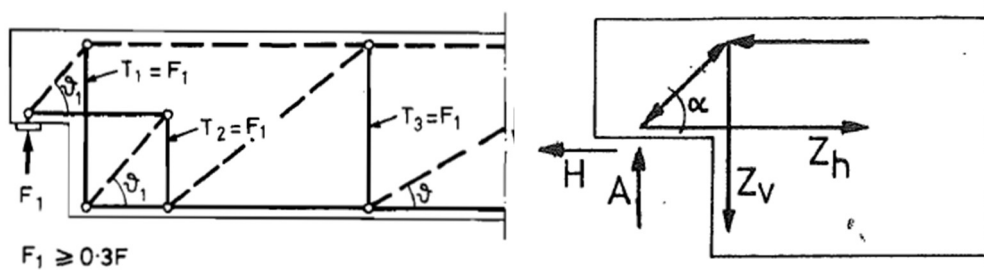
Ristikkoanalyysi on yksi eurokoodin EN 1992-1-1 hyväksyttämistä analysointimenetelmistä betonirakenteen sisäisten voimien analysointiin, jota käytetään erityisesti, kun rakenteessa on jonkinlainen epäjatkuvuuskohta. Eurokoodi (SFS-EN 1992-1-1. 2015) määrittää ristikkomenetelmän mukaiseen malliin kuuluvan puristusjäännityskaistoja edustavia puristussauvoja, raudoitusta edustavia vetosauvoja ja näitä yhdistäviä solmuja. Ristikkoanalyysissä hahmotellaan rakenteen sisälle muodostuvan betonisauvoja, jotka toimivat puristussauvoina. Huomioitavaa on, että ristikkoanalyysissä puristusvyöhykkeet ovat yhtä oleellisia kuin vetovyöhykkeet kun tarkastellaan ristikkoanalyysillä rakenteita. Tässä työssä kuitenkin ei huomioida puristusvyöhykkeitä, joten asiat kuten betonin kestävyys puristusvyöhykkeillä jää huomioimatta.

Ristikkoanalyysillä saatuja ristikkomalleja voi mallintaa eri tavoin. On hyvä pitää mielessä, että nämä mallinnukset seuraavat teoreettisia voiman siirtymiä rakenteessa, kun veto- ja puristussauvojen sekä solmukohtien sijaintiin todellisuudessa vaikuttaa rakenteeseen asennetut raudoitteet. Teoriassa asennetaan raudoitteet vetosauvoihin, todellisuudessa vetosauvat sijoittuvat asennettuihin raudoitteisiin. Seuraavissa alaluvuissa esitetään kaksi eri teoreettista ristikkomallia sekä niistä laadittu yhdistelmämalli.

2.1.1 Ristikkomalli 1

Lovetun pään tuelta löytyy ensimmäinen solmu. Tästä solmusta lähtee noin 45° kulmassa puristussauva seuraavaan solmuun, joka sijaitsee ensimmäisen pystysuuntaisen vetosauvan kohdalla, siinä kohdassa, jossa palkki kasvaa koko mittaansa. Tätä tapausta sovelletaan käytettäessä pystysuuntaisia ylöstaivutettuja tankoja tai hakoja loveuksen edessä ja vaakasuuntaisia teräksiä lovetun osan alapinnassa (Lindberg et al. 1982, s.

- 8). Mainitut sauvat ja solmut sekä tässä ristikkomallissa olevat voimat on esitetty kuvassa 1. Puristussauvat katkoviivalla, vetosauvat yhtenäisellä viivalla.



Kuva 1. Puristus- ja vetosauvojen sijainnit sekä voimat ristikkomallissa 1 (Lindberg et al. 1982, s. 9; Schlaich & Schäfer 1991, s. 115)

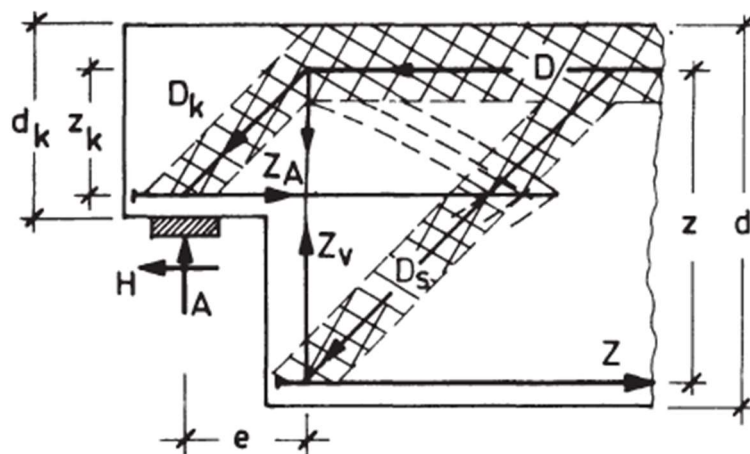
Kuvasta 1 olennaiset merkinnät ovat palkin sisällä tapahtuvat vaakaveto Z_h sekä pystyveto Z_v . A on palkille kohdistuva tukireaktio, H on palkkiin aiheutuva vaakavoima, ja α on tukipisteen päältä löytyvän puristussauvan kaltevuuskulma. Sisäiset voimat saadaan nurkkapisteiden tasapainoehdojen mukaan määritellyiksi. Vaikuttavat voimat määritellään

$$Z_v = A \quad (1)$$

$$Z_h = \frac{A}{\cos(\alpha)} + H. \quad (2)$$

Vaakakuorma H aiheutuu palkille rakenteiden pakkovoimista kuten lämpöliike, kutistuma, viruma, ja taipuma (Jussila 2014, s. 20).

Tätä teoriaa on kuitenkin kehitetty vielä pidemmälle. Kuvassa 2 on esitettyä tarkemmin saman ristikkomallin tuottavat voimat sekä ristikkoväriyksellä rakenteen puristussauvat.



Kuva 2. Voimat yksityiskohtaisemmin ristikkomallissa 1 (Leonhardt & Mönning 1977, s. 144)

Tässä on hyvä huomioida kuvan 2 tapa merkitä sisäinen vaakavoima Z_A , ja että se on eri merkintätapa kuin kuvassa 1. Tämän pidemmälle viedyn teorian mukaan voimat määritellään seuraavanlaisesti:

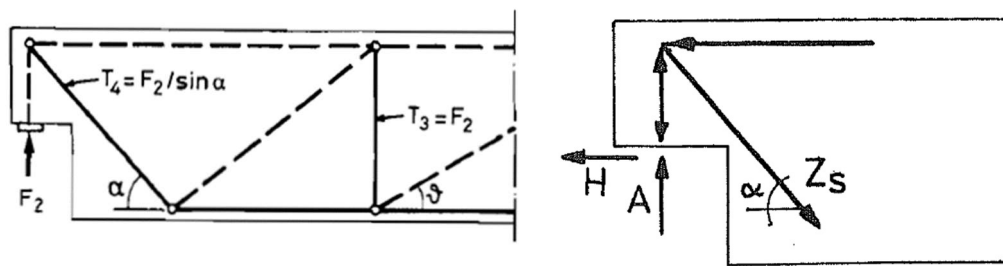
$$Z_A = \frac{A \cdot e}{z_k} + H \quad (3)$$

$$Z_v = A \cdot 0,35 \frac{d}{d_k} \leq A \quad (4)$$

Kaavoissa Z_A on palkin sisältä löytyvä vaakavetovoima, A on tukivoima, e on momentti-
varsi tukivoimalta vetovyöhykkeeseen, H on palkkiin aiheutuva vaakavoima. Z_v on palkin
sisältä löytyvä pystyveto voima, d on palkin kokonaiskorkeus, d_k on palkin lovetun osan
kokonaiskorkeus.

2.1.2 Ristikkomalli 2

Toinen tapa ajatella lovipäässä sijaitsevat sauvat ja solmut on, että ensimmäinen solmu ei löydykään tuen välittömästä läheisyydestä, vaan palkin yläpinnassa kulkevan puristusvyöhykkeeltä. Tällöin solmusta lähtevä vetosauva on kulmassa, eikä kohtisuorassa. tämän vetosauvan kaltevuuteen vaikuttaa merkittävästi palkin dimensiot. Mainitut sauvat ja solmut sekä niistä sekä tässä ristikkomallissa olevat voimat on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Puristus- ja vetosauvojen sijainnit sekä voimat ristikkomallissa 2 (Schlaich & Schäfer 1991, s. 115) (Lindberg et al. 1982, s. 9)

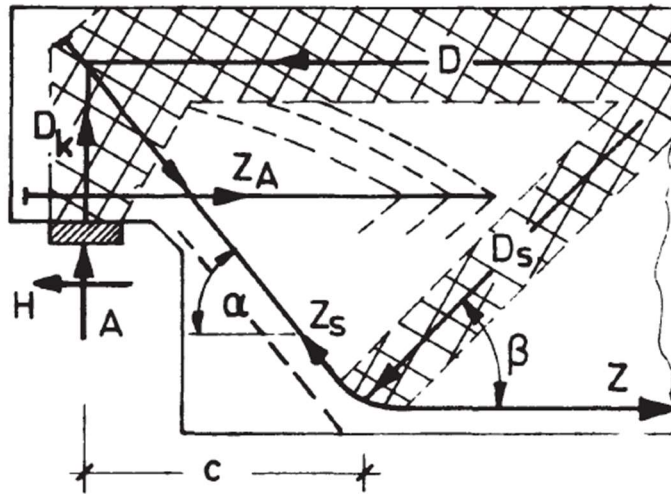
Voimat on määritetty

$$Z_s = \frac{A}{\sin(\alpha)} \quad (5)$$

$$Z_h = H, \quad (6)$$

jossa Z_h on sama vaakasuuntainen voima tuelta palkkiin kohti kuin kuvassa 1. Kaavasta 5 nähdään, että mitä pystysuorempaan vetovyöhykke muodostuu, sitä pienempi veto-
voima siinä kulkee.

Tätäkin yksinkertaista teoriaa on viety hieman pidemmälle. Kuvassa 4 on esitetty yksityiskohtaisemmin voimat.



Kuva 4. Voimat yksityiskohtaisemmin ristikkomallissa 2 (Leonhardt & Mönning 1977, s. 144)

Leonhardt & Mönning (1977) ovat esittäneet kaavat voimille seuraavanlaisesti

$$Z_A = 0,25 \frac{d}{d_k} \cdot \frac{A \cdot c}{z_k} + H \quad (7)$$

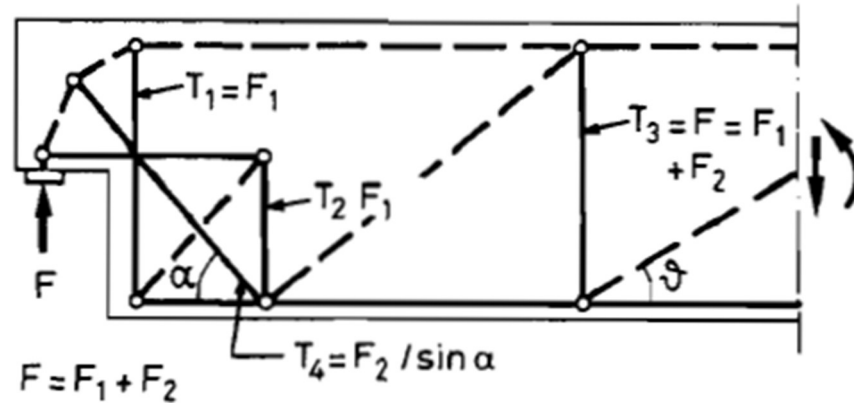
ja

$$Z_S = \frac{A}{\sin(\alpha)} = A \cdot \sqrt{2} \text{ kun } \alpha = 45^\circ, \quad (8)$$

jossa Z_A on palkin sisäinen vaakavetovoima, Z_S on palkin sisällä viistosti kulkeva vetovoima, d on palkin kokonaiskorkeus, d_k on lovetun osan kokonaiskorkeus, A on tukireaktio, c on momenttivarsi tuelta palkin alapinnan solmulle, H on palkkiin aiheutuva vaakavoima, α on viistosti kulkevan vetovoiman kaltevuuskulma.

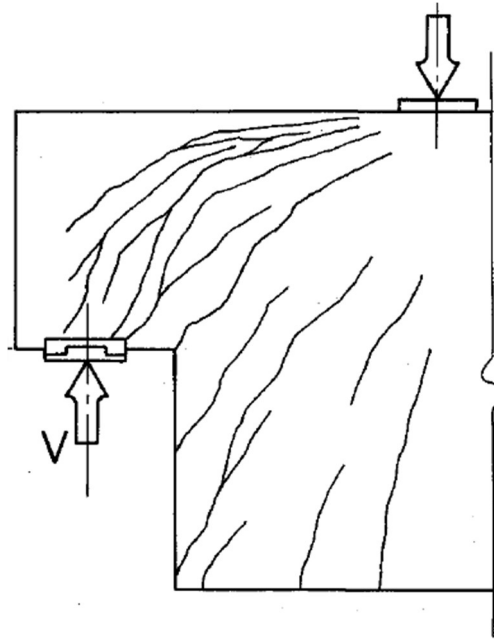
2.1.3 Ristikkomallien yhdistelmä

Kuvissa 2 ja 4 esitetyt ristikkomallit ovat yksinkertaistettuja. Todellisuudessa lovipäästä löytyvä ristikkomalli on enemmänkin näiden kahden esitetyn yhdistelmä. Ensimmäinen solmu löytyy tuen välittömästä läheisyydestä ja seuraava tämän ja ensimmäisen pystyvetosauvan päätysolmun välistä. Tämä ristikkomalli on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Ristikkomallien yhdistelmä (Schlaich & Schäfer 1991, s. 115)

Kuvassa 5 puristussauvat ovat katkoviivalla kuvattuna, ja vetosauvat yhtenäisellä. Ristikkoanalyysimenetelmässä betonisauvat ovat samansuuntaisia palkin alapinnasta alkavien halkeamien kanssa. Kuva 6 esittää halkeamia, jotka muodostuvat lovipäiseen palkkiin silloin kun palkin yläpintaa kuormitetaan miltei murtumiseen saakka.



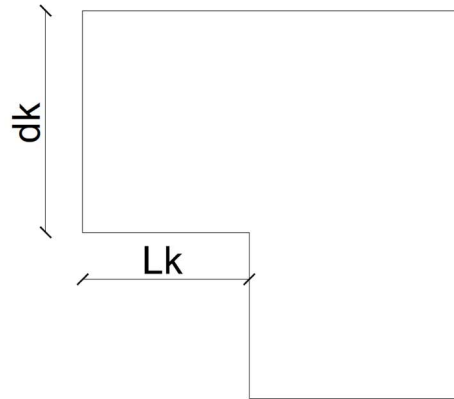
Kuva 6. Lovipäähän muodostuvat halkeamat juuri ennen murtumista (Chan & Mattock 1979, s. 35)

Kun tarkastellaan kuvaa 5 ja kuvaa 6 yhtäaikaisesti, voidaan huomata halkeamien seuraavan yhdistetyn ristikkomallin puristussauvoja. Tämä tarkoittaa, että poiketen ristikkomalleista 1 tai 2 todellinen puristusvyöhyke seuraa enemmän yhdistettyä ristikkomallia.

Tämä yhdistelmämalli on esitettyä ajatuksen tasolla, mutta tämän työn laskennassa otetaan huomioon vain yksinkertaisemmat ristikkomallit 1 & 2.

2.2 Lovetun palkin mittoja

Palkin lovetun osan korkeus d_k tai siihen liittyvä leveys b määräytyy raudoituksen ankurointivaatimusten sekä betonin puristuslujuuden perusteella. Lovetun osan pituuden tulee olla lyhyt, yleensä $L_k \approx d_k$, mutta jos $L_k \approx 2 \cdot d_k$, niin ei ole vielä leikkausvaaraa, jos ripustusraudoitteet ovat riittävät.



Kuva 7. Palkin lovetun osan mitat

Kuvassa 7 on esitetty lovetun osan vaakamitta L_k , sekä lovetun osan pystymitta d_k . Tätä pidemmät lovetut osat on yleensä mitoitettava vielä erikseen taivutusta ja leikkausvoimaa varten. (Leonhardt & Mönning 1977, s. 144) Mitä pienempi suhde $\frac{d_k}{d}$ on, sitä enemmän vaakatasossa voimat siirtyvät pilarin suuntaan tuelta pois ja sitä alttiimpi loviosa on leikkausmurrolle. Kaavasta (4) voidaan määrittellä minimikorkeus lovetulle osan kokonaiskorkeudelle. Kaavan (4) ehto toteutuu, jos

$$d_{k,min} = 0,35d. \quad (9)$$

Jossa $d_{k,min}$ on lovetun osan kokonaiskorkeuden minimiarvo, ja d on palkin kokonaiskorkeus.

3. TERÄSBETONIPALKIN LOVIPÄÄN RAUDOITUSTAVAT

3.1 Raudoitteiden käyttö teräsbetonirakenteessa

Teräsbetonirakenne on yhdistelmä rakenne, joka koostuu betonista ja sen sisällä sijaitsevista raudoitteista. Betoni antaa teräsbetonille hyvän puristuskestävyyden, kun taas rauditus antaa hyvän veto- ja taivutuskestävyyden. Betoni myös suojaa raudoitusta korroosiolta ja hidastaa raudituksen pehmenemistä ja lämpenemistä tulipalotilanteessa. (BY211 2013, s. 54) Tässä yhdistelmä rakenteessa yhteistoiminta vaatii, että riittävä tartunta materiaalien välillä mahdollistaa jännitysten ja muodonmuutosten siirtymisen materiaalilta toiselle. Raudoitteet asetetaan teräsbetonirakenteeseen niille sijanneille, joissa rakenteeseen kohdistuu vetorasitusta.

3.1.1 Ankkurointipituudet

Lovipään raudituksen tarkastelussa ja mitoituksessa erittäin oleellista on, että saadaan rauditukselle riittävä ankkurointi. Lovetun osan dimensiot eivät välttämättä mahdollista raudoitteen tartuntapituuden

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \quad (10)$$

täyttymistä (SFS 1992-1-1 2015, s. 133). Kaavassa ϕ on raudoitteen halkaisija, σ_{sd} on tangon mitoitusjännitys kohdassa, josta ankkurointipituus mitataan.

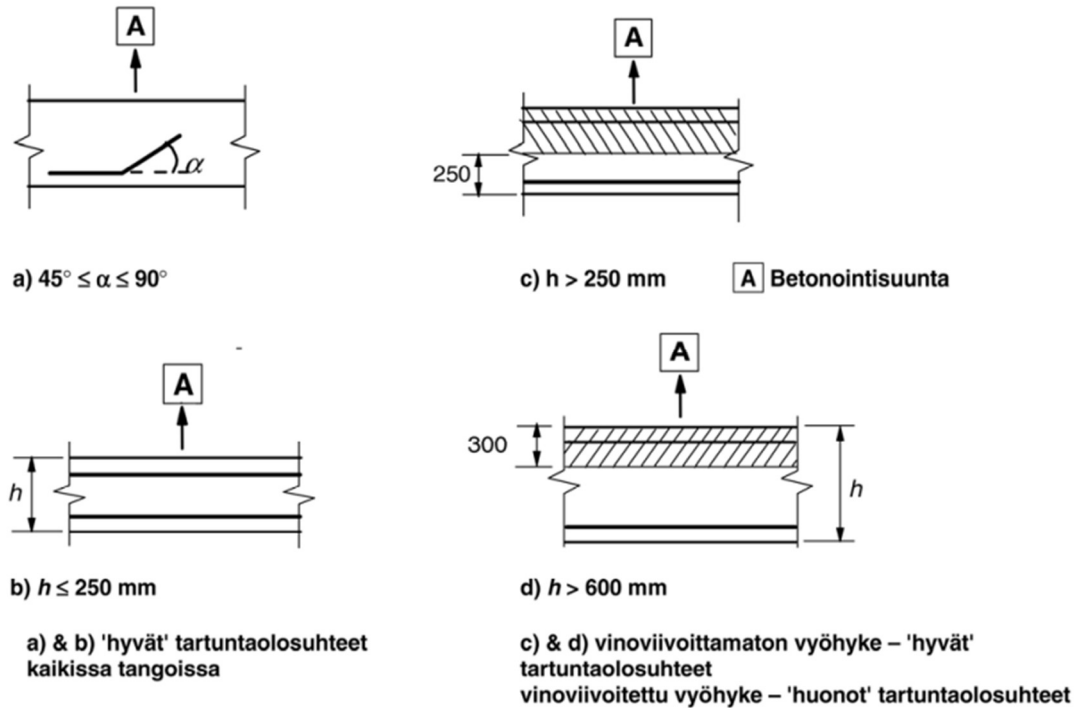
$$\sigma_{sd} = \frac{F_{Ed}}{A_s}, \quad (11)$$

jossa A_s on palkin pääteräksien poikkipinta-ala.

f_{bd} on tartuntalujuus, joka määritetään kaavalla 12

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}, \quad (12)$$

jossa η_1 on kerroin, joka liittyy raudoitteiden tartuntaolosuhteisiin, $\eta_1 = 1$ kun tartuntaolosuhteet ovat "hyvät", ja $\eta_1 = 0,7$ muissa tapauksissa. Kuvassa 7 on esitetty vaatimukset tartuntaolosuhteelle. (SFS 1992-1-1, s. 133)



Kuva 8. Raudoitteiden tartuntaolosuhteet (SFS 1992-1-1, s. 133)

Kaavassa 13 η_2 on kerroin, joka liittyy raudoitteen halkaisijaan:

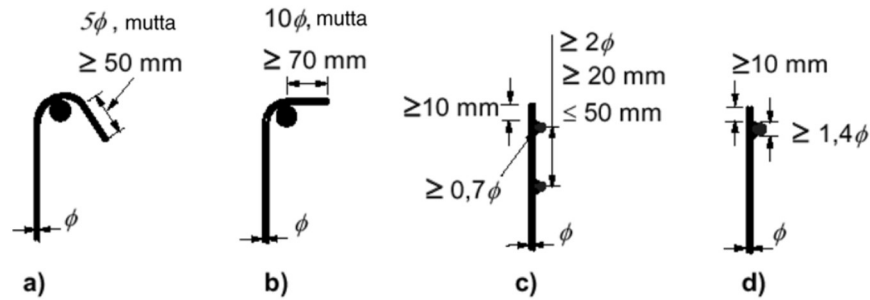
$$\eta_2 = 1,0 \text{ kun } \phi \leq 32 \text{ mm} \quad (13)$$

$$\eta_2 = \frac{132 - \phi}{100} \text{ kun } \phi > 32 \text{ mm}, \quad (14)$$

jossa ϕ on raudoitteen halkaisija.

Siinä tilanteessa, että lovetun osan pituus L_k on lyhyempi kuin $l_{b,rqd}$ niin täytyy rauditus ankkuroida muulla tavoin, esimerkiksi taivuttamalla rauditus, tai käyttämällä raudituksen päässä ankkurointilevyä.

Hakojen ja leikkausraudoitteiden ankkurointi toteutetaan tyypillisimmin koukkujen ja taivutusten, tai hitsatulla poikittaisraudoituksella. Koukun tai taivutuksen sisäpuolelle sijoitetaan tanko. Kuvassa 9 on esitetty tavat, miten järjestää haan ankkurointi, c ja d kohdat ovat hitsatut. (SFS 1992-1-1 2015, s. 135)

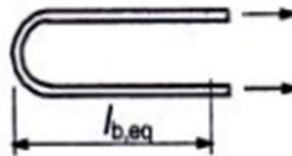


Kuva 9. Umpihakojen ankkurointi (SFS 1992-1-1 2015, s. 136)

Yleisesti taivutettujen raudoitusten ankkurointimitoitus mitoitetaan kuten suoran tangon ankkurointimita mitoitetaan, ankkurointipituudeksi otetaan taivutetun tangon keskiakselia pitkin kulkeva mitta. Tämän tyylin lisäksi on myös mahdollista korvata ankkurointipituuden mitoitussarvo ekvivalentilla ankkurointipituudella $l_{b,eq}$ joka määritetään yhtälöllä

$$l_{b,eq} = \alpha_1 \cdot l_{b,rqd} \quad (15)$$

jossa α_1 on kerroin, jonka arvo on 0,7 silloin kun betonipeite ja terästen keskinäinen väli on riittävän suuri, $c_d \geq 3\phi$. (BY211 2013, s. 157–158) Kuvassa 10 on esitetty ekvivalentti ankkurointipituus vakioienkissä.



Kuva 10. Ekvivalentti ankkurointipituus (BY211 2013, s. 159)

3.1.2 Rautamäärän mitoitus

Teräsbetonirakenteeseen asennettavan raudoitteen määrän kertoo raudoitteen myötölujuuden sekä raudoitteeseen kohdistuvan normaalivoiman, eli teräsbetonissa tapahtuvan vedon, suuruuden. Teräsbetonille annettu myötölujuus muutetaan mitoitussarvoksi jakamalla se teräksen materiaaliosavarmuusluvulla γ , esitetty kaavassa 16. Tämä materiaaliosavarmuusluku γ on normaalivallitsevassa tilanteessa betoniteräkselle 1,15 (RakMK 2019, s. 15)

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma}. \quad (16)$$

Tämän mitoitussarvon ja normaalivoiman suhteella saadaan tarvittavan teräsmäärän pinta-ala (BY202 1986, s. 280):

$$A_{s,req} = \frac{N_{so}}{f_{yd}}. \quad (17)$$

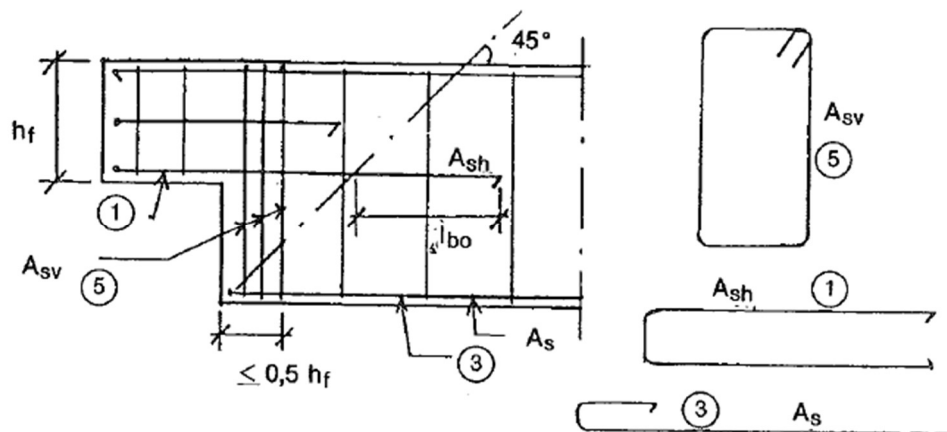
Tämä $A_{s,req}$ on oleellinen määrittämään tarvittavan raudoitteen halkaisija sekä raudoitteiden kappalemäärä. Valitun raudoitteen on täytettävä $A_{s,req}$ määrällisesti, mutta raudoitteen halkaisijan valinnassa on myös huomioitava käytännön toteutettavuus, kuten betonin suojarahkaus sekä raudoitteiden välien koot.

3.2 Eri raudoitustavat lovetulle palkin päälle

Ristikkoanalyysi koostuu puristus- ja vetovyöhykkeistä. Puristusvyöhykkeet siirtyvät teräsbetonin läpi betonin puristuksessa, kun taas vetovyöhykkeet teräksen vedosta. Tavoitteena raudoitteille, jotka asennetaan lovipäähän, on siirtää voima tuelta palkin pääraudoitukselle.

Ristikkoanalyysillä tarkasteltu lovipää tuottaa meille useamman ristikkomallin palkin lovipäälle. Tarkastellen näitä kahta ristikkomallia kuvista 2 ja 4 voidaan huomata mihin kohtiin lovipäätä olisi tarpeen asentaa raudoitteita ottamaan vastaan vetoa.

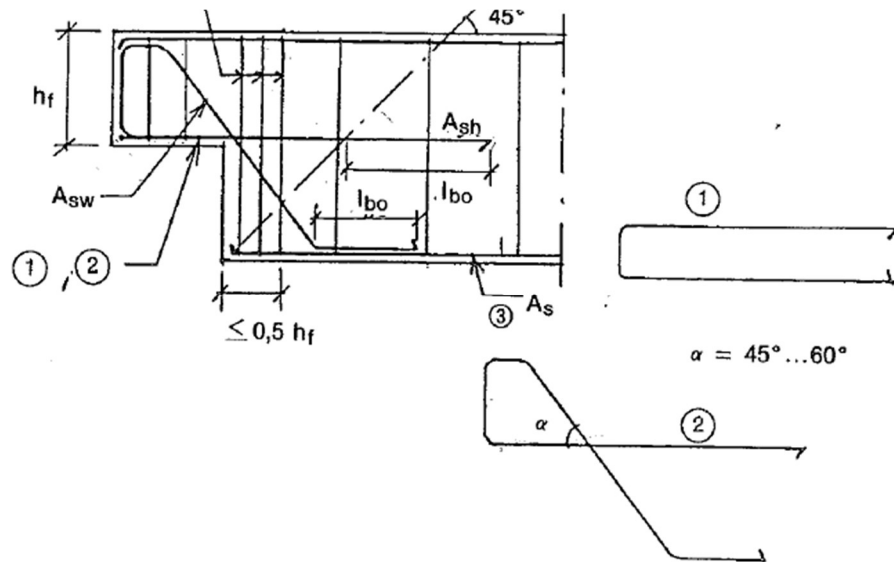
Katsoen kuvasta 2 ristikkomallia 1, huomataan raudoitteen tarpeen olevan kohdissa Z_v , Z_A , ja Z . Kuvassa 11 on esitettyinä raudoitteet, joita voi asentaa täyttämään tätä ristikkomallia varten.



Kuva 11. Ristikkomallin 1 raudoitteita (Rakentajain Kalenteri 2000, s.593)

Kuvasta 11 löytyy vaakalenkit (1), joiden ankkurointipituus l_{b0} on merkitty, pystyhaat (5), sekä pääraudoitus (3). Esitetystä kuvassa 10 ankkurointipituus l_{b0} on vanhan normin mukainen merkintätapa ja poikkeaa kaavassa 10 esitetystä $l_{b,rqd}$, mutta tarkoittaa samaa ankkurointipituutta.

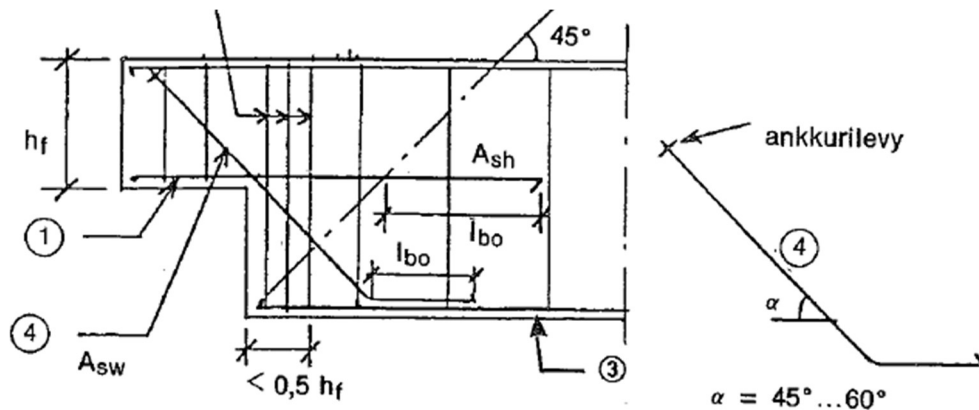
Katsoen sitten taas kuvasta 4 ristikkomallia 2, huomataan raudoituksen tarpeen olevan kuvan kohdissa Z_A , Z_S , ja Z . Kuvassa 11 on esitetty raudoitteet, joita olisi tarpeen asentaa tätä ristikkomalli varten. Kuvassa 12 on esitettyä myös pystyhaat, mutta jätetään ne huomioimatta. Tarkastellaan tässä kohtaa vain raudoitteita, jotka voidaan todeta tarpeelliseksi ristikkomallin 2 mukaisesti.



Kuva 12. Ristikkomallin 2 raudoitteita (Rakentajain Kalenteri 2000, s.593)

Kuvasta 12 raudoitteet, joihin keskitytään ovat; vaakalenkit (1) ja ylöstaivutetut tangot (2), joiden ankkurointipituudet l_{bo} on myös esitettyä, sekä alaraiditus (3) kuvasta 9. Ylöstaivutetut tangot tekevät silmukan, jotta tanko ottaa kahdessa eri kohtaa vastaan vetoa sekä tangon kumpikin pää saa täytettyä tarvittavan tartuntapituuden.

Kuvassa 13 on esitettyä samankaltainen raudoitustyyli kuin kuvassa 12, mutta tässä ylöstaivutettu raudoite ei tee silmukkaa, vaan käyttää päässään ankkurointilevyä saadakseen riittävän ankkuroinnin.



Kuva 13. Raudoitus ankkurilevyllä (Rakentajain Kalenteri 2000, s.593)

Kuvassa 13 esitetty raudoitustapa voidaan myös modifioida niin, että ankkurointilevyn sijaan raudoite taivutetaan hakamaiseksi. Taitos tehdään ankkurointilevyn kohdalta niin, että raudoite kulkee palkin yläpintaa pitkin, ja tämä sitten taivutetaan samanmuotoiseksi palkin toisella sivulla kuin mitä kuva 13 esittämällä sivulla. Ylhäältäpäin katsottuna kyseinen raudoite olisi haan muotoinen.

Raudoitteiden valinnassa on tärkeää juuri se, että raudoite täyttää ristikkoanalyysissä tuotetun vetovyöhykkeen tarpeen. Jos raudoitetta asennetaan muualle kuin vetovyöhykkeelle, se on turhaa, ellei raudoitteet ole mitoitettu ja asennettu puristusraudoitteeksi. Ylimääräinen raudoite tarkoittaa ylimäärisiä kustannuksia ja työtunteja.

Raudoitteiden valinnassa on tärkeää muistaa, että raudoitteen on kuljettava ristikkomallin solmukohdan kautta, jotta raudoite pystyy vastaanottamaan vedon siitä kohtaa mistä vetosauva alkaa. Kuvan 11 mukainen raudoitus on mallinnettu ristikkomallille 1, ja on asennettu teorianmukaisen solmukohdan sijainnin mukaisesti. Jos todellisuudessa vino puristussauva ei olekaan niin vino kuin miten ristikkomalli 1 sen esittää, ei kuvassa 11 näkyvä pystyhaka mene solmukohdan läpi. Tällöin ei ole rautaa vastaanottamassa vetoa, joka syntyy solmukohdan ja asennetun raudoitteen välille. Tällöin on hyvä asentaa palkin yläpintaan raudoite, joka sitoo solmukohdan pystyhakaraudoitteeseen, kuten kuvassa 11 on tehty.

3.3 Tarvittava rautamäärä

Yhdistetään seuraavaksi ristikkomallien vetovoimien suuruudet, raudoitteet, sekä kaava 17. Laaditaan kummankin ristikkomallin ehdotetuille raudoitteille kaavat, jotka antavat raudoitteiden tarvittavan pinta-alan määrän riippuen palkilla olevasta kuormituksesta, sekä raudoitteen myötölujuudesta.

Taulukossa 1 on käytetty ristikkomallin 1 kaavoja 3 ja 4, ristikkomallin 2 kaavoja 7 ja 8, kuvasta 11 löytyvät raudoitteet (1) ja (5), sekä kuvasta 12 löytyvä raudoite (2). Raudoitteen tartuntapituuksiin on käytetty kaavaa 10.

Kun vaadittava ankkurointipituus $l_{b,req}$ lasketaan, huomioidaan kaavasta 15 tuleva kerroin α_1 niissä tilanteissa, joissa se on tarpeen.

Taulukko 1. *Ristikkomallien raudotteiden pinta-alat ja tartuntapituudet*

Raudoite	$A_{s,req}$	$l_{b,req}$
1, vaakalenkit, ristikkomalli 1	$\frac{\left(\frac{A \cdot e}{z_k}\right) + H}{f_{yd}}$	$\frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \cdot \alpha_1$
1, vaakalenkit, ristikkomalli 2	$\frac{\left(0,25 \cdot \frac{d}{d_k} \cdot \frac{A \cdot e}{z_k} + H\right)}{f_{yd}}$	$\frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \cdot \alpha_1$
2, ylöstaivutettu tanko	$\frac{\left(\frac{A}{\sin(\alpha)}\right)}{f_{yd}}$	$\frac{\phi}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$
5, pystyhaat	$\frac{\left(A \cdot 0,35 \cdot \frac{d}{d_k}\right)}{f_{yd}}$	—

4. TUTKIMUKSEN TULOKSET

4.1 Esimerkkilaskelmat

Palkki, jolla tullaan laskemaan esimerkkilaskelmia, on suorakaidepalkki. Palkin dimensiot ovat $h=700$ mm, $b=400$ mm, $l_k=300$ mm ja $l=6000$ mm. Palkin pään lovetun osan suuruus on 300 mm, eli jäljelle jäävä osuus $d_k = 400$ mm. Kuorma, joka tulee palkin päälle, on 167 kN/m. Tämä on kuorman laskenta-arvo, joka ottaa huomioon palkin oman painon. Palkki on kummastakin päästä nivelellisesti tuettu. Palkin matkalta kuorma tuottaa 1 MN kuormaa, joka jakaantuu tasaisesti palkin kummassakin päässä olevaan tukeen. Näin ollen palkin tuelle tulee 500 kN voima.

Käytössä oleva raudoite on B500B. Käytetty betoni on C45/55. Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (18)$$

jossa $\alpha_{cc} = 0,85$ ja materiaaliosavarmuusluku $\gamma_c = 1,5$.

Palkkiin liittyvät dimensiot ja muita suureita löytyy taulukosta 2.

Taulukko 2. Palkin dimensioita ja muita suureita

Palkin korkeus h [mm]	700
Palkin leveys b [mm]	400
Palkin lovetun osan pituus l_k [mm]	300
Palkin pituus l [mm]	6000
Palkin lovetun osan korkeus d_k [mm]	400
Tasaisesti jakautunut kuorma q [$\frac{kN}{m}$]	167
Raudoitteen myötölujuus f_{yk} [MPa]	500
Raudoitteen myötölujuuden mitoitusarvo f_{yd} [MPa]	435
Raudan materiaaliosavarmuusluku γ_s	1,15
Betonin puristuslujuus f_{cd} [MPa]	25,5
Betonin suojapeitteen paksuus c [mm]	30

Taulukosta 1 kummankin ristikkomallin vaakalenkkien pinta-alaa koskevassa kaavassa on muuttuja z_k joka viittaa lovetun osan yläpuolisten vaakalenkkien keskiöstä yläpinnan puristusresultanttiin. Jotta voidaan määrittää puristuspinnan korkeus

$$y = \frac{A_s}{b} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (19)$$

tarvitsee ensin määrittää palkin pääraudoituksen pinta-ala A_s .

Palkin pääraudoitus on laskettu betonirakenteiden perusteiden oppikirjan by 203 (s. 75-84) esittämällä tavalla.

Palkin pääraudoituksen vaadittu pinta-ala on

$$A_{s,vaad} = \frac{M_{Ed}}{z \cdot f_{yd}}, \quad (20)$$

jossa M_{Ed} on palkkiin kohdistuva taivutusrasitus, z on sisäinen momenttivarsi

$$z = d \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \quad (21)$$

d on palkin tehollinen korkeus, β on apusuureiden mukainen laaduton suhteellisen puristuspinnan korkeus

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}, \quad (22)$$

jossa μ on apusuureiden mukainen laaduton suhteellisen momentin arvo

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{bd^2 f_{cd}} \quad (23).$$

Palkkiin kohdistuva taivutusrasitus saadaan laskettua kaavalla

$$M_{Ed} = \frac{FL}{8}, \quad (24)$$

jossa F on tasaisesti jakautuneen voiman suuruus palkin matkalta (Tekniikan kaavasto 2005, s. 148)

$$F = q \cdot L, \quad (25)$$

jossa q on tasaisesti jakautunut voima, ja L on palkin pituus.

Sijoittamalla taulukosta 1 arvoja kaavoihin 20–25 saadaan $A_{s,vaad}$ tulokseksi 2896 mm^2 . Tämä saadaan täytettyä, jos palkki raudoitetaan 6T25, jolloin A_s on 2945 mm^2 .

Nyt voidaan sijoittaa A_s arvo kaavaan 20, ja siitä saatu y arvo seuraavaan kaavaan

$$z_k = h - (h - d_k) - \frac{y}{2} - c - \frac{\phi}{2}. \quad (26)$$

Etäisyys z_k on riippuvainen valitun vaakahaan halkaisijasta, joten sille ei voi määrittää arvoa tässä vaiheessa. Taulukoissa 4 ja 5 on huomioitu z_k arvon muutos haan halkaisijan muuttuessa, mutta sitä ei vastaedes esitetä. Taulukossa 3 on esitetty z_k joka on laskettu kun $\phi = 10$ mm.

Tarkistetaan betonin kestävyys palkin puristuspinna. Betonin lujuusluokaksi on valittu C45/55, ja tämän puristuslujuus $f_{cd} = 25,5$ MPa. Kaavalla

$$f = \frac{M_{Ed}}{z \cdot (b \cdot y)} \quad (27)$$

saadaan palkin yläosassa kulkevan puristusvyöhykkeessä olevaksi paineeksi f arvon 25,06 MPa, jonka C45/55 betoni kestää. Palkkiin ei siis tarvitse mitoittaa puristusraudoitteita, eikä kuormituksia tai dimensioita tarvitse tässä vaiheessa lähteä muokkaamaan.

Taulukossa 3 on esitetty z_k ja muita oleellisia arvoja raudoitusten laskemisessa. Esimerkissä palkki ei osallistu rakenteen tuulikuormien tai muiden vaakavoimien välittämiseen, joten aiheutuva vaakavoima H on laskettu olemaan 20% tuelle tulevasta voimasta (Jussila 2014, s. 21).

Taulukko 3. *Lisää oleellisia suureita esimerkkilaskuihin*

Palkin tuelle tuleva kuorma A [kN]	500
Tuen päällä olevan vetovyöhykkeen puolivälin ja palkin puristusvyöhykkeen puolivälin etäisyys z_k (kun $\phi = 10$ mm) [mm]	302
Tuen ja palkin täyden mitan etäisyys e [mm]	150
Betonin vetolujuus f_{ctd} [MPa]	1,5
Palkkiin kohdistuva vaakavoima H [kN]	100
Palkin tehollinen korkeus d [mm]	657,5

Seuraavaksi esitetyissä ristikkomallien raudoituksissa ei ole palkin muita raudoituksia esitetty pääraudoituksen, vaakahakojen, pystyhakojen, ja ylöstaivutetut rautojen lisäksi. Palkkeihin luonnollisesti tulisi mitoittaa ja asentaa muut raudoitteet esimerkiksi palkin mitalta kulkevat umpihaotukset.

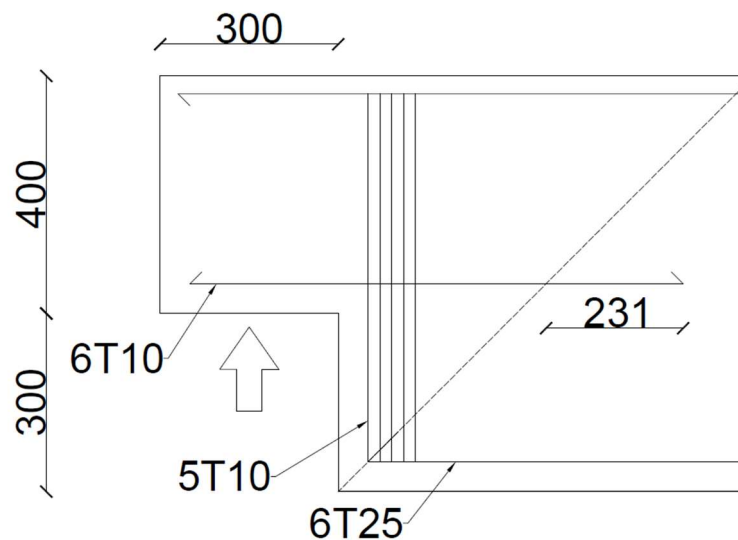
4.1.1 Ristikkomalli 1

Kuvassa 9 on esitetty ristikkomallin 1 tarvitsemat raudoitteet. Taulukosta 1 saadaan kaavat, joilla voidaan laskea tarvittava pinta-ala raudoitukselle. Taulukoista 2 ja 3 saadaan arvot suureille. Raudoitteilla on oleellista muistaa, että ne ovat silmukoita, ja menevät vetovyöhykkeiden läpi kahdesti, käytännössä tuplata niiden pinta-alan. Vaakalenkkien tartuntapituudessa astuu voimaan ehto $c_d \geq 3\phi$ joten α_1 kerroin on 0,7.

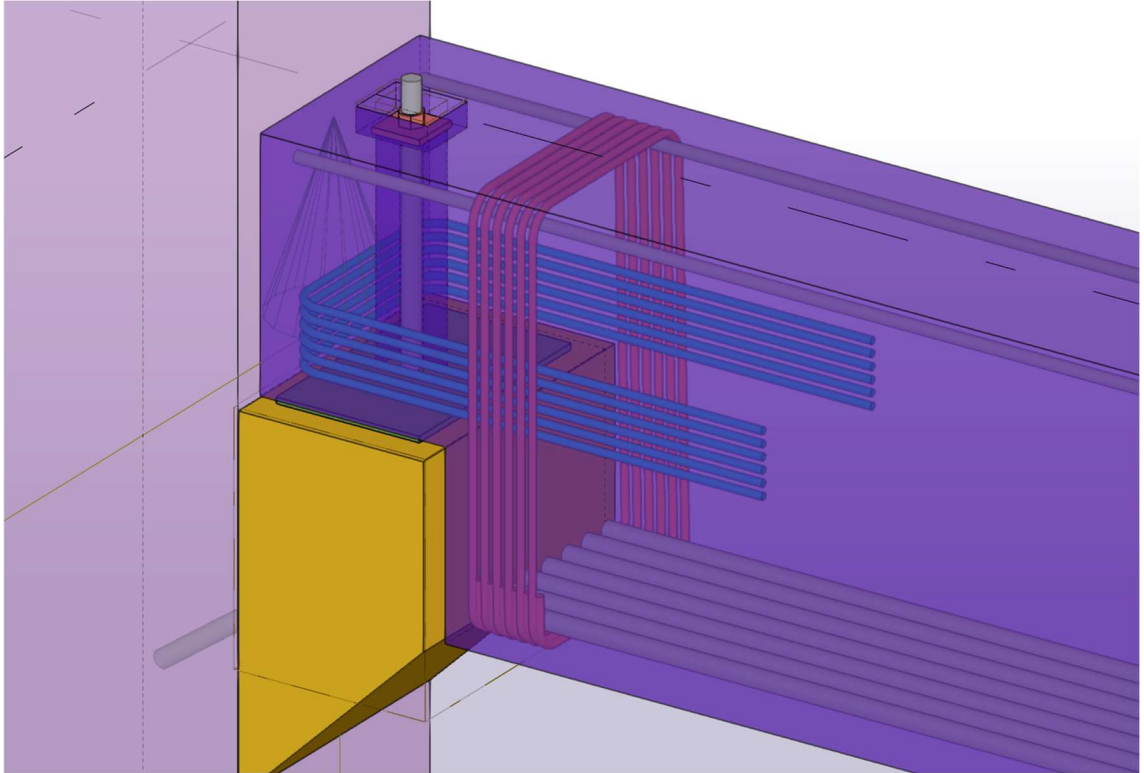
Taulukko 4. Ristikkomallin 1 raudoitelaskelmia

Raudoite	Vetosauvassa kulkeva voima [kN]	$A_{s,req}$ [mm ²]	Rautamäärä	A_s [mm ²]	$l_{b,req}$ [mm]
1, vaakalenkit, ristikkomalli 1	348	801	6T10	942	231
5, pystyhaat	306	704	5T10	785	–

Lasketut raudoitteet on esitetty kuvassa 14, niiden määrät ja kuinka ne tulisi sijoittaa, ja kuvassa 15 on esitetty 3D mallinnus samoista raudoitteista. Mallinnukset on tehty Tekla 2024 ohjelmalla.



Kuva 14. Ristikkomallin 1 mukaiset raudoitteet



Kuva 15. Ristikkomallin 1 mukaiset raudoitteet 3D mallinnettuna

4.1.2 Ristikkomalli 2

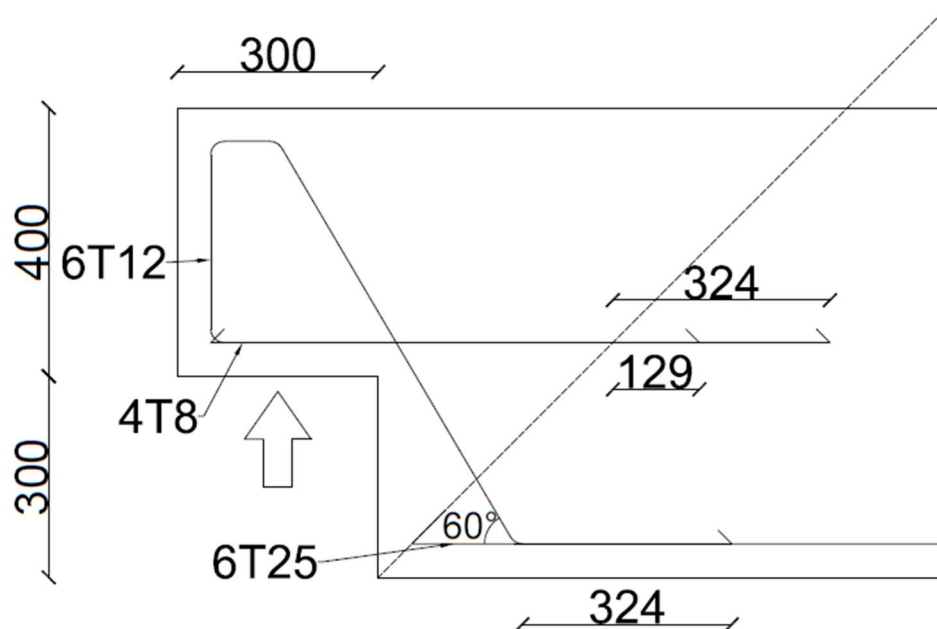
Kuvassa 12 on esitetty ristikkomallin 2 tarvitsemat raudoitteet. Taulukosta 1 saadaan kaavat, joilla voidaan laskea tarvittava pinta-ala raudoitukselle. Taulukoista 2 ja 3 saadaan arvot suureille. Vaakalenkkien tartuntapituuden laskennassa ehto $c_d \geq 3\phi$ täyttyy, joten kerroin α_1 kerroin on 0,7.

Palkin dimensioilla ylöstaivutettu tanko on $\alpha = 60^\circ$ asteen kulmassa.

Taulukko 5. Ristikkomallin 2 raudoitelaskelmia

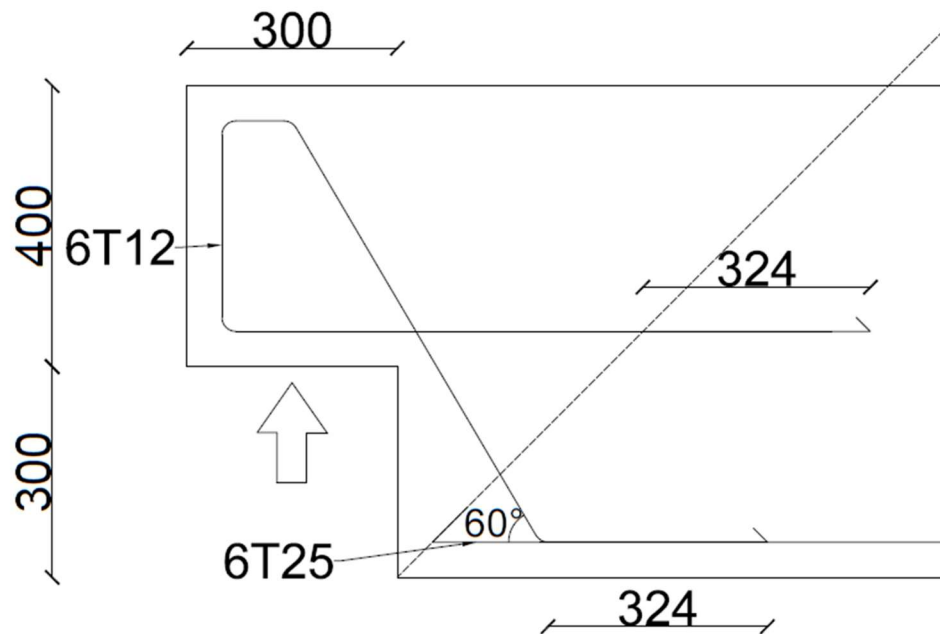
Raudoite	Vetosauvassa kulkeva voima [kN]	$A_{s,req}$ [mm ²]	Rautamäärä	A_s [mm ²]	l_{bo} [mm]
1, vaakalenkit ristikkomalli 2	152	340	4T8	402	129
2, ylöstaivutettu tanko	583	1341	6T12	1357	324

Lasketut raudoitteet on esitetty kuvassa 16, niiden määrät ja kuinka ne tulisi sijoittaa.



Kuva 16. Ristikkomallin 2 mukaiset raudoitteet vaakahaotuksella

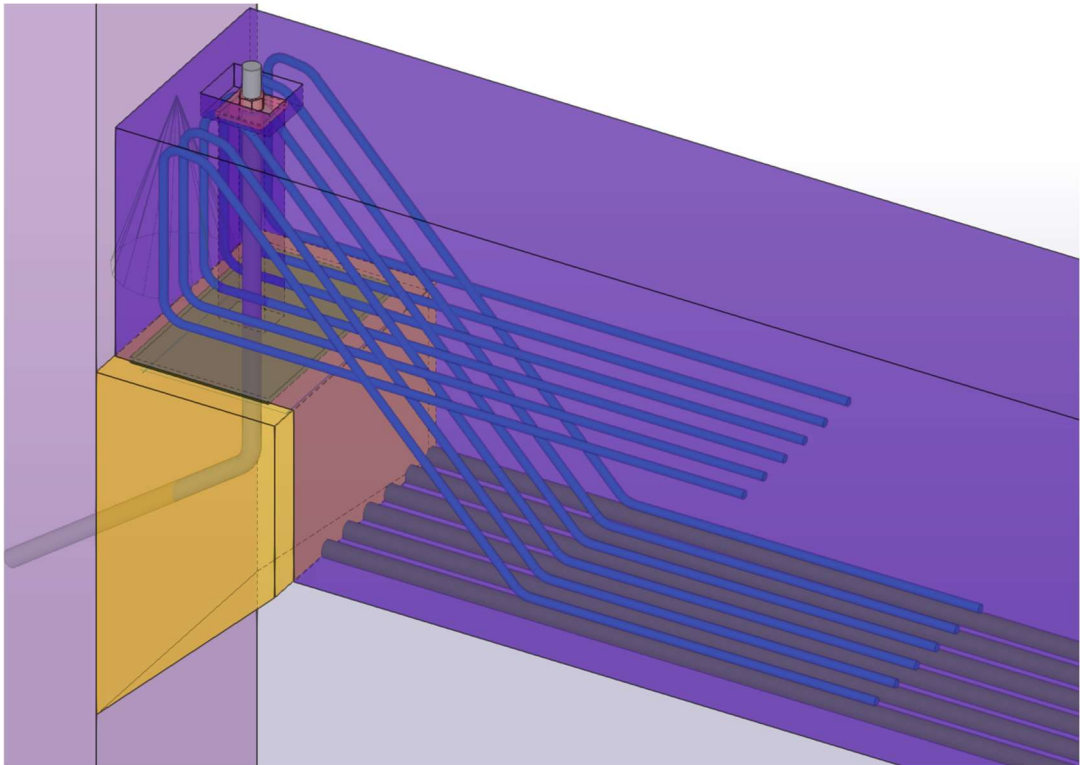
Koska ylöstaivutetut raudat menevät samansuuntaisesti vaakasuuntaisten hakojen kanssa, vaakasuuntainen voima saadaan riittävälle teräsmäärälle siirrettyä ilman vaakasuuntaisia hakoja. Näin ollen saadaan raudoitteen myös paremmin mahtumaan palkkiin. Raudoituskuva palkille voi näyttää seuraavanlaiselta:



Kuva 17. Ristikkomallin 2 mukaiset raudoitteet vaakahaotuksesta

Tässä raudoitustavassa on huomioitava palkin alaosaan muodostuva raudanmäärä. Palkin pääraudoitus ja ylöstaivutetun raudan on mahdollista sinne niin, että valutilanteessa betoni pystyy esteettä täyttämään raudan alapuolella olevan tilan. Ylöstaivutetun raudoitteen alapinnan osan on saatava pääraudoitusten alapintaan saakka, mielellään päätan-
kojen väliin (Lindberg et al. 1982, s. 29).

Kuvassa 18 on esitetty raudoitustapa 3D mallinnettuna.

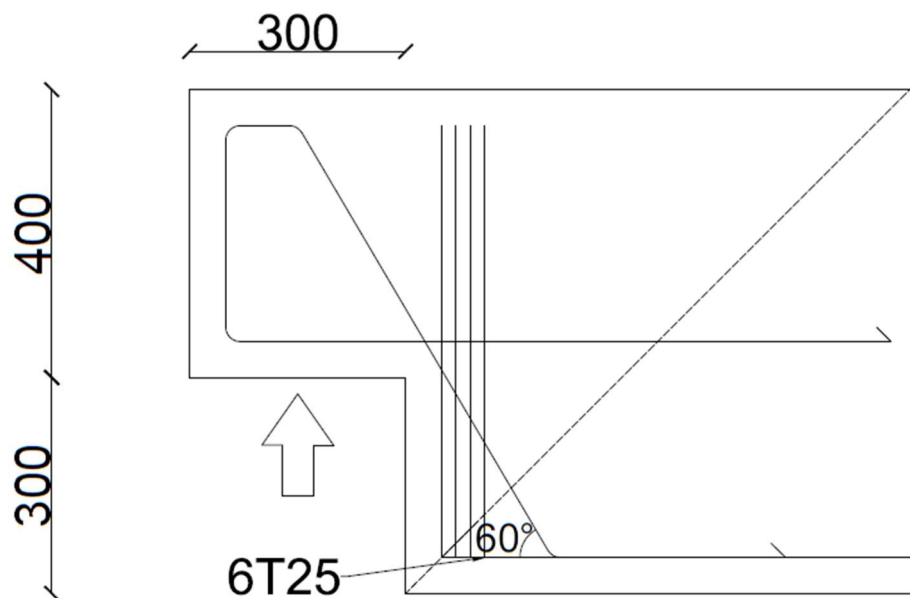


Kuva 18. Ristikkomallin 2 mukaiset raudoitteet 3D mallinnettuna

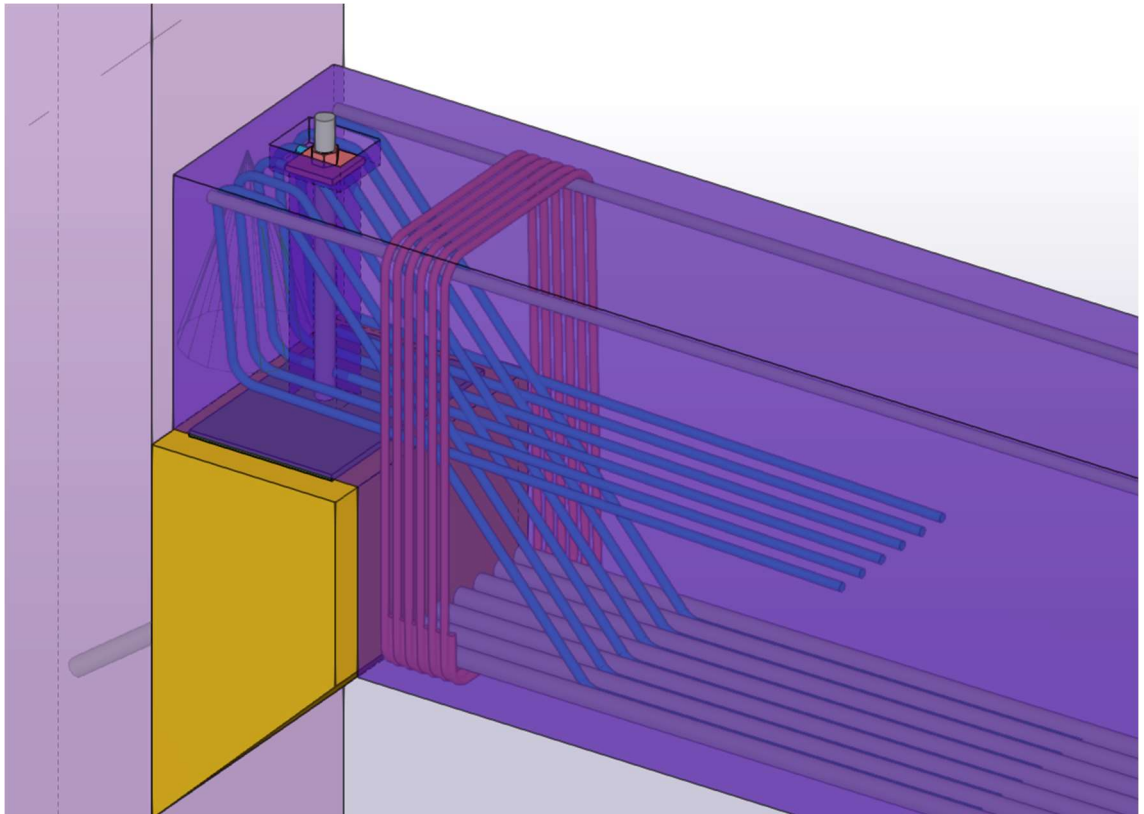
4.1.3 Tulosten tulkinta

Kummassakin tapauksessa saadaan riittävä rauditus asennettua palkkiin vastaanottamaan palkin sisäisiä vetorasituksia, oman ristikkomallinsa mukaan. Pystyhaat ovat helpompia tehdä, mitata, ja asentaa. Kun taas sitten ylöstaivutetut raudat ovat monimutkaisempia tehdä, ne ovat monipuolisempia siinä, että ne vastaanottavat pystyyn menevää, sekä vaaka voimia palkin sisällä. Kuvan 14 raudoitustavassa murtotapa on äkillinen ja hauras ilman selvää edeltävää myötövaihetta. Tämä raudoitustapa soveltuu parhaiten niissä rakenteissa, joissa lovetun osan korkeus on lovetun osan pituuteen nähden suuri, ja tukireaktiot pieniä. (Lindberg et al. 1982, s.28) Ylöstaivutettujen rautojen osalta murtotapa on sitkeä ja myötövaihe selväpiirteinen. Tätä raudoitustapaa on hyvä käyttää matalilla palkin pään korkeuksilla. (Lindberg et al. 1982, s. 29)

Jos asia olisi niin yksinkertainen niin nämä raudoitustavat voisivat olla parhaat vaihtoehdot. Kuitenkin kuvassa 5 esitetään näiden ristikkomallien yhdistettyä mallia, joka on enemmän todellisuutta vastaava. Kuvasta 5 voidaan todeta, että samaan aikaan on vetorasitusta sekä pystysuuntaisesti ristikkomallin 1 mukaan, kuin vinottaissuuntaisesti ristikkomallin 2 mukaan. Kumpikaan ristikkomalli yksinään ei täytä kumpaankin suuntaan menevää vetovyöhykettä. Tällöin ehdotuksena raudoitustavalle olisi näiden kahden raudoitustavan risteämä. Ylöstaivutettuja raudotteita kuin myös pystysuuntaisia hakoja.



Kuva 19. Ristikkomallien 1 & 2 mukaisten raudoitusten yhdistymä



Kuva 20. Ristikkomallien 1 & 2 mukaisten raudoitusten yhdistymä 3D

5. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin lovipäistä palkkia, ja sen raudoitustapoja. Ensin tarkasteltiin ristikkoanalyysillä palkin sisäisiä voimia, ja laadittiin analyysistä kaksi eri ristikkomallia. Näiden ristikkomallien sisäisiä vetovyöhykkeitä tutkittiin ja määritettiin niille raudoitustavat. Lopuksi vielä laadittiin kaavat, joilla selvitettiin tarvittava rautamäärä.

Tutkimuskysymyksenä tälle tutkimukselle toimi

– Millaisen raudoituksen teräsbetonipalkin lovipää vaatii?

Vastauksena toimii se, että raudoituksen täytyy kulkea vetovyöhykkeiden läpi niin, että tuelle tulevat tukivoimat siirtyvät palkin pääraudoitukselle. Rautaa tulee olla tätä varten riittävä määrä.

Alakysymyksen

– Kuinka paljon raudoitteita teräsbetonipalkin lovipää tarvitsee?

vastaus löytyy taulukon 1 kaavoista, jotka määrittävät tarvittavan rautamäärän pinta-alan.

Toisen alakysymyksen

– Mitenkä raudoitteet tulisi asettaa sinne?

vastaus löytyy kuvista 11–18. Kuvat 11–13 esittelevät raudoitteet ja 14–18 asettavat ne esimerkkilaskuissa paikoilleen.

Raudoituksia ei tule asentaa liikaa eikä turhiin paikkoihin. Liika rauta, tai väärään paikkaan asennettu rauta tarkoittaa suurempia kustannuksia sekä kulutettuja työtunteja. Mikään raudoitustapa, jota tässä työssä käytiin läpi ei ollut selkeästi parempi eikä huonompi kuin toinen. Kuvan 14 raudoitustapa on yksinkertaisempi tehdä ja asentaa, murtotapa on äkillinen ja hauras, ja soveltuu parhaiten, kun lovetun osan korkeus on lovetun osan pituuteen nähden suuri. Kuvan 17 raudoitustapa on monimutkaisempi mutta monipuolisempi, sen murtotapa on sitkeä ja myötövaihe selväpiirteinen. Tätä raudoitustapaa voidaan käyttää matalilla palkin pään korkeuksilla. Kuvan 20 raudoitustapa on puolestaan näiden kahden yhdistelmä, ja siitä löytyy kummankin haitta- ja hyötypuolet.

Insinöörin, joka suunnittelee lovetujen palkkien päitä, on hyvä ottaa huomioon nämä asiat valitessaan mitä raudoitustapaa lähtee mitoittamaan palkkiinsa.

LÄHTEET

BY202 (1986). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja, osa 2. Suomen Betoniyhdistys r.y.

BY203. (1982). Betonirakenteiden perusteiden oppikirja. Suomen Betoniyhdistys r.y.

BY211. (2013). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja, Osa 1 – 2013. Suomen Betoniyhdistys r.y.

Chan T. & Mattock A. (1979). Design and Behaviour of Dapped-End Beams. University of Washington.

Jussila S (2014). Raudoittamattomien kumilevylaakereiden mitoitus talonrakentamisessa.

Leonhardt F. & Mönig E. (1977). Vorlesungen über Massivbau. Springer-Verlag. Berlin.

Lindberg R., Mehto L., Pelkonen J. (1982). Lovipäisen elementtipalkin kapasiteettiselvitys. Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Rakentajain kalenteri (2000). Rakennustieto Oy.

Rakentamismääräyskokoelma (2019). Rakenteiden lujuus ja vakaus, betonirakenteet. Ympäristöministeriö.

Schlaich J. & Schäfer K. (1991). Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models. University of Stuttgart. Germany.

SFS-EN 1992-1-1 (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa-1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardoimisliitto SFS. Saatavissa <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/377991.html.stx>

Tekniikan kaavasto (2005). Tekniikan kaavasto: Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. Tammertekniikka.

VTT (1985). Connections between precast concrete elements. VTT Technical Research Centre of Finland.