

Konsta Airaksinen

**PURISTUSRAUDOITETTU MATALA
TERÄSBETONIPALKKI VS KORKEA
PURISTUSRAUDOITTAMATON TERÄS-
BETONIPALKKI**

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Nina Lindberg
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Konsta Airaksinen: Puristusraudoitettu matala teräsbetonipalkki vs. korkea puristusraudoittamaton teräsbetonipalkki

(Low reinforced concrete beam with compression reinforcement vs. high reinforced concrete beam without compression reinforcement)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2022

Raskaasti kuormitettu teräsbetonipalkki tarvitsee lisää taivutuskestävyyttä ja tässä työssä käsitellään kaksi keinoa, joilla sitä pystytään lisäämään. Keinoja siihen ovat palkin poikkileikkauksen korkeuden kasvattaminen tai puristusraudoituksen lisääminen, joita kumpaakin tässä työssä vertaillaan. Vertailun pääpaino on vaihtoehtojen rakenteellisessa toiminnassa ja mitoituksessa, mutta vertailua suoritetaan myös hiilijalanjäljen ja kustannusten kannalta. Työn tavoitteena on selvittää vaihtoehdoista turvallisempi, ekologisempi ja kustannustehokkaampi rakenneratkaisu.

Työssä on kolme osaa. Ensin työssä esitettiin kirjallisuustutkimuksena palkkien toimintaa puristusraudoitettuna ja pelkästään vetoraudoitettuna sekä kerrottiin poikkileikkausten mitoituksen perustat. Työssä sen jälkeen mitoitettiin matala veto- ja puristusraudoitettu poikkileikkaus sekä korkea pelkkä vetoraudoitettu poikkileikkaus samaan esimerkkitalanteeseen, jossa on raskas kuormitus. Palkkien poikkileikkausten mitoitus suoritettiin murtorajatilassa ja niille tehtiin myös käyttörajatilantarkastelut raudoituksen ja betonin jännityksille, halkeamaleveyksille ja taipumille. Käyttörajatilassa käytettiin ominais- ja pitkäaikaisyhdistelmää. Mitoitukset ja käyttörajatilantarkastelut suoritettiin Excel-taulukoissa, jotka ovat työssä liitteinä. Vertailu ekologisuuden ja taloudellisuuden kannalta tehtiin saatujen poikkileikkausten avulla, kun betonin ja betoniterästen määrät palkeissa oli selvillä. Rakenteellinen vertailu tehtiin työssä mitoituksen ohessa tulleiden huomioiden ja tulosten varmuuksien perusteella.

Työn tulosten perusteella korkea pelkästään vetoraudoitettu poikkileikkaus on parempi vaihtoehto rakenteellisesta, ekologisesta ja taloudellisesta näkökulmasta. Mitoituksen tuloksista huomataan, että raskaasti kuormitetulle matalalle puristusraudoitetulle poikkileikkaukselle tulee käyttörajatilan betonin puristusjännityksen tarkastelussa ongelmia etenkin, kun tarkastelua tehdään kuormien ominaisyhdistelyllä. Matalalla poikkileikkauksella ei päästä työssä käytettyyn betonin puristusjännityksen raja-arvoon, vaikka sen mitoituksessa sovellettiin paljon, joka lisää poikkileikkauksen toiminnan epävarmuutta murtorajatilassa. Myöskin ekologisuuden ja taloudellisuuden kannalta korkeamman poikkileikkauksen palkki on parempi vaihtoehto, vaikka se on tilavuudeltaan selvästi suurempi, koska teräsbetonissa käytettävän teräksen hiilijalanjälki ja hinta ovat betonia huomattavasti suurempia. Työn tuloksena saadaan, että taivutuskestävyyttä kannattaa parantaa poikkileikkauksen korkeutta kasvattamalla niin paljon, kuin kyseessä oleva tilanne antaa mahdollisuutta ja vasta sen jälkeen mitoittaa puristusraudoja.

Avainsanat: Teräsbetonipalkki, puristusraudoitus, murtorajatila, käyttörajatila

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TERÄSBETONIPALKIN TOIMINTA JA MITOITUKSEN PERUSTA	3
2.1 Vetorausdoitetun teräsbetonipalkin toiminta.....	3
2.2 Puristusraudoitetun teräsbetonipalkin toiminta	6
2.3 Murtorajatilan laskenta	8
2.3.1 Taivutusmitoitus	9
2.3.2 Leikkausmitoitus	11
2.3.3 Puristusraudoituksen mitoitus	12
2.3.4 Ankkurointirauhoitus	13
2.4 Käyttörajatilan laskenta	15
2.4.1 Jännitystarkastelut	17
2.4.2 Halkeamaleveys	19
2.4.3 Taipuma.....	20
3. MITOITUS.....	23
3.1 Esimerkkitalanne.....	23
3.2 Palkkien mitoitus	24
3.3 Huomioita palkkien mitoituksesta	26
4. TUTKIMUKSEN TULOKSET.....	28
4.1 Palkkien hiilidioksidipäästöt valmistuksessa.....	28
4.2 Palkkien kustannukset	30
5. YHTEENVETO.....	32
LÄHTEET	33
LIITTEET.....	35

1. JOHDANTO

Palkit ovat vaakarakenteita, jotka ottavat vastaan pystykuormia siirtäen ne pilareille ja siitä edelleen perustusten kautta maaperään. Palkkeja valmistetaan puusta, betonista ja teräksestä. Betonista valmistetaan teräs- ja jännebetonipalkkeja, joista jälkimmäistä käytetään pidemmille jänneväleille. Rakennusmateriaalien kustannukset ovat olleet viime vuoden nousussa, koska koronapandemian takia materiaalien tuonti on vaikeutunut ja samalla rakentaminen on lisääntynyt kotimaassa, sillä ulkomaille ei ole päässyt. Tilastokeskuksen (Rakennuskustannusindeksi, 2021) mukaan puutavaran hinta on kasvanut vuodessa 50,7 % ja teräksen 41,6 %. Vastaava luku betonille on 11,6 %, joten hintojen nousun vuoksi on rakenteista suunniteltava mahdollisimman kustannustehokkaita. Jatkuva huoli ilmaston lämpenemisen takia johtaa siihen, että myös rakennesuunnittelijoilta vaaditaan ekologisempia suunnitteluratkaisuja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Rakennusalan hiilidioksidipäästöt kokonaisuudessaan olivat vuonna 2020 8,7 gigatonnia, mikä vastaa kaikista maailman päästöistä 37 %, ja pelkästään rakennusmateriaalien valmistuksessa tulevat päästöt olivat 3,2 gigatonnia. (United Nations Environment Programme 2021, s. 15) Rakennusalalla on siis iso vastuu kasvihuonekaasujen päästöistä, joten rakenneratkaisuiden valinnassa täytyy tulevaisuudessa pohtia myös ympäristöä.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan teräsbetonipalkkia ja verrataan kahta erilaista rakenneratkaisua sille. Vaakarakenneena palkki ottaa usein pituusakselia vastaan kohtisuoria kuormituksia ja tällöin palkkiin tulee taivutusrasituksia, jotka tuennasta riippuen aiheuttavat palkin ylä- ja alapintaan vetovoimia tai puristusta. Yksiaukkoisen palkin alapinta on vedetty ja yläpinta puristettu, kun palkki ottaa vastaan ylhäältä tulevan pystykuorman. Samassa kuormituksessa jatkuvalla palkilla tukien kohdalla puristus kohdistuu alapintaan ja yläpinta on vedetty. Betonilla on hyvä puristuslujuus, mutta raskaasti kuormitettuun teräsbetonipalkkiin voi olla tarve lisätä puristuslujuutta, ja siihen keinoja ovat esimerkiksi palkin poikkileikkauksen korkeuden kasvattaminen, puristusraudoituksen lisääminen ja betonin lujuuden kasvattaminen (BY211 2013). Tässä työssä tutkitaan näistä vaihtoehdoista palkin korkeuden kasvattamista ja puristusraudoituksen lisäämistä. Verrataan siis saman raskaan kuormituksen kohtaavia matalampaa puristusraudoitettua teräsbetonipalkkia korkeampaan puristusraudoittamattomaan teräsbetonipalkkiin lujuusominaisuuksien, kustannustehokkuuden ja ekologisuuden kannalta.

Tutkimus suoritetaan mitoittamalla palkit eurokoodeissa määriteltyjen suunnittelusääntöjen mukaisesti sekä murto- että käyttörajatilassa ja pyritään löytämään ideaalipoikkileikkaukset eli mahdollisimman pienet poikkileikkaukset, jotta niistä saadaan kustannustehokkaat ja materiaalien määrä mahdollisimman vähäiseksi. Tutkimus on rajattu nivellisesti tuettuun yksiaukkoiseen teräsbetonipalkkiin, jonka poikkileikkaus on suorakaiteen muotoinen. Betonilujuus on rajattu normaalilujuuksiin, ja rasitusluokaksi valitaan riittävän suuri, jotta halkeamaleveydelle ja betonijännitykselle on määritetty raja-arvot betoninormeissa. Palotilanteen ja onnettomuusrajatilan mitoitus on rajattu pois. Materiaalikustannukset määritetään pelkästään valmistuksessa aiheutuvista kustannuksista eli logistiset kustannukset jätetään pois. Hiilijalanjäljen laskennassa myös huomioidaan vain materiaaleista aiheutuvat päästöt.

Työn alussa käsitellään palkkien mitoituksen teoriaa murto- ja käyttörajatilassa eurokoodien laskentaperusteilla sekä palkin toimintaa puristusraudoituksella ja ilman. Sen jälkeen mitoitetaan palkit esimerkkitapauksen mukaisilla kuormituksilla, jotta löydetään ideaalipoikkileikkaukset ja sopivat vetoterästen määrät kummallekin tapaukselle. Mitoituksessa käytetään apuna laskentataulukkoa Excelissä. Poikkileikkausten selvittämisen jälkeen verrataan palkkien kustannuksia ja ekologisuutta. Lopussa tehdään yhteenveto tuloksista ja arvioidaan, kumpi palkkirakenne on parempi vaihtoehto.

2. TERÄSBETONIPALKIN TOIMINTA JA MITOITUKSEN PERUSTA

Tässä luvussa käsitellään teräsbetonipalkin mitoituslaskennan teoriaa ja teräsbetonipalkin käyttäytymistä vetoraidoitettuna ja puristusraidoitettuna. Mitoitus suoritetaan kahdessa rajatilassa: murto- ja käyttörajatilassa. Palotilanteen mitoitusta ja onnettomuusrajatilan mitoitusta ei esitetä tässä työssä. Palotilanteelle on esitetty oma mitoitus eurokoodin mukaisesti standardissa SFS-EN-1992-1-2 (2005), ja onnettomuuskuormien laskeamista käsitellään standardissa SFS-EN-1991-1-7 (2015).

Palkki voi joutua murtorajatilaan ylikuormituksen tai onnettomuustilanteen johdosta, jolloin rakenne voi esimerkiksi menettää vakautensa, murtua paikallisesti, tehdä liian suuren muodonmuutoksen, menettää stabiilisuuden tai murtua väsymisen takia (BY210 2008, s. 18). Murtorajatilan mitoituksen tavoitteena on siis varmistaa, että rakenne murtuu vasta käyttöolosuhteiden kuormiin nähden ylikuorman vaikutuksesta. Murtorajatilassa mitoituksen tehtävänä on määrittää palkin poikkileikkaus, käytettävät materiaallujuudet ja raudituksen määrä ja sijainti (BY211 2013, s. 92). Palkille mitoitetaan taivutusmomentin kautta vetoraidoitus ja leikkausvoiman kautta leikkausraidoitus. Mitoituksessa lasketaan myös ankkurointiterästen määrä. Mitoitus suoritetaan Eurokoodi SFS-EN 1992-1-1 (2015) esitettyjen kaavojen avulla, kuten esimerkiksi taivutusmitoitus tehdään standardissa esitetyillä suhteellisilla kaavoilla.

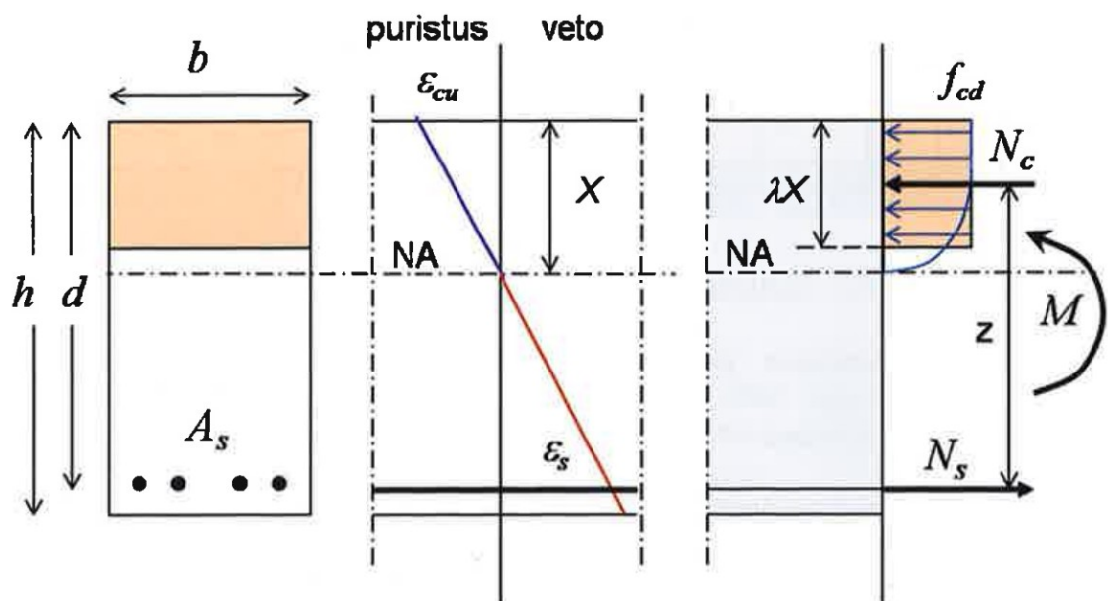
Käyttörajatilassa rakenteen rasituksena ajatellaan olevan suunnitellun käytön aiheuttama ominaiskuorma. Käyttörajatilassa rakenne voi olla ylikuormitettu ilman, että rakenne menisi murtorajatilaan ja saattaisi murtua, koska murtorajatila vaatii selvää ylikuormaa. Käyttörajatilassa rakenteesta tarkastetaan ja rajataan käyttökelpoisuusvaatimukset, joita ovat halkeamaleveys, taipuma, terästen vetojännitys ja betonin puristusjännitys (BY211 2013, s. 205).

2.1 Vetoraidoitettun teräsbetonipalkin toiminta

Vetoraidoitettun teräsbetonipalkin toiminta perustuu betonin puristuslujuuteen ja teräksen vetolujuuteen. Betonilla on huono vetolujuus, joten kun palkin alapintaan kohdistuu vetojännitystä, tarvitsee sinne lisätä terästä. Betonin vetolujuuden ylittyessä vetopinta halkeilee ja voima siirtyy halkeamissa kokonaisuudessaan teräksille. Betonin vetojäykistysvaikutus tapahtuu, kun halkeamien välissä teräksen lisäksi on betonilla pieni voima,

joka nostaa palkin vetojäykkyyden suuremmaksi kuin mitä se olisi pelkällä raudoituksella. (BY210 2008, s. 76)

Kuvassa 1 on esitetty vetoraudoitetun suorakaidepoikkileikkauksen jännityskuvaaja ja muodonmuutosjakaumat sekä poikkileikkauksen mitat. Kuvassa betonin puristuma on reunalla ϵ_c ja teräksen venymä ϵ_s . Murtotilassa on eurokoodeissa määritetty normaalilujuuksisille ($\leq C50/60$) betoneille murtopuristuman arvoksi $\epsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$ ja teräksen murtovenymälle $\epsilon_{su} = 10 \text{ ‰}$ (SFS-EN 1992-1-1 2015). Poikkileikkauksessa voi tapahtua joko sitkeä tai ei-sitkeä (hauras) murto. Sitkeä murtuminen tapahtuu, kun rakenteessa on tapahtunut jo suuria muodonmuutoksia varoittamaan mahdollisesta murtotilasta ennen kuin rakenne menettää kestävyytensä. Esimerkiksi tässä vetoraudoitetussa poikkileikkauksessa se tarkoittaa, että teräs plastisoituu ja siihen tulee suuri venymä vastaanottamaan vetorasitusta ennen kuin puristetun pinnan betoni saavuttaa murtopuristuman ϵ_{cu} arvon. (BY210 2008, s. 120) Ei-sitkeässä murrossa teräs ei välttämättä plastisoidu, joten muodonmuutoksia ei näy betonin murtopuristumaa ennen. Murtorajatilan mitoituksessa pyritään rakenne suunnittelemaan siten, että rakenne murtuu aina sitkeästi.



Kuva 1: Vetoraudoitettu suorakaidepoikkileikkaus (BY211 2013, s.96)

Vetoraudoitetun teräsbetonipalkin oikean toiminnan varmistamiseksi palkille mitoitetaan poikkileikkauksen mitat, teräsmäärä ja betonilujuus. Teräsbetonipalkissa ei ole ulkoista normaalivoimaa, jolloin voimatasapainoehdon nojalla sisäisten voimien betonin puristusvoiman N_c ja raudoituksen vetovoiman N_s täytyy olla yhtä suuret

$$N_c = N_s. \quad (1)$$

Kuvan 1 perusteella betonin puristuskestävyydelle N_c saadaan lauseke

$$N_c = f_{cd}by, \quad (2)$$

jossa f_{cd} on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo, b poikkileikkauksen leveys ja y puristuspuunnan korkeus (BY202 1982, s. 101). Betonin puristusjännitys on paraabeli, mutta yksinkertaistamiseksi sen puristuspinta voidaan betonilla esittää suorakaiteen muotoisena. Yksinkertaistus tehdään siten, että kuvassa 1 puristuspuunnan korkeus y on esitetty λX , jossa X on neutraaliakselin sijainti ja kerroin λ on 0,8, kun $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ tai $0,8 - \frac{f_{ck}-50}{400}$, kun $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$.

Raudoituksessa vaikuttavan vetovoiman resultantin lauseke on

$$N_s = f_{yd}A_s, \quad (3)$$

jossa f_{yd} on raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo ja A_s pääraudoituksen pinta-ala poikkileikkauksessa.

Kun kaavat (2) ja (3) sijoitetaan kaavaan (1) saadaan

$$f_{cd}by = f_{yd}A_s. \quad (4)$$

Tämä saadaan vielä muotoon jakamalla kumpikin puoli lausekkeella $f_{cd}bd$:

$$\frac{y}{d} = \frac{A_s}{bd} * \frac{f_{yd}}{f_{cd}}. \quad (5)$$

Seuraavaksi määritellään laaduttomat parametrit yksinkertaistamaan kaavaa:

- tehollisen puristuspuunnan suhteellinen korkeus: $\beta = \frac{y}{d}$
- geometrinen raudoitussuhde: $\rho = \frac{A_s}{bd}$
- mekaaninen raudoitussuhde: $\omega = \rho \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$. (BY211 2013, s. 97)

Näillä parametreillä kaava (4) saadaan muotoon

$$\beta = \omega. \quad (6)$$

Tämä pätee taivutusrasitetuille teräsbetonin suorakaidepoikkileikkauksille, joissa ei ole puristusraudoitusta. (BY202 1982, s. 102)

Rakenteen kestävyys taivutusrasitukselle voidaan esittää joko puristusvyöhykkeen kestävyydellä

$$M_{Rc} = N_c z = f_{cd}byz, \quad (7)$$

tai pääraudoituksen kestävyydellä

$$M_{Rs} = N_s z = f_{yd}A_s z. \quad (8)$$

Sisäinen momenttivarsi z määritetään kuvan 1 perusteella

$$z = d - \frac{y}{2}, \quad (9)$$

joka voidaan tehollisen puristuspinnan suhteellisen korkeuden β avulla esittää muodossa

$$z = d \left(1 - \frac{\beta}{2}\right). \quad (10)$$

Sijoitetaan z kaavaan (7) ja sievennetään, niin saadaan

$$\frac{M_{Rc}}{f_{cd}bd^2} = \beta \left(1 - \frac{\beta}{2}\right). \quad (11)$$

Määritetään tästä laaduton suure suhteellinen momentti μ

$$\mu = \beta \left(1 - \frac{\beta}{2}\right), \quad (12)$$

jolloin kaava (11) saadaan muotoon

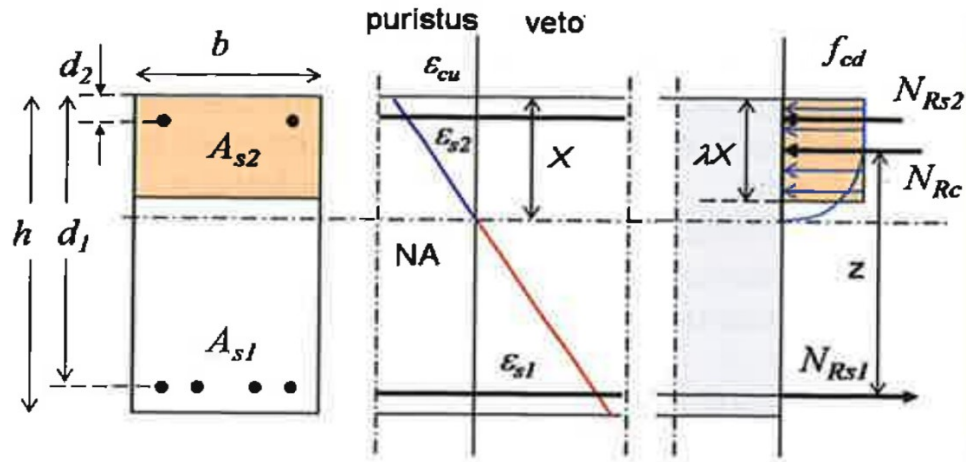
$$\mu = \frac{M_{Rc}}{f_{cd}bd^2}. \quad (13)$$

Näillä lausekkeilla pystytään suorittamaan mitoitus- ja analysointitehtäviä teräsbetonipalkille. (BY211 2013, s. 96–98)

2.2 Puristusraudoitetun teräsbetonipalkin toiminta

Palkin murtuminen halutaan sitkeäksi ja, kun raskaasti kuormitetun palkin korkeutta ei voida kasvattaa, sen sitkeyttä voidaan parantaa lisäämällä puristuspuolelle raudoitus. Tällä varmistetaan vetopuolen raudoituksen myötääminen ja palkin sitkeä murtuminen.

(BY211 2013, s. 107) Puristusraudoituksen lisääminen nostaa neutraaliakselin sijaintia ja tällöin pienentää poikkileikkauksen puristusvyöhykettä.



Kuva 2: Veto- ja puristusraudoitettu poikkileikkaus (BY211 2013, s. 107)

Kuvassa 2 on esitetty veto- ja puristusraudoitetun poikkileikkauksen mitat sekä pintojen muodonmuutoskuvaajat ja jännitysjaakauma. Tässä poikkileikkauksessa myös sisäiset voimat toteuttavat tasapainoehdon, sillä siihen ei kohdistu ulkoista normaalivoimaa. Tasapainoehdon myötä palkin vetopuolelle täytyy lisätä saman verran raudoitusta, mitä puristuspuolelle mitoitetaan.

Vetoraudoitettuun poikkileikkaukseen verrattuna tähän on lisätty puristuspuolelle puristusraudan voimaresultantti

$$N_{sc} = A_{s2} f_{yd}, \quad (14)$$

jossa A_{s2} on puristusraudoituksen pinta-ala ja f_{yd} on raudoituksen lujuus. (BY210 2008, s. 205)

Tasapainoehto toteutuu, kun kaavaan (1) lisätään puristusraudan voimaresultantti

$$N_s = N_c + N_{sc}. \quad (15)$$

Nämä esitetään momenttiyhtälönä vetoraudoituksen akselin suhteen ja sen avulla saadaan palkin momenttikapasiteetti M_{Rd}

$$M_{Rd} = M_{Rc} + M_{Rsc} = N_c z + N_{sc} (d - d'). \quad (BY202 1982, s. 112) \quad (16)$$

Mitoitusyhtälöstä saadaan tällöin

$$M_{Rd} = M_{Rc} + M_{Rsc} \geq M_{Ed}, \quad (16)$$

jossa M_{Rc} on puristusvyöhykkeen betonin momenttikestävyys, M_{Rsc} puristusraudoituksen ja M_{Ed} on kuormittava taivutusmomentti. Rakenteen taivutuskestävyys lasketaan siis

erikseen betonille ja puristusraudoitukselle. Betonin puristusvyöhykkeen kestävyys saadaan kaavan (13) avulla muotoon

$$M_{RC} = \mu_{bd} b d^2 f_{cd}, \quad (17)$$

jossa μ_{bd} on raja-arvo suhteelliselle momentille tasapainoraidoitettu poikkileikkaukselle eli kaavalla saadaan se taivutuskestävyys, jonka poikkileikkaus pystyy ottamaan vastaan ilman puristusraudoitusta. (BY211 2013, s. 107–109) Näin ollen kaavan (16) mukaan puristusraudoitukselta vaadittava momenttikestävyys M_{RSC} arvo saadaan

$$M_{RSC} \geq M_{Ed} - M_{RC}. \quad (18)$$

Kaavassa (16) esitetään momentille M_{RSC} laskenta ja kun siihen sijoitetaan kaavan (14) puristusraudoituksen vetovoima N_{Sc} saadaan se momenttikestävyys, minkä puristusraudoituksen täytyy ottaa vastaan.

$$M_{RSC} = A_{s2} f_{yd} (d - d'). \quad (19)$$

Tämän saadun momenttikestävyuden avulla saadaan laskettua vaadittava pinta-ala puristusraudoitukselle.

2.3 Murtorajatilan laskenta

Murtorajatilan mitoitus perustuu osavarmuusmenettelyyn, jossa riittävä varmuus rakenteen murtumista vastaan saadaan käyttämällä osavarmuuslukuja pienentämään rakennusmateriaalien ominaislujuuksia ja kasvattamaan rakennetta rasittavia ominaiskuormia. Niistä saadaan mitoitusarvot rakenteen kestävyydelle R_d ja kuormista mitoitusvoimasuure E_d . Murtorajatilassa osavarmuusluvut kuormille ovat lähes aina isompia kuin yksi. (BY210 2008, s. 16–18)

Osavarmuusmenettelyllä rakenteen mitoitus perustuu mitoitusehtoon:

$$R_d \geq E_d \quad (20)$$

Rakenteen mitoitusarvon kestävyydelle täytyy olla suurempi kuin mitoittava voimasuure, jotta rakenne menee läpi kyseisen tarkastelun. Jos rakenne ei mene läpi tätä tarkastelua, täytyy rakennetta muuttaa siten, että mitoitusehto toteutuu.

Mitoittavan voimasuureen laskennassa tehdään ensin kuormitusyhdistely, jossa kuormia kerrotaan osavarmuusluvulla kasvattamaan niitä. Kuormitusyhdistelyssä periaatteena on löytää rakenteen suurin kuormien aiheuttama rasitus yhdistämällä kaikki kuormat, jotka voivat vaikuttaa samanaikaisesti. Rakenteeseen kohdistuvia ominaiskuormia, niin pysyviä kuin muuttuvia, kerrotaan taulukon 1 mukaisilla osavarmuuskertoimilla, jotta niistä saadaan mitoituskuormat. Samalle tilanteelle tehdään useita kuormitusyhdistelyjä,

joita ovat esimerkiksi pelkät pysyvät kuormat ja pysyvät sekä kaikki muuttuvat kuormat, joista yksi on määräävä eli suurin. Näistä kuormitusyhdistelystä valitaan määräävin eli se, joka aiheuttaa suurimman kuorman rakenteelle.

Taulukko 1: Murtorajatilan kuormitusyhdistelyn osavarmuuskertoimet (SFS-EN-1991-1-1 2011)

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitusolot	Pysyvät kuormat		Määräävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)
	Epädulliset	Edulliset		
(Yht. 6.10a)	$1,35 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$		
(Yht. 6.10b)	$1,15 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$	$1,5 K_{FI} Q_{k,i}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Kuormitusyhdistelystä saatujen mitoituskuormien avulla lasketaan palkkia rasittavat voima- ja momenttisuureet, kuten taivutusmomentti M_{Ed} ja leikkausvoima V_{Ed} jäykän kappaleen statiikalla tasapainoehtojen kautta. Näiden laskukaavat esitetään luvussa 3. Palkkia voi kuormittaa myös vääntörasitus, joka on jätetty tästä tutkimuksesta pois.

Murtorajatilan mitoituksissa oletetaan, että palkki noudattaa Euler-Bernoullin palkkiteoriaa ja toteuttaa tasapainoehdot. Tämä tarkoittaa sitä, että taivutuksessa palkin poikkileikkaus säilyy samana tasana kohtisuoraan pituusakselia vastaan. Muita oletuksia laskentaa varten ovat muun muassa: betonin vetojännitystä ei oteta huomioon, parabolinen puristusvyöhyke esitetään suorakaiteen muotoisena, raudoituksen jännitys on myötöjännityksen suuruinen ja poikkileikkaus murtuu, kun betoni saavuttaa murtopuristuman ϵ_{cu} . (BY 211 2013, s. 93–94)

2.3.1 Taivutusmitoitus

Taivutusmitoituksessa lasketaan lujuusominaisuuksiltaan riittävän suuri poikkileikkaus ja raudoituksen määrä, jotta saadaan sellainen taivutuskestävyys M_{Rd} , joka toteuttaa kaavan (20) mitoitusehdon eli on suurempi kuin rasittava taivutusmomentti M_{Ed} . Taivutusmitoituksessa palkille määritetään pääraudoitus palkin alapintaan ottamaan taivutusmomentista johtuvan vetorasituksen vastaan. Mitoitus tehdään käyttämällä yksinkertaistettuja suhteellisiin arvoihin perustuvia kaavoja.

Mitoitus aloitetaan selvittämällä palkin rasitukset ulkoisista kuormista ja lasketaan taivutusmomenttiin M_{Ed} arvot. Seuraavaksi valitaan alkuarvot palkin poikkileikkauksen mitoista h korkeus ja b leveys. Korkeuden h avulla arvioidaan tehollinen korkeus d , joka on

etäisyys puristetusta reunasta pääraudoituksen keskipisteeseen. Se saadaan, kun korkeudesta vähennetään lähtötiedoissa määritelty suojabetonipeite c , hakaraudoitus ϕ_{haka} ja puolet arvioidusta pääraudan paksuudesta ϕ_{pr}

$$d = h - c - \phi_{haka} - \frac{\phi_{pr}}{2}. \text{ (BY210 2008, s. 200)} \quad (21)$$

Tehollisen korkeuden avulla palkille saadaan laskettua luvussa 2.1 esitetty suhteellinen momentti μ

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{f_{cd}bd^2}, \quad (22)$$

jossa f_{cd} on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo. Tässä tarkastetaan, ylittääkö suhteellinen momentti tasapainoraidoituksen mukaisen raja-arvon suhteelliselle momentille μ_b eli toteuttaa ehdon $\mu \leq \mu_b$. Jos ehto ei toteudu, täytyy joko suurentaa poikkileikkauksen mittoja, kasvattaa betonin lujuutta tai lisätä puristuspuolelle raudoitusta. (BY211 2013, s. 100)

Suhteellisella momentilla saadaan laskettua tehollinen puristusvyöhykkeen korkeus β

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 * \mu}. \quad (23)$$

Tästä lasketaan edelleen palkille sisäinen momenttivarsi z , joka betonin puristusjännitysresultantin N_c etäisyys raudoituksen vetojännitysresultantista N_s

$$z = d \left(1 - \frac{\beta}{2} \right). \quad (24)$$

Nyt voidaan tarvittavat määreet sijoittaa kaavaan (8) ja saadaan raudoituksen pinta-alaksi

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{f_{yd}z}. \quad (25)$$

Saadun raudoituksen pinta-alan avulla valitaan sopiva raudoituksen halkaisija ja niiden lukumäärä. Sen jälkeen tarkastetaan, että saatu tehollinen korkeus on vähintään arvioidun suuruinen. Lopuksi tarkastetaan, että saatu vetoraidoitusmäärä on suurempi, kuin palkin vähimmäisraudoitus. Vähimmäisraudoituksella varmistetaan, että palkki ei muru ei-sitkeästi ensimmäisen halkeaman syntyessä.

Palkkien vähimmäisraudoitusmäärälle on esitetty kaavat

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} bd \\ 0,0013bd \end{array} \right. , \quad (26)$$

jossa f_{ctm} on betonin keskimääräinen aksiaalivetolujuus ja f_{yk} teräksen lujuuden ominaisarvo. (BY211 2013, s. 188)

2.3.2 Leikkausmitoitus

Leikkausvoimaa esiintyy palkeissa aina taivutusmomentin kanssa. Suurin rasittava leikkausvoiman arvo V_{ed} esiintyy tukien läheisyydessä, koska siellä on isoimmat pisteuorimat, kuten tukireaktiot. Leikkausvoimien johdosta palkkiin syntyy leikkausmuodonmuutoksia, kuten vinoja leikkaushalkeamia. (BY211 2013, s. 131)

Leikkausmitoitus perustuu ristikkomenetelmään, jossa puristusparre ja sauvat muodostuvat puristetusta betonista ja vetoparre pääraudoituksesta. Puristussauvat ovat kulmassa θ vetoparteeseen nähden ja leikkausraudoitus ottaa vastaan näitä vinoja veto-voimia. (Kerokoski 2021, s. 114)

Leikkausraudoituksen mitoitussyhtälö on

$$V_{Rd,s} \geq V_{Ed}, \quad (27)$$

jossa V_{Ed} on ulkoisista kuormista johtuva mitoittava leikkausvoiman arvo ja $V_{Rd,s}$ on rakenteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo.

Mitoituksessa ensin tarkastetaan riittääkö rakenteen leikkauskestävyys ilman leikkausraudoitusta $V_{Rd,c}$ vallitsevaa rasitusta V_{Ed} , jos rasitus on suurempi kuin kestävyys tarvitsee rakenne hakaraudoituksen. Tässä tutkimuksessa tutkitaan raskaasti kuormitettua, joten oletetaan, että palkki ei kestä ilman leikkausraudoitusta.

Raudoituksen mitoituksessa valitaan ensin hakojen kaltevuus α , joka valitaan usein pystysuoraksi eli $\alpha = 90^\circ$. Sitten valitaan puristussauvan kaltevuus θ väliltä $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$. Vaadittava leikkausraudoituksen määrä lasketaan kaavasta

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}}{z f_{ywd} (\cot(\theta) + \cot(\alpha)) \sin(\alpha)}, \quad (28)$$

jossa $\frac{A_{sw}}{s}$ on vaadittava leikkausraudoituksen pinta-ala pituusyksikköä kohti, f_{ywd} on hakaraudoituksen mitoitusjännitys, jonka arvona käytetään 80-% myötölujuuden ominaisarvosta, ja z on sisäinen momenttivarsi, jonka arvona käytetään $0,9 * d$. (BY 211 2013, s. 136–141)

Valitaan saadun leikkausraudoituksen määrän mukaan sopiva tankopaksuus ja leikkeisyys haoille. Hakavälin s voidaan nyt laskea, kun tiedetään pituusyksikkö mille raudoituksen määrä on laskettu, hakojen halkaisija ϕ ja leikkeisyys n . (BY202 1982, s. 165)

Lasketaan myös betonin puristuskestävyys pystyhaoilla ($\alpha = 90$) poikkileikkauksen leveyden b , sisäisen momenttivarren z , puristussauvojen kaltevuuden θ , betonin puristuslujuuden mitoitusarvon f_{cd} ja halkeilleen betonin lujuuden pienennyskerroin v , joka on 0,6 arvoilla $f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$, kaavalla

$$V_{Rd,max} = \frac{vf_{cd}bz}{\cot\theta + \tan\theta}. \quad (29)$$

Tämän pitää toteuttaa puristumurtoehto

$$V_{Rd,max} \geq V_{Ed}. \quad (\text{Kerokoski 2021}) \quad (30)$$

Lopuksi tarkastetaan vielä, että minimirauditusmäärä toteutuu kyseiselle

$$\frac{A_{sw,min}}{s} \geq 0,08b_w \sin(\alpha) \left(\frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \right). \quad (31)$$

Tasaisesti kuormitetun nivelellisesti tuetun yksiaukkoisen palkin keskiosalla leikkausvoima on huomattavasti pienempi kuin päädyissä, joten lasketaan se matka, jossa tämä minimirauditusmäärä riittää ottamaan sitä kohtaa rasittavan leikkausvoiman. Se saadaan, kun kaavaan (28) A_{sw} paikalle sijoitetaan minimirauditusmäärä $A_{sw,min}$ ja ratkaistaan kaavasta leikkausvoima $V_{Ed,min}$. Tämän jälkeen leikkausvoiman rasituskuviosta lasketaan se matka palkin keskeltä, missä leikkausrasitus on pienempi kuin tämä laskettu leikkausvoima ja mitoitetaan minimihaat sille matkalle.

2.3.3 Puristusraudoituksen mitoitus

Puristusraudoituksen mitoituksessa lasketaan tarvittava määrä raudoitusta palkin poikkileikkauksen puristuspuolelle, jotta varmistetaan palkin oikea toiminta, että vetorausvoimat myötä ja murto on sitkeä. Puristuspuolen rauditus ei kuitenkaan välttämättä myötä, jos sitä on runsaasti. Tässä tutkimuksessa rauditus mitoitetään siten, että puristusraudoitus myötä murtotilassa.

Puristusraudoituksen mitoitus etenee lähes samantapaisesti alaluvun 2.3.1 taivutusmitoituksen kanssa. Ensinnäkin määritetään ulkoisista kuormista johtuva mitoittava taivutusmomentti M_{Ed} ja taivutusmitoituksen laskennassa on jo määritetty palkille poikkileikkauksen mitat leveys b ja tehollinen korkeus d sekä käytettävä betonilujuus f_{cd} . Näiden avulla lasketaan suhteellinen momentti μ kaavalla (13) ja tarkastetaan ylittääkö se raja-arvon μ_b , jos ylittää ja poikkileikkausta ei voida enää kasvattaa niin mitoitetään poikkileikkauksen puristusrautoitusta.

Lasketaan se osuus momenttikestävydestä minkä puristusvyöhykkeen betoni ottaa vastaan M_{RC} kaavalla (17) ja vähennetään se mitoittavasta taivutusmomentista M_{Ed} , jolloin saadaan se momenttikestävyys M_{RSC} , jonka puristusraudoitus täytyy ottaa vastaan.

$$M_{RSC} = M_{Ed} - M_{RC} \quad (32)$$

Arvioidaan tämän jälkeen puristusraudoituksen halkaisija $\phi_{puristus}$ ja lasketaan sen avulla puristusraudoituksen tehollinen korkeus d_2 eli etäisyys palkin puristetusta pinnasta puristusraudoituksen puoleen väliin

$$d_2 = c + \phi_{haka} + \frac{\phi_{puristus}}{2}. \quad (33)$$

Seuraavana lasketaan vaadittava puristusraudoituksen määrä A_{s2} kaavan (19) avulla

$$A_{s2} = \frac{M_{RSC}}{\sigma_{s2}(d_1 - d_2)}, \quad (34)$$

jossa $(d_1 - d_2)$ on puristusraudoituksen voiman sisäinen momenttivarsi ja σ_{s2} raudoituksen jännitys, joka on tässä tutkimuksessa raudoituksen myötölujuus f_{yd} .

Vetoraudoituksen määrä saadaan laskemalla yhteen puristusraudoituksen määrä ja betonin puristusvyöhykkeen vaatima vetoraudoitusmäärä, joka saadaan kaavan (4) ja suhteellisten arvojen avulla. Betonin tehollisen puristusvyöhykkeen suhteellisen korkeuden β arvoon vaikuttaa vetoraudoitukseen haluttava venymän ϵ_{sy} arvo.

$$A_s = \beta b d_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} + A_{s2}. \quad (\text{BY211 2013, s. 109}) \quad (35)$$

Tarkastetaan onko toteutunut tehollinen korkeus arvioitua pienempi, jos on niin raudoitusmäärä täytyy laskea uudelleen. Tämä tilanne voi tulla esimerkiksi vastaan, kun pääraudoitus joudutaan asentamaan kahteen kerrokseen, jolloin tehollinen korkeus on pienempi ja täten poikkileikkauksen momenttikestävyys pienenee.

2.3.4 Ankkurointiraudoitus

Raudoituksen ankkuroinnilla varmistetaan, että rakenteen sisälle kehittyvät voimat. Ankkuroinnilla pyritään ankkuroimaan raudoitustangon voima tartunnan avulla betoniin. Ilman toimivaa ankkurointia betoniteräkset eivät pysty ottamaan veto- ja puristusvoimia vastaan. Ankkurointi tehdään tuilla joko suorilla tangoilla, kuten pääraudoituksella, tai erillisillä ankkurointiraudoilla kuten pysty- ja vaakalenkeillä. Raudoituksen ankkurointikykyyn vaikuttaa esimerkiksi:

- tangon pinnan laatu (sileä, harjateräs tai jännepunos)

- raudan sijainti rakenteessa
- asento valusuuntaan nähden
- tangon halkaisija ϕ . (BY210 2008, s. 463–464)

Ankkurointimitoitus tehdään yleensä taivutetuissa rakenteissa tukien alueella. Ankkurointiraudoituksen mitoituksessa lasketaan ensin raudoitustangon pinnalla vaikuttava tartuntalujuus f_{bd} betonin mitoitusvetolujuuden f_{ctd} avulla kaavalla

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2f_{ctd}, \quad (36)$$

jossa η_1 kerroin huomioi raudoituksen tartuntaolosuhteita ja η_2 kerroin riippuu tangon halkaisijasta. Kerroin η_1 on 1,0 ”hyvissä” tartuntaolosuhteissa ja 0,7 huonoissa olosuhteissa, joita ovat esimerkiksi korkeiden palkkien yläosat. Kerroin η_2 on 1,0, kun tangon halkaisija $\phi \leq 32 \text{ mm}$ ja $\frac{132-\phi}{100}$ silloin, kun halkaisija on $> 32 \text{ mm}$. (BY211 2013, s. 155–156)

Tartuntalujuuden avulla voidaan esittää ankkurointipituuden perusarvo $I_{b,rqd}$

$$I_{b,rqd} = \frac{\phi \sigma_{sd}}{4 f_{bd}}, \quad (37)$$

jossa σ_{sd} on tangossa vaikuttava mitoitusjännitys ja se saadaan raudoituksessa vaikuttavan voiman ja raudoituksen pinta-alan avulla $\frac{F_{ed}}{A_s}$. Raudoituksessa vaikuttava voima F_{Ed} saadaan mitoittavan leikkausvoiman V_{Ed} , momenttikäyrän siirtomitan α_L , sisäisen momenttivarren z ja puristussauvan kaltevuuden θ kautta

$$F_{Ed} = V_{Ed} \frac{\alpha_L}{z} = 0,5V_{Ed}(\cot\theta - \cot\alpha).$$

Saatua ankkurointipituuden perusarvoa $I_{b,rqd}$ voidaan vielä pienentää kertoimilla ankkurointipituuden mitoitusarvoon I_{bd} ottaen huomioon mm. tankojen muodon, betonipeitteen, poikittaisen raudoituksen ja poikittaisen paineen

$$I_{bd} = \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4\alpha_5I_{b,rqd}. \quad (38)$$

Lopuksi tarkastetaan, että saatu mitoitusarvo ylittää minimiarvot, jotka ovat

- vetoraudoitukselle: $I_{b,min} = \max \begin{cases} 0,3I_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$
- puristusraudoitukselle $I_{b,min} = \max \begin{cases} 0,6I_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases}$. (BY211 2013, s. 159)

Minimiarvoa käytetään, jos saatu mitoitusarvo ei ylitä sitä. Saadun mitoitusankkurointipituuden avulla määritetään tuelle riittävä toteutunut ankkurointipituus I_D . Ankkurointipituus toteutetaan joko pääraudoituksella, mutta jos sitä kautta ei saada tarpeeksi isoa ankkurointipituutta tuen päälle niin voidaan

- lisätä leikkausraudoitusta, jolloin ankkuroitava voima F_{ed} pienenee
- lisätä raudoituksen määrää A_s , jolloin mitoitusjännitys σ_{sd} pienenee.

Ankkuriraudoituksen lisäämiseen keinoja on esimerkiksi suorien tankojen lisääminen, vaaka- ja pystylenkkien sijoittaminen limittäin pääraudoituksen kanssa tuen alueella tai hitsaamalla poikittaistankoja. (BY211 2013, s. 159)

2.4 Käyttörajatilan laskenta

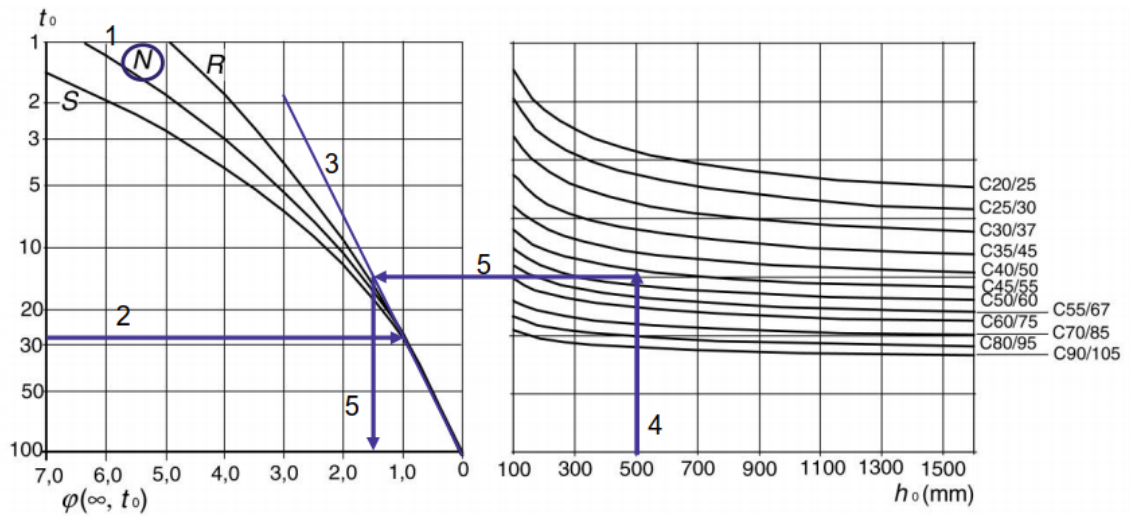
Käyttörajatilassa rakenteen on tarkoitus täyttää sille asetetut käyttökelpoisuusvaatimukset suunnittelun käyttöiän ajaksi, kun sitä rasittaa tavallisissa olosuhteissa vaikuttavat kuormat. Näitä käyttökelpoisuusvaatimuksia on määritelty mm. rakenteen taipumalle, halkeamaleveydelle ja jännityksille. Käyttörajatila eroaa murtorajatilan laskennasta siten, että käyttörajatilassa käytetään kuormitukselle ja materiaaliominaisuuksille ominaisarvoja eli kuormitusyhdistelyssä osavarmuuskertoimet saavat arvon 1. Käyttörajatilan mitoitus tehdään aina murtorajatilan jälkeen, joten rakenteelle on jo määritetty esimerkiksi materiaalilujuudet, raudoituksen määrä ja poikkileikkauksen mitat b leveys, h korkeus ja tehollinen korkeus d .

Käyttörajatilassa on kolme erilaista kuormitusyhdistelmää: ominaisyhdistelmä, tavallinen yhdistelmä ja pitkäaikainen yhdistelmä. Kuormitusyhdistelmille on määritelty eri osavarmuuskertoimia ψ hyöty-, lumi- ja tuulikuormille Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-1 (2011). Yhdistelmissä on erilaisia arvoja liittyen esimerkiksi betonin ajasta riippuvista ominaisuuksista, kuten kutistuminen ja viruma. Pitkäaikaistarkastelussa viruma huomioidaan laskennassa virumaluvun $\varphi(t, t_0)$ avulla ja sen määrittämiseen voidaan käyttää graafista menetelmää, jossa tarvitaan tietää käytetty sementtilaatu, kuormituksen alkamisajankohta, betonin lujuus ja muunnettu paksuus. Muunnettu paksuus h_0 lasketaan kaavalla

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}, \quad (39)$$

jossa A_c on poikkileikkauksen pinta-ala ja u on piirin yhteenlaskettu pituus, missä kuivumista voi tapahtua.

Näiden tietojen avulla luetaan virumaluku kuvan 3 mukaisella tavalla.



Kuva 3: Virumaluvun määrittäminen graafisesti (Lindberg 2021a)

Ensin lähdetään sementtilaadusta eli onko sementti N (normal), R (Rapid) vai S (slow). Tämän jälkeen valitaan ajankohta t_0 , jolla kuormitus alkaa rasittamaan palkkia, ja tästä pysty akselin arvosta vedetään viiva valitun sementtilaadun käyrään ja piirretään siitä pisteestä suora origoon. Lasketun muunnetun paksuuden avulla saadaan kuvan 3 oikeanpuoleisesta taulukosta betonilujuuden käyrän avulla kohta, josta piirretään vaakasuora kolmannessa kohdassa piirrettyyn suoraan. Virumaluku $\varphi(\infty, t_0)$ saadaan vetämällä viiva tästä pisteestä suoraan alas.

Saadulla virumaluvulla pienennetään kimmokerrointa

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)}, \quad (40)$$

jossa E_{cm} on betonin lyhytaikainen kimmokerroin ja $E_{c,eff}$ on betonin pitkäaikainen kimmokerroin viruma huomioiden (BY210 2008, s. 325). Kutistuman vaikutusta palkin taipumaan esitetään luvussa 2.4.2.

Kimmokerroin E_{cm} laskentaan tarvitaan betonin puristuslujuuden keskiarvo f_{cm} , joka saadaan

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}. \quad (41)$$

Tämän avulla kyseiselle betonille kimmokertoimeksi (lyhytaikainen) tulee

$$E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}. \quad (\text{BY210 2008, s. 33-36}) \quad (42)$$

Käyttörajatilassa rakenteen poikkileikkaus on joko halkeamattomassa tai haljenneessa tilassa. Kummallekin tilalle on omanlaiset laskentakaavat. Jännitystarkastelun ja taipuman laskennassa voidaan poikkileikkauksen olettaa olevan haljenneessa tilassa, kun betonin vetojännitys on ylittänyt betonin keskimääräisen vetolujuuden f_{ctm} . Tilan selvittämiseen on määritetty halkeilumomentti M_{cr}

$$M_{cr} = f_{ctm} W_e, \quad (43)$$

jossa W_e on poikkileikkauksen kimmainen taivutusvastus (BY210 2008, s. 323).

2.4.1 Jännitystarkastelut

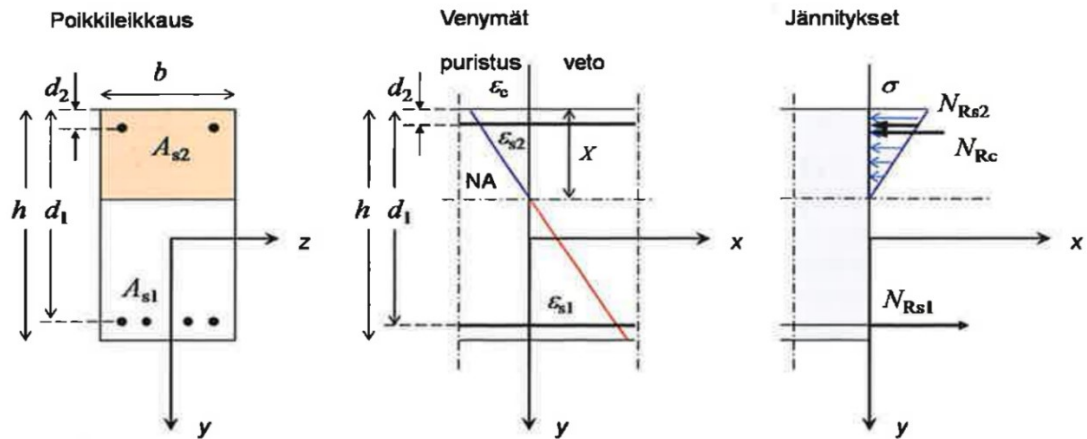
Eurokoodissa on asetettu betonin puristusjännitykselle ja raudoituksen vetojännitykselle raja-arvoja taulukon 2 mukaan.

Taulukko 2: Eurokoodin kansallisen liitteen määrittävät raja-arvot jännityksille (BY211 2013, s. 210)

Suure	Kuorma		
	Ominaiskuormat	Pitkäaikaiset kuormat	Pakkomuodonmuutokset
Betonin puristusjännitys	$0,6 f_{ck}$	$0,45 f_{ck}$	-
Raudoituksen vetojännitys	$0,6 f_{yk}$	-	$0,8 f_{yk}$

Betonin puristusjännityksen raja-arvo ominaiskuormille on rajattu käytettäväksi rasitusluokissa XD (kloridit muusta kuin merivedestä), XF (jäätymissulamisrasitus) ja XS (merivesi), mutta rajausta suositellaan käyttämään kaikissa rasitusluokissa jännitysten suuntaisten halkeamien välttämiseksi (BY60 2008, s.88).

Tutkimuksessa käydään läpi haljenneen tilan laskentakaavat, sillä tutkimus käsittelee raskaasti kuormitettua palkkia, jolloin voidaan olettaa, että rakenne on halkeillut. Kuvassa 4 on esitetty haljenneen poikkileikkauksen venymä- ja jännitystila sekä käytettävät merkinnät laskennassa käytettäville suureille.



Kuva 4: Haljenneen poikkileikkauksen jännitys- ja venymätilat (BY211 2013, s. 208)

Haljenneen poikkileikkauksen jännitystilojen laskentaa varten täytyy laskea puristusvyöhykkeen korkeus X_{II} , jossa alaindeksi II kuvaa haljennutta tilaa. Se saadaan kaavalla

$$X_{II} = \frac{1}{b} \{ [(\alpha_e A_{s1} + (\alpha_e - 1) A_{s2})^2 + 2b(\alpha_e d_1 A_{s1} + (\alpha_e - 1) d_2 A_{s2})]^{0.5} - (\alpha_e A_{s1} + (\alpha_e - 1) A_{s2}) \}, \quad (44)$$

jossa b on poikkileikkauksen leveys, α_e on kimmokerrointen suhde, A_{s1} on vetoraidoituksen pinta-ala, A_{s2} on puristusraudoituksen pinta-ala, d_1 on tehollinen korkeus veto-raudoitukseen ja d_2 on puristusraudoituksen etäisyys puristetusta reunasta. Kimmokerrotoimien suhde α_e on teräksen kimmokerroin jaettuna betonin kimmokertoimella E_s/E_c . (BY211 2013, s. 207–208)

Halkeilleen poikkileikkauksen jäyhyysmomentti I_{II} saadaan kaavalla

$$I_{II} = \frac{bX_{II}^3}{3} + \alpha_e A_{s1}(d_1 - X_{II})^2 + (\alpha_e - 1) A_{s2}(d_2 - X_{II})^2. \quad (45)$$

Nyt betonin puristusjännitys σ_c reunalla voidaan esittää kaavalla

$$\sigma_c = M_{Ek} \frac{X_{II}}{I_{II}}. \quad (46)$$

Puristusvyöhykkeellä sijaitsevien raudoitusten jännitykset saadaan kaavalla

$$\sigma_{s2} = \alpha_e \frac{M_{Ek}}{I_{II}} (d_2 - X_{II}). \quad (47)$$

Haljenneen osan raudoituksen vetojännityksen ratkaisemiseksi voidaan laskea ensin sisäinen momenttivarsi

$$z_{II} = d_1 - \frac{X_{II}}{3}. \quad (48)$$

Nyt kun tiedetään sisäinen momenttivarsi, niin haljenneen puolen raudoituksen vetojännitykseksi saadaan

$$\sigma_{s1} = \frac{M_{Ek}}{A_s z_{II}}. \quad (49)$$

Lopuksi tarkastetaan ylittääkö saadut jännitysarvot taulukon 2 mukaan lasketut raja-arvot materiaaleille. (BY211 2013, s. 207–209)

2.4.2 Halkeamaleveys

Rakenteisiin syntyy halkeamia, kun vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Tämän voi aiheuttaa ulkoinen kuormitus tai sisäiset pakkovoimat, joita syntyy esimerkiksi betonin kutistumisen tai lämpöliikkeiden johdosta (BY202 1982, s. 185). Halkeamaleveydelle on asetettu raja-arvot Eurokoodissa pitkäaikaisyhdistelylle ja Suomen kansallisen liitteen arvot on esitetty taulukossa 3. Raja-arvot ovat määritetty, jotta rakenne toteuttaa sille asetetut säilyvyysvaatimukset ja säilyttää ulkonäön.

Taulukko 3: Halkeamaleveyden raja-arvot rasitusluokittain (BY211 2013, s. 211)

Rasitusluokka	Halkeamaleveys w_{max} (mm) pitkäaikainen kuormitusyhdistelmä
X0, XC1	0,4
XC2, XC3, XC4, XD1, XS1	0,3
XD2, XD3, XS2, XS3	0,2

Halkeamaleveyden mitoitus perustuu ehtoon

$$w_k \leq w_{max}, \quad (50)$$

jossa w_{max} on taulukossa 2 määritetty raja-arvo halkeamaleveydelle ja w_k on rakenteelle lasketun halkeaman leveys. Halkeamaleveys w_k lasketaan kaavalla

$$w_k = S_{r,max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), \quad (51)$$

jossa $S_{r,max}$ on kahden halkeaman välin maksimiarvo rakenteessa, ϵ_{sm} raudoituksen venymä ja ϵ_{cm} on betonin keskimääräinen venymä halkeamien välillä (BY211 2013, s. 212).

Halkeamavälin maksimiarvo $S_{r,max}$ saadaan kaavasta

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}}, \quad (52)$$

jossa k_1 ottaa huomioon raudoituksen tartuntaominaisuudet, k_2 ottaa huomioon rakenteen jännitys jakauman, k_3 ja k_4 ovat kansallisesti valittavia parametrejä, c on betonipeitteen arvo, ϕ on raudoituksen tankopaksuus ja $\rho_{p,eff}$ on tehollinen raudoitussuhde.

Tehollisen raudoitussuhteen ratkaisemiseksi lasketaan ensin poikkileikkauksen tehollisen vetoalueen korkeus $h_{c,eff}$ käyttäen tehollista korkeutta d , poikkileikkauksen korkeutta h tai halkeamattoman/haljenneen tilan puristusvyöhykkeen korkeutta X

$$h_{c,eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,5(h - d) \\ \frac{h-X}{3} \\ \frac{h}{2} \end{array} \right. . \quad (53)$$

Tällä tehollisella vetoalueen korkeudella saadaan tehollisen vetoalueen pinta-ala $A_{c,eff}$

$$A_{c,eff} = bh_{c,eff}. \quad (54)$$

Tehollinen raudoitussuhde saadaan nyt laskettua

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}, \quad (55)$$

jossa A_s on vetoalueella olevan pääraudoituksen pinta-ala. (BY210 2008; BY211 2013)

Raudoituksen ja betonin venymien erot halkeamavälissä $\epsilon_{cm} - \epsilon_{sm}$ lasketaan kaavalla

$$\epsilon_{cm} - \epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s}, \quad (56)$$

jossa σ_s on raudoituksen jännitys halkeamassa, k_t on kuormituksen vaikutusajasta riippuva kerroin, $f_{ct,eff}$ betonin vetolujuuden tehollinen arvo, jonka arvona käytetään yleensä f_{ctm} , α_e on kimmokerrointen suhde $\frac{E_s}{E_{cm,eff}}$ ja E_s on raudoituksen kimmokerroin (BY210 2008, s. 360–361).

Nyt voidaan laskea halkeamaleveyden arvo w_k kaavalla (49) ja tarkistaa toteuttaako se kaavan (48) mitoitus ehdon. Siinä tapauksessa, jos ehto ei toteudu niin halkeamaleveyttä täytyy pienentää ja siihen on keinoja esimerkiksi lisätä raudoitusmäärää.

2.4.3 Taipuma

Taipumamitoituksen periaatteena toimii sääntö, ettei taipumat saa olla niin suuria, että se aiheuttaa rakenteeseen ulkonäköhaittoja tai haittaa rakenteen toimintaa. Näitä on esimerkiksi julkisivujen ja pinnoitteiden vaurioita, lattioiden tasaisuus ja säilyvyyden huononemista. (BY210 2008; BY211 2013)

Betoninormeissa on määritelty taipuman raja-arvoksi pitkäaikaisilla kuormilla

$$a_{max} = \frac{L}{250}, \quad (57)$$

jossa L on rakenteen jännemitta.

Rakenteeseen taipumaa aiheuttaa ulkoinen kuormitus, kutistuma ja viruma. Viruma huomioidaan pitkäaikaisyhdistelyssä kimmokertoimen pienentämisellä, joka on esitetty luvussa 2.4.

Taipuman arvo palkille lasketaan kaavasta

$$a = KL^2 \frac{1}{r}, \quad (58)$$

jossa K on tuennasta ja kuormituksesta riippuva kerroin ja $\frac{1}{r}$ on palkin kaarevuus. (BY211 2013, s. 228)

Kuormituksen tuomaan kaarevuuden arvoon vaikuttaa taivutusmomentti M_{Ed} , vallitseva kimmokerroin E_{cm} tai $E_{cm,eff}$, kun viruma otetaan huomioon ja luvussa 2.4.1 esitetty poikkileikkauksen jäyhyysmomentti I . Tutkimuksen palkki on raskaasti kuormitettu, joten oletetaan että rakenne on haljenneessa tilassa, jolloin sen kaarevuudeksi saadaan

$$\frac{1}{r} = \frac{M_{Ed}}{E_{cm,eff} I}. \quad (59)$$

Raudoitus estää betonin vapaata kutistumista, joka aiheuttaa siihen vetojäännityksiä ja sitä myötä taipumaa. Kutistumisen aiheuttama taipuma lasketaan kaavalla

$$a_{cs} = K_{cs} L^2 \frac{1}{r_{cs}}, \quad (60)$$

jossa K_{cs} on momenttijakaumakerroin kutistumalle ja sen arvo on 0,125 ja $\frac{1}{r_{cs}}$ on kutistuman aiheuttama kaarevuus, joka saadaan

$$\frac{1}{r_{cs}} = \epsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I}, \quad (61)$$

jossa ϵ_{cs} on kutistuman aiheuttama vapaa muodonmuutos betonissa, S on raudoituksen staattinen momentti ja I on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti.

Kokonaistaipuma on tällöin

$$a_{tot} = a + a_{cs}. \quad (62)$$

Tarkastetaan toteuttaako kokonaistaipuma mitoitus ehdon

$$a_{tot} \leq a_{max}. \quad (63)$$

Jos ehto ei toteudu täytyy palkkia muuttaa esimerkiksi kasvattamalla palkin korkeutta, joka lisää palkin taivutusjäykkyyttä ja pienentää taipumaa.

3. MITOITUS

Tässä kappaleessa mitoitetaan esimerkkitilanteeseen kaksi teräsbetonipalkin poikkileikkausta siten, että puristuslujuutta kasvatetaan toisessa puristusraudoituksella ja toisessa poikkileikkauksen korkeutta muuttamalla. Alaluvussa 3.1 kuvataan esimerkki tilanne palkeille ja määritetään tuleva hyötykuorma sekä pysyvä kuorma yläpuoliselta rakenteelta, jotka ovat samat kummassakin. Näiden kuormien lisäksi palkeille lasketaan omasta painosta johtuva pysyvä kuorma. Kuormien ja rasitusten laskut suoritetaan Excel-taulukkoilla, jotka löytyvät liitteinä tässä työssä. Excel-taulukoiden laskennassa käytetyt kaavat ovat esitetty luvussa 2.

3.1 Esimerkkitalanne

Mitoitetaan raskaasti kuormitettu teräsbetonipalkki kylmän parkkihallin kattoon, jonka yläpuolella on varastotila, joka kuuluu hyötykuorma luokkaan E eli vähimmäishyötykuorma on $7,5 \text{ kN/m}^2$ (SFS-EN 1991-1-1 2011). Palkki toimii varastotilan lattian kannattimena. Tällöin seuraamusluokkana on CC2, josta saadaan kuormakertoimeksi $K_{FI} = 1,0$ ja toteutusluokka on 2. Näiden tietojen avulla saadaan betonilujuudeksi $\leq C50/60$ ja materiaaliosavarmuusluvuiksi perusarvot: betonille $\gamma_c = 1,50$ ja raudoitukselle $\gamma_s = 1,15$. Kyseessä kylmätilassa oleva rakenne, joka on kuitenkin suojattu sateelta niin karbonatisoitumisesta aiheutuvan korroosion takia palkki kuuluu rasitusluokkaan XC3.

Palkin jännevälän pituus on 7000 mm ja palkkijako parkkihallissa on 8500 mm. Palkin yläpuoliselta rakenteelta tuleva pysyvä kuorma on määritetty $g_{k,yr} = 5 \text{ kN/m}^2$ suuruiseksi, jotta palkin päällä voi olla ainakin ontelolaatta ja pintalaatta. Tämä jaetaan palkeille viivakuormaksi, jolloin siitä saadaan $g_{k,yr} = 5 \text{ kN/m}^2 * 8,5 \text{ m} = 42,5 \text{ kN/m}$. Muuttuvaa kuormaa on pelkästään hyötykuorma, joka palkille tulee yläpuolen varastotilasta. Hyötykuorman arvoa $q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2$ nostetaan arvoon 10 kN/m^2 , jotta palkeille saadaan riittävän suuri rasitus. Mukaan otetaan vielä ripustuskuorma $q_{k,rip} = 1 \text{ kN/m}^2$. Palkille tuleva ominaishyötykuorma metriä kohden saadaan, kun nämä kuormat yhdistetään ja kerrotaan palkkijaolla

$$q_k = 8,5 \text{ m} * \left(10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) = 93,5 \text{ kN/m}.$$

3.2 Palkkien mitoitus

Rakenteen pysyviä kuormia ovat palkin oma paino ja yläpuolisen rakenteen kuorma, joka esitettiin edellisessä luvussa. Palkin oman painon laskennassa käytän teräsbetonin tiheytenä 2500 kg/m^3 . Veto- ja puristusraudoitetun matalan palkin pituus on 7 metriä ja arvioitu palkin poikkileikkaus on $630 * 400 \text{ mm}^2$, jolloin palkin oman painon viivakuormaksi saadaan $g_{k,oma} = 9,81 \text{ m/s}^2 * 2500 \text{ kg/m}^3 * 0,63 \text{ m} * 0,4 \text{ m} = 6,2 \text{ kN/m}$. Pelkäämään vetoraudoitetun palkin arvioitun poikkileikkauksen mitat ovat $880 * 400 \text{ mm}^2$, joten sen palkin oma paino on $g_{k,oma} = 9,81 \text{ m/s}^2 * 2500 \text{ kg/m}^3 * 0,88 \text{ m} * 0,4 \text{ m} = 8,63 \text{ kN/m}$.

Murtorajatilassa tehdään kuormitusyhdistely saaduille pysyville kuormille ja edellisen alaluvun ominaiskuormalle q_k taulukon 1 mukaisilla osavarmuuskertoimilla siten, että saadaan suurin mahdollinen kuormitus palkille. Kummallekin tilanteelle mitoittava kuormitusyhdistely murtorajatilassa on

$$p_d = 1,15 * (g_{k,oma} + g_{k,yr}) + 1,5 * q_k.$$

Käyttöraajatilassa palkit tutkitaan kahdella kuormitusyhdistelyllä: ominais- sekä pitkäaikaistapauksissa. Ominaisyhdistelyssä palkilta tarkastetaan vain raudoitusten ja betonin jännitykset ja pitkäaikaisyhdistelyssä jännitysten lisäksi tarkastetaan taipuma ja halkeamaleveys. Käyttöraajatilassa tarkasteluihin tarvitaan palkkia rasittava taivutusmomentin mitoitusarvo ominaisyhdistelyssä ja pitkäaikaisyhdistelyssä. Ominaisyhdistelyssä kuormien osavarmuuskertoimet ovat 1 ja pitkäaikaisyhdistelyssä hyötykuormaa pienennetään luokan E (varastotilat) pitkäaikaiskertoimella $\psi_2 = 0,8$.

Näiden kuormitusyhdistelyjen arvojen avulla lasketaan palkeille mitoittavat taivutusmomentit M_{ed} (murtorajatila), M_{Ek} (ominaisyhdistely) ja M_{Ek2} (pitkäaikaisyhdistely) sekä murtorajatilassa vielä leikkausvoima V_{ed} statiikan kaavoilla. Maksimi taivutusmomentti on tasaisesti kuormitetulla yksiaukkoisella suorakaidepalkilla arvoltaan $M_{max} = pL^2/8$, jossa p on rasittava tasainen kuormitus ja L jänneväli. Suurin taivutusmomentin arvo sijaitsee palkin keskellä. Suurimmat leikkausvoimat tulevat yksiaukkoiselle palkille tuille ja siellä leikkausvoiman suuruus on yhtä suuri kuin tuilta tuleva tukireaktio. Tasaisesti kuormitetun yksiaukkoisen palkin mitoittava leikkausvoiman suuruus on $V_{max} = pL/2$. (Salmi & Pajunen 2018, s. 442) Mitoittavana leikkausvoimana saisi käyttää leikkausvoiman arvoa etäisyyden d päässä tuen reunasta, mutta tässä työssä käytetään suurinta leikkausvoimaa.

Näillä kaavoilla on laskettu kummallekin palkille kullekin kuormitusyhdistelylle mitoittavat rasitukset ja niiden avulla on palkeille suoritettu mitoitus murtorajatilassa sekä tehty käyttörajatilan tarkastelut liitteissä A ja B. Liitteestä A saadaan veto- ja puristusraudoitetun poikkileikkauksen mitoiksi $630 * 400 \text{ mm}^2$ ja betonin lujuudeksi C45/55. Vetoraudoitusta tähän poikkileikkaukseen tulee kahdeksan kappaletta T32 kokoista rautaa ja puristuspuolelle tulee neljä kappaletta T25 rautaa. Leikkauskestävyyteen palkkiin tulee hakaraudoitus 2-leikkeinen T10 k45. Eli haan raudan halkaisija 10 mm ja hakajako 45 mm koko palkin mitalle. Ankkurointiraudoitukseksi tulee kumpaankin päähän tukien päälle kaksi T12 2-leikkeistä vaakalenkkiä ja kolme T12 pystylenkkiä. Liitteessä A on esitetty myös veto- ja puristusraudoitetun poikkileikkauksen käyttörajatilatarkastelut, joiden tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4: Veto- ja puristusraudoitetun poikkileikkauksen käyttörajatilatarkastelut

Tarkastelu	Raja-arvo	Tulos	Yksikkö
Betonin puristusjännitys (ominais)	31,5*	30,6	MPa
Betonin puristusjännitys (pitkäaikais)	20,3	18,2	MPa
Vetoraudoituksen jännitys (ominais)	300,0	273,9	MPa
Vetoraudoituksen jännitys (pitkäaikais)	300,0	252,9	MPa
Puristusraudoituksen jännitys (ominais)	300,0	-131,8	MPa
Puristusraudoituksen jännitys (pitkäaikais)	300,0	-242,3	MPa
Halkeamaleveys	0,30	0,17	mm
Taipuma	28,0	26,7	mm

*Ei päästy suositeltuun raja-arvoon $0,6 * f_{ck}$, joten kasvatettu raja-arvoksi $0,7 * f_{ck}$

Liitteestä B saadaan samat tiedot pelkälle vetoraudoitetulle poikkileikkaukselle. Poikkileikkaus mitoiksi tuli $880 * 400 \text{ mm}^2$ ja betonin lujuudeksi C40/50. Vetoraudoitusta tulee viiden T32 raudan verran ja hakaraudoitukseksi tulee 2-leikkeinen T10 k65 päädyissä ja 2-leikkeinen T10 k350 palkin keskellä 1200 millimetrin matkalla. Ankkurointiraudoitukseksi tulee kaksi T12 2-leikkeistä vaakalenkkiä ja neljä T12 pystylenkkiä kummankin tuen päälle. Liitteen B lopussa on myös käyttörajatilan tarkastelut, joiden tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5: Vetoraudoitetun poikkileikkauksen käyttörajatilatarkastelut

Tarkastelu	Raja-arvo	Tulos	Yksikkö
Betonin puristusjännitys (ominais)	24,0	23,7	MPa
Betonin puristusjännitys (pitkäaikais)	18,0	14,6	MPa
Vetoraudoituksen jännitys (ominais)	300,0	300,0	MPa
Vetoraudoituksen jännitys (pitkäaikais)	300,0	277,2	MPa
Halkeamaleveys	0,30	0,24	mm
Taipuma	28,0	24,1	mm

Taulukoista 4 ja 5 nähdään, että kummankin palkin mitoittava tekijä on ominaisyhdistelyn jännitystarkastelu. Veto- ja puristusraudoitetussa poikkileikkauksessa se on betonin puristusjännitys ja pelkässä vetoraudoitetussa poikkileikkauksessa vetoraudoituksen jännitys on poikkileikkauksen määrittävä tekijä.

3.3 Huomioita palkkien mitoituksesta

Huomioita veto- ja puristusraudoitetun palkin mitoituksessa

Käyttörajan tarkasteluissa ilmeni, että ominaisyhdistelyn kuormilla betonin puristusjännitys nousee matalalla raskaasti kuormitetulla palkilla todella korkeaksi. Täten tässä tutkimuksessa normeissa määritettyyn taulukossa 2 ilmoitettuun raja-arvoon $0,6 * f_{ck}$ ei päästy, vaan hieman korkeampaan lukuun, joka oli noin luokkaa $0,7 * f_{ck}$. Siltanormissa on ilmoitettu, että riittävällä vaakasidonnalla betonin puristusjännityksen arvo saa nousta tuon $0,6 * f_{ck}$ yli, mutta siinä on suositeltu maksimissaan 10 % nousua (SFS-EN 1992-2 2009, s. 36). Sen sijaan rakennuksia koskevassa standardissa SFS-EN 1992-1-1 (2015) ei anneta vastaavaa suositusta. Täten palkkiin mitoitettiin koko mitalle runsas haka-määrä, joka toimii tässä tilanteessa riittävänä vaakasidontana.

Betonin puristusjännityksen hallitsemiseksi murtorajatilassa mitoitettujen puristusrautojen lisäksi käyttörajan tilassa mitoitettiin 3 T25 kokoista rautaa pelkälle puristuspuolelle, jotta raudoitus ottaa enemmän puristusta vastaan ja vähentää betonille tulevaa puristusjännityksen osaa. Lisätty raudoitus aiheuttaa palkin toimintaan mahdollisesti sen, että puristuspuolen raudoituksessa ei tapahdu myötöä. Laskennallisesti se tarkoittaa sitä, että niissä ei ylitä myötövenymän $\epsilon_{su} = 2,5 \text{ ‰}$ arvo, jolloin murtorajatilan laskennassa raudoituksen lujuutena tulisi käyttää myötölujuutta (435 MPa) pienempää arvoa, jonka laskenta on esitetty teoksessa BY211 (2013) sivuilla 108–109. Tätä lisättyä puristusraudoitusmäärää ei tarvitse lisätä vetoraudoitus puolelle, sillä maksimimomenttia vastaan momenttikapasiteetti on jo saavutettu murtorajatilassa.

Raudoitusten mitoituksessa murtorajatilassa on myös oletettu vetoraudoituksen venymäksi $\epsilon_s = 6,3 \text{ ‰}$, jotta saadaan lisättyä puristuserästen määrää, sillä tällöin puristuspuolel pinnan korkeus pienenee eli neutraaliakselin paikka nousee ja tämä kasvattaa samalla myös sisäistä momenttivartta z puristuspuolel pinnan ja vetoraudoituksen välillä. Puristuspuolel pinnan korkeuden pienenemisen johdosta betonin ottama puristusvoima pienenee, jolloin tarvitaan enemmän raudoitusta puristuspuolelle, jotta saadaan vetopuolen teräksiin tuo $6,3 \text{ ‰}$ venymä. Mitoituksessa käytetty suhteellisen puristuspuolel pinnan korkeuden arvo β on laskettu kaavalla

$$\beta = \frac{y}{d} = \frac{0,8 * X}{d}, \quad (64)$$

jossa X on puristuspuolen korkeus ja se saadaan kaavalla

$$X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_s + \epsilon_c} * d, \quad (65)$$

jossa betonin puristuman käytetään murtopuristuman arvoa $\epsilon_c = 3,5\%$. (Lindberg 2021b)

Käyttörajan tarkasteluissa taipuman laskennassa on oletettu, että johtuen puristuspuolen raudoituksesta palkissa ei tapahdu betonin vapaata kutistumista, jolloin kutistumasta ei aiheudu lisää kutistumaa palkille.

Huomioitavaa vetoraidoitettujen palkkien mitoituksessa

Käyttörajan taipuman tarkastelussa on betonin vapaaksi kutistumaksi oletettu 5 ‰, jolloin kutistumasta aiheutuu pieni taipuman lisäys. Toisin kuin puristusraudoitetussa palkissa, tässä ominaisyhdistelyssä betonin puristusjännityksen raja-arvona käytetään taulukossa 2 olevaa arvoa $0,6 * f_{ck}$. Normit eivät ole suoraan määrittäneet tätä raja-arvoa ominaisyhdistelylle rasitusluokassa XC (karbonatisoituminen), mutta suositus on käyttää sitä kaikissa rasitusluokissa jännitysten suuntaisten halkeamien välttämiseksi. Veto-raudoitettuun palkkiin lisätään asennusta varten puristuspuolen kulmiin 2 T16 terästä. Tämänkin poikkileikkauksen mitoittava tekijä oli käyttörajan betonin puristusjännitys ominaisyhdistelyssä kuten taulukosta 5 nähdään.

4. TUTKIMUKSEN TULOKSET

Tässä luvussa verrataan palkki vaihtoehtoja ensin rakenteellisesta näkökulmasta luvun 3 mitoitusten perusteella ja verrataan myös palkkien materiaalimäärien kautta kustannus- ja hiilijalanjälkieroja.

Palkkien mitoituksessa huomattiin matalien palkkien ongelma, koska varsinkin raskaasti kuormitettuna betonin puristusjännitykset nousevat suuriksi, jolloin niitä on vaikeaa saada normeissa määritettyihin raja-arvoihin. Mitoituksen ja toiminnallisuuden kannalta korkea pelkästään vetorausoitettu palkki on parempi ja varmempi vaihtoehto, sillä matalamman poikkileikkauksen mitoituksessa joutuu soveltamaan runsaasti, kuten luvussa 3.3 on kerrottu.

Vetorausoitettun poikkileikkauksen mitoitus sujui paljon helpommin ja vaivattomasti verraten puristusraudoitetun mitoitukseen. Rakenteena siis korkea poikkileikkaus on varmempi ja parempi vaihtoehto. Korkeamman pelkästään vetorausoitettun poikkileikkauksen haitat verrattuna matalaan puristusraudoitettuun on koko ja asennettavuus. Pienempää palkkia on helpompi valmistaa ja asentaa työmaalla. Matalampi poikkileikkaus on myös ulkonäöllisesti ja huoneen vapaan korkeuden kannalta parempi vaihtoehto.

4.1 Palkkien hiilidioksidipäästöt valmistuksessa

Hiilidioksidipäästöt näille palkeille suoritetaan sivuston CO2data.fi- verkkopalvelun avulla. CO2data.fi sivua pitää yllä ja vastaa Suomen ympäristökeskus SYKE ja sivusto on luotu ympäristöministeriön toimeksiannosta. Sivusto ilmoittaa rakennustuotteille mm. hiilijalanjäljen, hiilikädenjäljen, hukkaprosentit työmaalla ja kuljetuksen päästötietoja. Tässä työssä laskemme käytettävien rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen sivustolta saadun tiedon perusteella. CO2data.fi ilmoittaa hiilijalanjäljen yksikössä kg CO₂e/kg, joka kertoo montako kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia on yhdessä kilogrammassa kyseistä rakennusmateriaalia. Hiilidioksidiekvivalentti kuvaa kasvihuonekaasupäästöistä tulevaa ilmastoa lämmittävää vaikutusta (OpenCO2.net). Hiilijalanjäljen arvo ilmoitetaan konservatiivisena arvona rakentamisluvan hakemiseen.

Luvussa 3 mitoitettujen poikkileikkausten mittojen ja raudoitusten perusteella lasketaan kilomääräisesti, kuinka paljon niihin tulee sekä betonia että terästä. Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty palkkeihin tulevien raudoitusten ja betonin tilavuudet ja painot.

Betonin tiheytenä on käytetty 2400 kg/m^3 ja raudoituksille teräksen tiheyttä 7850 kg/m^3 .

Taulukko 6: Veto- ja puristusraudoitetun palkin raudoituksen ja betonin tilavuudet ja painot

	Halkaisija (mm)	Määrä	Pituus (mm)	Tilavuus (m^3)
Vetoraudoitus (T32)	32	5	6930	0,0279
Veto- ja puristusraudoitus (T25)	25	11	6930	0,0374
Pystylenkit (ankkurointi)	12	6	1430	0,0010
Vaakalenkit (ankkurointi)	12	4	1100	0,0005
Haat	10	154	1780	0,0215
Raudan tilavuus yhteensä				0,0883
Palkin tilavuus				1,764
Betonin tilavuus				1,676
Raudoituksen paino (kg)				693,0
Betonin paino (kg)				4021,7

Pelkässä vetoraudoitetussa palkissa on puristuspuolelle kumpaankin kulmaan lisätty T16 asennusteräksset.

Taulukko 7: Vetoraudoitetun palkin raudoituksen ja betonin tilavuudet ja paino

	Halkaisija (mm)	Määrä	Pituus (mm)	Tilavuus (m^3)
Vetoraudoitus	32	5	6930	0,0279
Puristuspuolelle asennusraudat	16	2	6930	0,0028
Pystylenkit (ankkurointi)	12	8	1680	0,0015
Vaakalenkit (ankkurointi)	12	4	1100	0,0005
Haat	10	92	2280	0,0165
Raudan tilavuus yhteensä				0,0491
Palkin tilavuus				2,464
Betonin tilavuus				2,415
Raudoituksen paino (kg)				385,8
Betonin paino (kg)				5795,6

Näiden tulosten avulla voidaan laskea palkin materiaaleille niiden hiilijalanjäljet. Veto- ja puristusraudoitetun palkin rauditus painoi yhteensä 693 kg ja CO2data.fi sivun mukaan harjateräs päästää $0,67 \text{ (kg CO}_2\text{e)/kg}$ kasvihuonekaasuja. Samassa palkissa on C45/55 lujuista betonia, jonka päästöistä ei ole CO2data.fi sivuilla annettu arvoa. C40/50 lujuisen valmisbetonin päästöjen arvo on $0,15 \text{ (kg CO}_2\text{e)/kg}$, joten C45/55 arviolta käytetään arvoa $0,17 \text{ (kg CO}_2\text{e)/kg}$. Täten puristusraudoitetulle poikkileikkaukselle päästöä tulee yhteensä betonista ja raudituksesta

$$4021,7 \text{ kg} * \frac{0,17(\text{kg CO}_2\text{e})}{\text{kg}} + 693 \text{ kg} * 0,67 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kg}} = 1148,0 (\text{kg CO}_2\text{e}).$$

Vetoraudoitetussa poikkileikkauksessa käytetään C40/50 lujista valmisbetonia, joten sen hiilijalanjäljen arvo on $0,15 (\text{kg CO}_2\text{e})/\text{kg}$. Täten tälle poikkileikkaukselle saadaan kokonaispäästöiksi

$$5795,6 \text{ kg} * 0,15 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{kg}} + 385,8 \text{ kg} * \frac{0,67(\text{kg CO}_2\text{e})}{\text{kg}} = 1127,8 (\text{kg CO}_2\text{e}).$$

Tuloksista huomataan, että vaikka puristusraudoitettu poikkileikkaus on huomattavasti pienempi ja siihen menee betonia vähemmän, niin silti sen hiilijalanjälki on hieman isompi. Tähän on syynä korkeampi lujuuksinen betoni sekä teräksen suhteellisesti paljon suurempi hiilidioksidipäästöarvo kuin betonilla. Ekologisuudenkin näkökulmasta matalampi puristusraudoitettu palkki on huonompi vaihtoehto.

4.2 Palkkien kustannukset

Kustannusten laskentaan vertailua varten hyödynnetään taulukoiden 6 ja 7 materiaalien painoja. Palkkien kustannukset tässä työssä koostuvat vain materiaaleista aiheutuvista kustannuksista. Logistiset kustannukset on oletettu palkeille samoiksi, kuten myös muotityöhön sekä raudoitukseen kuluvat ajat ja kustannukset. Oletetaan, että korkeamman vetoraudoitetun palkin muotityöhön kulunut suurempi työmäärä korvautuu puristusraudoitetun palkin ylimääräiseen raudoitustyöhön.

Betonin kustannusten vertailu suoritetaan taulukkojen 6 ja 7 betonin kuutiomäärillä sekä sivun kilpailutabetoni.fi hintalaskurilla, joka arvioi betonin hinnan betonityön, kuutiomäärän ja betonin lujouden perusteella (Kilpailutabetoni.fi 2022). Sivuston mukaan kuutio C40/50 lujista betonia kustantaa 150 euroa ja kuutio C45/55 betonia 160 euroa. Arvioitujen hinnat ovat pelkälle materiaalille eikä siinä oteta huomioon esimerkiksi kuljetusta, pumppausta ja betonitöitä. Raudoituksen kustannusta varten vertailtiin erään rautakaupan internet-sivustolla olevia erikokoisten harjaterästen hintoja ja arvioitiin niiden keskiarvojen avulla hinnaksi $2,51 \text{ e}/\text{kg}$. Raudoituksen hinnan arviointi on haastavaa nykymarkkinoiden hintojen runsaan nousun ja hintavaihteluiden eri tuottajien välillä, joten tässä käytetään vain karkeaa arviota harjateräksen kilohinnalle. Todellisuudessa raudoituksen hintaan vaikuttaa myös sen paksuus ja pituus.

Näiden tietojen avulla voidaan laskea kummallekin palkille arviot kustannuksista, jotka menevät materiaaleihin. Veto- ja puristusraudoitettuun palkkiin tulee betonia $1,676 \text{ m}^3$ ja käytetty betoni on C45/55. Raudoituksen paino on $693,0 \text{ kg}$, jolloin palkin materiaali kustannuksiksi saadaan

$$1,676 \text{ m}^3 * 160 \text{ e/m}^3 + 693,0 \text{ kg} * 2,51 \text{ e/kg} = 2007,59\text{e}.$$

Pelkässä vetorausoitettussa palkissa on $2,415 \text{ m}^3$ C40/50 lujuista betonia ja raudoituksen paino on 358,8 kg. Täten korkeamman poikkileikkauksen omaavan palkin materiaali kustannuksiksi saadaan

$$2,415 \text{ m}^3 * 150 \text{ e/m}^3 + 385,8\text{kg} * 2,51 \text{ e/kg} = 1330,61\text{e}.$$

Tuloksista huomataan, että kustannuksissa on reilu ero korkean pelkän vetorausoitettun palkin hyödyksi. Suurin syy tälle on maailman nykytilanteesta johtuvat erityisesti raudan toimitusongelmat ja vaikeudet saada materiaaleja. Maailmantilanne ei vaikuta betonin valmistukseen yhtä paljoa, sillä siihen tarvittavat materiaalit voidaan saada Suomesta. Hinnat materiaaleille ovat todella karkeita arvioita, mutta näillä saadaan suuntaa antava tulos, joka kertoo tämänhetkisen tilanteen. Tilanteen maailmalla jatkuessa teräksen hinta voi nousta vielä, joka lisää entuudestaan palkkien hintaeroa.

5. YHTEENVETO

Tutkimuksessa tutkittiin teräsbetonipalkkeja, jotka ovat raskaasti kuormitettuja, ja joiden kestävyyttä taivutusta vastaan parannetaan kahdella eri tavalla: kasvattamalla poikkileikkauksen kokoa tai lisäämällä puristusraudoitusta. Vertailua suoritettiin pääpainona rakenteen varmuus ja toiminta, mutta tutkimuksessa verrattiin myös palkkien valmistuksessa aiheutuvia ekologisia vaikutuksia ja taloudellisia kuluja. Tavoitteena oli saada selville, kumpi näistä ratkaisuista on parempi lisäämään teräsbetonipalkin taivutuskestävyyttä. Tutkimus rajattiin koskemaan yksiaukkoisia nivelellisiä teräsbetonipalkkeja, joiden poikkileikkaukset ovat suorakaiteita. Tutkimuksessa ei myös otettu huomioon palkkien palomitoitusta tai onnettomuustilanteita.

Tutkimuksen luvussa kaksi käsiteltiin palkkien toimintaa ja esitettiin perusteet mitoituksen murtorajatilassa sekä käyttörajatilantarkasteluihin. Laskennoissa käytetyt kaavat ovat eurokoodeissa määriteltujen standardien mukaiset. Kolmannessa luvussa suoritettiin laskentaesimerkki, jossa samaan kuormitustilanteeseen mitoitettiin kaksi erilaista palkkia. Toinen oli poikkileikkaukseltaan korkeampi ja toiseen lisättiin puristusraudoitus. Mitoituksen välivaiheet ja tulokset ovat esitettynä Excel-taulukoissa, jotka ovat työn liitteinä. Mitoituksen tuloksina saatiin korkeammaksi poikkileikkaukseksi $880 * 400 \text{ mm}^2$ ja betonin lujuudeksi C40/50, kun taas puristusraudoitetun poikkileikkauksen mitat olivat $630 * 400 \text{ mm}^2$ ja betonin lujuutena C45/55. Mitoituksen aikana huomattiin matalamman puristusraudoitetun palkin ongelmaksi raskaasta kuormituksesta tulevat korkeat jännitykset käyttörajatilassa. Sen mitoituksessa jouduttiin soveltamaan useaan otteeseen, jotta palkki saatiin läpi käyttörajatilantarkastelut. Tämä lisää rakenteen epävarmuutta ja toimintaa murtorajatilassa.

Korkeampi pelkästään vetoraudoitettu poikkileikkaus oli myös kustannuksiltaan ja hiilidioksidipäästöitään parempi vaihtoehto. Palkkien raudoitus on harjaterästä, jonka valmistuksessa vapautuu huomattavasti enemmän kasvihuonekaasuja kuin betonin valmistuksessa. Joten vaikka korkeassa palkissa on lähes kuutio enemmän betonimassaa, on puristusraudoitetulla palkilla niukasti isompi hiilijalanjälki. Samoin harjateräksen hinta maailman nykytilanteesta johtuen on nousussa verrattuna betoniin, joten puristusraudoitetun palkin materiaali kustannukset ovat isommat. Työn tuloksena saadaan, että taivutuskestävyyttä kannattaa parantaa poikkileikkauksen korkeutta kasvattamalla niin paljon, kuin kyseessä oleva tilanne antaa mahdollisuutta ja vasta sen jälkeen mitoittaa puristusraudoitus.

LÄHTEET

- BY202 (1982). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1. Suomen Betoniyhdistys ry. Jyväskylä. 242 s.
- BY210 (2008). Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 710 s.
- BY211 (2013). Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 254 s.
- BY60 (2008). Suunnitteluohje EC 2. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 209 s.
- Kerokoski, O. & Lindberg, N. (2021). Betonirakenteiden perusteet -kurssin luentomoniste. Tampereen Yliopisto. 230 s.
- Kilpailutabetoni.fi (2022). Artikkelit. Betonin hinta. Saatavissa (viitattu 28.5.2022): <https://www.kilpailutabetoni.fi/artikkelit/betonin-hinta/>
- Lindberg N. (2021a). RAK.RS.210. Opetus 5: Palkit taivutus. Luentomoniste. Tampereen yliopisto. 77 s.
- Lindberg N. (2021b). RAK.RS.210. Opetus 3: Materiaalit. Luentomoniste. Tampereen yliopisto. 77 s.
- OpenCO2.net -hiilijalanjälkialusta. Clonet Oy. Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://www.openco2.net/fi/taustaa>
- Rakentamisen päästötietokanta. Suomen Ympäristökeskus SYKE. Saatavissa (viitattu 12.4.2022): <https://co2data.fi/>.
- Salmi, T. & Pajunen, S. (2018). Lujuusoppi. Pressus Oy. Tampere. 462 s.
- SFS-EN 1991-1-1 (2011). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Suomen standardisoimisliitto. 72 s.
- SFS-EN 1991-1-7 (2015). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat. Suomen standardisoimisliitto. 118 s.
- SFS-EN 1992-1-1 (2015). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen standardisoimisliitto. 219 s.
- SFS-EN 1992-2 (2009). Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Betonisillat. Mitoittaminen ja yksityiskohtien suunnittelu. Suomen standardisoimisliitto. 87 s.
- Tilastokeskus (2021, joulukuu). Rakennuskustannusindeksi. 12 s. Saatavissa (viitattu 15.2.2022): https://www.stat.fi/til/rki/2021/12/rki_2021_12_2022-01-14_fi.pdf

United Nations Environment Programme (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi. Saatavissa (viitattu 15.2.2022): https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf

LIITTEET

Liite A: Veto- ja puristusraudoitetun palkin mitoitus

Liite B: Vetoraudoitetun palkin mitoitus

LIITE A: VETO- JA PURISTUSRAUDOITETUN PALKIN MITOITUS

Kuormat ja rasitukset

Jänneväli	L	7	m
Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Oman painon viivakuorma	$g_{k,oma}$	6,18	kN/m
Hyötykuorman viivakuorma	q_k	93,5	kN/m
Yläpuolisen rakenteen pysyvä viivakuorma	$g_{k,yr}$	42,5	kN/m
Murtorajatilan mitoittava kuormitusyhdistely	p_d	196,23	kNm
Käyttörajatilan ominaisyhdistely	p_k	142,18	kNm
Käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistely	p_{k2}	123,48	kNm
Mitoittava taivutusmomentti (MRT)	M_{Ed}	1201,92	kNm
Mitoittava leikkausvoima (MRT)	V_{Ed}	686,81	kN
Taivutusmomentti (KRT, ominais)	M_{Ek}	870,85	kNm
Taivutusmomentti (KRT, pitkäaikais)	M_{Ek2}	756,32	kNm
Pysyvä kuorma		5	kN/m^2
Palkkijako		8,5	m
Hyötykuorma (Luokka E)		10	kN/m^2
Ripustuskuorma		1	kN/m^2

Taivutusmitoitus

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin lujuusluokka		C45/55	MPa
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d	569	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ed}	1201,92	kNm
Suhteellinen momentti	μ	0,364	$\geq \mu_b$
	μ_b	0,358	Tarvitaan puristusraudoitus!
Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus	β	0,478	$> \beta_b=0,467$
Sisäinen momenttivarsi	z	433	mm
Vaadittava raudoitismäärä	$A_{s,vaad}$	6386	mm^2
Valittu tangon halkaisija		32	mm
Valittu tankomäärä		8	
Toteutunut raudoitismäärä	A_s	6434	mm^2
Vähimmäisraudoitismäärä 1	$A_{s,min}$	355	mm^2
Vähimmäisraudoitismäärä 2	$A_{s,min}$	296	mm^2

Puristusraudoitus

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu puristusraudoituksen paksuus	$\phi_{puristus}$	25	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	569	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ed}	1201,92	kNm
Betonin puristusvyöhykkeen kestävyys	M_{Rc}	809	kNm
Suhteellinen momentti	μ	0,364	$> \mu_{bd}$
	μ_{bd}	0,245	
Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus	β_{bd}	0,286	$<--$ Vetoraudoituksen venymä 6,3‰
Sisäinen momenttivarsi	z	488	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	57,5	mm
Puristusraudoitukselta vaadittava kestävyys	M_{Rsc}	393,2	kNm
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	1768	mm^2
Valittu puristusraudoituksen halkaisija		25	mm
Valittu tankomäärä		4	
Toteutunut puristusraudoitusmäärä	$A_{s2,tot}$	1963	mm^2
Vetoraudoituksen määrä	A_s	5777	mm^2
Valittu vetoraudoituksen halkaisija		32	mm
Vetoraudoituksen määrä		8	
Toteutunut vetoraudoitusmäärä	$A_{s,tot}$	6434	mm^2

Leikkausmitoitus

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d	569	mm
Mitoittava leikkausvoima	V_{Ed}	686,81	kN
Hakojen kaltevuus	α	90	$^{\circ}$
Puristussauvan kaltevuus	θ	45	$^{\circ}$
Sisäinen momenttivarsi	z	512,1	mm
Lujuuden pienennyskerroin	v	0,6	
Hakaraudoituksen mitoitusjännitys	f_{ywd}	400	MPa
Betonin puristuskestävyys	$V_{RD,max}$	1567	kN
Vaadittava leikkausraudoitus määrä	A_{sv}/s	3353	mm^2/m
Haan leikkeisyys	n	2	
Yhden haan pinta-ala		157	mm^2
Hakaväli	s	47	mm
Toteutettava hakaväli	k	45	mm
Toteutunut leikkausraudoitusmäärä		3456	mm^2
Minimiraudoitusmäärä	$A_{sv,min}/s$	429	mm^2/m
Toteutunut leikkausraudoitus		2-leikkeinen T10 k45	

Ankkurointirauditus

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Raudituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Pääraudoituksen halkaisija	ϕ_{pr}	25	mm
Pääraudoituksen määrä	A_s	6434	mm ²
Betonin mitoitusvetolujuus	f_{ctd}	1,5	MPa
Tartuntaolosuhde	n_1	1	
Kerroin raudituksen halkaisijasta	n_2	1	
Tartuntalujuus	f_{bd}	3,375	MPa
Mitoittava leikkausvoima	V_{Ed}	686,81	kN
Puristuspaarteen kulma	θ	45	
Hakaraudoituksen kaltevuuskulma	α	90	
Ankkuroitava vetovoima	F_{Ed}	343,4066	kN
Raudituksessa vaikuttava jännitys	σ_{sd}	53,4	MPa
Ankkurointipituuden perusarvo	$I_{b,rqd}$	98,8	mm
Ankkurointipituuden mitoitusarvo	I_b	98,8	mm
		29,7	mm
Minimiarvot vetoraudoitukselle	$I_{b,min}$	250	mm
		100	mm
		59,3	mm
Minimiarvot puristusraudoitukselle	$I_{b,min}$	250	mm
		100	mm
Määrävä ankkurointipituus		250	mm

Tukena 400x400 pilari -> ankkurointipituus tuella 200mm -> tarvitaan ankkurointirauditus

Rauditusmäärä ankkuroimaan vetovoima	$A_{s,vaad}$	789,8	mm ²
Valitaan kaksi T12 2-leikkeistä vaakalenkkiä ja 3 T12 pystylenkkiä tuille			
Toteutunut ankkurointiraudan määrä		791,7	mm ²

Jännitystarkastelut (Ominaisyhdistely)

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	53	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	36283	MPa
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	210000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	569	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	57,5	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ek}	870,85	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	6434	mm^2
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	3435	mm^2
Virumaluku (Kuva 3)	y	1,5	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	14513,3	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	14,5	
Kimmokertoimien suhde	α_e	5,8	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	218	mm
Jäyhyysmomentti	I_{II}	6386802715	mm^4
Betonin puristusjäännitys	σ_c	30,6	MPa
Puristusraudoituksen jäännitys	σ_{s2}	-131,8	MPa
Sisäinen momenttivarssi	z_{II}	494,2	mm
Haljenneen puolen raudoituksen jäännitys	σ_{s1}	273,9	MPa
Raja-arvo betonin puristusjäännitykselle		31,5	MPa
Raja-arvo raudoituksen vetojäännitykselle		300	MPa

Jännitystarkastelut (Pitkäaikainen)

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	53	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	36283	MPa
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	200000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	569	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	61	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ek}	756,32	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	6434	mm ²
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	1963	mm ²
Poikkileikkauksen pinta-ala	A_c	252000	mm ²
Kuivuvien sivujen piirin mitta	u	2060	mm
Muunnettu paksuus	h_0	245	mm
Virumaluku (Kuva 3)	γ	2	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	12094,4	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	16,5	
Kimmokertoimien suhde	α_e	5,5	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	313	mm
Jäyhyysmomentti	I_{II}	12998592954	mm ⁴
Betonin puristusjännitys	σ_c	18,2	MPa
Puristusraudoituksen jännitys	σ_{s2}	-242,3	MPa
Sisäinen momenttivarssi	z_{II}	464,7	mm
Haljenneen puolen raudoituksen jännitys	σ_{s1}	252,9	MPa

Raja-arvo betonin puristusjännitykselle		20,25	MPa
Raja-arvo raudoituksen vetojännitykselle		300	MPa

Halkeamaleveys

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonin vetolujuuden tehollinen arvo	f_{ctm}	3,80	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	53	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	36283	MPa
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	200000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	569	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	61	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ek2}	756,32	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	6434	mm^2
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	1963	mm^2
Poikkileikkauksen pinta-ala	A_c	252000	mm^2
Kuivuvien sivujen piirin mitta	u	2060	mm
Muunnettu paksuus	h_0	245	mm
Virumaluku (Kuva 3)	y	2	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	12094,4	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	16,5	
Kimmokertoimien suhde	α_e	5,5	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	313	mm
		152,5	mm
Tehollisen vetoalueen korkeus	$h_{c,eff}$	105,7	mm
		315	mm
Tehollisen vetoalueen pinta-ala	$A_{c,eff}$	42289,01	mm^2
Tehollinen raudoitussuhde	$\rho_{p,eff}$	0,15214	
Pitkäaikaisen kuorman vaikutus	k_t	0,4	
Haljenneen puolen raudoituksen jännitys	σ_{s1}	252,9	MPa
Venymien erot halkeamavälissä	$\epsilon_{cm} - \epsilon_{sm}$	0,00109	
Halkeamavälin maksimiarvo	$S_{r,max}$	154,8	mm
Halkeamaleveys	w_k	0,17	mm
Halkeamaleveyden raja-arvo	$w_{k,max}$	0,3	mm

Taipuma

Poikkileikkauksen korkeus	h	630	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Rakenteen jännemitta	L	7000	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	45	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	25,50	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	53	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	36283	MPa
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	200000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	569	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	61	mm
Mitoitettava taivutusmomentti	M_{EK2}	756,32	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	6434	mm^2
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	3435	mm^2
Virumaluku (Kuva 3)	γ	2	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	12094,4	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	16,5	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	292	mm
Jäyhyysmomentti	I_{II}	14331025584	mm^4
Palkin kaarevuus	$1/r$	4,36357E-06	$1/m$
Kuormasta aiheutuva taipuma	a	26,73	mm
Kutistuman aiheuttama kaarevuus	$1/r_{cs}$	0	
Kutistuman aiheuttama taipuma	a_{cs}	0,00	mm
Kokonaistaipuma	a_{tot}	26,73	mm
Taipuman raja-arvo (pitkäaikainen)	a_{max}	28	mm

LIITE B: VETORAUDOITETUN PALKIN MITOITUS

Kuormat ja rasitukset

Jänneväli	L	7	m
Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Oman painon viivakuorma	$g_{k,oma}$	8,63	kN/m
Hyötykuorman viivakuorma	q_k	93,5	kN/m
Yläpuolisen rakenteen pysyvä viivakuorma	$g_{k,yr}$	42,5	kN/m
Murtorajatilan mitoittava kuormitusyhdistely	p_d	199,05	kNm
Käyttörajatilan ominaisyhdistely	p_k	144,63	kNm
Käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistely	p_{k2}	125,93	kNm
Mitoittava taivutusmomentti (MRT)	M_{Ed}	1219,20	kNm
Mitoittava leikkausvoima (MRT)	V_{Ed}	696,68	kN
Taivutusmomentti (KRT, ominais)	M_{Ek}	885,88	kNm
Taivutusmomentti (KRT, pitkäaikais)	M_{Ek2}	771,34	kNm
Pysyvä kuorma		5	kN/m^2
Palkkijako		8,5	m
Hyötykuorma (Luokka E)		10	kN/m^2
Ripustuskuorma		1	kN/m^2

Taivutusmitoitus

Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin lujuusluokka		C40/50	MPa
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	40	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	22,67	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Raudituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d	819	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ed}	1219,20	kNm
Suhteellinen momentti	μ	0,200	$\leq \mu_b$
	μ_b	0,358	
Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus	B	0,226	$\leq 0,467$
Sisäinen momenttivarsi	z	726	mm
Vaadittava rauditusmäärä	$A_{s,vaad}$	3860	mm ²
Valittu tangon halkaisija		32	mm
Valittu tankomäärä		5	
Toteutunut rauditusmäärä	A_s	4021	mm ²
Vähimmäisraudoitusmäärä 1	$A_{s,min}$	511	mm ²
Vähimmäisraudoitusmäärä 2	$A_{s,min}$	426	mm ²

Leikkausmitoitus

Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	40	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	22,67	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Raudituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d	819	mm
Mitoittava leikkausvoima	V_{Ed}	696,68	kN
Hakojen kaltevuus	α	90	°
Puristussauvan kaltevuus	θ	45	°
Sisäinen momenttivarsi	z	737,1	mm
Lujuuden pienennyskerroin	v	0,6	
Hakaraudituksen mitoitusjännitys	f_{ywd}	400	MPa
Betonin puristuskestävyys	$V_{Rd,max}$	2005	kN
Vaadittava leikkausraudoitus määrä	A_{sv}/s	2363	mm ² /m
Haan leikkeisyys	n	2	
Yhden haan pinta-ala		157	mm ²
Hakaväli	s	66	mm
Toteutettava hakaväli	k	65	mm
Toteutunut leikkausraudoitusmäärä		2513	mm ²
Minimiraudoitusmäärä	$A_{sv,min}/s$	405	mm ² /m
Toteutunut leikkausraudoitus päädyissä		2-leikkeinen T10 k65	
Minimihakoja vastaava leikkausvoima	$V_{Ed,min}$	119,34	kN
Väli palkin keskellä minimihaoille		1200	mm
Hakaväli minimihaat		388	mm
Toteutunut leikkausraudoitus keskellä		471,2	mm ²
		2-leikkeinen T10 k350	

Ankkurointiraudoitus

Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	40	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	22,67	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Pääraudoituksen halkaisija	ϕ_{pr}	32	mm
Pääraudoituksen määrä	A_s	4021	mm ²
Betonin mitoitusvetolujuus	f_{ctd}	1,5	MPa
Tartuntaolosuhde	n_1	1	
Keroin raudoituksen halkaisijasta	n_2	1	
Tartuntalujuus	f_{bd}	3,375	MPa
Mitoittava leikkausvoima	V_{Ed}	696,68	kN
Puristuspaarteen kulma	θ	45	
Hakaraudoituksen kaltevuuskulma	α	90	
Ankkuroitava vetovoima	F_{Ed}	348,3423	kN
Raudoituksessa vaikuttava jännitys	σ_{sd}	86,6	MPa
Ankkurointipituuden perusarvo	$I_{b,rqd}$	205,3	mm
Ankkurointipituuden mitoitusarvo	I_b	205,3	mm
		61,6	mm
Minimiarvot vetorausoitukseen	$I_{b,min}$	320	mm
		100	mm
		123,2	mm
Minimiarvot puristusraudoitukselle	$I_{b,min}$	320	mm
		100	mm
Määrävä ankkurointipituus		250	mm

Tukena 400x400 pilari eli ankkurointipituus tuella vain 200mm -> tarvitaan ankkurointiraudoitus

Rauditusmäärä ankkuroimaan vetovoima	$A_{s,vaad}$	801,2	mm ²
Valitaan kaksi T12 2 – leikkeistä vaakalenkkiä ja 4 T12 pystylenkkiä tuille			
Toteutunut ankkurointiraudan määrä		904,8	mm ²

Jännitystarkastelut (Ominaisyhdistely)

Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	40	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	22,67	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	48	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	35220	MPa
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	200000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	819	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	0	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ek}	885,88	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	4021	mm^2
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	0	mm^2
Virumaluku (Kuva 3)	y	1,5	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	14088,2	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	14,2	
Kimmokertoimien suhde	α_e	5,7	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	254	mm
Jäyhysmomentti	I_{II}	9474340153	mm^4
Betonin puristusjännitys	σ_c	23,7	MPa
Puristusraudoituksen jännitys	σ_{s2}	-134,9	MPa
Sisäinen momenttivarssi	z_{II}	734,3	mm
Haljenneen puolen raudoituksen jännitys	σ_{s1}	300,0	MPa

Raja-arvo betonin puristusjännitykselle		24	MPa
Raja-arvo raudoituksen vetojännitykselle		300	MPa

Jännitystarkastelut (Pitkäaikainen)

Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	40	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	22,67	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	48	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	35220	MPa
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	200000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	819	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	0	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ek2}	771,34	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	4021	mm ²
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	0	mm ²
Poikkileikkauksen pinta-ala	A_c	352000	mm ²
Kuivuvien sivujen piirin mitta	u	2560	mm
Muunnettu paksuus	h_0	275	mm
Virumaluku (Kuva 3)	y	1,9	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	12145,0	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	16,5	
Kimmokertoimien suhde	α_e	5,7	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	381	mm
Jäyhyysmomentti	I_{II}	20078190521	mm ⁴
Betonin puristusjännitys	σ_c	14,6	MPa
Puristusraudoituksen jännitys	σ_{s2}	0,0	MPa
Sisäinen momenttivarsi	z_{II}	692,0	mm
Haljenneen puolen raudoituksen jännitys	σ_{s1}	277,2	MPa

Raja-arvo betonin puristusjännitykselle		18	MPa
Raja-arvo raudoituksen vetojännitykselle		300	MPa

Halkeamaleveys

Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	40	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	22,67	MPa
Betonin vetolujuuden tehollinen arvo	f_{ctm}	3,51	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	48	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	35220	MPa
Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	200000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	819	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	0	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ek2}	771,34	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	4021	mm ²
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	0	mm ²
Poikkileikkauksen pinta-ala	A_c	352000	mm ²
Kuivuvien sivujen piirin mitta	u	2560	mm
Muunnettu paksuus	h_0	275	mm
Virumaluku (Kuva 3)	y	2	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	11740,2	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	17,0	
Kimmokertoimien suhde	α_e	5,7	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	385	mm
		152,5	mm
Tehollisen vetoalueen korkeus	$h_{c,eff}$	164,9	mm
		440	mm
Tehollisen vetoalueen pinta-ala	$A_{c,eff}$	65948,64	mm ²
Tehollinen raudoitussuhde	$\rho_{p,eff}$	0,06098	
Pitkäaikaisen kuorman vaikutus	k_t	0,4	
Haljenneen puolen raudoituksen jännitys	σ_{s1}	277,8	MPa
Venymien erot halkeamavälissä	$\epsilon_{cm} - \epsilon_{sm}$	0,00115	
Halkeamavälin maksimiarvo	$S_{r,max}$	208,2	mm
Halkeamaleveys	w_k	0,24	mm
Halkeamaleveyden raja-arvo	$w_{k,max}$	0,3	mm

Taipuma

Poikkileikkauksen korkeus	h	880	mm
Poikkileikkauksen leveys	b	400	mm
Rakenteen jännemitta	L	7000	mm
Betonin ominaispuristuslujuus	f_{ck}	40	MPa
Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	f_{cd}	22,67	MPa
Betonipeitteen nimellisarvo	c	35	mm
Betonin puristuslujuuden keskiarvo	f_{cm}	48	MPa
Betonin kimmokerroin (lyhytaikainen)	E_{cm}	35220	MPa
Raudituksen myötölujuuden ominaisarvo	f_{yk}	500	MPa
Raudituksen myötölujuuden mitoitusarvo	f_{yd}	435	MPa
Teräksen kimmokerroin	E_s	200000	MPa
Arvioitu pääraudoituksen paksuus	ϕ_{pr}	32	mm
Arvioitu hakaraudoituksen paksuus	ϕ_{haka}	10	mm
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus	d_1	819	mm
Puristusraudoituksen tehollinen korkeus	d_2	0	mm
Mitoittava taivutusmomentti	M_{Ek2}	771,34	kNm
Vetoraudoituksen määrä	A_{s1}	4021	mm ²
Puristusraudoituksen määrä	A_{s2}	0	mm ²
Virumaluku (Kuva 3)	y	2	
Pitkäaikainen kimmokerroin	$E_{c,eff}$	11740,2	MPa
Pitkäaikainen kimmokertoimien suhde	$\alpha_{e,eff}$	17,0	
Puristusvyöhykkeen korkeus	X_{II}	385	mm
Jäyhyysmomentti	I_{II}	20511992982	mm ⁴
Palkin kaarevuus	$1/r$	3,20305E-06	1/m
Kuormasta aiheutuva taipuma	a	19,62	mm
Kutistuman aiheuttama kaarevuus	$1/r_{cs}$	7,24073E-07	1/m
Kutistuman aiheuttama taipuma	a_{cs}	4,43	mm
Kokonaistaipuma	a_{tot}	24,05	mm
Taipuman raja-arvo (pitkäaikainen)	a_{max}	28	mm