

LAB-ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus
Talonrakennustekniikka

Jere Parikka

Paalun asennusvirheen vaikutukset paaluanturan suunnitteluun ja mitoitukseen

Opinnäytetyö 2020

Tiivistelmä

Jere Parikka

Paalun asennusvirheen vaikutukset paaluanturan suunnitteluun ja mitoitukseen, 49 sivua, 7 liitettä

LAB-ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma

Talonrakennustekniikka

Opinnäytetyö 2020

Ohjaajat: lehtori Petri Himmi, LAB-ammattikorkeakoulu, yksikönpäällikkö Marina Viitala, WSP Finland Oy

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä paaluanturan mitoitusongelmaan ja luoda ohjeet sen ratkaisemiseksi. Lisäksi tavoitteena oli luoda laskentapohja ja ohjeistus, joiden avulla suunnittelija pystyisi ratkaisemaan kyseisen ongelman. Muina tavoitteina olivat oppia paaluanturan mitoitus eri tilanteissa ja lisätä osaamista eri ohjelmien käytössä suunnittelutehtävissä.

Työssä käydään läpi paalupilarianturan mitoitus ristikkomenetelmällä ja valitun ongelman vaikutukset mitoitukseen. Ongelmaksi valittiin paalun asennuksen tuomat mitoitusongelmat. Vaikutusta tutkittiin Robot Structural Analysis 2020 -ohjelmalla, jonka avulla tutkittiin anturan sisäisten voimien muuttumista. Tulokset kirjattiin ja niiden avulla luotiin taulukot ja kuvaajat havainnollistamaan voimien muuttumista ja helpottamaan suunnittelutyötä.

Työn tuloksena luotiin Excel-laskenta-alustaan lisäosa, joka mitoittaa neljän paalun pilaripaaluanturan, kun yksi paalu on asennettu virheellisesti. Lisäksi luotiin raudoitus- ja suunnitteluohjeet samaan ongelmatilanteeseen. Niiden tarkoituksena on auttaa suunnittelijaa ongelmatilanteen ratkaisemiseen. Ohjeita voi käyttää myös ongelmattomaan tilanteeseen. Alusta, kuvaajat ja ohjeet sisältävät ylimääräistä varmuutta jolla varmistetaan, että niiden käyttö on mahdollista ilman riskiä alimitoituksesta.

Työtä voidaan laajentaa koskemaan erikokoisia paaluanturoita. Lisäksi Excel-laskenta-alustasta voidaan tehdä laajempi.

Asiasanat: paaluantura, ristikkomenetelmä, raudoite, Eurokoodi

Abstract

Jere Parikka

Pile installation error effects on pile foundation design and calculations, 49

Pages, 7 Appendices

LAB University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Degree Programme in Construction Engineering

Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2020

Instructor(s): Mr Petri Himmi, Senior Lecturer, LAB University of Applied Sciences, Ms Marina Viitala, Department Manager, WSP Finland Oy

The purpose of the thesis was to get acquainted with the design problem of a pile foundation and create instructions for solving it. In addition, the aim was to create a calculation platform and guidelines that would help the designer to solve this problem. Other goals were to learn the sizing of the pile foundation in different situations and to increase the skills in using different programs in designing.

The work presents the Strut-and-tie modeling in application of the pile foundation design and the effects of the chosen problem to it. Problems caused by pile installations were chosen. The effect was studied by Robot's Structural Analysis Professional 2020 software, which was used to study the changes in the internal forces of the foundation. The results were recorded and used to create tables and graphs to illustrate the change in forces and to assist in design work.

As a result of this work, an add-on was created to the Excel calculation platform that calculates the four-pile pillar foundation when one pile is installed incorrectly. In addition, reinforcement and design instructions were created for the same problem. Their purpose is to help the designer solve the problem. The instructions can also be used for a problem-free situation. The platform, graphs and instructions include additional certainty to ensure that they can be used without the risk of undersizing.

The work can be extended to cover pile foundations of different sizes. In addition, the Excel calculation platform can be made more extensive.

Keywords: pile foundation, Strut-and-tie modeling, reinforcement, Eurocode

Sisällys

1	Johdanto	5
2	Paaluantura	6
2.1	Keskiötäisyydet	6
2.2	Paaluanturan reunan etäisyys paaluista	7
2.3	Paalujen sallitut mittapoikkeamat	7
3	Paaluanturan mitoitus	8
3.1	Vetosauvat	10
3.2	Purtistuskaistan kestävyys	12
3.3	Solmupisteiden kestävyys	12
3.4	Lävistyskestävyys	16
3.5	Leikkauskestävyys	18
4	Mitoitusongelma	19
4.1	Ristikkovoimat	19
4.2	Ongelma	21
4.2.1	Keskiöväli	21
4.2.2	Puristus- ja vetovoimat	24
4.2.3	Paalujen rasitukset	28
4.2.4	Geometria	29
5	Excel-laskenta-alusta	30
5.1	Laskennan periaate	30
5.2	Tehdyt muutokset	31
5.3	Yleiset ohjeet alustan käyttäjälle	32
5.4	Vertailutulokset	34
5.5	Vertailutulosten analysointi	35
5.6	Mitoituksen arviointi	35
6	Raudoituksen suunnittelu	36
6.1	Vetorausoituksen teräsmäärä	36
6.2	Terästen etäisyydet	37
6.3	Raudoituksen ankkurointi	38
6.4	Ripustusraudoitus	40
6.5	Leikkaus- ja lävistyskestävyys	42
6.6	Mallipiirustukset ja paalujatkokset	42
7	Ohjeita	42
7.1	Puristuskestävyys	42
7.2	Vetokestävyys	44
7.3	Paalukuorma	45
8	Yhteenveto ja pohdinta	47
	Lähteet	49

Liitteet

- Liite 1 Mallipiirustus
- Liite 2 Mallipiirustus
- Liite 3 Mallipiirustus
- Liite 4 Mallipiirustus
- Liite 5 Mallipiirustus
- Liite 6 Excel-laskenta-alusta
- Liite 7 Ristikkovoimat

1 Johdanto

Maanvaraisen perustamisen rinnalla paaluperustaminen on yleinen perustamistapa Suomessa. Paaluperustusta joudutaan käyttämään, kun maan varaan perustaminen ei ole taloudellista tai mahdollista. Syitä paaluperustuksen käyttöön ovat painumien, siirtymien ja kiertyminen parempi hallitseminen varsinkin savi-koilla ja löyhien maakerrosten päälle rakennettaessa. Myös perustamistapa ja ympäröivien rakennusten sijainti voivat johtaa paaluperustukseen. (Jääskeläinen 2009, 52.)

Paalut pyritään asentamaan suunnitelmissa esitettyyn paikkaan ja asentoon, kuitenkin niitä vääntämättä asennuksen jälkeen. Paaluperustuksia suunniteltaessa otetaan huomioon paaluperustusta asennettaessa syntyvät poikkeamat paalujen sijainnissa ja kaltevuuksissa. Paalutuksen sijainnin mittauksen perusteella määritetään poikkeamat ja tarkastetaan, että ne pysyvät sallituissa rajoissa. Jos sallitut sijainti-, kaltevuus- tai suuntaustoleranssit ylitetään, tulee jokaisen rakennusosan mahdollinen ylikuormitus tutkia ja on ryhdyttävä tarpeellisiin toimenpiteisiin. (RIL 254-2016, 183.) Ylitetyt toleranssit voivat aiheuttaa mitoituksessa huomattavaa lisätyötä.

Tässä opinnäytetyössä ratkaistaan paalujen asennusvirheestä johtuva mitoitusongelma. Opinnäytetyössä käytetään apuna eurokoodeja ja standardeja sekä niitä noudattavia ohjeita ja teoksia. Työssä esitellään eurokoodin mukainen laskentamenetelmä ja paalun asennustyön virheen aiheuttamat ongelmat. Lisäksi luodaan ohjeita näiden ongelmien ratkaisemiseen. Lopputuotteena tehdään Excel-lisäosa, rauditusohjeet ja pikavalintataulukoita.

Opinnäytetyö tehtiin WSP Finland Oy:lle. WSP on suuri yhdyskuntarakentamisen asiantuntijayritys, jossa työskentelee noin 43 000 asiantuntijaa.

Työn tarkoituksena on luoda toimipisteelle ja yritykselle ohjeet paaluanturan mitoitusongelmaan sekä luoda laskentapohja ja ohjeistus, joiden avulla suunnittelija pystyy ratkaisemaan kyseisen ongelman.

2 Paaluantura

Paaluanturalla tarkoitetaan anturarakennetta, joka sitoo paalut yhdeksi toimivaksi ryhmäksi. Paalut ovat maan sisään lyötäviä, puristettavia, porattavia tai valettavia hoikkia rakenteita, joiden tehtävä on siirtää rakennuksen kuormat kalliolle, kovalle maakerrokselle tai tasaisesti maaperälle. (RIL 254-2016, 19.)

Anturaa suunniteltaessa on otettava huomioon vaatimukset vähimmäiskeskiöetäisyyksistä, paalujen etäisyys paalu anturan reunaan sekä muihin rakenteisiin ja paalujen kaltevuudet.

2.1 Keskiöetäisyydet

Kun paalujen välinen vapaa väli on paalun halkaisijan kaksinkertaista mittaa suurempi, voidaan paalujen välinen vuorovaikutus jättää huomiotta (SFS-EN 1992-1-1, 54).

Suunnitelma-asiakirjoissa määrätään paalujen väliset etäisyydet. Etäisyydet on valittava niin, etteivät vierekkäiset paalut huononna toistensa kantavuutta eivätkä vahingoita toisiaan asennettaessa. Minimikeskiövälejä ei tulisi alittaa: tuki- ja kitkapaaluilla 0,8 m, koheesiopaaluilla 1,0 m ja maakerrokseen tukeutuvilla vetopaaluilla 1,5 m. Muita vähimmäisarvoja on esitetty Paalutusohjeessa PO-2016, jotka on esitetty taulukossa 1. (RIL 254-2016, 179.)

Paalun pituus [m]	Tuki- ja kitkapaalu		Koheesiopaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7d	3d	4d	4,5d
10-25	Väliarvot interpoloidaan		5d	5,6d
25	3,5d	4d	6d	6,8d

Taulukko 1. Paalujen keskiöetäisyyden vähimmäisarvot (RIL 254-2016, 179)

2.2 Paaluanturan reunan etäisyys paaluista

Etäisyys paalun ulkoreunasta paaluanturan reunaan valitaan sellaiseksi, että paaluanturan vetoteräksset voidaan ankkuroida riittävälle matkalle (SFS-EN 1992-1-1, 162). Paaluanturan reunan etäisyyden paaluista tulee myös olla riittävä kestämään paaluvoimien aiheuttamat jännitykset sekä estämään anturan reunan lohkeaminen.

Teräsbetonipaaluilla keskipisteen etäisyyden paaluanturan reunasta tulisi olla vähintään paalun sivumitan suuruinen. Ympyrän muotoisilla paaluilla tulisi anturan reunan etäisyyden paaluhatusta tai paalun reunasta olla vähintään puolet paalun halkaisijasta tai paaluhatun sivumitasta. Kaltevilla paaluilla voidaan tapauskohtaisesti käyttää pienempääkin reunaetäisyyttä. (RIL 254-2016, 180.)

2.3 Paalujen sallitut mittapoikkeamat

Paalut pyritään asentamaan tarkalleen suunniteltuun paikkaan, ja asennuksen aikana syntyvät poikkeamat sijainnissa ja kaltevuuksissa otetaan huomioon paaluperustusta suunniteltaessa (RIL 254-2016, 181).

Paalutuksen sijainnin mittauksen perusteella määritetään poikkeamat ja tarkastetaan, että ne pysyvät sallituissa rajoissa. Jos sallitut sijainti-, kaltevuus- tai suuntaustoleranssit ylitetään, tulee jokaisen rakennusosan mahdollinen ylikuormitus tutkia ja on ryhdyttävä tarpeellisiin toimenpiteisiin. (RIL 254-2016, 183.)

Rakentamistoleranssit lyötvälle teräsbetonipaaluille, ellei toisin määrätä suunnitelmissa:

- yksittäinen pysty- ja vinopaalu, paalulaatta tai paaluhatturakenne:
 $e \leq e_{\max} = 0,10 \text{ m}$
- 2–8 paalun paaluryhmän yksittäinen paalu $e \leq e_{\max} = 0,15 \text{ m}$
- yli 8 paalun paaluryhmän $e \leq e_{\max} = 0,20 \text{ m}$
- koko paaluryhmän $e \leq e_{\max} = 0,05 \text{ m}$
- paalurivin yksittäisen paalun $e \leq e_{\max} = 0,15 \text{ m}$
- koko paalurivin $e \leq e_{\max} = 0,05 \text{ m}$ kohtisuorassa suunnassa

- yksittäisen pysty tai vinopaalun $i \leq i_{\max} = 0,04 \text{ m/m}$
- kaltevien paalujen horisontaalisuunta saa poiketa 2 astetta suunnitelmasta.

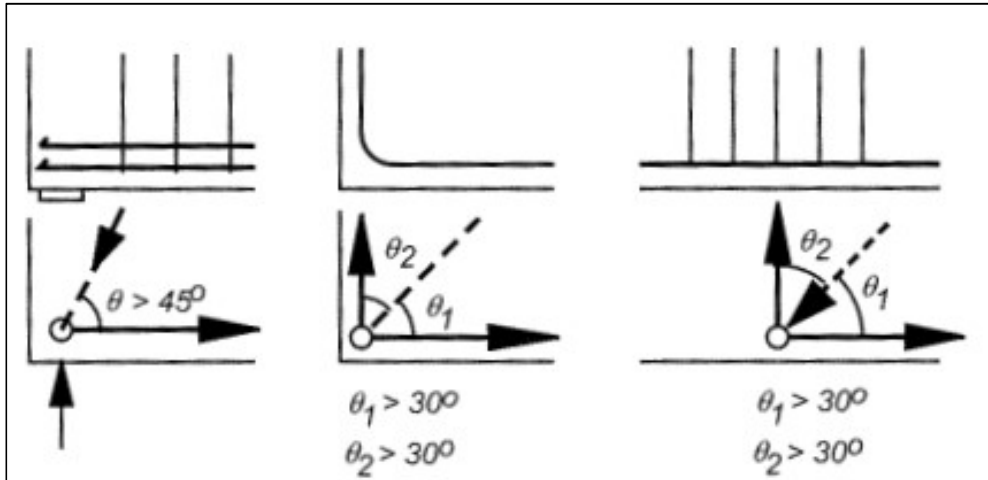
Rakentamistoleranssit on kokonaisuudessaan esitetty RIL 254-2016 sivuilla 183-184. Näistä toleransseista voidaan poiketa, mutta se on sovittava jo suunnittelu- vaiheessa.

3 Paaluanturan mitoitus

Paaluanturan mitoittamiseen käytetään yleisesti ristikkomenetelmää. Joissain tapauksissa voidaan käyttää myös taivutusteoriaa, joka sopii parhaiten perusmuurianturoille. Yleensä paaluanturat mitoitetaan niin paksuina, että voidaan käyttää ristikkomalleja. Tässä työssä keskitytään ristikkomalliin. (Betoniteollisuus 2011, 7.)

Ristikkomallien käyttö perustuu plastisuusteoriaan, vaikka mallin jännitykset ja jännityskeskittymät perustuvat kimmoteoriaan. Ristikkomenetelmässä puristus- sauvat ovat betonia ja vetosauvoina toimii rauditus. Sauvat liittyvät toisiinsa solmuissa, joiden voimatasapaino tulee olla varmistettu. Ristikkomalli on varmallalla puolella alarajateoreeman perusteella. Menetelmää käytettäessä ei tarvitse erikseen tarkistaa yhteensopivuutta muodonmuutosten ja voimien välillä. (Leskelä 2008, 430–431.)

Ristikkomenetelmässä puristus- ja vetosauvojen välinen kulma asetetaan mahdollisimman suureksi, $\theta \geq 45^\circ$ aina kun on mahdollista, kuitenkin vähintään $21,8^\circ$ (Betoniteollisuus 2011, 7). Tästä johtuen ristikkomenetelmää käytettäessä anturan paksuutta on edullista kasvattaa. Yleisesti paaluanturat tehdäänkin niin paksuiksi, että voidaan käyttää ristikkomallia ja ettei läpileikkaantuminen tule mitoit- tavaksi. (Leskelä 2008, 432 ja 454.) Veto ja puristussauvojen liittyminen sol- mussa on esitetty kuvassa 1.

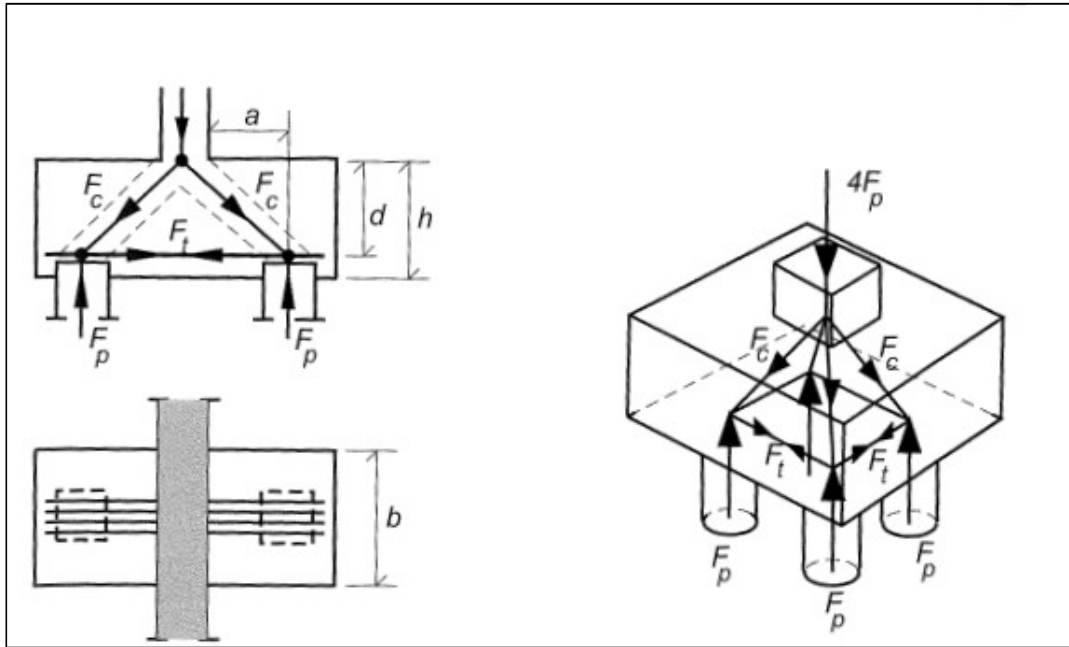


Kuva 1. Veto- ja puristussauvojen liittyminen solmussa. Vetosauvat = täydet viivat, Puristussauvat = katkoviivat (Leskelä 2018, 432).

Puristussauvat edustavat leveitä puristusjännityskenttiä ja niiden täytyy sijaita tarpeeksi etäällä anturan reunasta. Vastaavasti myös vetosauva ei voi sijaita aivan seinän ulkoreunassa. (Leskelä 2008, 433.)

Jos ristikkomenetelmän edellyttämä sauvavoimien yhteensopivuus säilyy, eli tärkeimmät puristussauvat on sijoitettu lineaarisen kimmoteorian mukaisesti, voidaan ristikkomenetelmää käyttäen tehdä myös käyttörajatilatarkastelut, kuten teräsännitysten ja halkeamaleveyden suuruuden tarkistus. (SFS-EN 1992-1-1, 63.)

Paaluanturan ristikkomalli suunnitellaan yksinkertaisena, jotta sen geometria ja sauvavoimat on helppo määrittää. Paaluanturan ristikkomalli on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Paaluanturan ristikkomallit (Leskelä 2018, 455)

Ristikkomenetelmää käytettäessä tulee tarkistaa ansaskulma, veto- ja puristusauvojen kestävyys, solmujen kestävyys, vetoterästen ankkurointi ja kaatumisvarmuus. Lisäksi tietyissä ongelmatilanteissa tulee tarkistaa myös leikkaus- ja lävistyskestävyys. Seuraavaksi käydään läpi tarvittavissa osin edellä mainitut mitoitukset. (SFS 1992-1-1.)

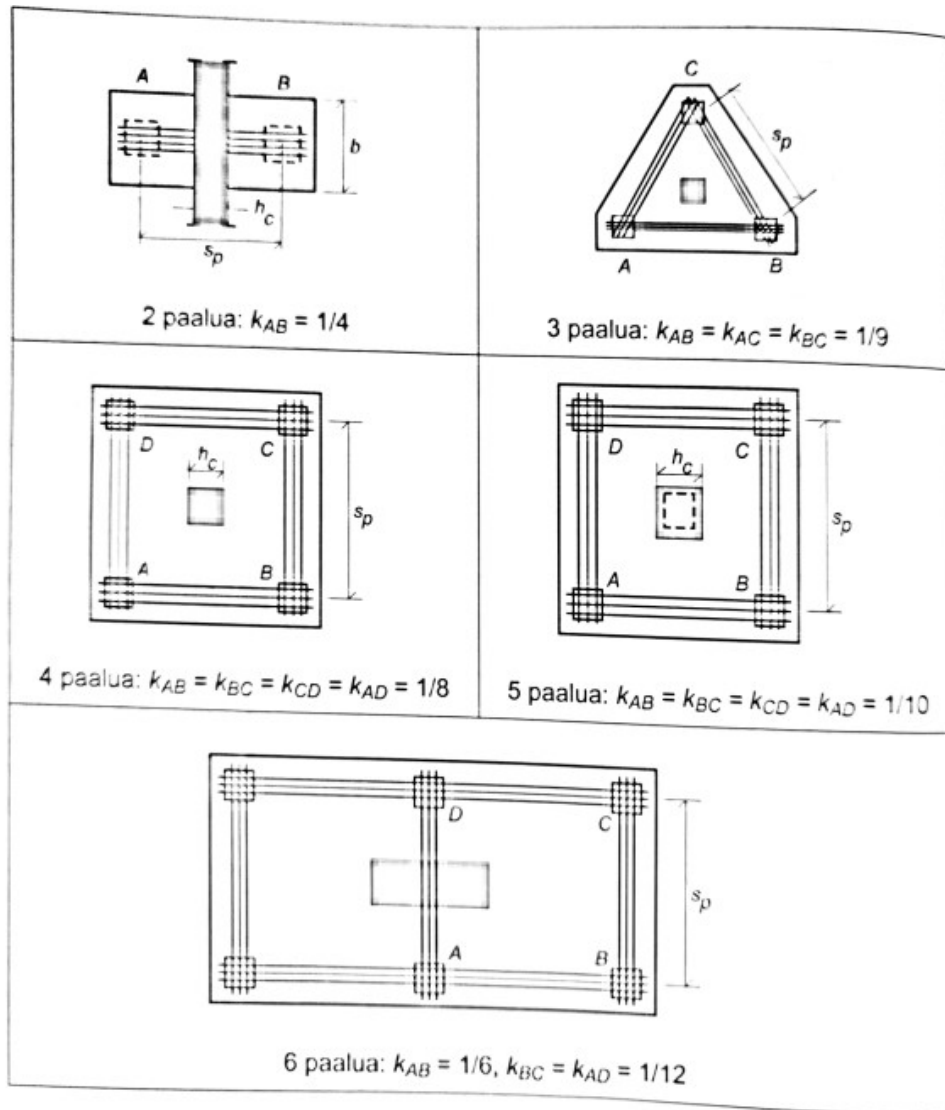
3.1 Vetosauvat

Vetosauvojen vetovoimat laskentaan kaavalla 1 (Leskelä 2008, 455).

$$F_t = k \frac{s_p}{d} \left(1 - \frac{h_c}{2s_p}\right) N_{Ed} \quad (1)$$

Missä

$F_{t,i}$	vetosauvan jännitys
N_{Ed}	paaluanturan mitoitusvoima
s_p	paalujen keskiöväli raudoituksen suunnassa
h_c	kuormitusalueen leveys
k	paalujen sijoituksesta riippuva kerroin (taulukko 2).



Taulukko 2. Kerroin k anturan raudoituksen vetovoiman laskemista varten (Leskelä 2008, 456)

Kaikki vetovoimat välitetään raudoituksen avulla. Tällöin mitoitus yksinkertaistuu. Raudoituksen suunnittelu käydään yksityiskohtaisesti läpi kohdassa 6. (Leskelä 2008, 456.)

3.2 Puristuskaistan kestävyys

Puristuskaistan sauvavoima saadaan vetosauvojen F_{ty} ja F_{tx} sekä paalun puristussauvojen F_p avulla (kuva 2). Puristussauvan puristusvoima F_c lasketaan solmupisteen tasapainosta kaavalla 2.

$$F_c = \sqrt{F_{ty}^2 + F_{tx}^2 + F_p^2} \quad (2)$$

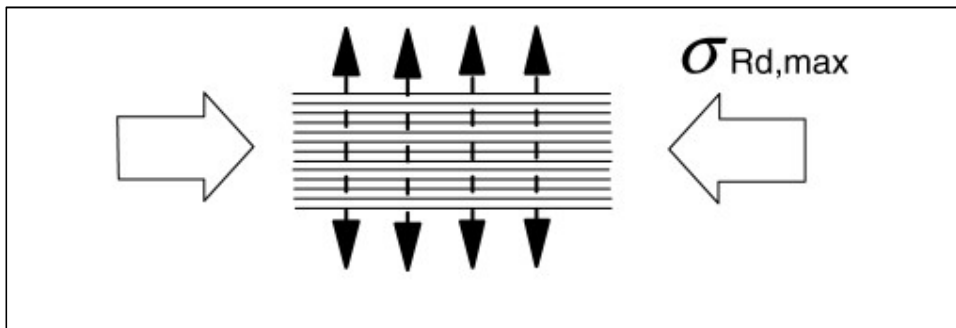
Puristuskaistan mitoituslujuus lasketaan kaavalla 3, kun kaistassa esiintyy poikittaista vetoa (kuva 3) (SFS-EN 1992-1-1).

$$\sigma_{Rd,max} = 0,6v'f_{cd} \quad (3)$$

missä

$$v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

f_{cd} betonin puristuslujuuden mitoitusarvo.



Kuva 3. Betonin puristuskaistojen mitoituslujuus, kun kaistassa esiintyy poikittaista vetoa (SFS-EN 1992-1-1, 106)

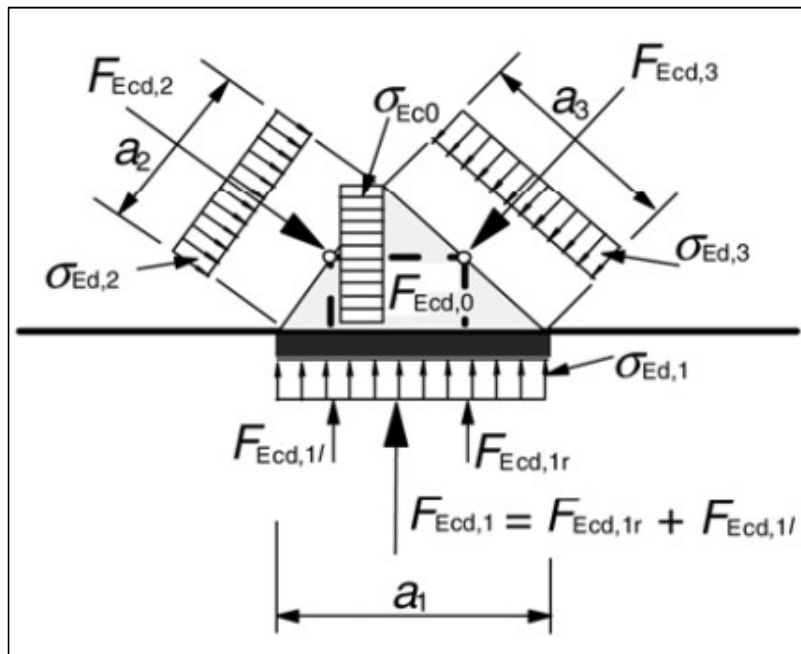
3.3 Solmupisteiden kestävyys

Solmupiste on rakenteen kohta, jossa resultanttivoimat kohtaavat ja jossa näiden voimien tulee olla tasapainossa. Solmukeskittymien mitoitus ja yksityiskohtien

suunnittelu ovat tärkeää määrittettäessä mekaanista kestävyyttä. Solmuja on kolme eri tyyppiä (SFS-EN 1992-1-1, 109):

- a. Puristussolmu, jossa solmuun ei ankkuroidu vetosauvoja (kuva 4).

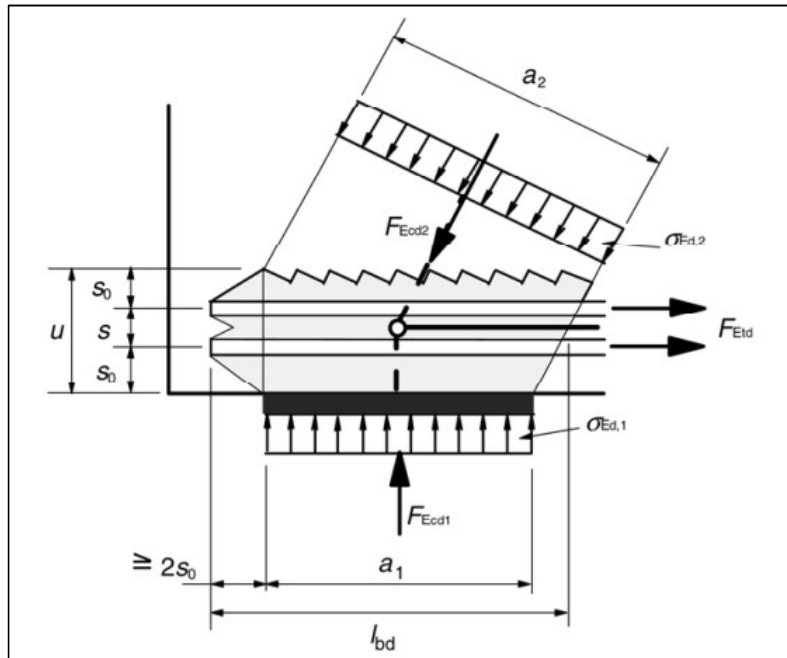
$$\sigma_{Rd,max} = k_1 v' f_{cd} \quad (4)$$



Kuva 4. Solmu johon liittyy vain puristussolmuja

- b. Solmu johon liittyy puristussauvoja ja johon ankkuroituu vetosauvoja yhdestä suunnasta. (kuva 5).

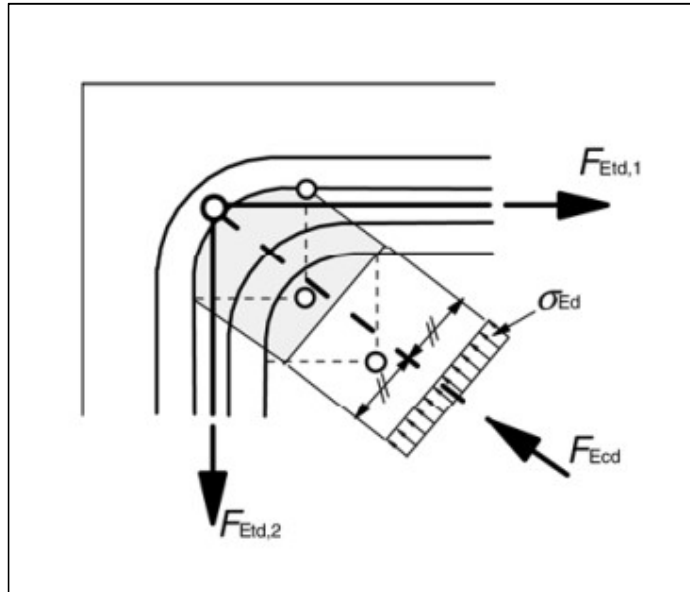
$$\sigma_{Rd,max} = k_2 v' f_{cd} \quad (5)$$



Kuva 5. Solmu johon liittyy puristussauvoja ja yhdeltä suunnalta vetosauvoja

- c. Solmu johon liittyy puristussauva ja joihin ankkuroituu vetosauvoja useammassa suunnassa (kuva 6).

$$\sigma_{Rd,max} = k_3 v' f_{cd} \quad (6)$$



Kuva 6. Solmu, joka on puristettu ja vedetty useammasta suunnasta

missä

$\sigma_{Rd,max}$	on puristusjännityksen mitoitusarvo, joka vaikuttaa solmuihin reunoilla
k_1	on 1,0 (tai $k_1 = k_4 = 3,0$, jos kaikkien kolmen akselin puristetun solmun kuorman jakautuminen tunnetaan (solmu a))
k_2	on 0,85 (solmu b)
k_3	on 0,75 (solmu c)
v'	on $1 - (f_{ck}/250)$
f_{cd}	on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo.

Jokaisen solmun puristusjännitykset on laskettava ja varmistettava, että ne eivät ylitä puristusjännityksen mitoitusarvoa eli puristuskestävyyttä. Puristusjännitykset saadaan kuvien 4, 5 ja 6 mukaisesti jakamalla puristusvoiman F_{Ecd} puristuspinta-alalla. Puristuspinta-alat lasketaan paaluanturan geometrian mukaan.

3.4 Lävistyskestävyys

Yleensä ristikkomenetelmää käytettäessä läpileikkautuminen ei tule määrääväksi, koska antura suunnitellaan tarpeeksi paksuksi. Kuitenkin läpileikkautuminen tulee tarkastaa, varsinkin jos kuorma tai tukireaktio vaikuttaa anturaan pienellä pinta-alalla. (Leskelä 2008, 454.)

Jos pilarianturaan ei tarvita leikkausraudoitusta saadaan anturan lävistyskestävyyden mitoitusarvo $v_{Rd,c}$ [MPa] kaavasta 7 (SFS-EN 1992-1-1, 103).

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho f_{ck})^{1/3} * \frac{2d}{a} \geq v_{min} * \frac{2d}{a} \quad (7)$$

missä

$C_{Rd,c}$	on kerroin, joka saadaan kaavalla 8 Suomen kansallisen liitteen mukaan
f_{ck}	betonin puristuslujuuden ominaisarvo [MPa]
k	on kerroin, joka saadaan kaavalla 10
ρ	saadaan kaavalla 9
a	on etäisyys pilarin ulkopinnasta tarkasteltavaan tarkistuspiiriin
d	on anturan tehollinen korkeus
v_{min}	on Suomessa 0.

$$C_{Rd,c} = \frac{0,3(\frac{D}{d}+1,5)}{\gamma_c(\frac{D}{d}+4)} \quad (8)$$

missä

D on pilarin halkaisija tai suorakaidepilarilla $D = \sqrt{c_1 c_2}$, missä c_1 ja c_2 ovat pilarin sivumittoja.

$$\rho = \sqrt{p_1 p_2} \leq 0,02 \quad (9)$$

missä

ρ_1 on $\frac{A_{s1}}{(c_1+3d)d}$

$$\rho_2 \quad \text{on} \quad \frac{A_{s2}}{(c_2+3d)d}$$

missä A_{s1} ja A_{s2} ovat vaikuttavan raudoituksen alat.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (10)$$

Lävistyskestävyyttä verrataan lävistyskuormaan kaavan 11 mukaan (SFS-EN 1992-1-1, 103). Jos v_{Ed} ylittää poikkileikkauksessa arvon $v_{Rd,c}$, käytetään lävistysraudoitusta eurokoodi 2 kohdan 6.4.5 mukaisesti.

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c} \quad (11)$$

missä

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,red}}{u_1 d}$$

missä

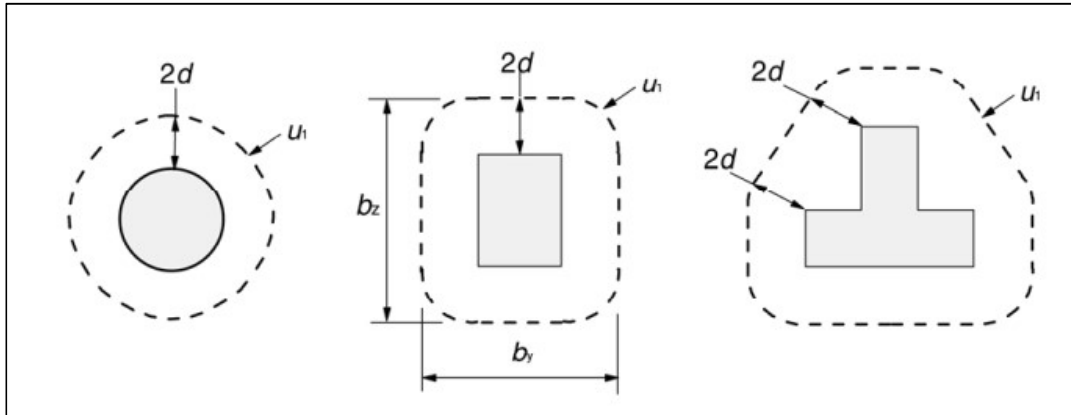
$V_{Ed,rad}$ saadaan kaavalla 12
 u_1 on tarkistuspiiri
 d anturan tehollinen paksuus.

$$V_{Ed,red} = V_{ed} - \Delta V_{ed} \quad (12)$$

missä

V_{Ed} on anturassa vaikuttava leikkausvoima
 ΔV_{ED} on tarkastuspiirin sisäpuolisen nettopaineen aiheuttama mitoitusvoima.

Pilarianturan lävistyskestävyyteen käytettävä perustarkistuspiiri u_1 määritetään kuvan 7 mukaan laskettaessa eurokoodi 2 mukaan. Betoninormien mukaan laskettaessa käytettäisiin $2d$:n tilalla d :tä.



Kuva 7. Perustarkistuspiirejä, missä d on rakenteen tehollinen paksuus (SFS-EN 1992-1-1, 97)

3.5 Leikkauskestävyys

Leikkaus ei normaalisti ole mitoittava tekijä, kun ansaskulmat ovat yli 45° . Tämän takia leikkauskestävyyttä ei normaalisti tarvitse tarkistaa, kun mitoitetaan ristikkomenetelmällä. Kun ansaskulmat muuttuvat paalun sijainnin muutoksen seurauksena on se syytä tarkistaa.

Jos betonin leikkauskestävyys $V_{Rd,c}$ ylittää leikkausrasituksen V_{Ed} täytyy anturaan määrittää minimileikkausraudoitus eurokoodin kohdan 9.2.2 mukaan. $V_{Rd,c}$ laskeaan kaavan 13 mukaan. (SFS-EN 1992-1-1, 84.)

$$v_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (13)$$

missä

f_{ck}	on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä
k	saadaan kaavalla 10
ρ	saadaan kaavalla 14
b_w	on poikkileikkauksen pienin leveys vedetyllä reunalla
σ_{cp}	saadaan kaavalla 15
$C_{Rd,c}$	on suositusarvoltaan $0,18/\gamma_c$
k_1	on suomessa 0,1
d	on anturan tehollinen paksuus.

$$\rho = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02 \quad (14)$$

missä

A_{sl} on tarkasteltavasta poikkileikkauksesta momentin itseisarvon pienemissuuntaan vähintään mitan ($l_{bd} + d$) verran ulottuvan veto-raudoituksen pinta-ala.

$$\sigma_{CP} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0,2 f_{cd} \quad (15)$$

missä

N_{ed} on kuormituksesta tai jännevoimasta aiheutuva normaalivoima poikkileikkauksessa

A_c on betonipoikkileikkauksen pinta-ala.

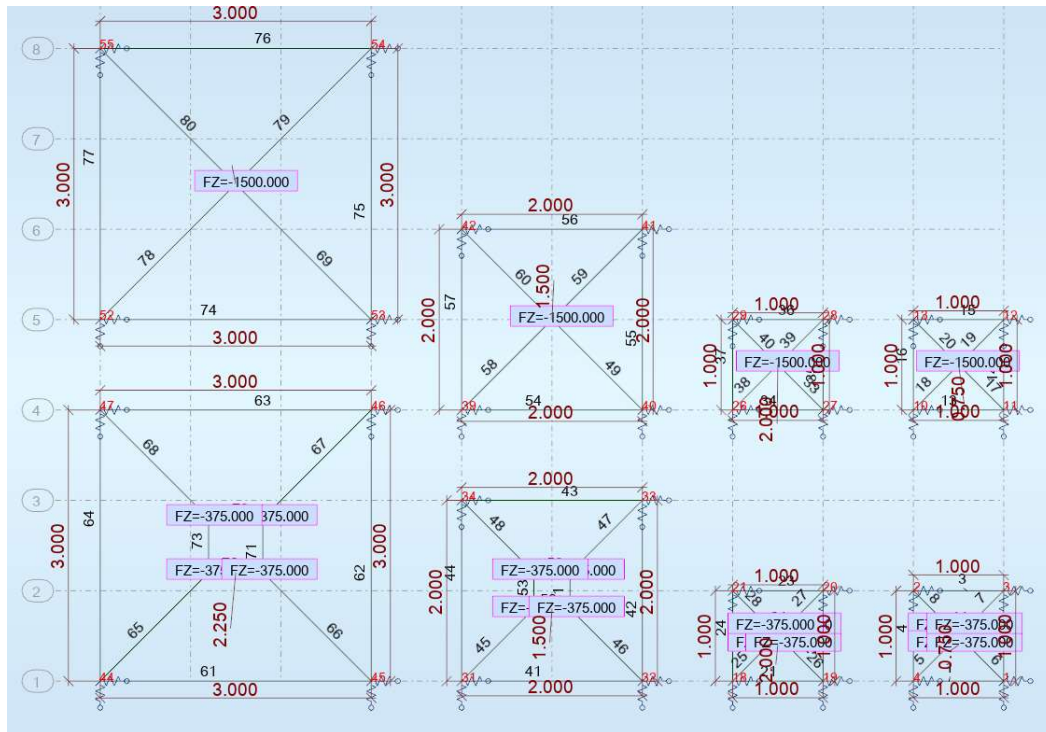
4 Mitoitusongelma

Paaluanturan mitoituksessa tulee useasti ongelmia, kun paalun asennustyössä on tehty virhe ja paalun sijainnin poikkeama ylittää sallitut toleranssit. Näissä tapauksissa mitoitusalueet eivät toimi oikein ja ne joudutaan mitoittamaan uudelleen eri menetelmillä kuten käsin laskemalla. Seuraavaksi tarkastellaan asennusvirheestä johtuvaa mitoitusongelmaa ja kehitetään ohjeet sen ratkaisemiseksi. Apuna käytetään Excel-pohjaa "SKOL_B20_Paaluantura_4-paalua_v1.52", millä mitoitus tapahtuu ristikkomenetelmällä sekä Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020 -ohjelmaa millä tutkitaan ristikkovoimia. Excel pohjalle SKOL_B20_Paaluantura_4-paalua_v1.52 tehdään myös laajennus millä voidaan tarkastella kyseistä mitoitusongelmaa.

4.1 Ristikkovoimat

Robot Structural Analysis Professional 2020 -ohjelmalla eli Robotilla tarkasteltiin ristikkovoimien muuttumista, kun ristikon geometria muuttuu. Tarkastelu pidettiin yksinkertaisena ja siinä käytettiin ääritapauksia. Tällä pyrittiin varmistamaan, että todellinen tilanne ei ylitä saatuja arvoja.

Robotissa vertailu tehtiin yksinkertaisten ristikkomallien mukaan (kuva 8), joissa sauvat ovat taipumattomia ja tuet jousitukina, joiden jäykkyys pystysuunnassa on 245 MN/m ja vaakasuunnassa ne ovat vapaasti liikkuvia. 1500 kN pistekuorma kohdistuu yhteen pisteeseen ristikon päältä tai 375 kN neljään pisteeseen ”pilarin” kulmien mukaan. Lisäksi pistekuorman kohdalle lisättiin 5 kNm suuruinen momentti. Ristikkomalleihin valittiin ääripään vaihtoehdot korkeudessa sekä eri kokoisia ristikoita mitoittavimman tilanteen löytämiseksi.



Kuva 8. Robot Structural Analysis Professional 2020 -ohjelmalla tehdyt ristikkomallit

Tarkastelu tehtiin vaiheittain. Ensin kahdeksasta erikokoisesta ristikosta kirjattiin suurimmat puristus- ja vetovoimat sekä paalukuormat. Sitten yhtä tukea siirrettiin jokaisessa ristikossa 10% tukivälistä tutkittavaan suuntaa ja suurimmat puristus-, vetovoimat ja paalukuormat kirjattiin. Tämä toistettiin 10% välein 50%: iin asti. Tuloksista määritettiin ristikkomalli, missä sauvavoimat kasvoivat prosentuaalisesti eniten. Kasvuprosentit kirjattiin ja niistä tehtiin taulukot 3–11. Saadut tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 7.

Lisäksi tehtiin satunnaistarkasteluja vakiokokoisilla anturoilla, joilla testattiin ristikkovoimien suuruuden eroa ääripään tapauksiin. Ristikkovoimien muutos todettiin pysyvän hyvin lähellä ääripääntapauksia, mutta aina niitä vähemmän. Yhtään tästä poikkeavaa tulosta ei saatu. Voidaan siis todeta, että tarkastelulla saatiin tuloksiksi varmalla puolella olevat arvot. Arvoja voidaan käyttää paalun sijaintivirheen aiheuttamien anturan ristikkovoimien muutosten arviointiin aina, kun anturan ristikkomalli voidaan todeta toimivaksi. Ristikkomalli voidaan todeta toimivaksi, kun se täyttää sille määritetyt ehdot. Tärkein näistä ehdoista on tarpeeksi suuret ansaskulmat, jotka mahdollistavat solmupisteiden toimimisen.

4.2 Ongelma

Käsitellään seuraavaa ongelmaa. Neljän paalun paaluanturan yksi paalu on asennettu virheellisesti sivuttaissuunnassa. Paalun sijainnin poikkeama ylittää sallitut toleranssit. Liian syväälle asennetun paalun jatkamiseen on annettu ohjeita kohdassa 6.6.

Asennusvirhe voi aiheuttaa seuraavanlaisia ongelmia mitoitukseen:

- Vähimmäiskeskiöväli ei täyty
- Puristus- ja vetosauvojen rasitukset muuttuvat
- Virheellisesti asennettu paalu ottaa suunniteltua enemmän rasitusta vastaan
- Virheellisesti asennettu paalu ottaa suunniteltua vähemmän rasitusta vastaan
- Pilarilta tuleva kuorma ei siirry paaluille
- Anturan leikkauskestävyys ei riitä
- Anturan lävistyskestävyys ei riitä

4.2.1 Keskiöväli

Kun keskiöväli alittaa suunnitelmissa ilmoitetun vähimmäisarvon, on mahdolliset vaikutukset rakenteen kestävyteen aina tarkistettava. Kun vierekkäiset paalut

ovat liian lähellä toisiaan, voivat ne vaikuttaa vähentävästi toistensa kantavuuteen sekä asennettaessa vahingoittaa toisiaan. (RIL 254-2016, 179.)

Lyhyt keskiöväli voi kasvattaa negatiivisen vaippahankauksen suuruutta, jos maa paalun ympärillä painuu enemmän kuin paalu. Paaluryhmässä paalun lisäkuorman suuruus riippuu keskiöetäisyydestä. (RIL 254-2016, 47–48.)

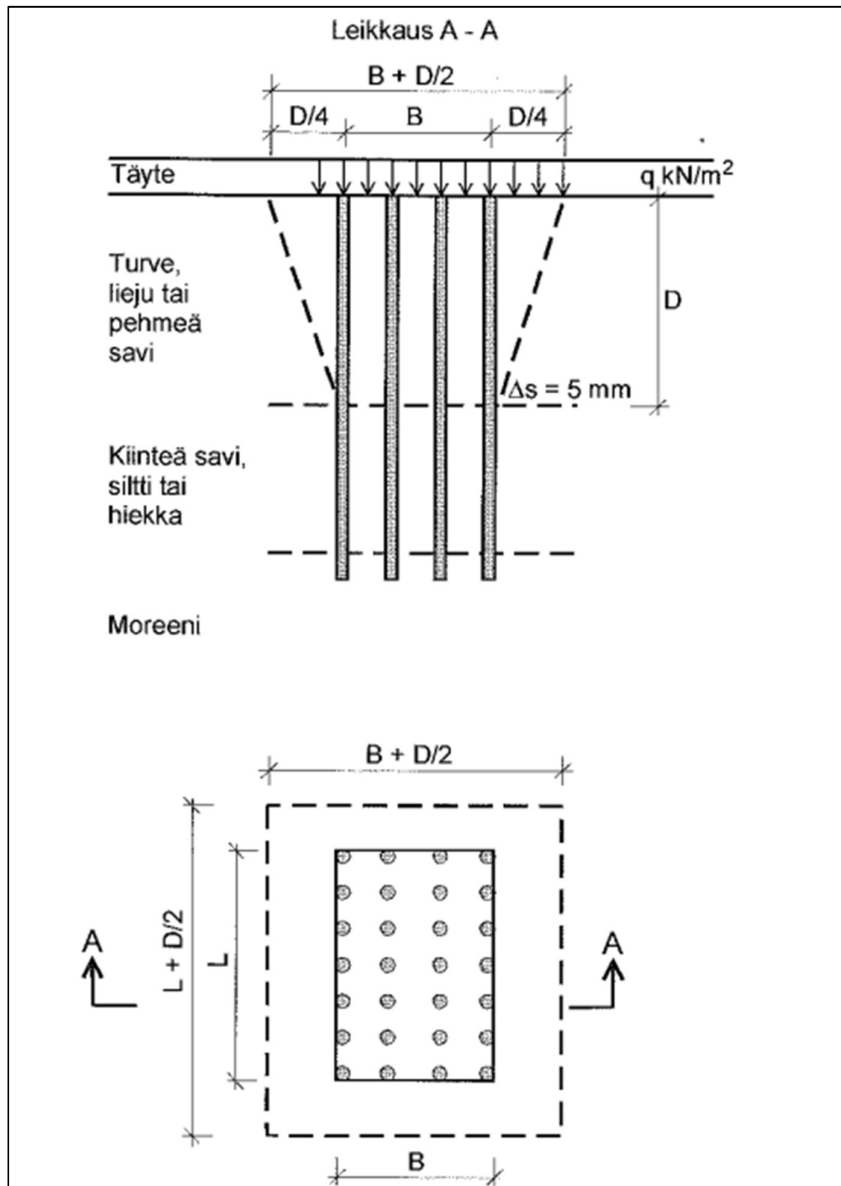
Tiheidien ja suurien paaluryhmien kokonaislisäkuorma lasketaan kaavoilla 16 ja 17.

$$F_{neg;d} = \frac{B \times L \times q + 2 \times (B+L) \times D \times c_u \times \gamma_g}{n} \quad (16)$$

$$F_{neg;d} = \frac{(B + \frac{D}{2}) \times (L + \frac{D}{2}) \times q \times \gamma_g}{n} \quad (17)$$

missä

c_u	siipikairalla määritetty keskimääräinen leikkauslujuus syvyyteen D asti
n	paalujen määrä
q	täytöstä aiheutuva tasainen pintakuorma paalujen ympärillä
B	Paaluryhmän leveys (kuva 9)
L	Paaluryhmän pituus (kuva 9)
D	Syvyys, jossa maan painuma on 5mm suurempi kuin paalujen (kuva 9)
γ_g	pysyvän kuorman osavarmuusluku.



Kuva 9. Negatiivisen vaippahankauksen aiheuttaman kokonaisläsäuormän las-
keminen paaluryhmälle (RIL 254-2016, 49)

Kun keskiöväli ylittää sallitun maksimiarvon, ristikkomallin geometria ei välttä-
mättä toimi halutulla tavalla, koska puristussauvojen ansankulmat ovat liian pie-
niä. Tästä seuraa, että anturaan on lisättävä ripustusraudoitus.

4.2.2 Puristus- ja vetovoimat

Anturan puristus- ja vetosauvojen voimien suuruudet muuttuvat alkuperäisistä suunnitelmista ja mitoituksista. Puristus- ja vetovoimien maksimit kasvavat, kun asennusvirhe kasvaa.

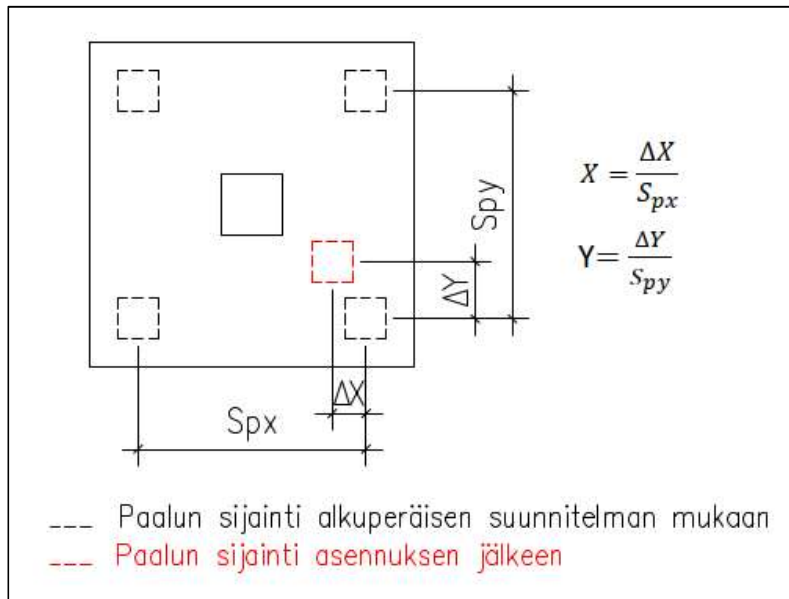
Taulukot 3–8 tehtiin Robotilla tehdyn laskennan tuloksista, joka on esitelty kohdassa 4.1. Taulukoista voidaan neljän paalun anturoissa arvioida anturan sisäisten sauvavoimien kasvua, kun paalun sijaintivirhe kasvaa. Taulukoiden X ja Y arvot lasketaan kuvien 10–12 mukaan.

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	5 %	11 %	18 %	27 %	36 %
0,1	5 %	9 %	14 %	18 %	22 %	33 %
0,2	11 %	14 %	19 %	24 %	27 %	30 %
0,3	18 %	18 %	24 %	28 %	31 %	32 %
0,4	27 %	22 %	27 %	31 %	34 %	44 %
0,5	36 %	33 %	30 %	32 %	44 %	54 %

Taulukko 3. Mitoittavan puristusvoiman kasvu, kun paalu on siirtynyt kohti anturan keskipistettä

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	6 %	14 %	24 %	38 %	55 %
0,1	6 %	1 %	8 %	18 %	33 %	53 %
0,2	14 %	8 %	3 %	15 %	30 %	53 %
0,3	24 %	18 %	15 %	12 %	30 %	57 %
0,4	38 %	33 %	30 %	30 %	34 %	70 %
0,5	55 %	53 %	53 %	57 %	70 %	108 %

Taulukko 4. Mitoittavan vetovoiman kasvu, kun paalu on siirtynyt kohti anturan keskipistettä



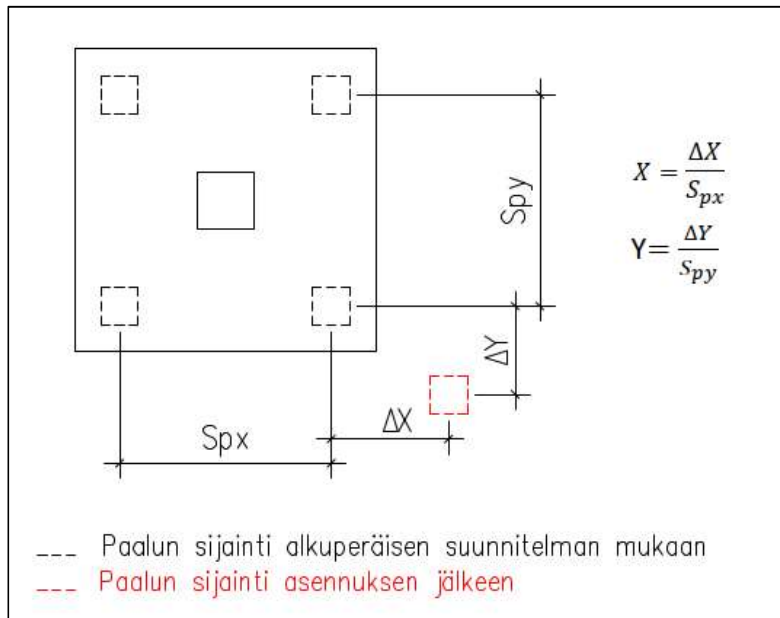
Kuva 10. Paalu on siirtynyt kohti anturan keskipistettä

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	6 %	11 %	16 %	21 %	25 %
0,1	6 %	9 %	13 %	16 %	19 %	22 %
0,2	11 %	13 %	16 %	19 %	22 %	25 %
0,3	16 %	16 %	19 %	22 %	25 %	28 %
0,4	21 %	19 %	22 %	25 %	28 %	30 %
0,5	25 %	22 %	25 %	28 %	30 %	32 %

Taulukko 5. Mitoittavan puristusvoiman kasvu, kun paalu on siirtynyt kahteen suuntaan pois päin anturan keskipisteestä

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	7 %	14 %	20 %	25 %	30 %
0,1	7 %	9 %	13 %	17 %	21 %	25 %
0,2	14 %	13 %	17 %	21 %	24 %	27 %
0,3	20 %	17 %	21 %	24 %	27 %	30 %
0,4	25 %	21 %	24 %	27 %	30 %	32 %
0,5	30 %	25 %	27 %	30 %	32 %	35 %

Taulukko 6. Mitoittavan vetovoiman kasvu, kun paalu on siirtynyt kahteen suuntaan pois päin anturan keskipisteestä



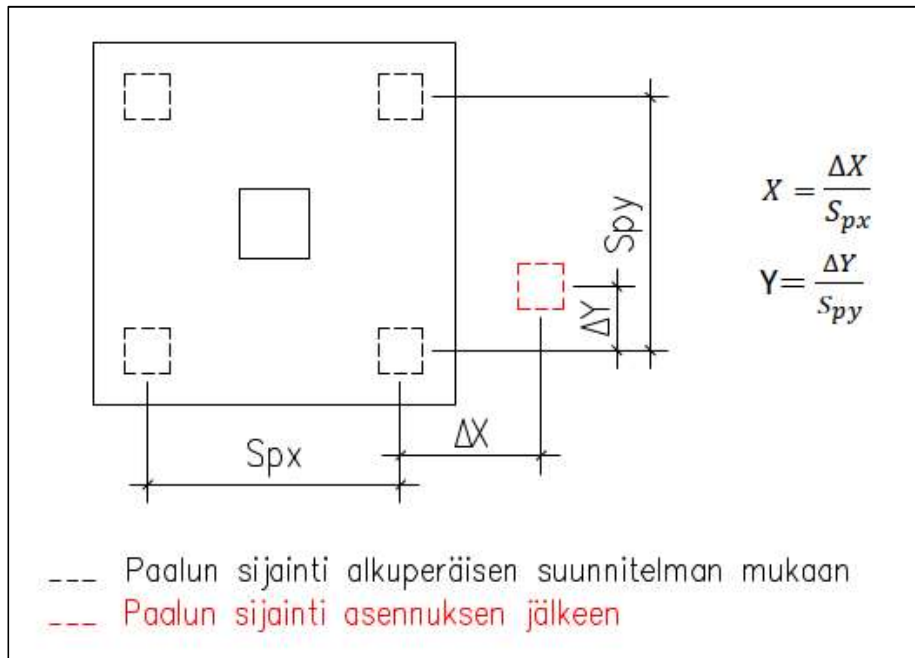
Kuva 11. Paalu siirtynyt kahteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	6 %	11 %	16 %	21 %	25 %
0,1	5 %	10 %	16 %	21 %	26 %	30 %
0,2	11 %	16 %	21 %	26 %	31 %	35 %
0,3	18 %	23 %	28 %	33 %	37 %	41 %
0,4	27 %	31 %	35 %	40 %	44 %	48 %
0,5	37 %	40 %	44 %	48 %	52 %	55 %

Taulukko 7. Mitoittavan puristusvoiman kasvu, kun paalu on siirtynyt yhteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	7 %	14 %	20 %	25 %	30 %
0,1	6 %	13 %	20 %	26 %	31 %	36 %
0,2	14 %	21 %	28 %	33 %	39 %	43 %
0,3	24 %	31 %	37 %	43 %	48 %	52 %
0,4	38 %	43 %	49 %	54 %	58 %	62 %
0,5	55 %	58 %	63 %	67 %	71 %	74 %

Taulukko 8. Mitoittavan vetovoiman kasvu, kun paalu on siirtynyt yhteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä



Kuva 12. Paalu on siirtynyt yhteen suuntaan pois päin anturan keskipisteestä

Uusi puristus- ja vetovoima saadaan lisäämällä taulukoista saatu prosenttiosuus alkuperäisestä jännityksestä alkuperäiseen jännitykseen. Voimat saadaan kaavoilla 18 ja 19:

$$F_{cd,n} = F_{c,i}(100\% + p_c) \quad (18)$$

$$F_{td,n} = F_{t,i}(100\% + p_t) \quad (19)$$

missä

$F_{cd,n}$	Korotettu puristusvoima
$F_{c,i}$	Alkuperäinen puristusvoima
p_c	Taulukosta 3,5,7 saatu kuormituksen kasvuprosentti
$F_{td,n}$	Korotettu vetovoima
$F_{t,i}$	Alkuperäinen vetovoima
p_t	Taulukosta 4,6,8 saatu kuormituksen kasvuprosentti.

Excel-laskenta-alustalla tehtiin vertailulaskuja, joilla pyrittiin saamaan järkeviä ja vertailukelpoisia tuloksia. Nopeasti kuitenkin havaittiin, että laskenta-alusta voi-

daan todeta vaikeaksi käyttää, kun paalu on asennettu virheellisesti. Alustan antamat tulokset eivät vastaa Robotilla saatuja sauvavoimia, varsinkaan korkeammilla anturoilla, kun paalun sijaintivirhe kasvaa. Alustaan tehtiin lisäosa, mikä ottaa anturan jännitysten muutokset huomioon. Se esitellään kohdassa 5.

4.2.3 Paalujen rasitukset

Anturalle tulevat kuormat eivät jakaudu tasaisesti kaikkien paalujen kesken, koska virheellisesti asennettu paalu ottaa joko enemmän tai vähemmän kuormia vastaan. Paalujen kuormat voivat kasvaa huomattavasti riippuen niiden etäisyydestä kuormituspisteeseen. Kohdan 4.1 vertailulaskennan tuloksista saatiin myös paalukuormat laskettua. Taulukoissa 9–11 on vertailtu eri suuruisten asennusvirheiden vaikutuksia paalukuormiin.

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	6 %	13 %	20 %	28 %	38 %
0,1	6 %	14 %	21 %	30 %	38 %	46 %
0,2	13 %	21 %	30 %	40 %	50 %	59 %
0,3	20 %	30 %	40 %	52 %	61 %	75 %
0,4	28 %	38 %	50 %	61 %	77 %	95 %
0,5	38 %	46 %	59 %	75 %	95 %	111 %

Taulukko 9. Mitoittavan paalukuorman kasvu, kun paalu on siirtynyt kohti anturan keskipistettä

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	6 %	11 %	16 %	21 %	25 %
0,1	6 %	9 %	13 %	16 %	19 %	22 %
0,2	11 %	13 %	16 %	19 %	22 %	25 %
0,3	16 %	16 %	19 %	22 %	25 %	28 %
0,4	21 %	19 %	22 %	25 %	28 %	30 %
0,5	25 %	22 %	25 %	28 %	30 %	32 %

Taulukko 10. Mitoittavan paalukuorman kasvu, kun paalu on siirtynyt kahteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä

Y↓ X→	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,0	0 %	6 %	11 %	16 %	21 %	25 %
0,1	6 %	11 %	16 %	21 %	25 %	30 %
0,2	13 %	17 %	22 %	27 %	31 %	35 %
0,3	20 %	24 %	29 %	33 %	38 %	42 %
0,4	28 %	33 %	37 %	41 %	45 %	49 %
0,5	39 %	42 %	46 %	50 %	53 %	56 %

Taulukko 11. Mitoittavan paalukuorman kasvu, kun paalu on siirtynyt yhteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä

Taulukoiden X ja Y arvot lasketaan kuvien 10–12 mukaan. Uusi mitoittava paalukuorma saadaan kaavasta 20. Tällä kuormalla voidaan arvioida mahdollisten jatkoimenpiteiden tarvetta.

$$F_{cd,i} = F_{cd,p}(100\% + p_{c,p}) \quad (20)$$

missä

$F_{cd,i}$	Mitoittava paaluvoima
$F_{cd,p}$	Alkuperäinen paaluvoima
$p_{c,p}$	Taulukosta 9–11 saatu korotusprosentti.

Excel-laskenta-alustaa tehtiin lisäosa, mikä ottaa geometrian muuttumisesta aiheutuvat paalukuormat huomioon. Laskenta-alusta esitellään kohdassa 5.

4.2.4 Geometria

Kun asennusvirhe kasvaa, ristikkomallin geometria voi muuttua niin paljon, ettei käytännössä rakenne toimi enää mallin osoittamalla tavalla. 30° pienemmät ansaskulmat eivät ole todellisia ja niihin liittyy muodonmuutosten yhteensopimattomuus. (Leskelä 2008, 432.) Tästä johtuen alle 30° kulmilla ristikkomenetelmän antamiin tuloksiin ei voi luottaa, eikä mitoitusta voi sillä tehdä. Riskinä on, että

voimat eivät siirry suunniteltuja reittejä pitkin ja/tai rakenteeseen syntyä uusia murtokohtia.

Kun paaluväli muuttuu, voivat paaluanturalle epätavalliset murtomekanismit tulla mitoittaviksi. Leikkaus- ja lävistysmitoitukset eivät yleensä ole mitoittavia ristikkomenetelmää käytettäessä, koska anturasta tehdään suhteessa tarpeeksi paksu. Kun anturan kokoa paaluvälin kasvaessa joudutaan suurentamaan, täytyy kyseiset murtomekanismit huomioida. Lisäksi pilarikuorman siirtyminen paaluille täytyy varmistaa ripustusraudoituksella.

5 Excel-laskenta-alusta

Excel-laskenta-alusta tehtiin laajennuksena SKOL_B20_Paaluantura_4-paalua_v1.52 laskenta-alustalle. Tähän päädyin, koska täysin uuden laskenta-alustan tekeminen olisi vienyt erittäin paljon aikaa epäsymmetrisen ristikkomallin monimutkaisuuden takia. Lisäksi kyseinen alusta on helposti ymmärrettävä, ja kaikki haluamani muutokset sain siihen lisättyä.

Liitteessä 6 on esitetty laskenta-alustaan tehdyt muutokset kokonaisuudessaan.

5.1 Laskennan periaate

Laskenta-alusta on periaatteeltaan yksinkertainen ja toimiva niin kauan, kun ristikon geometria pysyy neliönä. Laskenta perustuu ristikkomenetelmään. Alusta laskee ristikon geometrian annettujen lähtötietojen (kuva 15) perusteella ottaen huomioon myös sijaintitoleranssit niin että suurin sallittu virhe toteutuu.

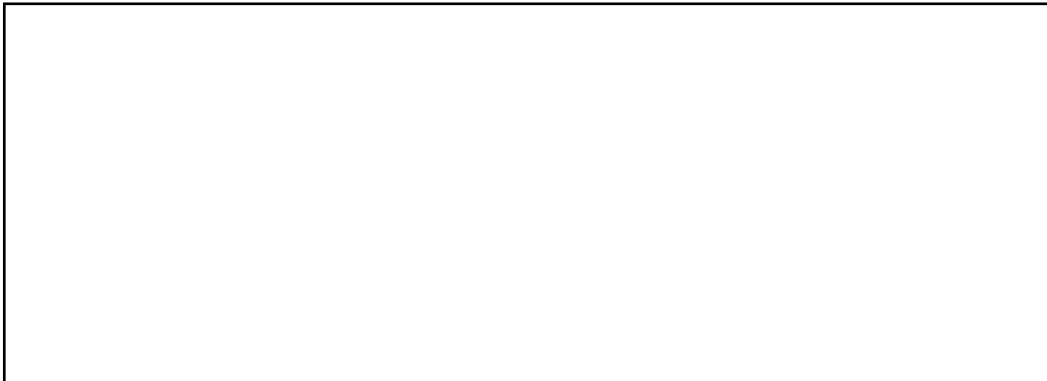
Saadun geometrian mukaan alusta laskee ristikkovoimat eli puristus- ja vetovoimat sekä paalujen kuormat. Niitä hyödyntämällä saadaan laskettua mitoittavat jännitykset. Mitoittavia jännityksiä verrataan laskettuihin puristus- ja vetokestävyyksiin ja saadaan lasketuksi anturan käyttöaste sekä määritettyä sen heikoin kohta. Lisäksi alusta tarkistaa pääraudoituksen ankkurointipituuden riittävyyden sekä muiden ehtojen, esimerkiksi reunaetäisyyden ja halkeilun täyttymisen.

5.2 Tehdyt muutokset

Laskenta-alustaan tehtiin lisäosa, joka sisältää uuden välilehden nimeltä ”poikkeama” ja pieniä muutoksia ja ohjeita lähtötietojen syöttöön. Muutokset vaikuttavat laskentaan vain, jos lähtötiedoissa ilmoittaa paalun sijaintivirheen ja sen suuruuden.

Poikkeama -välilehdellä alusta laskee suurenevat ristikko- ja paaluvoimat kaavoilla 18 ja 19 taulukoiden 3–8 avulla. Näitä uusia ristikkovoimia käyttämällä saadaan laskettua käyttöasteet vedolle ja puristukselle sekä ankkuroinnille. Lisäksi alusta ilmoittaa paalukuorman muutoksen ja tarvittavan ripustusraudoituksen määrän.

Lähtötietojen antamista pyrittiin selventämään lisäämällä ohjeita mahdollisten virheilmoitusten tueksi. Jos käyttäjän antamilla arvoilla antura ei täytä vaatimuksia, alusta esittää virheilmoituksen lisäksi nyt syyn virheelle ja ratkaisun sille. Kuvassa 13 on esitetty esimerkki tehdyistä ohjeistuksista.



Kuva 13. Esimerkki tehdyistä ohjeistuksista alustaan.

Lisäksi lähtötiedoissa voidaan ilmoittaa paalun virheellinen asennus ja sen suuruus. Kun virhe on ilmoitettu ja kuvan 15 mukaiset arvot annettu, käyttää alusta sitä automaattisesti laskennassa.

5.3 Yleiset ohjeet alustan käyttäjälle

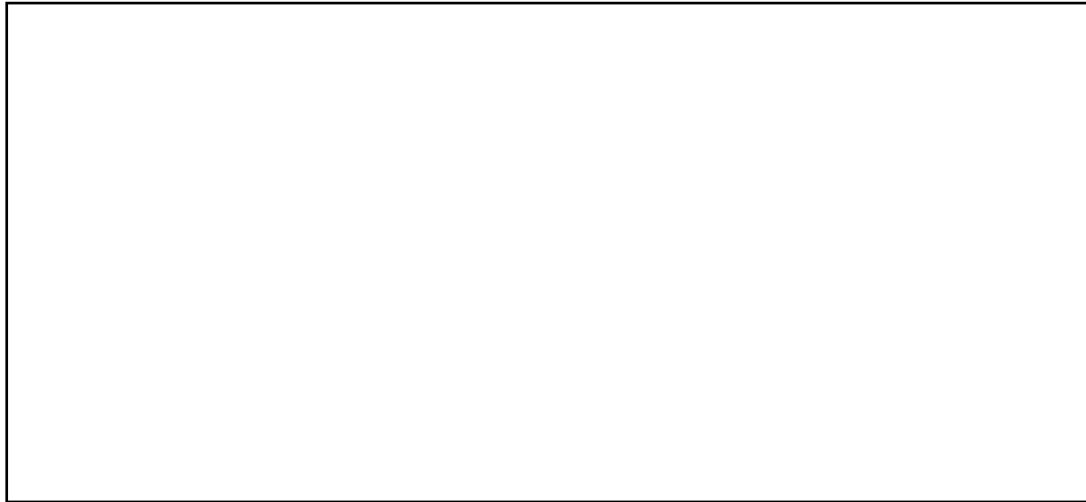
Käyttäjälle oleellisin välilehti on "Lähtötiedos_tulos"-välilehti. Nimen mukaisesti tällä välilehdellä syötetään kaikki lähtötiedot sekä samalla alusta ilmoittaa laskennan tuloksen. Osa välilehdestä on esitetty kuvassa 14.

Betoni =	C30/37	$s_{px} =$	800	$s_{py} =$	1600	mm	VIRHE_spy
Rasitusluokka =	XC2	$l =$	2000	$b =$	2000	mm	VIRHE_b
Betoniteräs $f_{ck} =$	500	MPa	$h =$	1000	mm		
Pääteräs $T_s =$	20	mm	$h_c =$	250	$b_c =$	250	mm
Lukumäärä $n_{sx} =$	6	kpl	$c =$	85	$c_1 =$	35	mm
Lukumäärä $n_{sy} =$	6	kpl	Ankkurointitapa	Suora teräs			
			Ankkurointiolosuhteet		Hyvät		
Paalut:			$l_1 =$	425	$l_{1y} =$	25	VIRHE
Paalujen koko $h_p =$	250	mm	$e_{2k} =$	1	$e_{2d} =$	23	
Paalujen pituus =	11 m - 13 m		Paalut, sijaintitoleranssi $e_s =$		50	mm	
Paalutyyppi =	Tuki- tai kittapaalu		Pilarin sijaintitoleranssi $e_1 =$		20	mm	
Ristikkokulmat ($^{\circ}$)	$\theta_2 =$	42,6	VIRHE	$\theta_3 =$	43,3	VIRHE	VIRHE
Raudituksen jakoalue $b_{rx} =$	300		VIRHE	$b_{ry} =$	300		VIRHE

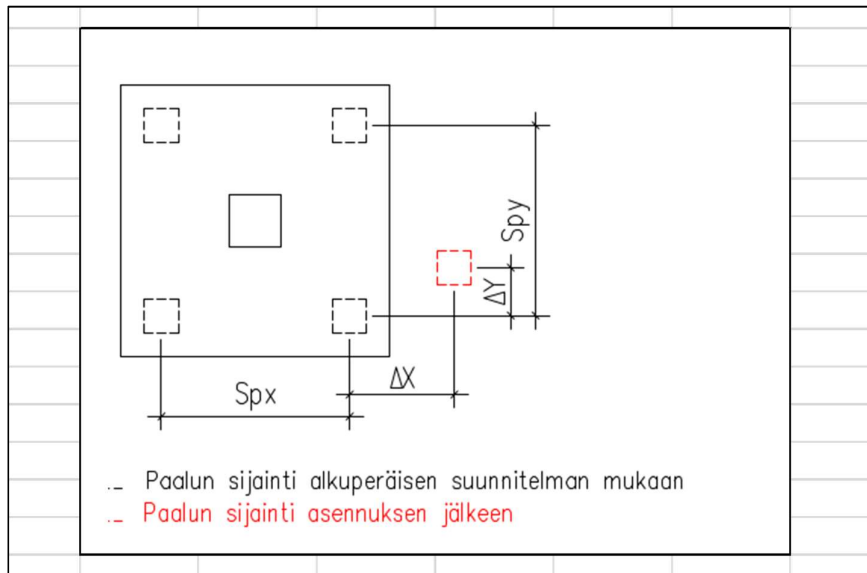
Kuva 14. Lähtötiedot virheilmoituksilla

Lähtötiedot tulee ilmoittaa keltaisiin soluihin ja niiden täytyy täyttää kaikki standardien mukaiset ehdot. Alusta ilmoittaa virheestä, jos nämä ehdot eivät täyty, ja päivitettyssä versiossa alusta ilmoittaa myös virheen syyn ja mahdolliset ohjeet sen ratkaisemiseksi. Kun kaikki lähtötiedot on ilmoitettu oikein eikä alusta ilmoita virheistä, voidaan saatuun laskentaan luottaa. Aina pitää kuitenkin käyttää omaa kriittistä tulkintaa.

Virheelliselle asennukselle alustaan tehtiin oma lähtötieto-osio (kuva 15). Tässä osiossa ilmoitetaan asennusvirhe sekä asennusvirheen suuruus. Alusta myös esittää virheen mukaisen kuvan (kuva 16), missä esitetään ΔX - ja ΔY -arvojen määrittäminen. Kun asennusvirheen suuruus on ilmoitettu, alusta ottaa automaattisesti virheen laskentaan mukaan. Lähtötietojen syöttämisessä täytyy kiinnittää huomiota, että ΔX - ja ΔY - arvot ovat ilmoitettu oikein perin. Jos arvot ilmoitetaan väärin on kuvan 17 mukaisessa tapauksessa vaarassa, että laskenta antaa väärän vastauksen.



Kuva 15. Lähtötiedot virheelliselle asennukselle



Kuva 16. Lähtötietojen mukainen kuva

Alustan muilta välilehdiltä käyttäjän ei välttämättä tarvitse huomioida mitään. On kuitenkin aina oltava varma, että eri arvot, esimerkiksi varmuuskertoimet, ovat ajan tasalla mahdollisen standardien muutosten jälkeen. Laskenta -välilehdeltä käyttäjä voi seurata laskennan kulkua ja tarkastaa alustan käyttämät ehdot. Alusta saattaa vaatia tiukempia ehtoja kuin aina on välttämätöntä käyttää. Myös

muut välilehdet sisältävät taulukoita ja muita laskennalle välttämättömiä lähtötietoja, jotka on hyvä tarkistaa varsinkin, jos ohjeisiin tai standardeihin on tullut muutoksia.

5.4 Vertailutulokset

Excel-laskenta-alustan tuloksia verrattiin Robot Structural Analysis Professional 2020 -ohjelmalla saatuihin tuloksiin. Tuloksien avulla selvitettiin, miten hyvin laskennat vastaavat toisiaan. Vertailu tehtiin 15–20 erikokoisen tai korkuisen anturan otannalla huomioiden, että se kattaisi eri tilanteet. Tulokset on esitetty taulukoissa 12 ja 13.

	Mitoittava puristusvoima		Mitoittava vetovoima		Mitoittava paalukuorma	
	Excel	Robot	Excel	Robot	Excel	Robot
Paalu siirtynyt kohti anturan keskipistettä	664	634	362	323	545	541
Paalu siirtynyt kahteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä	619	602	311	291	445	453
Paalu siirtynyt yhteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä	628	605	323	296	453	468

Taulukko 12. Vertailutulosten keskiarvot.

	Tulosten ero puristusvoima		Tulosten ero vetovoima		Tulosten ero paalukuormat	
	kN	%	kN	%	kN	%
Paalu siirtynyt kohti anturan keskipistettä	30	5 %	38	11 %	4	1 %
Paalu siirtynyt kahteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä	18	3 %	20	7 %	-7	-2 %
Paalu siirtynyt yhteen suuntaan poispäin anturan keskipisteestä	23	4 %	27	9 %	-15	-3 %

Taulukko 13. Vertailutulosten erot.

Lisäksi tehtiin vertailua alkuperäisen alustan ja muunnetun kanssa, jotta voitaisiin todeta, ettei lisäosa vaikuta alkuperäisen laskennan luotettavuuteen. Vertailun avulla pystytään toteamaan, ettei tehdyt muutokset vaikuta alkuperäiseen laskentaan.

5.5 Vertailutulosten analysointi

Taulukosta 12 nähdään, että mitoittavat puristusvoimat ja vetovoimat pysyvät Excel-laskenta-alutalla keskimäärin suurempina kuin Robotilla saadut voimat. Kun verrataan kaikkia saatuja tuloksia, huomataan, että alustan antamat voimat eivät alita Robotilla saatuja voimia kertaakaan. Tulokset pysyvät kuitenkin vertailukelpoisina, eikä laskentojen välille synny myöskään liian suurta erotusta.

Paalukuormat Excel-laskenta-alusta laskee pienemmiksi, kun paalu on siirtynyt pois päin anturan keskipisteestä. Ero johtuu siitä, että alusta laskee myös alkuperäiset paalukuormat pienemmiksi kuin Robot. Kun alustalla lasketaan virheellisen asennuksen aiheuttamia suurempia paalukuormia, pysyy ero prosentuaalisesti samana mutta kokonaisuudessaan kasvaa, mitä isompi virhe on kyseessä.

Alkuperäisen ja muutetun alustan mitoituksia vertaamalla voidaan todeta, ettei lisäosa vaikuta alkuperäiseen mitoitukseen millään tavalla, kunhan lähtötiedoissa ei ole ilmoitettu paalun asennusvirhettä.

5.6 Mitoituksen arviointi

Tulokset osoittavat, että Excel-laskenta-alustaan tehdyt muutokset toimivat halutulla tavalla. Alusta korottaa mitoittavia voimia juuri määritetyn verran, ja koska sen mitoitus on lähtökohtaisesti varmallalla puolella, pysyy se varmallalla puolella, vaikka sillä lasketaan paalun virheellisen asennuksen aiheuttamat lisäjännitykset.

Lisäosa tehtiin sillä periaatteella, että on kyseessä aina mitoittavin tilanne, eli oletetaan, ettei anturan geometriaa ole optimoitu. Näin tehtiin, vaikka eri geometrioilla voimat vaihtelivat tietyissä tapauksissa paljonkin, koska suureksi osaksi erot olivat pieniä. Sillä pyrittiin varmistamaan, että käyttäjä voi luottaa alustaan tilanteesta riippumatta.

Paalukuormat jäivät vähän pienemmiksi kuin Robotin ilmoittamat, mutta ero on pieni. Sen lisäksi Excel-laskenta-alusta laskee alkuperäiset paalukuormat standardien mukaisesti. Ero johtuu siitä, että mitoittavin ristikkomalli on Robotissa eri kuin mitä Excel käyttää. Robotin käyttämässä mallissa paalulle tuleva kuorma

kasvaa muutamalla prosentilla ja vetosauvan vetovoima pienenee. Tästä johtuen alustaa voi hyvin käyttää tarkistettaessa virheellisen asennuksen aiheuttamia muutoksia, mutta jos paalun kapasiteetti on lähellä maksimia, on syytä käyttää myös muita laskentatapoja. Tämän myös laskenta-alusta ilmoittaa.

Alustan lisäosa tehtiin niin, että se laskee aina uudet sauvavoimat suurimmalla kuormien muutosprosentilla. Tästä johtuen lisäosan käyttöä suositellaan lähinnä asennusvirheen tarkistukseen, eikä niinkään erikoisen anturan suunnittelun lähtökohdaksi. Alustan käyttäjän on myös suhtauduttava kriittisesti sen antamiin tuloksiin, jos ne eivät vastaa oletettuja arvoja tai niiden suuruusluokka on epäuskottava.

6 Raudoituksen suunnittelu

Kun paalun sijaintivirhe kasvaa, täytyy anturan raudoituksen suunnitteluun kiinnittää erityistä huomiota. Täytyy myös ottaa huomioon anturan geometrian muutoksen tuomat uudet murtomekanismit. Näitä murtomekanismeja vastaan täytyy anturaan lisätä rauditus.

6.1 Vetoraudoituksen teräsmäärä

Vetoraudoituksen vaadittu teräsmäärä A_s saadaan kaavalla 21.

$$A_s = \frac{F_{t,i}}{f_{sd}} \quad (21)$$

missä

$F_{t,i}$ on vetosauvan jännitys
 f_{sd} on betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo.

Eurokoodin mukaan päätankojen halkaisijaksi tulee valita vähintään 8 mm, ja pääraudoituksen kokonaismäärä $A_{s,min}$ saadaan puolestaan laskettua kaavasta

22 (SFS-EN 1992-1-1, 160).

$$A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,10N_{Ed}}{f_{sd}} \\ 0,002A_c \end{array} \right. \quad (22)$$

missä

N_{Ed} on puristavan normaalivoiman mitoitusarvo
 f_{sd} on raudituksen myötölujuuden mitoitusarvo.

Jos päävetoraudituksen pinta-ala on suurempi kuin vähimmäisraudoitus, voidaan rakenneosan alapinnansuuntaiset tasan jakautuneet tangot jättää pois. Myös sivut ja yläpinta voidaan jättää raudittamatta, jos ollaan varmoja, ettei vetoa keskity näille alueille. (SFS-EN 1992-1-1, 162.)

Vetorauditus tulee keskittää paalujen päiden yli kulkeviin kaistoihin 0,1...0,2 h korkeudelle, missä h on anturan korkeus. Paalujen vapaavälin ollessa suurempi kuin kolmekertaa paalujen sivumitta, osa raudituksesta sijoitetaan paalujen väliin jäävälle alueelle. (Leskelä 2008, 456.) Vetoraudituksen sijoittelu on esitetty tarkemmin liitteissä 1–3.

Vetoraudituksessa on huomioitava paalujen sijaintien muutos. Rauditus täytyy suunnitella niin, että vetovoimat siirtyvät teräksille. Liitteissä 1–3 on esitetty, kuinka vetoraudituksen voi suunnitella niin, että se vastaa ristikkomallin geometriaa. Vetorauditusta suunnitellessa tulee muistaa, että ankkurointipituuden tulee olla riittävä ja että raudituksen jakoalue täyttää ehdot. Jokaista tapausta on syytä tarkastella aina tapauskohtaisesti.

6.2 Terästen etäisyydet

Vierekkäisten terästen etäisyyksien tulee olla sellaiset, että betonin valaminen ja tiivistäminen on mahdollista ja että riittävät tartuntaolosuhteet saavutetaan. Yhdensuuntaisten tankojen vapaaväli ja rinnakkaisten tankojen vaakakerrosten väli

voidaan laskea kaavalla 23. (SFS-EN 1992-1-1, s. 130.)

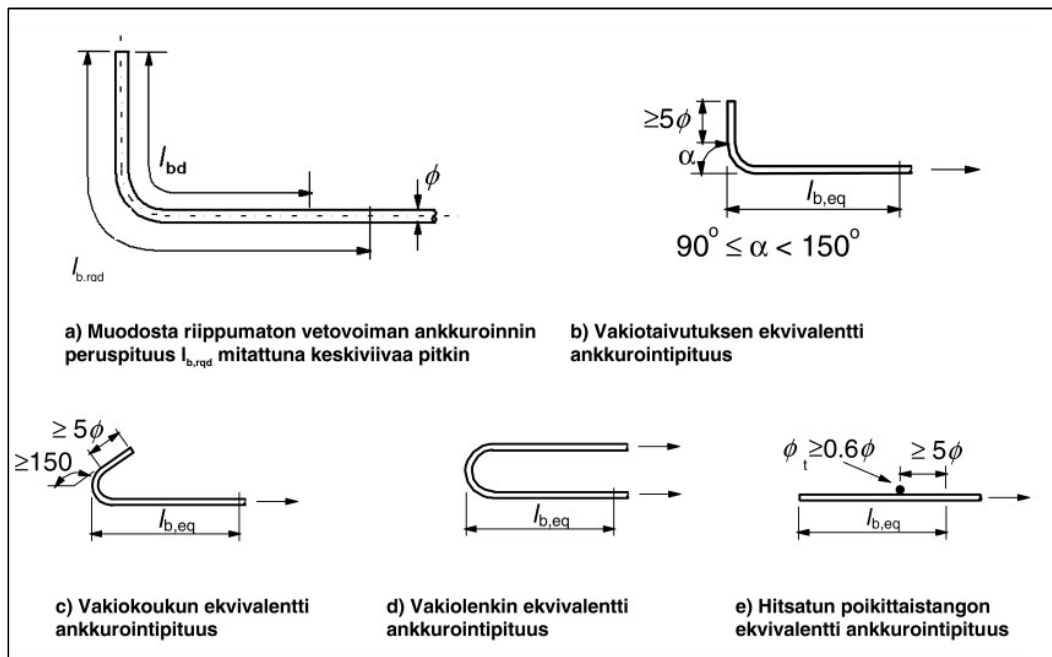
$$x_s = \max \begin{cases} k_1 * d \\ d_g * k_2 \\ 20 \text{ mm} \end{cases} \quad (23)$$

missä

k_1 on Suomessa 1
 d on teräksen halkaisija
 d_g on kiviaineksen suurin raekoko
 k_2 on Suomessa 3 mm.

6.3 Raudoituksen ankkurointi

Pääraudoituksen raudat, tangot ja hitsatut verkot ankkuroidaan siten, että tartuntavoimat siirtyvät betonille aiheuttamatta halkeilua tai lohkeilua. Poikittaisraudoitusta voidaan käyttää tarvittaessa. (SFS-EN 1992-1-1, 131.) Kuvassa 17 on esitetty eri ankkurointimenetelmiä.



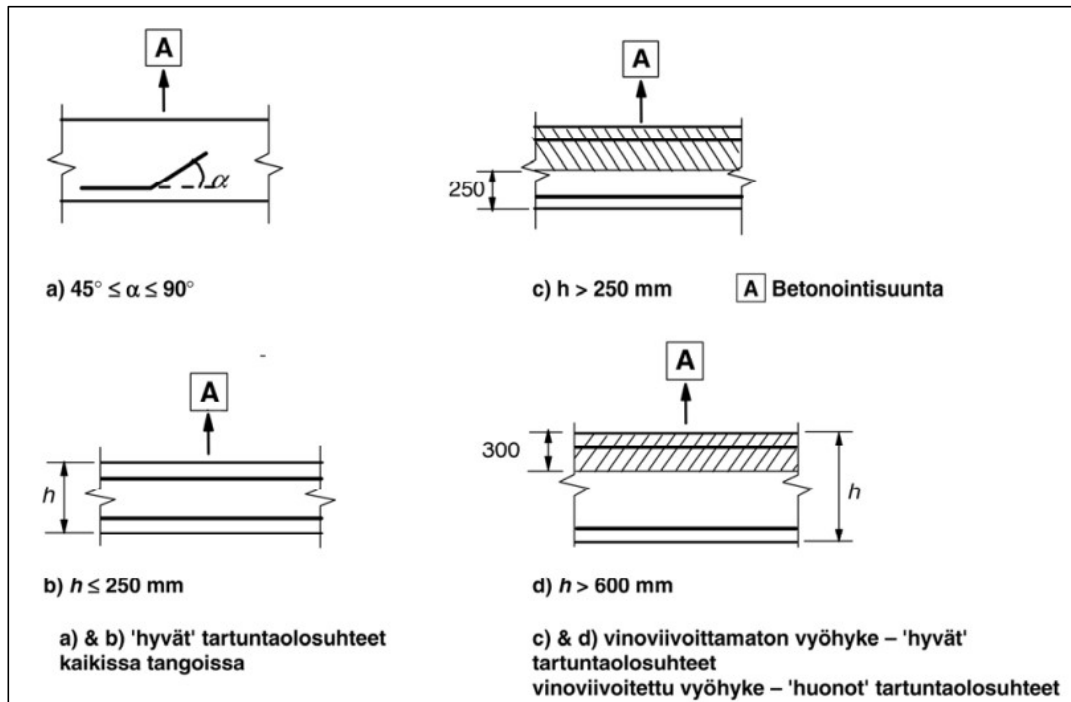
Kuva 17. Ankkurointimenetelmiä (SFS-EN 1992-1-1, 132)

Tartuntalujuuden mitoitusarvo f_{bd} murtorajatilassa saadaan kaavalla 24 (SFS-EN 1992-1-1, 132).

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2f_{ctd} \quad (24)$$

missä

f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo
 η_1 on riippuvainen tartuntaolosuhteiden laadusta, =1,0 kun hyvät olosuhteet, 0,7 muissa tapauksissa (kuva 18)
 η_2 on riippuvainen tangon halkaisijasta 1,0 kun $\Phi \leq 32$ mm, $(132 - \Phi) / 100$ kun $\Phi > 32$ mm.



Kuva 18. Tartunta olosuhteet (SFS 1992-1-1, 133)

Ankkurointipituuden perusarvo $l_{b,rqd}$ saadaan kaavalla 25 (SFS-EN 1992-1-1, 133).

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\Phi}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right) \quad (25)$$

missä

σ_{sd} on mitoitusjännitys ankkurointipituuden mittakohdasta
 f_{bd} saadaan kaavalla 24.

Ankkurointipituuden perusarvon $l_{b,rqd}$ avulla saadaan ankkurointipituuden mitoitussarvo l_{bd} kaavalla 26 (SFS-EN 1992-1-1, 134).

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (26)$$

missä

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ ovat kertoimia 0,7 – 1,0 (SFS-EN 1992-1, taulukko 8.2)

$l_{b,rqd}$ on ankkurointipituuden perusarvo

$l_{b,min}$ on ankkurointipituuden vähimmäisarvo.

Ankkurointipituuden vähimmäisarvo saadaan kaavoilla 27 tai 28 (SFS-EN 1992-1-1, 134).

Vetovoimalle:
$$l_{b,min} \geq \max\{0,3l_{b,rqd}; 10\phi; 100 \text{ mm}\} \quad (27)$$

Puristusvoimalle:
$$l_{b,min} \geq \max\{0,6l_{b,rqd}; 10\phi; 100 \text{ mm}\} \quad (28)$$

Normaalisti paaluanturaan ei tarvita ripustusraudoitusta, kun se mitoitetaan riskikomenetelmällä. Jos paalun sijaintivirheestä johtuen paaluväli kasvaa, on syytä ripustusraudoitusta käyttää. Ripustusraudoituksella voidaan varmistaa pilarikuorman N_{ed} siirtyminen paalulle.

6.4 Ripustusraudoitus

Paaluvälin ylittäessä neljä kertaa paalun sivumitan täytyy anturaan suunnitella ripustusraudoitus. Ripustusraudoitus mitoitetaan leikkausvoimalle $V_{sv,Ed}$ kaavan 29 mukaan:

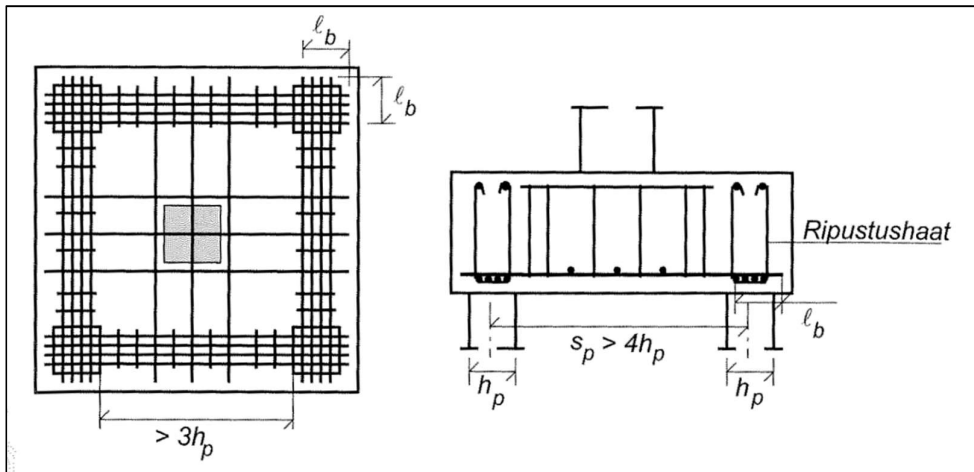
$$V_{sv,Ed} = \frac{N_{Ed}}{1,5 * n} \quad (29)$$

missä

n on paalujen lukumäärä.

Ripustusraudoituksen teräsmäärä A_{sv} saadaan kaavalla 30 ja se jaetaan paalujen vapaavälille kuvan 19 osoittamalla tavalla. Ripustushakojen ollessa kaksileikkeisiä voidaan A_{sv} jakaa kahdella. Ripustushakojen jako anturaan, jossa on virheellisesti asennettu paalu, on esitetty liitteissä 2 ja 3 (Leskelä 2008, 256).

$$A_{sv} = \frac{V_{sv,Ed}}{f_{sd}} \quad (30)$$



Kuva 19. Periaate ripustusraudoituksen sijoittamiseen, kun paaluväli on huomattava. (Leskelä 2008, 257)

6.5 Leikkaus- ja lävistyskestävyys

Kun anturan geometria muuttuu, on syytä tarkastaa myös sen leikkaus- ja lävistyskestävyys. Kun paalu siirtyy reilusti pois päin anturan keskipisteestä voi anturan geometria muuttua niin, että anturan leikkaus- ja lävistyskestävyys huononevat. Kestävyudet lasketaan kohtien 3.4 ja 3.5 mukaisesti.

6.6 Mallipiirustukset ja paalujatkokset

Liitteissä 1–3 on esitetty paalun sijaintivirheen huomioonottavat mallipiirustukset. Niissä on esitetty veto- ja ripustusraudoituksen sijoittelu tapauskohtaisesti. Liitteissä on esitetty äärimitat anturalle ja paaluvälille, mutta ne on suunniteltava aina tapauskohtaisesti.

Liitteissä 4 ja 5 on esitetty esimerkkejä, joilla paalujatkokset voidaan tehdä. Paalujatkoksia suunnitellessa on varmistettava, että anturalta tuleva voima siirtyy hallitusti paalulle. On myös otettava huomioon paalun ja paaluryhmän kapasiteetin mahdollinen heikkeneminen. Jokainen paalujatkos on suunniteltava tapauskohtaisesti, sillä niissä on huomioitava paalulle tulevat kuormat, liitostapa ja paalun kestävyys.

7 Ohjeita

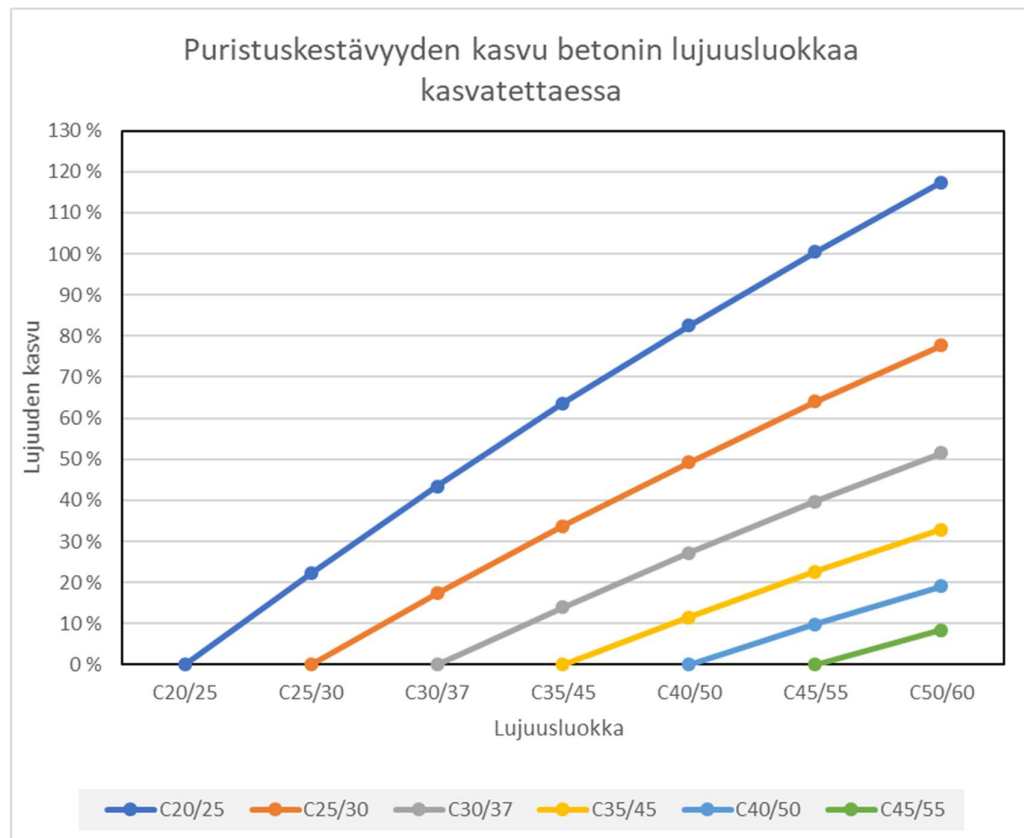
Seuraavaksi esitetään ohjeita, joilla paalun sijaintivirheen vaikutukset anturan kestävyteen saadaan helposti minimoitua.

7.1 Puristuskestävyys

Anturan geometrian muuttumisesta johtuen sen sisäinen maksimi puristusjännitys kasvaa. Puristusjännityksen kasvuun vaikuttaa paljon anturan uusi geometria, mutta yleensä se ei ylitä 40 prosenttia. Puristusjännityksen kasvu on otettava huomioon mitoituksessa.

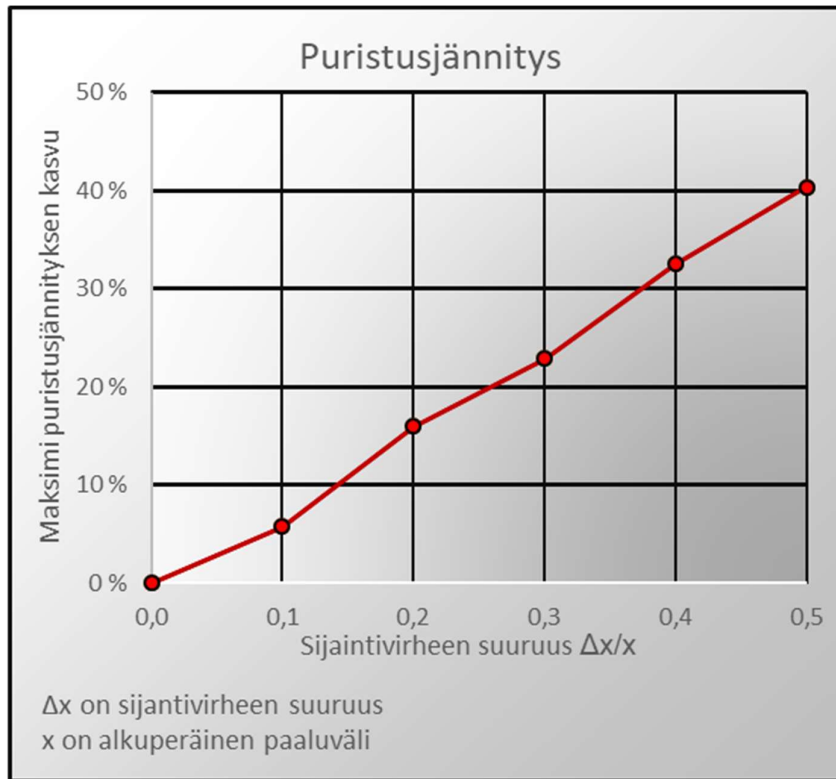
Puristusjännitystä voi pienentää kasvattamalla anturan korkeutta. Anturan paksuntaminen kannattaa suunnitella tapauskohtaisesti. Vaikutus on suhteellisen pieni puristusvoimaan, koska ristikkomenetelmällä suunniteltu antura on jo suhteellisen paksu.

Puristuskestävyyttä voidaan kasvattaa kasvattamalla betonin lujuusluokkaa. Betonin lujuusluokan kasvattamisen vaikutus puristuskestävyyteen on esitetty kuvassa 20. Kuvaajassa lujuuden kasvu on esitetty aina suhteessa alkuperäiseen lujuuteen.



Kuva 20. Puristuskestävyyden kasvu betonin lujuusluokkaa kasvatettaessa

Kuvassa 21 on esitetty kuvaaja, jonka avulla voidaan arvioida anturan maksimi puristusjännityksen kasvua nopeasti ilman tarkempaa tarkastelua, kun paalu on virheellisesti asennettu neljän paalun anturassa. Kuvaaja antaa varmalla puolella olevan arvon ja todellinen puristusjännityksen kasvu on todennäköisesti pienempi.



Kuva 21. Puristusjännityksen kasvu

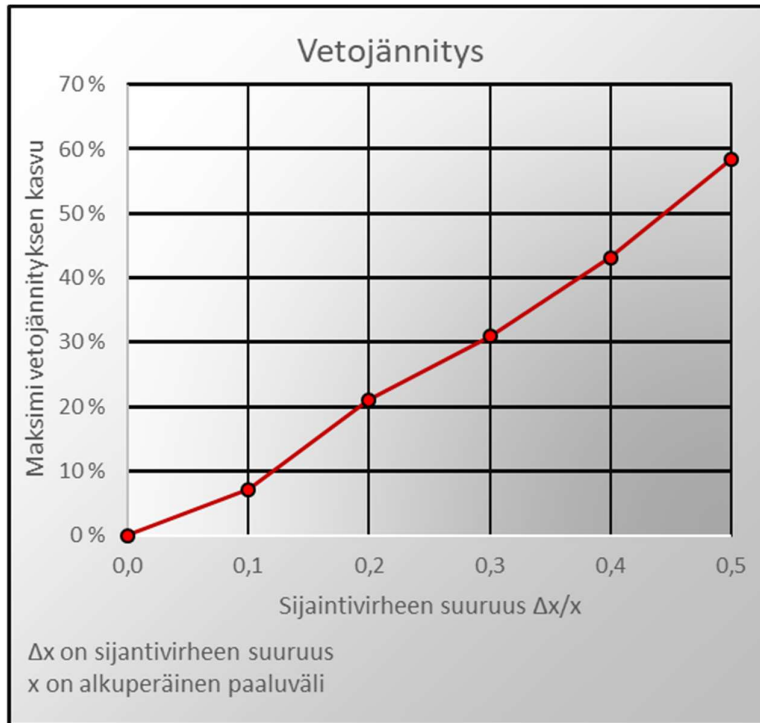
7.2 Vetokestävyys

Anturan geometrian muuttumisesta johtuen sen sisäinen maksimi vetojännitys kasvaa. Maksimi vetojännitys kasvaa geometriasta riippuen, mutta vain ääritapauksissa yli 60 %. Ääritapaukset on aina suunniteltava tapauskohtaisesti.

Vetojännitystäkin voidaan pienentää kasvattamalla anturan korkeutta. Korkeuden kasvattamista kannattaa harkita varsinkin, jos vaadittu teräsmäärä ei mahdu haluttuun sijaan.

Vetokestävyyttä voidaan kasvattaa lisäämällä pääraudoituksen määrää. Raudoitusta suosittelen lisäämään vähintään maksimi vetovoiman kasvun verran. Jos vetoraudoitus ei mahdu alkuperäisen suunnitelman mukaiselle alueelle, voi aluetta levittää kohti anturan keskipistettä.

Kuvassa 22 on esitetty kuvaaja, jonka avulla voidaan arvioida anturan maksimi vetojännityksen kasvua nopeasti ilman tarkempaa tarkastelua, kun paalu on virheellisesti asennettu neljän paalun anturassa. Kuvaaja antaa varmalla puolella olevan arvon ja todellinen vetojännityksen kasvu on todennäköisesti pienempi.



Kuva 22. Vetojännityksen kasvu

7.3 Paalukuorma

Kuvissa 23 ja 24 on esitetty kuvaajat, joiden avulla voidaan arvioida maksimi paalukuorman kasvua nopeasti ilman tarkempaa tarkastelua, kun paalu on virheellisesti asennettu neljän paalun anturassa. Kuvaajat antavat varmalla puolella olevan arvon ja todellinen paalukuorman kasvu on todennäköisesti pienempi. Kun paalu on siirtynyt kohti anturan keskipistettä, on syytä tarkistaa myös paalun ja paaluryhmän kantavuuden heikentyminen.



Kuva 23. Paalukuorman kasvu, kun paalu on siirtynyt kohti anturan keskipistettä



Kuva 24. Paalukuorman kasvu, kun paalu on siirtynyt poispäin anturan keskipisteestä

8 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyönä oli tarkoitus perehtyä paaluanturan mitoitukseen ja virheellisen paalun asennuksen aiheuttamiin ongelmiin. Ongelmista oli määrä valita tarkempaan perehtymiseen yksi, jonka ratkaisemiseen oli tarkoitus luoda ohjeet, taulukoita sekä laskenta-alusta.

Työssä käydään läpi ristikkomenetelmän käyttö paaluanturan mitoituksessa sekä valitun ongelman vaikutus siihen. Ongelmaksi valittiin yhden paalun asennusvirhe neljän paalun paaluanturassa. Kun ongelmaan oli perehdytty, Robot Structural Analysis Professional 2020 -ohjelmalla tarkasteltiin sen vaikutuksia mitoitukseen. Saatujen tulosten perusteella tehtiin lisäosa valmiiseen Excel-laskenta-alustaan. Lisäksi tuloksista muodostettiin taulukoita ja kuvaajia tulosten havainnollistamiseksi ja suunnittelutyön helpottamiseksi.

Paaluanturan raudoitukselle tehtiin ohjeet, jotka huomioivat paalun asennusvirheen. Ohjeissa esitetään tarvittavat toimenpiteet paalun asennusvirheen aiheuttamien anturan sisäisten voimien kasvun kumoamiseksi. Ohjeet toimivat myös asennusvirheettömälle paaluanturalle.

Paaluanturan mitoitukseen perehtyminen osoittautui luultua haastavammaksi eri lähteistä saatujen ohjeiden ristiriitaisuuden ja hajanaisuuden takia. Myös paalun sijaintivirheestä aiheutuvat ongelmat osoittautuivat yllättävän laajoiksi ja vaikeiksi tutkia. Tuloksista saatiin kuitenkin koottua tyydyttävät taulukot ja kuvaajat, joita pystytään hyödyntämään suunnittelutyössä.

Excel-laskenta-alusta päädyttiin tekemään valmiin SKOL-pohjan lisäosaksi, koska kokonaan uuden alustan tekeminen olisi vaatinut paljon lisätyötä ja SKOL-pohja sopi tarkoituksiin hyvin. Alustaan lisättiin myös lyhyitä ohjeita helpottamaan sen käyttöä.

Työssä onnistuttiin vastaamaan kaikkiin tavoitteisiin hyvin. Tuloksista saatiin tehtyä havainnollistavia kuvaajia ja taulukoita sekä laskenta-alusta, mitkä helpottavat suunnittelutyötä kyseisessä ongelmatilanteessa jatkossa. Kuitenkin laskenta-

alustasta olisi voitu tehdä kattavampi ja tarkempi tekemällä se alusta asti vastaamaan ongelmaa. Anturan sisäisiä voimia tutkittaessa olisi voitu käyttää tarkempia malleja tarkempien tulosten saamiseksi.

Työtä voidaan laajentaa kattamaan erikokoiset paaluanturat. Laskenta-alustaa voidaan myös jatkokehittämään tai kokonaan uuden tarkemman alustan tekeminen on mahdollista. Asennusvirhettä voidaan myös tutkia muilla laskentatavoilla, joilla saatettaisiin päästä todellisempiin ja luotettavampiin tuloksiin.

Lähteet

Betoniteollisuus. 2011. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan. Osa 6: Perustukset. https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoisen1992/Leaflet_6_Perustukset.pdf. Luettu 24.4.2020.

Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. 1.painos. Tampere: Tammermekniikka/AMK-Kustannus Oy.

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

RIL 254-2016. Paalutusohje PO-2016. 2016. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

SFS-EN 1992-1-1. 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2.painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

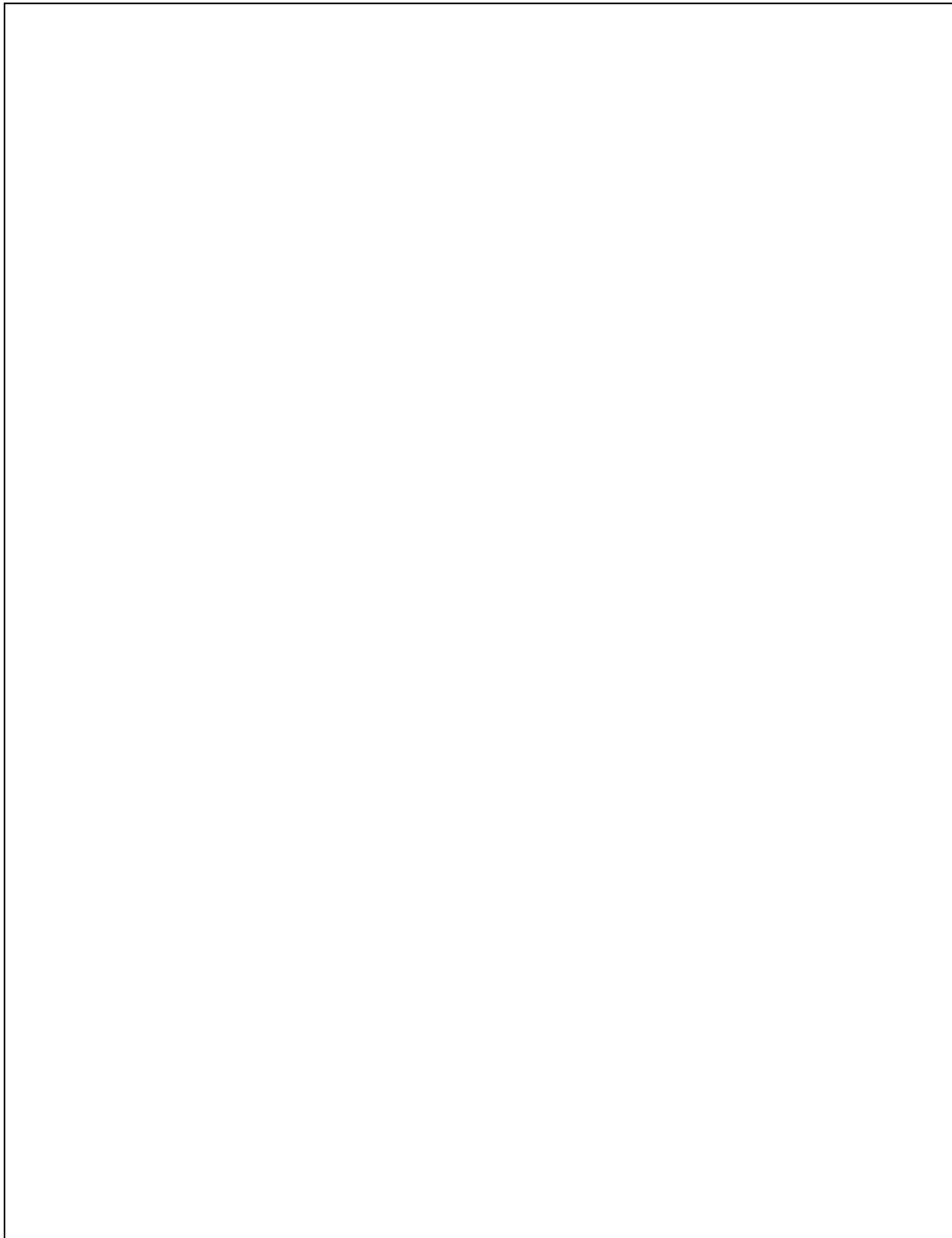
LIITE 1. MALLIPIIRUSTUS
PAALU ON SIIRTYNUT KOHTI ANTURAN KESKIPISTETTÄ

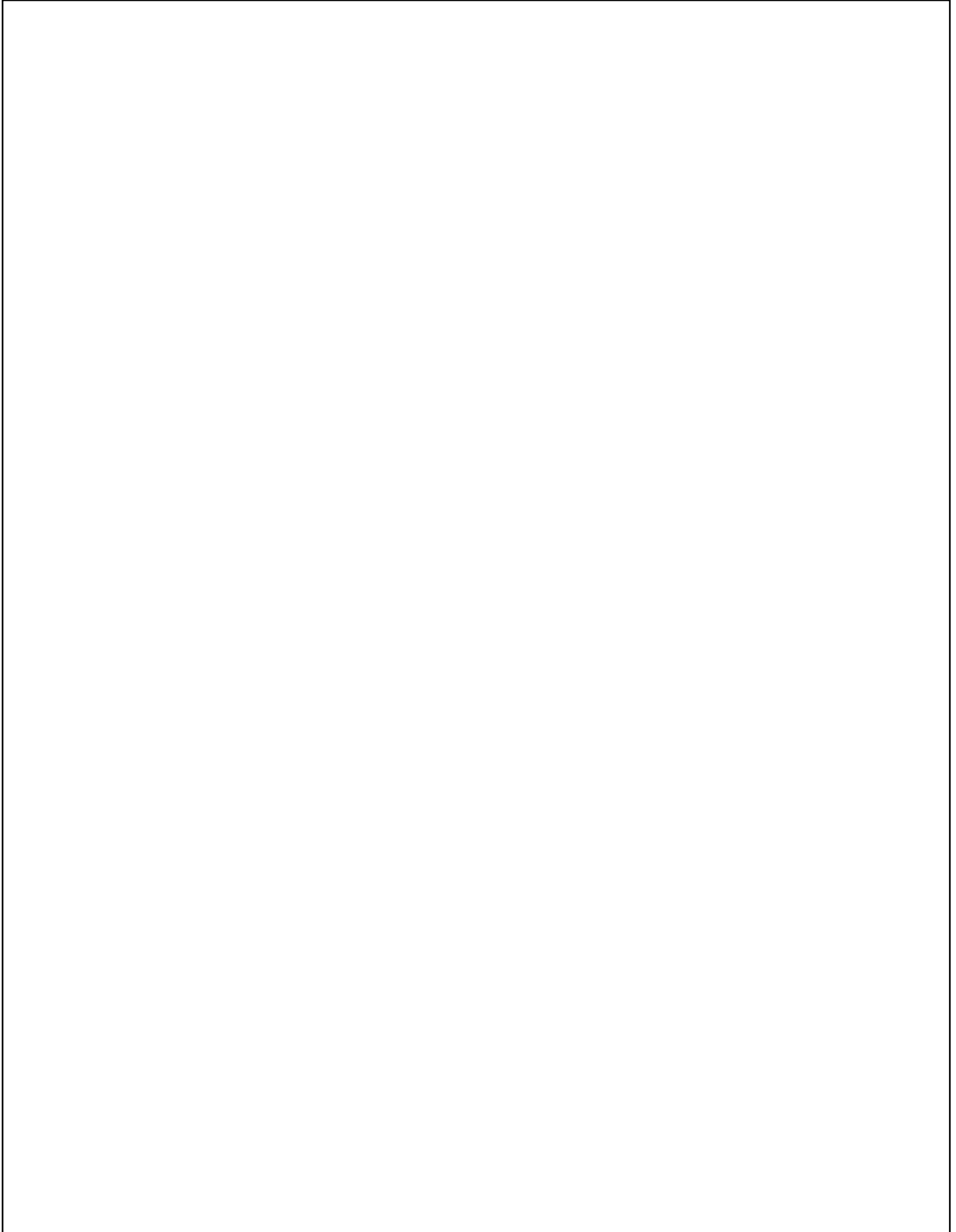
LIITE 2. MALLIPIIRUSTUS
PAALU ON SIIRTYNUT YHTEEN SUUNTAAN POISPÄIN ANTURAN KESKIPISTEESTÄ

LIITE 3. MALLIPIIRUSTUS
PAALU ON SIIRTYNUT KAHTEN SUUNTAAN POISPÄIN ANTURAN KESKIPISTEESTÄ

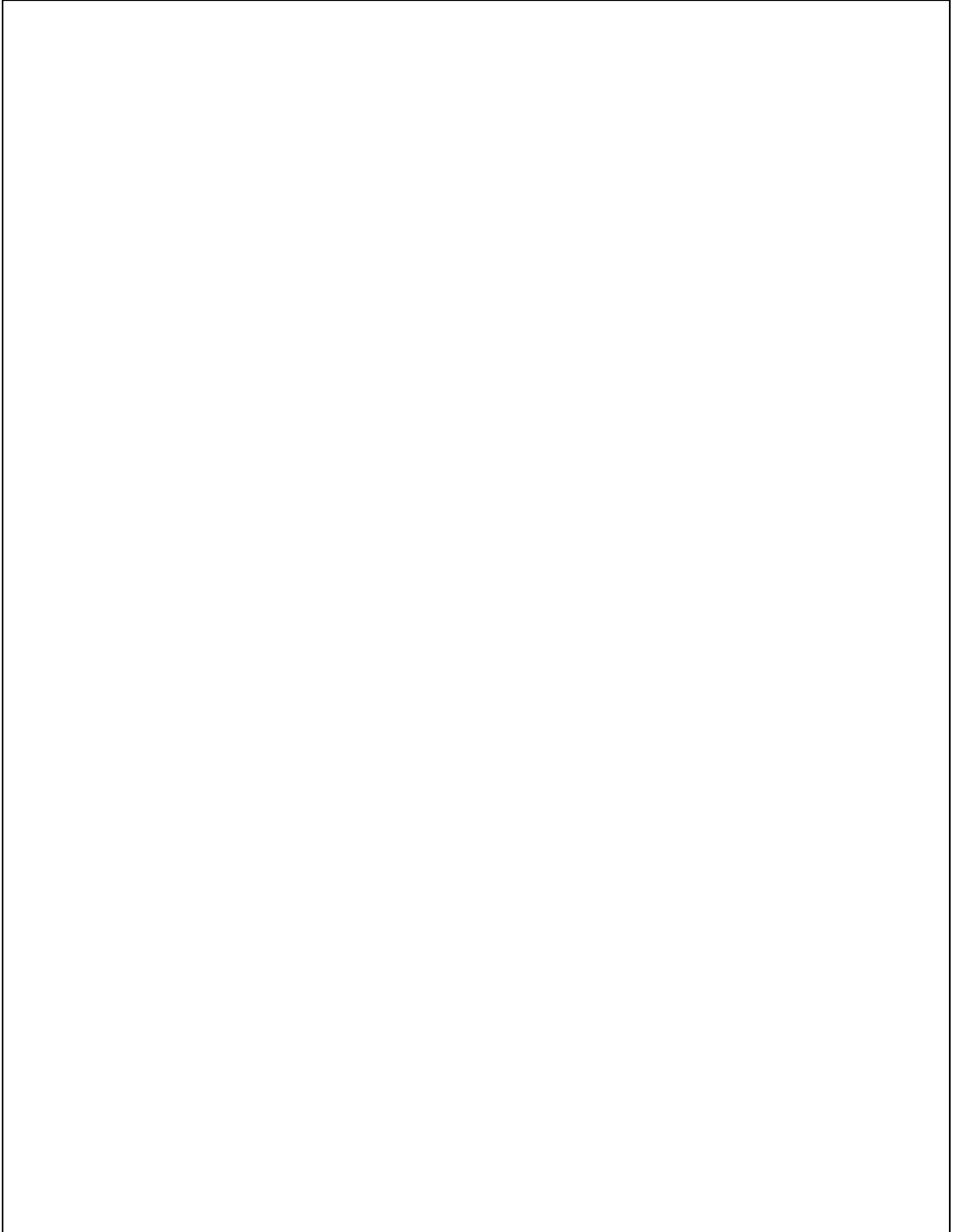
LIITE 4. MALLIPIIRUSTUS
PAALU ON ASENNETTU LIIAN SYVÄLLE

LIITE 5. MALLIPIIRUSTUS
PAALU ON ASENNETTU LIIAN SYVÄLLE

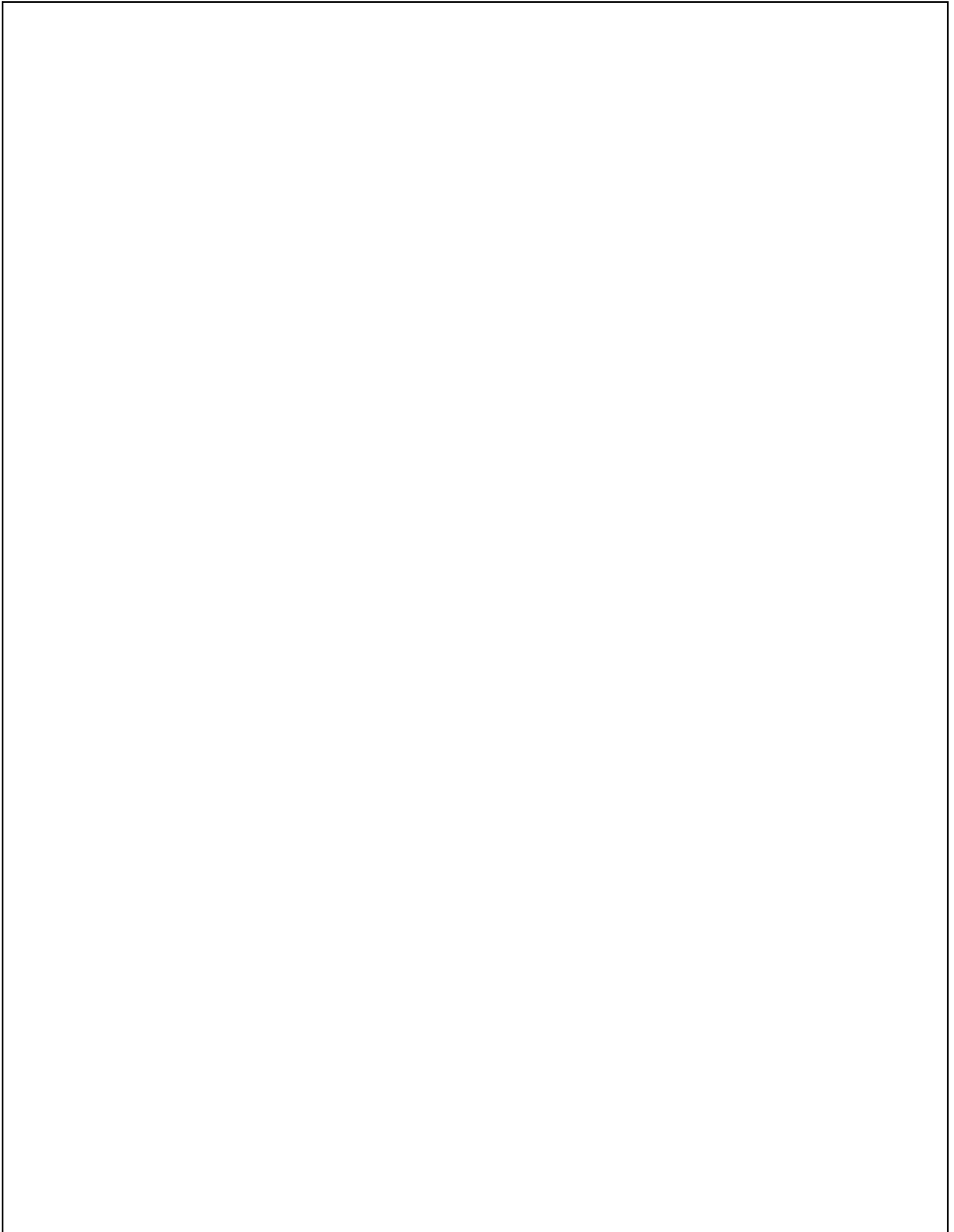




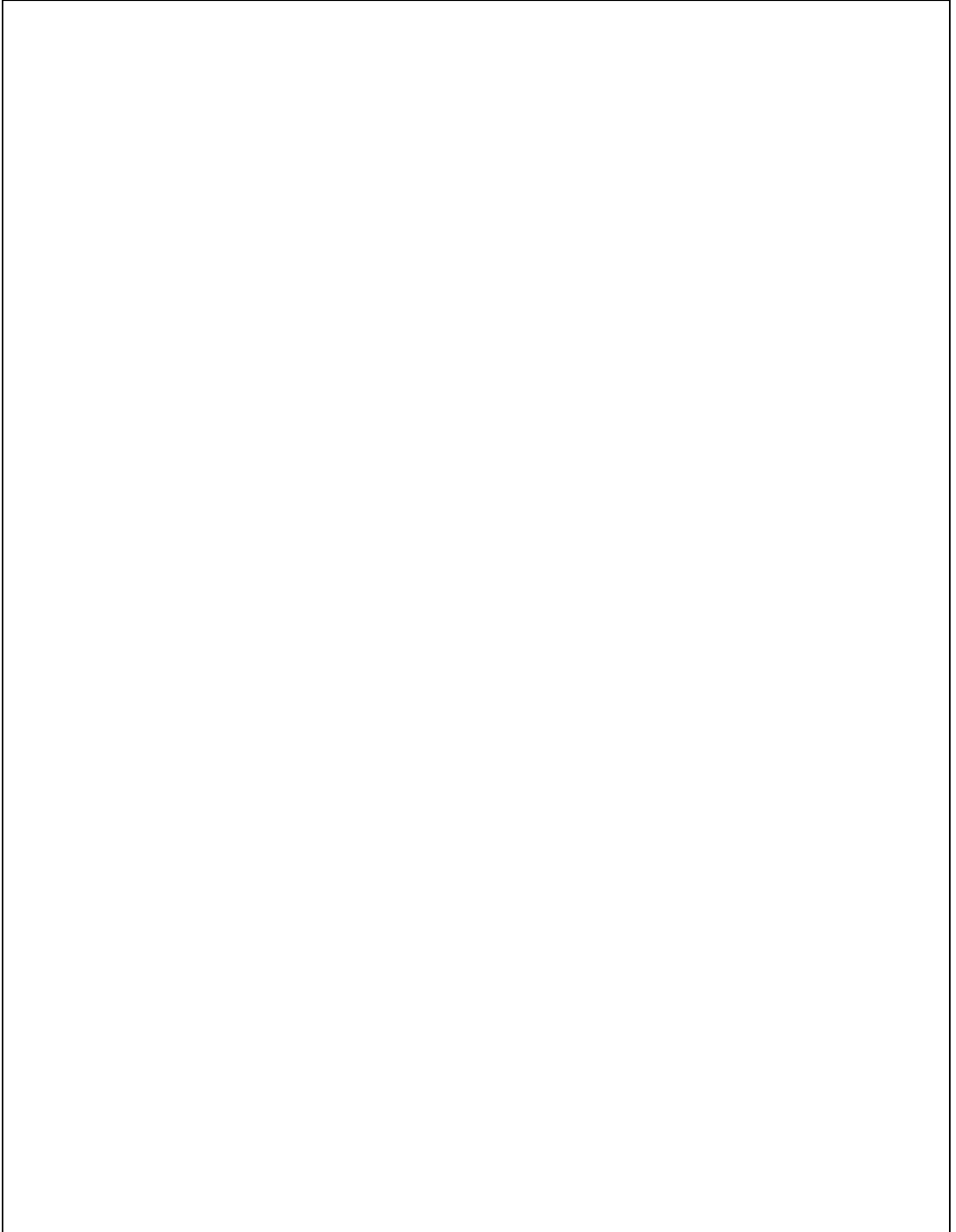
LIITE 7. RISTIKKOVOIMAT
PAALU ON SIIRTYNUT KAHTEN SUUNTAAN POISPÄIN ANTURAN KESKIPISTEESTÄ



LIITE 7. RISTIKKOVOIMAT
PAALU ON SIIRTYNUT KAHTEN SUUNTAAN POISPÄIN ANTURAN KESKIPISTEESTÄ



LIITE 7. RISTIKKOVOIMAT
PAALU ON SIIRTYNUT YHTEEN SUUNTAAN POISPÄIN ANTURAN KESKIPISTEESTÄ



LIITE 7. RISTIKKOVOIMAT
PAALU ON SIIRTYNUT YHTEEN SUUNTAAN POISPÄIN ANTURAN KESKIPISTEESTÄ

