



Ari-Markus Taskinen

Pilaripaaluanturoiden mitoittaminen ristikkomenetelmällä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennesuunnittelu

Insinöörityö

1.4.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Ari-Markus Taskinen
Otsikko: Pilaripaaluanturoiden mitoittaminen ristikkomenetelmällä
Sivumäärä: 54 sivua + 12 liitettä
Aika: 1.4.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine: Rakennesuunnittelu
Ohjaajat: Insinööri Tomi Karppinen
Tiimipäällikkö Rimo Löiv

Tämän insinööryön aiheena oli paaluanturoiden mitoittaminen ristikkomenetelmällä. Tässä työssä tavoitteena oli tutustua paaluanturoiden mitoittamiseen ristikkomenetelmää hyödyntäen ja pohjatietojen perusteella luoda Excel-pohjainen laskentatyökalu yrityksen käyttöön. Toisena tavoitteena oli selkeyttää mitoituskäytäntöjä 5-paalun paaluanturan mitoitukseen. Tässä opinnäytetyössä on myös koottu yhteen keskeisempiä tutkimuksia paaluanturoiden mitoituskäytäntöihin liittyen.

Tässä työssä käytiin läpi olennaiset asiat paaluanturan mitoitus tehtävää silmällä pitäen. Kirjallisuustyö jaettiin kahteen osaan, jotka koostuivat teoriasta ja mitoittamisesta. Teoriaosuudessa käytiin läpi suunnittelun perusteet standardien ja ohjeiden muodossa. Teoriaosuudessa sivuttiin myös paaluja, paaluanturoita ja niiden rasiuksia. Mitoitusosiossa esiteltiin tavat solmupisteiden mitoittamiselle, voimasuureiden ratkaisemiselle ja halkeamaleveyden määrittämiselle.

Työn tärkeimpänä tuloksena syntyi laskentapohja yrityksen käyttöön. Tässä kirjallisuustyössä otettiin kantaa erityisesti solmupisteiden mitoittamiseen ja tuotiin niiden mitoitus tapojen eroavaisuuksia ja ristiriitoja esille. Jatkokehitystä ajatellen, tässä työssä esiteltiin myös tapa kehittää laskentapohjia useille paaluanturoille 3D-menetelmää hyödyntäen, missä paalujen todelliset sijainnit otettaisiin huomioon.

Avainsanat: paaluantura, ristikkomenetelmä, mitoitusmenetelmät, solmupiste

Abstract

Author: Ari-Markus Taskinen
Title: Pile cap design with STM
Number of Pages: 54 pages + 12 appendices
Date: 1 April 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Civil Engineering
Professional Major: Structural Engineering
Supervisors: Tomi Karppinen, Engineer
Rimo Lõiv, Team leader

The main goal of this thesis was to create Microsoft Excel-based calculation tool for the company use. The program is supposed to calculate the dimensions and main reinforcement of 5-pile cap and create a calculation report. Another goal of this thesis was to make pile cap design instructions clearer. The most important research has also been collected for this thesis.

This thesis consisted of theory and practical section. Basics of design were presented in the theory section. Piles, pile caps and stresses are also presented in the theory section. The practical section was more oriented to calculation. Stress calculation of nodes with STM is presented in calculation section. Calculation of concrete's crack width and magnitude of the forces is also presented.

The most important result of this thesis was the Microsoft Excel-based calculation tool, which was made for company use. Most important subject of this thesis was node calculation with STM. Contradictions of design methods were also presented in the thesis. For the future, the thesis took a side on developing calculation tool for more complex cases.

Keywords: Pile cap, STM, design methods, nodes

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Suunnittelun perusteet	2
2.1	Lait, ohjeet ja standardit	2
2.2	Paaluanturamitoituksen keskeisimmät ohjeet ja standardit	3
2.3	Eurokoodit	4
2.4	Suomen kansallinen liite	4
3	Teräsbetonipaalut	5
3.1	Paalujen suunnittelu	6
3.2	Paalutustyöluokat	7
3.3	Geotekniset luokat ja suunnitteluvaatimusten määrittäminen	7
3.4	Seuraamusluokat	9
3.5	Rasitusluokat	10
4	Paaluanturat	10
4.1	Paaluanturoiden suunnitteluperusteet	12
4.1.1	Paalujen keskinäisten etäisyyksien sallitut mittapoikkeamat	13
4.1.2	Paalun etäisyys anturan reunasta	14
4.1.3	Paalujen keskiöetäisyydet	14
4.1.4	Paalujen etäisyydet muista rakenteista	15
5	Paaluanturoiden ulkoiset rasitukset	16
5.1	Puristus ja veto	17
5.2	Leikkaus ja lävistys	18
5.3	Käyttöraajatilatarkastelut	19
6	Ristikkomenetelmä	21
6.1	Teoria	22
6.2	Veto- ja puristussauvat	25
6.3	Ristikkomallin solmupisteet ja solmualueet	26
6.3.1	Solmutyypit	29

7	Paaluanturoiden mitoittaminen	31
7.1	Tietokoneavusteinen mitoittaminen	31
7.2	Vakiopaaluanturat	32
8	Paaluanturoiden mitoittaminen ristikkomenetelmällä	33
8.1	Solmupisteiden mitoittaminen kaksiulotteisesti	38
8.2	Solmupisteiden mitoittaminen kolmiulotteisesti	43
9	Käyttörajatilatarkastelu paaluanturalle	48
9.1	Halkeilu yleisesti	48
9.2	Halkeilun rajoittaminen	48
9.3	Halkeamaleveyden laskenta	49
10	Yhteenveto	53
10.1	Jatkokehitys	53
	Lähteet	55
	Liitteet	
	Liite 1: Esimerkkilaskelma 5-paalun paaluanturasta	

Lyhenteet

CCC	Määritelmä solmulle, johon liittyy kolme puristavaa voimaa
CCT	Määritelmä solmulle, johon liittyy kaksi puristavaa ja yksi vetävä voima
CTT	Määritelmä solmulle, johon liittyy kaksi vetävää ja yksi puristava voima
FEM	Finite element method – elementtimenetelmä
fib	fédération internationale du béton – Kansainvälinen betoniyhdistys
PTL	Paalutustyöluokka
RakMk	Vanha nimitys rakentamismääräyksistä
RIL	Rakennusinsinööriliitto
SFS	Suomen standardoimisliitto
SKOL ry	Suunnittelu- ja konsultointialan yritysten toimialajärjestö
STM	Strut-and-tie method – ristikkomenetelmä
TTT	Määritelmä solmulle, johon liittyy kolme vetävää voimaa
VBA	Visual Basic for Applications – Microsoftin ohjelmointikieli
YM	Ympäristöministeriö

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii Vahanen Suunnittelupalvelut Oy, joka toimii osana Vahanen-konsernia. Vahanen Oy koostuu 13 eri yksiköstä, jotka toimivat rakennetun ympäristön eri sektoreilla. Yrityskaupan myötä, Vahanen Oy toimii nykyään osana AFRYä.

Paaluperustuksien suunnittelu ja toteuttaminen on arkipäivää varsinkin pääkaupunkiseudulle rakennettaessa ja yritykset joutuvatkin usein suunnittelemaan ja mitoittamaan paaluperustuksia, koska maapohjan kantavuus ei muuten ole riittävä. Pääkaupunkiseudulla hyvillä perustusolosuhteilla varustetut tontit (maanvaraisilla) ovat vähissä, mutta toisaalta rakentaminen voi olla usein kannattavaa näillekin tonteille suuren kysynnän vuoksi, joten paalutuskustannuksista huolimatta näille tonteillekin kyetään rakentamaan.

Aikaisemmin yrityksellä on saattanut olla useita menetelmiä käytössään suunniteltaessa paaluanturoita, ja suunnittelijat ovatkin käyttäneet itse parhaaksi havaitsemiaan menetelmiä. Tämän insinööriyön tavoitteena on perehtyä ristikkomenetelmän käyttöön mitoittaessa paaluanturaperustuksia. Opinnäytetyön toisena tavoitteena on yhtenäistää ohjeistusta, miten paaluanturoita mitoitetään. Opinnäytetyön keskeisimpänä tuloksena syntyy ristikkomenetelmään perustuva laskentapohja, joka lähtöarvot syöttäen mitoittaa ja luo laskentareportin 5-paalun paaluanturasta.

Opinnäytetyö koostuu kirjallisuusosuudesta ja laskentapohjasta. Opinnäytetyön lähteinä toimivat kirjallisuusteokset, internet-lähteet ja tutkimustulokset. Asiantuntijalausuntoja kysyttiin myös mm. tilaajayritykseltä, Rakennusteollisuudelta ja diplomitöiden tekijöiltä. Myös SKOL ry:n kehityshankkeessa 2008–2011 aikaisemmin luodut laskentapohjat paaluanturoista toimivat työn tausta- ja tukimateriaalina.

2 Suunnittelun perusteet

Perustussuunnittelu on tärkeä osa rakennuksen kokonaissuunnittelua. Perustusten tulee olla vakaat ja merkittäviä painumia ei saa syntyä. Perustusten täytyy kestää niille tulevat vaaka- ja pystykuormat, jotka kerääntyvät aina vesikalta asti. Perustusten tulee myös kestää ne maaperän olosuhteet, joihin ne asennetaan.

Rakennusten kantavuusteknistä suunnittelua ohjaa Euroopan maissa eurokoodit ja niiden kansalliset liitteet. Ympäristöministeriö on laatinut lisäksi rakentamismääräyskokoelman, joka aikaisemmin tunnettiin nimellä RakMk. Rakenteiden ja rakennusten toteutusta varten on laadittu toteutusstandardit rakennetyypeittäin esimerkiksi alumiinirakenteille. Rakennusmateriaalien oikeaoppinen käyttö ja soveltuvuus eri kohteisiin varmistetaan tuotekohtaisilla käyttöohjeilla. CE-merkintä lienee tunnetuin rakennusmateriaalien laadun takaaja.

2.1 Lait, ohjeet ja standardit

Suomessa rakentamista ohjaa maankäyttö- ja rakennuslaki. Lain tarkoituksena on järjestää rakentaminen ja alueiden käyttö niin, että lailla luodaan elinympäristölle hyvät edellytykset ja sitä edistetään taloudellisesti, sosiaalisesti ja ekologisesti. [Maankäyttö- ja rakennuslaki: 1 §.]

Tarkemmin rakennusten suunnittelua ja erityisesti kantavuusteknistä suunnittelua Suomessa ohjaa Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakentamismääräyskokoelma uudistui laajasti vuoden 2018 alussa. Muutos oli mittava, aikaisemmin B-osina tunnetut määräykset rakenteiden lujuuksista tunnetaan nyt nimellä ”Ympäristöministeriön asetukset koskien kantavia rakenteita ja pohjarakenteita”. Uudistuksen myötä yksityiskohtaisempi ohjeistus on nyt enemmän juridiikan kieltä ja suunnittelija saakin yksityiskohtaisempaa informaatiota eurokoodeista. [Ympäristöministeriön verkkosivut.]

Eurokoodit ovat eurooppalaisia standardeja, jotka koskevat kantavien rakenteiden suunnittelua. Eurokoodit koostuvat 58 eri osasta ja niissä määritetään rakenteiden suunnittelu yksityiskohtaisesti. Kantavien rakenteiden suunnittelu perustuu hyvin pitkälti eurokoodeihin ja niiden tulkintoihin. Tätä opinnäytetyötä koskevat erityisesti eurokoodijulkaisut suunnittelun perusteista SFS-EN 1990, kuormista SFS-EN 1991 ja betonirakenteiden suunnittelusta SFS-EN 1992. [Lastunen 2021.]

Kansalliset liitteet ovat eurokoodijulkaisujen maakohtaisia ohjeita, jotka ohjeistavat suunnittelijaa ottamaan huomioon myös maakohtaiset erityispiirteet, esimerkiksi lumikuorman Suomessa. Yleisesti kansallisia arvoja voidaan antaa varmuuslukuihin, luonnonkuormien suuruuteen ja rakenteiden säilyvyyteen sekä käyttöikään. Kansalliset liitteet ovat ympäristöministeriön laatimia. [Lastunen 2021.]

2.2 Paaluanturamitoituksen keskeisimmät ohjeet ja standardit

Suomenkielisiä ohjeita paaluanturoiden mitoitukseen on suhteellisen vähän. Ohjeet ovat usein suurpiirteisiä eivätkä välttämättä ohjaa suunnittelijaa kovinkaan yksityiskohtaisesti, kuten esimerkiksi teräsbetonipalkkeja mitoitettaessa. Ohjeistuksissa neuvotaan mitoittamaan teräsbetonipaaluanturat ristikkomenetelmällä, johon liittyviä ohjeita on kuitenkin suhteellisen hyvin saatavilla.

Suunnittelijan etsiessä tietoa paaluanturoiden mitoittamisesta eteen tulee usein myös muiden maiden standardit. Amerikkalaisessa rakentamisstandardissa onkin enemmän yksityiskohtaista tietoa paaluanturoiden (*engl. pile cap*) mitoittamisesta. Varsinaisessa mitoittamisessa on otettava kuitenkin huomioon, että mitoitustyö on tehtävä oman maan standardin mukaan.

Keskeisimpiä ohjeita ristikkomenetelmän mukaiseen mitoittamiseen löytyy Eurokoodista SFS-EN 1992, Betoniteollisuuden laatimista oppikirjoista (By 210, By 211) ja esimerkiksi fib:n (fédération internationale du béton) laatimista suunnittelukoodeista. Ristikkomenetelmällä laadituista mitoitusohjeista on myös tehty useita opinnäytetöitä.

2.3 Eurokoodit

Eurokoodeissa asiat esitetään periaatesääntöinä ja soveltamissääntöinä. Periaatesäännöt ovat yksiselitteisiä ja niitä tulee noudattaa sellaisenaan. Soveltamissäännöt ovat yleisesti hyväksytyjä sääntöjä. [Laakso 2020: 32.]

Paaluanturoiden suunnittelua on ohjeistettu eurokoodissa SFS-EN 1992 ja betoniteräspaalujen suunnittelua SFS-EN 1997. Maata syrjäyttäviä paaluja käsitellään standardissa SFS-EN 12699. Suomen rakennusinsinööriliiton (RIL) laatimia paaluanturoiden ja paalujen suunnittelua koskevia ohjeita on julkaisuissa RIL 202-2011, RIL 254-2016 ja RIL 207-2017. Rakennusinsinööriliiton kirjat perustuvat eurokoodimitoitukseen.

Varsinaista paaluanturan mitoitusta eurokoodi ei ohjeista kuin 1-sivun mittaisella tekstillä. Ristikkomenetelmä ja sen käyttö on sen sijaan eurokoodissa paremmin esillä. [SFS-EN 1992-1-1: 105, 162.]

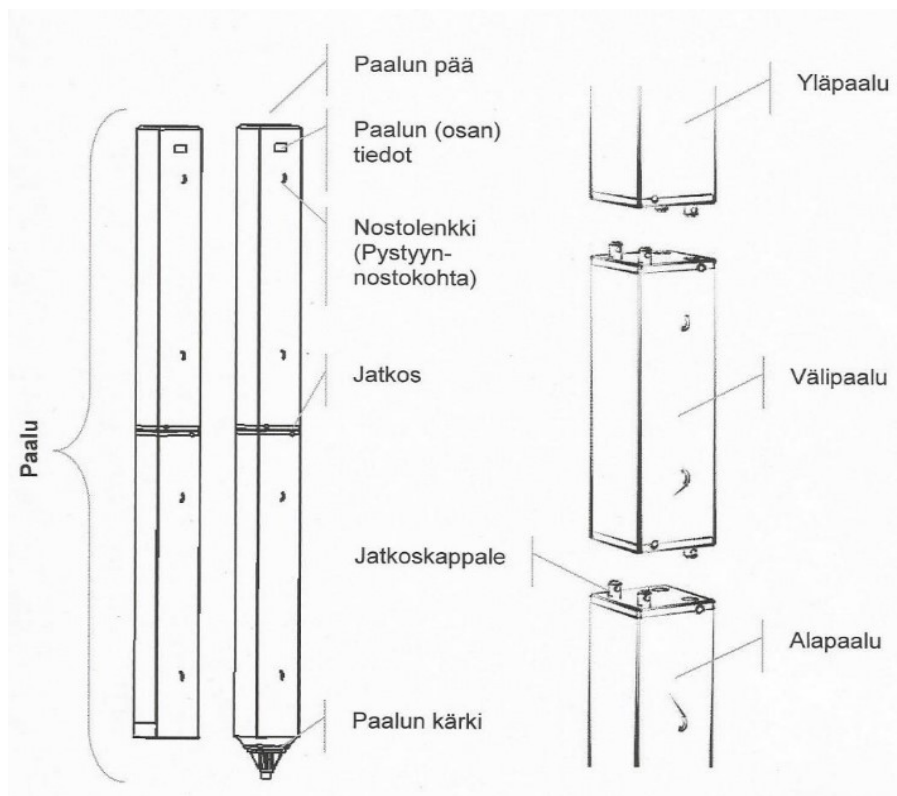
2.4 Suomen kansallinen liite

Paaluanturoiden kannalta Suomen kansallinen liite ei juurikaan ota kantaa niiden mitoittamiseen. Paaluanturaa ei mainita Suomen kansallisessa liitteessä (Rakenteiden lujuus ja vakaus, betonirakenteet) sanallakaan. Tähän opinnäytetyöhön liittyen Suomen kansallinen liite betonirakentamisesta on sen sijaan hieinan ottanut kantaa paalujen raudoittamiseen ja terästen ankkurointimitoitukseen. Myös käyttörajatilamitoitukseen liittyvä halkeamaleveyden määräytyminen eri rasisluokissa on määrätty em. liitteessä. [Lastunen 2021.]

3 Teräsbetonipaalut

Teräsbetonipaalut ovat maahan lyötäviä tai kaivettavia ympyrän tai suorakaitteen muotoisia pitkiä kappaleita (kuva 1). Paaluilla on tarkoitus siirtää rakennukselta tulevat kuormat maaperään tai kalliopintaan. Paalut voidaan ryhmitellä niiden toimintatavan, materiaalin ja valmistustavan perusteella tukipaaluihin, kitkapaaluihin ja koheesiopaaluihin. Tukipaalut lyödään yleensä kalliopintaan asti ja koheesiopaalut jätetään kalliopintaa ylemmäs, maakerroksen varaan.

Paaluja käytetään perustustapana silloin, kun maapohjan kantavuus ei muuten ole riittävä. Paaluja ja paaluperustuksia käytetään usein savi- ja silttipitoisilla mailla, joita Etelä-Suomesta löytyy runsaasti. Toinen syy paaluperustuksien käyttöön on myös se, että perustaminen perusmuurein, anturoin tai pilarein tiiviin pohjakerroksen varaan tulisi näissä kohteissa kalliimmaksi ja hankalammaksi. [Rantamäki & Tamminne 2002: 43.]



Kuva 1. Teräsbetonipaalu ja sen rakenne. [Rakennusteollisuus 2011: 5.]

Paalu voidaan varustaa kalliokärjellä (kuva 1), jonka tarkoituksena on varmistaa paalun pureutuminen kallioperään estäen paalun kärjen sivuliukuman. Kalliokärkeä käytetään maaperässä, jossa on havaittu olevan suuria lohkareita tai tiivistä moreenia. Teräsbetonipaalun kärki voidaan myös varustaa kärkeä suojaavalla kengällä. [Rantamäki & Tamminne 2002: 47.]

3.1 Paalujen suunnittelu

Paalut on suunniteltava siten, että maapohjan ominaisuudet ja paalumateriaalin lujuus huomioonotettuna paalu kestää sille tulevat kuormat riittävällä varmuudella painumien ja sivusiirtymien pysyessä sallittujen rajojen puitteissa. Suunnittelussa on huomioitava paaluja yhdistävä rakenne, paalun jäykkyys ja lujuus. [Rantamäki & Tamminne 2002: 49.] Teräsbetonipaalujen mitoittamisen tulee perustua johonkin seuraavista menettelyistä:

- staattisten koekuormituksiin ja niiden tuloksiin, jotka on osoitettu laskelmilla
- kokemusperäisiin tai analyyttisiin laskentamenetelmiin, jotka ovat osoitettu paikkansapitäviksi koekuormituksilla
- dynaamisten koekuormitusten tuloksiin, jotka ovat osoitettu paikkansapitäviksi koekuormituksilla
- vastaavanlaisen paaluperustuksen havaittuun käyttäytymiseen (edellyttäen pohjatutkimusten tukevan tätä menettelyä)

[RIL 207-2017: 122].

Tämän työn yhteydessä laaditussa laskentapohjassa ja laskentaesimerkissä paaluanturoissa käytetään aina tukipaaluja, joiden on ulotuttava kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen. Paaluja kuormittaa rakennekuormien lisäksi maasta paaluun johtuvat lisäkuormat, joita voivat olla negatiivinen vaippahankaus ja paalun sivukuorma tai vastus. [Rantamäki & Tamminne 2002: 51.]

3.2 Paalutustyöluokat

Paalutustyöluokat huomioivat kuormitus- ja rasitustilat, jotka määrittävät paalun rakenteen. Paalutustyöluokka huomio myös toteutuksen. Paalutustyöluokkia määrittäessä oletuksena pidetään, että paaluille kohdistuu pelkästään sen akselin suuntaisia kuormia. Paalutustyöluokan lisäksi, paalun rakenteessa tulee huomioida lisäksi rakennettavan kohteen ominaisuudet, jotka kuvataan seuraamusluokan ja geoteknisen luokan avulla. Paalutustyöluokka määräytyy kohteen seuraamusluokan ja geoteknisen luokan perusteella. Taulukossa (1) on esitetty paalutustyöluokkien määräytyminen, tavallisten olosuhteiden vallitessa. [RIL 254-1-2016: 101.]

Taulukko 1. Paalutustyöluokan määräytyminen. [RIL 254-1-2016: 101.]

Geotekninen luokka	Seuraamusluokka		
	CC1	CC2	CC3
GL 1	PTL1...PTL3	PTL2...PTL3	PTL2...PTL3
GL 2	PTL1...PTL3	PTL2...PTL3	PTL3
GL 3	PTL1...PTL3	PTL2...PTL3	PTL3

Paalunosien ja varusteiden valmistukselle on asetettu eri standardeissa seuraamusluokasta riippuvia vaatimuksia. Tuotteen tuotetunnisteeseen on merkittävä suurin paalun geotekninen kestävyys, jonka paalutustyöluokka on määrittänyt. [RIL 254-1-2016: 102.]

3.3 Geotekniset luokat ja suunnitteluvaatimusten määrittäminen

Geotekniset luokat määrittävät geoteknisten tutkimusten määrän ja sisällön. Geotekniseen luokkaan 1 kuuluu pienet ja yksinkertaiset rakenteet, joissa perusvaatimukset täyttyvät yksinkertaisilla kokeilla ja katselmuksilla. Geotekniseen luokkaan 2 kuuluvat rakenne- ja perustustyyppit, joihin ei liity erityisiä riskejä.

Geoteknisessä luokassa 3 rakenteet voivat olla erityisen suuria tai epätavallisia, tai rakenteet voivat sijaita seismisillä alueilla. Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat myös rakenteet, jossa maapohjan liikkuminen edellyttää erityisiä tutkimuksia.

Helppoissa pohjarakennuskohteissa paalutusta harvoin tarvitaan, sen sijaan vaativissa luokissa paalutus on usein lähtökohtana rakennuksen perustamiselle [RIL 207-2017: 33].

Perustelluista syistä helppojen kohteiden (GL1) geoteknisessä luokassa voi pohjaolosuhdeselvitykseksi riittää asiantuntijan suorittama maastokatselmus, jonka perusteella tehdään päätelmät rakennuspaikan pohjaolosuhteista. Yksinkertaisia menetelmiä voidaan käyttää silloin, kun riski kokonaisvakavuuden tai maapohjan liikkeiden suhteen on vähäinen. [RIL 254-1-2016: 36.]

Vaativien kohteiden (GL2) luokassa on tarpeen tehdä riittävän laajat pohjatutkimukset, jotta pohjarakenteiden suunnittelu ja niiden toteuttaminen voidaan tehdä turvallisesti. Pohjatutkimukset on ulotettava niin syväälle, että kaikki maakerrokset, joilla voi olla vaikutusta rakentamiseen tai sen suunnitteluun, saadaan tutkittua. [RIL 254-1-2016: 37.]

Vaativien kohteiden geoteknisessä luokassa erikoismenetelmien käyttö ei usein ole tarpeellista ja vastaavasti rutiinimenetelmien käyttö onkin sallittua. Vastavan pohjarekennesuunnittelijan vastuulla on pohjatutkimuspisteiden riittävän määrän toteaminen ja että, rakennuskohteessa käytetään sopivaa pohjatutkimusmenetelmää. Tutkimusten laajuudet esitetään standardissa SFS-EN 1997-1. [RIL 254-1-2016: 37.]

Erittäin vaativissa kohteissa (GL3), joissa on epätavallisia riskejä tai epätavallisen vaikeita pohja- tai kuormitusolosuhteita, standardissa SFS-EN 1997-1 määritetty tutkimuksen laajuus ei välttämättä riitä.

Pohjatutkimukset tehdään erittäin vaativissa kohteissa jokaisen perustuksen kohdalta ja suurten perustusten nurkkapisteistä. Paineellisen pohjaveden alueilla pohjaveden painetaso on mitattava. Kalliopitoisissa pohjaolosuhteissa kalliion päälliset maakerrosten ominaisuudet ovat selvitetävä riittävän tarkasti ottamalla niistä maanäytteitä. [RIL 254-1-2016: 39.]

3.4 Seuraamusluokat

Seuraamusluokat ottavat kantaa rakenteen sortumisesta aiheutuviin seurauksiin. Seuraamusluokkien seuraamukset ovat kuvattu hengenmenetyksinä, taloudellisina vahinkoina, sosiaalisina ja ympäristövahinkoina. Seuraamusluokat ovat riippuvaisia rakenteiden vaurioista tai viasta johtuvista seuraamuksista. Kuormakerrointa korotetaan seuraamusluokan vaativuuden muuttuessa vähäisistä suuriin seuraamuksiin. Seuraamusluokkien määrittely on esitetty taulukossa 2. [SFS-EN 1990: 136.]

Taulukko 2. Seuraamusluokat ja niiden määrittely. [SFS-EN 1990: 136.]

Seuraamusluokka	Kuvaus	Kuormakerroin K_{FI}
CC3	Suuret seuraamukset hengenmenetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1,1
CC2	Keskisuuret seuraamukset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1
CC1	Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	0,9

Seuraamusluokkien lisäksi betonirakenteiden toteuttamiselle on olemassa toteutusluokat. Toteutusluokat koskevat betonirakenteita, jotka valmistetaan rakennustyömaalla. Toteutusluokat valitaan seuraamusluokkien, toteutuksen riskien ja standardin SFS-EN 1990 perusteella. [SFS-EN 1990: 136.].

3.5 Rasitusluokat

Mekaanisten kuormien lisäksi rakenteisiin kohdistuu ympäristöstä aiheutuvia kemiallisia ja fysikaalisia rasituksia. Rasitusluokat ovat kehitetty sitä varten, että nämä rasitukset tulevat huomioonotetuksi rakenteita suunnittelussa. Rasitusluokat jaetaan seuraaviin luokkiin:

- X0 – Ei korroosioriskiä
- XC – Korroosio, joka aiheutuu karbonatisoitumisen vaikutuksista
- XD – Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korroosio
- XS – Meriveden kloridien aiheuttama korroosio
- XF – Jäädytys-sulatusrasitus
- XA – Kemiallinen rasitus

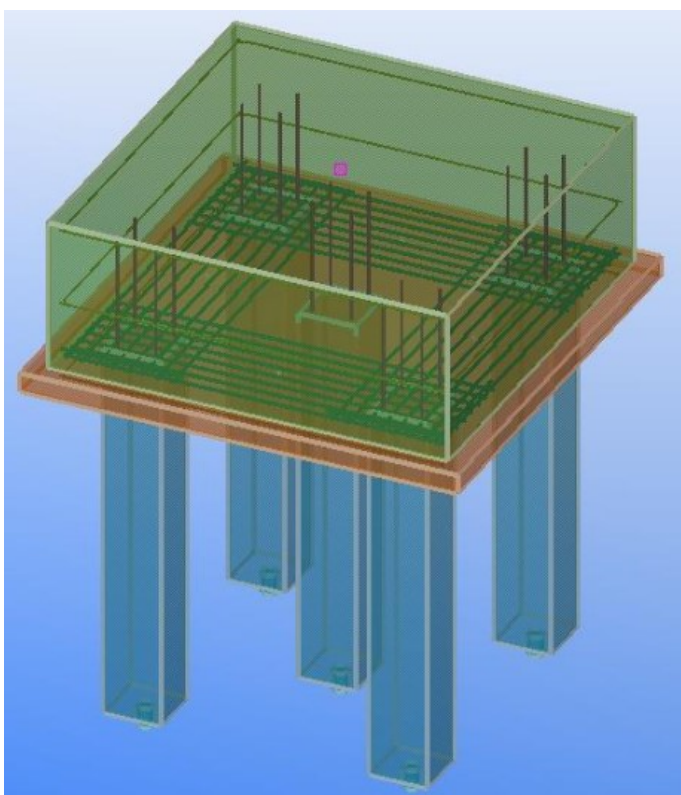
Rasitusluokat jaetaan vielä erikseen niiden rasituksen laadun mukaan. Rasitusluokassa XC, jossa ympäristörasituksena on karbonatisoitumisesta aiheutuva korroosio, luokka XC1 tarkoittaa, että rakenne on pysyvästi märkä tai kokonaan kuiva. [SFS-EN 1992-1-1: 48.]

4 Paaluanturat

Paaluanturoita käytetään talonrakennus ja infrakohteissa paaluperustusten yhteydessä. Paaluanturoilla sidotaan paalut yhtenäiseksi rakenteeksi. Paaluantura siirtää yläpuoliset kuormat paaluille, jotka ovat hieman upotettuina paaluanturan sisällä. Paaluanturaa kuormittavana yläpuolisena rakenteena voi toimia pilari, seinä tai perusmuuri.

Asuntorakentamisessa ja siihen liittyvässä tavanomaisessa rakentamisessa paalut sijoitetaan yleensä pystysuoraan (kuva 2), sillä maanpaine ja paalujen sivuttaisvastus ottavat riittävässä määrin rakennuksen rungolta tulevat vaakavoimat. [Leskelä 2008: 454.]

Paaluanturan alapinnan tason suunnittelussa on otettava huomioon pohjaveden korkeus. Roudan aiheuttamien vaurioiden vuoksi paaluanturan alapinta on sijoitettava roudattomaan syvyyteen tai routiminen on estettävä massanvaihdolla tai routaeristeellä. [Rantamäki & Tamminne 2002: 77.]



Kuva 2. Paalujen pystysuora symmetrinen sijoitus paaluanturaan nähden 5-paalun paaluanturan tapauksessa. [Laitakari 2015: 8.]

Paalujen sijoitus anturaan nähden on oltava symmetrinen (kuva 2). Paalujen symmetrisellä sijoittamisella kuormitusresultanttiin nähden pyritään varmistamaan myös se, että paaluihin syntyisi samansuuruiset kimmoiset puristumat paalujen jäykkyyden ollessa vakio, paalujen ollessa samanlaisia. [Lehtonen 2020: 50.]

4.1 Paaluanturoiden suunnitteluperusteet

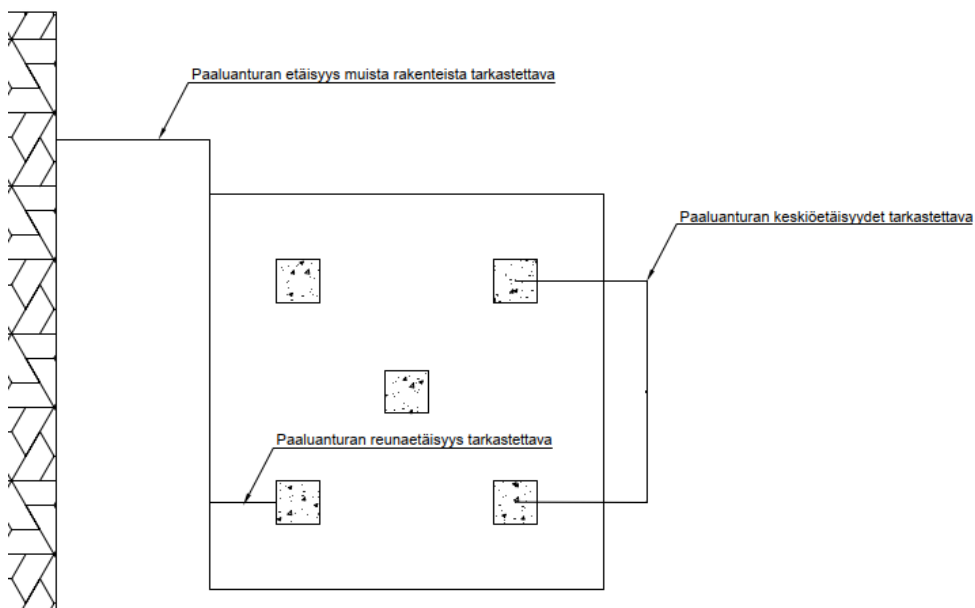
Tavanomaisissa paalutuskohteissa, erityisesti talonrakentamiskohteissa, paaluanturoiden mitoittamiselle on hyvä asettaa tiettyjä reunaehtoja, jotta niiden mitoittamiseen voidaan käyttää tavanomaisia menetelmiä. Näihin tavanomaisiin kohteisiin Rakennusteollisuus on laatinut suunnittelijan vakiopaaluantura ohjeita, joihin on koottu tiettyjen vakiopaaluanturoiden rasiuskäyriä. Ohjeista löytyy myös näiden vakiopaaluanturoiden tarvittavia vetoraudoitusmääriä. Ohjeissa on tehty seuraavat oletukset, joita myös tämän opinnäytetyön esimerkkilaskelma ja työssä laadittu laskentapohja noudattaa:

- paalut ovat pystysuoria, joiden mitat ovat 250x250 mm, 300x300 mm ja 350x350 mm
- vaakavoimia ei synny anturaan ulkoisista kuormituksista
- paaluantura toimii jäykkänä kappaleena laskettaessa paaluvoimia
- paaluille ei sallita vetorasitusta
- pilari- ja seinäkuormat ovat symmetrisesti paaluanturaan nähden (keskellä)

[Betoniteollisuus 2021: 5].

Paalujen asennus tulee suunnitella siten, että ne pystytään asentamaan niiden suunnitelluille sijainneilleen. Teräsbetonipaaluille asetetaan eri vaatimuksia koskien niiden sijaintia. Paalujen sijaintien tulee olla sellaiset, että ne eivät liialti poikkea määrätyistä paikoistaan.

Paalun keskinäinen etäisyys, etäisyys muista rakenteista ja etäisyys paaluanturan reunasta tulee tarkastaa. Kuvassa (3) havainnollistetaan em. vaatimuksia.



Kuva 3. Paaluanturan geometrian huomioiminen mitoituksessa. Kirjoittajan muokkaama kuva. [Leskelä 2008: 457.]

Paaluanturoiden geometrinen vaatimusten lisäksi on määritettävä paalujen katkaisutaso. Paalut katkaistaan siten, että ne ovat upotettuina vähintään 50 mm paaluanturan sisällä, ellei muuta ole määrätty. Jäykässä paalun- ja paaluanturan liitoksessa on huomioitava tartuntaterästen pituus. [RIL 254-2-2016: 176.]

4.1.1 Paalujen keskinäisten etäisyyksien sallitut mittapoikkeamat

Paalutustyön suorittaminen harvoin onnistuu niin tarkasti, ettei paalujen suunniteltu sijainti poikkeaisi toteutuneesta sijainnista. Paaluanturan suunnittelu ja mitoittaminen onkin tehtävä sen jälkeen, kun paalujen todelliset sijainnit ovat selvillä. Todellisten sijaintien perusteella suunnittelija tekee päätelmät siitä, onko paalujen määrä riittävä paaluanturalle tulevalle kuormalle.

Pysty- ja vinopaaluille suurin sallittu sijaintipoikkeama on 100 mm suuntaan standardin SFS-EN 12699 mukaan.

Pienen paaluryhmän, jossa on 4–8 paalua, yksittäisen paalun sijaintipoikkeama voi maksimissaan olla 150 mm. Paaluryhmän painopisteen ei tulisi kuitenkaan poiketa 50 mm enempää. Sijaintipoikkeamat tulee huomioida paaluanturoiden mitoituksessa. [Leskelä 2008: 457; SFS-EN 12699: 28; RIL 254-2-2016: 180.]

4.1.2 Paalun etäisyys anturan reunasta

Paaluanturan on kestettävä paaluvoimien aiheuttamat jännitykset ja ehtona anturan kestävyydelle on, että anturan reuna ei saa lohjeta. Paaluanturan reunan etäisyydelle asetetaan seuraavia vaatimuksia.

- Normaalitapauksissa paaluanturan reuna tulisi olla lähimmän paalun ulkopinnasta vähintään puolet paalun halkaisijasta
- Paaluanturoiden reunaetäisyyttä täytyy kasvattaa, jos työskennellään vaikeissa olosuhteissa, kuten vedenalaisissa betonointitehtävissä

Normaalitapauksissa, missä paaluanturan reunan etäisyys tulisi olla lähimmästä paalusta puolet paalun halkaisijasta, paalun sijaintipoikkeama täytyy myös huomioida reunaetäisyyttä määritettäessä. Sääntö pätee myös paaluhattuja käytettäessä. [RIL 254-2-2016: 180.]

4.1.3 Paalujen keskiöetäisyydet

Suunnitelma-asiakirjoissa on rajoitettava paalujen keskiöetäisyyksiä. Keskiöetäisyyksien rajoittaminen on tarpeen tehdä, että paalutustyö onnistuisi inhimillisesti, eikä vierekkäiset paalut asennettaessa vahingoittaisi toisiansa. Maa pyrkii myös tiivistymään paalua upotettaessa maahan, jolloin maaperän kantavuusominaisuudet voivat muuttua.

Paalutusohjeen (PO-2016) mukaiset vähimmäisarvot paalujen keskiöetäisyyksille ovat seuraavat:

- tuki- ja kitkapaaluille 0,8 m
- koheesiopaaluille 1,0 m
- maakerroksiin tukeutuville vetopaaluille 1,5 m.

Raskaisiin rakenteisiin tarkoitetuille suurpaaluille on omat määritelmät keskiöetäisyyden määräytymiseksi, joita ei käsitellä tässä opinnäytetyössä. Taulukossa 3 on esitetty paalujen keskiöetäisyyksien määräytyminen.

Taulukko 3. Paalujen keskiöetäisyyden määräytyminen, jossa d on teräsbetonipaalun halkaisija. [RIL 254-2-2016: 179.]

Paalun pituus [m]	Tuki- ja kitkapaalu		Koheesiopaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7d	3d	4d	4,5d
10..25	(Ratkaistaan interpoloiden)		5d	5,6d
25	3,5d	4d	6d	6,8d

Mikäli paalu jouduttaisiin korvaamaan uudella paalulla paalun vaurioitumisen seurauksena, tulisi uusi paalu asentaa vähintään mitan $2d$ (missä d on paalun halkaisija) keskiöetäisyydelle korvattavasta paalusta. [RIL 254-2-2016: 179.]

4.1.4 Paalujen etäisyydet muista rakenteista

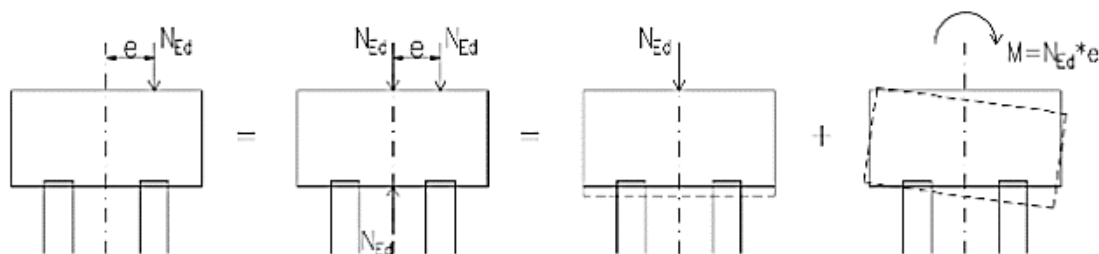
Minimietäisyydet muista rakenteista on suunniteltava kohdekohtaisesti. Suunnittelussa on otettava huomioon paalutuksen, pohjasuhteiden ja ympäröivien rakenteiden aiheuttamat erityisvaatimukset ja rajoitukset. Etäisyyttä valittaessa huomioon tulee ottaa myös paalutyypin, paalun poikkileikkausala sekä värinä, joka aiheutuu paalutuksesta.

Paalutuksesta aiheutuvat painumat on arvioitava upotettaessa paalut aikaisemmin tehtyjen rakenteiden perustamistasoa alemmas. Myös sivusiirtymät ja niiden vaikutus ympärillä oleviin rakenteisiin on huomioitava suunnittelussa. [RIL 254-2-2016: 180.]

5 Paaluanturoiden ulkoiset rasitukset

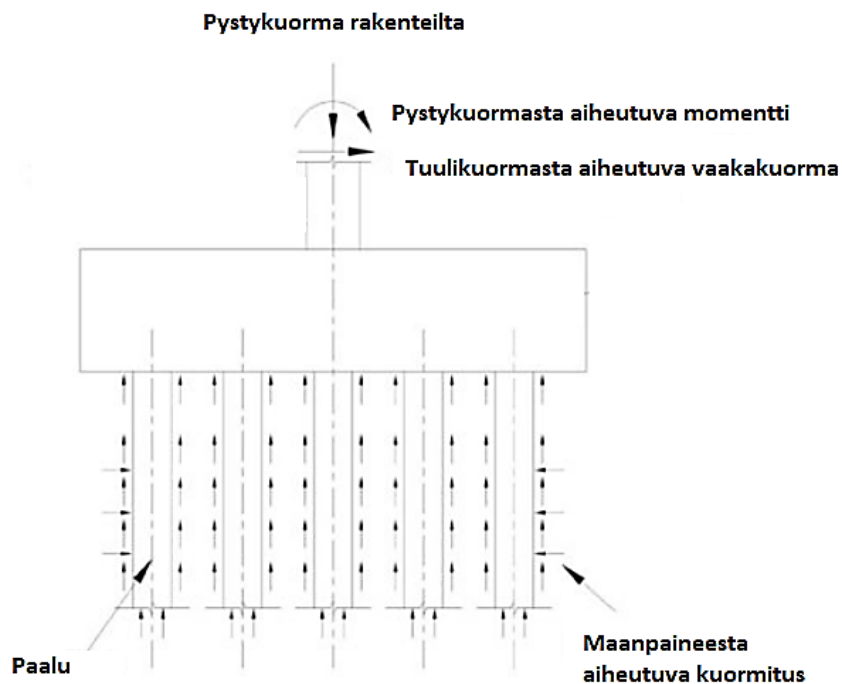
Tässä luvussa käsitellään paaluanturoihin kohdistuvia ulkoisista kuormista aiheutuva rasituksia. Ulkoisista kuormista syntyy paaluanturan sisäisiä jännityksiä. Sisäisiä jännityksiä käsitellään luvussa 8.

Paaluanturat rasittuvat eniten puristavista voimista, joita aiheuttaa pystykuormat rakenteilta. Pystykuormiksi luetaan hyötykuormat, lumikuormat, rakenteiden omat painot ja jäykistysrakenteiden vastaanottamat kuormat. Paaluanturan päällä oleva epäkeskeisesti sijoittunut kuorma (kuva 4) lisää taivutusmomenttia paaluanturalle.



Kuva 4. Kuorman epäkeskeisestä sijainnista johtuva lisämomentti. [Rantamäki & Tamminen 1979: 66.]

Paaluanturoiden mitoituksessa on aikaisemmin tarkastettu leikkaus- ja lävistyskestävyys, mutta ristikkomalleihin perustuvalla mitoitusmenetelmällä leikkaus- ja lävistyskestävyyden tarkastaminen ei ole välttämättä tarpeen paaluanturan suuren korkeuden ansiosta. [Laitakari 2015: 5.]



Kuva 5. Paaluanturan ja paalun tyypillisimmät kuormat. Kirjoittajan muokkaama kuva. [Cao 2009: 6.]

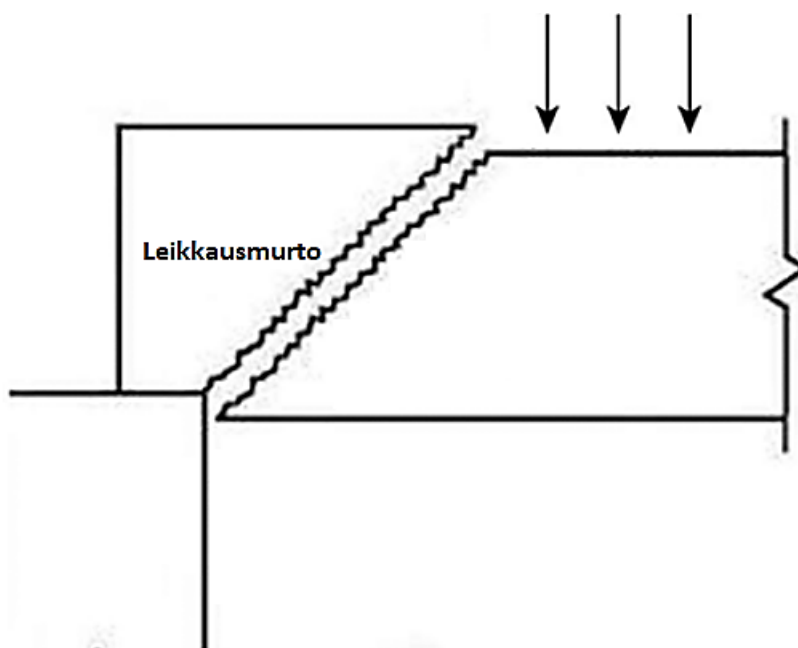
Käyttörajatilamitoituksessa paaluanturoille tarkastellaan halkeamaleveyden suuruutta. Sallittu halkeamaleveyden suuruus esitetään eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 taulukossa 7.1N. [SFS-EN 1992-1-1: 118.]

5.1 Puristus ja veto

Betonirakenteessa puristavat voimat otetaan vastaan betonin puristuskaistoilla. Betonin puristuslujuus on sen vetolujuuteen nähden lujuusluokasta riippuen noin 8–14 kertaa suurempi. Vetovoimat otetaan vastaan teräksellä, jolla on hyvä vetolujuus verrattuna betoniin. Onkin taloudellista asettaa teräkset vetorasitusten suuntaisesti ja betonikaistat puristusrasitusta mukaillen. Paaluanturoihin kohdistuu pääosin puristusrasitusta. Paaluperustus voidaan suunnitella käyttämällä pystysuoria paaluja, silloin kun rasitus on pääosin puristavaa.

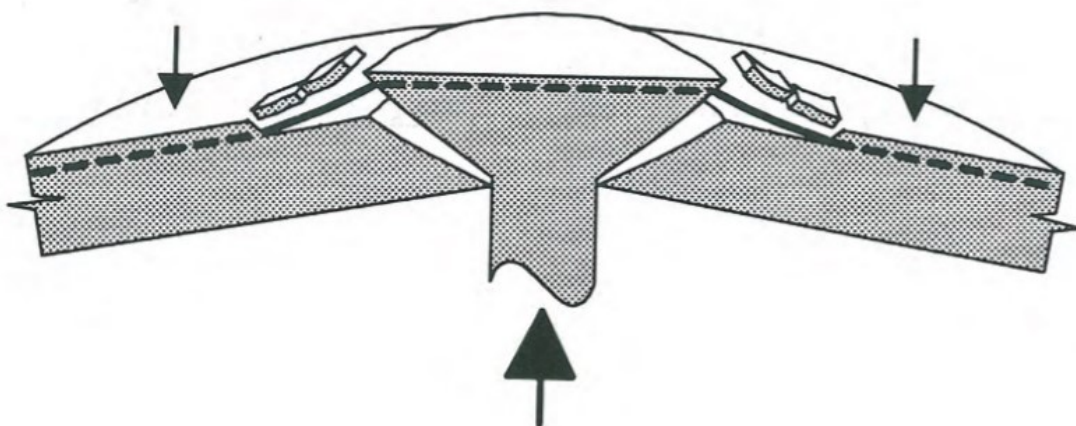
5.2 Leikkaus ja lävistys

Paaluanturoita on aikaisemmin mitoitettu taivutusteoriaan perustuen, jolloin paaluanturan leikkauskestävyys on saattanut tulla määrääväksi tekijäksi eli paaluanturan leikkaantumisen on jouduttu huomioimaan raudoituksessa ja sen dimensioissa. Mitoituslaskelmissa, jotka ovat perustuneet taivutusteoriaan, mal-leissa on voitu usein käyttää hakateräksiä saavuttaakseen tyydyttävän leikkaus-kestävyyden. [Laitakari 2015: 4.]



Kuva 6. Leikkausmurto palkkitapauksessa. Kirjoittajan muokkaama kuva.

Rakenteeseen, johon toinen rakenne liittyy kohtisuorasti, voi rakenteen liittymiskohdan vieressä tapahtua lävistysmurto. Tukireaktion, jonka pilari aiheuttaa (kuva 7), voidaan ajatella leviävän vaakarakenteeseen 45° kulmassa. Lävistysmurto muodostaa murtokartion.



Kuva 7. Lävistyskartion muodostuminen rakenteen liittymäkohdan viereen pilari-laatta rakenteessa. [Hallgren 1997: 1.]

Paaluanturoissa lävistysmurtuma voi syntyä paalun ympärillä. Paaluanturan lävistysmitoitus tehdään kuten pilarilaatoilla tai pilarianturoilla. Ne eroavat pilarianturoiden mitoituksesta siten, että maapohjan kantokykyä ei huomioida niiden mitoituksessa. [Romakkaniemi 2019: 14.]

Paaluanturan tapauksessa lävistysmurto on kuitenkin epätodennäköistä, koska paaluanturat mitoitetaan ristikkomallin mukaan ja korkeus tulee luonnostaan suureksi. Mikäli paaluanturan paaluvälit alkavat kasvamaan ja paaluanturasta tulee paalulaatta, on lävistysmitoitusta syytä tehdä. [Laakso 2020: 23.]

5.3 Käyttörajatilatarkastelut

Käyttörajatilatarkasteluilla tarkoitetaan tarkasteluja, joissa rakenteita tarkastellaan niiden estetiikan ja käyttömukavuuden kannalta. Käytännössä rakenteiden käyttörajatilatarkasteluilla pyritään rajoittamaan rakenteen taipumaa, halkeilua ja muodonmuutoksia.

Käyttörajatilatarkasteluissa, toisinkuin murtorajatilatarkastelussa, kuormia ei koroteta varmuuskertoimilla, eli kuormat tarkastellaan ominaiskuormina. On kuitenkin huomattava, että muuttuvalle ominaiskuormalle käytetään yhdistelykerrointa muodonmuutoksesta aiheutuvan haitan perusteella. Toinen tärkeä sääntö käyttörajatilatarkasteluille on, että rakenteiden oletetaan toimivan kimmoteorian mukaisella tavalla, eli jännityksen suhde rakenteen muodonmuutokseen oletetaan olevan lineaarista tiettyyn pisteeseen asti. [Leskelä 2008: 347, 317; Lehtonen 2020: 12.]

Taipumatarkasteluissa tarkastellaan kuormien aiheuttamia rakenteen poikkileikkauksen painopisteviivan siirtymää vertailuviivan suhteen. Pääsääntönä pidetään, että taipuma ei saa haitata rakenteen toimintaa. Myöskään taipuma ei saa muodostua niin suureksi, että se haittaisi rakenteen estetiikkaa. Suurimmat sallitut taipumat esitetään eurokoodissa rakenteesta riippuen. [Leskelä 2008: 327.]

Muodonmuutoskuormiin luetaan vaikutukset, jotka aiheuttavat rakenteeseen jännitystilan. Pakkojännityksiä aiheutuu silloin, kun jokin rakenteen osa estää muodonmuutoksen vapaan kehityksen. Tyypillinen esimerkki pakkojännityksen muodostumiselle on, kun lämpölaajentumiseen ei ole varattu rakenteessa tarpeeksi tilaa. [Leskelä 2008: 347.]

Paaluanturoille pätee samat käyttörajatilasäännöt kuin muillekin laatta- ja palkkirakenteille. Anturoille ei ole asetettu taipumarajaa eurokoodissa, mutta paaluanturoiden korkeuden suhde leveyteen on suuri, joten suurta taipumaa ei ole tiedossa. Taipumat ja niiden rajoittaminen tulee kyseeseen ennemminkin palkki- ja laattarakenteille.

Paaluanturoiden käyttörajatilamitoitus käytännössä rajautuu halkeamaleveyden määrittämiseen. Sallittu halkeamaleveys määräytyy rasitusluokan perusteella. Anturat kuuluvat usein rasitusluokkaan XC2, jossa kemiallista rasitusta ei sallita. Halkeamaleveyden suuruuteen vaikuttaa käytetyn materiaalin lujuusominaisuudet, vetoraidoituksessa vallitseva jännitys ja vetoalueen mitat. Halkeamaleveyden laskenta paaluanturalle on esitetty luvussa 9.3. [Nykyri ym. 2014: 196.]

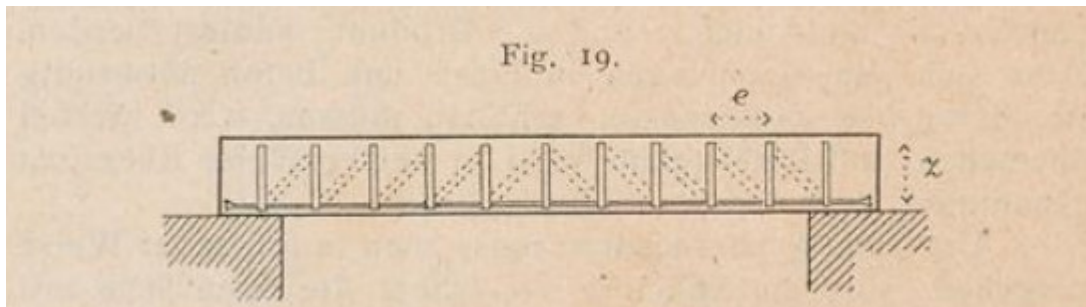
6 Ristikkomenetelmä

Ristikkomenetelmä on suunnittelumenetelmä, jolla voidaan mallintaa voimien kulkua betonissa, kun rakenteen kuormituksessa tai sen geometriassa on epäjatkuvuuskohtia. Tavanomaisissa rakenteissa, joissa ei kuormituksen tai rakenteen geometriasta johtuen ole epäjatkuvuuskohtia, voidaan rakenteen mitoittamiseen käyttää kimmoteorian mukaisia oppeja. Ristikkomalleissa tarkastellaan staattista voimatasapainoa kuvitteellisten voimamonikulmioiden avulla. [Leskelä 2008: 159.]

Ristikkomenetelmällä on pitkä historia betonirakenteiden mekaniikassa. Se on saanut alkunsa jo 1800-luvun lopussa Karl Wilhelm Ritterin toimesta. Laaja-alaisempaa hyväksyntää ristikkomenetelmä alkoi saamaan 1980-luvun rakennesuunnittelussa, kun Kanadan betonirakentamisstandardit (*engl. The Canadian Concrete Code*) hyväksyi sen yhdeksi mitoitusmenetelmäksi vuonna 1984. [Chantelot & Mathern 2010: 62.]

Ristikkomenetelmän käyttö on yleistynyt 2000-luvulla, kun se noteerattiin eurokoodeissa vuonna 2004 yhtenä paaluanturoiden suunnittelumenetelmänä. Aikaisemmin paaluanturoita on voitu mitoittaa betonipalkkien tapaan, Euler-Bernoullin taivutusteoriaan perustuen. On kuitenkin todettu, että ristikkomenetelmällä laaditut mallit kuvastavat kuitenkin paremmin voimien jakaantumista paaluanturassa.

Yleisesti voidaan todeta, että kun sauvaa rasitetaan, siihen syntyy voimajakauma. Voimajakauman avulla voidaan kuvata voimien kulku sauvassa. Kuvassa (8) on kuvattu alkuperäinen ajatus ristikkomallista, jossa viistosauvat kuvaavat kuvitteellisia puristussauvoja ja pysty- ja vaakaviivat kuvastavat vetosauvoja. [Metwally 2016: 8.]



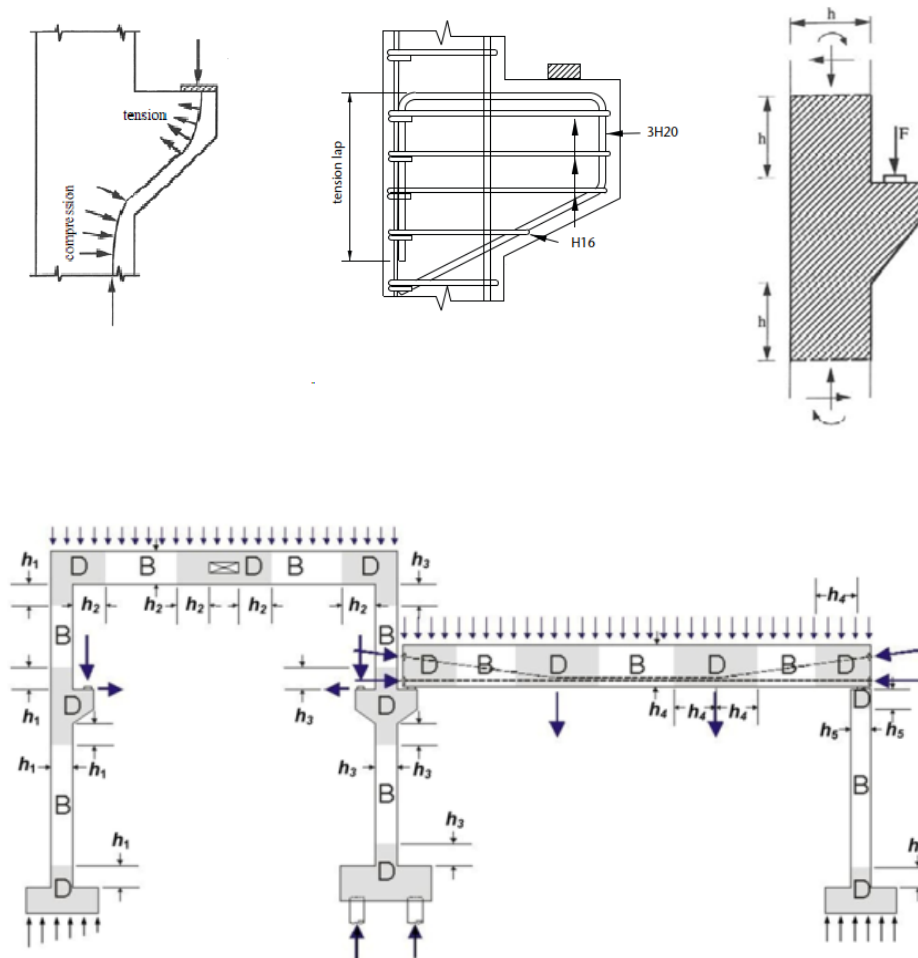
Kuva 8. Ritterin ajatus 1-aukkoisen palkin ristikkomallista. [Ritter 1899: 7.].

Ristikkomallin ei tulisi poiketa merkittävästi kimmoteorian mukaisista jännityksistä ja niiden jakautumisesta. Ristikkomallia luodessa taustatieto rakenteen jännitysjakaumasta on tarpeen. Yleisestikin pohjatieto ja kokemus ristikkomallin toiminnasta on tarpeen suunnittelutehtävissä. [Leskelä 2008: 431.]

6.1 Teoria

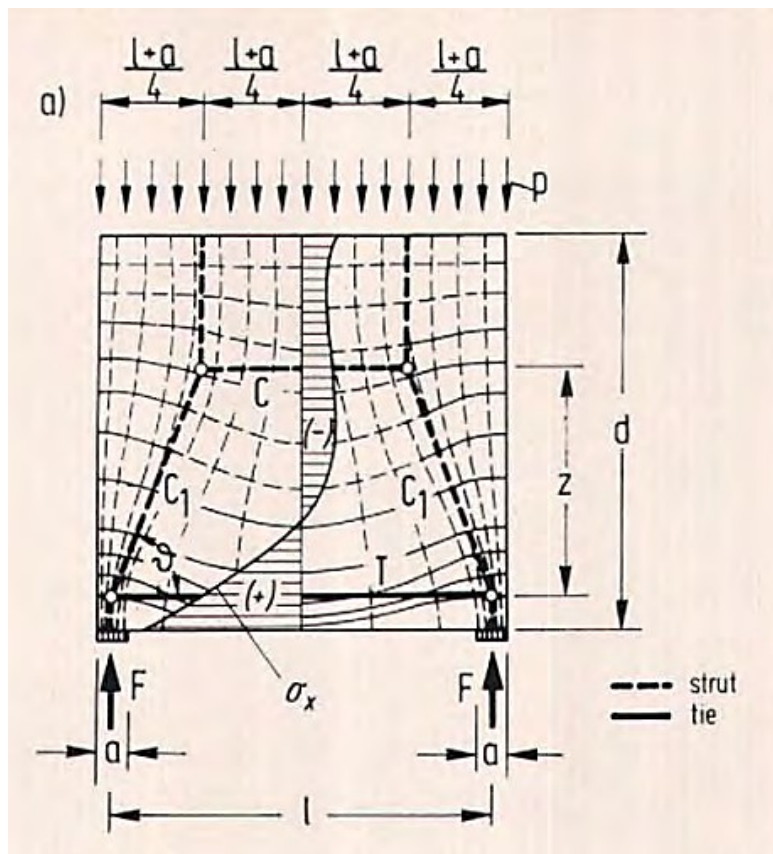
Ristikkomenetelmän tavoitteena on mallintaa voimien jakaantumista betonirakenteissa. Mallinnus tehdään haljenneelle betonille, kun plastinen muodonmuutos on tapahtunut, käyttäen puristus- ja vetosauvoja sekä niitä yhdistäviä solmupisteitä. Mallissa puristussauvat ovat betonia ja ottavat vastaan puristusrasitukset. Vetosauvoina toimivat rakenneteräkset. Huomattavaa on, että ristikkomalleihin piirretyt vetosauvat ovat myös todellisuudessa samassa paikassa vetoterästen muodossa. [Chantelot & Mathern 2010: 61.]

Rakenteissa voi esiintyä epäjatkuusalueita, joissa suunta tai jokin muu ominaisuus muuttuu epäjatkovasti. Pilarissa oleva uloke (kuva 9) on esimerkki rakenteen epäjatkuuskohtasta. Tällaisia epäjatkuuskohtia kutsutaan D-alueiksi. B-alueiksi kutsutaan sellaisia alueita, mitkä ovat D-alueiden vieressä, mutta niissä ei esiinny epäjatkuutta. [Leskelä 2008: 161.]



Kuva 9. Pilarin uloke on tyypillinen D-alue. [Walraven 2008: 111; Goodchild ym. 2014.].

Kaikki rakenteet voidaan jakaa B- ja D-alueisiin. B-alueiksi kutsutaan rakenteita, joissa kimmoteorian oletetaan olevan voimassa ja ne voidaan mitoittaa palkkiteorian mukaisesti. Bernoullin palkkiteoriassa oletetaan rakenteen poikkileikkausten pysyvän tasoina myös kuormitettuna ja muodonmuutosjakauman oletetaan olevan lineaarinen rakenteen murtumiseen saakka. Toisinkuin edellä, kuvassa (10) on kuvattu seinämäisen palkin epälineaarinen rasituksen kulkeutuminen.



Kuva 10. Seinämäisen palkin epälineaarinen rasitus rakenteen korkeuden funktiona. [Schlaich ym. 1987: 89.]

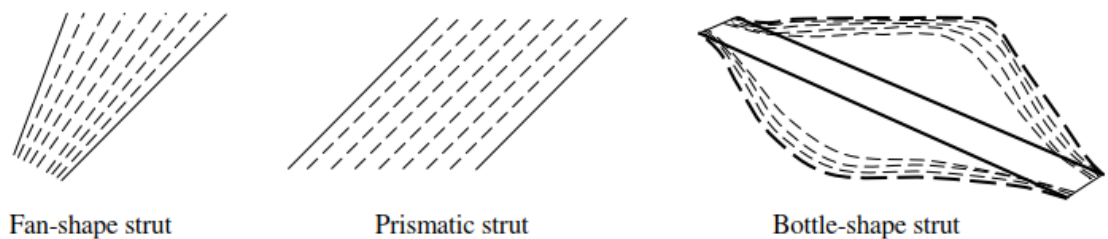
D-alueilla Bernoullin palkkiteoria ei ole voimassa (kuva 10). Näillä alueilla on epäjatkuvuuskohtia, jotka aiheutuvat rakenteen geometriasta tai kuormituksesta. Muodonmuutosten ja jännitysten jakautuminen näillä alueilla ei ole lineaarista, eikä niitä voi mitoittaa palkkiteorian mukaisesti. [Koskimies 2014: 14.]

6.2 Veto- ja puristussauvat

Ristikkomallin mukaisessa rakenteessa puristusjännitysten oletetaan siirtyvät betonisissa puristuskaistoissa. Puristussauvat kuvaavat todellisen rakenteen puristuskaistan resultanttia. Puristussauvojen jännityskenttien muotoa kuvataan kolmella eri tavalla, joita ovat:

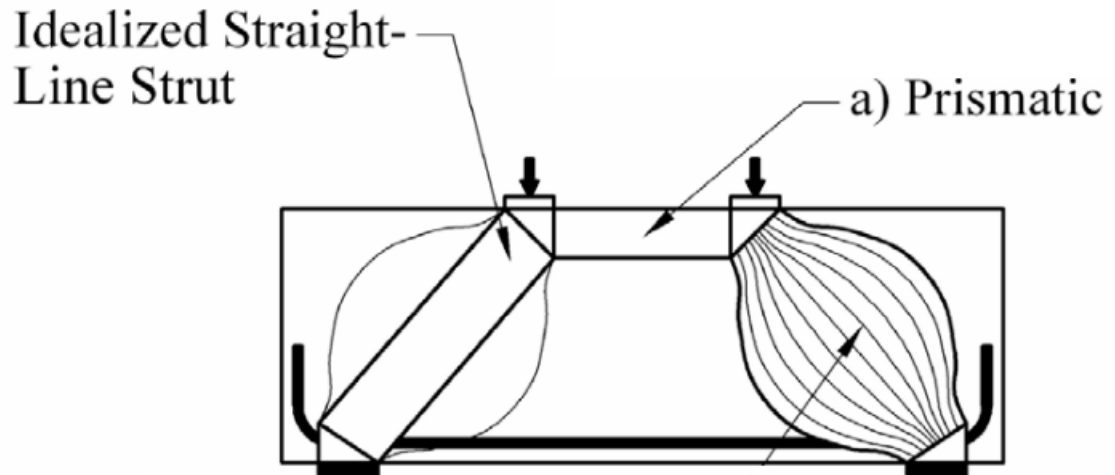
- ”prismaattinen”
- ”pullomainen”
- ”viuhkamainen”

Prismaattisen puristussauvan ajatellaan olevan suorakaiteen muotoinen, pullomaisessa kentässä jännitysalue laajenee keskikohtaan tultaessa ja viuhkamaisessa kentässä jännitys kasvaa toiseen päähän mentäessä. Kuvassa (11) esitetään puristussauvojen jännityskenttien jakautuminen eri tavoin.



Kuva 11. Puristussauvojen eri jännityskentät. [Chantelot & Mathern 2010: 67.]

Mikäli puristus- ja vetosauvojen solmupisteiden välillä on tarpeeksi laajentumistilaa poikittaissuunnassa, muodostuu jännityskentästä ”pullomainen”. Poikittainen vetojännitys on tyypillinen piirre pullomaisissa jännityskentissä, joita esimerkiksi paaluanturoissa (alapinnassa) esiintyy (kuva 12). Poikittaista puristusta esiintyy paaluanturan diagonaalin yläpäässä ja tällöin poikittaissauvan muoto on prismaattinen. Kuvasta (12) nähdään myös tapa, kuinka pullomaisia jännityskenttiä kuvataan usein ristikkomalleissa.



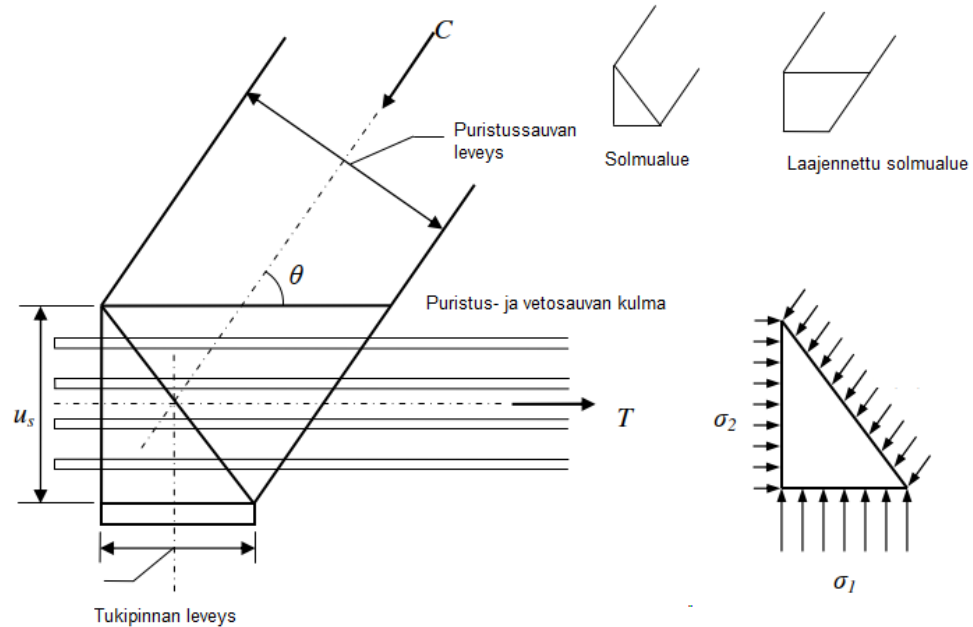
Kuva 12. Puristussauvan jännityksen pullomainen leviäminen ja sen idealisoitu malli. [American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2007: 3.].

Paaluanturan betonikaistojen poikittaiselle puristukselle ja vedolle on eurokoodissa määritetty kaavat mitoitusslujuuden laskentaan. Kaavat on esitetty luvussa 8.1.

6.3 Ristikkomallin solmupisteet ja solmualueet

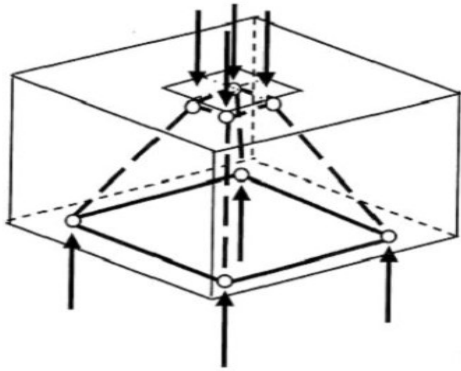
Puristus- ja vetosauvat liittyvät solmupisteissä, joissa niiden suunta vaihtuu. Tiedettäessä vähintään yksi sauvavoima ja sauvojen välinen suuntakulma, voidaan loput sauvavoimat ratkaista. Ristikkomallin toiminnan kannalta on olennaista, että solmupisteessä olevat voimat ovat tasapainossa. [Leskelä 2008: 162; Koskimies 2014: 19.]

Solmualueella tarkoitetaan jännitysalueita, jotka muodostuvat solmupisteen ympärille. Paaluanturan mitoituksen kannalta mielenkiintoisinta on selvittää solmualueiden pinta-aloja, jotta niissä vallitsevat jännitykset voidaan laskea.



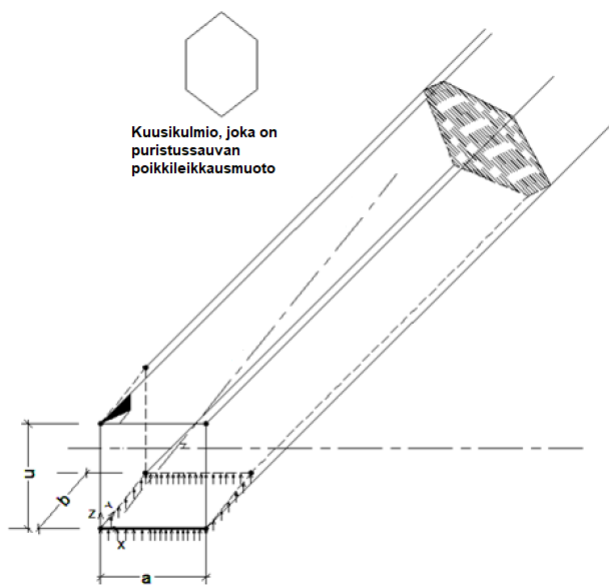
Kuva 12. Solmualueen jännitykset CCT ja CCC-solmussa tasokuvauksena. Kirjoittajan muokkaama kuva. [Chantelot & Mathern 2010: 54.]

Solmupisteiden ja alueiden jännitystarkastelussa on eroja. Useat ohjeet ja kirjat esittelevät tavan mitoittaa solmualueita tasossa, mutta paaluanturan tapauksessa sen neliömäisen muodon myötä anturan sisään muodostuu avaruusristikko. Avaruusristikon solmualueiden pinta-alojen ratkaisemiseen on kehitetty menetelmiä, joista tunnetuin lienee Chantelot & Mathernin esittelemä (kuva 13).



Kuva 13. Avaruusristikon muodostuminen paaluanturan sisään. [Metwally 2016: 34.].

Solmupistetarkastelun jännitysalueiden mittojen erot syntyvät mitoitustavan valinnasta. Chantelot & Mathern tekivät maisterityössään vertailuja solmupisteiden mitoitustapojen välillä. Pinta-alojen määrittämisessä eroja syntyi 0...29 %. [Chantelot & Mathern 2010: 68.]



Kuva 14. Puristussauva ja sen muodostama jännityspinta-ala solmussa kolmiulotteisena kuvauksena 4-paalun paaluanturan tapauksessa. Kirjoittajan muokkaama kuva. [Metwally 2016: 43.]

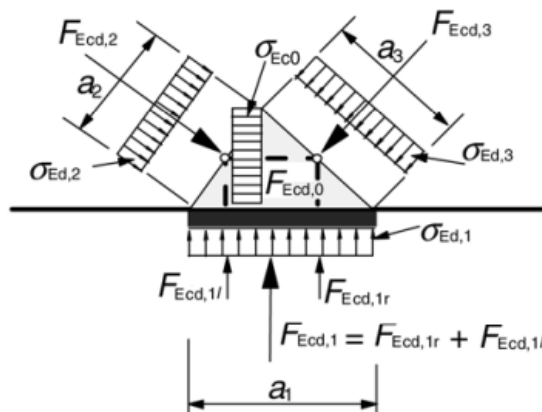
Täysin tarkat laskelmat jännityspinta-aloista on luonnollisesti mahdotonta laskea käsin, joten avuksi on otettava tietokoneohjelmat etenkin suuremmissa paaluanturoissa ja laatoissa. Tässäkin työssä esitetyt kaavat solmupinta-alojen laskemiseen on yksinkertaistettuja malleja, jotta laskenta voitaisiin tehdä pienemmällä työmäärällä. [Laakso 2020: 14–15.]

6.3.1 Solmutyypit

Solmutyypit jakautuvat niihin liittyvien voimien mukaisesti. Solmuihin voi liittyä puristavia ja vetäviä voimia. C tulee sanasta ”*compression*” ja T sanasta ”*tension*”. Eurokoodi tuntee neljä erityyppistä ristikkomenetelmän solmua, joita ovat:

- CCC-solmu
- CTT-solmu
- CCT-solmu
- TTT-solmu

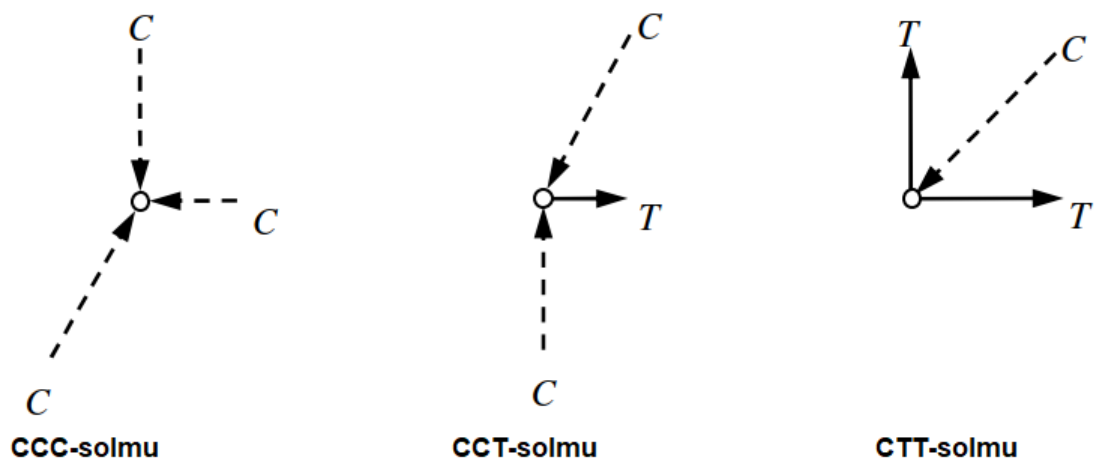
CCC-solmussa (kuva 15) vaikuttaa ainoastaan puristusjännitys, jossa puristusjännitys tulee solmuun sen kaikista suunnista. Ristikkomenetelmän mukaisessa mitoittamisessa kyseistä solmutyyppiä käytetään esimerkiksi paaluanturan yläpään solmuna, missä kuorma liittyy anturaan.



Kuva 15. CCC-solmu. [SFS-EN 1992-1-1: 108.]

CCC-solmu on paaluanturan tapauksessa usein kriittinen solmu, sillä todellisuudessa esimerkiksi 5-paalun paaluanturan tapauksessa siihen liittyy 6 puristavaa voimaa. [Chantelot & Mathern 2010: 64.]

CTT ja CCT-solmut (kuva 16) ovat yhdistelmäsolmuja, joihin liittyy siis sekä puristus- ja vetosauvoja. Usein näitä solmutyyppejä tavataan seinämäisten palkkien ja paaluanturoiden alapintojen solmupisteissä. TTT-solmut ovat harvinaisempia ja niitä ei esiinny tavanomaisessa rakentamisessa.



Kuva 16. Yleisimmät solmutyypit. [Chantelot & Mathern 2010: 71.]

Solmut nimetään ja esitetään usein tasokuvauksena. Todellisuudessa esimerkiksi neljän paalun paaluanturan nurkkasolmussa siihen liittyy 2 vetävää ja 2 puristavaa voimaa. Tällainen solmu on todellisuudessa "2C2T" -solmu. Chantelot & Mathern onkin maisterityössään laajentanut solmupisteiden nimeämisen käsitteä niin, että niiden nimeämisessä otetaan huomioon kaikki solmupisteiden voimat. [Chantelot & Mathern 2010: 61–62.]

7 Paaluanturoiden mitoittaminen

Tässä luvussa käsitellään eri mitoitusmenetelmiä. Varsinkin isommissa hankkeissa, jossa paalukuormat ovat suuria ja suunnittelijat ovat päätyneet paalulaattojen käyttöön, tietokoneavusteisen mitoittamisen tärkeys korostuu. Pienemmissä hankkeissa, tavanomaisia paaluanturoita käytettäessä, vakiopaaluanturoita voidaan hyödyntää mitoituksessa.

Paaluanturoiden mitoittamistavoille ei aina ole ollut yhtenäistä menetelmää ja aikaisemmin ne on mitoitettu taivutusteoriaan perustuen. Nykyään paaluanturat mitoitetaan usein ristikkomenetelmään perustuen, eurokoodin kuitenkin salliessa myös taivutusteoriaan perustuvan mitoitusmenetelmän käytön.

7.1 Tietokoneavusteinen mitoittaminen

Monimutkaisia rakenteita on tavattu tutkia nk. "FEM" -laskennalla. Laskennassa rakenteet pilkotaan pieniksi palasiksi, joita kutsutaan elementeiksi. Laskennan tarkoituksena on mitoittaa monimutkaiset rakenteet turvallisesti. Ne voidaan myös optimoida siten, että rakentaminen olisi mahdollisimman kustannustehokasta.

FEM-laskenta voi olla epälineaarista tai lineaarista. Lineaariset mallit ovat nopeampia suorittaa, mutta laskenta ei ota huomioon siirtymiä. Epälineaarisisessa laskennassa materiaalin myötölujuuden ylittyessä sen jäykkyys muuttuu, toisinkuin lineaarisessa laskennassa. Voidaankin sanoa, että epälineaarisisessa laskennassa laskenta on suoritettava iteratiivisesti. [Pieksamä 2019: 17.]

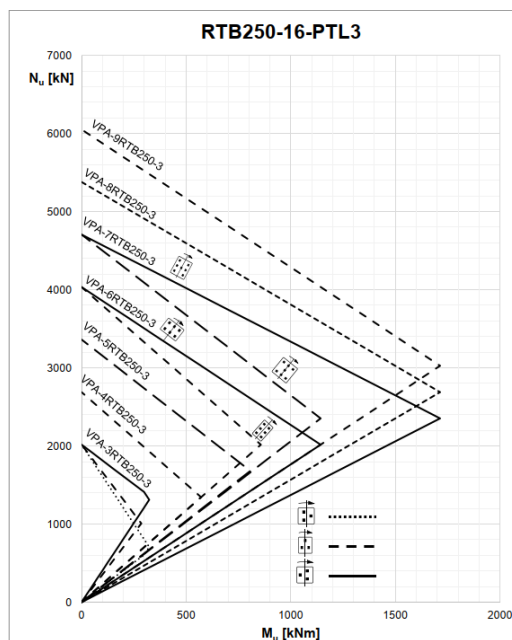
Ongelmaksi paaluanturoiden mitoittamisessa FEM-ohjelmilla on muodostunut se, että kaikissa ohjelmissa ei ole siihen soveltuvaa lisäosaa. Paaluanturoita mitoitettaessa FEM-ohjelmilla ohjelmien tulee olla kehittyneitä ja niiden tulee olla soveltuvia laskemaan epälineaarisia jännityksiä kolmiulotteisissa malleissa. [Laakso 2020: 19.]

Kaikki FEM-ohjelmat eivät sisällä lisäosaa paaluanturoiden mitoittamiseen, mutta niillä voidaan arvioida esimerkiksi paaluanturan jäykkyyttä ja paaluhattuja käytettäessä paaluhattun yläpuolisia jännityksiä. [Lehtonen 2018: 26.]

7.2 Vakiopaaluanturat

Vakiopaaluanturat ovat luotu helpottamaan paaluanturan valintaa eri paaluanturoille luotujen yhteisvaikutuskuvaajien avulla. Ohjeet ovat luotu 2...9:n paalun paaluanturoille ja paalujen halkaisijoille 250 mm, 300 mm ja 350 mm. Mitoituksessa on käytetty ristikkomenetelmää ja tarkasteluja on tehty solmupisteisiin, betonin vinoon puristuskapasiteettiin ja vetosauvoihin. Yksittäisen paalun sijaintitoleranssina on käytetty arvoa ± 100 mm. [Betoniteollisuus 2021: 2.]

Vakiopaaluanturat ovat luotu tiettyihin tapauksiin, joiden vaatimukset ovat esitetty luvussa 4.1. Suunnittelijan ohjeissa on valintakäyrät, joista valitaan sopivat paaluanturat kohteeseen kuormalaskennan perusteena. Paaluanturoille tulevat voimasuureet ovat laskettu murtorajatilassa osavarmuuslukuja käyttäen.



Kuva 17. Paalutustyöluokan 3, 250 mm halkaisijalla varustetun paalun paaluanturan valintakuvaaja, jossa x-akselilla on momenttikestävyys ja y-akselilla normaalivoimakestävyys. [Betoniteollisuus 2021: 10.]

Yhteisvaikutuskuvaajassa käyrät kuvastavat eri vakiopaaluanturoiden kuorman-
kantokykyä. Mikäli vakiopaaluanturan tulisi kestää 3000 kN kuorma ja 1000
kNm momentti, loogiseksi valinnaksi tulisi VPA-7RTB250-3, sillä kuvaajalle piir-
retty piste jäisi em. vakiopaaluanturan yhteisvaikutuskäyrän sisäpuolelle. Näillä
kriteereillä valinta olisi paras myös taloudellisesti. Yhteisvaikutuskuvaajista
(kuva 17) on huomioitavaa myös se, että ne on laskettu käyttäen 85 % paalujen
suurimmasta kuormakapasiteetista. Paalujen sijaintipoikkeamat ovat otettu huo-
mioon alennetussa kuormakapasiteetissa. Paalujen sijaintien ollessa hyvinkin
poikkeavia, tulisi ristikkomalli tehdä todellisten sijaintien mukaisesti saadakseen
todenmukaisempia tuloksia. [Betoniteollisuus 2021: 7.]

8 Paaluanturoiden mitoittaminen ristikkomenetelmällä

Tässä luvussa esitetään paaluanturoiden laskentaprosessi eurokoodin mukaan.
Paaluanturoita mitoittaessa tarkastetaan:

- Betonin puristuskapasiteetti
- Raudoituksen vetokapasiteetti
- Solmupisteiden jännitykset
- Veto- ja puristussauvojen voimat
- Vetovoimien ankkurointi
- Käyttörajatilamitoituksen mukainen halkeamaleveys.

Täysin tarkkoja paalukuormia on hankala laskea silloin, kun paalumäärä kasvaa
kahdesta paalusta ylöspäin. Kahden paalun paaluanturan tapaus on staattisesti
määrätty rakenne ja tätä suuremmilla paalulukumäärillä varustetut paaluanturat
staattisesti määräämättömiä rakenteita. Paalujen tukireaktioita ei siis teoriassa
kyettäisi helpoin keinoin ratkaisemaan, mutta paalukuormien jakautumiselle teh-
dään yksinkertaistaminen, joka on esitetty alempana. [Petri 2012: 23.].

Paalukuorman ratkaisemiseen käytetään yksinkertaistettua mallia, joka perus-
tuu paalujen symmetriseen asetteluun, jossa kuorman epäkeskisyydet voidaan
ottaa huomioon. Anturan voimat jakautuvat kolmiulotteisesti, mutta ne voidaan
ratkaista käyttäen tasoprojektiomallia.

Mikäli epäkeskisyyttä ei otettaisi huomioon, paaluanturalle tuleva kuorma jaettaisiin ainoastaan paalujen lukumäärällä. Paaluanturalle tuleva kuorma jaetaan paalujen lukumäärällä, jossa huomioidaan kuorman epäkeskinen sijainti. Viiden paalun paaluanturan paalukuorma voidaan ratkaista kaavasta (1).

$$F_p = \frac{\left(\frac{N_{ed}}{s_p} * \left(\frac{s_p}{\sqrt{5}} - e \right) \right)}{\sqrt{5}} \quad (1)$$

Missä

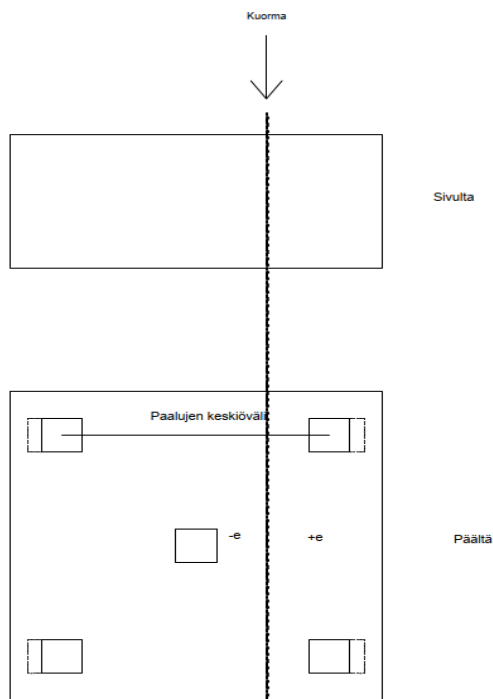
F_p on paalukuorma

N_{ed} on puristava voima

s_p on paalujen keskiöväli

e on epäkeskisyyden

Kaava (1) ottaa huomioon epäkeskisyyden paaluanturan toiselle puolelle. Vastaavasti toisen puolen tukireaktiot lasketaan samalla kaavalla (1), nyt epäkeskisyyden kaavaan lisäten. Kuvassa (18) on havainnollistettu tilannetta.



Kuva 18. Epäkeskeisen kuorman huomioiminen paaluanturan mitoituksessa. Kirjoittajan muokkaama kuva.

Vetosauvan voiman laskentaan voidaan käyttää eurokoodin kaavasta 6.5.9 johdettua kaavaa (kaava 2). Mikäli kaavan termille h_c annetaan arvo 0, vastaa kaavasta saatu voima pistekuormaa. Kaava soveltuu käytettäväksi silloin, kun kyseessä on muuttuva jännityskenttä (D-alueilla). Kertoimen k -arvot on esitetty kuvassa (19). [Petri 2012: 29.]

$$N_s = k * \frac{s_p}{d} * \left(1 - \frac{h_c}{2 * s_p}\right) * N_d \quad (2)$$

Missä

N_s on raudoituksen vetovoima

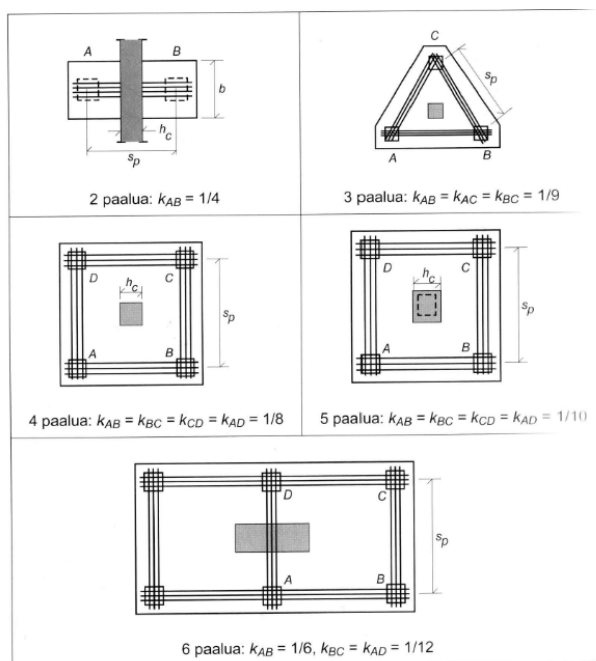
k jännityskentän leveys

s_p on paaluväli

d on tehollinen korkeus

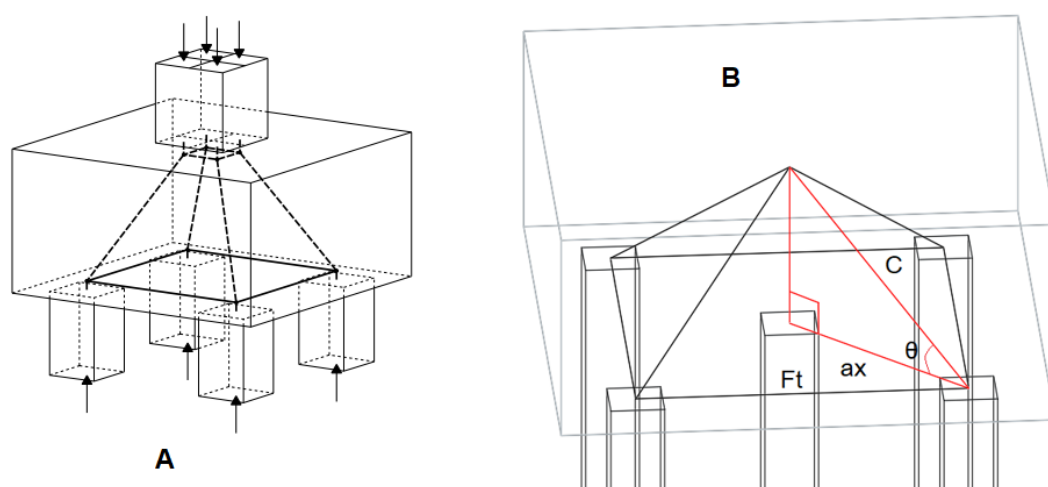
h_c on kuorman sivumitta

N_d on kuormittava voima



Kuva 19. Kuvassa on esitetty arvot k -kertoimen valintaan eri paaluanturoille [Leskelä 2008: 456.]

Ristikkomenetelmässä avaruusristikon puristus- ja vetosauvan kulman suuruus vaikuttaa oleellisesti sen ominaisuuksiin. Puristussauvan kulmat ovat yleensä $45\text{--}60^\circ$. Alhaisemmat kulmat ($> 45^\circ$) aiheuttavat ongelmia rakenteessa, kun sen korkeus pienenee ja mitoittavaksi tekijäksi voi tulla leikkauskestävyys. Alhaisemmillä kulmilla rakenne ei välttämättä myöskään toimisi D-alueen tavoin ja ristikkomenetelmällä tehdyt laskennat eivät kuvaisi rakenteen voimien kulkua realistisimmin. Korkeammat kulmat ($> 60^\circ$) sen sijaan tekevät rakenteesta jo hyvin paksun. Puristussauvan kaltevuus voidaan ratkaista tasapainoyhtälön avulla. [Petri 2012: 27; Leskelä 2008: 455.]



Kuva 20. Ristikkomallit kuormakeskiön mukaan. Kirjoittajan muokkaama kuva (B). [Chantelot & Mathern 2010: 3.]

Ristikkomallin yläpää voidaan jakaa kuormituksen perusteella osapinta-aloihin, tai ristikkomalli voidaan luoda kuorman keskipisteen ympäri (Kuva 20). Valinta vaikuttaa puristussauvan kaltevuuteen. Puristussauvan kulmaa ratkaistaessa tulee tietää yhden sivun pituus. Paaluanturan sisään muodostuneen avaruusristikon alimman sivun pituus voidaan ratkaista Pythagoran lausetta soveltaen kaavoista (3 ja 4).

$$a_{x,y} = \left(\left(\frac{s_{px}}{2} \right)^2 + \left(\frac{s_{py}}{2} \right)^2 \right)^{0,5} \quad (3)$$

$$a_{x,y} = \left(\left(\left(\frac{s_{px}}{2} \right)^2 + \left(\frac{s_{py}}{2} \right)^2 \right)^{0,5} \right) - z \quad (4)$$

Missä

$a_{x,y}$ on avaruusristikon alimpien sivujen pituudet

s_{px} ja s_{py} ovat paalujen keskiöetäisyydet suunnissa x- ja y

z on kuormapinnan neljäsosan vinohalkaisija

Paalujen sijaintipoikkeama ja kuorman epäkeskisyys voidaan huomioida kaavassa (3 ja 4) lisäämällä ne keskiövälin pituuteen. Laskenta vastaavasti, kuten kaavassa (1). Puristussauvan kulma voidaan nyt ratkaista kaavasta (4). Ristikomallin tehollista korkeutta määritettäessä tulee miettiä, määritetäänkö korkeus anturan yläpinnasta vai kuorman alapuolelle muodostuvasta solmusta.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d}{a_{x,y}} \right) \quad (5)$$

Missä

d on pääraudoituksen etäisyys yläsolmusta tai anturan pinnasta

Puristussauvassa vallitseva voima voidaan ratkaista trigonometrian avulla, kun tiedetään puristussauvan kulma ja paalun tukireaktio. Laskentaan käytetään kaavaa (6).

$$C = \frac{F_p}{\sin(\theta)} \quad (6)$$

Missä

C on puristussauvan voima

F_p on paalun tukireaktio

θ on puristus- ja vetosauvan välinen kulma

8.1 Solmupisteiden mitoittaminen kaksiulotteisesti

Tässä luvussa tarkastellaan paaluanturan kannalta keskeisiä solmupisteitä. Tarkastelu tehdään CCT- ja CCC-solmuille kaksiulotteisesti. CCC-solmut voidaan jakaa kahteen eri tapaukseen, joita ovat kolmio- ja puolisuunnikkasolmu. Tässä luvussa esitellään molemmat tapaukset.

Betonisten puristuskaistojen mitoituslujuutena käytetään lujuutta f_{cd} , silloin, kun poikittaista puristusjännitystä ei esiinny puristuskaistassa. Mikäli puristuskaistaan liittyy poikittaisia vetovoimia, mitoituslujuutta pienennetään kaavan (7) mukaisesti.

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6 * v' * f_{cd} \quad (7)$$

Missä

$\sigma_{Rd,max}$ on suurin sallittu puristussauvan jännitys poikittaiselle vedolle

v' on materiaalikerroin, joka huomioi betonin ominaislujuuden

f_{cd} on betonin mitoituslujuus

Ohjeissa ja standardeissa solmupisteiden mitoitus esitetään usein kaksiulotteisesti. Solmupistetarkastelussa määritetään solmualueen pinta-ala ja sitä rasittava voima. Vallitseva jännitys solmupisteessä on oltava pienempi kuin solmupisteen suurin sallittu jännitys. Eurokoodi antaa kaavat solmupisteiden kestävyyksille tapauskohtaisesti, jotka on esitetty alla. [SFS-EN 1992-1-1: 106.]

$$\sigma_{Rd,max} = k_1 * v' * f_{cd} \quad (8)$$

$$\sigma_{Rd,max} = k_2 * v' * f_{cd} \quad (9)$$

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 * v' * f_{cd} \quad (10)$$

$$\sigma_{Rd,max} = k_4 * v' * f_{cd} \quad (11)$$

$$v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (12)$$

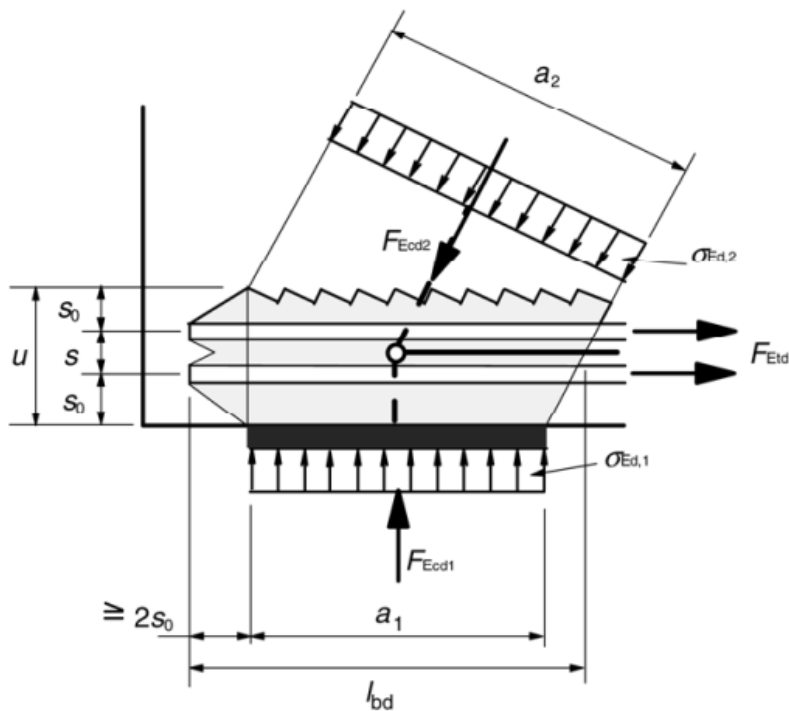
Missä

$\sigma_{Rd,max}$ on suurin sallittu solmujännitys

$k_{1...4}$ on kansallisessa liitteessä määrätty kuormakerroin

f_{ck} on betonin ominaislujuus ilman materiaalikohtaisia osavarmuuskertoimia

Kerroin k_1 on käytössä puristussolmuissa, joihin ei ankkuroidu lainkaan vetosauvoja. Kerrointa k_2 (kuva 21) käytetään tapauksessa, jossa solmuun liittyy puristussauvoja ja joihin ankkuroituu yhdessä suunnassa vetosauvoja. Kerrointa k_3 käytetään silloin, kun solmuun liittyy puristava voima ja kahden suunnan vektoroiditus ja kerrointa k_4 silloin, kun puristus on kolmen akselin suunnassa. Käytännössä paaluanturoissa CCC-solmujen kestävydet mitoitetaan kertoimen k_4 mukaan. Eurokoodin suositusarvot k-kertoimille ovat $k_1 = 1,0$, $k_2 = 0,85$, $k_3 = 0,75$ ja $k_4 = 3,0$. Arvot voidaan esittää myös kansallisissa liitteissä maakohtaisesti. [SFS-EN 1992-1-1: 109.]



Kuva 21. CCT-solmu eurokoodin mukaan. [SFS-EN 1992-1-1: 108.]

Kaksiulotteisesti mallinnettaessa jännitysten suuruutta solmupisteissä, voidaan CCT-solmua käyttää paaluanturan tapauksessa alaselmuna. CCT-solmun (kuva 21) jännitys voidaan laskea kaavasta (11). [Leskelä 2008: 440.]

$$\sigma_{Ed,2} = \frac{F_{Ed,2}}{(a_1 \sin(\theta) + u \cos(\theta)) \cdot h_p} \quad (13)$$

Missä

$\sigma_{Ed,2}$ on jännitys solmun vieressä

$F_{Ed,2}$ on puristusvoima

a_1 on tukialueen leveys

θ on puristus- ja vetosauvan välinen kulma

u on vetosauvojen leveys

h_p on paalun halkaisija

Päävetoraudoituksen ankkurointi tapahtuu solmussa. Ankkurointi mitoitetaan eurokoodin mukaisesti ja se on esitetty tämän työn esimerkkilaskelmassa. Vetosauvojen korkeus u voidaan määrittää tapauskohtaisesti kaavoista 14–16. [Leskelä 2008: 439.]

$$u = 0 \quad (14)$$

$$u = 2c \quad (15)$$

$$u = 2c + (n - 1)s \quad (16)$$

Missä

u on vetosauvan korkeus

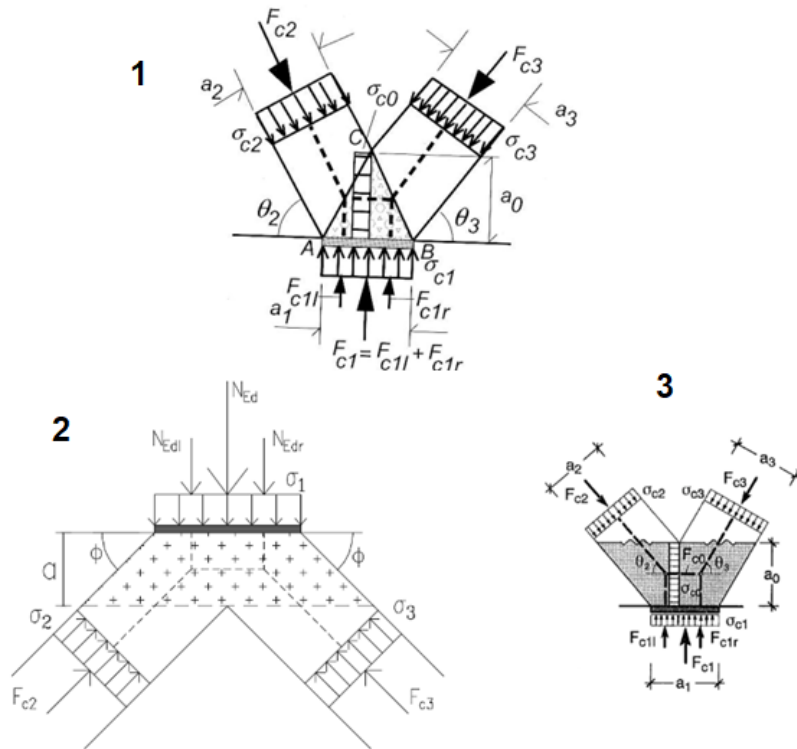
c on yleensä betonipeitteen leveys anturan pinnasta raudoitukseen

n on raudoituserrosten määrä

s on tankoväli pystysuunnassa

Kaava 14 pätee silloin, kun yhdessä kerroksessa oleva rauditus ei ankkuroidu solmualueen taakse. Vastaavasti kaava 15 pätee silloin, kun rauditus ankkuroituu vähintään mitan " $2c$ " verran solmun taakse. Mikäli rauditus on useammassa kerroksessa, käytetään kaavaa 16. [Leskelä 2008: 439.]

CCC-solmussa solmupiste voi olla hydrostaattinen tai ei-hydrostaattinen. Solmussa, missä kuormasta aiheutuva jännitysalue on kolmionmuotoinen, ja missä solmujen sivut ovat valittu kohtisuoraksi voiman suuntaan nähden, on tasojännitystila hydrostaattista muistuttava. Tällaisessa solmussa puristussauvojen kulmat ovat 45-astetta ja tällöin solmussa ei esiinny leikkausjännitystä. Ristikkomallin kehityksen alkuaikoina em. solmuja on käytetty runsaasti. On kuitenkin huomattu, että niiden käyttö voi johtaa epärealistisiin dimensioihin. [Lehtonen 2018: 42.]



Kuva 22. Hydrostaattinen "kolmiosolmu" (1) ja ei-hydrostaattiset puolisuunnikasolmut (2 ja 3) [Leskelä 2008: 438; Schlaich ym. 1999.]

Mikäli pääjännitykset ovat ainoastaan puristavia (hydrostaattisen solmun tapauksessa) on jännitystarkastelussa kriittisin jännitys σ_{c1} (kuva 22), jolla tarkoitetaan tukipainejännitystä. Tällöin pelkän tukipainejännityksen tarkastaminen riittää. Tukipainejännityksen tarkastus riittää myös silloin, kun solmukorkeus a_0 on suurempi kuin solmun korkeus hydrostaattisessa jännitystilassa. Hydrostaattisen solmun korkeus a_{0h} on puolet kuorman leveydestä a_1 . Hydrostaattisen solmun tukipainejännitys voidaan laskea kaavasta (17). [Leskelä 2008: 439.]

$$\sigma_{c1} = \frac{N_{Ed}}{(a_1 * b_1)} \quad (17)$$

Missä

σ_{c1} on kuormasta aiheutuva jännityspinta

N_{Ed} on puristavan voiman mitoitusarvo

a_1 on kuormitetun pinnan leveys

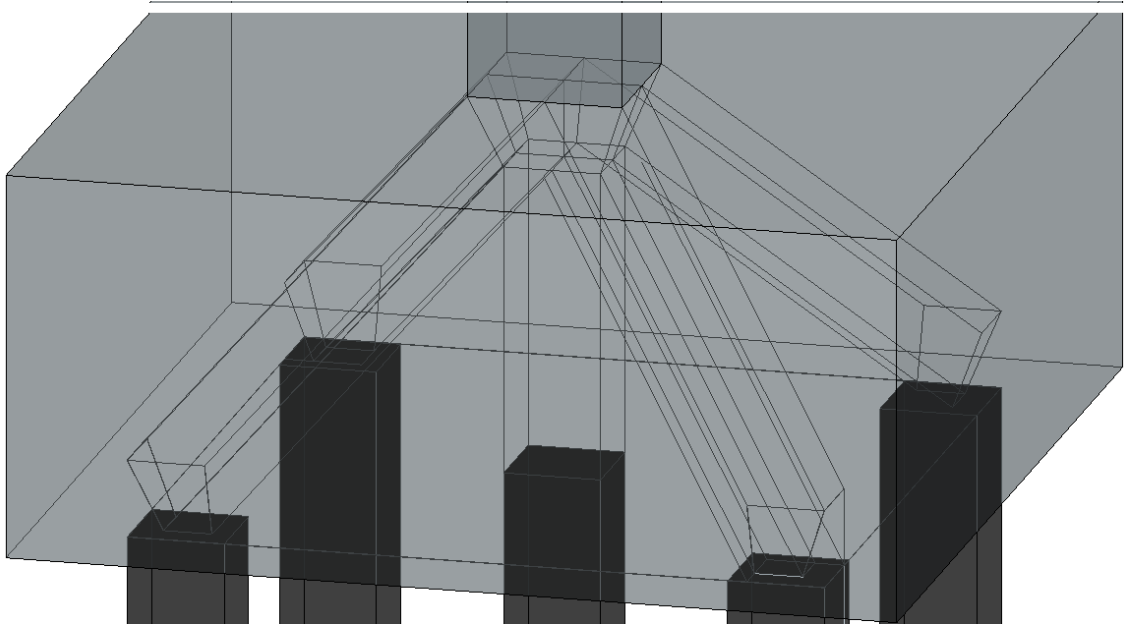
b_1 on kuormitetun pinnan leveys

Puolisuunnikassolmut voidaan jakaa kahteen alasolmuun ja niitä yhdistävään puristussauvaan. Puolisuunnikassolmua voidaan käyttää tapauksessa, jossa siihen liittyy viisi puristavaa voimaa, joista neljä on sauvavoimia ja yksi on tukipaine. Edellä mainittu tilanne voisi olla esimerkiksi neljän paalun paaluanturassa, kuorman alla. Solmu jaetaan kolmeen kolmioon, missä suurin jännitys on keskellä ja jännitysten tarkastaminen tapahtuu vastaavasti kuten kolmiosolmussa. [Leskelä 2008: 439.]

Timo Petri on ottanut opinnäytetyössään kantaa puolisuunnikassolmujen mitoittamiseen todeten, että varsinkin suuria pilareita käytettäessä puolisuunnikassolmu voisi olla todenmukaisempi tapa mallintaa yläsolmun jännitystä. On kuitenkin huomattava, että eurokoodi ei tunne puolisuunnikassolmua. [Petri 2012: 49.]

8.2 Solmupisteiden mitoittaminen kolmiulotteisesti

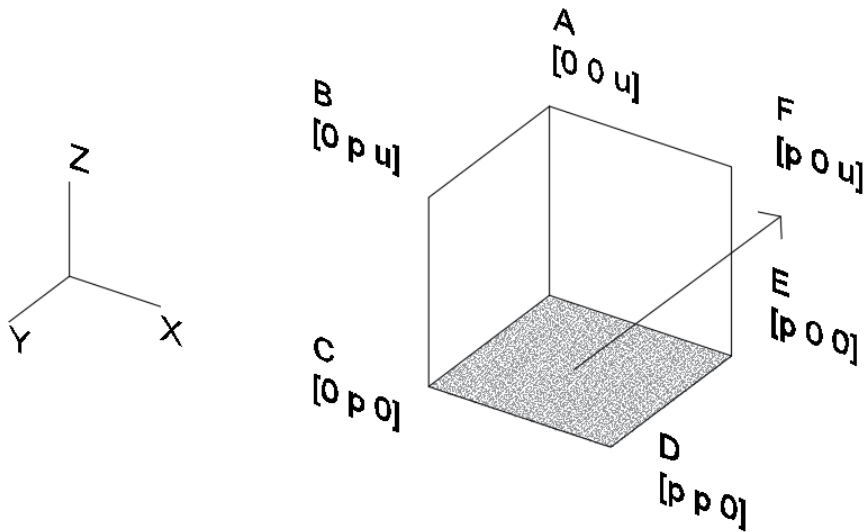
Oleellinen ero 2D- ja 3D-mitoitustapojen välillä on se, että jäljempänä mainitussa huomioon otetaan voimien suuntakulmat niiden kaikissa suunnissa. Paaluanturaa on mielekäästä tutkia kolmiulotteisesti sen kuutiomaisen muodon vuoksi. Vertailun vuoksi, seinärakenne on usein kapeahko sen korkeuteen nähden, joten kaksiulotteinen tarkastelu seinässä voi riittää. Kuvassa (23) on esitetty kolmiulotteinen tarkastelutapa.



Kuva 23. Kuormasta aiheutuvat puristusdiagonaalit. Kirjoittajan muokkaama kuva. [Chantelot & Mathern 2010.]

Tarkastelussa on tarkoitus määrittää diagonaalisauvan voimaa vastaan kohtisuorassa oleva solmun tasopinta-ala voiman todellinen suunta huomioiden. Tätä varten, aluksi määritetään kolmiulotteinen suuntavektori paalun keskipisteestä kuorman keskipisteeseen. Useissa tapauksissa, puristussauvan (kuva 23) ajatellaan olevan heksagonin eli kuusiokulman muotoinen.

Kuvassa (24) on esitetty puristussauvan voimaa vastaan kohtisuorassa oleva solmupinta-ala (2C2T-solmu). Nuoli kuvastaa suuntavektoria ja pisteet A-F ovat kuusiokulman nurkkapisteitä. Nurkkapisteiden sijainnit ovat esitetty vektorimuodossa, missä p tarkoittaa paalun halkaisijaa ja u (kaavat 14–16) vetosauvojen korkeutta. [Chantelot & Mathern 2010: 172.]



Kuva 24. Puristusdiagonaalin muodostama solmupinta-ala, missä harmaa-alue kuvastaa paalun pinta-alaa. Kirjoittajan muokkaama kuva. [Chantelot & Mathern 2010.]

Puristussauvan suuntavektori voidaan määrittää, kun tiedetään puristusdiagonaalin xy - ja xz -akselien väliset suuntakulmat. Suuntavektori määritetään kaavalla (18).

$$v = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{xy}) \cdot \cos(\theta_{xz}) & \cos(\theta_{xy}) \cdot \sin(\theta_{xz}) & \sin(\theta_{xy}) \end{pmatrix} \quad (18)$$

Missä

v on suuntavektori paalun keskipisteestä kuorman keskipisteeseen

θ_{xy} on x - ja z -akselien välinen suuntakulma

θ_{xz} on x - ja y -akselien välinen suuntakulma

Laskenta jatkuu kuusiokulman pinta-alan määrittämisellä. Ensiksi tulee määrittää kuusiokulman sivujen pituudet. Sivujen pituudet voidaan ratkaista matriisi- ja vektorilaskentaa soveltaen kaavalla (19). [Chantelot & Mathern 2010: 173.]

$$I_{AB} = \left((B - A) - ((B - A) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \quad (19)$$

Missä

A ja B ovat pisteitä avaruudessa $[x\ y\ z]$

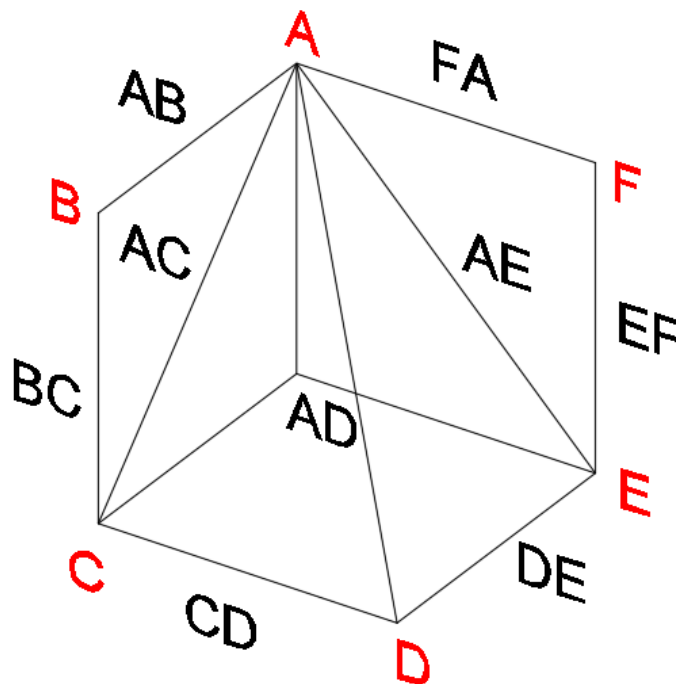
v on suuntavektori paalun keskipisteestä kuorman keskipisteeseen

T on transpoosi

Kaavasta (19) saadut arvot sijoitetaan vielä kaavaan (20). Kaava antaa käytännössä ulos kuusiokulman sivun "AB" pituuden avaruudessa. Sivun "AB" pituus voidaan ratkaista kaavalla (20).

$$|I_{AB}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (20)$$

Yllä olevat kaavat (18–20) käydään läpi kaikille kuusiokulman sivuille (kuva 25). Sivujen pituuksien määrittämisen jälkeen, voidaan sivujen väliin jäävät pinta-alat laskea esimerkiksi Heronin kaavaa hyödyntäen. Heronin kaavalla voidaan laskea minkä tahansa kolmion pinta-ala, kun sen sivujen pituudet tiedetään.



Kuva 25. Sivujen pituuksien määräytyminen. Kirjoittajan muokkaama kuva.

$$A_{ABC} = \frac{1}{4} \sqrt{(I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{AC}^2)^2 - 2(I_{AB}^4 + I_{BC}^4 + I_{AC}^4)} \quad (21)$$

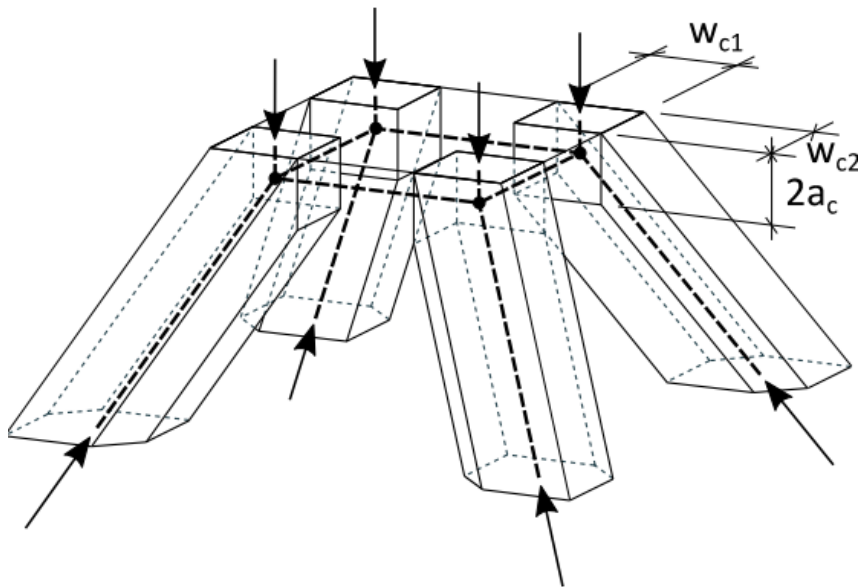
missä

A_{ABC} on kolmion ABC pinta-ala

I_{AB} , I_{BC} ja I_{AC} ovat sivujen pituudet

Puristussauvan muodostama lopullinen jännityspinta-ala saadaan, kun laske-
taan yhteen pinta-alat A_{ABC} , A_{ACD} , A_{ADE} ja A_{AEF} (Kuva 24) kaavaa (21) hyödyn-
täen. Käyttöaste solmulle lasketaan vertaamalla solmujännitystä sen kestävyys-
teen. Solmujen kestävyudet ovat esitetty luvussa 8.1.

Aikaisemmassa esimerkissä määritettiin puristusdiagonaalin poikkileikkauksen
muodostama solmupinta-ala alasolmulle. Yläpään solmun mitoitusprosessi olisi
vastaavanlainen, mutta paalun halkaisija korvattaisiin osakuorman pituuksilla
 W_{c1} ja W_{c2} . Solmun korkeus $2a_c$ määritettäisiin myös tapauskohtaisesti. Toisin
kuin edellä, yläsolmu on puhtaasti puristettu ja poikittainen veto on nyt poikit-
taista puristusta. [Mathern ym. 2017: 4.]



Kuva 26. Kuorman alapuolisten (puristusdiagonaalin yläsolmun) solmualueen mittojen määräytyminen. [Mathern ym. 2017: 4.]

9 Käyttörajatilatarkastelu paaluanturalle

Paaluanturoita on aikaisemmin mitoitettu käyttörajatilamitoitusta myöten taivutusteoriaan perustuen. Myöhemmin on kuitenkin katsottu, että jännitysten epälineaarista jakautumisesta johtuen, paaluanturoiden mitoittaminen ristikkomenetelmällä on todenmukaisempi tapa mitoittaa paaluanturat. Käyttörajatilamitoitus voidaan eurokoodin mukaan tehdä myös ristikkomenetelmään perustuen, mikäli puristussauvojen sijainti ja suunta asetetaan lineaarisen kimmoteorian mukaan. Eurokoodi ei kuitenkaan suoraan ohjeista sitä, miten halkeamaleveyden laskenta käyttörajatilassa ristikkomenetelmään perustuen, voidaan laskea. Suunnittelijan työkaluksi minimiraudoitusta laskiessa jääkin sovelletut ohjeet esimerkiksi palkin mitoituksesta. [SFS-EN-1992-1-1: 63.]

9.1 Halkeilu yleisesti

Betonissa halkeilu voi syntyä useista syistä. Halkeamia voi syntyä kuormituksen aiheuttamana, betonin tilavuuden muutoksista, pakkovoimista tai kovettumattomassa betonissa tapahtuvista muodonmuutoksista. Kaikki halkeamat eivät kuitenkaan ole haitallisia ja osa onkin vain lähinnä kosmeettisia hiushalkeamia.

Betonin puristusjäännitys tulee rajata käyttörajatilassa tiettyyn jännitykseen, jotta vältetään jännitysten suuntaiset halkeamat ja edelleen rakenteen muuttuminen epäkelvoksi. Raudoituksen jännityksen tulee pysyä kimmorajan alapuolella.

9.2 Halkeilun rajoittaminen

Halkeilun rajoittamiseen on eri keinoja. Laskennallinen keino halkeilun rajoittamiseen on käyttää minimiraudoitusta. Halkeilun rajoittaminen ilman suoraa laskentaa voidaan tehdä rajoittamalla raudoituksen tankokokoa ja tankojen halkaisijaa. Taulukot em. rajoitustoimenpiteille on esitetty eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 taulukoissa 7.2N ja 7.3N.

Halkeilua voidaan joutua rajoittamaan vetoalueilla. Vetorasitetussa betonissa, jossa halkeilua esiintyy, on oltava minimiraudoituksen mukainen raudoitusmäärä. Pääraudoituksen vähimmäisala voidaan laskea kaavasta (20).

$$A_{s,min} = \max \begin{cases} 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b_t * d \\ 0,0013 * b_t * d \end{cases} \quad (22)$$

missä

$A_{s,min}$ on vähimmäisraudoitusala

f_{ctm} on betonin keskimääräinen aksiaalinen vetolujuus

f_{yk} on betonin ominaislujuus

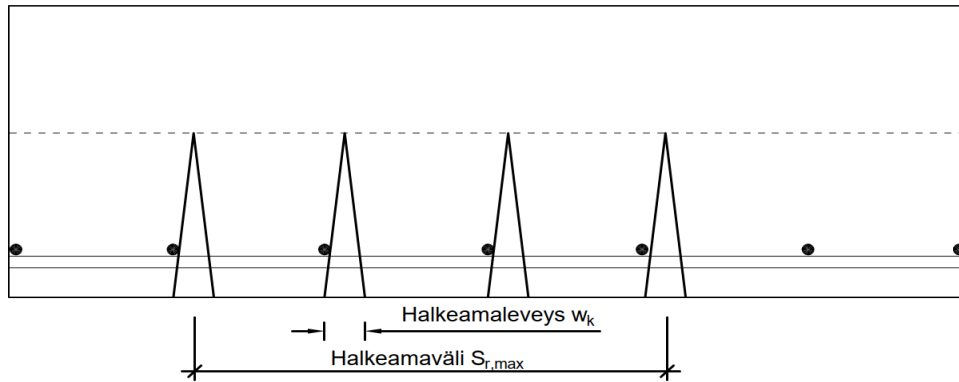
b_t vetopuolen keskimääräinen leveys; ratkaistaan tapauskohtaisesti

d on rakenteen tehollinen korkeus

Kaavan (22) arvo voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Ylempänä laskettu kaava on eurokoodissa määritetty palkeille. Eurokoodissa on myös esitetty paaluanturassa käytettäville raudoituksen päätangoille minimihalkaisijan, joka on 8 mm. Arvo voidaan määrittää kansallisessa liitteessä. [SFS-EN 1992-1-1: 160.]

9.3 Halkeamaleveyden laskenta

Paaluanturan halkeamaleveyden laskenta tehdään alueille, joissa on suurin vetorasitus. Suurin vetorasitus paaluanturoissa on sen alapinnoissa, solmujen välissä. Kuvassa (26) on esitetty halkeamaleveys w_k ja halkeamaväli $S_{r,max}$.



Kuva 26. Halkeamaleveyden ja halkeamavälin määräytyminen, missä katkoviiva esittää neutraaliakselin sijaintia. Kirjoittajan muokkaama kuva. [Leskelä 2008: 362.]

Tarkastelut voidaan tehdä halkeamattomina jännityksiä ja taipumia laskettaessa, jos vetojännitysten suuruus rajataan arvoon $f_{ct,eff}$. Paaluanturan käyttöraja-tilamitoituksessa tarkastellaan halkeamaleveyden muodostumista. Halkeamaleveyksiä laskettaessa vetolujuutena voidaan käyttää arvoa f_{ctm} . [Leskelä 2008: 317.]

Taulukko 4. w_{max} arvot. [SFS-EN 1992-1-1: 118; Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kansallinen liite betonirakenteista. Ympäristöministeriö 2019: 31.]

Rasitusluokka	Teräsbetonirakenteet ja tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet
	Pitkäaikainen kuormitusyhdistelmä	Tavallinen kuormitusyhdistelmä
X0, XC1	0,4 mm	0,2 mm
XC2, XC3, XC4, XD1, XS1	0,3 mm	0,2 mm
XD2, XD3, XS2, XS3	0,2 mm	Vetojännityksetön tila

Sallitut halkeamaleveysarvot on määritetty taulukossa 4. Halkeamaleveyden suuruus riippuu rasitusluokasta, kuormitusyhdistelmästä ja rakenteesta. Halkeaman ominaisleveys w_k määritetään eurokoodin mukaan kaavalla (21).

$$w_k = s_{r,max} * \Delta\varepsilon_{sm} \quad (23)$$

missä

w_k on halkeaman ominaisleveys

$s_{r,max}$ on suurin halkeamaväli

$\Delta\varepsilon_{sm}$ kuormituksesta aiheutuva keskimääräinen raudoituksen ja betonin venymäero halkeamien välissä

Tankovälin ollessa pienempi kuin $5(c+\varnothing/2)$, missä \varnothing on raudoituksen halkaisija ja c on betonin suojaetäisyys, laskenta voidaan tehdä kaavalla (24). Tankovälin ollessa em. kaavaa suurempi, Leskelä on kirjassaan (Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008) maininnut, että eurokoodin kaavaa $1,3(h-x)$ ei tule missään tapauksessa käyttää. Kaavan ongelma on se, että kaava ei ota huomioon muuttujia, mitkä todellisuudessa vaikuttavat halkeamavälin suuruuteen. [Leskelä 2008: 360.]

$$s_{r,max} = k_3c + k_1k_2k_4 \frac{\varnothing}{\rho_{s,eff}} \quad (24)$$

missä

$s_{r,max}$ on halkeamaväli

k_1 on luku, joka ottaa huomioon raudoituksen ankkurointiominaisuudet

k_2 on rasitustavan huomioon ottava luku

k_3 ja k_4 ovat kansallisessa liitteessä valittavia arvoja

\varnothing raudoitustankojen halkaisija silloin, kun käytetään samankokoisia tankoja

$\rho_{s,eff}$ on tehollisen raudoitus- ja betonialan suhde ($A_s/A_{c,eff}$)

c on betonin suojaetäisyys

Mikäli kaavan (24) mukaisessa poikkileikkauksessa on eri tankokokoja, on ekvivalentti halkaisija laskettava eurokoodin kaavalla (7.12). Venymäero lasketaan kaavalla (23). [SFS-EN 1992-1-1: 123.]

$$\Delta\varepsilon_{sm} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_s - k_t * \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{s,eff}} * (1 + \alpha_e * \rho_{s,eff})}{E_s} \\ 0,6 * \frac{\sigma_s}{E_s} \end{array} \right. \quad (25)$$

missä

σ_s on raudoituksen jännitys betonin halkeaman kohdalla

k_t on luku, joka ottaa huomioon kuormituksen keston

α_e on raudoituksen ja betonin keskimääräisen kimmokertoimen suhde

$f_{ct,eff}$ on betonin vetolujuus

E_s on raudoituksen kimmokerroin

Halkeamaleveys riippuu olennaisesti vetoalueen tehollisesta pinta-alasta. Tehollinen pinta-ala $A_{c,eff}$ lasketaan kaavalla (24). [SFS-EN 1992-1-1: 120.]

$$A_{c,eff} = h_{c,eff} * b_{eff} \quad (26)$$

Missä

$h_{c,eff}$ on betoniteräksiä ympäröivän alueen tehollinen korkeus

b_{eff} on betoniteräksiä ympäröivän alueen tehollinen leveys

Vetoalueen tehollisen pinta-alan arvot lasketaan kaavoista (27 ja 28). [SFS-EN 1992-1-1: 120; Lehtonen 2018: 64.]

$$h_{c,eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,5 * (h - d) \\ (h - x)/3 \\ h/2 \end{array} \right. \quad (27)$$

$$b_{c,eff} = b_j + 5 \left(c + \frac{\varnothing}{2} \right) \quad (28)$$

Missä

h on

d on rakenteen tehollinen korkeus

b_j on raudoituksen jakoalue

c on betonin suojaetäisyys

x on etäisyys neutraaliakselista

10 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli luoda 5-paalun paaluanturan laskentapohja yrityksen käyttöön ja tuoda esiin paaluanturan mitoitusta ristikkomenetelmään perustuen. Laskentapohja laadittiin aikaisempien SKOL-laskentapohjien pohjalta osittain. Työssä omaksuttiin 3D-menetelmä solmupisteiden mitoittamiselle. Laskentapohja mitoittaa 5-paalun paaluanturan ottaen huomioon pienet kuorman ja paalujen epäkeskisyydet ja luo laskentaportin. Laskentapohjaa ei luotu paalujen todellisten sijaintien perusteella, vaan ohjelmassa käytettiin määrättyjä sallittuja sijaintipoikkeamia. Sijaintipoikkeamien huomioiminen jätettiin jatkokehityksaiheeksi.

Haasteena tässä opinnäytetyössä oli selkeiden suunnitteluohjeiden puuttuminen ja yleisestikin se, että aihe oli teknisesti suhteellisen haastava. Tekninen haaste näkyi erityisesti siinä, että rakenteiden mitoittamisessa ei voitu käyttää tavanomaisia menetelmiä. Työssä omaksuttiin Chantelot & Mathernin (2010) esittämä 3D-menetelmä solmupistemitoittamiseen. Tämän työn esimerkkilaskelmassa, jossa mitoitettiin 5-paalun paaluantura, käytettiin em. menetelmää solmupistemitoittamiseen.

10.1 Jatkokehitys

Suurimpana jatkokehityksaihe-ehdotuksena on laskentapohjan laatiminen suuremmille paaluanturoille. Laskentapohja voitaisiin luoda siten, että paalumäärää voitaisiin vaihdella laskentapohjan sisällä. Laskentapohja voisi perustua koordinaatistoon, jossa rakennustyömaalta saadut paalujen tarkat sijainnit sijoitettaisiin laskentapohjan sisäiseen koordinaatistoon ja sijaintien pohjalta ohjelma lasiksi voimasuureet. Tarkkojen paalujen sijaintien perusteella voitaisiin nähdä, kykenisikö paaluantura toimimaan suunnitellulla tavalla, vai jouduttaisiinko tekemään muutoksia paaluanturan kokoon. Paalujen sijainnit ja solmupisteet (tai kuormapisteet) voisivat perustua omiin koordinaatistoihinsa.

Vaihtoehtoisesti laskentapohja voitaisiin luoda siten, että laskentapohja laskisi jokaiselle paalulle erikseen kaikki mahdolliset sijaintipoikkeamat ja näin ollen saataisiin kriittisimmät kuormat.

Haasteena laskentapohjan luomisessa on vähintään Excelin sisäisen koodikie-
len (VBA:n) osaaminen. Laskentapohjassa tulitaisiin tarvitsemaan luuppiraken-
teita, jotka käyvät läpi kaikki paalujen mahdolliset sijainnit. Omat haasteet las-
kentapohjan tekemiseen toisi 3D-solmupistemethodin käyttäminen solmujen
mitoittamisessa.

Paaluanturoille tulevat taivutusmomentit voivat olla tapauksittain hyvinkin suu-
ria. Tällöin pelkän epäkeskeisen puristuksen huomioiminen tavalla, joka esitet-
tiin tässäkin opinnäytetyössä, ei ole riittävä. Tapauksissa, joissa taivutusmo-
mentti olisi poikkeavan suuri, ristikkomalli tulee muodostaa niin, että siinä hu-
mioidaan anturaan ankkuroitava vetorasitus. Tämä on myös aihe, joka kaippa
jatkotutkimusta.

Tässä opinnäytetyössä omaksuttiin aiemmin mainittu 3D-menetelmä solmupis-
tejännitysten laskemiseen. Menetelmä on kuitenkin uusi ja suoria esimerkkilas-
kelmia ei juurikaan löytynyt, joten menetelmää tulisi vielä tutkia ja kehittää erilai-
siin tapauksiin. Em. menetelmä yhdistettynä laadukkaaseen FEM-laskentaan
tarjoaa varmasti tehokkaita tuloksia paaluanturoiden mitoittamiseen.

Lähteet

Betoniteollisuus. Vakiopaaluanturat suunnittelijan ohje. 2021. Verkkojulkaisu. <<https://www.betoni.com>>. Luettu 10.1.2022.

Gautier, Chantelot & Mathern Alexandre. 2010. Strut-and-tie modelling of reinforced concrete pile caps. Master's Thesis. Chalmers University of Technology. Researchgate publishing.

Koskimies, Joonas. 2014. Ristikkomenetelmä (Strut-and-tie modeling). Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Laakso, Juhan-Petteri. 2020. Paaluanturan mitoitus ristikkomenetelmällä käytössä paalumäärää 10...16. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Laitakari, Antti. 2015. Vakiopaaluperustusten laskenta. Verkkoaineisto. <<https://docplayer.fi/6260022-Vakiopaaluperustusten-laskenta-di-antti-laitakari.html>>. Luettu 1.2.2022

Lastunen, Auli. 2021. Eurokoodit – tarkoitus. Verkkoaineisto. <<https://www.eurocodes.fi/eurokoodit-tarkoitus/>>. Luettu 15.1.2022.

Lehtonen, Aleksi. 2018. Eurokoodin mukaisen laskentamenetelmän kehittäminen paaluanturan mitoitukseen. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulun yliopiston julkaisualusta Jultika.

Leskelä, Matti V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>>. Luettu 20.1.2022.

Mathern ym. 2017. Enhanced strut-and-tie model for reinforced concrete pile caps. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/328688004_Enhanced_strut-and-tie_model_for_reinforced_concrete_pile_caps>. Luettu: 1.3.2022.

Metwally, Mohamed Ibrahim. 2016. Design of Transfer Slabs Using Strut-and-Tie Model. Master's Thesis. Mansoura University. Researchgate publishing.

Nykyri, Pekka. 2014. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2, 2014. Tampere. Tammerprint Oy.

Petri, Timo. 2012. Eurokoodien tuomat muutokset paaluanturoiden mitoittamiseen. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampereen yliopiston julkaisualusta Trepo.

Romakkaniemi, Paula. 2019. Betonirakenteiden lävistysmitoitus. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Pieksemä, Mikko. 2019. Teräspaaluanturan solmupisteen jännitysten analysointi paalun ja anturan liitoksessa. Opinnäytetyö. Saimaan ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Rantamäki, Martti & Tammirinne, Markku. 2002. Pohjarakennus. Helsinki: Otatieto Oy.

RIL 207-2017. Geotekninen suunnittelu. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Grano Oy.

RIL 254-2016. Paalutusohje PO 2016. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Grano Oy.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön verkkosivut. <<https://ym.fi/rakentamismaaraykset>>. Luettu 20.1.2022.

SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-EN 1990. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-EN 12999:2015. Pohjarakennustyöt, maata syrjäyttävät paalut. Suomen Standardoimisliitto SFS.

Esimerkkilaskelma

5-paalun paaluantura

Lähtöarvot ja tiedot

Paalutyypä: RTB-300-16

Paalun pituus: 15m

Valittu betoni (paaluantura): C35/45

Rasitusluokka: XC2

$$h_p := 300 \text{ mm}$$

Paalun halkaisija

$$\phi_s := 25 \text{ mm}$$

Arvio pääraudoituksen halkaisijasta

Betoni

$$f_{ck} := 35 \frac{N}{mm^2} \quad f_{cd} := 19.83 \frac{N}{mm^2} \quad f_{ctm} := 3.2 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{ctk,0.005} := 2.2 \frac{N}{mm^2} \quad f_{cm} := 43 \frac{N}{mm^2} \quad f_{ctd} := 1.3 \frac{N}{mm^2}$$

Teräs

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad f_{yd} := \frac{f_{yk}}{1.15} = 435 \frac{N}{mm^2}$$

Kuormat

$$N_{ed} := 4100 \text{ kN}$$

$$M_{ed} := 300 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

MRT

$$N_{ek} := 3000 \text{ kN}$$

$$M_{ek} := 240 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

KRT

$$b_c := 450 \text{ mm}$$

$$h_c := 450 \text{ mm}$$

Kuormapinnat

Kuorman epäkeskisyyss

$$e_d := \frac{M_{ed}}{N_{ed}} = 73 \text{ mm}$$

Momentista aiheutuva epäkeskisyyss

$$e_{sall} := 100 \text{ mm}$$

Kuorman sijaintipoikkeama

$$e_{1d} := e_d + e_{sall} = 173 \text{ mm}$$

$$e_{1k} := e_{1d}$$

1. Valitaan anturalle alustavat dimensiot

Korkeus

$$h := 1100 \text{ mm}$$

Pituus

$$l := 2200 \text{ mm}$$

Leveys

$$b := 2200 \text{ mm}$$

$$c_1 := 35 \text{ mm}$$

$$c := 70 \text{ mm}$$

Raudoituksen suojaetäisyydet
(sivu- ja ala)

$$s_{px} := 3.3 \cdot h_p = 990 \text{ mm}$$

$$s_{py} := 3.3 \cdot h_p = 990 \text{ mm}$$

Minimi paalujen keskiöetäisyys
suuntaan x ja y

$$l_{1x,y} := \frac{(l - s_{px} - h_p)}{2} = 455 \text{ mm}$$

Toteutunut paalun reunaetäisyys anturan
reunasta

$$l_{min} := 0.5 \cdot h_p = 150 \text{ mm}$$

Minimi reunaetäisyys

$$l_{1x,y} > l_{min} \quad \text{OK}$$

$$d_p := h - c - \phi_s = 1005 \text{ mm}$$

Tehollinen korkeus

+

2. Lasketaan voimasuureet

$$F_{p1} := \frac{\left(\frac{N_{ed}}{s_{px}} \cdot \left(\frac{s_{pz}}{\sqrt{5}} + e_{1d} \right) \right)}{\sqrt{5}} = 1141 \text{ kN}$$

Tukireaktio 1

$$F_{p2} := \frac{\left(\frac{N_{ed}}{s_{px}} \cdot \left(\frac{s_{pz}}{\sqrt{5}} - e_{1d} \right) \right)}{\sqrt{5}} = 499 \text{ kN}$$

Tukireaktio 2

$$F_{p3} := \frac{N_{ed}}{5} = 820 \text{ kN}$$

Tukireaktio 3 (keskipaalu)

$$a_{x1} := \left(\left(\frac{s_{pz}}{2} - e_{1d} \right)^2 + \left(\frac{s_{py}}{2} \right)^2 \right)^{0.5} = 590 \text{ mm}$$

Diagonaalivoiman 1 alin sivu

$$a_{x2} := \left(\left(\frac{s_{pz}}{2} + e_{1d} \right)^2 + \left(\frac{s_{py}}{2} \right)^2 \right)^{0.5} = 832 \text{ mm}$$

Diagonaalivoiman 2 alin sivu

$$\theta_1 := \text{atan} \left(\frac{d_p}{a_{x1}} \right) = 60 \text{ deg}$$

$$\theta_2 := \text{atan} \left(\frac{d_p}{a_{x2}} \right) = 50 \text{ deg}$$

Puristussauvojen kulmat

$$\theta > 45 \text{ deg} \quad \text{OK}$$

$$\gamma_{12} := \text{atan} \left(\frac{\left(\frac{s_{py}}{2} \right)}{\left(\frac{s_{px}}{2} + e_{1d} \right)} \right) = 37 \text{ deg}$$

$$\gamma_{21} := \text{atan} \left(\frac{\left(\frac{s_{py}}{2} \right)}{\left(\frac{s_{px}}{2} - e_{1d} \right)} \right) = 57 \text{ deg}$$

$$C_1 := \frac{F_{p1}}{\sin(\theta_1)} = 1323 \text{ kN}$$

Puristusdiagonaalien voimat

$$C_2 := \frac{F_{p2}}{\sin(\theta_2)} = 648 \text{ kN}$$

Raudoituksen poikittaiset vetovoimat x- ja y-suuntiin

$$T_{1x} := \left(\frac{F_{p1}}{\tan(\theta_1)} \right) \cdot \cos(\gamma_{12}) = 538 \text{ kN}$$

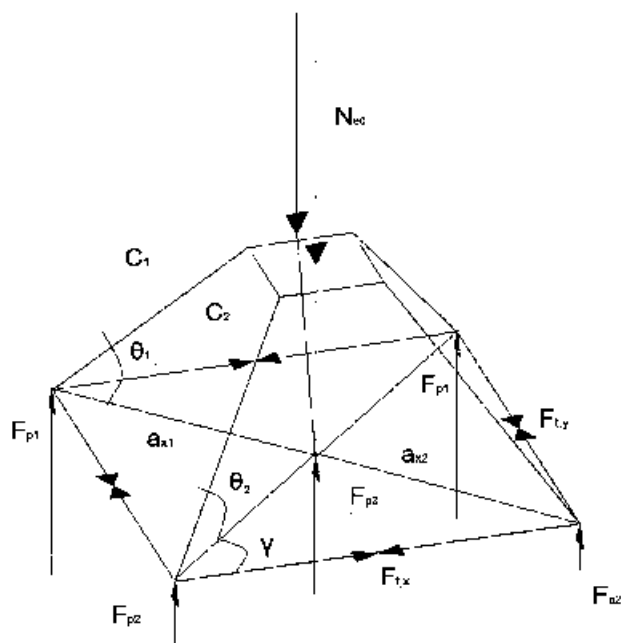
$$T_{2x} := \left(\frac{F_{p2}}{\tan(\theta_2)} \right) \cdot \cos(\gamma_{21}) = 225 \text{ kN}$$

$$T_{1y} := \left(\frac{F_{p1}}{\tan(\theta_1)} \right) \cdot \sin(\gamma_{12}) = 399 \text{ kN}$$

$$T_{2y} := \left(\frac{F_{p2}}{\tan(\theta_2)} \right) \cdot \sin(\gamma_{21}) = 346 \text{ kN}$$

$$F_{y.ed} := \max(T_{1y}, T_{2y}) = 399 \text{ kN}$$

$$F_{x.ed} := \max(T_{1x}, T_{2x}) = 538 \text{ kN}$$



3. Lasketaan pääraudoitus

$$A_{s,min} := \max \left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d_p, 0.0013 \cdot d_p \cdot b \right) = 3679 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,vaad,x} := \frac{F_{x,ed}}{f_{yd}} = 1239 \text{ mm}^2$$

Vaadittu raudoitusala

$$A_{s,vaad,y} := \frac{F_{y,ed}}{f_{yd}} = 918 \text{ mm}^2$$

$$n := 8$$

Tankojen kappalemäärä (arvio)

$$A_{sx} := n \cdot \pi \cdot \frac{(\phi_s)^2}{4} = 3927 \text{ mm}^2$$

$$A_{sy} := n \cdot \pi \cdot \frac{(\phi_s)^2}{4} = 3927 \text{ mm}^2$$

$$A_s > A_{s,\min} \quad \text{OK}$$

4. Lasketaan pääraudoituksen ankkurointitarve

Ankkurointitapa: taivutettu tanko

Tartuntaolosuhteet: hyvät

$$\alpha_1 := 1.0 \quad \alpha_2 := 1.0 \quad \alpha_3 := 1.0 \quad \alpha_4 := 1.0 \quad \alpha_5 := 1.0 \quad \eta_1 := 1.0 \quad \eta_2 := 1.0$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2.925 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{sd,x} := \frac{F_{x,ed}}{A_{sx}} = 137 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{sd,y} := \frac{F_{y,ed}}{A_{sy}} = 102 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{sd} := \max(\sigma_{sd,y}, \sigma_{sd,x}) = 137 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{Raudituksen jännitys}$$

$$l_{b,rqd} := \left(\frac{\phi_s}{4}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right) = 293 \text{ mm} \quad \text{Vaadittava ankkurointipituus}$$

$$l_{b,\min} := \max(0.3 \cdot l_{b,rqd}, 10 \cdot \phi_s, 100 \text{ mm}) = 250 \text{ mm}$$

$$l_{bd} := \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} = 293 \text{ mm} \quad \text{Toteutunut ankkurointipituus}$$

$$l_{bd} > l_{b,\min} \quad \text{OK}$$

5. Tarkastetaan solmupistejännitykset (3D)

Tarkastetaan 2C2T-solmu

$$d_h := 2 \cdot (50 \text{ mm} + \phi_s) = 150 \text{ mm}$$

Solmualueen korkeus

Suuntavektori

$$v := [\cos(\theta_1) \cdot \cos(\gamma_{12}) \quad \cos(\theta_1) \sin(\gamma_{12}) \quad \sin(\theta_1)] = [0.407 \quad 0.302 \quad 0.862]$$

$$A := [0 \quad 0 \quad d_h] = [0 \quad 0 \quad 150] \text{ mm}$$

$$B := [0 \quad h_p \quad d_h] = [0 \quad 300 \quad 150] \text{ mm}$$

$$C := [0 \quad h_p \quad 0] = [0 \quad 300 \quad 0] \text{ mm}$$

$$D := [h_p \quad h_p \quad 0] = [300 \quad 300 \quad 0] \text{ mm}$$

$$E := [h_p \quad 0 \quad 0] = [300 \quad 0 \quad 0] \text{ mm}$$

$$F := [h_p \quad 0 \quad d_h] = [300 \quad 0 \quad 150] \text{ mm}$$

Sivujen pituudet

$$I_{AB} := \left\| ((B-A) - ((B-A) \cdot v^T) \cdot v)^T \right\| = 286 \text{ mm}$$

$$I_{BC} := \left\| \left((C-B) - ((C-B) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 76 \text{ mm}$$

$$I_{CD} := \left\| \left((D-C) - ((D-C) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 274 \text{ mm}$$

$$I_{DE} := \left\| \left((E-D) - ((E-D) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 286 \text{ mm}$$

$$I_{EF} := \left\| \left((F-E) - ((F-E) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 76 \text{ mm}$$

$$I_{FA} := \left\| \left((A-F) - ((A-F) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 274 \text{ mm}$$

$$I_{AC} := \left\| \left((C-A) - ((C-A) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 333 \text{ mm}$$

$$I_{AD} := \left\| \left((D-A) - ((D-A) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 442 \text{ mm}$$

$$I_{AE} := \left\| \left((E-A) - ((E-A) \cdot v^T) \cdot v \right)^T \right\| = 335 \text{ mm}$$

Pinta-alat

$$ABC := \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{AC}^2)^2 - 2 \cdot (I_{AB}^4 + I_{BC}^4 + I_{AC}^4)} = 9158 \text{ mm}^2$$

$$ACD := \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(I_{AC}^2 + I_{CD}^2 + I_{AD}^2)^2 - 2 \cdot (I_{AC}^4 + I_{CD}^4 + I_{AD}^4)} = 45584 \text{ mm}^2$$

$$ADE := \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(I_{AD}^2 + I_{DE}^2 + I_{AE}^2)^2 - 2 \cdot (I_{AD}^4 + I_{DE}^4 + I_{AE}^4)} = 47958 \text{ mm}^2$$

$$AEF := \frac{1}{4} \cdot \sqrt{(I_{AE}^2 + I_{EF}^2 + I_{FA}^2)^2 - 2 \cdot (I_{AE}^4 + I_{EF}^4 + I_{FA}^4)} = 6784 \text{ mm}^2$$

$$S_1 := ABC + ACD + ADE + AEF = 109484 \text{ mm}^2$$

Solmujen kestävyudet

	CTT-solmulle	CCC-solmulle
$v' := 1 - \frac{35}{250} = 0.86$	$k_3 := 0.75$	$k_4 := 3.0$

$k_2 := 0.85$	CCT-solmulle
---------------	--------------

$$\sigma_{Rd,max2} := k_2 \cdot v' \cdot f_{cd} = 14.5 \frac{N}{mm^2}$$

CCT-solmun sallittu jännitys

$$\sigma_{Rd,max3} := k_3 \cdot v' \cdot f_{cd} = 12.79 \frac{N}{mm^2}$$

CTT-solmun sallittu jännitys

$$\sigma_{Rd,max4} := k_4 \cdot v' \cdot f_{cd} = 51.16 \frac{N}{mm^2}$$

CCC-solmun sallittu jännitys

Solmujen jännitykset +

$$\sigma_1 := \frac{C_1}{S_1} = 12.08 \frac{N}{mm^2}$$

2C2T-solmu

$$\sigma_1 < \sigma_{Rd,max3} \quad \text{OK}$$

Solmujännitys (2D)

$$\sigma_{E.cd1} := \frac{C_1}{(h_p \cdot \sin(\theta_1) + d_h \cdot \cos(\theta_1)) \cdot h_p} = 13.18 \frac{N}{mm^2}$$

CCT-solmun jännitys

$$\sigma_{E.cd1} < \sigma_{Rd,max2} \quad \text{OK}$$

$$\sigma_{3.tp} := \frac{N_{ed}}{b_c \cdot h_c} = 20.25 \frac{N}{mm^2}$$

Tukipaine kuorman alla

$$\sigma_{3.tp} < \sigma_{Rd,max4} \quad \text{OK}$$

$$\sigma_{1,tp} := \frac{\max(F_{p1}, F_{p2}, F_{p3})}{(h_p)^2} = 12.67 \frac{N}{mm^2}$$

Tukipaine paalun päällä

$$\sigma_{1,tp} < \sigma_{Rd,max3} \quad \mathbf{OK}$$

6. Tehdään käyttörajatilatarkastelu

$$F_{p1k} := \frac{\left(\frac{N_{ek}}{s_{pz}} \cdot \left(\frac{s_{pz}}{\sqrt{5}} + e_{1k} \right) \right)}{\sqrt{5}} = 835 \text{ kN}$$

Tukireaktiot, KRT

$$F_{p2k} := \frac{\left(\frac{N_{ek}}{s_{pz}} \cdot \left(\frac{s_{pz}}{\sqrt{5}} - e_{1k} \right) \right)}{\sqrt{5}} = 365 \text{ kN}$$

$$F_{p3k} := \frac{N_{ek}}{5} = 600 \text{ kN}$$

$$C_{1k} := \frac{F_{p1k}}{\sin(\theta_1)} = 968 \text{ kN}$$

Puristusdiagonaalien voimat, KRT

$$C_{2k} := \frac{F_{p2k}}{\sin(\theta_2)} = 474 \text{ kN}$$

Raudoituksen poikittaiset vetovoimat x- ja y-suuntiin

$$T_{1x,k} := \left(\frac{F_{p1k}}{\tan(\theta_1)} \right) \cdot \cos(\gamma_{12}) = 394 \text{ kN}$$

$$T_{2x,k} := \left(\frac{F_{p2k}}{\tan(\theta_2)} \right) \cdot \cos(\gamma_{21}) = 165 \text{ kN}$$

$$T_{1y,k} := \left(\frac{F_{p1k}}{\tan(\theta_1)} \right) \cdot \sin(\gamma_{12}) = 292 \text{ kN}$$

$$T_{2y,k} := \left(\frac{F_{p2k}}{\tan(\theta_2)} \right) \cdot \sin(\gamma_{21}) = 253 \text{ kN}$$

$$F_{y,ek} := \max(T_{1y,k}, T_{2y,k}) = 292 \text{ kN}$$

$$F_{x,ek} := \max(T_{1x,k}, T_{2x,k}) = 394 \text{ kN}$$

$$\sigma_{sk,x} := \frac{F_{x,ek}}{A_{sx}} = 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{sk,y} := \frac{F_{y,ek}}{A_{sy}} = 74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{sk} := \max(\sigma_{sk,y}, \sigma_{sk,x}) = 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Raudoituksen jännitys, KRT

$$\sigma_{sk} < f_{yd} \quad \text{OK}$$

$$\text{Rasitusluokka XC2} \rightarrow w_{max} := 0.3 \text{ mm}$$

$$\text{Teräsjännitys} \sim 160 \text{ MPa} \rightarrow \text{Suurin tankokoko [mm]} \rightarrow 32 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

$$\text{Tankojaon enimmäisarvo, kun } w_{max} 0.3 \text{ mm} \rightarrow 300 \text{ mm} \quad \text{OK}$$