



Excel-pohjaisten mitoitusohjelmien kehittäminen

Teemu Kuronen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2024

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma
Talonrakennustekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka

KURONEN, TEEMU:
Excel-pohjaisten mitoitusohjelmien kehittäminen

Opinnäytetyö 65 sivua, joista liitteitä 13 sivua
Toukokuu 2024

Opinnäytetyön aiheeksi valikoitui insinööritoimisto Jonecon Oy:n havaitsema tarve mitoitusohjelmille, joiden avulla olisi mahdollista aiempaa kustannustehokkaammin toteuttaa toimistossa tehtävää suunnittelu-/mitoitustyötä. Tarve mitoitusohjelmien kehittämiseksi on ollut olemassa, koska ohjelmat eivät ole enää ajantasaiset, paikkansapitävät ja ovat muutenkin tiedoiltaan ja toiminnoiltaan puutteellisia.

Opinnäytetyönä kehitettiin toimivat ja ajantasaiset Excel-pohjaiset mitoitusohjelmat insinööritoimisto Jonecon Oy:n toimistokäyttöön. Mitoitusohjelmien tueksi teoria ja laskenta avattiin myös työssä. Mitoitusohjelmat liittyvät teräsbetonirakenteisiin ja tarkemmin laatan lävistyskapasiteettiin, maanpaineeseen, raudituksen ankkurointiin ja palkin vääntörasitukseen/-kapasiteettiin. Tavoitteena on, että tulevaisuudessa käytössä on toimivat ja ajantasaiset mitoitusohjelmat, jotka tekevät mitoituksen pelkkien lähtötietojen perusteella.

Aiheisiin tutustuttiin aihepiirien kirjallisuuden, tuoreimpien tutkimuksien, säädösten, ohjeiden ja lähtötietojen avulla, joiden perusteella ohjelmia alettiin kehittää. Ohjelmat pohjautuvat ajantasaisiin suunnitteluohjeisiin ja säädöksiin. Opinnäytetyön tuloksena kehitettiin Excel-pohjaiset mitoitusohjelmat, joilla pystytään mitoittamaan aikaisemmin mainitut asiat. Excel-laskentaohjelma valittiin mitoitusohjelmien pohjaksi siitä syystä, että aikaisempaa dataa oli siellä ja myös siksi, että sen käyttö on koettu toimistossa mutkattomimmaksi tällaisessa tilanteessa.

Lopputuloksena saatiin neljä Excel-pohjaista mitoitusohjelmaa, jotka pätevät tämänhetkisiin suunnitteluohjeisiin ja säädöksiin. Mitoitusohjelmista tuli toimivat kokonaisuudet, jotka huomioivat varmuuden ja nopeuttavat sekä kustannustehostavat suunnittelijoiden työntekoa toimistossa. Mitoitusohjelmia tulee kuitenkin mahdollisesti tulevaisuudessa päivittää sen mukaan, milloin suunnitteluohjeet ja säädökset päivittyvät.

Asiasanat: mitoitusohjelma, lävistyskapasiteetti, ankkurointi, vääntörasitus/-kapasiteetti

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Building Construction

KURONEN, TEEMU:
Development of Excel-based Sizing Programmes

Bachelor's thesis 65 pages, appendices 13 pages
May 2024

This thesis addresses the need identified by Jonecon Oy engineering firm for more efficient design and sizing tools. The existing programmes were found to be outdated and lacking in accuracy and functionality, prompting the development of new solutions. The study aimed to create functional Excel-based sizing programmes, focusing on reinforced concrete structures such as slab punching shear capacity and reinforcement anchorage.

The development process involved thorough research and adherence to current design guidelines and regulations. Utilizing literature, recent research, regulations, and initial data, the study initiated the development of Excel-based sizing programmes. The choice of Excel was based on its accessibility and existing data within the office environment.

The resulting programmes offer comprehensive solutions, ensuring compliance with the current standards and regulations while enhancing the efficiency of designers' work. In conclusion, four Excel-based sizing programmes were successfully developed, meeting the current design requirements and streamlining the design process within Jonecon Oy. Although functional, these programmes may require periodic updates to align with future revisions in design guidelines and regulations.

Key words: excel-based sizing programmes, reinforced concrete structures, slab punching shear capacity, reinforced anchorage

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	LÄVISTYMINEN TERÄSBETONIRAKENTEISSA	8
2.1	Lävistymisen teoria	8
2.1.1	Pilarilaatta ja pilariantura	8
2.1.2	Paaluantura ja paalulaatta	9
2.2	Lävistyskestävyyden vahvistaminen	9
2.3	Leikkausraudoittamattoman rakenteen lävistyminen	10
2.4	Lävistysmitoitus	11
2.4.1	Lävistysmitoitus laattarakenteissa betonieurokoodin mukaan	11
2.4.2	Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys	17
2.4.3	Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys	19
2.4.4	Lävistysmitoitus anturoille eurokoodien mukaan	22
3	MAANPAINESEINÄ.....	28
3.1	Maanpaineeseinän teoria	28
3.2	Maanpaineeseinän toiminta.....	28
3.3	Maanpaineen laskenta	29
3.3.1	Lepopaineen laskenta.....	29
3.3.2	Aktiivi-/passiivipaineen laskenta.....	30
4	RAUDOITUKSEN ANKKUROINTI	32
4.1	Raudoituksen ankkuroinnin teoria	32
4.2	Raudoituksen ankkuroinnin mitoitus	32
4.2.1	Suorien tankojen ankkurointimitoitus.....	33
4.2.2	Koukku- tai lenkipäinen lisäraudoitus.....	38
4.2.3	Hitsatut tangot.....	39
5	VÄÄNTÖ TERÄSBETONIPALKISSA.....	43
5.1	Väännön teoria	43
5.2	Väännön mitoitus.....	44
5.2.1	Vääntöraudoituksen mitoitus	46
5.2.2	Mitoitus yhdistetyille rasituksille	47
6	MITOITUSOHJELMAT TULEVAISUUDESSA.....	49
7	YHTEENVETO JA POHDINTA	50
	LÄHTEET	51
	LIITTEET	53
	Liite 1. Pilarilaatan lävistysmitoitus Excel mitoitushjelma.....	53
	Liite 2. Lävistysmitoitus anturoille Excel mitoitushjelma.....	55
	Liite 3. Maanpaineiden laskenta Excel mitoitushjelma.....	58

Liite 4. Suoran tangon ankkurointi Excel mitoitusohjelma.....	59
Liite 5. Hitsatun poikittaistangon ankkurointi Excel mitoitusohjelma.....	61
Liite 6. Ankkurointimitoitus koukuille Excel mitoitusohjelma.....	63
Liite 7. Teräsbetonipalkin mitoitus väännölle Excel mitoitusohjelma.....	64

ERITYISSANASTO

Eurokoodi	Eurokoodit ovat eurooppalaisia standardeja, jotka ohjaavat kantavien rakenteiden suunnittelua. Niistä käytetään lyhennettä EN, ja sen jälkeinen numerosarja määrittelee osan, jota eurokoodi käsittelee.
Kansallinen liite	Antaa kansalliset parametrit eurokoodin kohtiin, joita on mahdollista muuttaa. Eurokoodissa on annettu mahdollisuus käyttää kansallisia parametreja, jotka ovat maa-kohtaisia. Kansallisista liitteistä käytetään myös lyhennettä "NA". Suomessa kansallisten liitteiden laatimisesta vastaa Ympäristöministeriö talonrakentamisen osalta.
Mitoitusohjelma	Tietokoneohjelma, joka on ohjelmoitu laskemaan rakenteiden kestävyys lähtötietojen perusteella.

1 JOHDANTO

Nykypäivänä tietotekniikan kehittymisen seurauksena suunnittelutoimistoissa ovat yleistyneet erilaiset tietokoneille kehitetyt mitoitusohjelmat. Mitoitusohjelmien tarkoitus on nopeuttaa ja kustannustehostaa rakennesuunnittelijoiden työn toteutusta. Rakennesuunnittelijoiden tulee kuitenkin tietää ja ymmärtää, miten ohjelmat toimivat ja osattava arvioida tuloksia kriittisesti. Lisäksi on tärkeää muistaa päivittää ohjelmia säännöllisin väliajoin, koska säädökset eivät ole voimassa ikuisesti.

Tämän työn tarkoituksena on käsitellä ja kehittää seuraavia teräsbetonirakenteisiin liittyviä mitoitusohjelmia: laatan lävistyskapasiteetti, maanpaineseinä, raudoituksen ankkurointi ja palkin vääntörasitus/-kapasiteetti. Mitoitusohjelmat luodaan Excel-ohjelmaan, koska toimistossa on huomattu, että se on heille paras ja toimivin alusta.

Opinnäytetyö on tehty Insinööritoimisto Jonecon Oy:n käyttöön palvelemaan rakennesuunnittelijoiden jokapäiväistä työtä. Laskennat pohjautuvat Suomen Rakennusinsinöörien Liiton RIL ry:n julkaisuihin. Työssä pyritään myös avaamaan teoriaa, jotta varmistutaan suunnittelijoiden riittävästä ymmärryksestä.

2 LÄVISTYMINEN TERÄSBETONIRAKENTEISSA

2.1 Lävistymisen teoria

Teräsbetoni­laatan lävistymisellä tarkoitetaan ilmiötä, jossa suuri pienellä alalla vaikuttava kuorma leikkaa laatasta betonikartion irti. Ilmiö on merkittävä tarkas­teltaessa teräsbetoni­laatan ja pilarin välistä liitosta. Lävistysmurto teräsbetoni­laatoissa ilmenee yleensä hauraana murtotapana, mikä tarkoittaa, että rakenne voi menettää kantokykynsä äkillisesti ilman näkyvää varoitusta. Lävistysmurtoon vaikuttaa laatan hoikkuus, laatan paksuuden ja pistekuorman vaikutusalan suhde, laatan taivutusraudoituksen määrä sekä leikkausraudoitus. (Nykyri 2022, 60; Leskelä 2008, 288.)

Lävistyksen yhteydessä tyypillistä on myös, että rakenteen murtumisen jälkei­nen kantokyky on hyvin alhainen. Tämä tarkoittaa, että kuormitus siirtyy herkästi viereisille rakenteille, mikä voi johtaa jatkuvan sortuman vaaraan. Pilarilaatat, pilarianturat, paalulaatat ja paaluanturat ovat tyypillisiä rakenteita, jotka ovat alttiita lävistysmurtumille. (Nykyri 2022, 60; Leskelä 2008, 288.)

2.1.1 Pilarilaatta ja pilariantura

Pilarilaatta on rakenne, joka koostuu pilareista ja ristiin kantavista, jatkuvista laatoista. Tällaisessa rakenteessa kuormat välittyvät laatoilta suoraan pilareille ilman palkistoja. Rakennerratkaisu on suosittu, sillä se on yksinkertainen ja no­pea toteuttaa samalla tarjoten avoimen ja muuntojoustavan tilan. Pilarilaatat ovat yleisiä erityisesti liike- ja toimistorakennuksissa, joissa rakennuksen käyttö­ tarkoitus voi muuttua ja muutostöiden on oltava helppoja toteuttaa. (Kestävä kivitalo n.d.; Leskelä 2008, 407.)

Pilariantura on myös tyypillinen rakenne, joka on altis lävistysmurtolle. Pilarian­ tura on betonista valettu betonikivi, jossa on pohjalla antura ja päällä pilari. (Pe­ rustava n.d.) Sen mitoitusperiaatteet vastaavat perinteisen seinäanturan mitoi­ tusperiaatteita. Pilarianturoilla lävistyskestävyys on yleensä ratkaisevampi tekijä

kuin taivutuskestävyys ja anturan paksuus määräytyy sen mukaan, onko leikkausraudoitusta käytetty vai ei. (Leskelä 2008, 449; Nykyri 2022, 191.)

2.1.2 Paaluantura ja paalulaatta

Paaluantura sitoo paalut rakenteellisesti yhdessä toimivaksi paaluryhmäksi. Paalut toimivat tukina, jotka siirtävät rakennuksen kuormat kovaan maaperään tai kallioon. Kuorma siirtyy paaluille pilarianturoilta tai seinäanturoilta. (Leskelä 2008, 454; Perustava n.d.)

Paalulaatta on maata vasten valettava laatta, jossa teräsbetoni-laatta tukeutuu paaluihin. Paalulaattoja käytetään erityisesti epävakaalle maaperälle, koska se jakaa rakennuksen painon tasaisesti paaluille, vähentäen maan vajoamisriskiä. (Legalett n.d.; Betonilattiat 2018, 132.)

Paaluanturoissa ja paalulaatoissa paalut toimivat pistemäisenä tukena, jolle laatta tuo kuormaa. Kun käsitellään tasapaksua paalulaattaa, sitä käsitellään kuin pilarilaattaa ja lävistysmitoitus suoritetaan samoin kuin pilarilaatoilla ja pilarianturoilla. Mitoituksessa varmistetaan, että suurin lävistyskestävyys ei ylitä paalun kuormituspinta-alan piirillä. (Leskelä 2008, 454; Nykyri 2022, 60; Betonilattiat 2018, 132.)

Paaluanturat ja -laatat mitoitetaan kantavina teräsbetonirakenteina kantavien rakenteiden suunnitteluohjeiden mukaisesti. Mitoituksessa ei huomioida maapohjan kuormankantokykyä lainkaan. Tärkeää kuitenkin on huomioida, että paalun aiheuttama tukireaktio voi olla epäkeskeinen suhteessa tarkistuspiiriin. Tämä epäkeskeisyys täytyy ottaa huomioon mitoittavan lävistysvoiman laskennassa. (Leskelä 2008, 454; Nykyri 2022, 60; Betonilattiat 2018, 132.)

2.2 Lävistyskestävyyden vahvistaminen

Nykyään lävistyskuormitetun rakenteen vahvistamiseen on useita vaihtoehtoja. Vahvistaminen voidaan toteuttaa joko irtoteräksillä tai valmiiksi tehdasvalmiste-

tuilla lävistysvahvikkeilla. Erityisesti ylös taivutetut teräkset tarjoavat monipuolisen vaihtoehdon, soveltuen sekä pyöreille että suorakulmaisille pilareille. Rajoituksena on kuitenkin tilantarve, koska pilarin jatkoteräkset voivat viedä paljon tilaa ja vaikeuttaa lävistysterästen asentamista. (Kestävä kivitalo n.d.; Leskelä 2008, 415.)

Perinteiset irtohaavat soveltuvat suorakulmaisille pilareille, kun taas kierrehaat ovat yleisiä pyöreillä pilareilla. Sekä hakojen että irtoterästen käytössä on huomioitava tilantarve. On varmistettava, että ne mahtuvat laatan ylä- ja alapinnan terästen väliin. (Kestävä kivitalo n.d.)

Laatan lävistyskestävyyttä voidaan parantaa myös lisäämällä taivutusraudoitusta. Pilarin yläpinnan taivutusraudoitus voi nostaa laatan leikkauskestävyyttä, vaikka sen vaikutus on suhteellisen pieni verrattuna leikkausraudoitukseen. Yksi mahdollisuus on myös lisätä laatan paksuutta ja muuttaa paksuuden suhdetta jännemittoihin. On kuitenkin huomioitava, että laatan paksuntaminen kasvattaa rakenteen omapainoa. Vaihtoehtona on myös käyttää lujuusominaisuuksiltaan kovempaa betonimassaa pilarien päissä, mikä voidaan toteuttaa käyttäen valukehikkoa valun yhteydessä. (Leskelä 2008, 415.)

2.3 Leikkausraudoittamattoman rakenteen lävistyminen

Laatat pyritään yleisesti suunnittelemaan ilman leikkausraudoitusta, sillä leikkausraudoitus vaikuttaa huomattavasti materiaalikustannuksiin ja työmäärään. (Nykyri 2022, 60.)

Lävistyskapasiteetti leikkausraudoittamattomassa rakenteessa perustuu kriittisen leikkauksen tarkasteluun. Kapasiteetti määräytyy laatan paksuuden, kontrollipiirin ja betonin lujuuden funktiona. Kontrollipiiri tarkoittaa piiriä, joka sijaitsee valitulla etäisyydellä tuen reunasta, jossa oletetaan lävistysilmiön tapahtuvan. (Sistonen, Lydman & Huovinen 1997, 95; Fernández Ruiz & Muttoni 2009, 485–494.)

2.4 Lävistysmitoitus

Lävistysmitoitus määrättiin Suomessa tehtäväksi RakMK:n osan B4 mukaisesti vuoteen 2017 saakka, vaikka muutoin mitoituksessa oli siirrytty eurokoodeihin jo aiemmin. Myöhemmän siirtymisen syyksi mainittiin epäselvyydet eurokoodin lävistysmitoituksen varmuustasossa. Nykyisin lävistysmitoitus ohjeistetaan tehtävän betonieurokoodin (SFS-EN 1992-1-1) mukaan. (RIL 202-2011 2011, 43; SFS-EN 1992-1-1 2005, 95; Nykyri 2022, 60.)

Eurokoodit perustuvat rajatilamenetelmään, joka erittelee rakenteen tarkastelun murto- ja käyttörajatiloihin. Rakenteen on täytettävä vaatimukset molemmissa rajatiloissa, kaikissa mitoitustilanteissa ja kuormitustapauksissa. (Kivitalo info n.d.; Lastunen 2021.)

2.4.1 Lävistysmitoitus laattarakenteissa betonieurokoodin mukaan

Betonieurokoodin (SFS-EN 1992-1-1) mukaan lävistysmitoitus pohjautuu empiirisesti asetettuihin kaavoihin. Kaavat pohjautuvat palkin leikkausmitoitukseen. (Lips 2012, 217.)

Ensimmäiseksi tulee tarkastaa mitoitusehdot. Tarkistetaan, onko laatan tai anturan lävistyskestävyys ($V_{Rd,c}$) ilman lävistysraudoitusta suurempi tai yhtä suuri kuin laskettu leikkausjännitys perustarkistuspiirillä ($V_{Ed,1}$) kaavan 1 mukaan. (Nykyri 2022, 62; SFS-EN 1992-1-1 2005, 99.)

$$V_{Rd,c} \geq V_{Ed,1} \quad (1)$$

Jos yllä oleva mitoitusehto ei täyty, on tarpeen vahvistaa rakennetta leikkausraudoituksella. Määritetään lisätarkistuspiiri, jonka sijoittamiselle valitaan etäisyys, jotta kaavan 1 ehto täyttyy. Leikkausraudoitus asetetaan tämän lisätarkistuspiirin sisäpuolelle. (Nykyri 2022, 62; SFS-EN 1992-1-1 2005, 99.)

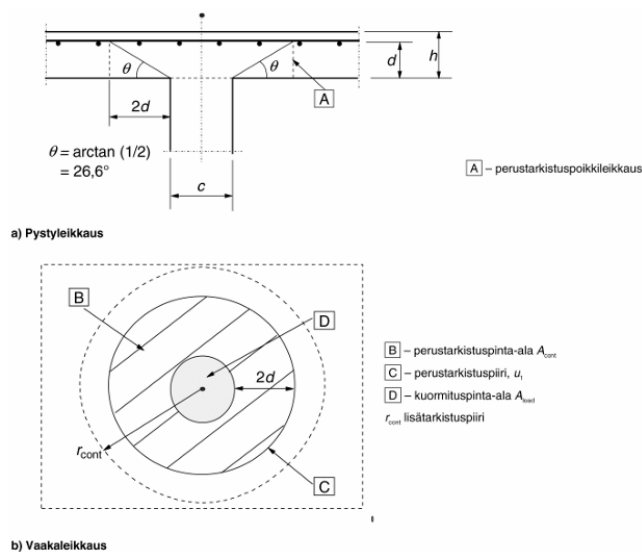
Lävistysraudoitusalan laskemisen jälkeen tarkistetaan, onko rakenteen lävistyskestävyyden maksimiarvo ($V_{Rd,max}$) suurempi tai yhtä suuri kuin piirille vaikutta-

va leikkausjännitys ($V_{Ed,0}$). Tarkistus tehdään kaavalla 2. (Nykyri 2022, 62; SFS-EN 1992-1-1 2005, 99.)

$$V_{Rd,max} \geq V_{Ed,0} \quad (2)$$

Mitoituksessa peruseriaate on tarkastella mitoitusta erilaisten tarkistuspiirien kautta. Tarkasteltavana on kolme seuraavaa kohtaa, jotka esitetty kuvassa 1 (SFS-EN 1992-1-1 2005, 95.):

1. Pilarin juuresta olevan leikkausjännityksen on pysyttävä lävistyskestävyyden maksimiarvon alapuolella.
2. Leikkausraudoittamattomalla alueella olevan leikkausjännityksen on pysyttävä leikkausraudoittamattoman rakenteen lävistyskapasiteetin alapuolella.
3. Leikkausraudoitetulla alueella olevan leikkausjännityksen on pysyttävä leikkausraudoitetun rakenteen lävistyskapasiteetin alapuolella.

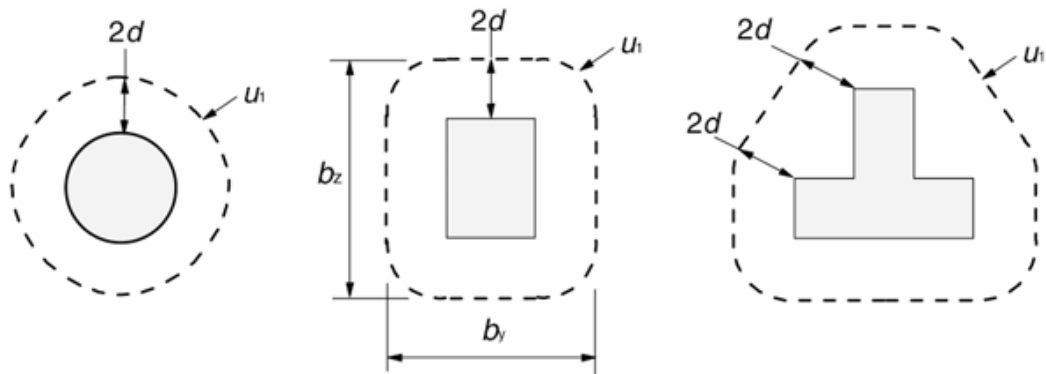


KUVA 1. EC2 mukaiset tarkistuspiirit ja pinta-alat (SFS-EN 1992-1-1 2005, 96.)

Perustarkistuspiirillä, joka sijaitsee $2 \cdot d$ etäisyydellä tuen reunasta, selvitetään, kestääkö laatta lävistysraudoittamattomana vai vaatiiko se lävistysraudoitteita. $2 \cdot d$ etäisyydellä tarkoitetaan tehollista mitta d , joka on laatan pääraudoituksen muodostavien raudoitusten tehollisten mittojen keskiarvo. Tehollisen d -mitan laskeminen tehdään kaavan 5 mukaan. Mikäli lävistysraudoitetta vaaditaan,

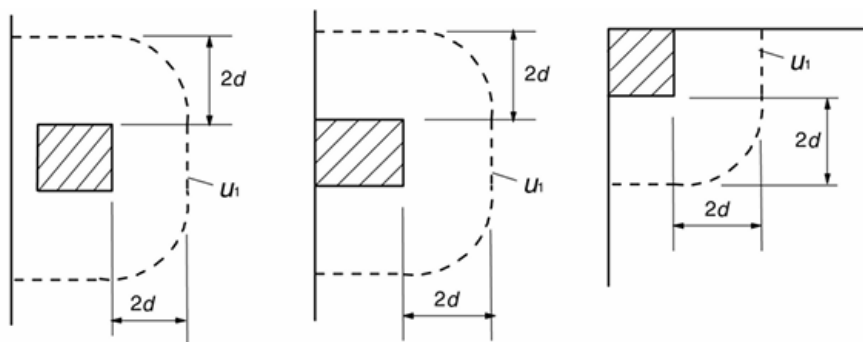
etsitään piiri r_{cont} , missä lävistysraudoitteita ei enää tarvita. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 96.)

Perustarkistuspiirin muoto u_1 valitaan niin, että se on $2 \cdot d$ etäisyydellä tuen reunasta, kuten kuvassa 2 on esitetty. Suorakulmaisen tuen tapauksessa eurokoodissa tarkistuspiirin muoto on selkeä. Siinä kulmat ovat $2 \cdot d$ säteisen ympyrän kaaria. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 97.)



KUVA 2. Perustarkistuspiirit eri muotoisille kuormituspinnoille (SFS-EN 1992-1-1 2005, 97.)

Jos tarkasteltava kuormitettu alue on laatan reunan tai nurkan lähellä, valitaan tarkistuspiiri kuvan 3 perusteella, jos se johtaa pienempään tarkistuspiirin pituuteen kuin kuvan 2 perusteella valittu. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 97.)



KUVA 3. Tarkistuspiirit laatan reunoilla, nurkissa tai niiden lähellä (SFS-EN 1992-1-1 2005, 97.)

Kaavalla 3 lasketaan perustarkistuspiiri suorakaiteen muotoiselle pilarille. (Nykyri 2022, 63.)

$$u_1 = 2c_1 + 2c_2 + \pi(4d) \quad (3)$$

Kaavassa 3 c_1 on kuorman epäkeskisyyden suuntainen pilarin sivumitta, c_2 on sivumitta toisessa suunnassa ja d on eri suuntaisten tankojen d -mittojen keskiarvo (kaava 5).

Kaavalla 4 lasketaan perustarkistuspiiri pyöreälle pilarille. (Nykyri 2022, 63.)

$$u_1 = \pi(D + 4d) \quad (4)$$

Kaavassa 4 D on pilarin halkaisija ja d on eri suuntaisten tankojen d -mittojen keskiarvo (kaava 5).

Tarkistuspiirien määrittelyyn tarvittava d -mitta määritetään alla olevasta kaavasta 5. (Nykyri 2022, 62.)

$$d = d_{eff} = \frac{d_y + d_z}{2} \quad (5)$$

Kaavassa 5 d_y ja d_z ovat y- ja z-suuntaisten tankojen teholliset korkeudet.

Seuraavaksi lasketaan mitoitusjännitys, jolle laatta mitoitetaan kaavan 6 mukaan. (Nykyri 2022, 64.)

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i \cdot d} \quad (6)$$

Kaavassa 6 V_{Ed} on kokonaiskuorma (lävistävä voima), u_i on käsiteltävän tarkistuspiirin pituus, d on laatan tehollinen korkeus ja β on epäkeskisen kuorman huomioon ottava kerroin. Epäkeskisyys e lasketaan alla olevalla kaavalla 7. Yleisessä tapauksessa suorakulmaiselle pilarille β lasketaan kaavalla 8 ja pyöreälle pilarille kaavalla 9. Keskiselle kuormalle käytetään arvoa $\beta=1,0$. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 100; Nykyri 2022, 64.)

$$e = \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \quad (7)$$

$$\beta = 1 + ke \frac{u_1}{W_1} \quad (8)$$

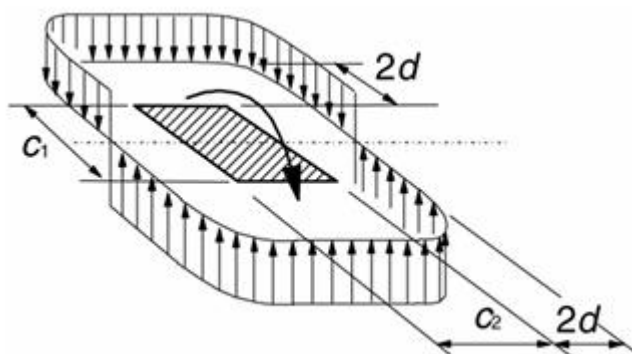
$$\beta = 1 + 0,6\pi \frac{e}{D + 4d} \quad (9)$$

Kaavoissa 7, 8 ja 9 kerroin k on riippuvainen pilarin sivumittojen c_1 ja c_2 suhteesta (taulukko 1), D on pilarin halkaisija, e on kuorman epäkeskisyys, M_{Ed} on epäkeskisen kuorman aiheuttama taivutusmomentti, V_{Ed} on vaikuttava leikkausvoima, W_1 on tarkistuspiirissä vaikuttavan leikkausvoiman staattinen momentti ja u_1 on perustarkastuspiirin pituus.

TAULUKKO 1. Suorakaiteen muotoisten kuormituspinta-alojen kertoimen k arvot (SFS-EN 1992-1-1 2005, 100.)

c_1/c_2	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,60	0,70	0,80

Taulukossa 1 c_1 tarkoittaa pilarin sivumittaa kuorman epäkeskisyiden suunnassa, kun taas c_2 tarkoittaa sitä toisessa suunnassa (kuva 4.). Pyöreille pilareille $\frac{c_1}{c_2} = 1$ eli k on aina 0,6. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 100.)



KUVA 4. Pilarin pään momentin aiheuttama leikkausjännityksen jakautuma sisäpilarin ja laatan liitoksessa (SFS-EN 1992-1-1 2005, 100.)

Suure W_i huomioi pilarin pään momentin aiheuttaman leikkausjännityksen jakautuman. Kaavassa 10 on esitetty sen yleinen muoto. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 100.)

$$W_i = \int_0^{u_1} e dl \quad (10)$$

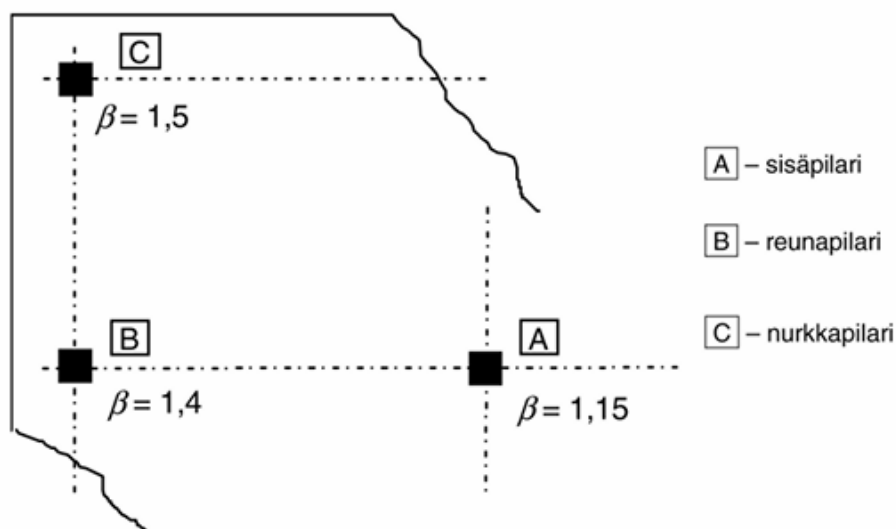
Kaavassa 10 e on pituusalkiota vastaava etäisyys akselist, jonka suhteen momentti vaikuttaa ja dl perustarkastuspiirin pituusalkio.

Suorakaidepilarille on olemassa yksinkertaistettu kaava 11. Kaavan 11 staattinen momentti on laskettu etäisyydellä $2d$ pilarin reunasta. (Nykyri 2022, 65.)

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1 \quad (11)$$

Kaavassa 11 d on laatan tehollinen korkeus, c_1 on kuorman epäkeskisyyden suuntainen pilarin sivumitta ja c_2 on vastaavasti sivumitta toisessa suunnassa.

Rakenteissa, joiden poikittainen stabiilius ei ole riippuvainen laattojen ja pilareiden välisestä kehävaikutuksesta ja joissa laatan jänteiden pituus ei eroa toisistaan yli 25 %, Eurokoodi mahdollistaa kertoimen β käyttää likiarvoja, joiden suositusarvot esitetään kuvassa 5. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 102.)



KUVA 5. Kertoimen β likimääräiset arvot (SFS-EN 1992-1-1 2005, 102.)

2.4.2 Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys

Aluksi tulee tarkistaa laatan lävistyskestävyys leikkausraudoittamattomana. Tarkistus suoritetaan perustarkistuspiirillä ja kestävyuden mitoitusarvo saadaan kaavasta 12. Jos aikaisemmin mainitun kaavan 2 mitoitusehto täyttyy, voidaan laatta toteuttaa ilman erillistä lävistys- tai leikkausraudoitusta. Alla oleva kaava 12 ei huomioi jännevoimia, jotka laatoissa ovat yleensä nolliä. Tarkastellaan siis tässä työssä vain tätä supistettua kaavaa. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 103; Nykyri 2022, 65.)

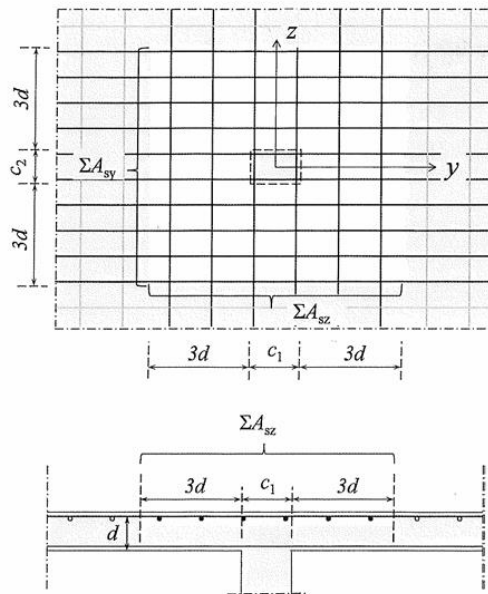
$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k \left(100 \rho_L \frac{f_{ck}}{MPa} \right)^{\frac{1}{3}} MPa \quad (12)$$

Kaavassa 12 $C_{Rd,c}$ on lävistyskestävyyden määrittämisessä käytettävä suure, k on laatan paksuudesta riippuva suure ks. kaava 14, ρ_L on geometrinen raudoitussuhde ja f_{ck} betonin lieriölujuuden ominaisarvo.

Raudoitussuhteet ρ_{Ly} ja ρ_{Lz} lasketaan y- ja z-suunnan raudoituksille erikseen. Ne liittyvät vastaavasti y- ja z-suuntien ankkuroituihin vetoteräksiin. Arvot ρ_{Ly} ja ρ_{Lz} lasketaan keskiarvoina, niihin huomioidaan ankkuroidut vetopuolen teräkset leveydeltä, mikä on pilarin tarkastelusuunnan sivumitta lisättyä mitalla $3d$ pilarin molemmin puolin ks. kuva 6. Laatan vetoterästen vaikutus lävistyskapasiteettiin otetaan huomioon raudoitussuhteella. Vetoterästen määrä lisää lävistyskapasiteettia määrättyyn rajaan asti, mutta suurina määrinä tämä vaikutus ei lisäännä. Siksi ρ_L (raudoitussuhde) on rajoitettu enintään arvoon 2 % kaavan 13 mukaisesti. Rakenteen lävistyskestävyys edellyttää aina taivutusraudoitusta, sillä Suomen kansallisessa liitteessä lävistyskestävyyden alaraja on asetettu nollassa. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 103; Nykyri 2022, 66.)

$$\rho_L = \min \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\rho_{Ly} \rho_{Lz}} \\ 0,02 \end{array} \right. \quad (13)$$

Kaavassa ρ_{Ly} ja ρ_{Lz} ovat raudoitussuhteet y- ja z-suunnassa.



KUVA 6. Suhteellisen raudoitusalun määrittäminen pilarin päässä (Nykyri 2022, 66.)

Kerroin k on kokovaikutustekijä, joka huomioi laatan paksuuden vaikutuksen lävistyskestävyyteen. Kerroin k lasketaan kaavalla 14. Kaavassa laatan kestävyys pienenee laatan paksuuden noustessa. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 103.)

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d}} \leq 2,0 \quad (14)$$

Kaavassa 14 d on laatan tehollinen korkeus (mm).

Eurokoodi antaa suositusarvot kertoimille $C_{Rd.c}$ ja v_{min} , mutta samalla tarjoaa mahdollisuuden esittää nämä arvot kunkin maan kansallisessa liitteessä. Kaavoissa 15 ja 16 on esitetty kansallisen liitteen valinnat. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 104.)

$$C_{Rd.c} = \frac{0,3}{\gamma_c} \cdot \frac{\left(\frac{D}{d} + 1,5\right)}{\left(\frac{D}{d} + 4\right)} \quad (15)$$

$$v_{min} = 0 \quad (16)$$

Kansallisen liitteen tarkoituksena on mahdollistaa kullekin maalle mahdollisuus huomioida paikalliset olosuhteet, kuten ilmasto. Suomessa kansallisesta liitteestä vastaa ympäristöministeriö. Mikäli kansallinen liite puuttuu, käytetään tällöin eurokoodin suositusarvoja. (Lastunen 2021.)

Kaavassa 15 γ_c on betonin materiaaliosavarmuusluku ja D pyöreän pilarin halkaisija. Suorakaidepilarilla halkaisija lasketaan kaavalla 17. (Nykyri 2022, 67.)

$$D = \sqrt{c_1 c_2} \quad (17)$$

Kaavassa 17 c_1 ja c_2 ovat pilarin sivumitat.

Kansallinen liite määrittelee suureen v_{min} arvoksi 0. Tämä perustuu siihen, että mikäli $C_{Rd,c}$ -arvo on kansallisen liitteen suositusarvoa pienempi, v_{min} on valittava nolllaksi. Muutoin on mahdollista, että v_{min} nousee määrääväksi tekijäksi lävistyskestävyyden kaavassa. Tämä korostaa tarvetta taivutusraudoitukselle, joka on aina edellytys lävistyskestävyydelle. (Nykyri 2022, 67.)

2.4.3 Leikkausraudoitetun laatan lävistyskestävyys

Jos mitoitusjännitys tarkastelupiirillä ylittää leikkausraudoittamattoman rakenteen lävistyskestävyyden, on rakennetta vahvistettava leikkausraudoitteilla (ks. kaava 1). Vahvistetun laatan lävistyskestävyys lasketaan Suomen kansallisen liitteen suositusten ja valintojen mukaisesti alla olevalla kaavalla 18. (Leskelä 2008, 302.)

$$v_{Rd,cs} = 0,167v_{Rd,c} + 1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw} f_{ywd,ef} \left(\frac{1}{u_1 d} \right) \sin \alpha \quad (18)$$

Kaavassa 18 $v_{Rd,c}$ on leikkausraudoitetun rakenteen lävistyskestävyyden mitoitusarvo, s_r on leikkausraudoituskehien säteittäinen väli (mm), A_{sw} on pilaria ympäröivän yksittäisen leikkausraudoituskehän raudoituksen ala (mm^2), $f_{ywd,ef}$ on lävistysraudoituksen tehollinen mitoituslujuus (ks. kaava 19), u_1 on perustar-

kistuspiirin pituus, d on laatan tehollinen korkeus, α on leikkausraudoituksen ja laatan tason välinen kulma.

$$f_{ywd,ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(250 + 0,25 \frac{d}{mm} \right) MPa \\ f_{ywd} \end{array} \right. \quad (19)$$

kaavassa 19 f_{ywd} on leikkausraudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo.

$$f_{ywd} = \min(f_{yd}; 0,8f_{yk}) \quad (20)$$

Kaava 18 on johdettu säteittäiselle raudoitukselle, missä termi s_r on leikkausraudoituskehien säteittäinen väli (mm). Tämän kaavan termi $1,5 \left(\frac{d}{s_r} \right) A_{sw}$ voidaan korvata piirin u_1 rajaamalla alueella olevan raudoituksen kokonaispinta-alalla. Tähän lasketaan mukaan raudoitus, joka on enintään $1,5d$ etäisyydellä pilarin reunasta. Jos leikkausraudoitus toteutetaan alas taivutetusta yläpinnan raudoituksesta, voidaan käyttää $\frac{d}{s_r}$ arvoa 0,67. (Nykyri 2022, 67; Leskelä 2008, 303.)

Leikkausraudoitetun rakenteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan samoin kuin leikkausraudoittamattoman rakenteen lävistyskestävyys, mutta hyödyntäen termille $C_{Rd,c}$ seuraavaa kaavaa 21. Kansallisen liitteen muutos korjaa leikkausraudoitetun rakenteen kapasiteetista hyödynnettävän betonin osuuden noin 75 prosentista noin 16 prosenttiin. (Nykyri 2022, 67; Leskelä 2008, 291.)

$$C_{Rd,c} = \frac{0.3 \left(\frac{D}{d} + 1.5 \right)}{4.5 \gamma_c \left(\frac{D}{d} + 4 \right)} \quad (21)$$

Tarvittavan leikkausraudoituksen pinta-alan selvittämisen jälkeen, tulee vielä tarkastaa lävistyskestävyyden ylärajan mitoitusehdot kaavan 22 mukaan.

$$V_{Rd,max} = k_{max} V_{Rd,c} = k_{max} v_{Rd,c} \frac{u_1 d}{\beta} \quad (22)$$

Kaavassa 22 $V_{Rd,c}$ on leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys kokonaiskuormana, β on epäkeskisen kuorman huomioiva kerroin, $v_{Rd,c}$ on leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyyden mitoitusarvo, u_1 on perustarkistuspiiri, d on laatan tehollinen korkeus ja k_{max} on vakio 1,6 Suomen kansallisen liitteen mukaisesti.

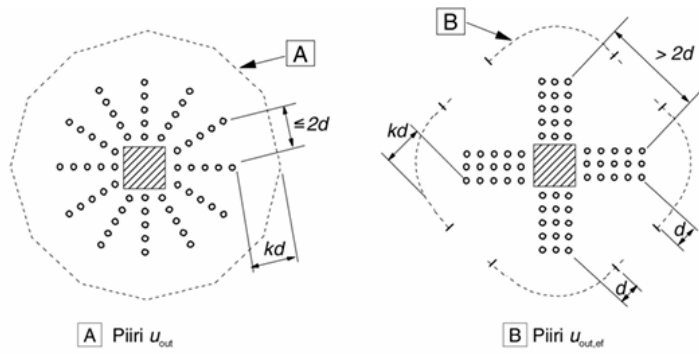
Mikäli lävistyskestävyyden yläraja ylittää vaikuttavan leikkausvoiman, riittävä lävistyskestävyys voidaan varmistaa leikkausraudoituksella. Tämä ehto on täytettävä sekä perustarkistuspiirillä kaavan 22 mukaisesti että pilarin piirillä kaavan 23 mukaisesti.

$$V_{Rd,max} = k_{max} V_{Rd,c} \frac{u_1}{u_0} \quad (23)$$

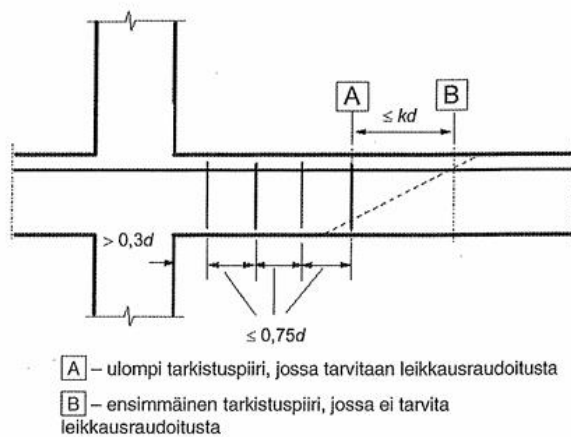
Kaavassa 23 u_1 on perustarkistuspiiri, $V_{Rd,c}$ on lävistyskestävyyden mitoitusarvo, k_{max} on vakio 1,6 Suomen kansallisen liitteen mukaisesti ja u_0 on pilarin ulkoreunan piiri.

Kun lävistyskestävyyden ylärajan mitoitusehto on tarkistettu ja leikkausraudoitus mitoitettu, asetetaan se niin, että leikkausraudoituksen uloin piiri sijoittuu enintään $1,5d$ lisätarkistuspiirin u_{out} sisäpuolelle. Lisätarkistuspiiri määritetään laskennallisesti siten, että mitoitusjännitys ei ylitä lävistyskestävyyttä, eli kaavan 2 ehto täyttyy. Eurokoodissa vaatimuksena on, että lävistysraudoitus sijoitetaan vähintään $0,3d$ etäisyydelle pilarista ja lävistysraudoitteiden keskinäinen etäisyys saa olla enintään $0,75d$. (Nykyri 2013, 68.)

Jos leikkausraudoitus asetetaan pilarin suuntaisiin sektoreihin, kuten kuvassa 7 kohdassa B, tulee lisätarkistuspiiri laskea kuvan mukaisesti vähennettynä. Kohdassa A esitetään säteittäinen leikkausraudoituksen jako. Kuva 8 havainnollistaa eurokoodien mukaista lävistysraudoituksen sijoittelua. (Nykyri 2022, 68.)



KUVA 7. Leikkausraudoituksen sijoittelu lisätarkastuspiiriin sisäpuolelle (SFS-EN 1992-1-1 2005, 105.)



KUVA 8. Leikkausraudoituksen sijoittelu lisätarkastuspiiriin sisäpuolelle (Nykyri 2022, 68.)

Lisätarkastuspiiriin $u_{out,ef}$ pituus määritetään kaavasta 24. (Nykyri 2022, 68.)

$$u_{out} = \beta \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c} \cdot d} \quad (24)$$

Kaavassa 24 β on epäkeskisen kuorman huomioiva kerroin, V_{Ed} on vaikuttava leikkausvoima, $v_{Rd,c}$ on leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys ja d laatan tehollinen korkeus.

2.4.4 Lävistysmitoitus anturoille eurokoodien mukaan

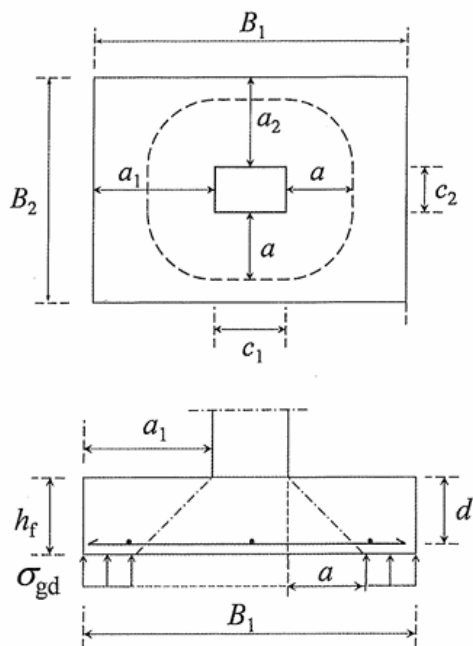
Pilarianturan mitoituspäätteet vastaavat seinäanturan mitoituspäätteitä. Eroavaisuutta ilmenee siinä, että niitä ei mitoiteta leikkaukselle, vaan lävistyk-

selle. Yleisesti pilarianturoiden mittasuhteet mahdollistavat niiden tarkastelun laattoina ja samalla myös noudatetaan laattojen raudoitussääntöjä. (Nykyri 2022, 191.)

Pilarianturan mitoitus ehdot vastaavat aikaisemmin esitettyjä leikkausraudoittamattoman pilarilaatan ehtoja (ks. kaavat 1 ja 2).

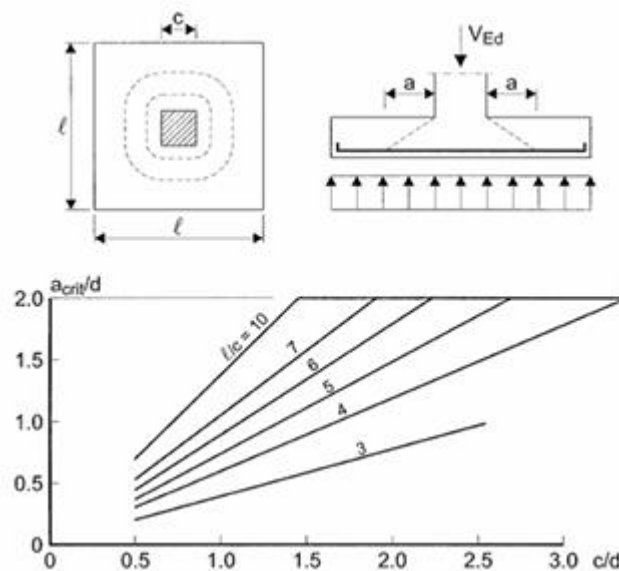
Lävistysmitoitus poikkeaa pilarilaatan mitoituksesta niin, että lävistyskuorman suuruus on riippuvainen lävistyskartion kaltevuudesta. Pilarianturan lävistyskartion kaltevuuskulma on yleensä pienempi verrattuna pilarilaattoihin. Lävistyskartion kaltevuuskulmalla on vaikutusta lävistyskartion piiriin ja siten myös pohjapaineen kuorman vaikuttavaan alaan. Mitä jyrkempi lävistyskartio, sitä suurempi on anturaan kohdistuva lävistyskuorma. Jos lävistyskartion kaltevuuskulma olisi sama kuin pilarilaatoilla, pilarianturan paksuuden vuoksi pohjapaineen vaikuttavasta alasta vähennettäisiin liian suuri alue. Tästä voisi seurata liian pienet kuormat ja epävarma mitoitus. Lävistyskuorman määrittämiseksi tarvitaan tieto lävistyskartion ulkopuolelle jäävästä anturan pinta-alasta (kaava 25 ja kuva 9). (Nykyri 2022, 193.)

$$A_{eff} = B_1 B_2 - [2a(c_1 + c_2) + c_1 c_2 + \pi a^2] \quad (25)$$



KUVA 9. Pilarianturan lävistyskartio (Nykyri 2022, 194.)

Eurokoodin mukaan pilarianturan lävistyskartion kaltevuuskulma tulee määrittää kokeilemalla. Materiaalissa näytetään apukäyrästä kriittisen lävistyskartion määrittämiseksi. Käyrästä on suunniteltu keskisesti kuormitetuille neliön muotoisille anturoille. Kuitenkin tätä on mahdollista käyttää myös suorakaiteen muotoisille anturoille, mikäli ero neliönmuotoiseen anturaan on vähäinen. Yleisesti tämän käyrästä käyttö on mahdollista lävistysmitoituksessa monissa tavallisimmissa tapauksissa. Kuvassa 10 on esitetty apukäyrästä ja siihen vaikuttavat termit. Anturan ja pilarin mittasuhteiden mukaan valitaan oikea käyrä. Kaltevuuden mitana käytetään kulman tangenttia d/a . (Nykyri 2022, 193.)



KUVA 10. Apukäyrästä kriittisen lävistyskartion määrittämiseen keskisesti kuormitetulle neliöanturalle (Nykyri 2022, 193.)

Apukäyrästä vaaka-akselilla esitetään pilarin sivun pituuden suhdetta anturan teholliseen korkeuteen d ja käyrästä suorat kuvastavat anturan ja pilarin sivujen pituuksien suhdetta. Pystyakselilta saadaan kriittisen murtokartion mitan suhde anturan teholliseen korkeuteen, josta lopulta saadaan termi " a ". Termi " a " on murtokartion vaakaprojektio kuvan 10 mukaisesti. Lävistyskartion mitan selvittämisen jälkeen tarkistetaan, että murtokartio pysyy anturan alapinnassa kuormitetun alueen sisäpuolella. (Nykyri 2022, 193.)

Mikäli pilarin muoto ei ole neliö, pilarin sivun pituuden suhde anturan teholliseen korkeuteen lasketaan molemmille suunnille samoin kuin l/c . Käyrästä saa-

daan siten eri arvot eri suunnille. Lävistyskartion mitasta riippuu lävistyskartion piiri, joka lasketaan kaavasta 26. (Nykyri 2022, 194.)

$$u = 2(c_1 + c_2) + 2\pi a \quad (26)$$

Eurokoodin säännöt on laadittu tapauksille, joissa kuormitus jakautuu tasaisesti. Siinä mainitaan, että anturoissa tarkistuspiirin sisäpuolella oleva kuormitus lisää rakenteen lävistyskestävyyttä, mikä mahdollistaa sen vähentämisen lävistysjäntäytymisen mitoitusarvoa laskettaessa. Lisäksi eurokoodissa mainitaan, että perustuslaatan lävistysvoimaa V_{Ed} voidaan pienentää maanpaineen suotuisan vaikutuksen vuoksi. Pilarianturoiden lävistyskestävyys tarkistetaan samoin kuin laattojen tapauksessa, käyttäen perustarkistuspiiriä, joka ympäröi pilaria etäisyydellä "a" pilarin reunasta. Yleisissä tapauksissa, joissa kuormat eivät aiheuta kiertymää pilarin päähän, anturaan vaikuttava nettovoima lasketaan kaavalla 27. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 102.)

$$V_{Ed,red} = V_{Ed} - \Delta V_{Ed} \quad (27)$$

Kaavassa 27 V_{Ed} on anturaan vaikuttava leikkausvoima ja ΔV_{Ed} tarkistuspiirin sisäpuolella ylöspäin vaikuttava voima. Redusoitu lävistyskuorma $V_{Ed,red}$ on lävistyskartion ulkopuolelle jäävälle pinta-alalle vaikuttava pohjapaine. ΔV_{Ed} saadaan, kun maapohjasta ylöspäin vaikuttavasta paineesta vähennetään anturan oma paino kaavan 28 mukaan. Lävistyskartion ulkopuolelle jäävä pinta-ala lasketaan kaavalla 29. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 103.)

$$\Delta V_{Ed} = \sigma_{gd} \Delta A_{red} \quad (28)$$

$$\Delta A_{red} = 2a(c_1 + c_2) + c_1 c_2 + \pi a^2 \quad (29)$$

Anturaan vaikuttava pohjapaine lasketaan kaavalla 30. (Nykyri 2022, 197.)

$$\sigma_{gd} = \frac{V_{Ed}}{A_T} \quad (30)$$

Kaavassa 30 V_{Ed} on anturaan vaikuttava kuorma ja A_T anturan kuormitettu pinta-ala.

$$A_T = B_{1T}B_{2T} \quad (31)$$

$$B_{1T} = B_1 - 2e_y \quad (32)$$

$$B_{2T} = B_2 - 2e_z \quad (33)$$

Kaavoissa 32 ja 33 e_y ja e_z ovat kuormituksen epäkeskisyydet y - ja z -suunnissa. B_1 ja B_2 ovat anturan sivumitat.

Lävistyskuormien aiheuttama jännitys piirillä u lasketaan kaavan 34 mukaisesti, tai epäkeskisen kuormituksen tapauksessa kaavan 35 mukaisesti. (Nykyri 2022, 194.)

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,red}}{ud} \quad (34)$$

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,red}}{ud} \left(1 + k \frac{M_{Ed}u}{V_{Ed,red}W} \right) \quad (35)$$

Kaavoissa kerroin k on määritetty taulukossa 1 ja arvo on riippuvainen pilarin mittasuhteista. Suure W on leikkausjännityksen jakautumisesta aiheutuva termi ja se lasketaan kaavan 36 mukaan. (Nykyri 2022, 201.)

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1c_2 + 2c_2a + 4a^2 + \pi ac_1 \quad (36)$$

Kaavassa 36 c_1 on pilarin sivumitta momentin suunnassa, c_2 on pilarin sivumitta toisessa suunnassa ja a lävistyskartion reunan etäisyys pilarin reunasta.

Lävistyskestävyys lasketaan kaavalla 37. Kaava on muokattu lävistyskestävyyden peruskaavasta. Kaavassa on lisäyksenä kerroin, joka ottaa huomioon kestävyden riippuvuuden murtokartion kaltevuudesta. (Nykyri 2022, 195.)

$$v_{Rd.c} = C_{Rd.c} k (100 \rho_L f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{2d}{a} MPa \quad (37)$$

Kaavassa 37 a on lävistyskartion reunan etäisyys pilarin reunasta, $C_{Rd.c}$ on lävistyskestävyyden määrittämisessä käytettävä suure (kaava 21), k on laatan paksuudesta riippuva suure (kaava 18), ρ_L on pääraudoituksen raudoitussuhde (kaava 13) ja f_{ck} on betonin lieriölujuuden ominaisarvo.

Pääraudoituksen raudoitussuhteessa on otettava huomioon terästen ankkurointi. Raudoitussuhdetta laskettaessa ensin on tarkasteltava raudoituksen vaatimaa ankkurointipituutta ja vertailtava sitä anturan lävistyskartion ulkopuolelle jäävään alueeseen ja sen pituuteen. Mikäli raudoitus ei ankkuroidu jommassakummassa tai molemmissa suunnissa, tehollista pinta-alaa on rajoitettava kaavan 38 mukaisella suhteella. (Nykyri 2013, 157.)

$$\frac{L_b}{L_{b.rqd}} \quad (38)$$

Kaavassa 38 L_b on toteutuva ankkurointipituus lävistyskartion ulkopuolella ja $L_{b.rqd}$ on toteutuvalle rautamäärälle lasketun teräsjännityksen mukaan laskettu ankkurointipituuden perusarvo.

Pilarianturan lävistyskestävyys leikkausraudoitettuna määritellään aikaisemmin esitetyn kaavan 23 mukaisesti. Lopuksi tarkistetaan, kuten laattojen tapauksessa, että suurin lävistyskestävyyden mitoitusarvo ei ylitä pilarin piirillä tai kuormituspinta-alan piirillä.

3 MAANPAINESEINÄ

3.1 Maanpaineseinän teoria

Maanpaineseinällä tarkoitetaan tukirakennetta, johon vaikuttaa pystykuormien lisäksi myös maanpaineesta aiheutuvaa vaakakuormaa. Maanpaine vaikuttaa erityisesti rakenteisiin, joissa seinän toisella puolella on tuettavaa maata ja toisella puolella on vapaata tila. Tyypillisiä maanpaineseinä ovat muun muassa kellarin seinät, kulmatukimuurit ja upotettavat tukiseinät, joilla pyritään tukemaan maanpinta jyrkempään kulmaan kuin mihin se normaalisti asettuisi. (Jääskeläinen 2011, 172.)

Maanpaine tarkoittaa maan ja rakenteen kosketuskohdassa vaikuttavaa painetta. Paine voi syntyä maamassasta tai olla ulkoisten kuormitusten aiheuttamaa kosketuspainetta. Maanpaineen suuruus, suunta ja jakautuminen määräytyvät maamassan ja rakenteen välisistä liikkeistä ja muodonmuutoksista. Maanpaineella on useita esiintymismuotoja, joita ovat lepopaine (p_0), aktiivipaine (p_a) ja passiivipaine (p_p). (Rantamäki, Jääskeläinen & Tamminen 2006, 233.)

3.2 Maanpaineseinän toiminta

Yleensä seinät ovat puristettuja rakenteita, joille kohdistuva pystykuorma johtuu laatasta tai palkista. Laatan aiheuttama kuorma jakautuu tasaisesti koko seinän leveydelle, kun taas palkin kuorma vaikuttaa seinään paikallisesti. Puristettuna rakenteena seinä voi nurjautua, mutta erikoistapauksena maanpaineseinä myös taipuu siihen kohdistuvan vaakakuorman vuoksi. (Nykyri 2022, 155.)

Maanpaineseinä voi saada omaa tasoaan vastaan kohtisuoria kuormia. Tällöin rakennetta tarkastellaan laattana. Pystykuormat kohdistuvat pitkien sivujen seinien suuntaisesti, joten niiden suhteen maanpaineseinä käsitellään seinärakenteena, joka toimii pilarin tavoin, mutta voi nurjautua vain yhdessä suunnassa. (Nykyri 2022, 155.)

3.3 Maanpaineen laskenta

Tässä opinnäytetyössä maanpaineeseinää ei tulla mitoittamaan yhteistyötahon pyynnöstä. Työssä perehdytään ainoastaan maanpaineiden laskentaan.

Maanpaineeseinä mitoitetetaan lepopaineelle, koska maanpaineeseinälle ei sallita siirtymiä. Tukimuurille voidaan sallia siirtymiä ja se voidaan mitoittaa aktiivi-/passiivipaineelle. Koska lepopaine on suurempi kuin aktiivi-/passiivipaine, tulee maanpaineeseinän rakenteesta järeämpi mitoitettaessa se lepopaineelle. Maanpaineeseinän mitoituksessa tavallisesti huomioidaan aikaisemmin mainittujen kuormien lisäksi myös muun muassa ilmastosta aiheutuvat kuormat, esimerkiksi lämpötilavaikutukset. Nykyrakentamisessa maanpaineeseinät rakennetaan kuitenkin niin, että näiden voimien vaikutus estetään. (Jääskeläinen 2011, 172.)

Eurokoodit antavat Suomessa ohjeistuksen siitä, mitä mitoitus tapaa ja varmuuskertoimia suunnittelussa käytetään. Eurokoodien mukainen suunnittelu perustuu rajatilamitoitukseen. Mitoituksessa murtorajatilat ja käyttörajatilat käsitellään erikseen. (Lastunen 2021.)

3.3.1 Lepopaineen laskenta

Maanpaineeseinä mitoitetetaan lepopaineelle silloin, kun seinästä halutaan liikku-
maton maapohjan suhteen. (Jääskeläinen 2011, 172.)

Lepopaine kertoimen (K_0) määrittäminen riippuu tuetun maan pinnan kaltevuudesta. Maan pinnan ollessa vaakasuuntainen lepopaine kerroin (K_0) määritetään alla olevasta kaavasta 39. (Jääskeläinen 2011, 174.)

$$K_0 = (1 - \sin\varphi) \quad (39)$$

Vaakasuoran maanpinnan mukaisessa tapauksessa lepopaine seinän juuressa lasketaan kaavasta 40. Lepopaine seinän yläosassa lasketaan kaavasta 41. (Jääskeläinen 2011, 174.)

$$p_0 = (\gamma z + q)K_0 \quad (40)$$

$$p_0 = qK_0 \quad (41)$$

Kaavoissa 39–41 φ on kitkakulma, γ on maan tilavuuspaino, z on rakenteen korkeus ja q on pintakuorma.

3.3.2 Aktiivi-/passiivipaineen laskenta

Maanpaineseinä mitoitetaan aktiivi-/passiivipaineelle, silloin kun seinärakenteelle sallitaan siirtymiä. Tässä työssä aktiivi-/passiivipaineen määrittämiseen käytetään Rankine'n menetelmää. Menetelmä sopii hyvin tilanteisiin, joissa tukiseinä on pystysuora ja sileä, tuetun maan pinta vaakasuora ja pintakuorma tasainen. (Jääskeläinen 2011, 175–176.)

Aktiivinen maanpainekerroin lasketaan kaavasta 42. (Jääskeläinen 2011, 176.)

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (42)$$

Passiivinen maanpainekerroin lasketaan vastaavasti kaavasta 43. (Jääskeläinen 2011, 176.)

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (43)$$

Aktiivinen maanpaine kitkamaassa seinän juuressa määritetään kaavalla 44. Aktiivinen maanpaine seinän yläosassa määritetään kaavalla 45. (Jääskeläinen 2011, 176.)

$$p_a = K_a(\gamma z + q) \quad (44)$$

$$p_a = qK_a \quad (45)$$

Passiivinen maanpaine seinän juuressa määritetään kaavalla 46. Passiivinen maanpaine seinän yläosassa määritetään kaavalla 47. (Jääskeläinen 2011, 176.)

$$p_p = K_p(\gamma z + q) \quad (46)$$

$$p_p = qK_p \quad (47)$$

Kaavoissa 42–47 φ on kitkakulma, γ on maan tilavuuspaino, z on rakenteen korkeus ja q on pintakuorma.

4 RAUDOITUKSEN ANKKUROINTI

4.1 Raudoituksen ankkuroinnin teoria

Betonin vetolujuuden ylittyessä betoni alkaa halkeilemaan ja lohkeilemaan. Tällöin raudoituksen täytyy siirtää voimat halkeaman yli. Tämä on mahdollista vain, jos raudoitus kykenee ankkuroitumaan riittävän pitkälle betoniin halkeaman molemmille puolille. Ankkuroituminen tapahtuu tavallisimmin tangon ja betonin välisen tartunnan avulla, mikä varmistaa rakenteen toiminnan. (By 201 2018, 266.)

Raudoituksen tartuntalujuuteen vaikuttavat useat eri tekijät, joista merkittävin on tangon pinta. Tangon pinta voi olla sileä, harjatanko, kuvioitu tai punottu vaijeri. Sileällä tangolla on heikommat tartuntaominaisuudet verrattuna harjakuvioiseen tankoon. Lisäksi raudoitteen sijainti rakenteessa, asento valusuuntaan nähden ja poikittainen jännitystila raudoitteen ympärillä vaikuttavat tartuntalujuuteen. Ankkuroitumiskyvyn ajatellaan olevan verrannollinen tangon pinnalla vaikuttavaan tartuntalujuuteen f_{bd} , joka puolestaan määräytyy betonin mitoitusvetolujuuden f_{ctd} perusteella. Tartuntalujuuteen vaikuttavat myös tangon tartuntaolosuhteet ja tankojen halkaisija. (Leskelä 2008, 463.)

4.2 Raudoituksen ankkuroinnin mitoitus

Palkeilla ankkurointimitoitus tehdään yleensä tukialueella. Raudoitukseen kohdistuva voima on suurin maksimimomentin alueella, mutta pienenee asteittain momentin pienenemisen sekä raudoituksen ja betonin välisen tartunnan vaikutuksesta. Tuella raudoituksen on ankkuroitava kokonaan viimeisen halkeaman kohdalla vaikuttava voima. Raudoitus voidaan ankkuroida eri tavoin, kuten suoralla tangolla, ankkurointielimellä tai lenkiksi/koukuksi taivutetun tangon avulla. (By 201 2018, 266; Nykyri 2013, 152.)

Ristikkomallin mukaisesti sekä puristussauvan että leikkaushalkeaman kaltevuus ovat riippuvaisia leikkausraudoituksen määrästä ja kaltevuudesta. Raudoituksen tulee ankkuroitua tuelle niin, että se kestää vähintään raudoitukseen

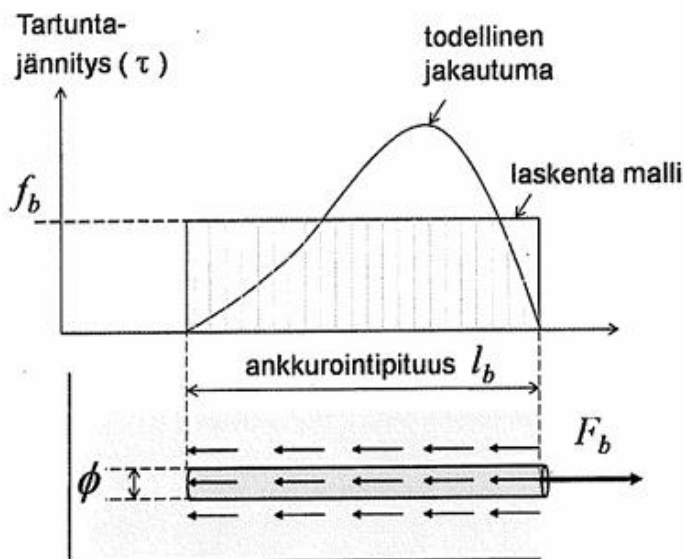
kohdistuvan voiman (F_{Ed}). Tämä voima lasketaan kaavasta 48. (Nykyri 2013, 152.)

$$F_{Ed} = 0,5V_{Ed}(\cot\theta - \cot\alpha) \quad (48)$$

Kaavassa 48 V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo, θ on puristussauvan kaltevuus ($21,8^\circ - 45^\circ$) ja α on leikkausraudoituksen kaltevuus.

4.2.1 Suorien tankojen ankkurointimitoitus

Ankkuroituminen suorilla tangoilla perustuu tangon ja betonin välille kehittyvään leikkausjännitykseen, josta käytetään myös nimitystä tartuntajännitys (τ_d). Tartuntajännityksellä tarkoitetaan nimellistä raudoitustangon vaipalle leikkausjännitykseksi jaettua voimaa. Mitoituksessa tartuntajännityksen oletetaan jakautuvan tasan tangon vaippapinnalle koko ankkurointimatalla (l_b), kuten kuvassa 11 esitetään. Tartuntajännityksen suurinta arvoa kutsutaan tartuntalujuudeksi (f_b). (Nykyri 2013, 153.)



KUVA 11. Suoran tangon ankkuroituminen (Nykyri 2013, 153.)

Ankkuroituva voima lasketaan kaavasta 49. (Nykyri 2013, 153.)

$$F_b = u_s l_b f_b \quad (49)$$

Kaavassa 49 u_s on tangon ympäröimä, joka lasketaan kaavalla 50. l_b on ankkurointipituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän. (Nykyri 2013, 153.)

$$u_s = \pi\phi \quad (50)$$

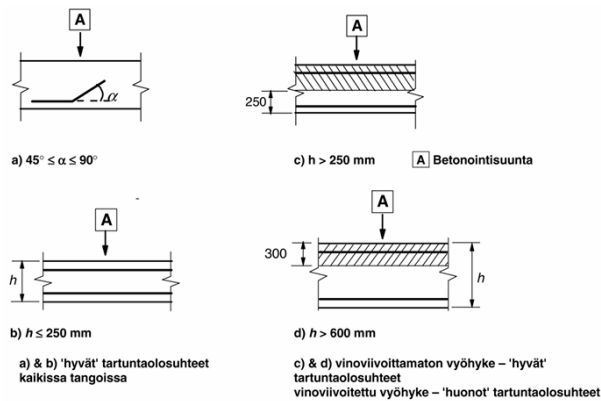
Harjatangoille tartuntalujuuden mitoitusarvo lasketaan tangon halkaisijan, betonin mitoitusvetolujuuden ja tartuntaolosuhteiden avulla kaavasta 51. (Nykyri 2013, 154.)

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2f_{ctd} \quad (51)$$

Kaavassa 51 η_1 on tartuntaolosuhteista riippuva kerroin. Tartuntaolosuhteiden ollessa hyvät se saa arvon 1 ja muissa olosuhteissa arvon 0,7. η_2 on tankopak-suudesta riippuva kerroin, joka lasketaan kaavalla 52 ja f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo (enintään C60/75). (Nykyri 2013, 154.)

$$\eta_2 = \begin{cases} 1,0, & \text{kun } \phi \leq 32 \text{ mm} \\ \frac{132 - \phi}{100}, & \text{kun } \phi > 32 \text{ mm} \end{cases} \quad (52)$$

Tartuntaolosuhteet ovat hyvät betonirakenteen osissa, joissa betoni tiivistyy tangon ympärille hyvin ja jos tangot ovat asennettu 45...90 asteen kulmassa vaakatasoon nähden. Hyvät tartuntaolosuhteet vallitsevat myös kaikissa tangoissa, jos palkin korkeus on enintään 250 mm. Sen sijaan yli 250 mm korkeissa palkeissa palkin alaosassa 250 mm:n korkeudelle asti on hyvät olosuhteet ja yläosassa huonot. Yli 600 mm korkeilla palkeilla on huonot tartuntaolosuhteet tangoilla, jotka ovat alle 300 mm syvyydellä palkin yläpinnasta. Kuvassa 12 on esitetty hyvät tartuntaolosuhteet alueilla, joissa ei ole viivoitusta. (Nykyri 2013, 154.)



KUVA 12. Tartuntaolosuhteiden määrittely. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 133.)

Ankkurointimitoituksessa varmistetaan, että ankkurointialueella pystyy synty-
mään vähintään yhtä suuri ankkurointivoima (F_{bd}) kuin laskettu ankkuroitava
voima (F_{Ed}). Tämä perustuu kaavaan 53. (Nykyri 2013, 155.)

$$F_{bd} \geq F_{Ed} \quad (53)$$

Eurokoodissa ankkurointipituuden perusarvo lasketaan kaavasta 54. (Nykyri
2013, 155.)

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi \sigma_{sd}}{4 f_{bd}} \quad (54)$$

Kaavassa 54 ϕ on tankopaksuus ja σ_{sd} on tangossa vaikuttava normaalijänni-
tys, joka lasketaan kaavalla 55. (Nykyri 2013, 155.)

$$\sigma_{sd} = \frac{F_{Ed}}{A_s} \quad (55)$$

kaavassa 55 A_s on palkin teräksen poikkipinta-ala.

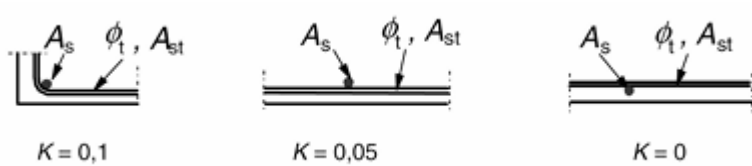
Ankkurointipituuden mitoitusarvo (l_{bd}) lasketaan suhteessa ankkurointipituuden
perusarvoon seuraavalla kaavalla 56. (Nykyri 2013, 155.)

$$l_{bd} = a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 l_{b,rqd} \quad (56)$$

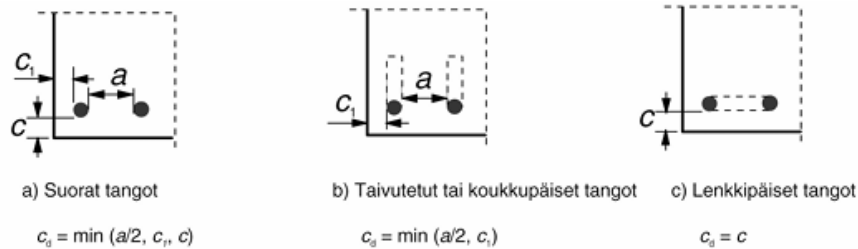
Kertoimet vaihtelevat välillä 0,7...1,0, ja niiden määrittely on esitetty taulukossa 2. Kertoimilla α_2 , α_3 ja α_5 pienennetään suorien tankojen ankkurointipituutta, kun taas kertoimella α_1 otetaan huomioon koukkujen ja lenkkien vaikutus sekä kertoimella α_4 hitsatun poikkitangon vaikutus. Pienennyskertoimia tulee käyttää vasta sitten, kun ankkurointipituus ei riitä ilman niitä. Kertoimen α_2 määrittelyssä käytettävä mitta c_d tarkoittaa pienintä betonipeitettä tai tankovälin puolikasta (ks. kuva 14). Kertoimen α_3 määrittelyssä käytettävä K-kerroin määritellään alla olevan kuvan 13 mukaan. (Nykyri 2013, 155; Leskelä 2008, 466.)

TAULUKKO 2. Pienennyskertoimien arvot ankkurointipituudelle (SFS-EN 1992-1-1 2005, 135.)

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 estoraudotus, 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 estoraudotus*	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 palkeilla 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: Väliämillä tuilla ankkurointipituuden mitoitusarvona l_{bd} voidaan käyttää pienempää arvoa kuin $l_{b,min}$ mikäli tuen kohdalla on vähintään yksi hitsattu poikittaislanka. Tämän edellytetään olevan vähintään 15 mm tuen ulkopinnalta.			



KUVA 13. K -kertoimen arvot palkeille ja laatoille (SFS-EN 1992-1-1 2005,135.)



KUVA 14. Mitan c_d arvot palkeissa ja laatoissa (SFS-EN 1992-1-1 2005, 134.)

Ankkurointipituudelle on asetettu vähimmäisarvot, jotka ovat:

- vetorausdoitukselle kaavan 57 mukaan.

$$l_{bd} \geq l_{bd,min} = \max \begin{cases} 0,3l_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100mm \end{cases} \quad (57)$$

- puristusraudoitukselle kaavan 58 mukaan.

$$l_{bd} \geq l_{bd,min} = \max \begin{cases} 0,6l_{b,rqd} \\ 10\phi \\ 100mm \end{cases} \quad (58)$$

Lopuksi ankkuroinnin riittävyys tulee tarkastaa mitoitus ehdolla, jossa toteutuvan ankkurointipituuden (l_b) tulee olla suurempi tai yhtä suuri kuin raudoituksen rasituksen perusteella määritetty ankkurointipituuden mitoitusarvo (l_{bd}). Mitoitusehto on esitetty kaavassa 59. (Nykyri 2013, 157.)

$$l_b \geq l_{bd} \quad (59)$$

Mikäli kaavan 59 ehto ei toteudu, voidaan vaadittua ankkurointipituutta pienentää seuraavilla toimenpiteillä (Nykyri 2013, 157.):

1. Lisäämällä leikkausraudoitusta, jolloin ankkuroitava voima pienenee.

2. Lisätään tuelle tuotavaa suoraa raudoitusta, jolloin tangossa vaikuttava normaalijännitys pienenee.
3. Käyttämällä koukku- tai lenkkipäistä lisäraudoitusta tai pääraudoitukseen voidaan hitsata suoraan poikittaisia tankoja.

4.2.2 Koukku- tai lenkkipäinen lisäraudoitus

Ankkurointia on mahdollista tehostaa taivuttamalla pääteräkset koukuiksi tai lenkeiksi. Yleensä paksujen tankojen (yli 20 mm) taivuttaminen ei kuitenkaan yleensä ole käytännöllistä, koska vaaditut taivutussäteet kasvavat suuriksi. Tällöin myös tuelle saattaa syntyä lohkeamisvaara. Välttääkseen tämän, tukialueelle voi lisätä ohuempia tankoja, jotka limitetään pääraudoituksen kanssa ja taivutetaan ylös. (Leskelä 2008, 487.)

Eurokoodissa tavutettujen tankojen ankkurointipituuden perusarvo $l_{b,rqd}$ mitataan raudoituksen päästä tangon keskilinjaa pitkin. Tällöin ankkurointivoima voidaan laskea käyttäen kaavaa 49. Mikäli raudoituksen betonipeite kuvan 13 mitoin täyttää alla olevan ehdon 60, taivutettujen terästen ankkurointipituutena voidaan käyttää ekvivalenttia ankkurointipituutta kaavan 61 mukaan. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 136.)

$$c_d > 3 * \phi \quad (60)$$

kaavassa 60 c_d on betonipeite kuvan 13 mukaan ja ϕ ankkuroitavan tangon halkaisija.

$$l_{b,eq} = a_1 * l_{b,rqd} \quad (61)$$

Kaavassa 61 a_1 on taulukon 2 mukainen kerroin ja $l_{b,rqd}$ on ankkurointipituuden perusarvo.

Ekvivalentin ankkurointipituuden vaikutuksen lasketaan alkavan etäisyydellä $\phi_m + \phi$ koukun päästä, jossa ϕ_m edustaa tangon taivutushalkaisijaa ja ϕ tangon

halkaisijaa. Eurokoodin mukaiset tankojen minimi taivutushalkaisijat esitetään taulukossa 3. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 131.)

TAULUKKO 3. Eurokoodin mukaiset tankojen minimi taivutushalkaisijat (SFS-EN 1992-1-1 2005, 131.)

Tangon halkaisija	Taivutustelan vähimmäishalkaisija taivutuksille, koukuille ja lenkeille (ks. kuvaa 8.1)
$\phi \leq 16 \text{ mm}$	4ϕ
$\phi > 16 \text{ mm}$	7ϕ

Koukkujen ja lenkkien ankkuroima voima F_{bd} voidaan laskea kaavan 49 avulla sijoittaen kaavan l_b :n paikalle joko koukun päästä mitatun ankkurointipituuden $l_{bd,rqd}$ tai ekvivalentin ankkurointipituuden $l_{b,eq}$ arvon, noudattaen kaavan 60 määrittelemää ehtoa.

4.2.3 Hitsatut tangot

Ankkurointipituutta on mahdollista myös pienentää hitsaamalla ankkurointipituudelle poikittaistankoja ks. kuva 15. Nämä poikittaistangot toimivat myös päätyankkureina. Poikittaistankojen vaikutus ankkurointipituuteen huomioidaan käyttäen ekvivalenttia ankkurointipituutta. Jotta ekvivalenttia ankkurointipituutta voidaan soveltaa, hitsattavien poikkitankojen halkaisijan on oltava vähintään 0,6 kertaa päätangon halkaisija. Ankkurointivaikutus hitsattuja poikkitankoja käytettäessä alkaa poikkitangon keskiöstä etäisyydeltä 5ϕ . Hitsatun poikkitangon ekvivalentti ankkurointipituus lasketaan kaavasta 62. (Nykyri 2013, 159.)

$$l_{b,eq} = a_4 * l_{b,rqd} \quad (62)$$

Kaavassa 62 a_4 on taulukon 2 mukainen kerroin ja $l_{b,rqd}$ on suoran tangon ankkurointipituus.

Hitsatun poikkitangon tartuntakestävyys voidaan laskea ekvivalenttia ankkurointipituutta käyttäen kaavasta 63.

$$F_{bd} = l_{b,eq} * u_s * f_{bd} \quad (63)$$

Kaavassa 63 u_s on ankkuroitavan tangon ympäröimä ja f_{bd} on betonin tartuntalujuus.

Tangon nimellishalkaisijan ollessa enintään 12 mm, hitsatun poikittaistangon ankkurointikestävyys riippuu pääasiassa hitsausliitoksen mitoitustalustuksesta. Hitsattujen poikittaisten tankojen kestävyys voidaan laskea kaavasta 64. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 137.)

$$F_{btd} = F_W \leq 16 * A_s * f_{cd} * \frac{\phi_t}{\phi} \quad (64)$$

Suorien tankojen ankkurointipituutta voidaan lyhentää myös hitsaamalla tangon päähän poikittainen tanko. Tangon halkaisija tulee olla välillä 14...32 mm tällaisissa tapauksissa. Poikittaisen tangon ankkurointikestävyys lasketaan kaavasta 65. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 136.)

$$F_{btd} = l_{td} * \phi_t * \sigma_{td} \quad (65)$$

kaavassa 65 l_{td} on poikittaistangon mitoituspituus (kaava 66), ϕ_t on poikittaistangon halkaisija, σ_{td} on betonin jännitys (kaava 67). (SFS-EN 1992-1-1 2005, 136–137.)

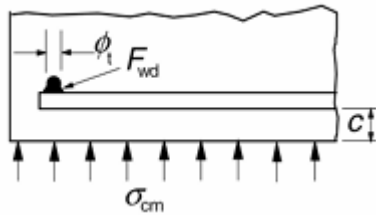
$$l_{td} = 1,16 * \phi_t * \sqrt{\frac{f_{yd}}{\sigma_{td}}} \leq l_t \quad (66)$$

$$\sigma_{td} = \frac{(f_{ctd} + \sigma_{cm})}{y} \leq 3 * f_{cd} \quad (67)$$

$$y = 0,015 + 0,14 * e^{-0,18*x} \quad (68)$$

$$x = 2 * \left(\frac{c}{\sigma_t}\right) + 1 \quad (69)$$

Kaavassa 66 f_{yd} on ankkuroitavan sauvan myötölujuuden mitoitusarvo ja l_t on poikittaistangon pituus (maksimissaan ankkuroitavien tankojen jakoväli). Kaavassa 67 f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo, σ_{cm} on betonin puristusjännitys ja f_{cd} on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo. Kaavassa 69 c on kumpaakin tankoa vastaan kohtisuorassa oleva betonipeite. Kaavalla 69 otetaan huomioon geometria.



KUVA 15. Hitsattu poikittaistanko ankkurointikappaleena (SFS-EN 1992-1-1 2005, 136.)

Poikittaisen tangon ankkurointikestävyys F_{btd} tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin hitsin leikkauskestävyys F_{wd} . Kaavan 70 mukaan. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 137.)

$$F_{btd} \leq F_{wd} \quad (70)$$

Hitsin leikkauskestävyys lasketaan kaavasta 71. (SFS-EN 1992-1-1 2005, 136.)

$$F_{wd} = 0,5A_s f_{yd} \quad (71)$$

kaavassa 71 A_s on poikittaisen tangon poikkipinta-ala ja f_{yd} on betoniraudoituksen suunnittelulujuus.

Pääteräksen perusankkurointipituuden lausekkeessa voidaan jännityksen arvoa pienentää $\frac{F_{btd}}{A_s}$ verran, kun lasketaan vähimmäisankkurointipituus ja suoran tangon osuus kestävydestä. (Leskelä 2008, 473.)

Jos molemmille puolille ankkuroitavaa tankoa hitsataan identtinen poikkitanko, tangon ankkurointivaikutus voidaan kaksinkertaistaa kaavan 65 mukaan, mikäli ulomman tangon betonipeite täyttää vaatimukset. Vastaavasti, jos kaksi tan-

koa hitsataan samalle puolelle ankkuroitavaa tankoa vähintään etäisyydelle $3\phi_t$, voidaan yhden tangon ankkurointikestävyys kertoa 1,4:llä. (Leskelä 2008, 474.)

5 VÄÄNTÖ TERÄSBETONIPALKISSA

5.1 Väännön teoria

Teräsbetonipalkeissa voi esiintyä myös vääntörasitusta muiden kuormitusten lisäksi. Vääntörasitusta syntyy, kun palkkiin kohdistuvien kuormien tai tukivoimien resultantit ei kulje palkin poikkileikkauksessa olevan vääntökeskiön kautta. Vääntökeskiö on poikkileikkauksen piste, jonka ympäri rakenne lähtee kiertymään vääntörasituksessa. Suorakaidepoikkileikkauksilla vääntökeskiö on poikkileikkauksen pintakeskiössä. (Nykyri 2013, 165.)

Vääntörasituksessa poikkileikkaustasot eivät pysy tasoina. Ainoastaan poikkileikkauksen symmetria-akselit pysyvät väännössä suorina ja kohtisuorassa palkin pituusakseliin nähden. Ulkopuoliset poikkileikkauksen osat siirtyvät palkin akselin suunnassa, jolloin poikkileikkaustaso käyristyy. Ilmiötä kutsutaan myös poikkipintapainumaksi. Ympyräpoikkileikkauksella kyseistä ilmiötä ei tapahdu. Betonirakenteissa esiintyvä vääntö on vapaata vääntöä, jolloin poikkipintapainuma syntyy esteettömästi ilman ulkoisia tai sisäisiä esteitä. (Nykyri 2013, 165.)

Vääntöä on kahta eri tyyppiä; estettyä ja vapaata vääntöä. Estetyllä väännöllä on merkitystä ohutseinämaisillä ja kotelopoikkileikkauksilla ja sitä esiintyy pääasiassa niissä. Teräsbetonirakenteissa sitä ei yleensä tarvitse huomioida, vaan rakenteet mitoitetaan vapaan väännön mukaisesti. (Nykyri 2013, 165.)

Palkissa vääntörasitus voidaan huomioida leikkaushajoilla, koska vääntörasitus synnyttää poikkileikkaukseen leikkausjännityksiä. Suorakaidepoikkileikkauksessa vääntöjännitys on suurimmillaan pidemmän sivun keskikohdassa. Ympyräpoikkileikkauksessa vääntöjännitys pysyy vakiona koko kehän matkalla. Sen sijaan suorakaidepoikkileikkauksen nurkissa vääntöjännitys on nolla. (Nykyri 2013, 165.)

5.2 Väännön mitoitus

Vääntöraudoitetun palkin mitoituksessa sovelletaan ristikkomenetelmää. Vääntöraudoitusta mitoitettaessa käytetään kolmiulotteista ristikkoa. Poikkileikkauksen kulmissa olevat tangot toimivat ristikoiden vetopaarteina, haat toimivat poikkittaisina vetosauvoina ja koteloon muodostuvat vinot betonisauvat ristikon puristussauvoina. (Nykyri 2013, 172.)

Vääntöraudoitusta mitoitettaessa on tärkeää ottaa huomioon, että vääntöraudoituksena toimii samanaikaisesti pituussuuntainen ja poikkisuuntainen raudoitus. Vääntörasituksessa puristussauvan kaltevuuskulman tulee olla välillä $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, jotta sekä pituussuuntainen että poikkittainen hakaraudoitus myötäävät samanaikaisesti ja syntyy sitkeä murto. (Nykyri 2013, 172.)

Palkin mitoitus väännölle aloitetaan määrittelemällä palkin poikkileikkaus, betonin lujuusluokka, terästen myötölujuus ja betonin rasitusluokka. Lisäksi tarvitaan tiedot palkille kohdistuvista kuormista sekä taivutus-, leikkaus- ja vääntörasitusten suuruuksista. Näiden tietojen avulla lasketaan palkille tarvittavat vetoteräksset ja leikkausraudoitus.

Palkin tehollinen korkeus d lasketaan kaavalla 72. (Nykyri 2013, 179.)

$$d = h - c_{nom} - 1,1\phi_h - \frac{1,1\phi}{2} \quad (72)$$

Kaavassa 72 h on poikkileikkauksen korkeus, c_{nom} on käytettävä suojabetoni-kerros, ϕ_h on hakojen tankopaksuus (mm) ja ϕ on arvioitu vetoterästen paksuus.

Seuraavaksi lasketaan poikkileikkauksen poikkipinta-ala A ja poikkileikkauksen piiri u . Tehollisen kotelon seinämän paksuus lasketaan kaavasta 73. (Nykyri 2013, 171.)

$$t_{ef} = \max\left(2d_s, \frac{A}{u}\right) \quad (73)$$

Kaavassa 73 d_s on etäisyys yläreunan pituussuuntaisten terästen pintakeskiöstä poikkileikkauksen yläreunaan, A on poikkileikkauksen poikkipinta-ala (mm^2) ja u on poikkileikkauksen piiri.

Tehollisen kotelon seinämän paksuuden avulla voidaan ratkaista teholliset poikkileikkauksen mitat kaavoista 74 ja 75. (Nykyri 2013, 171.)

$$b_0 = b - t_{ef} \quad (74)$$

$$h_0 = h - t_{ef} \quad (75)$$

Seuraavaksi lasketaan tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala A_k ja piiri u_k kaavojen 76 ja 77 avulla. (Nykyri 2013, 171.)

$$A_k = b_0 h_0 \quad (76)$$

$$u_k = 2(h_0 + b_0) \quad (77)$$

Tehollisen pinta-alan avulla voidaan laskea poikkileikkauksen vääntöhalkeilukestävyys $T_{Rd,c}$. Vääntöhalkeilukestävyyttä verrataan mitoittavaan vääntömomenttiin T_{Ed} . Kaavalla 78 lasketaan poikkileikkauksen vääntöhalkeilukestävyys ja kaavasta 79 selviää mitoitusyhtälö. (Nykyri 2013, 172.)

$$T_{Rd,c} = 2A_k t_{ef} f_{ctd} \quad (78)$$

$$T_{Rd,c} \geq T_{Ed} \quad (79)$$

Mikäli vääntöhalkeilukestävyys ylittää mitoittavan vääntömomentin, palkissa riittää vähimmäisraudoitus. Vähimmäisraudoitus lasketaan kaavan 80 mukaan. Jos mitoittava vääntömomentti ylittää vääntöhalkeilukestävyuden, palkki halkeaa ja tarvitaan erillistä vääntöraudoitusta. (Nykyri 2013, 180.)

$$A_{s,min} = \max \begin{cases} 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t d \\ 0,0013 b_t d \end{cases} \quad (80)$$

Kaavassa 80 b_t on palkin vedetyn osan keskimääräinen leveys.

5.2.1 Vääntöraudoituksen mitoitus

Mikäli mitoittava vääntömomentti on suurempi kuin vääntöhalkeilukestävyys, erillinen vääntöraudoitus vaaditaan. Vääntöraudoituksen mitoittamisen ensimmäinen vaihe on määrittää puristussauvan kaltevuus θ . Poikkileikkauksessa käytetään sekä pituussuuntaisia ja poikittaissuuntaisia vääntöraudoituksia. Pituussuuntaisen vääntöraudoituksen laskemiseen käytetään kaavaa 81. (Nykyri 2013, 175.)

$$A_{sL} = \frac{T_{Ed}}{2A_k f_{yLd}} \frac{u_k}{\tan\theta} \quad (81)$$

kaavassa 81 f_{yLd} on pituussuuntaisen raudoituksen myötölujuus.

Teräsmäärä, joka saadaan kaavasta 81, jaetaan symmetrisesti poikkileikkaukseen siten, että tangot sijoitetaan ylä- ja alareunan nurkkiin. Pitkän sivun puoli-
väliin sijoitetaan tangot vain, jos ilman niitä tankojen vapaa väli on yli 350 mm. Yhden tangon poikkipinta-alan on oltava vähintään A_{sL} jaettuna tankojen lukumäärällä. (Nykyri 2013, 175.)

Poikittaista vääntöraudoitusta eli hakaraidoitusta mitoittaessa ensimmäinen askel on valita tankopaksuus. Tämän jälkeen lasketaan hakojen poikkipinta-ala A_{sw} kaavalla 82. Tarvittavan hakavälin laskemiseksi käytetään mitoittavaa vääntömomenttia, tehollisen poikkileikkauksen poikkipinta-alaa, hakaraidoituksen myötölujuutta ja puristussauvan kaltevuutta. (Nykyri 2013, 175.)

$$A_{sw} = \frac{T_{Ed}}{2A_k f_{yLd}} \frac{s}{\cot\theta} \quad (82)$$

$$s \leq 2 \frac{A_{sw}}{T_{Ed}} A_k f_{ywd} \cot \theta \quad (83)$$

Vaikka poikkileikkaus ei laskennallisesti halkeaisi vääntömomentin vaikutuksesta, siihen tulee kuitenkin asettaa vähimmäisraudoitus (kaava 81). Haat tulee asettaa maksimissaan määritellylle välille kaavan 84 mukaan. (Nykyri 2013, 175.)

$$s_{max} = \frac{u}{8} \quad (84)$$

Kaavassa 84 u on poikkileikkauksen piiri.

Kun pituussuuntainen raudoitus ja hakaradoitus on määritetty, on tärkeää tarkistaa vääntökestävyyden yläraja $T_{Rd,max}$, jota kutsutaan myös puristusmurtokestävyydeksi (Kaava 85). Vääntökestävyyden ylärajan on oltava suurempi kuin mitoittava vääntömomentti. (Nykyri 2013, 180.)

$$T_{Rd,max} = 2v f_{cd} A_k t_{ef} \sin \theta \cos \theta \quad (85)$$

Kaavassa 85 v on pienennyskerroin, joka lasketaan alla olevasta kaavasta 86. f_{cd} on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo, A_k on tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala (kaava 76), t_{ef} on tehollisen kotelon seinämän paksuus (kaava 73) ja θ on puristussauvan kaltevuus.

$$v = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) \quad (86)$$

Kaavassa 86 f_{ck} on betonin puristuslujuus.

5.2.2 Mitoitus yhdistetyille rasituksille

Yleisesti teräsbetonipalkissa vääntö ei esiinny yksin, vaan yhdessä muiden rasitusten kanssa. Teräsbetonipalkin ollessa vääntörasitettu, siihen kohdistuu

yleensä jokin ulkoinen kuorma. Ulkoinen kuorma aiheuttaa palkkiin väännön lisäksi leikkaus- ja taivutusrasitusta. (Nykyri 2013, 177.)

Yhdistetyt rasitukset huomioidaan raudoituksessa niin, että jokaiselle rasitukselle mitoitetään omat raudoitukset. Ainoastaan leikkaus- ja vääntörasituksen vaikuttaessa samanaikaisesti, betonin puristuskestävyys on tarkistettava. Mitoittavien leikkaus- ja vääntörasitusten suhde niiden maksimi kestävyyteen ei saa olla suurempi kuin yksi, sillä muuten palkkiin suunnitellun ristikon puristussauvan kestävyys saattaa ylittyä. Yhteisvaikutusehto tarkastetaan kaavan 87 mukaan. (Nykyri 2013, 177.)

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1 \quad (87)$$

Kaavassa 87 T_{Ed} on vääntörasituksen mitoitusarvo, $T_{Rd,max}$ on vääntökestävyyden mitoitusarvon yläraja, V_{Ed} on leikkausrasituksen mitoitusarvo ja $V_{Rd,max}$ on leikkauskestävyyden mitoitusarvon yläraja.

Suorakaiteen muotoisissa poikkileikkauksissa riittää vähimmäisraudoitus, jos halkeiluehto kaavan 88 mukaan toteutuu. (Nykyri 2013, 178.)

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,c}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} \leq 1 \quad (88)$$

Kaavassa 88 $T_{Rd,c}$ on vääntöhalkeilukestävyys ja $V_{Rd,c}$ on leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyys.

6 MITOITUSOHJELMAT TULEVAISUUDESSA

Historiallisesti Excel on ollut yksi keskeisimmistä työkaluista rakennesuunnittelijoille. Sen joustavuus ja helppokäyttöisyys ovat tehneet siitä luotettavan monenlaisiin laskentatehtäviin. Tulevaisuutta tarkasteltaessa on syytä pohtia, kuinka Excelin kaltaiset perinteiset työkalut kehittyvät ja miten ne kilpailevat uudempien ja erikoistuneempien mitoitusohjelmien kanssa.

Excelillä on paljon vahvuuksia. Sen modulaarinen rakenne mahdollistaa monenlaisten laskentapohjien rakentamisen alkaen yksinkertaisista päivittäisistä laskelmista aina monimutkaisiin analyysihin. Lisäksi sen yleisyys ja helppokäyttöisyys tekevät siitä hyvän vaihtoehdon erityisesti pienemmille yrityksille, joilla ei ole resursseja tai tarvetta investoida kalliisiin erikoisohjelmiin.

Excelin rajoitukset ja haasteet alkavat nousta esiin monimutkaisemmissa ja laajamittaisemmissa projekteissa. Excel-pohjaiset mitoitusohjelmat ovat alttiita inhimillisille virheille, ja ohjelmat voivat olla myös vaikeita ylläpitää ja päivittää. Lisäksi, kun projektit kasvavat, niiden monimutkaisuus lisääntyy. Tällöin Excelin suorituskkyky saattaa tulla rajoittavaksi, sillä se ei ole suunniteltu käsittelemään suuria tietomääriä tai monimutkaisia algoritmeja tehokkaasti.

Tulevaisuuden ratkaisut saattavat löytyä erikoistuneista mitoitusohjelmista, jotka tarjoavat enemmän toiminnallisuuksia ja tarkkuutta. Näitä ovat esimerkiksi FEM (Finite Element Method) -ohjelmistot. Lisäksi tekoälyn käyttö rakennesuunnittelussa voi avata uusia mahdollisuuksia automatisoidulle mitoitukselle ja analyysille.

Vaikka Excel ei ehkä koskaan tule häviämään kokonaan rakennesuunnittelun työkaluvalikoimasta, sen rooli muuttuu. Se voi edelleen toimia nopeana ja joustavana työkaluna pienimuotoisissa projekteissa tai nopeissa laskelmissa. Kuitenkin monimutkaisemmissa ja laajamittaisemmissa projekteissa se tulee saamaan rinnalleen erikoistuneempia ja tehokkaampia ohjelmistoja, joita on jo otettu käyttöön.

7 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyössä perehdyttiin eri teräsbetonirakenteisiin ja niiden mitoittamiseen. Mitoituksessa ja työssä käsiteltiin laatan lävistystä, maanpainesseinää, raudoituksen ankkurointia ja palkin vääntöä. Teorian pohjalta luotiin myös Excel-pohjaiset mitoitusohjelmat kustannustehostamaan suunnittelijoiden mitoituslaskentaa. Mitoitusohjelmat olivat lähtökohtainen tavoite työlle. Yhteistyötahon kanssa sovittiin, mitä ominaisuuksia mitoitusohjelmilta haluttiin ja näitä sopimuksia noudatettiin. Mitoitusohjelmat laskevat lähtötietojen avulla tarpeelliset tiedot. Mitoitusohjelmien laskennat pohjautuvat tämänhetkisiin voimassa oleviin eurokoodeihin ja kansallisiin liitteisiin. Mitoitusohjelmien tuloksia on myös kokeiltu ja vertailtu moneen kertaan, jotta niiden luotettavuus ja toimivuus on voitu varmistaa. Työn lopputuloksena syntyneitä mitoitusohjelmia tullaan käyttämään insinööritoimisto Jonecon Oy:n suunnittelukäytössä.

Rakennesuunnittelun nykypäivää on käyttää erilaisia suunnittelua auttavia ja nopeuttavia työkaluja. Excelin lisäksi on olemassa paljon muita hyviksi todettuja alustoja, mutta se on täysin käyttäjästä kiinni, mikä hänelle sopii parhaiten. Jotta käyttäjä voi käyttää mitoitusohjelmia, tulisi hänen tietää teoriaa ja osata arvioida tuloksia kriittisesti. Ohjelmia tulee myös tulevaisuudessa päivittää, kun suunnitteluohjeet muuttuvat.

Haasteellisinta opinnäytetyössä oli Excel-ohjelman käyttö ja kaavojen kirjoittaminen sinne. Neljästä lopputuloksena syntyneestä mitoitusohjelmasta tuli kuitenkin selkeitä ja yksinkertaisia käyttää.

LÄHTEET

Betonilattiat 2018. By 45. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

By 201. 2018. Betonitekniikan oppikirja. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Fernández Ruiz, M., Muttoni, A. 2009. Applications of Critical Shear Crack Theory to Punching of Reinforced Concrete Slabs with Transverse Reinforcement. ACI Structural Journal.

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy.

Kestävä kivitalo. n.d. Pilarilaatta rakenteena, mitoitus ja raudoituksia. Verkkosivu. Viitattu 25.3.2024. <https://www.kivitalo.fi/betonirakenteet/pilarilaatta-rakenteena-mitoitus-raudoitusohjeita/>

Kivitalo info. n.d. Eurokoodisuunnittelu. Verkkosivu. Viitattu 17.4.2024. <https://kivitaloinfo.fi/kivitalon-suunnittelu/rakennesuunnittelu/kantavien-rakenteiden-suunnittelu/eurokoodisuunnittelu/>

Lastunen, A. 2021. Eurokoodit - Tarkoitus. Eurokoodit. Verkkosivu. Viitattu 17.4.2024. <https://www.eurocodes.fi/eurokoodit-tarkoitus/>

Legalett. n.d. Paalulaatta. Verkkosivu. Viitattu 25.3.2024. <https://www.legalett.fi/mika-on-legalett/mika-on-legalet/paalulaatta>

Leskelä, M. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. By 210. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Lips, S. 2012. Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement. EPFL (Lausanne).

Nykyri, P. 2013. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. By 211. Helsinki: BY – koulutus Oy.

Nykyri, P. 2022. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2. By 211. Helsinki: BY – koulutus Oy.

Perustava. n.d. Maanvaraiset ja paalutettavat perustustyyppit. Verkkosivu. Viitattu 25.3.2024. <https://www.perustava.fi/blogi/rakentajan-vinkit/perustustyyppit>

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tamminen, M. 2006. Geotekniikka. Helsinki: Yliopistokustannus Oy.

RIL 202-2011, Betonirakenteiden suunnitteluohje 2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2005. Suomen standardoimisliitto SFS.

Sistonen, E., Lydman, M. & Huovinen, S. 1997. Teräsbetoni- ja laatan lävistyskapasiteetin laskentakaavan geometrinen malli. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

LIITTEET

Liite 1. Pilarilaatan lävistysmitoitus Excel mitoitushjelma

1(2)

Pilarilaatan lävistysmitoitus:

Laatan paksuus:	$h =$	<input type="text" value="0"/>	mm	<input type="text" value="0"/>	m
Pilarin sivumitta, y-suunta:	$c_1 =$	<input type="text" value="0"/>	mm	<input type="text" value="0"/>	m
Pilarin sivumitta, z-suunta:	$c_2 =$	<input type="text" value="0"/>	mm	<input type="text" value="0"/>	m
Pilarin halkaisija, jos pyöreä:	$D =$	<input type="text" value="0"/>	mm	<input type="text" value="0"/>	m
Pilarikuorma:	$V_{Ed} =$	<input type="text" value="0"/>	kN		

Valkoiset laatikot: syötä arvo!
Keltaiset laatikot Excel laskee!

Rasitusluokka:	<input type="text" value="XC1"/>	Suunnittelukäyttöikä:	<input type="text" value="50v"/>
$c_{nom} =$	<input type="text" value="20"/>	mm	
Betoni:	<input type="text" value="C35/45"/>		
$f_{ck} =$	<input type="text" value="35"/>	MPa	
$f_{cd} =$	<input type="text" value="19,8333"/>	MPa	
Rauditus:	<input type="text" value="B500B"/>		
$f_{yk} =$	<input type="text" value="500"/>	MPa	
$f_{yd} =$	<input type="text" value="434,783"/>	MPa	
$f_{ywd} =$	<input type="text" value="400"/>	MPa	
Laatan yläpinnan rauditus:			
Rauditus y-suunnassa (lähempänä pintaa):	$\phi_y =$	<input type="text" value="0"/>	k-jako: <input type="text" value="5"/> ←Vetovalikot molempiin (mm)
Rauditus z-suunnassa:	$\phi_z =$	<input type="text" value="0"/>	k-jako: <input type="text" value="5"/> ←Vetovalikot molempiin (mm)
Poikkileikkaussuureita:			
$d_y =$	<input type="text" value="-20"/>	mm	
$d_z =$	<input type="text" value="-20"/>	mm	
$d =$	<input type="text" value="-20"/>	mm	
$A_{sy} =$	<input type="text" value="0"/>	mm ²	
$A_{sz} =$	<input type="text" value="0"/>	mm ²	
$\rho_{Ly} =$	<input type="text" value="0"/>		
$\rho_{Lz} =$	<input type="text" value="0"/>		
$\rho_L =$	<input type="text" value="0"/>		
Mitoitusjännitys:			
	<input type="text" value="Sisäpilari"/>		
Epäkeskisyyden huomioiva kerroin:	$\beta =$	<input type="text" value="1,15"/>	
Pilarin muoto:	<input type="text" value="Suorakulmic"/>		
Perustarkistuspiirin pituus:	$u_1 =$	<input type="text" value="-251,327"/>	mm
Mitoituskuorma perustarkistuspiirillä:	$v_{Ed,1} =$	<input type="text" value="0"/>	MPa
Lävistyskestävyys:			
Nimellinen poikkileikkaus:	$D =$	<input type="text" value="0"/>	mm
Kerroin:	$C_{Rd,c} =$	<input type="text" value="0,075"/>	
Kerroin:	$k =$	<input type="text" value="#LUKU!"/>	
Lävistyskestävyys:	$v_{Rd,c} =$	<input type="text" value="#LUKU!"/>	MPa
Laatan lävistyskestävyys:			
Mitoitusehto:	$\frac{v_{Ed,1}}{v_{Rd,c}} =$	<input type="text" value="#LUKU!"/>	%
			#LUKU!

2(2)

Lävistyskestävyyden yläraja:Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys: $V_{Rd,c} =$ #LUKU! kN Lävistyskestävyyden yläraja: $V_{Rd,max} =$ #LUKU! kN Mitoitusehto: $\frac{V_{Rd,max}}{V_{Ed}} =$ #LUKU! % #LUKU!**Leikkausraudoituksen mitoitus:**Leikkausraudoituksen tehollinen lujuus: $f_{yv,def} =$ 245 MPa

Määritellään tarkistuspiirit:

Tarkistuspiiri, jossa laatta kestää ilman leikkausraudoitusta: $u_{out} =$ #LUKU! m Piirin etäisyys pilarin kyljestä: $e_{out} =$ #LUKU! m

Leikkauskestävyys säteittäiselle raudoitukselle:

Käytetään pystyhakojia:

 $\alpha =$ 90 $^{\circ}$ Kokeillaan raudoituskehien väliä: $s_r =$ 5 mm ←Vetovalikko, arvon tulee olla pienempi, kuin $0,75d = -15 \text{ mm}$ Kokeillaan tankopaksuutta: $\phi =$ 0 mm ←VetovalikkoHakojen määrä: $n_{sw} =$ 1 ←Vetovalikko $A_{sw} =$ 0 mm^2 $v_{Rd,cs} =$ #LUKU! MPa Mitoitusehto: $\frac{v_{Ed,1}}{v_{Rd,cs}} =$ #LUKU! % #LUKU!

Lävistysmitoitus anturoille:

Anturan y-suuntainen mitta:	$B_1 =$	0	mm	0	m
Anturan z-suuntainen mitta:	$B_2 =$	0	mm	0	m
Anturan paksuus:	$h =$	0	mm	0	m
Pilarin y-suuntainen mitta:	$c_1 =$	0	mm	0	m
Pilarin z-suuntainen mitta:	$c_2 =$	0	mm	0	m
Pystykuorma:	$V_{Ed} =$	0	kN		
Taivutusmomentti z-akselin suhteen:	$M_{Edz} =$	0	kNm		
Taivutusmomentti y-akselin suhteen:	$M_{Edy} =$	0	kNm		

Valkoiset laatikot: syötä arvo!
Keltaiset laatikot Excel laskee!

Rasitusluokka:	XS3	Suunnittelukäyttöikä:	50v
$c_{nom} =$	50	mm	
Betoni:	C30/37		
$f_{cd} =$	17	MPa	
$f_{ctd} =$	1,333333333	MPa	
$f_{ctm} =$	2,9	MPa	
$f_{ck} =$	30	MPa	
Rauditus:	B500B		
$f_{yk} =$	500	MPa	
$f_{yd} =$	434,782609	MPa	
Anturan rauditus:			
y-suuntaan:	$\phi_y =$	0	mm $k_y =$ 5 mm
z-suuntaan:	$\phi_z =$	0	mm $k_z =$ 5 mm
	$d_y =$	-50	mm
	$d_z =$	-50	mm
Tehollinen korkeus:	$d =$	-50	mm -0,05 m
Epäkeskisyyys ja tehollinen pinta-ala:			
	$e_y =$	#JAKO/0!	mm
	$e_z =$	#JAKO/0!	mm
	$B_{1T} =$	#JAKO/0!	mm #JAKO/0! m
	$B_{2T} =$	#JAKO/0!	mm #JAKO/0! m
	$A_T =$	#JAKO/0!	m ²
Pohjapaine:	$\sigma_{gd} =$	#JAKO/0!	kPa
Mitoitusmomentti:			
	$a_1 =$	0	m
	$a_2 =$	0	m
	$M_{Ed1} =$	#JAKO/0!	kNm
	$M_{Ed2} =$	#JAKO/0!	kNm
Vähimmäisraudoitusala:	$A_{s,min} =$	-75,4	mm ² /m

kpl= 1 ←Valitse vetovalikosta
kpl= 1 ↓Valitse vetovalikosta

2(3)

Raudoituksen mitoitus:

y-akselin suuntainen raudoitus (lasketaan koko anturan leveydelle):

$$\begin{aligned} \mu &= \# \text{JAKO/0!} \\ \beta &= \# \text{JAKO/0!} \\ A_{s,vaad} &= \# \text{JAKO/0!} \text{ mm}^2 \quad 0 \text{ mm}^2 \\ A_{s,tot} &= 0 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

z-akselin suuntainen raudoitus (lasketaan koko anturan leveydelle):

$$\begin{aligned} \mu &= \# \text{JAKO/0!} \\ \beta &= \# \text{JAKO/0!} \\ A_{s,vaad} &= \# \text{JAKO/0!} \text{ mm}^2 \quad 0 \text{ mm}^2 \\ A_{s,tot} &= 0 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Ankkuroinnin tarkistus:

Tarkistus pystyleikkauksessa maksimimomentin kohdassa:

$$\begin{aligned} f_{bd} &= 3 \text{ MPa} \\ \sigma_{sd} &= \# \text{JAKO/0!} \text{ MPa} \\ L_{b,rqd} &= \# \text{JAKO/0!} \text{ mm} \quad \# \text{JAKO/0!} \\ \sigma_{sd} &= \# \text{JAKO/0!} \text{ MPa} \\ L_{b,rqd} &= \# \text{JAKO/0!} \text{ mm} \quad \# \text{JAKO/0!} \end{aligned}$$

Tarkistus vinossa leikkauksessa:

Ankkurointi vaatimus y-suunnassa:

$$\begin{aligned} F_s &= \# \text{JAKO/0!} \text{ kN} \\ F_{bd} &= 0 \text{ kN} \quad \# \text{JAKO/0!} \end{aligned}$$

Ankkurointi vaatimus z-suunnassa:

$$\begin{aligned} F_s &= \# \text{JAKO/0!} \text{ kN} \\ F_{bd} &= 0 \text{ kN} \quad \# \text{JAKO/0!} \end{aligned}$$

Lävistysmitoitus:

Murtokartion kaltevuus:

$$\begin{aligned} \frac{c_1}{d} &= 0 \\ \frac{c_2}{d} &= 0 \\ \frac{B_1}{c_1} &= \# \text{JAKO/0!} \\ \frac{B_2}{c_2} &= \# \text{JAKO/0!} \\ a &= -32,5 \end{aligned}$$

3(3)

Redusoitu lävistyskuorma:

$$\Delta A_{red} = 0,00331831 \text{ m}^2$$

$$\Delta V_{Ed} = \#JAKO/0! \text{ kN}$$

$$V_{Ed,red} = \#JAKO/0! \text{ kN}$$

Mitoitusjännitys:

$$W_1 = 0,004225 \text{ m}^2$$

$$u = -0,2042035 \text{ m}$$

$$k = 0,6$$

$$v_{Ed} = \#JAKO/0! \text{ MPa}$$

Lävistyskestävyys:

$$D = 0 \text{ mm}$$

$$C_{Rd,c} = 0,075$$

$$k = \#LUKU!$$

Tehollinen raudoitusala:

y-suunta:

$$L_{b,rqd} = \#JAKO/0! \text{ mm}$$

$$L_b = 32,5 \text{ mm} \quad \#JAKO/0!$$

$$p_{ly} = 0$$

z-suunta:

$$L_{b,rqd} = \#JAKO/0! \text{ mm}$$

$$L_b = 32,5 \text{ mm} \quad \#JAKO/0!$$

$$p_{lz} = 0$$

$$p_l = 0$$

$$v_{Rd,c} = \#LUKU! \text{ MPa}$$

$$\text{Käyttöaste: } \frac{v_{ed}}{v_{Rd,c}} = \#JAKO/0! \% \quad \#JAKO/0!$$

Maanpaineet

	Maalaji:	<input type="text" value="Hiekkainen sil"/>	
	Tiivisyys:	<input type="text" value="Tiivis"/>	
Tilavuuspaino:	$\gamma =$	<input type="text" value="16"/>	kN/m^3
Kitkakulma:	$\varphi =$	<input type="text" value="35,5"/>	$^{\circ}$
Rakenteen mitat:			
Korkeus:	$z =$	<input type="text" value="0"/>	m
Pintakuorma:	$q_k =$	<input type="text" value="0"/>	kN/m^2
Aktiivipaine:			
Aktiivinen maanpainekerroin:	$K_a =$	<input type="text" value="0,2652599"/>	
Aktiivipaine seinän juuressa:	$p_a =$	<input type="text" value="0"/>	kN/m
Aktiivipaine seinän yläosassa:	$p_a =$	<input type="text" value="0"/>	kN/m
Passiivipaine:			
Passiivinen maanpainekerroin:	$K_p =$	<input type="text" value="3,7698881"/>	
Passiivipaine seinän juuressa:	$p_p =$	<input type="text" value="0"/>	kN/m
Passiivipaine seinän yläosassa:	$p_p =$	<input type="text" value="0"/>	kN/m
Lepopaine:			
Lepopainekerroin:	$K_0 =$	<input type="text" value="0,419297"/>	
Lepopaine seinän juuressa:	$p_0 =$	<input type="text" value="0"/>	kN/m
Lepopaine seinän yläosassa:	$p_0 =$	<input type="text" value="0"/>	kN/m
Valitaan mitoittavaksi maanpaineeksi:		<input type="text" value="Lepo"/>	
Mitoittava paine seinän juuressa:		<input type="text" value="0"/>	kN/m
Mitoittava paine seinän yläosassa:		<input type="text" value="0"/>	kN/m

Liite 4. Suoran tangon ankkurointi Excel mitoitusohjelma

1(2)

Suoran tangon ankkurointimitoitus

Leikkausvoiman mitoitusarvo:	$V_{Ed} = 0$	kN							
Palkin korkeus:	$h = 0$	mm							
Palkin leveys:	$b = 0$	mm							
Tukileveys:	$L_T = 0$	mm							
Rasitusluokka:	Xc2								
	$c_{nom} = 30$	mm							
Betoni:	C30/37								
	$f_{cd} = 17$	MPa							
	$f_{ctd} = 1.333333$	MPa							
Rauditus:	B500B								
	$f_{yd} = 434.783$	MPa							
Päätangon halkaisija:	$\phi = 0$	mm							
Hakasten halkaisija:	$\phi_h = 0$	mm							
Tuella tuotavien päätankojen määrä:	$Kpl = 0$								
Päätankojen poikkipinta-ala:	$A_s = 0$	mm ²							
Tehollinen korkeus:	$d = -30$	mm							
Leikkausraudoituksen (hakasten) kaltevuus:	$\alpha = 0$								
Puristussauvan kaltevuus (21.8° - 45°):	$\theta = 0$								
Sisäinen momenttivars:	$z = -27$	mm							
Tuella ankkuroitava voima:	$F_{Ed} = \#JAKO/0!$	kN							
Raudituksen jännitys:	$\sigma_{sd} = \#JAKO/0!$	MPa							
Tartuntalajuus:									
Olosuhteet:	Hyvä								
$\eta_1 =$	1								
$\eta_2 =$	1								
Tartuntalajuuden mitoitusarvo:	$f_{bd} = 3$	MPa							
Ankkurointi pituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän:	$l_{s,rd} = \#JAKO/0!$	mm							
Toteutuva ankkurointi pituus:	$l_b = -30$	mm							
Mitoitusehto:	$\frac{l_{s,rd}}{l_b} = \#JAKO/0!$	%							

Virheet (lahti): syys arvo: kehasset laasti on Excel laskes

Virheet (lahti): syys arvo: kehasset laasti on Excel laskes

Suunnittelukäyttöikä: 50v

Hakojen leikkeisyys: $n_h = 1$ +Vetovalikko

Hakojen poikkipinta-ala: $A_{s,h} = 0$ mm²

$s <$ $\#JAKO/0!$ mm

Hakaväli: $s = 0$ +Vetovalikko, oltava pienempi kuin yllä laskettu arvo

Valitaan haat: T 0 k 0

Virheet (lahti): syys arvo: kehasset laasti on Excel laskes

Jos ankkurointi pituus ei toteudu voi yrittää muuttaa puristussauvan kaltevuutta tai käyttää pienennyskertoimilla laskettua arvoa alla

2(2)

Onko ankkuroitava tanko vedetty vai puristettu?: Vedetty ▾

$$\alpha_1 = 1$$

$$\alpha_2 = \#JAKO/0!$$

$$\alpha_3 = 1$$

$$\alpha_4 = 1$$

$$\alpha_5 = \#JAKO/0!$$

$$l_{bd} = \#JAKO/0! \text{ mm}$$

$$\frac{l_{bd}}{l_b} = \#JAKO/0! \% \quad \#JAKO/0!$$

Tarkistetaan ankkurointipituuden vähimmäisarvo: $l_{b,min} = \#JAKO/0! \text{ mm}$

$$\frac{l_{b,min}}{l_{bd}} = \#JAKO/0! \% \quad \#JAKO/0!$$

Liite 5. Hitsatun poikittaistangon ankkurointi Excel mitoitussohjelma 1(2)

Suoran tangon ankkurointimitoitus, päähän hitsattu päätangon paksuinen poikittaistanko

Leikkausvoiman mitoitussarvo:	$V_{Ed} =$	<input type="text" value="0"/>	kN			
Palkin korkeus:	$h =$	<input type="text" value="0"/>	mm	<input type="text" value="0"/>	m	Väärtoiset laastit: syötä arvo! Vetotaset laastit: Excel-laskes
Palkin leveys:	$b =$	<input type="text" value="0"/>	mm	<input type="text" value="0"/>	m	
Tukileveys:	$L_T =$	<input type="text" value="0"/>	mm	<input type="text" value="0"/>	m	
Rasitusluokka:	<input type="text" value="XC2"/>			Suunnittelukäyttöikä:	<input type="text" value="50v"/>	
$c_{nom} =$	<input type="text" value="30"/>		mm			
Betoni:	<input type="text" value="C30/37"/>					
$f_{cd} =$	<input type="text" value="17"/>		MPa			
$f_{ctd} =$	<input type="text" value="1.33333"/>		MPa			
Rauditus:	<input type="text" value="B500B"/>					
$f_{yd} =$	<input type="text" value="434.783"/>		MPa			
Pätangon halkaisija:	$\phi =$	<input type="text" value="0"/>	mm	+ Vetovalikko		
Hakasten halkaisija:	$\phi_h =$	<input type="text" value="0"/>	mm	+ Vetovalikko		
Pätankojen määrä:	Kpl:	<input type="text" value="0"/>		+Vetovalikko		
Pätankojen poikkipinta-ala:	$A_s =$	<input type="text" value="0"/>	mm ²			
Tehollinen korkeus:	$d =$	<input type="text" value="-30"/>	mm			
Leikkausraudoituksen (hakasten) kaltevuus:	$\alpha =$	<input type="text" value="0"/>	°			
Puristussauvan kaltevuus (21,8° - 45°):	$\theta =$	<input type="text" value="0"/>	°			
Sisäinen momenttivarsi:	$z =$	<input type="text" value="-27"/>	mm			
Tuelle ankkuroitava voima:	$F_{Ed} =$	<input type="text" value="#JAKO/0!"/>	kN			
Raudituksen jännitys:	$\sigma_{sd} =$	<input type="text" value="#JAKO/0!"/>	MPa			
Tartuntalujuus:	Olosuhteet:	<input type="text" value="Hyvä"/>				
	$\eta_1 =$	<input type="text" value="1"/>				
	$\eta_2 =$	<input type="text" value="1"/>		+vaihtaa laskettu arvo tähän, jos tangon halkaisija yli 32 mm. Muuten OK!:	<input type="text" value="1.33"/>	
Tartuntalujuuden mitoitussarvo:	$f_{bd} =$	<input type="text" value="3"/>	MPa			
Ankkurointi pituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän:	$l_{brqd} =$	<input type="text" value="#JAKO/0!"/>	mm			
Toteutuva ankkurointi pituus:	$l_b =$	<input type="text" value="-30"/>	mm			
Mitoituusehto:	$\frac{l_{brqd}}{l_b} =$	<input type="text" value="#JAKO/0!"/>	%	\leq	<input type="text" value="#JAKO/0!"/>	

Onko ankkuroitava tanko vedetty vai puristettu:

$\alpha_1 = 1$
 $\alpha_2 = \#JAKO/0!$
 $\alpha_3 = 1$
 $\alpha_4 = 0,7$
 $\alpha_5 = \#JAKO/0!$

Hitsatut poikittaiset tangot:

Poikittaisen tangon halkaisija: $\phi_t = 0$ mm
 Poikittais tankojen määrä: Kpl: 0 +Vetovalikko

Poikittaisen tangon poikkipinta-ala: $A_s = 0$ mm²

Hitsin leikkauskestävyys: $F_{Wd} = 0$ kN

Hitsien kestävyys: $\#JAKO/0!$ #JAKO/0!

Poikittaistangon pituus: $l_t = 0$ mm

+Vetovalikko. Arvon tulee olla suurempi, kuin alla laskettu mitoituspituus!

Poikittaisen tangon mitoituspituus: $l_{td} = \#JAKO/0!$ mm

≤ 0 mm #JAKO/0!

Ekvivalentin ankkurointipituuden perusarvo: $l_{b,eq} = \#JAKO/0!$ mm

Betonin nimellinen pintapaine: $\sigma_{td} = \#JAKO/0!$ N/mm²

≤ 51 N/mm² #JAKO/0!

Ankkurointikestävyys: $F_{btd} = \#JAKO/0!$ kN

≤ 0 kN #JAKO/0!

≤ 12 mm pääteräksien ja poikittaistankojen mitoitus: $F_{btd} = \#JAKO/0!$ kN

≤ 0 kN #JAKO/0!

Yli 12 mm tankojen mitoitus:

Täyttyykö yllä olevat ehdot?

F_{bd} : Koko ankkurin tartunta= $\#JAKO/0!$ kN

Poikittaisen tangon osuus= $\#JAKO/0!$ kN

Hitsin kestävyys= 0 kN

Määräävä ankkurointikestävyys: $\#JAKO/0!$ kN

Ankkurointikestävyden kerroin: 1

Poikittaisen tangon mitoituskestävyys: $\#JAKO/0!$ kN

Normaalijännityksen pienennysarvo: $\frac{F_{btd}}{A_s} = \#JAKO/0!$ kN

Tangon mitoitusjännitys: $\sigma_{sd} = \#JAKO/0!$ N/mm²

Ankkurointipituuden perusarvo: $l_{b,rqd} = \#JAKO/0!$ mm

≤ -30 mm #JAKO/0! #JAKO/0!

Ankkurointipituuden mitoitusarvo: $l_{bd} = \#JAKO/0!$ mm

≤ -30 mm #JAKO/0! #JAKO/0!

Ankkurointipituuden minimiarvo: $l_{b,min} = \#JAKO/0!$ mm

$\frac{l_{b,min}}{l_b} = \#JAKO/0!$ % #JAKO/0!

Liite 6. Ankkurointimitoitus koukuille Excel mitoitushjelma

1(1)

Vaikutus ankkurointiin, mikäli suoratanko taivutetaan koukuksi

Ankkurointi pituus mitattuna tuen reunasta tangon päähän:	$l_{b,d} =$	#JAKO/0!	mm	
Päätangon halkaisija:	$\phi =$	0	mm	
Tangon halkaisija:	$\phi > 16\text{mm}$			
Taivutustelan vähimmäishalkaisija taivutuksille, koukuille ja lenkeille:	$\phi_m =$	0	mm	
Tartuntalujuuden mitoitusarvo:	$f_{bd} =$	3	MPa	
	$c_{nom} =$	30	mm	
	$l_{b,reqd} =$	#JAKO/0!	mm	
Koukku tangon ankkurointipituus:	$l_b =$	#JAKO/0!	mm	
	$\frac{l_{b,min}}{l_{b,d}} =$	#JAKO/0!	%	#JAKO/0!
Koukullisen tangon ankkuroima voima:	$F_{b,d,k} =$	#JAKO/0!	kN	
Suoran tangon ankkuroima voima:	$F_{b,d,s} =$	#JAKO/0!	kN	
Koukun vähentävä vaikutus:	$F_b =$	#JAKO/0!	kN	
	$\frac{F_b}{F_{b,d,s}} =$	#JAKO/0!	%	#JAKO/0!

Liite 7. Teräsbetonipalkin mitoitus väännölle Excel mitoitusohjelma

1(2)

Teräsbetonipalkin mitoitus väännölle

Vääntörasituksen mitoitusarvo: $T_{Ed} = 0$ kNm

Palkin korkeus: $h = 0$ mm

Palkin leveys: $b = 0$ mm

Valkoiset laatikot: syöväne! Valtainen laatikot Excel laskee!

Rasitusluokka: XC2 Suunnittelukäyttöikä: 50v

$c_{nom} = 30$ mm

Betoni: C30/37

$f_{cd} = 17$ MPa

$f_{ck} = 30$ MPa

$f_{ctd} = 1,33333$ MPa

$f_{ctm} = 2,89647$ MPa

Rauditus: B500B

$f_{yd} = 434,783$ MPa

$f_{yk} = 500$ MPa

Oletetaan haka: $\phi_s = 0$ mm ← Vetovalikko

Oletetaan päätangot samat molempiin: $\phi_1 = 0$ mm ← Vetovalikko

$\phi_2 = 0$ mm ← Vetovalikko

Tehollinen korkeus: $d = -30$ mm

Raud. Keskitäisyys: $d_z = 30$ mm

Poikkipinta-ala: $A = 0$ m²

Poikkileikkauksen piiri: $u = 0$ m

Tehollisen kotelon seinämän paksuus: $t_{ef} = \#JAKO/0!$ mm

Tehollisen poikkileikkauksen mitat: $b_o = \#JAKO/0!$ mm $\#JAKO/0!$ m

$h_o = \#JAKO/0!$ mm $\#JAKO/0!$ m

$A_k = \#JAKO/0!$ m²

$u_k = \#JAKO/0!$ m

Vääntöhalkellukestävyyt: $T_{Rd,c} = \#JAKO/0!$ kNm

Mitoitusehto: $\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,c}} = \#JAKO/0!$ % $\#JAKO/0!$

Vähimmäisraudoitus, jos palkki kestä: Valitaan (vetovalikot molempiin) →

$A_{s,min} = 0$ mm²

$K_{pl} = 1$ $\phi = 0$ mm

$A_{s1} = 0$ mm² OK!

Vääntäraudoituksen mitoitus:

Pituussuuntaisen raudituksen:

Puristussuunnan kaltevuus ($30^\circ - 60^\circ$): $\phi = 0$ °
 Pituussuuntainen rauditus: $A_{1z} = \text{#JAKO/0}$ mm² Teräsmäärä jaetaan symmetrisesti poikkileikkauksen ylä- ja alareunan nurkkiin
 Talkojen ikm (vetovälikko): $X = 1$ kpl

Yhden tangon poikkipinta-ala vähintään: $\frac{A_{1z}}{X} = \text{#JAKO/0}$ mm²

Valitaan tanko: $T = 0$ + Vetovälikko
 Valitun tangon poikkipinta-ala: $A_{1p} = 0$ mm² #JAKO/0!
 Pituussuuntainen rauditus: $A_{1z, tot} = 0$ mm²

Hakeraudoitus:

Valitaan haat: $T = 0$ + Vetovälikko
 Hakojen poikkipinta-ala: $A_{hp} = 0$ mm²
 Hakaväli: $s \leq \text{#JAKO/0}$ mm
 Suurin sallittu hakaväli: $s_{max} = 0$ mm
 Valitaan vääntöhaat: $T = 0$ k 5 +Vetovälit molempiin, k-jaon oltava pienempi kuin yllä laskettu hakaväli

Vääntökestävyyden yläraja:

$$v = 0,528$$

$$T_{Ed, max} = \text{#JAKO/0} \text{ kNm}$$

$$\text{Mitoitusehto: } \frac{T_{Ed}}{T_{Ed, max}} = \text{#JAKO/0} \% \quad \#JAKO/0!$$

Mitoitus yhdistetyille rasituksille:

$$\text{Mitoittava leikkauvoima: } V_{Ed} = 0 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 0 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed, max} = \text{#JAKO/0} \text{ kN}$$

$$\text{Yhdistetyn leikkauksen ja väännön mitoitusehto: } \frac{T_{Ed}}{T_{Ed, max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Ed, max}} = \text{#JAKO/0} \% \quad \#JAKO/0!$$

Vähimmäisraudoitetun palkin mitoitus yhdistetyille rasituksille:

$$\text{Mitoittava leikkauvoima: } V_{Ed} = 0 \text{ kN}$$

$$V_{Ed, tot} = \text{#JAKO/0} \text{ kN}$$

$$\text{Mitoitusehto: } \frac{T_{Ed}}{T_{Ed, tot}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Ed, tot}} = \text{#JAKO/0} \% \quad \#JAKO/0!$$