



Teräsbetonipalkin mitoitus ja ankkurointimitoitus

Janne Mehtänen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Rakennusalan työnjohdon tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennusalan työnjohdon tutkinto-ohjelma

MEHTÄNEN, JANNE

Teräsbetonipalkin mitoitus ja ankkurointimitoitus

Opinnäytetyö 78 sivua, joista liitteitä 11 sivua
Toukokuu 2020

Opinnäytetyön aiheena oli teräsbetonipalkin ja raudoitusten ankkuroinnin mitoitus Eurokoodin mukaan, jonka pohjalta tehtiin Excel-pohjainen laskentaohjelma toimeksiantoyritykselle. Toimeksiantajana toiminut Perustava Oy ehdotti aihetta, sillä yritys tarvitsi mitoitusväkalua raudoitusten ankkuroinnin mitoitukseen. Aiemmin yrityksellä oli käytössään taulukko, jossa oli määritetty erikokoisille tangoille mitoitettut ankkurointipituudet. Taulukon arvot oli laskettu suurimmalle mahdolliselle tangossa vaikuttavalle voimalle, jolloin terästä käytettiin tarpeettoman paljon. Ajatuksena oli, että laskentaohjelman avulla käytetyn teräksen määrää saadaan laskelmoitua alhaisemmaksi, ja näin ollen se tuottaisi myös taloudellista hyötyä.

Opinnäytetyössä esitellään yksiaukkoisen teräsbetonipalkin mitoitusta murtorajatilassa sekä teräksien ankkurointimitoitusta. Työssä selitetään lukijalle ankkurointimitoituksen perusteet ja vaihtoehtoisia ankkurointimenetelmiä. Työ tehtiin laadullista tutkimusmenetelmää käyttäen.

Tässä työssä esiteltyjen tietojen avulla pystytään suunnittelemaan teräsbetonipalkki murtorajatilassa leikkaukselle ja taivutukselle Eurokoodin mukaisesti. Työn avulla tehdyllä ohjelmalla voidaan myös mitoittaa palkin pääterästen ja leikkausraudoituksen vaatimat ankkurointipituudet. Työssä esitetään pääteräksien ankkurointi usealla eri menetelmällä.

Mitoitusväkalun hyödyt saadaan esille tarkastelemalla käytetyn teräksen määrää ennen ja jälkeen mitoitusväkalun käyttöönottoa. Ankkurointimitoituseriaate on kaikilla teräsbetonirakenteilla samanlainen, joten laskentaohjelmaa voitaisiin kehittää myös muille rakenteille.

Asiasanat: teräsbetoni, ankkurointimitoitus, eurokoodi, taivutusmitoitus, leikkausmitoitus, teräsbetonipalkki

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Construction Site Management

MEHTÄNEN, JANNE
Reinforced Concrete Beam Design and Anchor Design

Bachelor's thesis 78 pages, appendices 11 pages
May 2020

The objective of this thesis was to gather information about reinforced concrete beams and anchoring of reinforcement according to Eurocode. The main purpose of gathered information was to create guide for anchor designing and also create Excel-based calculator for the client of this assignment, Perustava Oy.

The theoretical part of the thesis reviews different features of steel and concrete, as well as the benefits of reinforced concrete. The theoretical part also reviews the effects of environmental stresses and conditions affecting to the structural designing.

The thesis presented the designing of simply supported reinforced concrete beam in the ultimate limit state, as well as the anchoring designing of steels. The purpose of the work was to explain to the reader the basics of anchoring designing and alternative anchoring methods. The work was done using a qualitative research method.

The anchoring dimensioning principle is similar for all reinforced concrete structures, so the calculation program could be developed for other structures as well.

Key words: Eurocode, reinforced concrete, bending force, cutting force, anchoring of reinforcement

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
1.1	TAUSTA.....	5
1.2	TAVOITTEET	5
2	TERÄSBETONIRAKENTEIDEN TOIMINTAPERIAATE	6
2.1	TERÄSBETONI.....	6
2.2	BETONITERÄS.....	6
2.2.1	BETONITERÄSLAADUT JA VAKIOKOOT	7
2.2.2	BETONITERÄKSEN TARTUNTAOMINAISUUDET	7
2.2.3	BETONITERÄKSEN LUJUUS	8
2.3	BETONI.....	9
3	TERÄSBETONIN SÄILYMINEN	13
3.1	KÄYTTÖIKÄ.....	13
3.2	RASITUSLUOKAT	14
3.3	BETONIPEITE	18
4	TERÄSBETONIPALKIN MITOITUS MURTORAJATILASSA.....	24
4.1	MITOITUS TAIVUTUKSELLE	24
4.2	MITOITUS LEIKKAUKSELLE	30
4.2.1	LEIKKAUSRAUDOITUKSEN MITOITUS	35
5	PAIKALLINEN PURISTUS.....	37
6	RAUDOITUKSEN ANKKUROINTI	39
6.1	ANKKUROINTIMITOITUS	40
6.2	PÄÄTERÄKSIEN ANKKUROINTI PALKIN PÄISSÄ.....	41
6.2.1	SUORAN TANGON ANKKUROINTIMITOITUS	41
6.2.2	TAIVUTETUT TANGOT	49
6.2.3	HITSATUT POIKITTAISET TANGOT.....	55
6.3	LEIKKAUSRAUDOITUKSEN ANKKUROINTI.....	58
6.4	LIMIJATKOKSET	59
6.5	ERILLISET KOUKUT JA LENKIT.....	63
6.6	PÄÄTERÄSTEN KATKAISUKOHDAT	63
7	POHDINTA	64
	LÄHTEET.....	66
	LIITTEET	67

LIITE 1. ESIMERKKILASKELMA 1

LIITE 2. ESIMERKKILASKELMA 2

1 JOHDANTO

1.1 TAUSTA

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi yksiaukkoisen vapaasti tuetun teräsbetonipalkin pääterästen mitoitus taivutukselle, leikkausraudoituksen mitoitus ja ankkurointipituuden mitoitus. Tämä mitoitustapa toimii myös teräsbetoniseinissä olevien aukkojen ylityspalkkien mitoitukseen. Seinäelementeissä aukkojen ylityspalkit ovat todellisuudessa jäykästi päistä kiinnitettyjä, mutta vapaasti tuetun palkin mitoitus antaa varmempia tuloksia.

1.2 TAVOITTEET

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Perustava Oy. Tavoitteena on luoda yritykselle selkeät ohjeet ankkurointipituuden mitoitukseen teräsbetonipalkeissa, ja tehdä helposti käytettävä Excel -pohjainen mitoitusohjelma ankkurointipituuden laskemiseen. Tavoitteena on myös tehdä raudoituspajalle tankojen taivutusohjeet, ja työmaan raudoittajille asennusohjeet riittävän betonipeitteen saavuttamiseksi. Ankkurointipituuden mitoituksella saadaan teräsmäärää optimoitua ja tämän kautta voidaan saada suuriakin säästöjä pitkällä aikavälillä. Teräsbetonielementeissä tukipinnat ovat usein lyhyitä, jolloin suoralla tangolla ankkurointi ei onnistu. Mitoitustyökalulla saadaan suunniteltua sopiva ankkurointimenetelmä tarkasti myös ongelmatilanteissa.

2 TERÄSBETONIRAKENTEIDEN TOIMINTAPERIAATE

2.1 TERÄSBETONI

Teräsbetonirakenne on rakenne, jossa betoni ja teräs mitoitetaan yhdessä kestämään rakenteelle tulevat rasitukset. Teräksen ja betonin yhteistoiminnan suurimmat hyödyt ovat betonin hyvä puristuskestävyys ja teräksen hyvä veto- ja taivutuskestävyys. Betoni myös suojaa raudoitusta korroosiolta sekä hidastaa raudoituksen lämpenemistä tulipalotilanteessa. Betonin ja teräksen lämmönjohtavuusarvot ovat lähes samansuuruiset, tämän ansiosta lämpötilaerot eivät aiheuta materiaalien välille muodonmuutosevoja ja sitä kautta ylimääräistä rasitusta. Rakenteen toiminnan kannalta on tärkeää, että muodonmuutokset ja jännitykset siirtyvät teräksen ja betonin välisen tartunnan vaikutuksesta betonista teräkselle ja päinvastoin. (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 263)

2.2 BETONITERÄS

Betoniteräksellä tarkoitetaan hitsattavaa harjakuvioitua terästä. Se valmistetaan kuumavalssaamalla tai kylmämuokkaamalla hiiliteräksestä, austeniittisesta teräksestä tai austeniittis-ferriittisestä (ruostumattomasta) teräksestä. (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 270)

Kuumavalssauksessa teräksen hitsattavuus paranee, kylmämuokatuilla teräksillä materiaalin lujuus nousee, mutta sitkeysominaisuudet pienenevät.

Betoniteräksen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat vetolujuus, sitkeys, myötölujuus, tartunta ja taivutettavuus. Muita ominaisuuksia ovat muun muassa hitsattavuus, väsymislujuus ja betoniterästen lujuus korkeissa lämpötiloissa. Teräksen ominaisuuksiin vaikuttaa pääasiassa sen kemiallinen koostumus ja rakenne. Koostumusta voidaan muuttaa erilaisilla seosaineilla ja epäpuhtauden määrällä. Rakennetta voidaan muuttaa lämpökäsittelyllä, kylmämuokkauksella ja pintakäsittelyllä. Yleisimmin käytettyjen betoniterästankojen ja -verkkojen lujuusluokka on 500 N/mm^2 ja vain noin 5% on lujuusluokan 700 N/mm^2 teräksiä. (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 271-272)

2.2.1 BETONITERÄSLAADUT JA VAKIOKOOT

Eurokoodissa on määritetty edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella teräkselle laatumerkinnot. Suomessa käytetään seuraavia betoniteräslaatuja:

A500HW/ B500B, A700HW, B500HW, B700HW, B600KX, S235JRG2, S355J0.

(Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by 210, 58)

Esimerkiksi A500HW selitettynä:

A = kuumavalssattu betoniteräs

500 = teräksen myötörajan ominaisarvo (f_{yk})

H = harjatanko

W = hitsattava laatu

(Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by 210, 57-58)

Yleiset Suomessa käytössä olevat betoniteräs koot (halkaisija): 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm ja 32 mm. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by 210, 59)

2.2.2 BETONITERÄKSEN TARTUNTAOMINAISUUDET

Yleisillä rakenneteräksillä kimmokerroin (kimmomoduuli) on $E=200\,000$ MPa. Betoniteräksillä käytetään kimmokertoimena $210\,000$ MPa, koska betoniterästen halkaisija määritetään metripainon kautta. Tangon tehollinen poikkipinta-ala on todellisuudessa alhaisempi, mikä on otettu huomioon betoniteräksen arvossa. (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 274)

Teräksen ja betonin välinen tartunta (f_R) riippuu poikittaisharjojen mitoista ja harjavälistä. Poikittaisharjan tehokkuuteen vaikuttavat harjan kyljen kaltevuuskulma, sekä poikittaisharjan vinous tangon pituusakseliin nähden. Tangon pinnan karheudella on myös pieni vaikutus tartuntaominaisuuksiin. Esimerkiksi on osoitettu, että ohut ja kiinteä pintaruoste parantaa tartuntaa. (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 275)

Betoniterästen tartuntaominaisuudet on tuotestandardeissa määritelty teräksen muotojen mittavaatimusten avulla. Tartunnan toimivuutta voidaan testata muun muassa ulosvetokokeella, jonka avulla voidaan tarkastella liukumaa ja maksimikuormaa. Mitä parempi tartunta, sitä pienempi liukuma. Betonin lujuus (erityisesti vetolujuus) vaikuttaa tartuntaan. Liukuma on lähes verrannollinen harjapinta-alan käänöslukuun. Suuri harjapinta-ala tarkoittaa, että liukuma on pieni. Mitä pienempi liukuma on, sitä pienempi on halkeamaleveys. (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 276)

2.2.3 BETONITERÄKSEN LUJUUS

Betoniteräksen mitoituslujuus lasketaan kaavalla

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{Y_S} \quad (1)$$

missä

f_{yk} = Teräksen myötölujuus [MPa]

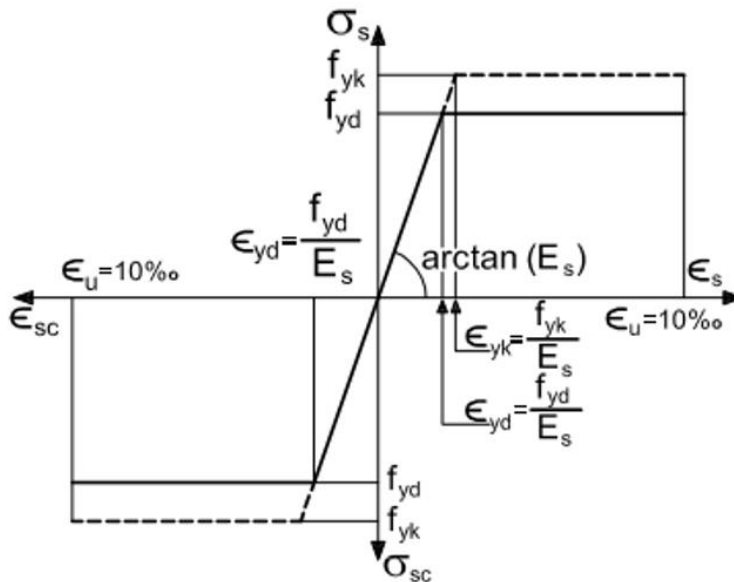
Y_S = teräksen materiaali osavarmuusluku, yleensä 1,15

Raudoituksen suhteellinen venymä lasketaan kaavasta

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{\varepsilon_s} \quad (2)$$

missä

ε_s = raudoituksen kimmokerroin

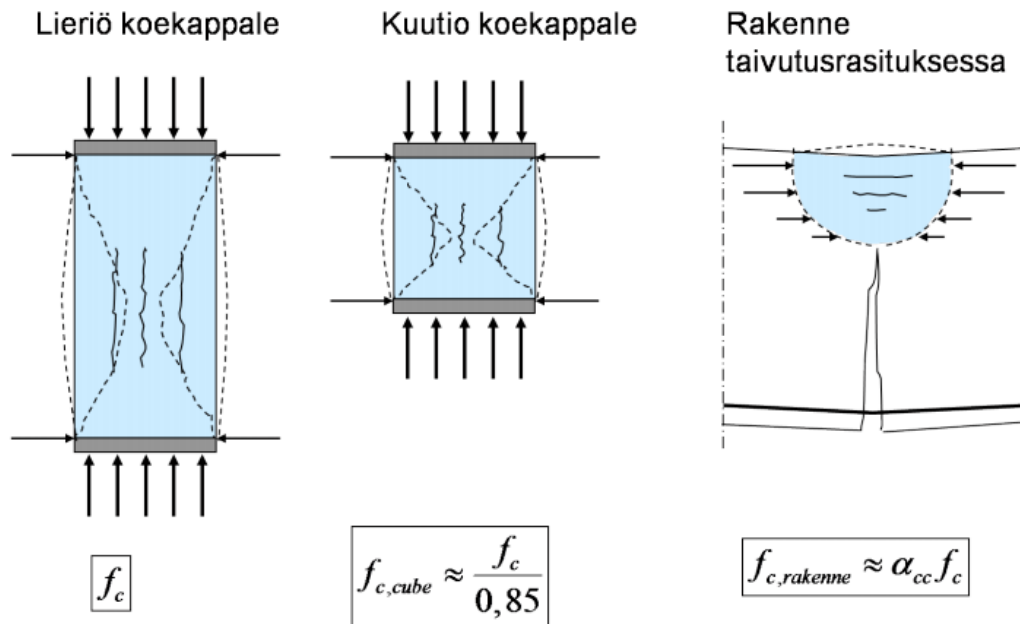


Kuvio 1: Betoniteräksen jännitys-muodonmuutoskuvio (RIL 131-2004, 29)

2.3 BETONI

Betonin tärkeimpiä ominaisuuksia ovat sen hyvä puristuslujuus ja säilyvyys. Betoni saadaan kestävämmän sille kohdistuvat rasitukset suhteuttamalla sen ainesosia. Puristuslujuus vaihtelee lujuusluokan mukaan. (Betoniteknii-
kirja 2018/by 201, 85)

Betonin lujuusluokan symbolina käytetään Eurokoodissa C (cylinder) -kirjainta. Esimerkiksi C30/37 merkinnässä 30 tarkoittaa ominaislieriölujuutta (f_{ck}) ja 37 ominaiskuutiolujuutta ($f_{ck,cube}$). Molempien yksikkö on MN/m^2 . $f_{ck,rakenne}$ taas määräytyy kuormitusalueen muodosta, mitoista ja mittasuhteista. (Betoniteknii-
kirja 2018/by 201, 85-86)



Kuvio 2. Koekappaleen muodon vaikutus betonin puristuslujuuteen (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 86)

Betonin puristuslujuuden keskiarvo 28 vrk iässä (f_{cm} = puristuslujuuden keskiarvo) lasketaan kaavalla

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \frac{\text{MN}^2}{\text{m}} \quad (3)$$

Puristuslujuuden mitoitusarvo f_{cd} lasketaan kaavalla

$$f_{cd} = acc * \frac{f_{ck}}{Y_c} \quad (4)$$

Y_c = betonin materiaaliosavarmuusluku, yleensä 1,5

acc = betonin puristuslujuuskerroin, Suomessa on sovittu käytettävän sen arvona 0,85

Betonin vetolujuus on noin 1/10 betonin puristuslujuudesta, mutta mitoituksessa käytettävä betonin vetolujuus noin 5-8% puristuslujuudesta. Betonin vetolujuus suhteessa betonin puristuslujuuteen on pienemmissä lujuusluokissa 8%, kun taas korkeissa lujuusluokissa 5%.

Betonin keskimääräinen vetolujuus 28 vuorokauden iässä lasketaan betonin lujuusluokan mukaan kaavalla

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} \text{ kun } f_{ck} \leq 50 \frac{\text{MN}^2}{\text{m}} \quad (5)$$

ja

$$f_{ctm} = 2,12 * \ln * (1 + 0,1 * f_{cm}) \text{ kun } f_{ck} > 50 \frac{\text{MN}^2}{\text{m}} \quad (6)$$

Kaavoista saatava arvo on vetolujuuden keskiarvo. Ominaislujuuden alaraja-arvo (5%) lasketaan kaavasta

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 * f_{ctm} \quad (7)$$

Ja yläraja-arvo (95%) kaavasta

$$f_{ctk,0,95} = 1,3 * f_{ctm} \quad (8)$$

Yläraja-arvoa käytetään vain harvoin, ja alaraja-arvo on yleensä yksinkertaistettu kaavoissa jättämällä prosentiosuutta esittävä luku 0,05 pois.

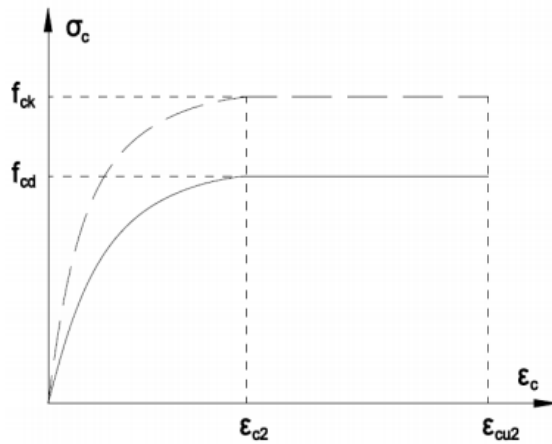
Murtorajatilamitoituksessa vetorasitus otetaan vastaan betoniteräksillä, mutta betonin vetolujuutta kuitenkin käytetään leikkaus- ja ankkurointimitoituksessa. Betonin vetolujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla

$$\frac{f_{ctd}}{Y_c} = act * f_{ctk,0,05} \quad (9)$$

jossa

Y_c = betonin materiaaliosavarmuusluku

act = betonin vetolujuuskerroin, Suomessa on sovittu käytettäväksi sen arvona 1,0. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 89-91)



Kuvio 3. Betonin jännitys-muodonmuutoskuvio (SFS-EN 1992-1-1/2015, 35-37)

Taulukko 1. Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Betonin lujuusluokka														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk, 0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{ct} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ϵ_{out} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Betonin lujuus- ja muodonmuutossuureista on tehty myös taulukko, joka helpottaa mitoitusta käsin laskettaessa. (SFS-EN 1992-1-1/2015, 30)

3 TERÄSBETONIN SÄILYMINEN

3.1 KÄYTTÖIKÄ

Käyttöiällä tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka ajan teräsbetonirakenteen on säilytettävä rakenteelliset ominaisuutensa. Rakenteen tulee toisin sanoen kestää suunnitellun käyttöiän verran ilman, että siihen tulee korjaustarvetta. Rakenteen tultua käyttöikänsä päähän, voidaan käyttöikää pidentää korjaustoimenpiteillä. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 99)

Jotta rakenne voidaan suunnitella niin, että se kestää suunnitellun käyttöiän, on tiedettävä ympäristön olosuhteet, rakenteelle asetettu käyttöikä vaatimus ja oleelliset rakenteen tiedot. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 136)

Yleisimmät tekijät, jotka vaikuttavat teräsbetonirakenteissa raudoitteen käyttöikään ovat: karbonatisoituminen, kloridit ja betonipeitepaksuus. Betonin käyttöikään vaikuttavia tekijöitä ovat: betonin lujuus, laatu, huokosrakenne, vesi/sementtisuhte.

Karbonatisoituminen on hiilidioksidin ja sementin ainesosien reaktiosta aiheutuva betonin emäksisyyden pieneneminen. Tämä johtaa siihen, ettei betoni suojaa enää betoniteräksiä korroosiolta.

Kloridit aiheuttavat myös korroosiota päästessään kosketuksiin betoniteräksien kanssa. Yleisimmin kloridirasitusta on suolattavien teiden läheisyydessä (sillat, parkkihallit) ja meriveden kanssa kosketuksiin joutuvissa teräsbetonirakenteissa. Erityisesti kloridirasitukselle altistuvissa teräsbetonirakenteissa täytyy kiinnittää huomiota riittävän pieniin halkeamaväleihin, jotta kloridipitoinen vesi ei pääsee halkeaman kautta betoniteräksien kanssa kosketuksiin.

Pakkasrapautuminen on Suomessa merkittävä tekijä betonirakenteille. Se muun muassa heikentää betonin lujuutta, aiheuttaa siihen halkeilua ja lohkeilua, ja tätä kautta ilman läpäisevyyden lisääntymistä. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 108-116)

Kemialliset vauriotekijät	Mekanismi	Vaikutus
Pehmeä vesi	liukeneminen	betonin raupautuminen
Happo	liukeneminen	betonin raupautuminen
Happo	neutraloituminen	teräskorroosion aktivoituminen
Happamat kaasut: hiilidioksidi, rikki- ja typpioksidit	neutraloituminen karbonatisoituminen	teräskorroosion aktivoituminen mikrorakenteen epäedullinen muuttuminen
Kloridit	passiivikalvon rikkoutuminen	teräskorroosion aktivoituminen
Aktiivivillassa olevat terästangot + happi + vesi	korroosio	terästankojen paisuminen, pinta-alan ja tartunnan menetykset
Jännitys, kloridit	jännityskorroosio (vetyhaurastuminen)	jänneraudoitteiden katkeaminen
Sulfaatit, merivesi, maaperä	kiteytymispaine kemialliset muutokset	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, silikaattikiviaines	alkali-piihapporeaktio alkali-silikaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, karbonaattikiviaines	karbonaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen

Kuvio 4. Betonin kemiallisia vauriotekijöitä, vauriomekanismit ja niiden vaikutukset (Betonitekniikan oppikirja/By201,2018, s131)

3.2 RASITUSLUOKAT

Rasitusluokat määrittävät rakenteen betonipeitteen lisäksi myös betonin minimi sementtimäärän per kuutio, maksimi vesi/sementtisuhteen, sementin laadun sekä seosaineiden tarpeen ja niiden rajoitukset. Rasitusluokat tulee valita tarkkaan, jotta ne vastaavat rakenteelle kohdistuvia rasituksia ja olosuhteita. Väärä rasitusluokka saattaa huonontaa rakenteen laatua ja aiheuttaa lisäkustannuksia. (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 137)

Taulukko 2. Rasitusluokat standardin EN 206-1 mukaisesti (RIL 202-2011/by 61, 26)

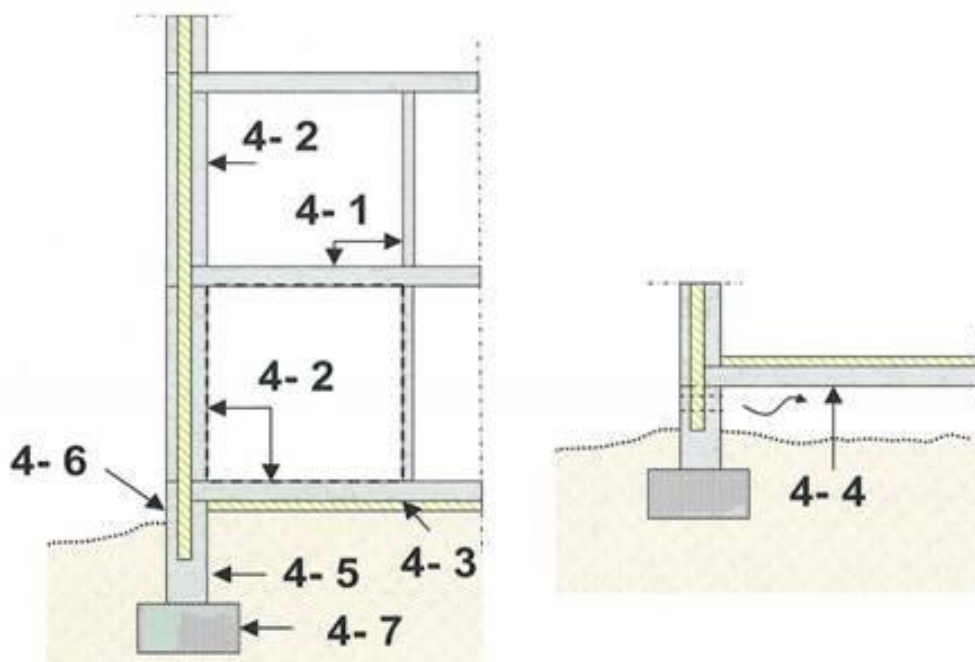
Luokan merkintä	Ympäristön kuvaus	Opastavia esimerkkejä paikoista, joissa rasitusluokka voi esiintyä
1. Ei korroosion tai rasituksen riskiä		
X0	Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni kaikissa ympäristöissä, lukuun ottamatta niitä, joissa esiintyy jäädytys-sulatus- tai kulutus-rasitusta tai kemiallista rasitusta. Raudoitettu tai metallia sisältävä betoni hyvin kuivissa olosuhteissa	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on hyvin alhainen
2. Karbonatisoitumisen vaikutuksista aiheutuva korrosio		
XC1	Kuiva tai pysyvästi märkä	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on alhainen Pysyvästi vedenalainen betoni
XC2	Märkä, harvoin kuiva	Betoni, joka on pitkään kosketuksissa veteen Useimmat perustukset
XC3	Kohtalaisen kostea	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on kohtalainen tai suuri Ulkona oleva sateelta suojattu betoni
XC4	Märkä ja kuiva vaihtelevat	Betonipinnat, jotka ovat kosketuksissa veden kanssa, mutta eivät kuulu rasitusluokkaan XC2

Taulukko 3. Rasitusluokat standardin EN 206-1 mukaisesti (RIL 202-2011/by 61, 26)

Luokan merkintä	Ympäristön kuvaus	Opastavia esimerkkejä paikoista, joissa rasitusluokka voi esiintyä
3. Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korroosio		
XD1	Kohtalaisen kostea	Betonipinnat, jotka ovat alttiina ilman sisältämille klorideille
XD2	Märkä, harvoin kuiva	Uima-altaat Betoni on alttiina kloridipitoisille teollisuusvesille
XD3	Märkä ja kuiva vaihtelevat	Sillan osat, jotka ovat alttiina kloridipitoisille roiskeille, jalkakäytävät Paikoitustalojen laatat
4. Meriveden kloridien aiheuttama korroosio		
XS1	Betoni on kosketuksissa ilman kuljettaman suolan kanssa, muuta ei suorassa kosketuksessa meriveteen	Lähellä rannikkoa tai rannikolla olevat rakenteet
XS2	Pysyvästi veden alla	Merirakenteiden osat
XS3	Vuoroveden ja roiskeen vyöhykkeellä	Merirakenteiden osat
5. Jääditys-sulatusrasitusjäänsulatusaineilla tai ilman niitä		
XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Tierakenteiden pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina jäätymiselle ja ilman kuljettamille jäänsulatusaineille
XF3	Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat
XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi	Jäänsulatusaineille alttiit teiden ja siltojen kannet Suoralle jäänsulatusaineroiskeelle ja jäätymiselle alttiit betonipinnat Roiskevyöhykkeellä olevat jäätymiselle alttiit merirakenteet

Taulukko 4. Rasitusluokat standardin EN 206-1 mukaisesti (RIL 202-2011/by 61, 26)

Luokan merkintä	Ympäristön kuvaus	Opastavia esimerkkejä paikoista, joissa rasitusluokka voi esiintyä
6. Kemiallinen rasitus		
XA1	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen vähän aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi
XA2	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen kohtalaisen aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi
XA3	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen hyvin aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi



Kuvio 5. Eri rakenneosien rasitusluokat rakennuksessa, taulukossa 5 on esitetty selitteet numeroiduille kohdille (<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/sailyvyys>)

Taulukko 5. Kuviossa 5 esitettyjen rakenneosien rasisusluokat (<https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/sailyvyys>)

Rakenne-osa	Rasisusluokka-yhdistelmä	Selite
4-1	X0	Välipohjat ja seinät (kuivat sisätilat)
4-2	XC1	Ulkoseinä, sisäkuori (kuivat sisätilat). Kosteat sisätilat, esim. kosteuseristämättömät pesutila yms. rakenteet
4-3	XC1	Alapohja, eristeen päällä
4-4	XC3	Alapohja, tuulettuva rakenne
4-5	XC2	Sokkeli, sisäkuori, maan alla
4-6a	XC3,4; XF1	Sokkelin ulkokuori
4-6b	XC3,4; XD1; XF2	Sokkelin ulkokuori, suolarasitus ¹⁾
4-7	XC2	Antura

¹⁾ Sokkelin ulkokuoreen voidaan katsoa kohdistuvan suolarasituksia, kun se sijaitsee suolattavan tien välittömässä läheisyydessä (etäisyys tiehen < 2 m).

3.3 BETONIPEITE

Betonipeitteellä tarkoitetaan raudoituksen ja betonin pinnan välistä etäisyyttä. Betonipeitettä suunniteltaessa on huomioitava haat ja työteräkset.

Betonipeitteen tarkoitus on suojata raudoitusta korroosiolta ja taata tartuntavoimien siirtyminen raudoitteen ja betonin välillä. Oikein suunniteltuna, raudoitettu betonirakenne säilyy pitkään ja kestää tulipalotilanteissa riittävän kauan. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 268)

Betonipeitekerroksen paksuus valitaan rakenteen rasisusluokan, suunnitellun käyttöön ja palonkestävyysvaatimuksen perusteella. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 268)

Betonipeitteen minimiarvo on suurin kolmesta arvosta

$$C_{min} = \text{MAX} [C_{min,b}; C_{min,dur}; 10 \text{ mm}] \quad (10)$$

jossa

$C_{min,b}$ = betonipeitteelle vaadittu vähimmäisarvo

$C_{min,dur}$ = ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisvaatimus

10 mm = tangon halkaisija (RIL 202-2011/by 61, 27)

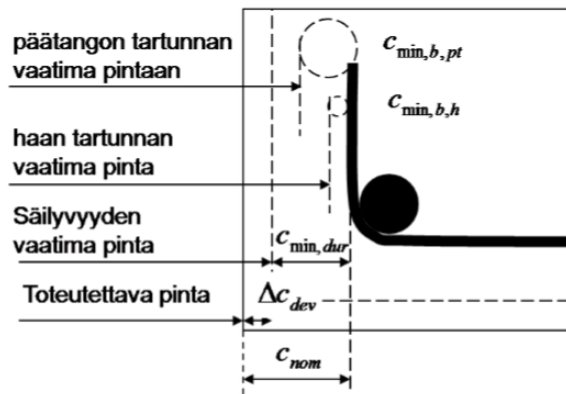
Taulukko 6. Rasitusluokkien asettamat betonipeite vaatimukset

(<https://www.elementisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/sailyvyys>)

Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo vaatimus $c_{min,dur}$ (mm)								
Kriteeri	Rasitusluokka taulukon 4.1 mukaan							
	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1	XS1	XD2	XD3 XS2,3
Betoniteräs	10	10	20	25	30	30	35	40
Jänneteräs	10	20	30	35	40	40	45	50
100 vuoden suunniteltu käyttöikä ¹⁾	+0	+0	+5	+5	+5	+5	+5	+5
Lujuusluokka \geq	C20/25	C30/37	C35/45	C35/45	C35/45	C40/50	C35/45	C45/55
RakMK B4 1-rakenneluokka	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5

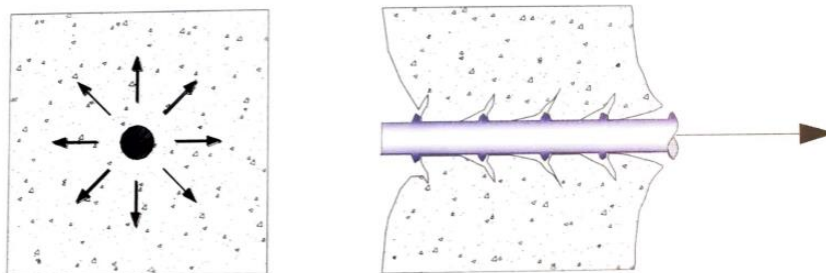
¹⁾ Jos rakenteen suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta, on myös muut säilyvyysvaatimukset tarkistettava RakMK B4 (SFS-EN 206-1 kansallinen liite) mukaisesti.

Tangon ja betonin välisen tartunnan vaatima betonipeite määritellään erikseen jokaiselle tankopaksuudelle. Säilyvyyden vaatima betonipeite taas määritellään rakenteessa ulointa raudoitusta lähimpänä olevan betonipinnan mukaan. Esimerkiksi palkeissa ja pilareissa pääteräksillä on hakojen halkaisijan verran enemmän betonipeitettä, kuin hakasilla. (Betoniteknikan oppikirja 2018/by 201, 269)



Kuvio 6. Tartunnan vaatiman betonipeitteen määrittäminen (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by 211)

Betoniteräksen eli harjatangon harjat muodostavat vaarvoja, jotka estävät liukumista ja siirtävät voimia betonille. Betonipeitteen on oltava riittävän suuri, koska vaarnavaikutus aiheuttaa tangon suuntaisia voimia ja myös tankoon nähden koh-tisuoria voimia. Nämä voimat saattavat lohkaista betonia, jolloin rakenne heikke-nee ja raudoitus pääsee altistumaan korroosiolle. Raudoituksella tulee olla riittä-vän suuret välit myös rakenteen sisällä, jotta betoni saadaan kunnolla tiivistettyä ja samalla rajoitettua halkaisuvoimia. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 266)



Kuvio 7. Voiman siirtyminen harjatangon harjojen muodostamien vaarvojen avulla (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 266)

Valutyöllä on suuri merkitys rakenteen toiminnan kannalta. Betoni tulee valaa tiiviisti niin, että se ympäröi kaikki tangot. Tiheästi raudoitetuissa rakenteissa voi-daan tarvittaessa niputtaa tankoja, jotta saadaan riittävästi tilaa valun ja tiivistä-misen onnistumiseksi.

Tartunnan vaatiman betonipeitteen vähimmäisarvo erillisillä tangoilla on yhtä suuri kuin tangon halkaisija [mm]

$$\emptyset = C_{min,b} \quad (11)$$

ja tankonipuilla tangon ekvivalenttihalkaisija [mm]

$$\emptyset_n = C_{min,b} \quad (12)$$

Maksimi raekoon ollessa suurempi kuin 32 mm, kasvatetaan minimi betonipeitettä 5 mm:llä.

Raudoitustankoja voidaan niputtaa maksimissaan kolmen tangon nippuihin. Niputetuilla tangoilla tulee kuitenkin muistaa, että halkeilutaipumus kasvaa. Tankonippua käsitellään mitoituksessa samansuuruisena kuin poikkileikkaukseltaan saman kokoista yksittäistä tankoa. Tangon ekvivalentti halkaisija \emptyset_n saadaan laskettua nipussa saman paksuisille tangoille kaavasta

$$\emptyset_n = \emptyset \sqrt{n_b} \quad (13)$$

missä

n_b = tankojen määrä

Eripaksuisille tangoille ekvivalentti halkaisija saadaan laskettua kaavasta

$$\emptyset_n = \sqrt{\frac{\sum A_s}{\pi}} \quad (14)$$

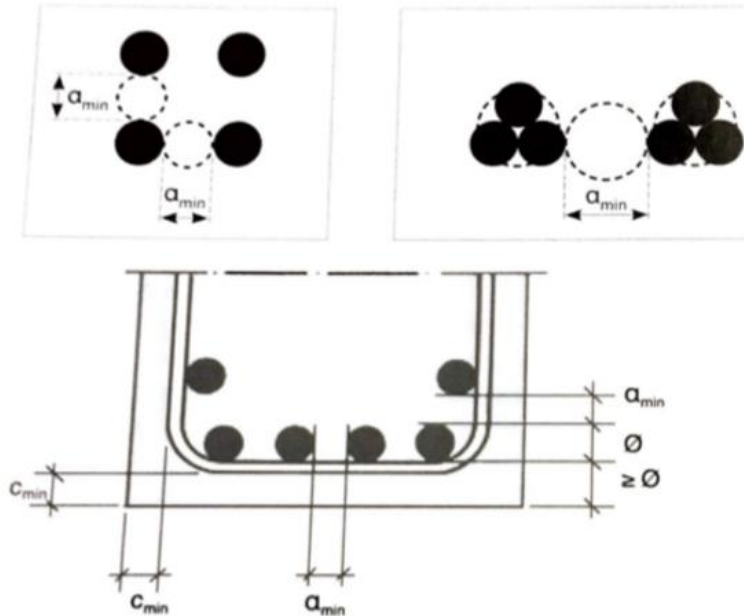
missä

$\sum A_s$ = tankojen yhteenlaskettu pinta-ala

Nipun ekvivalentti halkaisija saa olla maksimissaan 55 mm.

Tankovälin vähimmäisarvo α_{min} määritellään seuraavan kaavan mukaan (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 267)

$$a_{min} = \text{suurin seuraavista} \left\{ \begin{array}{l} \emptyset \text{ tai } \emptyset_n \\ \text{kiviaineksen suurin sallittu raekoko} + 3 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} \end{array} \right.$$



Kuvio 8. Raudoitustankojen välit ja betonipeitteen vähimmäisarvot (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 268)

Rakenteen käyttöikämitoituksessa käytetään betonipeitteen vähimmäisarvoa [C_{min}] ja rakenteen kantavuutta suunniteltaessa käytetään betonipeitteen nimellisarvoa käyttäen [C_{nom}].

Betonipeitteen nimellisarvo lasketaan kaavasta

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \quad (15)$$

missä

ΔC_{dev} = suunnittelussa huomioon otettava mittapoikkeama (Betonitekniikan oppikirja 2018/by 201, 269)

Mittapoikkeama ΔC_{dev} on muottipintaa vasten valettaessa 10 mm. Epätasaisille pinnoille (esim. pesubetoni) on vielä lisättävä betonipeitteen vähimmäisarvoon vähintään 5 mm.

Muita epätasaisia pintoja (esimerkiksi tasausvalu tai kova eriste) vasten valettaessa mittapoikkeama lasketaan kaavasta

$$\Delta C_{dev} = C_{min} + 10 \text{ mm} \quad (16)$$

muissa tapauksissa mittapoikkeama lasketaan alustan laatu huomioon ottaen kaavasta

$$\Delta C_{dev} = C_{min} + (\Delta C_{dev}) \quad (17)$$

jossa (ΔC_{dev}) saadaan alla olevasta taulukosta. (RIL 202-2011/by 61, 29)

Taulukko 7. Betonipeitteen mittapoikkeama eri laatusilla alustoilla (RIL 202-2011/by 61, 29)

Alustan laatu	ΔC_{dev}
Tasattu ja tiivistetty hiekka tai sora ja lineaariset raudoitusvälikkeet	20 mm
Tasattu ja tiivistetty hiekka tai sora ja pistemäiset raudoitusvälikkeet	30 mm
Tasattu, mutta tiivistämätön hiekka, tai sora ja lineaariset raudoitusvälikkeet (esim. paalulaatta)	30 mm
Tasattu mutta tiivistämätön hiekka, tai sora ja pistemäiset raudoitusvälikkeet (esim. paalulaatta)	40 mm

Elementeissä sallitaan pienemmän mittapoikkeaman käyttäminen, jos se on tehtaan sisäisen laadunhallintajärjestelmän mukaan hyvin perusteltua ja tehdas on ulkopuolisen laadunvarmistuksen piirissä. Työmaalla voidaan käyttää alle 10 mm:n mittapoikkeamaa toteutusluokassa 3 ja toleranssiluokassa 2. Alle 5 mm:n mittapoikkeamaa ei saa käyttää. (Betoniteknikan oppikirja 2018/by 201, 269)

4 TERÄSBETONIPALKIN MITOITUS MURTORAJATILASSA

Pääaiheena tässä opinnäytetyössä on palkin pääterästen ankkurointimitoitus, jotta palkin mitoituksessa käydään läpi vain Eurokoodi 2:ssa esitetty yksiaukkoisen palkin taivutus- ja leikkausmitoitus. Mitoituksessa käsitellään pelkästään palkkeja, joiden poikkileikkaus on suorakaiteen muotoinen.

4.1 MITOITUS TAIVUTUKSELLE

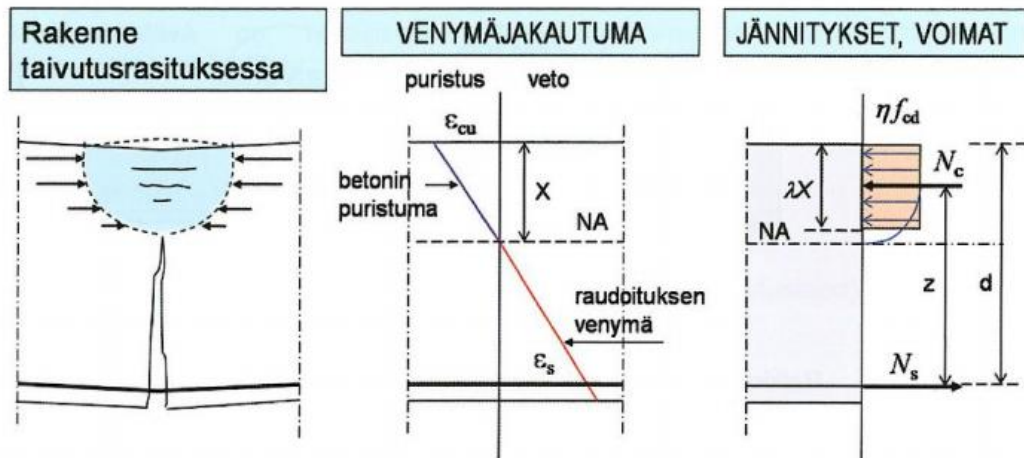
Ennen taivutusmitoitusta tulee selvittää palkkiin kohdistuva taivutusmomentti M_{Ed} , jonka perusteella mitoitetaan palkin taivutuskestävyys M_{Rd} . Taivutusmomentti on tasaisesti kuormitetulla yksiaukkoisella palkilla suurimmillaan palkin keskellä, epätasaisilla kuormilla suurin taivutusmomentti on laskettava tapauskohtaisesti. Taivutusmomentti syntyy yksiaukkoisella palkilla palkin alapintaan tukien väliin, kun taas jatkuvilla palkkeilla se on yleensä suurimmillaan keskituella palkin yläpinnassa.

Taivutuskestävyyden tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin palkin mitoittava taivutusmomentti. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 100).

Tästä saadaan muodostettua mitoitusehto

$$M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad (18)$$

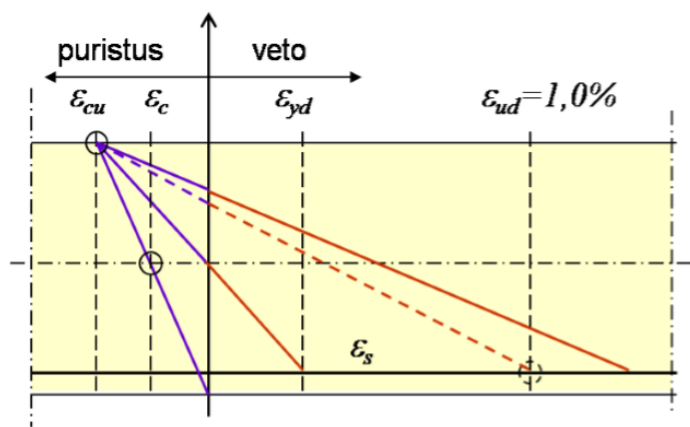
Teräsbetonipalkin taivutusmitoituksessa oletetaan, että vetopuolen rauditus myötä. Tämän takia rauditusmäärä täytyy rajoittaa, jotta ehto toteutuu. Kun palkin rauditus mitoitetaan suurimmalla sallitulla rauditusmäärällä, kutsutaan sitä tasapainoraudoitetuksi (A_{sb}). Maksimi rauditusmäärän raja-arvo voidaan mitoittaa myötölujuuden ominais- tai mitoitusarvolla. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 94)



Kuvio 9. Taivutusrasitetun TB-palkin venymä ja jännitys jakaumat (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 94)

Yllä olevassa kuvassa on esitetty betonin puristusvyöhykkeen todellinen muoto ja Eurokoodin mukaisessa mitoituksessa käytettävä suorakaiteen muotoinen puristusvyöhyke. Tämä menettelytapa yksinkertaistaa mitoitusta. Kuvassa esitetyt suuret selitetään mitoituksen kulun yhteydessä.

Alla olevassa kuvassa on esitetty mahdolliset betonin murtumiskohdat ympyröidyissä kohdissa. Palkki voi murtua puristetulla reunalla tai pintakeskiössä. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 94)



Kuvio 10. Palkin venymät murtorajatilassa (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 95)

Alla olevassa taulukossa on esitetty palkin puristusvyöhykkeen koon mitoituksessa käytettävät kertoimet. Kertoimien arvo riippuu betonin lujuudesta. Norma-

liljuusbetoneilla kertoimet ovat vakioita ja korkealujuusbetoneilla kertoimet lasketaan taulukossa esitetyistä kaavoista. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 95)

Taulukko 8. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 95)

	$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$	$50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$
λ	0,8	$0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400}$
η	1,0	$1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200}$

Betonin puristusvyöhykkeen kestävyys lasketaan kaavasta

$$N_{Rc} = \eta f_{cd} b \lambda X \quad (19)$$

missä

η = taulukosta saatava kerroin

f_{cd} = betonin puristuslujuuden mitoitusarvo

b = palkin leveys

λ = taulukosta saatava kerroin

X = puristusvyöhykkeen korkeus palkin yläreunasta poikkileikkauksen neutraaliakseliin mitattuna.

(Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 96)

Palkin vedetyn puolen raudoituksen vetokestävyys lasketaan kaavasta

$$N_{Rs} = f_{yd} A_s \quad (20)$$

missä

f_{yd} = raudoituksen mitoitus myötölujuus [MPa]

A_s = veroraudoituksen poikkipinta-ala [mm^2]

Palkin poikkileikkauksessa puristusvoimaresultantti ja vetovoimaresultantti tulee olla samansuuruisia, jotta voimatasapaino täyttyy. Tämä saadaan kirjoitettua muotoon

$$N_{RC} = N_{RS} \quad (21)$$

joka voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$\frac{\lambda X}{d} = \frac{A_s f_{yd}}{bd \eta f_{cd}} \quad (22)$$

missä

d = raudituksen painopisteen etäisyys palkin yläreunaan (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 94, 96)

Seuraavaksi lasketaan palkin tehollisen puristuspuunnan suhteellinen korkeus β , mekaaninen raudoitussuhde ω ja geometrinen raudoitussuhde ρ . Nämä suureet saadaan laskettua kaavoista

$$\rho = \frac{A_s}{bd}, \quad (23)$$

$$\beta = \frac{\lambda X}{d}, \quad (24)$$

$$\omega = \rho \frac{f_{yd}}{\eta f_{cd}} \quad (25)$$

Puristusraudoittamattomassa palkissa puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus β ja mekaaninen raudoitussuhde ω ovat yhtä suuria. Tämä voidaan kirjoittaa muotoon (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 97)

$$\beta = \omega \quad (26)$$

Palkin puristusvyöhykkeen puristuskestävyys M_{Rc} ja taivutusraudoituksen kestävyys M_{Rs} saadaan laskettua kaavoista (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 97)

$$M_{Rc} = N_{Rc}z = \eta f_{cd} b \lambda X z \quad (27)$$

$$M_{Rs} = N_{Rs}z = f_{yd} A_s z \quad (28)$$

Palkin poikkileikkauksessa muodostuvan puristuspuunnan resultantin ja veto-raudoituksen vetokestävyuden välisen voimaparin etäisyyttä kutsutaan sisäiseksi momenttivarreksi z .

Sisäinen momenttivarssi saadaan laskettua kaavasta

$$z = d \left(1 - \frac{\beta}{2} \right) \quad (29)$$

Missä d = poikkileikkauksen tehollinen korkeus

Tehollinen poikkileikkaus saadaan laskettua kaavasta

$$d = h - c_{nom} - 1,1\emptyset_h - \frac{1,1\emptyset}{2} \quad (30)$$

missä

h = palkin korkeus [mm]

c_{nom} = betonipeite [mm]

\emptyset_h = hakojen halkaisija [mm]

\emptyset = pääterästen halkaisija [mm] (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 98)

Sijoittamalla momenttivarssi z puristusvyöhykkeen puristuskestävyyden kaavaan ja pyörittelemällä yhtälöä saadaan laskettua suhteellinen momentti μ kaavasta

$$\mu = \frac{M_{Rc}}{\eta f_{cd} b d^2} = \beta \left(1 - \frac{\beta}{2} \right) \quad (31)$$

eli

$$\mu = \beta \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \quad (32)$$

Tehollisen puristuspinnan suhteellisen korkeus voidaan nyt laskea kaavasta

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (33)$$

Tasapainoraidoitettujen palkin poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus saadaan laskettua puristusvyöhykkeen korkeuden (X) ja tehollisen korkeuden (d) avulla.

$$\frac{X}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_s} \quad (34)$$

missä

$\varepsilon_{cu} = 0,0035$ = betonin murtopuristuma

ε_s = raudoituksen kimmokerroin

Käyttämällä edelliseen kaavaan (34) tehollista puristusvyöhykkeen korkeutta, voidaan kaava (35) kirjoittaa muotoon (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 98)

$$\beta = \lambda \frac{X}{d} = \lambda \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_s}, \quad \leq \beta_{\max} = 0,7\beta_{bd} \quad (35)$$

Rakenne mitoitetaan 70% tasapainoraidoitusta alhaisemmaksi, jotta muodonmuutokset (murtuminen) havaitaan selkeästi ennen murtumista.

Tasapainoraidoituksen maksimi raja-arvo lasketaan kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 99-100)

$$\beta_{bd} = \lambda \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad (36)$$

jossa

ε_{yd} = raudoituksen murtovenymä

Palkin taivutusmomentin MEd vaatima vetoraudoituksen poikkipinta-ala saadaan laskettua kaavasta

$$A_s = \omega b d \frac{\eta f_{cd}}{f_{yd}} \quad (37)$$

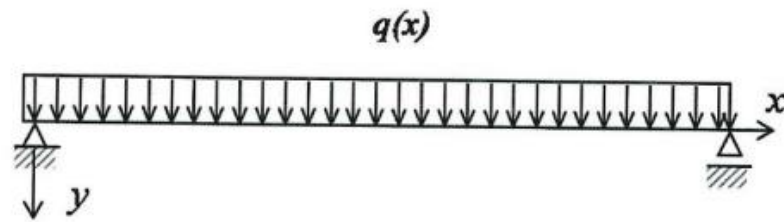
Pääterästen yhteen laskettu poikkipinta-ala täytyy olla suurempi kuin vaaditun raudoituksen pinta-ala (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 101)

$$A_s \leq A_{s,toteutunut} \quad (38)$$

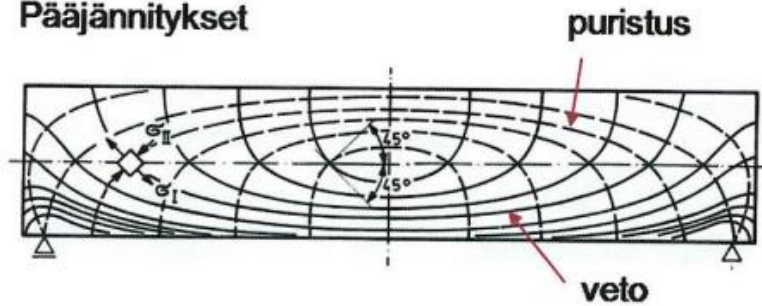
4.2 MITOITUS LEIKKAUKSELLE

Yksiaukkoisella teräsbetonipalkilla suurimmat leikkausvoimat syntyvät tukien läheisyyteen. Tasaisesti kuormitetulla palkilla molemmilla tuilla on yhtä suuret leikkausvoimat, epätasaisesti kuormitetuilla palkeilla leikkausvoimat ovat tuilla erisuuruiset. Jatkuvilla palkeilla suurin leikkausvoima syntyy yleensä välituelle. Päävetovoimat ovat lähes kohtisuorat palkin korkeus suunnassa, nämä voimat otetaan vastaan kokonaan leikkausraudoituksella (hakasilla). (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 129.)

Kuormitus



Pääjännitykset

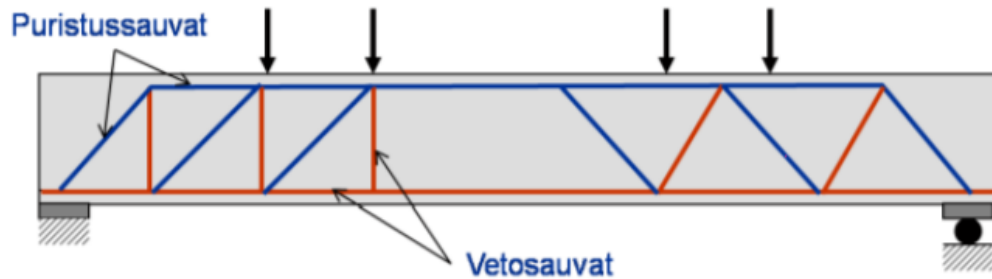


Kuvio 11. Pääjännitykset tasaisella pintakuormalla homogeenisessa suorakaiteen muotoisessa palkissa (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1/by211, 131.)

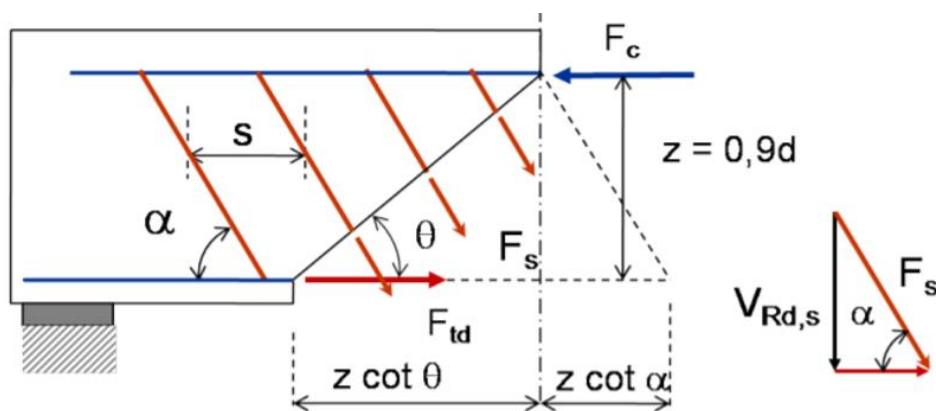
Leikkausmitoituksessa tulee ensin selvittää palkkia rasittava leikkausvoima V_{Ed} , jonka tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin palkin leikkausraudoituksen kestävyys $V_{Rd,s}$. Tästä saadaan muodostettua mitoitusehto (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1 2013/by211, 140

$$V_{Rd,s} \geq V_{Ed} \quad (39)$$

Palkki mitoitetaan leikkaukselle ristikkomallin avulla. Palkissa ajatellaan olevan veto- ja puristussauvoja. Pystysuuntaisina vetosauvoina toimivat leikkausraudoitukset eli hakaset, ja puristussauvoina kuvitteelliset vinot, uuman levyiset betonisauvat. Yksiaukkoisen palkin yläpinta on kokonaan puristettu ja alapinta vedetty, alapinnan vetosauvana toimii taivutusmitoituksessa mitoitettut pääteräkset.



Kuvio 12. Ristikkomenetelmän mukainen ristikkorakenne (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1 2013/by211, 135)



Kuvio 13. Ristikkomenetelmässä käytettävät voimasuureet (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 135)

Kuvion (13) ristikkomallia apuna käyttäen saadaan muodostettua kaava, jolla saadaan selville suorakaidepoikkileikkauksen muotoisella palkilla kriittisessä vinoissa leikkauksessa raudoitukselle myötöhetkellä kehittyvä voima

$$F_{R,sw} = f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} z (\cot \theta + \cot \alpha) \quad (40)$$

missä

f_{ywd} = leikkausraudoituksen myötölujuuus [MPa]

s = leikkaushakojen jakoväli [mm]

A_{sw} = Leikkausraudoituksen poikkipinta-ala [mm^2]

α = hakojen kulma palkin pituus suuntaan nähden

θ = puristussauvan kulma. Suomessa puristussauvan kulmana käytetään pääsääntöisesti 21,8 astetta, mutta sille on myös asetettu raja-arvot (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 134, 136)

$$21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad (41)$$

Edellisestä kaavasta laskettu voima on sama, kuin leikkausraudoituksen suunnassa vaikuttava voima. Tästä voimasta saadaan laskettua pystysuuntainen leikkausvoima $V_{Rd,s}$ kaavalla (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 135-136)

$$V_{Rd,s} = f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} z (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \geq V_{Ed} \quad (42)$$

jossa

sisäinen momenttivarsi z lasketaan leikkausmitoituksessa kaavasta

$$z = 0,9d \quad (43)$$

Suomessa leikkausraudoitus suunnitellaan pääsääntöisesti pystyyn ($\alpha = 90^\circ$), jolloin leikkauskestävyyden kaava (42) voidaan sieventää muotoon

$$V_{Rd,s} = f_{ywd} \frac{A_{sw}}{s} z (\cot \theta) \geq V_{Ed} \quad (44)$$

Puristussauvan puristuskestävyys lasketaan kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 136)

$$F_{Rd,c} = v f_{cd} b_w z \cos \theta \quad (45)$$

missä

b_w = palkin uuman leveys kapeimmalta kohdalta [mm]

v = puristussauvan puristuslujuuden pienennys kerroin, jolla ehkäistään betonin halkeilua. Kerroin lasketaan kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 137)

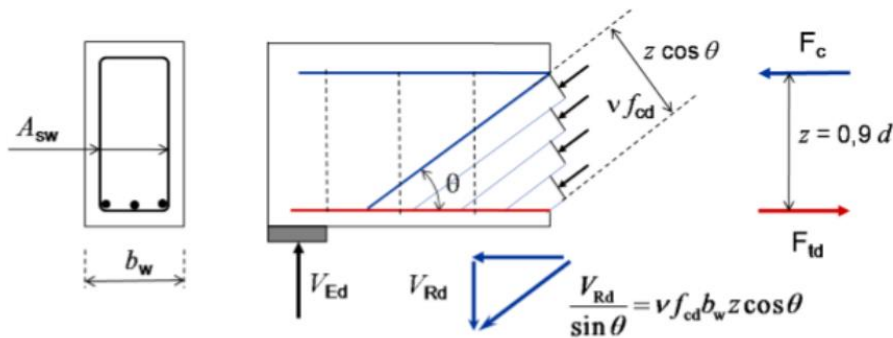
$$v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \quad (46)$$

Palkin uuman pystysuora puristusmurtokestävyys saadaan laskettua vinon puristussauvan murtokestävyudesta kaavalla

$$V_{Rd,max} = v f_{cd} b_w z \cos \theta \sin \theta \quad (47)$$

joka voidaan kirjoittaa muotoon (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 137)

$$V_{Rd,max} = \frac{v f_{cd} b_w z}{\tan \theta + \cot \theta} \quad (48)$$



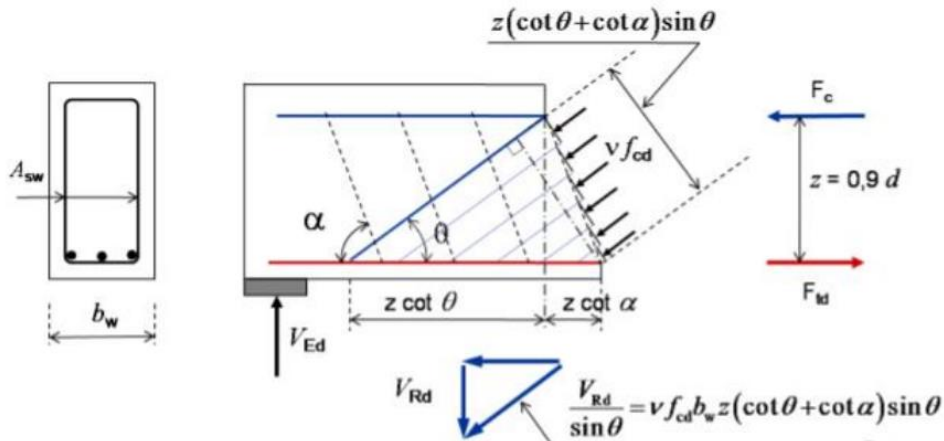
Kuvio 14. Puristussauvan kestävyuden laskenta, kun haat ovat 90 asteen kulmassa (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 137)

Leikkausraudoituksen ollessa vinossa, lasketaan puristussauvan kestävyys kaavalla (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 138)

$$V_{Rd,max} = v f_{cd} b_w z (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \theta \quad (49)$$

joka voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$V_{Rd,max} = v f_{cd} b_w z \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} \quad (50)$$



Kuvio 15. Puristussauvan kestävyden laskenta, kun haat ovat vinossa (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 137)

Suurentamalla puristussauvan kulmaa, on lisättävä leikkausraudoitusta, jolloin saadaan parannettua leikkauskestävyyttä.

Yli 45 asteen kulmalla, leikkausraudoituksen lisääminen ei enää paranna leikkauskestävyyttä. (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 139)

Jos tiedetään leikkausraudoituksen kestävyys ja halutaan tietää puristussauvan kulma, voidaan se laskea kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 140)

$$\theta = \arccot \left(\sqrt{\frac{v f_{cd} s b_w}{f_{ywd} A_{sw} \sin \alpha}} - 1 \right) \quad , 21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad (51)$$

4.2.1 LEIKKAUSRAUDOITUKSEN MITOITUS

Palkin vaadittu leikkausraudoitus A_{sw} saadaan kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 140)

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{Ed}}{z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha} \quad (52)$$

Teräsbetonipalkeissa käytetään yleensä kaksileikkeisiä leikkausraudoitteita eli umpihakoja ja taivutettuja U-hakoja. Hakajaon tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin laskettu hakajako. Hakajako lasketaan kaavasta

$$s \leq \frac{A_{sw}}{V_{Ed}} z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (53)$$

Puristusrunkokestävyys tulee mitoittaa niin, että mitoittava leikkausvoima V_{Ed} on pienempi tai yhtä suuri kuin puristusrunkokestävyys. Tämä lasketaan kaavasta

$$V_{Rd,max} = v f_{cd} b_w z \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta}, V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (54)$$

Eurokoodin mukaan teräsbetonipalkeilla tulee aina asettaa vähimmäisleikkausraudoitus. Tämä saadaan kaavasta

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq 0,08 b_w \sin \alpha \left(\frac{\sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}}{\frac{f_{yk}}{\text{MPa}}} \right) \quad (55)$$

Edellisestä kaavasta (55) saadaan pyöritettyä kaava, josta selviää vähimmäisleikkausraudoituksen hakaväli.

$$s \leq \frac{A_{sw}}{0,08 b_w \sin \alpha} \frac{\frac{f_{yk}}{\text{MPa}}}{\sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}} \quad (56)$$

Leikkausraudoituksen hakaväli ei myöskään saa olla liian suuri.

Suurin sallittu hakaväli s_{max} saadaan kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelu oppikirja osa 1/by211, 141)

$$s_{max} = 0,75d(1 + \cot \alpha) \quad (57)$$

5 PAIKALLINEN PURISTUS

Teräsbetonipalkkia kuormittaa usein pilarilta tuleva pistekuorma, jolloin palkin pistekuormakestävyys F_{Rdu} on tarkistettava kaavasta

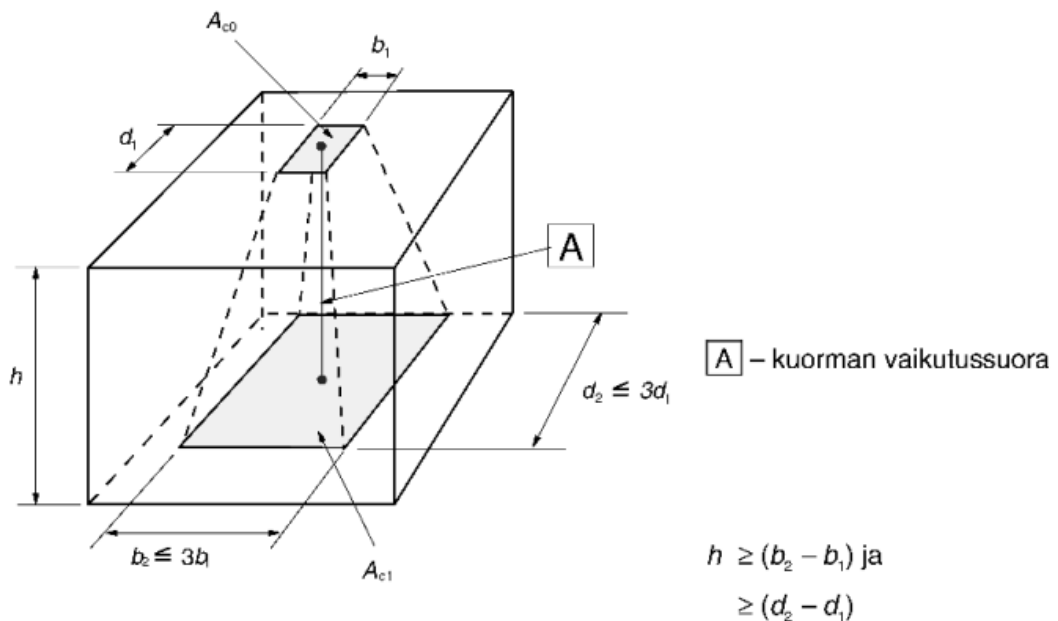
$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 f_{cd} A_{c0} \quad (58)$$

missä

A_{c0} = kuormitusalue

A_{c1} = suurin mitoituksessa käytettävä jakauma-alue, joka on saman muotoinen kuin A_{c0} .

f_{cd} = betonin puristuslujuuden mitoituslujuus



Kuvio 16. Paikallisen puristuksen mitoitusalueiden jakautuminen (RIL 202-2011/by 61, 47)

Kuorman jakautumiskartion korkeuden tulee olla kuvion (16) ehtojen mukainen. Jakautumiskartio muodostuu pistekuorman keskilinjaa pitkin kuvan mukaisesti. Jos poikkileikkauksessa vaikuttaa useampi puristuskuorma, ei kuorman jakautumisalueet saa limittyä keskenään. (RIL 202-2011/by 61, 47)

Halkaisuvoima, jolle rauditus mitoitetaan, lasketaan yllä olevasta kuviosta katsottuna b-suunnassa kaavasta

$$F_{tu} = 0,25F_d \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right) \quad (59)$$

missä

F_d = pistekuorman mitoitusarvo

d-suunnan halkaisuvoima lasketaan kaavasta (RIL 202-2011/by 61, 48)

$$F_{tu} = 0,25F_d \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right) \quad (60)$$

Tarvittava lisäraudoitus halkaisuvoimille voidaan laskea kaavasta

$$A_{s,vaad} = \frac{F_{tu}}{f_{yd}} \quad (61)$$

Paikallisen puristuksen kaavaa soveltaen voidaan myös laskea ankkurointikapaleen ankkurointikapasiteetti, joka otetaan huomioon ankkurointimitoituksessa.

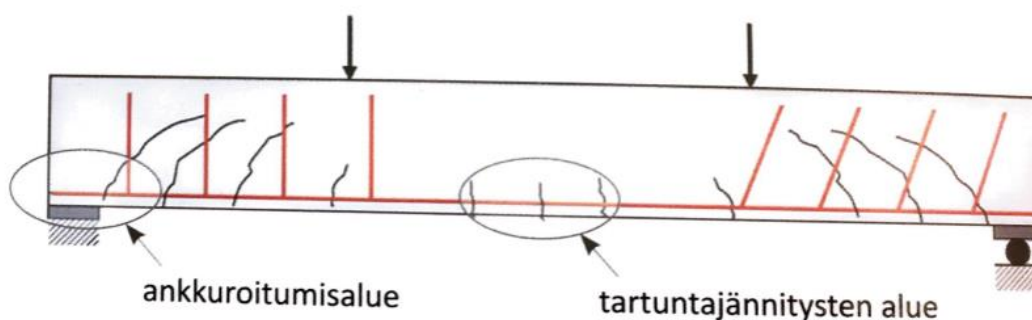
6 RAUDOITUKSEN ANKKUROINTI

Betonin vetojännityksen ylittyessä betoni halkeaa, jolloin raudoituksen tehtävä on siirtää voimat halkeaman yli. Raudoituksen täytyy ankkuroitua riittävän pitkälle halkeaman molemmille puolille. Ankkurointi perustuu tangon ja betonin väliseen tartuntaan. Ankkurointi on rakenteen toiminnan kannalta ehdottoman tärkeää. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 266)

Merkittävin tangon tartuntalujuuteen vaikuttava tekijä on tangon pinnan laatu. Siileillä tangolla on huonoimmat tartuntaominaisuudet ja harjakuvioisella tangolla parhaimmat. Tartuntalujuuteen vaikuttaa myös raudoitteen sijainti, valusuunta ja raudoitetta ympäröivä poikittainen jännitys.

Tangon halkaisijalla on vaikutus ankkurointikestävyyteen. Pienien tankojen aiheuttama halkaisuvoima on suhteessa pienempi suuriin tankoihin verrattuna. Toisin pienillä tangoilla tangon halkeaman venymä on suurempi kuin suurilla tangoilla. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 463)

Teräsbetonipalkissa on kahdenlaista ankkuroitumistilannetta. Alla olevasta kuvasta nähdään, että ankkuroitumista tapahtuu palkin keskellä, jossa raudoitus jatkuu usean halkeaman yli. Palkin päässä raudoitus ankkuroituu tuelle. Tuella raudoitus on vietävä halkeamattomaan betoniin asti, jotta jännitykset siirtyvät betonille aiheuttamatta vahinkoa.



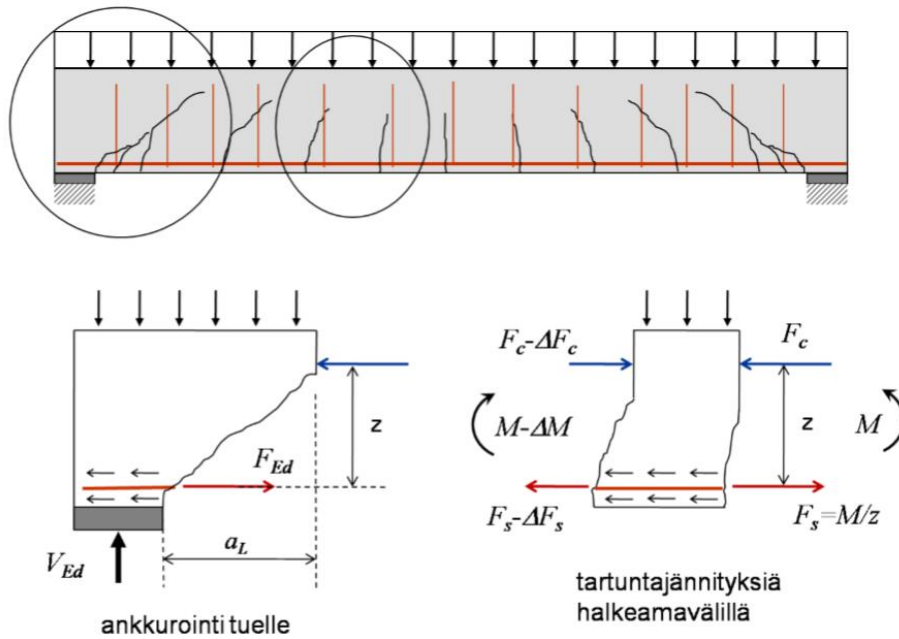
Kuvio 17. Ankkurointitapaukset teräsbetonipalkissa (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 266)

Palkin keskellä vaikuttava voima raudoituksessa on vierekkäisissä halkeamissa lähes yhtä suuri, johtuen taivutusmomentin vähäisestä muutoksesta. Raudoituksella saadaan pidettyä halkeamat tarpeeksi pieninä, jotta ne eivät heikennä rakenteen käyttöikää tai ulkonäköä. Jatkoksissa tangot on limitettävä riittävän pitkälle, jotta jännitykset ehtivät siirtymään tangosta betoniin ja betonista toiseen tankoon.

Tuella raudoituksen on ankkuroitava kokonaan viimeisen halkeaman kohdalla vaikuttava voima. Raudoitus voidaan ankkuroida usealla eri tavalla: suoralla tangolla, ankkurointielimellä tai lenkiksi/koukuksi taivutetun tangon avulla. (Betonitekniiikan oppikirja 2018/by 201, 266)

6.1 ANKKUROINTIMITOITUS

Ankkurointimitoitus tehdään palkeilla yleensä tukialueilla. Raudoitukseen kohdistuva voima on suurimmillaan maksimimomentin kohdalla, josta se pienenee tukea päin mentäessä (momentin pienentyessä, ja raudoituksen ja betonin välisen tartunnan vaikutuksesta). Halkeaman kaltevuudella on merkitystä raudoituksen voimaan tuen reunalla. Mitä vinompi halkeama on, sitä suurempi voima raudoituksella on tuen reunalla. Halkeaman vinous riippuu puristussauvan kulmasta sekä leikkausraudoituksen määrästä ja sen kulmasta. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 154)



Kuvio 18. Raudoituksen voiman siirtyminen betonille (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 154)

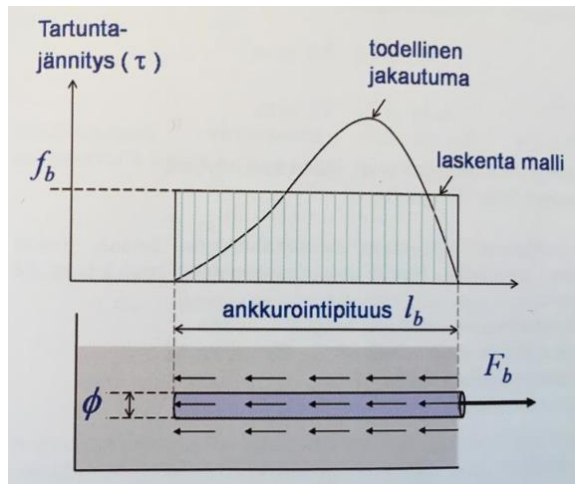
Raudoituksen tulee ankkuroitua tuelle niin, että se kestää vähintään raudoitukseen kohdistuvan voiman F_{Ed} . Tämä voima lasketaan kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 154-155)

$$F_{Ed} = V_{Ed} \frac{a_L}{z} = 0,5V_{Ed}(\cot \theta - \cot \alpha) \quad (62)$$

6.2 PÄÄTERÄKSIEN ANKKUROINTI PALKIN PÄISSÄ

6.2.1 SUORAN TANGON ANKKUROINTIMITOITUS

Suoran tangon ankkurointi perustuu tangon ja betonin väliseen leikkausjännitykseen, toiselta nimeltään tartuntajännitykseen τ_b . Alla olevan kuvion mukaisesti tartuntajännitys oletetaan mitoituksessa jakautuvan tasaisesti tangon vaippapinnalle koko ankkurointimatalla, vaikka todellisuudessa näin ei ole.



Kuvio 19. Suoran tangon ankkuroituminen (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 155)

Tartuntajännityksen suurinta arvoa kutsutaan tartuntalujuudeksi F_b .

Ankkurointivoima lasketaan kaavasta

$$F_b = u_s l_b f_b \quad (63)$$

missä

u_s = tangon ympärysmitta

l_b = ankkurointipituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 155)

Tartuntalujuus betoniteräkselle lasketaan tangonhalkaisijan, betonin mitoitusvetolujuuden ja tartuntaolosuhteiden avulla kaavasta

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (64)$$

missä

η_1 = tartuntaolosuhteista riippuva kerroin

= 1, kun tartuntaolosuhteet ovat hyvät

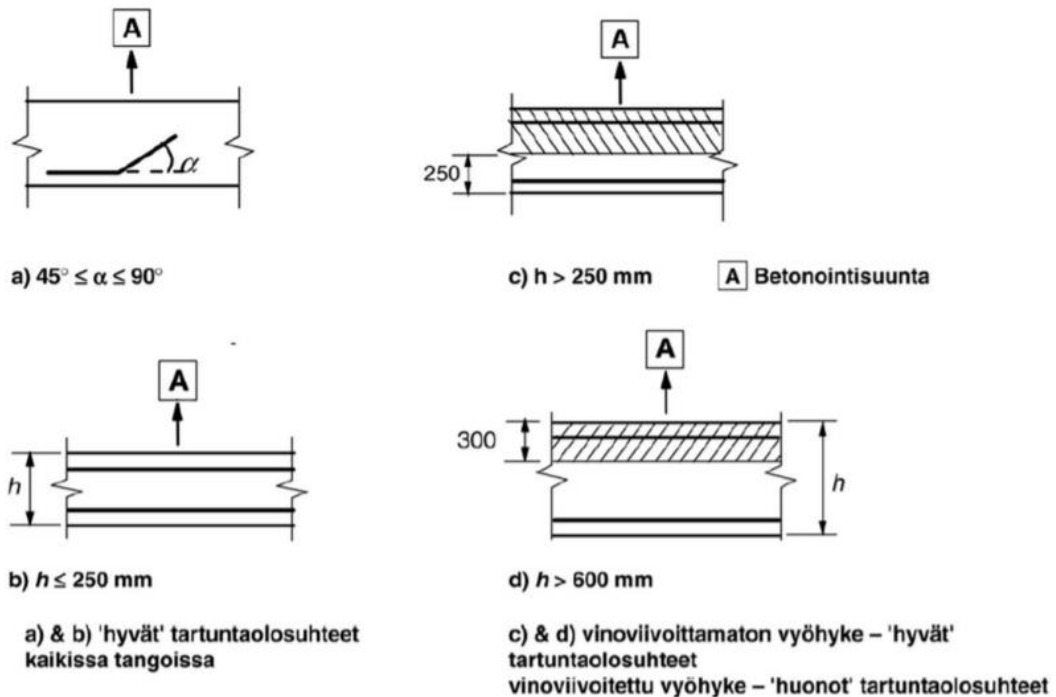
= 0,7, kun olosuhteet ovat huonot

η_2 = tankopaksuudesta \emptyset riippuva kerroin

$$= \begin{cases} 1,0 & , \text{ kun } \emptyset \leq 32 \text{ mm} \\ \frac{132 - \emptyset}{100} & , \text{ kun } \emptyset > 32 \text{ mm} \end{cases} \quad (65)$$

f_{ctd} = betonin vetolujuuden mitoitusarvo. Kaavassa saa käyttää enintään lujuusluokan C60/75 betonin lujuuden arvoa (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 155-156)

Tartuntaolosuhteet ovat hyvät, jos betoniteräkset ovat 45...90 asteen kulmassa palkin pituussuuntaan nähden. Lisäksi kaikissa betoniteräksissä vallitsee hyvät tartuntaolosuhteet, jos palkin korkeus on pienempi tai yhtä suuri kuin 250 mm. Yli 250 mm korkeissa palkeissa puristuspuolen betoniteräksillä vallitsee huonot tartuntaolosuhteet. Yli 600 mm korkeilla palkeilla vallitsee huonot tartuntaolosuhteet betoniteräksillä, jotka ovat alle 300 mm palkin yläpinnasta mitattuna. Betonoinnin suunta on myös ratkaiseva tekijä tartuntaolosuhteen kerrointa valittaessa. Kuvassa esitetty tartuntaolosuhteet Eurokoodin mukaisesti.



Kuvio 20. Tartuntaolosuhteet (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 156)

Ankkurointimitoituksessa osoitetaan, että ankkurointialueella voi kehittyä vähintään yhtä suuri ankkurointivoima (f_{bd}) kuin laskettu ankkuroitava voima F_{Ed} . Tästä saadaan muodostettua kaava (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 157)

$$f_{bd} \geq F_{Ed} \quad (66)$$

Ankkurointivoiman kaavan (63) ja edellisen kaavan (66) perusteella saadaan muodostettua mitoitusehto

$$l_b \geq \frac{F_{Ed}}{u_s f_{bd}} \quad (67)$$

josta saadaan muodostettua ankkurointipituuden perusarvon kaava

$$l_{b,rqd} = \frac{F_{Ed}}{u_s f_{bd}} = \frac{\emptyset \sigma_{sd}}{4 f_{bd}} \quad (68)$$

missä

\emptyset = tankopaksuus

σ_{sd} = tangossa vaikuttava normaalijännitys, joka lasketaan kaavasta

$$\sigma_{sd} = \frac{F_{Ed}}{A_s} \quad (69)$$

missä

A_s = palkin pääteräksien poikkipinta-ala [mm²]

Eurokoodissa käytetään ankkurointipituuden perusarvoa laskettaessa kaavan (68) oikeaa puolta, jolloin kaava sievenee muotoon

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset \sigma_{sd}}{4 f_{bd}} \quad (70)$$

Lopuksi tarkistetaan mitoitusehto, jossa toteutuvan ankkurointipituuden (l_b) tulee olla suurempi kuin ankkurointipituuden perusarvo ($l_{b,rqd}$).

$$l_b \geq l_{b,rqd} \quad (71)$$

jossa

l_b = tuen ja ankkuroitavan tangon pään välinen etäisyys

Jos tangon ankkurointipituus ei vielä riitä, voidaan käyttää pienennyskertoimia, joilla saadaan pienennettyä ankkurointipituuden perusarvoa. Pienennyskertoimia tulee käyttää vain silloin, kun ankkurointipituus ei riitä ilman niitä. Ankkurointipituuden mitoitusarvo l_{bd} lasketaan kaavasta

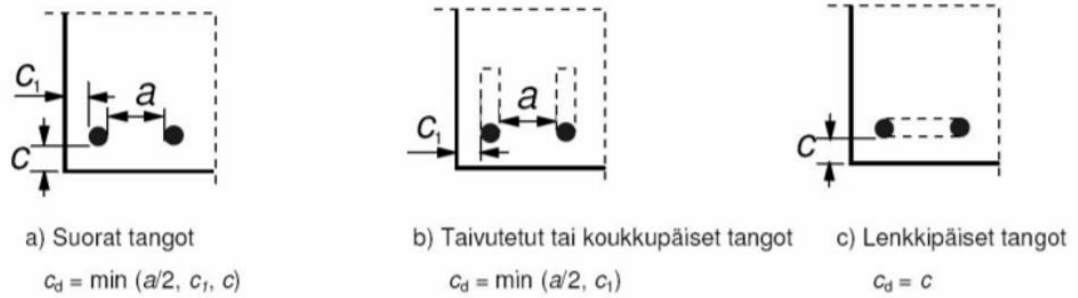
$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \quad (72)$$

α -kertoimet saadaan alla olevasta taulukosta (9) ja niiden jokaisen arvo on 0,7...1,0 välillä. Kertoimilla α_2, α_3 ja α_5 pienennetään suoran tangon ankkurointipituutta, mutta näiden kertoimien tulo ei saa olla alle 0,7. Kerroin α_1 ottaa huomioon koukkujen ja lenkkien vaikutuksen. Kerroin α_4 ottaa huomioon hitsatut poikittaistangot. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 157)

Taulukko 9. Ankkurointipituuden pienennyskertoimet (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 466)

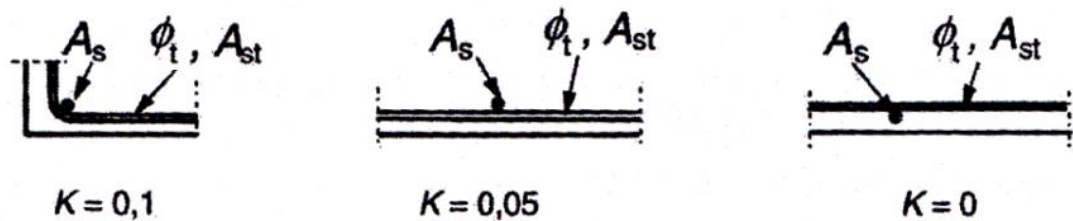
Vaikuttava tekijä	Ankkurointityyppi	Betoniteräs	
		vetoteräs	puristusteräs
Tankojen muoto	Suora	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	Muu kuin suora (ks. kuvia 8.1 (b), (c) ja (d))	$\alpha_1 = 0,7$ jos $c_d > 3\phi$ muuten $\alpha_1 = 1,0$ (mitan c_d arvot ovat kuvassa 8.3)	$\alpha_1 = 1,0$
Betonipeite	Suora	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - \phi)/\phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	Muu kuin suora (ks. kuvia 8.1 (b), (c) ja (d))	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3\phi)/\phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (mitan c_d arvot ovat kuvassa 8.3)	$\alpha_2 = 1,0$
Poikittainen laajenemisen estoraudoitus, jota ei ole hitsattu pääraudoitukseen	Kaikki tyypit	$\alpha_3 = 1 - K\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
Poikittainen hitsattu laajenemisen estoraudoitus*	Kaikki tyypit; sijainti ja koko kuvassa 8.1 (e) määritellyllä tavalla	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Laajenemista estävä poikittaispaine	Kaikki tyypit	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	–
missä $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min})/A_s$ ΣA_{st} poikittaisraudoituksen poikkileikkausala pitkin mitoitusarvon mukaista ankkurointipituutta l_{bd} $\Sigma A_{st,min}$ poikittaisraudoituksen poikkileikkausalan vähimmäisarvo = 0,25 A_s palkella ja 0 laatoilla A_s yksittäisen halkaisijaltaan suurimman ankkuroidun tangon poikkileikkausala K kuvan 8.4 arvot p poikittaispaine [MPa] murtorajatilassa pitkin mitoitusarvon mukaista ankkurointipituutta l_{bd} .			
* Ks. myös kohtaa 8.6: Välttämällä tuilla ankkurointipituuden mitoitusarvona l_{bd} voidaan käyttää pienempää arvoa kuin $l_{b,min}$ mikäli tuen kohdalla on vähintään yksi hitsattu poikittaisanka. Tämän edellytetään olevan vähintään 15 mm tuen ulkopinnalta.			

Kertoimen α_2 määrittelyssä tarvittava C_d voi tarkoittaa joko pienintä tankovälin puolikasta tai betonipeitettä. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 158)



Kuvio 21. Ankkurointipituuden pienennyskertoimien määrittelyyn vaadittavat betonipeite ehdot (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 158)

Kertoimen α_3 määrittelyssä tarvittava K arvo saadaan alla olevasta kuvasta



Kuvio 22. Kertoimen K arvo palkeille ja laatoille (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 466)

Kerroin α_5 saadaan laskettua kaavasta

$$1,0 - 0,04p \left(\frac{1}{\text{MPa}} \right); p = \frac{V_{Ed}}{bL_T} \quad (73)$$

missä

b = palkin leveys

L_T = tukipinnan leveys

Ankkurointipituudelle on Eurokoodissa määritetty minimiankkurointipituus ($l_{b,min}$), jonka tulee aina täytyä. Minimiarvo saadaan laskettua vetovoimaa ankkuroitaessa kaavasta

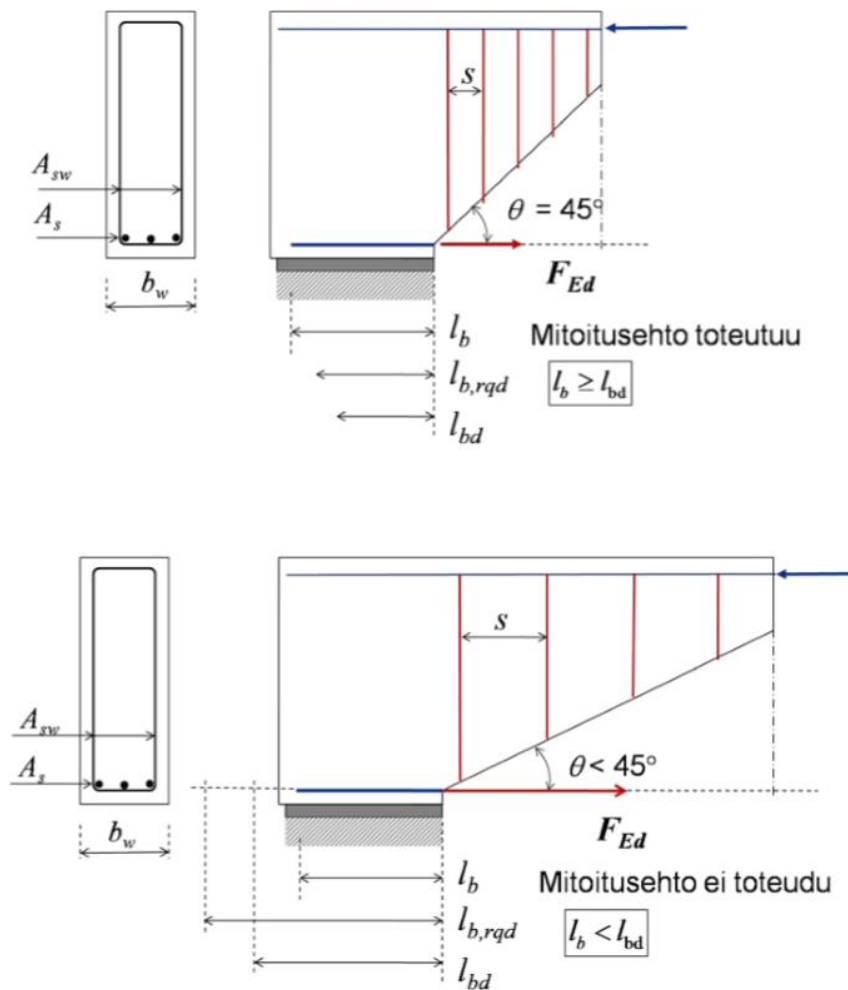
$$l_{bd} \geq l_{b,min} = \text{Suurin seuraavista} \begin{cases} 0,3l_{b,rqd} \\ 10\emptyset \\ 100 \text{ mm} \end{cases} \quad (74)$$

ja puristusvoimaa ankkuroitaessa kaavasta

$$l_{bd} \geq l_{b,min} = \text{Suurin seuraavista} \begin{cases} 0,6l_{b,rqd} \\ 10\emptyset \\ 100 \text{ mm} \end{cases} \quad (75)$$

Ankkurointipituuden tulee täyttää mitoitusehto

$$l_b \geq l_{bd} \quad (76)$$



Kuvio 23. Leikkausraudoituksen määrän vaikutus ankkurointipituuteen (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 160)

Jos suoran tangon ankkurointipituus ei pienennyskertoimillakaan ole riittävä, voidaan ankkurointipituutta pienentää seuraavilla keinoilla:

a) Lisätään tuelle tuotavan raudoituksen määrää, jos kaikkia pääteräksiä ei ole tuotu tuelle.

- b) Puristussauvojen kulmaa voidaan suurentaa, jolloin leikkausraudoituksen määrä kasvaa.
- c) Taivutetaan tankoja ($\varnothing < 20$ mm), vaihtoehtoisesti voidaan myös lisätä erillisiä koukkuja tai lenkkejä, jotka limitetään pääraudoituksen kanssa.
- d) Hitsataan poikittaisia tankoja parantamaan ankkurointipituutta. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 159)

6.2.2 TAIVUTETUT TANGOT

Ankkurointikestävyyttä voidaan parantaa taivuttamalla pääteräkset koukuiksi tai lenkeiksi, jolloin ne toimivat niin sanottuina päätyankkureina. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 467)

Sileillä vedetyillä tangoilla tulee aina käyttää koukkuja tai hitsattuja poikittaistankoja. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 487)

Ankkurointipituutta (l_b) voidaan pidentää taivuttamalla pääteräksiä tuella koukuiksi tai lenkeiksi. Paksujen tankojen (≥ 20 mm) taivuttaminen ei kuitenkaan ole enää kannattavaa, johtuen tangon suuresta taivutussäteestä. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 159)

Eurokoodissa on määritetty ehto, että vapaalle tuelle on tuotava 25% alapinnan pääteräksistä, mutta kuitenkin aina vähintään kaksi pääterästä. Jos jatkuvalla tuella alapinnan teräkset katkaistaan tuen kohdalla, tulee ankkurointipituuden minimi arvon olla vähintään alapuolella olevan kaavan mukainen (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 193)

$$l_b \geq 10\varnothing \quad (77)$$

Keskituella alapinnan teräksiä ankkuroitaessa koukuilla, ankkurointipituus tulee olla vähintään taivutustelan minimihalkaisijan $\varnothing_m \geq 16$ mm ja alle 16 mm tangoilla $2\varnothing_m$ pituinen. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 491)

Betoniteräksiä taivuttaessa on vältettävä tankojen taivutushalkeamia ja murtumia. Halkaisujännityksien on myös pysyttävä tarpeeksi pieninä, jotta tankoa ympäröivä betoni ei halkea. Taivutussäteellä ei ole merkitystä silloin, kun

- a) Taivutetun tangon päässä oleva suora osuus on maksimissaan $5\emptyset$
- b) Tangon taivutettu osuus ei sijaitse poikkileikkauksen reunalla, ja taivutuksen sisäpuolella on vähintään päätangon kokoinen poikittaistanko. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 467)

Eurokoodin mukaan tankojen taivutustelan on täytettävä Eurokoodin ja Betoninormien niille asettamat määräykset. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 468)

Taulukko 10. Eurokoodin asettamat minimi taivutustelat eri tankojen halkaisijoille (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 468)

Tangon halkaisija	Taivutustelan minimi halkaisija
$\emptyset \leq 16$	$4\emptyset$
$\emptyset > 16$	$7\emptyset$

Muissa tapauksissa taivutustelan minimihalkaisija saadaan kaavasta

$$\emptyset_m \geq \frac{F_{bt}}{f_{cd}} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\emptyset} \right) \quad (78)$$

missä

F_{bt} = tangossa murtorajatilassa vaikuttava vetovoima taivutuksen alkuun

a_b = puolet vierekkäisten tankojen keskiövälistä. Kun tanko on tuen reunalla, lasketaan etäisyys kaavasta

$$a_b = c + \frac{\emptyset}{2} \quad (79)$$

missä

c = betonipeitteen paksuus [mm]

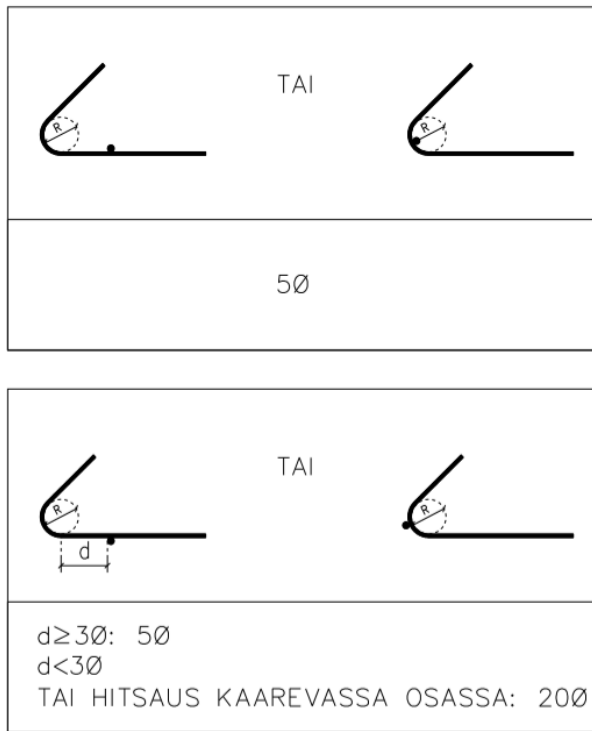
f_{cd} = betonin mitoituslujuus, kaavassa saa käyttää enintään lujuusluokan C60/75 betonin lujuuden arvoa

Betoninormeissa taivutustelan halkaisija riippuu tangon halkaisijan lisäksi myös teräksen laadusta (taivutushalkaisija \varnothing_m on puolet taivuttimen halkaisijasta). (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 468)

Taulukko 11. Betoninormien asettamat minimi taivutustelat eri tankojen halkaisijoille ja teräslaaduille (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 469)

Teräslajit	Haat, koukut ja lenkit	Pääraudoitus
A500HW	4 \varnothing , kun $\varnothing \leq 10$	24 \varnothing
	5 \varnothing , kun $10 < \varnothing \leq 20$	
	7 \varnothing , kun $\varnothing \geq 20$	
A700HW	4 \varnothing , kun $\varnothing \leq 10$	34 \varnothing
	5 \varnothing , kun $10 < \varnothing \leq 20$	
B500K	6 \varnothing , kun $\varnothing \leq 12$	24 \varnothing
B700K	9 \varnothing , kun $\varnothing \leq 12$	34 \varnothing
B600KX	6 \varnothing , kun $\varnothing \leq 12$	30 \varnothing

Eurokoodissa on esitelty minimitaivutustelat päätangoille, joihin on hitsattu poikittaistanko. Minimitaivutussäde on 5 \varnothing , kun poikittaistanko on taitoksen sisäpuolella. Kun hitsattu poikittaistanko on taitoksen vastakkaisella puolella, taivutussäde määräytyy poikittaisen tangon sijainnin perusteella, alla olevan kuvion mukaisesti. Päätanko tulee taivuttaa ennen poikittaisen tangon hitsaamista, johtuen hitsin mahdollisesta haurasmurtumasta. Taivutustelan koko ei kuitenkaan saa alittaa Eurokoodin ja Betoninormien asettamia minimi taivutustelan kokoja. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 468)



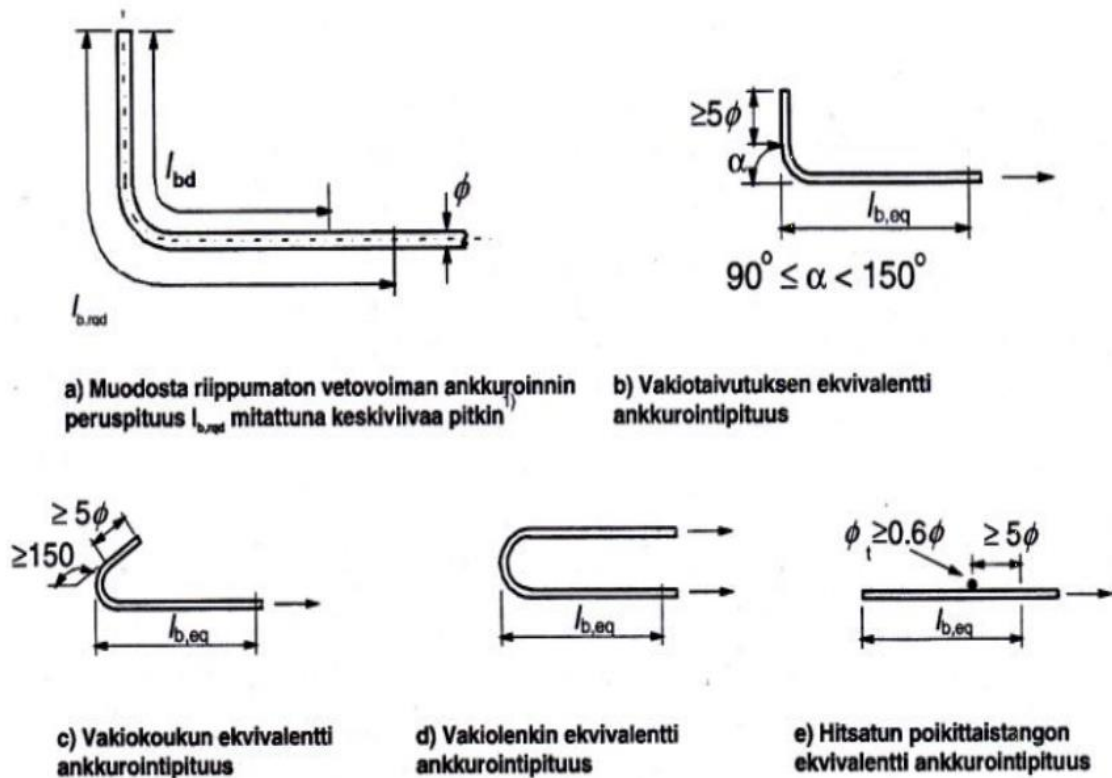
Kuvio 24. Eurokoodissa 2:ssa esitetyt minimi taivutushalkaisijat hitsatuissa raudotteissa (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 468)

Taivutetuilla koukuilla ja lenkeillä mitoituksen kulku menee pääasiassa niin kuin suorillakin. Lenkeissä ja koukuissa, jotka täyttävät alapuolella olevan kuvion taivutetulle tangolle asettamat ehdot, voidaan ankkurointipituuden mitoitusarvo (l_{bd}) korvata ekvivalentti ankkurointipituudella ($l_{b,eq}$). On kuitenkin huomioitava, että ekvivalentti ankkurointipituus koskee vain vedettyjä tankoja.

$$l_{b,eq} = \alpha_1 l_{b,rqd} \quad (80)$$

missä

α_1 = ankkurointipituuden pienennyskertoimien taulukosta (9) saatava pienennyskerroin. Taivutetuilla tangoilla sen arvo on 0,7, jos betonipeite täyttää ehdon $c_d > 3\emptyset$.



Kuvio 25. Ekvivalentti ankkurointipituus hitsatuille poikittaistangoille ja taivuteuille lenkeille/koukuille (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 161)

Ankkurointipituus ($l_{b,rd}$) mitataan tangon keskiakselia pitkin, tangon mahdollisesta taivutuksesta riippumatta. On tärkeää ottaa huomioon, että taivutukset ja koukut eivät paranna puristusvoiman ankkurointia. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 160-161)

Ekvivalentti ankkurointipituus ($l_{b,eq}$) mitataan alhaalla olevan kuvion (26) mukaan alkaen etäisyydellä (a) lenkin/koukun päädyistä. Lähtöpisteessä vaikuttaa vain koukun ankkurointikestävyys, joka ei kestä täyttä vetovoimaa. Pisteessä $a + l_{b,eq}$ voi ensimmäisen kerran vaikuttaa täysi vetovoima. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 472)

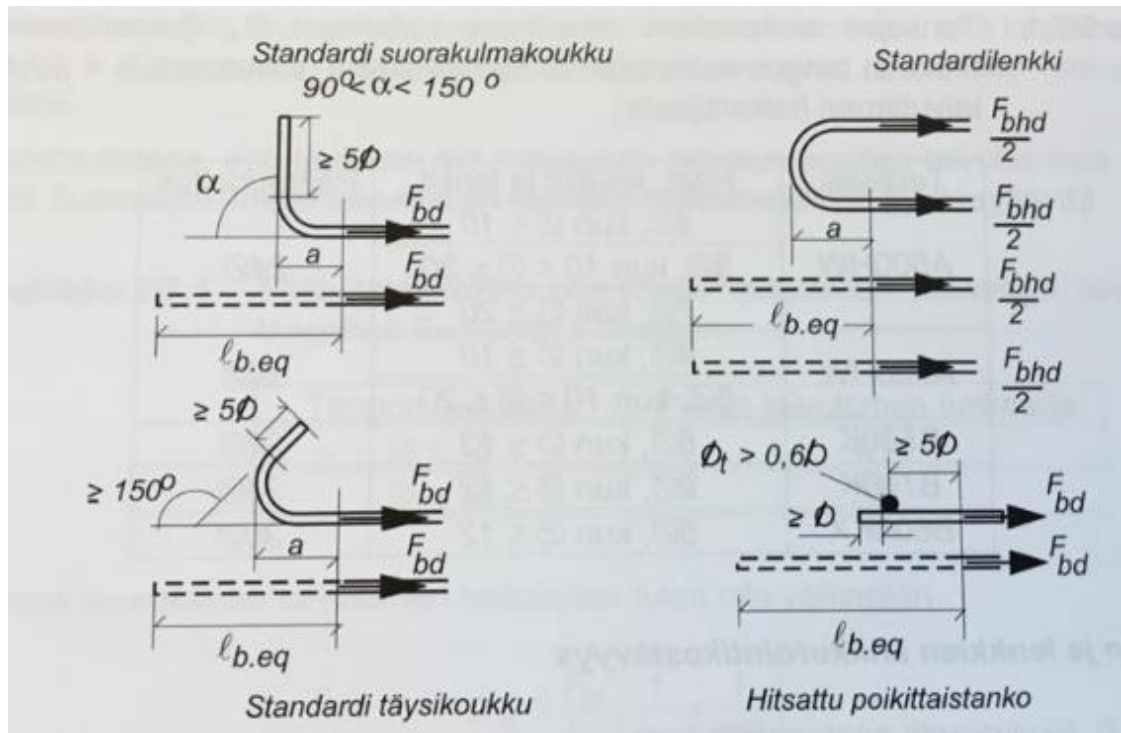
(a) saadaan laskettua kaavasta

$$a = \emptyset + \emptyset_m \quad (81)$$

missä

\emptyset_m = tangon taivutuspyyrän halkaisija

\emptyset = tangon halkaisija (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 469-470)



Kuvio 26. Eurokoodi 2 mukainen ekvivalentti ankkurointipituus (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 470)

Koukkujen ja lenkkien ankkurointikestävyys ekvivalentti ankkurointipituuden avulla kaavasta

$$F_{bd} = l_{b,eq} u_s f_{bd} \quad (82)$$

missä

u_s = tangon ympärysmitta

ja tapauksissa, jotka eivät täytä ekvivalentti arvon käyttämisen sallivia ehtoja kaavasta

$$F_{bd} = l_{b,rqd} u_s f_{bd} \quad (83)$$

6.2.3 HITSATUT POIKITTAISET TANGOT

Eurokoodin mukaan ankkurointipituutta voidaan pienentää hitsaamalla ankkurointipituuden matkalle poikittaistankoja. Poikittaistangot toimivat myös päätyankkureina. Sallituille poikittaistangoille on määritelty kuvion (25) mukainen ehto, jonka mukaan poikittaistangon on oltava suurempi kuin $0,6\emptyset$. Poikittaisen tangon on oltava myös vähintään etäisyydellä $5\emptyset$ ankkurointipituuden alkamiskohdasta kuvion (25) ja (26) mukaisesti. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 160-161)

Hitsattu poikittaistanko mitoitetaan kuten taivutetun tangon ekvivalentti ankkurointi. Tässä tapauksessa ekvivalentin ankkurointipituuden kaavaan (80) vaihdetaan α_1 tilalle α_4 eli

$$l_{b,eg} = \alpha_4 l_{b,rqd} \quad (84)$$

missä

α_4 = taulukon (9) mukainen kerroin, jonka arvo on 0,7

Hitsatun poikittaistangon vaikutus voidaan ottaa huomioon myös puristuspuolen terästen ankkurointimitoituksessa. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 161)

500 N/mm^2 betoniterästangoilla hitsin kestävyys tulee yleensä mitoittavaksi tekijäksi, samoin 12 mm ja sitä pienemmissä päätangoissa. Hitsattujen poikittaisten tankojen kestävyys voidaan laskea kaavasta

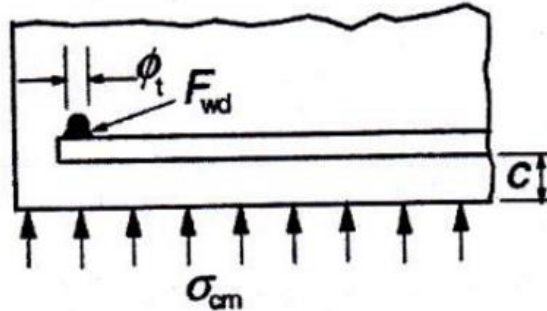
$$F_{btd} = F_{Wd} \leq \frac{16A_s f_{cd} \emptyset_t}{\emptyset} \quad (85)$$

missä

\emptyset_t = poikittaisen tangon halkaisija $\leq 12 \text{ mm}$

\emptyset = ankkuroitavan tangon halkaisija $\leq 12 \text{ mm}$

Suorien tankojen ankkurointipituutta voidaan pienentää myös hitsaamalla tangon päähän poikittainen tanko alapuolella olevan kuvion mukaisesti. Tangon koko tulee rajata tässä tapauksessa 16...32 mm välille. Hitsin laatu ja kapasiteetti on otettava kyseisessä tapauksessa huomioon.



Kuvio 27. Pääterästen ankkurointi hitsatun poikittaistangon avulla (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 473)

Poikittaisen tangon ankkurointikestävyys F_{btd} tulee olla pienempi tai yhtä suuri, kuin hitsin leikkauskestävyys F_{Wd} .

$$F_{btd} \leq F_{Wd} \quad (86)$$

Hitsin leikkauskestävyyden voi laskea yksinkertaistetulla menetelmällä kaavasta

$$F_{Wd} = 0,5A_s f_{sd} \quad (87)$$

missä

A_s = poikittaisen tangon poikkipinta-ala

f_{sd} = betoniraudoituksen suunnittelulujuus

Ankkurointikestävyys F_{btd} lasketaan kaavasta

$$F_{btd} = l_{td} \phi_t \sigma_{td} \leq F_{Wd} \quad (88)$$

missä

l_{td} = poikittaisen tangon mitoituspituus, joka lasketaan kaavasta

$$1,16\varnothing_t \sqrt{\frac{f_{sd}}{\sigma_{td}}} \leq l_t \quad (89)$$

l_t = poikittaisen tangon pituus

\varnothing_t = poikittaisen tangon halkaisija (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 473)

σ_{td} = betonin nimellinen pintapaine, joka lasketaan kaavasta (http://www.betoniyhdistys.fi/media/julkaisut/by210_korjattu_sivu_473.pdf)

$$\sigma_{td} = \frac{f_{ctd} - \sigma_{cm}}{y} \leq 3f_{cd} \quad (90)$$

missä

σ_{cm} = ankkurointitasoon kohdistuva poikittainen paine, puristus negatiivisena

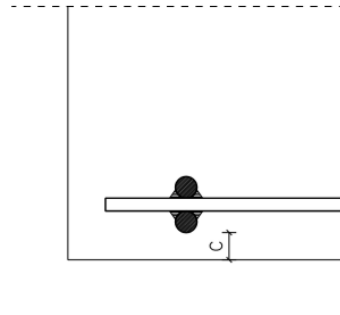
$$y = 0,015 + 0,14e^{-0,18x}$$

$x = \frac{2c}{\varnothing_t} + 1$, missä c on betonipeite (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 473)

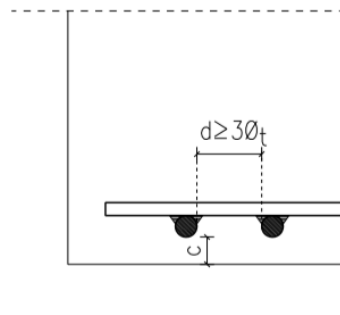
Pääteräksen perusankkurointipituuden $l_{b,rqd}$ lausekkeessa (70) voidaan jännityksen σ_{sd} arvoa pienentää F_{btd}/A_s verran, kun lasketaan vähimmäisankkurointipituus ja suoran tangon osuus kestävydestä. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 473)

Jos ankkuroitavan tangon molemmille puolille hitsataan samanlainen poikittainen tanko, voidaan betonipeite-ehtojen täytyessä ankkurointikestävyys kertoa kahdella.

Jos kaksi tankoa hitsataan ankkuroitavan tangon samalle puolelle vähintään etäisyydelle $3\varnothing_t$, kerrotaan yhden tangon ankkurointi kestävyys 1,4:llä. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 474)



SAMAN KOKOINEN TANKO
ANKKUROITAVAN TANGON MOLEMMIN PUOLIN

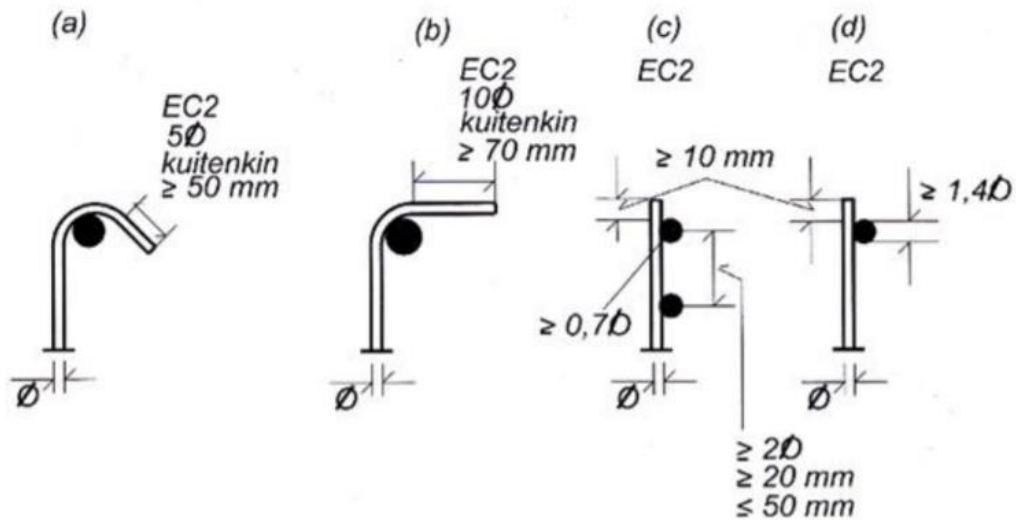


SAMAN KOKOINEN TANKO
ANKKUROITAVAN TANGON SAMALLAPUOLELLA

Kuvio 28. Hitsatut poikittaiset tangot

6.3 LEIKKAUSRAUDOITUKSEN ANKKUROINTI

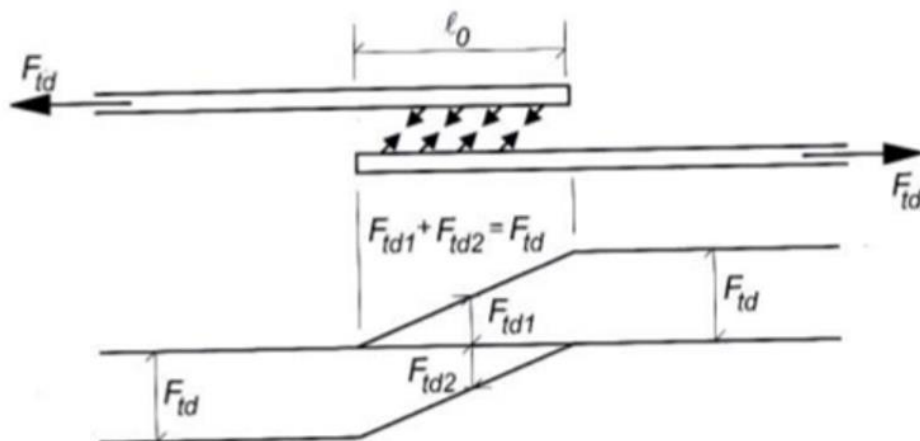
Leikkausraudoitus tulee aina ankkuroida, jotta vetovoima pystyy siirtymään betonilta hakaselle. Hitsattujen hakojen hitsin leikkauslujuus tulee mitoittaa niin, ettei ankkurointikestävyys ylitä hitsin leikkauslujuutta. Leikkausraudoituksen eli hakasten ankkurointi voidaan suunnitella alla olevan kuvion mukaisesti.



Kuvio 29. Eurokoodin mukaiset hakojen ankkurointivaatimukset (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 475)

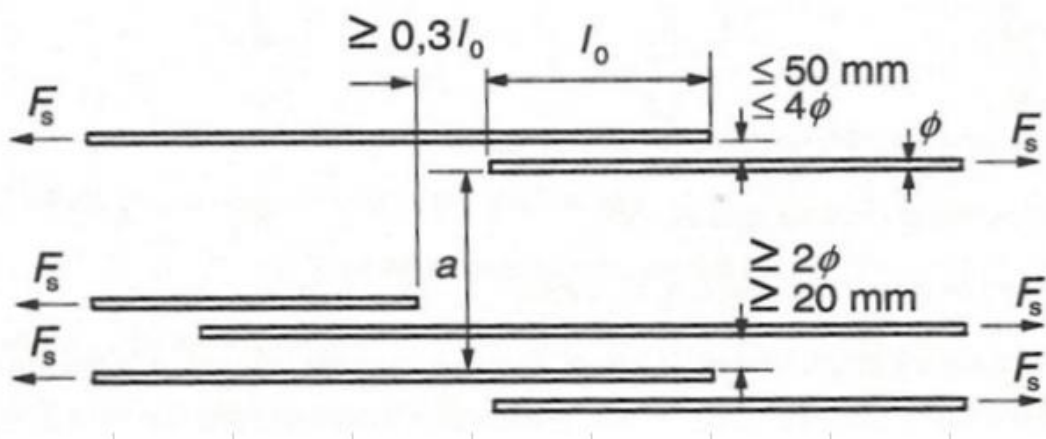
6.4 LIMIJATKOKSET

Pitkissä rakenteissa ja mutkissa, tankoja joudutaan jatkamaan limittämällä. Teräksessä vallitseva vetovoima siirtyy limijatkoksessa betoniin ja betonista seuraavaan tankoon. Limityspituuden tulee olla riittävän suuri, jotta voima pystyy siirtymään tangosta toiselle, ilman, että betonin vetolujuus ylittyy. Vetolujuuden ylittyessä limijatkoksen kestävyyttä voidaan lisätä pidentämällä limityspituutta, lisäämällä hakasia tai erillisellä poikittaisella raudoituksella.



Kuvio 30. Limijatkoksen voimansiirtoperiaate (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 476)

Tyypillisesti jatkoksissa tangot jäävät liian lähelle toisiaan, jolloin tankojen väliin jäävä betonipeite on liian pieni, tämä heikentää voiman siirtymistä tangosta toiselle. Vierekkäiset tangot tulisi asentaa niin, että niiden välinen etäisyys on vähintään 2ϕ tai 20 mm. Limitettyjen tankojen väli saa olla maksimissaan 4ϕ tai 50 mm. Kaikkia tankoja ei pidä jatkaa samassa poikkileikkauksessa eikä myöskään limittää suurimman vetovoiman alueelle. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 475-476)



Kuvio 31. Vierekkäisten limijatkoksien ehdot (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 477)

Yhdessä kerroksessa olevasta vetoraudoituksesta saa limittää 100% samassa jatkoksessa, jos vierekkäisten tankojen päiden etäisyys on yllä olevan kuvion mukaisesti ($\geq 0,3l_0$). Kahdessa kerroksessa olevia vedettyjä tankoja voidaan jatkaa 50% ja puristettuja tankoja 100%.

Eurokoodin mukaan jatkospituuden mitoitusarvo l_0 lasketaan kaavasta

$$l_0 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,rqd} \frac{A_{s,vaadittu}}{A_{s,toteutunut}} \geq l_{0,min} \quad (91)$$

jossa

$\alpha_1 \dots \alpha_5$ kertoimet ja ankkurointipituuden perusarvo $l_{b,rqd}$ määritellään samalla tavalla kuin ankkurointipituuden perusarvoa laskettaessa.

$A_{s,vaadittu}$ = vaadittu teräksen poikkipinta-ala

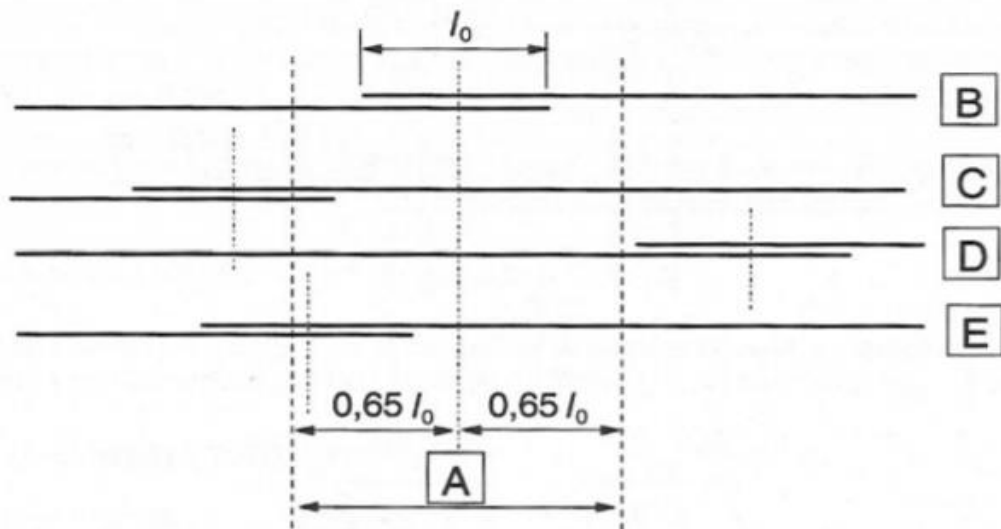
$A_{s,toteutunut}$ = valitulla teräsmäärällä toteutunut teräksen poikkipinta-ala

$$l_{0,min} = \text{Suurin} \begin{cases} 0,3\alpha_3 l_{b,rqd} \\ 15\emptyset \\ 200 \text{ mm} \end{cases}$$

α_6 = kerroin, joka saadaan kaavasta

$$\alpha_6 = \sqrt{\frac{P_1}{25}}, \quad 1 \leq \alpha_6 \leq 1,5 \quad (92)$$

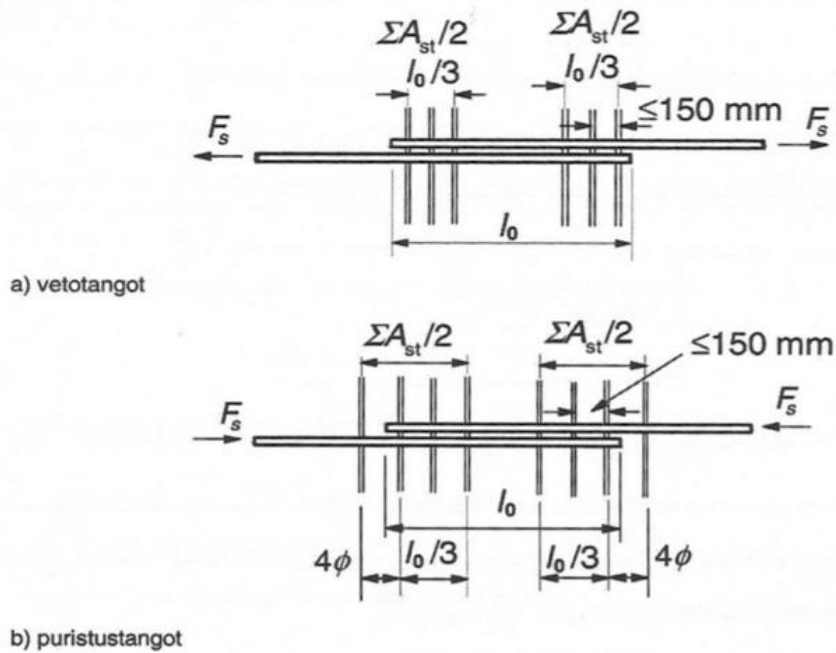
jossa P_1 on limijatkettujen tankojen prosenttiosuus samassa tarkasteltavassa poikkileikkauksessa. Tankojen limijatkoksen keskikohdan tulee olla tarkasteltavan poikkileikkauksen sisällä, jotta se lasketaan kuuluvaksi prosenttiosuuteen. Tarkasteltava poikkileikkaus määritellään mittaamalla keskeltä tarkasteltavaa limijatkosta $0,65l_0$ verran keskikohdan molemmille puolille.



Kuvio 32. Raudoituksen prosenttiosuuden määrittäminen (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 477)

Esimerkiksi yllä olevassa kuviossa on esitetty limijatkoksien keskikohdat lyhyellä pistekatkoviivalla ja tarkasteltava poikkileikkaus pitkällä pistekatkoviivoilla. Tarkasteltaessa tankoa B, poikkileikkaukseen osuu 2 limijatkosta (B ja E), eli jatkettu prosentti osuus on 50%. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 477)

Limijatkoksissa alle 20 mm tangoilla, tai jos rakenteen jokaisessa kohdassa tankojen jatkettu osuus P_1 on alle 25%, riittävät palkin leikkausmitoituksessa määritetyt hakaset estämään halkeilun. Suuremmilla tangoilla tulee poikittainen raudoitus mitoittaa niin, että poikittaisen raudoituksen kokonaispinta-ala ΣA_{st} on vähintään sama, kuin yhden jatkettavan tangon poikkipinta-ala A_s . (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 478)



Kuvio 33. Vedettyjen ja puristettujen tankojen jatkoksien poikittaisraudoituksen sijoittaminen (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 479)

Poikittaisraudoitus tulee sijoittaa yllä olevan kuvion mukaisesti jatkettavien tankojen päiden alueelle. Puristettujen tankojen poikittaisena raudoituksena tulee palkeissa ja pilareissa pääsääntöisesti käyttää umpihakoja. Umpihakoja tai U-lenkkejä tulee käyttää myös silloin, kun samassa poikkileikkauksessa jatketaan yli 50% tangoista ja reunimmaisten tankojen välinen etäisyys (a) on kuvion (31) mukaan maksimissaan 10ϕ . (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 479)

6.5 ERILLISET KOUKUT JA LENKIT

Ankkurointipituutta voidaan vapaalla tuella parantaa myös lisäämällä palkin päähän erillisiä pienempiä lenkkejä ja koukkuja. Erillisten lenkkien ja koukkujen tankopaksuus on yleensä 10...16 mm (≥ 20 mm tankoja ei taivuteta).

Pääteräksien ja ankkurointiterästen tulee limittyä jatkospituuden mitoitusarvon l_0 mukaisesti.

Eurokoodissa on määritetty ehto, että vapaalle tuelle on tuotava 25% alapinnan pääteräksistä, mutta kuitenkin aina vähintään kaksi pääterästä. Jos jatkuvalla tuella alapinnan teräkset katkaistaan tuen kohdalla, ankkurointipituuden minimiarvo saadaan kaavasta (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 193)

$$l_b \geq 10\emptyset \quad (93)$$

Keskituella alapinnan teräksiä ankkuroitaessa koukuilla, ankkurointipituus tulee olla vähintään taivutustelan minimihalkaisijan $\emptyset_m \geq 16$ mm ja alle 16 mm tanگوilla $2\emptyset_m$ pituinen. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 491)

6.6 PÄÄTERÄSTEN KATKAISUKOHDAT

Pääterästen katkaisukohtien mitoituksen periaatteena on optimoida rakenteen rauditusmäärää vähentämällä taivutusraudoitusta. Rakenteessa mitoitetaan kohdat, joissa "ylimääräinen" rauditus voidaan katkaista. Koska tuelle ei ole tarpeellista tuoda kaikkia vedettyjä teräksiä, voidaan tällä menettelyllä käyttää teoriassa vähemmän rauditusta rakenteessa. (Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013/by211, 192)

Eurokoodissa on huomautettu raudituksen katkaisukohtien rauditusohjeesta, jonka mukaan taivutusraudoituksen optimoiminen ei ole käytännöllistä vaan teoreettinen esimerkki. Tankoja katkaistaessa tulee erittäin suurella todennäköisyydellä hukkapätkiä, kun tankoja ei saada katkaistua niin, että koko tanko saataisiin hyödynnettyä. Tästä syystä tässä opinnäytetyössä ei käydä katkaisukohtien mitoitusta. (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008/by210, 490)

7 POHDINTA

Opinnäytetyössä käytetty kirjallisuus- ja laskentatutkimus sopi työhön. Näiden pohjalta saatiin tehtyä Excel-mitoitusohjelma, joka oli lähtökohtainen tavoite työlle.

Mitoitusohjelman tuloksia on vertailtu opinnäytetyössä käytettyjen kirjojen sisältämiin Eurokoodin mukaisiin taulukoihin, jonka perusteella on saatu varmuus mitoitusohjelman toimivuudesta ja luotettavuudesta.

Liitteen (1) laskentaesimerkistä voidaan päätellä, että esimerkkitapauksessa pienennyskertoimien vähentävä vaikutus on n.16%. Edullisten vaikutusten yhdistetty pienennyskerroin on vielä maltillinen, mutta ero on silti huomattava. Liitteen (1) esimerkissä ankkurointipituuden perusarvo on n.50% pienempi, kuin mitä se olisi täydelle voimalle mitoittaessa. Liitteen (1) tapauksessa ankkurointipituuden perusarvo pieneni n.40%, kun puristussauvan kulmaksi asetettiin 45 astetta. Liitteen (2) laskentaesimerkissä tarkasteltiin täsmälleen saman palkin ankkurointia, kun ankkuroitavan tangon päähän on hitsattu ankkuroitavan tangon paksuinen poikittaistanko. Tangon päähän hitsatun tangon parantava vaikutus on esimerkkitapauksessa n.61%, ilman pienennyskertoimia. Päätyankkureiden (hitsatut poikittaistangot, koukut, ankkurointikappaleet) parantava vaikutus on valtava, mutta niitä käytettäessä on huomioitava betonin ja teräksen murtumisriskit.

Tuotannossa käytetään paljon vakioraudoite-elementtejä, joiden käyttö monesti rajaa tuella terästen ankkurointi tapaa. Suomessa puristussauvan kulmana käytetään yleisesti $21,8^\circ$, mutta ankkurointimitoituksen kannalta puristussauvan kulman suurentaminen ja leikkausraudoituksen tihentäminen on joissain tapauksissa järkevää. Toisaalta puristussauvan kulman suurentaminen kasvattaa raudoitusmäärää kokonaisuudessa, joten palkkeihin on edullisempaa lisätä erillisiä ankkurointiteräksiä kuin leikkausraudoitusta.

Optimoitaessa ankkurointipituutta, on noudatettava tarkasti raudoituksen asen-
tamisohjeita, tankojen asemointiin liittyviä ohjeita sekä tartunnan toimivuuden

kannalta asetettuja betonipeitevaatimuksia. Tankojen taivutus- ja hitsausmääräyksistä puhumattakaan. Toki suunnittelussa on pidettävä järkevä toleranssi, riskien ehkäisemiseksi.

Teräsbetonipalkin leikkausmitoitus herätti suurta mielenkiintoa ristikkomenetelmän tarkempaan perehtymiseen, ja ankkurointipituuden mitoitus avasi monta ovia muidenkin rakenteiden, kuin palkkien ankkurointimitoitukseen. Ankkurointimitoituksen kulku on eri teräsbetonirakenteilla lähes samanlainen, mikä mahdollistaa muidenkin Excel-pohjaisten mitoitushjelmien kehittämistä.

Jatkotutkimusta voitaisiin tehdä teräksen ja betonin eri murtomekanismien mitoituksesta, jossa perehdyttäisiin esimerkiksi vaarnatappien ankkurointiin. Toinen jatkotutkimus aihe, voisi olla injektoitavien ankkureiden toimintaperiaate ja mitoitus.

LÄHTEET

Betoniteollisuus ry. n.d. Julkisivut/Rakenteellinen toiminta/Säilyminen. Elementtisuunnitteluun liittyvä internetsivusto. Luettu 08.04.2020. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/sailyvyys>

Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 2015. SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2. painos. Helsinki: Rakennusteollisuus RT ry.

Suomen betoniyhdistys ry. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005. PDF. 29.04.2008. Korjattu sivu. Luettu 10.4.2020. http://www.betoniyhdistys.fi/media/julkaisut/by210_korjattu_sivu_473.pdf

Suomen Betoniyhdistys ry. 2008. By 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. 2. painos. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2013. By 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 - osa 1. 3. painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. Betonitekniikan oppikirja. 6. painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Suomen Rakennusinsinöörin Liitto. 2004. RIL 131-2004. Betoninormit. RakMk B4 Betonirakenteet. Mitoitustaulukot ja käyrästöt. SFS-EN 206-1 ja kansallinen liite. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.

Suomen Betoniyhdistys ry, Suomen rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 2011. RIL 202-2011. Betonirakenteiden suunnitteluohje. Eurokoodit EN 1992-1-1. Eurokoodit 1992-1-2. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry, Suomen Rakennusinsinöörin liitto ry.

LIITTEET

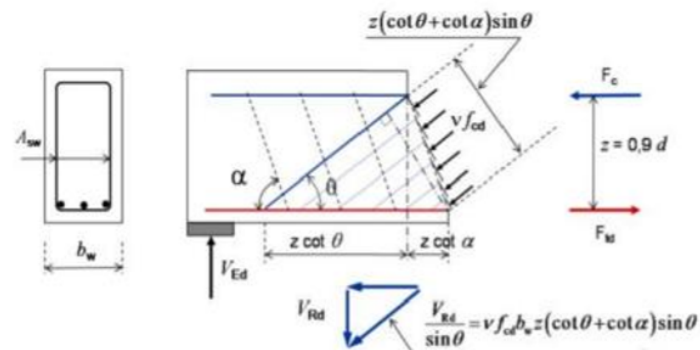
Liite 1. Teräsbetonipalkin ankkurointimitoitus esimerkki 1

Suoran tangon ankkurointimitoitus

Suoran tangon ankkurointi

Lähtötiedot

d	Palkin korkeus	500 mm
b _w	Palkin leveys	280 mm
L,t	Tuen leveys palkin pituus suunnassa	280 mm
f _{yk}	Teräksen ominaislujuus	500 MPa
f _{ck}	Betonin ominaislujuus (max C60/75)	30 MPa
γ _c	Betonin osavarmuuslujuus	1,5
γ _s	Teräksen osavarmuuslujuus	1,15
f _{ctm}	Betonin vetolujuus	2,90 Mpa
f _{ctk}	Bet.vetolujuuden ominaisarvo	2,03 Mpa
f _{ctd}	Bet.vetolujuuden mitoitusarvo	1,35 Mpa
α _{cc}	EU:ssa 0,85	0,85
f _{cd}	Betonin puristuslu. Mitoitusarvo	17,00 MPa
f _{yd}	Teräksen mitoituslujuus	434,7826 MPa
C _{nom}	Betonipeite tangon päässä	30 mm
∅	Pääteräksen halkaisija	16 mm
∅ _h	Hakasten halkaisija	8 mm
	Pääteräksien määrä	2 kpl
A _s	Pääteräksien poikkipinta-ala	402,1239 mm ²
V _{ed}	Mitoitus leikkausvoima	70 kN
α	Leikkausraudoituksen (hakasten) kulma	90 astetta
θ	Puristussauvan kulma (21,8...45)	21,8 astetta



Tuelle ankkuroitava voima

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

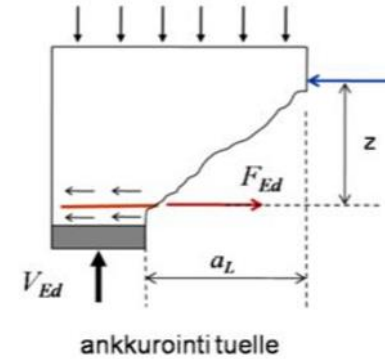
Fed Raudoitukseen kohdistuva voima 87,50624 kN

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 \eta_2 f_{ctd}$$

fbd Tartuntalujuus 3,041292 N/mm2
 η1 Tartunta olosuhteista riippuva kerroin 1 Hyvät=1, huonot=0,7

η2 Tankopaksuudesta riippuva kerroin $1 = \begin{cases} 1,0 & , \text{ kun } \varnothing \leq 32 \text{ mm} \\ \frac{132 - \varnothing}{100} & , \text{ kun } \varnothing > 32 \text{ mm} \end{cases}$

lb Ankkurointipituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän 250 mm



$$\sigma_{sd} = \frac{F_{Ed}}{A_s}$$

σsd tangossa vaikuttava normaalijännitys 217,6102 N/mm2

$$l_{b,rqd} = \frac{\varnothing \sigma_{sd}}{4 f_{bd}}$$

lb,rqd Ankkurointipituuden perusarvo 286,2076 mm

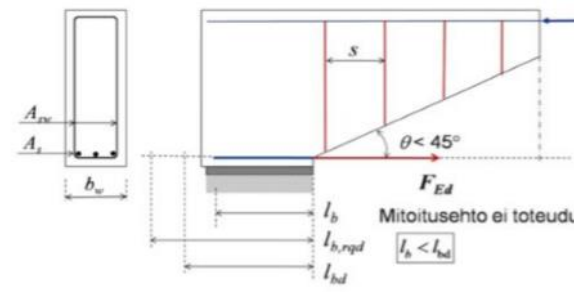
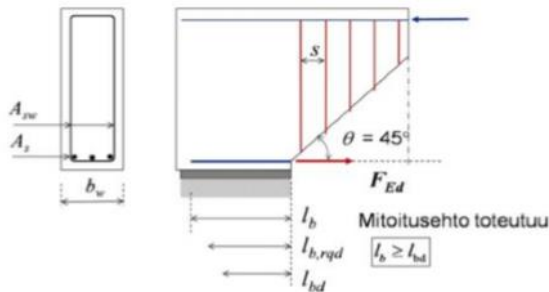
Mitoitetaanko täydelle voimalle? ei

Täydelle voimalle ankkuroitaessa σsd=fyd

fyk	Raudoituksen lujuus	500 Mpa
Ys	Teräksen osavarmuusluku	1,15
fyd	Teräksen mitoituslujuus	434,7826 MPa
Fed	fyd vastaava vetovoima	174,8365 kN

Mitoitusehto $l_b \geq l_{b,rqd}$

ANKKUROINTIPITUUS EI RIITÄ KA 114 %



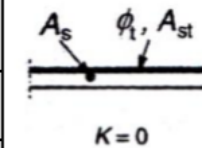
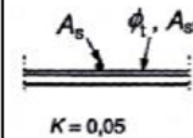
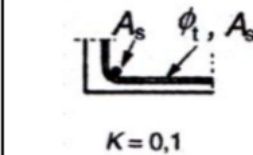
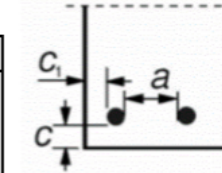
Pienennyskerroimet

Jokaisen kertoimen arvo on 0,7...1,0 välillä. Kertoimilla α_2, α_3 ja α_5 pienennetään suoran tangon ankkurointipituutta, mutta näiden kertoimien tulo ei saa olla alle 0,7. Kerroin α_1 ottaa huomioon koukkujen ja lenkkien vaikutuksen. Kerroin α_4 ottaa huomioon hitsatut poikittaistangot. **Pienennyskerroimia ei tule käyttää, ellei ankkurointipituus riitä ilman niitä.**

Onko ankkuroitava tanko vedetty vai puristettu?

vedetty

α_1	Tankojen muoto (Suoralla tangolla=1)		1
α_2	Betonipeite		0,86875
Cnom	Pääteräksen pienin betonipeite (c1 tai c, katso kuva oikealla)	30 mm	
a	Tankojen välinen etäisyys	172 mm	
Cd	Tankojen pienin väli/2 tai betonipeite	30 mm	
α_3	Poikittaisen laajenemisen estoraudotus, jota EI OLE hitsattu pääraudoitukseen		1
$\sum A_{st}$	Poikittaisraudoituksen (hakaset tai jokin muu poikittainen raudoite) poikkileikkausala pitkin mitoitusarvon mukaista ankkurointipituutta lbd	0 mm ²	
	Poikittaisraudoituksen halkaisija	0 mm	
	Ankkurointipituuden matkalla olevien poikit.raud. määrä	0 kpl	
$\sum A_{st,min}$	Poikittaisraudoituksen poikkileikkausalan vähimmäisarvo	0 mm ²	
A_s	Yksittäisen halkaisijaltaan suurimman ankkuroidun tangon poikkileikkausala	201,0619 mm ²	
λ	Kerroin	0	
K	Oikealla olevasta kuvasta saatava kerroin	0,1	
α_4	Poikittainen hitsattu laajenemisen estoraudotus		1
	Tuleeko poikittaista raudoitusta, joka on hitsattu pääteräksiin?	ei	
α_5	Laajenemista estävä poikittaispaine	Käytetäänkö kerrointa?	0,964286
p	Puristusjännitys raudoituksen tasossa yhdistetty pienennyskerroin	0,892857 Mpa	0,837723



l_b Ankkurointipituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän 250 mm
 l_{b,rqd} Ankkurointipituuden perusarvo 286,2076 mm

Mitoitusehto $l_b \geq l_{b,rqd}$ **ANKKUROINTIPITUUS EI RIITÄ** **KA** **114 %**

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd}$$

l_{bd} Ankkurointipituuden mitoitusarvo 239,7627 mm

Mitoitusehto $l_b \geq l_{bd}$ **OK** **KA** = **96 %**

Ankkurointipituuden minimiarvo vetovoimaa ankkuroitaessa

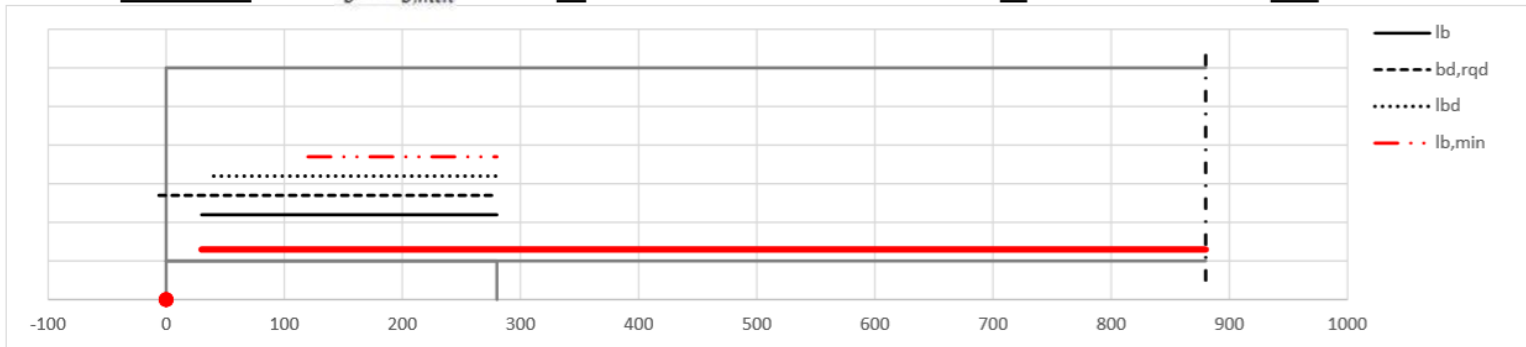
l_{b,min} $l_{bd} \geq l_{b,min} = \text{Suurin seuraavista}$ $\begin{cases} 0,3l_{b,rqd} & 85,86227 \text{ mm} \\ 10\emptyset & 160 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} & 100 \text{ mm} \end{cases}$ 160 mm

Määräävä 160 mm

Ankkurointipituuden minimiarvo puristusvoimaa ankkuroitaessa

l_{b,min} $l_{bd} \geq l_{b,min} = \text{Suurin seuraavista}$ $\begin{cases} 0,6l_{b,rqd} & 171,7245 \text{ mm} \\ 10\emptyset & 160 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} & 100 \text{ mm} \end{cases}$ 172 mm

Mitoitusehto $l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$ **OK**
Mitoitusehto $l_{bd} \geq l_{b,min}$ **OK**
Mitoitusehto $l_b \geq l_{b,min}$ **OK** **KA** = **64 %**



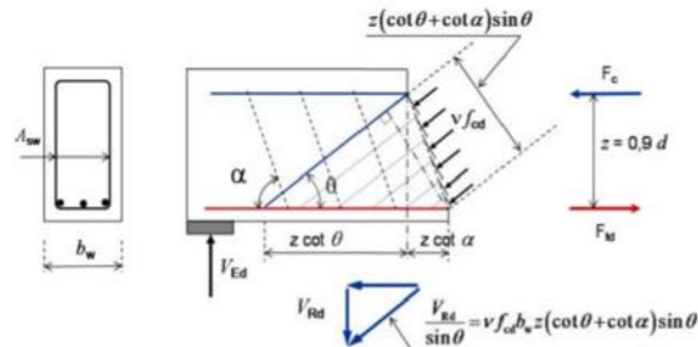
Liite 2. Teräsbetonipalkin ankkurointimitoitus esimerkki 2

Suoran tangon ankkurointimitoitus, jonka päähän on hitsattu pääteräksen paksuinen poikittaistanko.

Suoran tangon ankkurointi

Lähtötiedot

d	Palkin korkeus	500 mm
b _w	Palkin leveys	280 mm
L,t	Tuen leveys palkin pituus suunnassa	280 mm
f _{yk}	Teräksen ominaislujuus	500 MPa
f _{ck}	Betonin ominaislujuus (max C60/75)	30 MPa
γ _c	Betonin osavarmuuslujuus	1,5
γ _s	Teräksen osavarmuuslujuus	1,15
f _{ctm}	Betonin vetolujuus	2,90 Mpa
f _{ctk}	Bet.vetolujuuden ominisarvo	2,03 Mpa
f _{ctd}	Bet.vetolujuuden mitoitusarvo	1,35 Mpa
α _{cc}	EU:ssa 0,85	0,85
f _{cd}	Betonin puristuslu. Mitoitusarvo	17,00 Mpa
f _{yd}	Teräksen mitoituslujuus	434,7826 MPa
C _{nom}	Betonipeite tangon päässä	30 mm
∅	Pääteräksen halkaisija	16 mm
∅ _h	Hakasten halkaisija	8 mm
	Pääteräksien määrä	2 kpl
A _s	Pääteräksien poikkipinta-ala	402,1239 mm ²
V _{ed}	Mitoitus leikkausvoima	70 kN
α	Leikkausraudoituksen (hakasten) kulma	90 astetta
θ	Puristussauvan kulma (21,8...45)	21,8 astetta



Tuelle ankkuroitava voima

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

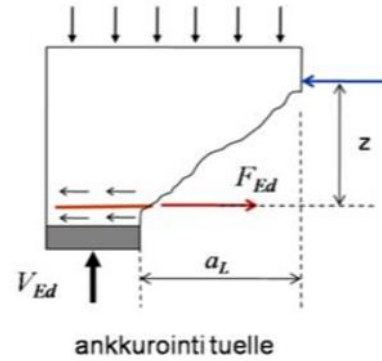
Fed Raudoitukseen kohdistuva voima 87,50624 kN

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \eta_2 f_{ctd}$$

fbd Tartuntalujuus 3,041292 N/mm²
 η1 Tartunta olosuhteista riippuva kerroin Hyvät=1, huonot=0,7

η2 Tankopaksuudesta riippuva kerroin $1 = \begin{cases} 1,0 & , \text{kun } \emptyset \leq 32 \text{ mm} \\ \frac{132 - \emptyset}{100} & , \text{kun } \emptyset > 32 \text{ mm} \end{cases}$

lb Ankkurointipituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän 250 mm



$\sigma_{sd} = \frac{F_{Ed}}{A_s}$
 σsd tangossa vaikuttava normaalijännitys 217,6102 N/mm²

Mitoitetaanko täydelle voimalle?

Täydelle voimalle ankkuroitaessa σsd=fyd

f_{yk} Raudoituksen lujuus 500 Mpa

Y_s Teräksen osavarmuusluku 1,15

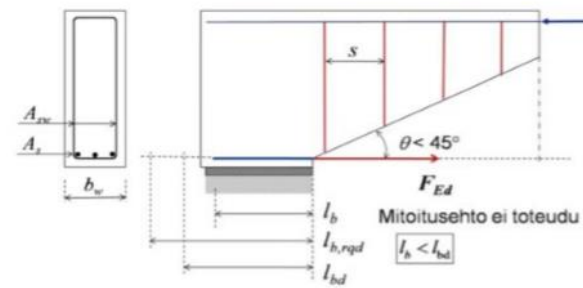
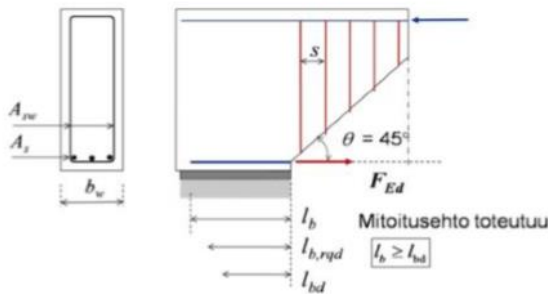
f_{yd} Teräksen mitoituslujuus 434,7826 MPa

F_{ed} f_{yd} vastaava vetovoima 174,8365 kN

$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset \sigma_{sd}}{4 f_{bd}}$
 lb,rqd Ankkurointipituuden perusarvo 286,2076 mm

Mitoitusehto $l_b \geq l_{b,rqd}$

ANKKUROINTIPITUUS EI RIITÄ **KA** **114 %**



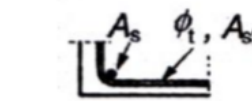
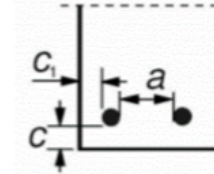
Pienennyskerroimet

Jokaisen kertoimen arvo on 0,7...1,0 välillä. Kertoimilla α_2 , α_3 ja α_5 pienennetään suoran tangon ankkurointipituutta, mutta näiden kertoimien tulo ei saa olla alle 0,7. Kerroin α_1 ottaa huomioon koukkujen ja lenkkien vaikutuksen. Kerroin α_4 ottaa huomioon hitsatut poikittaistangot. **Pienennyskerroimia ei tule käyttää, ellei ankkurointipituus riitä ilman niitä.**

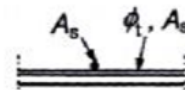
Onko ankkuroitava tanko vedetty vai puristettu?

vedetty

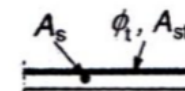
α_1	Tankojen muoto (Suoralla tangolla=1)		1
α_2	Betonipeite		0,86875
Cnom	Pääteräksen pienin betonipeite (c1 tai c, katso kuva oikealla)	30 mm	
a	Tankojen välinen etäisyys	172 mm	
Cd	Tankojen pienin väli/2 tai betonipeite	30 mm	
α_3	Poikittaisen laajenemisen estoraudotus, jota EI OLE hitsattu pääraudoitukseen		1
$\sum A_{st}$	Poikittaisraudoituksen (hakaset tai jokin muu poikittainen raudoite) poikkileikkausala pitkin mitoitusarvon mukaista ankkurointipituutta lbd	0 mm ²	
	Poikittaisraudoituksen halkaisija	0 mm	
	Ankkurointipituuden matkalla olevien poikit.raud. määrä	0 kpl	
$\sum A_{st,min}$	Poikittaisraudoituksen poikkileikkausalan vähimmäisarvo	0 mm ²	
A_s	Yksittäisen halkaisijaltaan suurimman ankkuroidun tangon poikkileikkausala	201,0619 mm ²	
λ	Kerroin	0	
K	Oikealla olevasta kuvasta saatava kerroin	0,1	
α_4	Poikittainen hitsattu laajenemisen estoraudotus		0,7
	Tuleeko poikittaista raudoitusta, joka on hitsattu pääteräksiin?	kyllä	
α_5	Laajenemista estävä poikittaispaine	Käytetäänkö kerrointa?	kyllä
p	Puristusjännitys raudoituksen tasossa	0,892857 Mpa	0,964286
	yhdistetty pienennyskerroin		0,837723



$K = 0,1$



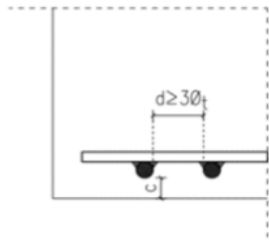
$K = 0,05$



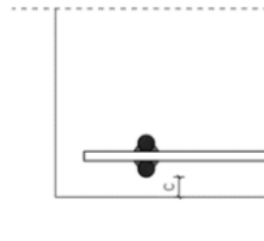
$K = 0$

Hitsatut poikittaiset tangot

Øt	Poikittaisen tangon halkaisija	16 mm
	Ensimmäisen poikkitangon etäisyys tuen reunasta k/k	240 mm
	Poikittaisen tangon etäisyys päätangon päästä k/k	10 mm
Cnom,pää	Betonipeite tangon alapuolella	30 mm
	Poikittaisten tankojen määrä	1 kpl
	Onko kaikki tangot samalla puolella päätankoa?	kyllä
	Poikittaisten tankojen välinen etäisyys	0 mm
	Täyttyykö päätangon alapuolisella poikittaistangolla betonipeite ehdot?	kyllä



SAMAN KOKOINEN TANKO
ANKKUROITAVAN TANGON SAMALLAPUOLELLA



SAMAN KOKOINEN TANKO
ANKKUROITAVAN TANGON MOLEMMIN PUOLIN

Tangon päähän hitsattu poikittaistanko

As	Poikittaisen tangon poikkipinta-ala	201,0619 mm ²
f _{sd} =f _{yd}	Betoniraudituksen suunnittelulujuus	434,7826 N/mm ²

$$F_{wd} = 0,5 A_s f_{sd}$$

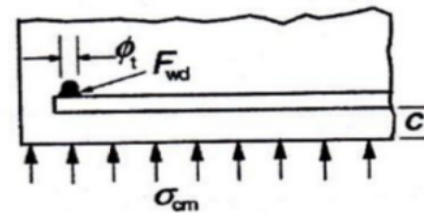
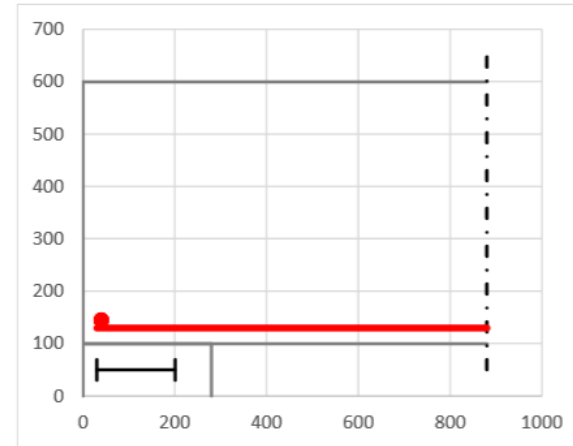
F _{wd}	Hitsin leikkauskestävyys (yksinkertaistettu)	43,70912 kN
	Hitsiliitoksen vahvuus	50 %
l _t	Poikittaisen tangon pituus	150 mm

$$l_{b,eq} = \alpha_4 l_{b,rq,d}$$

l _{b,eq}	Ekvivalentti ankkurointipituuden perusarvo	200,3453 mm
-------------------	--	-------------

POKITTAINEN TANKO ON PÄÄTANGON PÄÄSSÄ

Suositus > 48 mm
Toteutuva betonipeite 30 mm



σ_{cm}	Ankkurointitasoon kohdistuva poikittainen pintapaine negatiivisena	-0,89286 N/mm ²			
y	$0,015 + 0,14e^{-0,18x}$	0,07454			
x	$\frac{2c}{\phi_t} + 1$	4,75			
	$\sigma_{td} = (f_{cd} - \sigma_{cm})/y \leq 3f_{cd}$			$\sigma_{td} \leq 3f_{cd}$	
σ_{td}	Betonin nimellinen pintapaine	30,11206 N/mm ²	\leq	51 N/mm ²	OK
	$1,16\phi_t \sqrt{\frac{f_{sd}}{\sigma_{td}}} \leq l_t$			$l_{td} \leq l_t$	
l _{td}	Poikittaisen tangon mitoituspituus	70,52512 mm	\leq	150 mm	OK
	$F_{btd} = l_{td}\phi_t\sigma_{td} \leq F_{Wd}$			$F_{btd} \leq F_{Wd}$	
F _{btd}	Ankkurointikestävyys	33,97851 kN	\leq	43,70912 kN	OK
	Mitoittavaksi tekijäksi tulee POIKITTAISEN TANGON ANKKUROINTIKESTÄVYYS			33,97851 kN	
	≤ 12 mm pääteräksien ja poikittaisten tankojen mitoitus				
	$F_{btd} = F_{Wd} \leq 16A_s f_{cd} \phi_t / \phi$			$F_{btd} \leq F_{Wd}$	
F _{btd}	Hitsatun poikittaisen tangon kestävyys ϕ_t = poikittaisen tangon halkaisija ≤ 12 mm ϕ = ankkuroitavan tangon halkaisija ≤ 12 mm	109,3777 kN	\leq	43,70912 kN	EI TOTEUDU!
	Mitoittavaksi tekijäksi tulee HITSIN KESTÄVYYS			43,70912 kN	

Yli 12 mm tankojen mitoitus

Ehtojen täytyessä: $F_{bd} = l_{b,eq} u_s f_{bd}$ muuten: $F_{bd} = l_{b,rqd} u_s f_{bd}$

Fbd	Koko ankkurin tartuntakestävyys	43,75312 kN	
	Poikittaisen tangon osuus	13,12594 kN	
	Hitsin kestävyys	43,70912 kN	
	Mitoittavaksi tekijäksi tulee	POIKITTAISEN TANGON ANKKUROINTIKESTÄVYYS	13,12594 kN

Määrävä ankkurointikestävyys

	Poikittaisen tangon ankkurointikestävyys	33,97851 kN
	Ankkurointikestävyyden kerroin	1
Ftbd	Poikittaisen tangon mitoitukseenkestävyys	33,97851 kN

Pääteräksen perusankkurointipituuden $l_{b,rqd}$ lausekkeessa voidaan jännityksen σ_{sd} arvoa pienentää $F_{bt,d}/A_s$ verran, kun lasketaan vähimmäisankkurointipituus ja suoran tangon osuus kestävydestä.

$$F_{bt,d}/A_s$$

Jännitys, jolla pienennetään normaalijännitystä 84,49761 N/mm²

σ_{sd} tangossa vaikuttava mitoituspääjännitys 133,1126 N/mm²

$$l_{b,rqd} = \frac{\sigma_{sd}}{4 f_{bd}}$$

l_{b,rqd} Ankkurointipituuden perusarvo 175,0737 mm (kun lasketaan vähimmäisankkurointipituutta l_{bd})

lb Ankkurointipituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän 250 mm
 lb,rqd Ankkurointipituuden perusarvo 175,0737 mm

Mitoitusehto $l_b \geq l_{b,rqd}$ **OK** **KA** **70 %**
 $l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd}$

lbd Ankkurointipituuden mitoitusarvo 146,6633 mm

Mitoitusehto $l_b \geq l_{bd}$ **OK** **KA** = **59 %**

Ankkurointipituuden minimiarvo vetovoimaa ankkuroitaessa

lb,min $l_{bd} \geq l_{b,min} = \text{Suurin seuraavista}$ $\begin{cases} 0,3l_{b,rqd} & 85,86227 \text{ mm} \\ 10\emptyset & 160 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} & 100 \text{ mm} \end{cases}$ 160 mm

Määrävä 160 mm

Ankkurointipituuden minimiarvo puristusvoimaa ankkuroitaessa

lb,min $l_{bd} \geq l_{b,min} = \text{Suurin seuraavista}$ $\begin{cases} 0,6l_{b,rqd} & 171,7245 \text{ mm} \\ 10\emptyset & 160 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} & 100 \text{ mm} \end{cases}$ 172 mm

Mitoitusehto $l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$ **OK**
Mitoitusehto $l_{bd} \geq l_{b,min}$ **KÄYTETÄÄN MINIMI ANKKUROINTIPITUUTTA**
Mitoitusehto $l_b \geq l_{b,min}$ **OK** **KA** = **64 %**

