

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talorakennustekniikka
Mika Alisaari

Opinnäytetyö

Voimajohtopylväiden detaljien mitoitusperusteet, niiden standardisointi ja lujuuslaskelmat

Työn ohjaaja: DI Risto Lilja
Työn teettäjä: Empower Oy
Työn valvojat: DI Janne Lallukka, DI Arto Uski

Tampere 5/2010

Tampereen ammattikorkeakoulu

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Talonrakennustekniikka

Tekijä Alisaari, Mika

Työn nimi Voimajohtopylväiden detaljien mitoitusperusteet, niiden standardisointi ja lujuuslaskelmat

Sivumäärä 31 + 22

Valmistumisaika Huhtikuu 2010

Työn ohjaaja DI Risto Lilja

Työn teettäjä Empower Oy, valvojina DI Janne Lallukka ja DI Arto Uski

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä selvitettiin erilaisten voimajohtorakenteisiin liittyvien detaljien mitoitusperusteet, päivitettiin niiden lujuuslaskelmat euronormien mukaisiksi ja määritettiin kullekin detaljille maksimikuorma tai muu mitoituskriteeri. Työn laajuuden rajoittamiseksi ei tässä työssä lähdetty selvittämään kuormitusten määräytymistä eri tapauksissa, vaan mitoituskuormat saatiin pylväsrakenteiden suunnitteluun tarkoitetuilla FEM-ohjelmilla, joilla voitiin laskea detaljeille tulevia voimakomponentteja.

Työn tavoitteena oli tehdä Empower Oy:n suunnittelijoille yksinkertaiset valintakriteerit detaljien koon määrittämiseksi sekä nopeuttaa lujuuslaskelmien dokumentointia lisäämällä detaljeista tehdyt valmiit laskelmat projektikohtaisten pylväiden lujuuslaskelmien liitteeksi.

Avainsanat voimajohtopylväs, U-pultti, kulmauloke

TAMK University of Applied Sciences

Civil Engineering

Writer Alisaari, Mika

Thesis Strength calculations for power line structures connection details

Pages 31 + 22

Graduation time April 2010

Thesis supervisor Risto Lilja (MSc)

Co-operating company Empower Oy, supervisors Janne Lallukka (MSc) ja Arto Uski (MSc)

ABSTRACT

For this thesis the connection details of power line structures were examined, and their strength calculations were updated according to Eurocode. Also the maximum load or other design criteria were defined for each detail. In order to limit the extent of this work the defining of tower loads were decided to be left out. Mentioned loads were acquired from FEM-programs which are designed to calculate force components for connection details.

The aim of this work was to create simple selection criteria to determine the sizes of details for the Empower Ltd. Engineers, and also to speed up projects' documentation process.

Keywords tower, U-bolt, hinged dropper

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	5
1.1 Pylvästyypit	5
1.1.1 Harustetut pylväät	5
1.1.2 Vapaastiseisovat pylväät.....	7
1.2 Rakenteiden kuormat.....	8
1.3 Standardit.....	9
2. U-pultit.....	11
2.1 Yleistä.....	11
2.2 Lähtötiedot	11
2.3 Laskenta.....	12
2.4 Esimerkkilaskelma	14
2.5 Lopputulokset.....	14
3. Kulmaulokkeet.....	15
3.1 Yleistä.....	15
3.2 Lähtötiedot	16
3.3 Laskenta.....	16
3.4 Esimerkkilaskelma	19
3.5 Lopputulokset.....	20
4. Peruspulttiliitos	21
4.1 Yleistä.....	21
4.2 Lähtötiedot	21
4.3 Laskenta.....	22
4.4 Esimerkkilaskelma	27
4.5 Lopputulokset.....	28
Lähteet	29
Liitteet.....	30
Liite 1: U-pulttien kuvaajat.....	30
Liite 2: U-pulttien Excel-laskelmat.....	32
Liite 3: Kulmaulokkeen Excel-laskelmat.....	36
Liite 4: Peruspulttiliitoksen Excel-laskelmat	38

1. Johdanto

Olen saanut tiivistä ohjausta työn eri luvuissa oleviin voimajohtopylväiden rakenteellisiin ja toiminnallisiin asioihin Empower Oy:n rakennesuunnittelijoilta DI Janne Lallukalta sekä DI Arto Uskilta. Voidaankin sanoa heidän olevan työn pääasiallinen lähde normien lisäksi, vaikka heitä ei ole eritelty tekstiin lähdeviitteillä.

1.1 Pylvästyypit

Voimajohtopylväillä on yleisesti käytössä kahta eri pylvästyppiä, harustettuja ja vapaastiseisovia. Pylväät valmistetaan yleisimmin teräksestä, mutta harustettujen 110 kV:n pylväiden jalat voidaan tehdä myös puusta. Pylväät kuljetetaan pystytyspaikalle osina ja ne kootaan paikan päällä.

Käytettävän pylvään valintaan vaikuttavat muun muassa:

- pystytyspaikan maasto
- pylväälle tulevat kuormat, jotka määräytyvät johdinten kulmasta pylväällä sekä perättäisten pylväiden etäisyydestä eli jännevälistä
- mahdolliset toisten johtojen ylitykset
- ajoteiden, junaratojen ja muiden rakenteiden läheisyys.

Edellisen jaottelun lisäksi voimajohtopylväät voidaan vielä jakaa kulma- ja suoran paikan pylväisiin. Suoran paikan pylväitä käytetään nimensä mukaisesti niin, että johtimet kulkevat suoraa linjaa. Kulmapylväitä käytetään taas silloin, kun johtimien kulkua halutaan ohjata johonkin suuntaan, jolloin niillä tehdään halutun astemäärän suuruinen muutos. Kulmapylväiden varusteluosat eroavat suoran paikan pylväiden varusteluosista erilaisten kuormitusten vuoksi.

Jokaisella pylväällä on tietty rooli voimajohtolinjalla. Suurin osa pylväistä on tavallisia kannatuspylväitä, mutta välillä johdinvoimien tasaamiseksi käytetään kiristyspylvästä. Kiristyspylväs eroaa kannatuspylvästä siten, että siinä johtimet katkeavat pylvään molemmin puolin ja ne yhdistetään toisiinsa erillisellä johdolla, jota kutsutaan jompiksi. Päätepylväksi puolestaan kutsutaan pylvästä, jolle voimalinja päättyy.

Johdinten lisäksi voimajohtopylväällä kulkevat sen yläpäässä olevien ukkosulokkeiden kautta ukkosköydet, jotka pyrkivät estämään ukkosen iskemisen johtimiin.

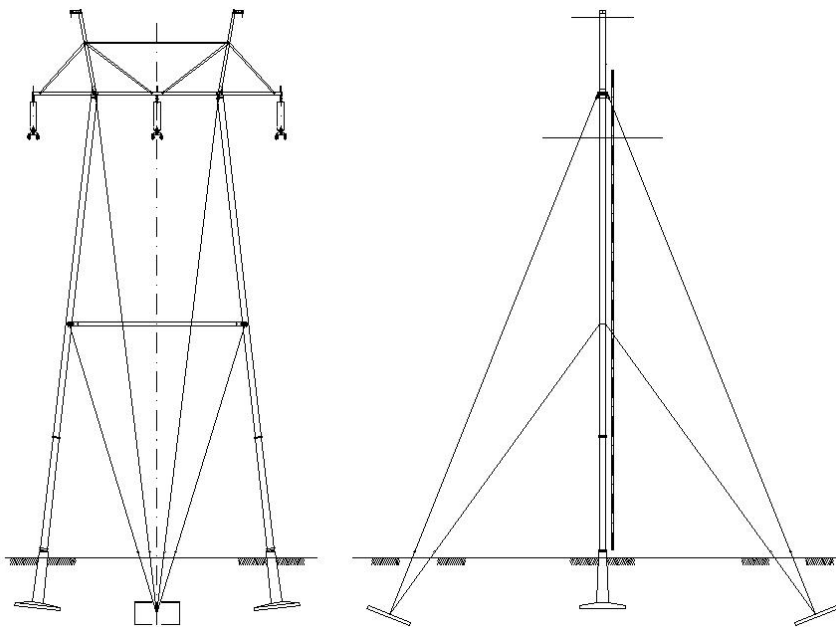
1.1.1 Harustetut pylväät

Harustetuilla pylväillä (kuva 1) on yksinkertainen runko, johon kuuluu kaksi jalkaa ja jalkojen yläpäässä poikittain kulkeva orsi. Korkeilla pylväillä voi myös olla tukiorsia jalkojen keskivaiheilla

jäykistämässä rakennetta. Pylvään jalat kiinnitetään perustuselementteihin niin sanotun tyvitapin avulla. Tyvitappi valetaan tehtaalla perustuselementtiin ja pylvään jalkaan tehdään siihen sopiva reikä. Pystytysvaiheessa koottu pylväsrunko vain lasketaan perustuselementin päälle. Liitoksessa ei käytetä kiristäviä kiinnikkeitä.

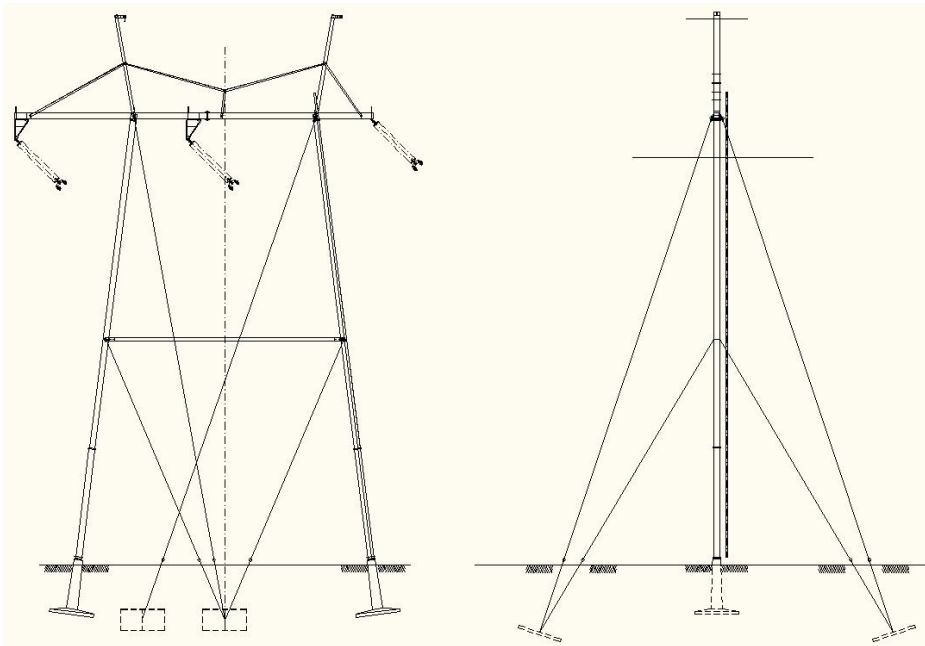
Teräspylvään jalat tehdään useimmiten pyöreästä CFCHS-putkesta ja orret CFRHS-neliö/suorakaideputkipalkista. Jalat ja orret voidaan myös tehdä ristikkorakenteisina. Ukkosulokkeina käytetään yleensä suorakaideputkia ja vetotankoina käytetään kulmateräksiä tai lattarautoja. Harustettu pylväs kiinnitetään maahan teräsvaijereilla, joita kutsutaan haruksiksi. Haruksia on molemmin puolin kaksi tai neljä, ja ne kiinnitetään pylväässä jalan yläpäihin ja mahdollisiin välitorsiin.

Maassa harukset kiinnitetään harusankureihin, joihin yleensä käytetään maahan upotettavia teräsbetoni-laattoja, joihin on kiinnitetty U-pulteilla kaksoissilmukat. Käytettävät U-pultit ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin tämän työn osiossa 2 käsitellyt U-pultit. Kaksoissilmukoiden yläpäät ovat maan pinnan yläpuolella, ja harukset kiinnitetään niihin kiilakiristimillä. Kalliolla harusankkuri voidaan korvata kalliioon juotettavalla lenkillä, johon kaksoissilmukat kiinnitetään.



Kuva 1: Harustettu suoran paikan pylväs (Kuva: Mika Alisaari)

Kulmapylväillä johtimet pyrkivät vetämään pylvästä vinottain, joten pienillä kulmilla harukset asennetaan hieman pylvään keskilinjan ulkopuolelle haruskuormien tasaamiseksi. Suurilla kulmilla harukset kiinnitetään kuvan (2) mukaisesti kahteen eri pisteeseen. Kulmapylväällä käytetään myös johdinten kallistumisen vuoksi kulmaulokkeita, joita on käsitelty tämän työn luvussa 3.

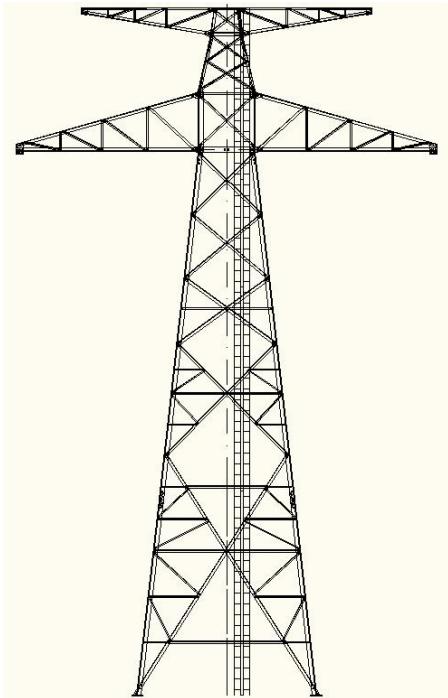


Kuva 2: Harustettu kulmapylväs (Kuva: Mika Alisaari)

1.1.2 Vapaastiseisovat pylväät

Vapaastiseisovat pylväät ovat yleensä L-profiileista valmistettuja neliömäisiä ristikkorakenteita. (Ks. kuva 3.) Harustetusta pylväästä poiketen vapaastiseisova pylväs kiinnitetään paarteiden alapäistä perustukseen. Yleensä perustuksina käytetään paikalla valettuja teräsbetonirakenteita. Kalliopaikoilla voidaan käyttää erillisiä kalliopilareita. Hyvissä olosuhteissa ja perustukselle tulevien kuormien ollessa pieniä voidaan käyttää myös elementtiperustuksia.

Vapaastiseisovia pylväitä käytetään yleensä silloin, kun johdolle varattu tila ei riitä harustetulle pylväälle. Niitä käytetään myös silloin, kun harustetun pylvään maksimikorkeus ei jollain erityisellä paikalla riitä. Myös 400 kV:n johdoilla kiristyspylväät on tehtävä vapaastiseisovina.



Kuva 3: Vapaastiseisova pylväs (Kuva: Mika Alisaari)

Vapaastiseisovissa pylväissä pylvään orret tehdään myös jalan tapaan ristikkorakenteisina. Johtimissa kiinni olevien eristinketjujen kiinnitysosina käytetään useimmiten CFRHS-neliöputkipalkkeja tai UPE-palkkeja. Osat liitetään toisiinsa pulttiliitoksia. Joissain tapauksissa osa rakenteesta voidaan kiinnittää toisiinsa hitsaamalla. Vapaastiseisovilla kulmapylväillä käytetään harustettujen pylväiden tapaan kulmaulokkeita.

1.2 Rakenteiden kuormat

Voimajohtopylväiden pysyvät kuormat määräytyvät jännevälin, johdintyyppin, johtokulman ja käytettävän pylvään mukaan. Pysyvään kuormaan on myös otettava huomioon pylvällä käytettävät varusteet ja kiinteät laitteet. Näiden lisäksi huomioidaan johtimille, eristimille ja pylvälle tulevat ulkoiset muuttuvat kuormat, kuten tuuli, lumi ja jää. Myös asennuksen ja kunnossapidon aikaiset kuormitukset on otettava huomioon muuttuvina kuormituksina. Mitoittavan kuormitustapauksen selvittämisessä on otettava huomioon edellä mainittujen kuormien yhdistelmät. Taulukossa 1 on esitetty ilmajohtonormin mukaiset standardikuormitustapaukset.(SFS-EN 50341-1, 76-104) Näiden kuormitustapausten lisäksi voimajohtonormissa on myös eritelty satunnaiset kuormitukset, joihin voidaan lukea esimerkiksi lumivyöryistä sekä johdinten katkeamisesta aiheutuvat kuormat.

Kuormitus-tapaus	Tapausten kuvaus
1 a	Huipputuulikuorma
1 b	Tuulikuorma minimilämpötilassa
2 a	Tasainen jääkuorma kaikissa jänteissä
2 b	Tasainen jääkuorma, poikittainen taivutus
2 c	Toispuolinen jääkuorma, pitkittäinen taivutus
2 d	Toispuolinen jääkuorma, vääntötaivutus
3	Yhdistetyt tuuli- ja jääkuormat
4	Rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset kuormat
5 a	Varmuuskuormat, vääntökuormat
5 b	Varmuuskuormat, johdon suuntaiset kuormat

Taulukko 1: Standardikuormitustapaukset (SFS-EN 50341-1, 104)

Rasitukset siirtyvät johtimilta eristinketjun kautta pylvään orsirakenteelle ja tätä pitkin koko pylvääle. Harustetuilla pylväillä johtimilta tulevat vaakavoimat siirtyvät pylvään jalalle puristukseksi ja haruksille vedoksi. Vapaastiseisovilla pylväillä vaakavoimat aiheuttavat kaatavan momentin, joka siirtyy pylvään paarteissa ristikkorakenteen vuoksi puristuksena / vetona.

Eri pylvästyypeillä on ominaisia mitoittavia kuormituksia. Suoran paikan kannatuspylväillä mitoittavaksi kuormaksi tulee yleensä maksimi tuulikuorma tai tuulen ja jään yhdistetty kuormitus. Lisäksi orsilla ja muilla pylvään osilla voivat varmuuskuormat olla mitoittavia. Suoran paikan pylvällä johtimilta tulevat vetovoimat eivät rasita pylvästä, kun taas kiristyspylväillä eri puolilta tulevat johtimien vetovoimat voivat olla erisuuret, jolloin ne oleellisesti vaikuttavat pylvääle tuleviin kuormituksiin. Lisäksi kiristyspylväät täytyy mitoittaa toispuoleiselle asennuskuormalle, jolloin johtimet on asennettu vain pylvään toiselle puolelle. Kulmakannatuspylväillä tuulikuormien lisäksi johtimien vetovoimasta tulee johtokulman suuruudesta riippuvia vaakavoimia pylvääle.

1.3 Standardit

Voimajohtojen yleiset vaatimukset sekä suunnitteluperusteet on esitetty standardeissa:

- SFS-EN 50341-1: Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä.
Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt
- SFS-EN 50341-3-7: Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä
Osa 3-7: Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt

Teräsosien ja -liitosten mitoitus on esitetty standardeissa:

- SFS-EN 1993-1-1: Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.

Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt

- SFS-EN 1993-1-8: Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.

Osa 1-8: Liitosten mitoitus

- SFS-EN 1993-1-10: Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.

Osa 1-10: Materiaalin sitkeys ja paksuussuuntaiset ominaisuudet

2. U-pultit

2.1 Yleistä

U-pultit ovat kuvan 4 mukaisia voimajohtopylväissä käytettäviä kiinnikkeitä, joiden avulla johtimissa kiinni oleva eristinketju kiinnitetään pylvään orsirakenteeseen. Ne valmistetaan pyörötangosta taivuttamalla ja päihin leikataan kierteet. U-pultit kiinnitetään pylvään orsirakenteena toimivan CFRHS-putkeen tehtyihin reikiin siten, että putki tulee kuvassa 5 esitettyjen mittojen e ja b väliin.



Kuva 4: U-pultti ja kiristysosat (Kuva: Mika Alisaari)

Ennen U-pultin kiinnittämistä orsirakenteeseen pujotetaan eristinketjussa oleva kiinnike toisen sakaran läpi, jolloin kiinnike jää U-pultin ja putken väliin. Tämän jälkeen sakaroihin laitetaan aluslevyt ja liitos kiristetään tuplapultein kireälle. U-pultti mahdollistaa eristinketjun pienen liikkeen molemmissa suunnissa ja helpottaa asennusta, kuitenkin olemalla varma ja yksinkertainen liitostapa.

2.2 Lähtötiedot

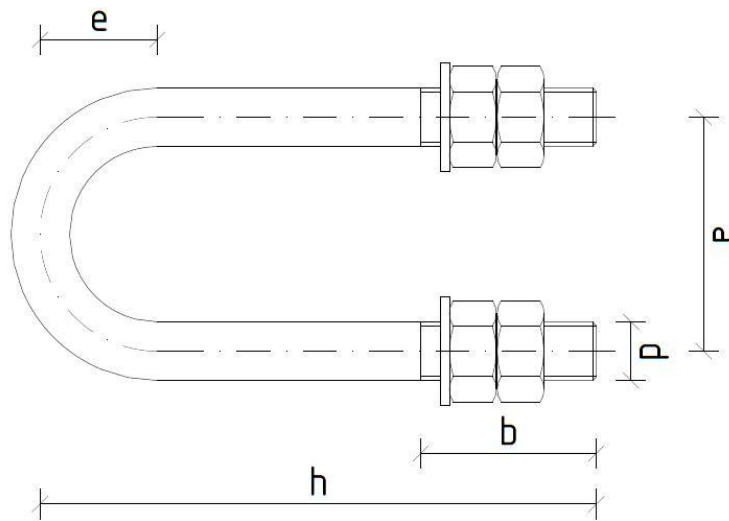
U-pulttien valmistuksessa käytetään standardin EN 10025-2 mukaista S355J2-terästä, jonka myötölujuus on 355 N/mm^2 (SFS-EN 1993-1-1, 26). U-pultteja valmistetaan viitenä eri kokona nimettynä käytettävän terästangon mukaan seuraavasti:

- UM 20
- UM 24
- UM 30

- UM 36
- UM 42.

Erottavina mittoina ovat siis paksuus (d), pituus (h), kierteiden pituus (b) ja sankaväli (a), jotka on määritetty kuvassa (5). Paksuus (d) määrittää suurelta osin taivutus- ja vetokestävyyden.

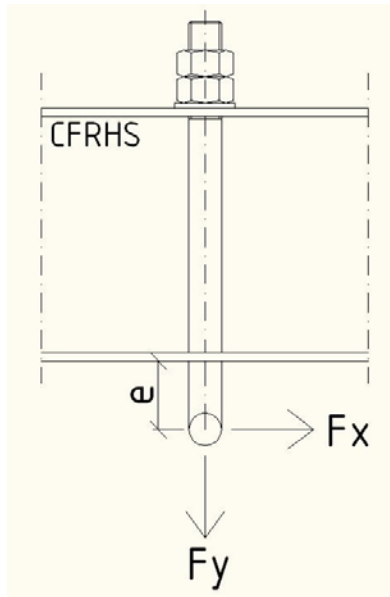
Momenttivarren pituudella on suuri merkitys mitoituksessa, koska millimetrienkin ero suurilla voimilla vaikuttaa kestävyteen paljon. Momenttivarren e arvona laskelmissa on käytetty sen minimiarvoa $a/2$. Pituus (h) puolestaan määräytyy ortena käytettävän CFRHS-putken koosta, koska U-pultti täytyy pystyä kiristämään orteen kiinni tiukasti.



Kuva 5: U-pultin muuttuvat mitat (Kuva: Mika Alisaari)

2.3 Laskenta

U-pulttien lujuuslaskelmissa on huomioitava johtimilta U-pultille välittyvä veto ja taivuttava voima. Laskelmissa vetoa kuvaa pystyvoima F_y ja taivutusta vaakavoima F_x , jotka ovat esitetty kuvassa 6. U-pultin lujuutta tarkastellaan jännityksen kautta, eli vetävä voima on jaettu u-pultin leikkauksen pinta-alalla ja vaakavoima F_x :stä aiheutuva taivutus on jaettu taivutusvastuksella. Tämän jälkeen voimista aiheutuvat jännitykset on laskettu yhteen ja tulosta on verrattu materiaalin osavarmuusluvulla γ_M jaettuun teräksen myötölujuuteen. Taivutus- ja vetojännityksen oletetaan jakautuvan tasan U-pultin molempiin haaroihin.



Kuva 6: Orren leikkaus ja U-pulttiin vaikuttavat voimat (Kuva: Mika Alisaari)

Voimajohtonormin mukaisesti suoran paikan pylväillä olevilla U-pulteilla osavarmuusluku $\gamma_M = 1,1$. Kuitenkin pääte-, kiristys- ja kulmapylväillä (>10 astetta) on käytettävä lisäkerrointa 1,1, jolla kerrotaan osavarmuusluku γ_M . Näin saadaan $\gamma_M = 1,1 \cdot 1,1 = 1,21$. (SFS-EN 50341-3-7, 10).

Laskentaan on käytetty kaavaa 1.0, josta on johdettu kaava 1.2.

$$\frac{F_y}{A} + \frac{M_x}{W} = f_{yd} \quad (1.0)$$

$$\frac{F_y}{A} + \frac{F_x \cdot e}{W} = \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (1.1)$$

Kun tiedetään voiman F_y suuruus, voidaan ratkaista F_x :n maksimiarvo käyttäen kaavaa 1.2

$$F_x = \frac{\left(\frac{f_y}{\gamma_M} - \frac{F_y}{A}\right) \cdot W}{e} \quad (1.2)$$

jossa F_x on taivuttava voima
 F_y on aksiaalinen voima
 f_y on rakenneteräksen myötöraja
 γ_M on osavarmuusluku
 A on poikkileikkauksen pinta-ala
 W on taivutusvastus

e on momenttivarren pituus.

Laskennassa käytettiin apuna Excel-ohjelmaa, johon syötettiin F_y :n arvoja 5 kN:n välein ja tuloksiksi saatiin suurin sallittu taivuttavan voiman suuruus.

2.4 Esimerkkilaskelma

Tässä laskelmassa tutkitaan UM 20:tä osavarmuusluvun γ_M :n ollessa 1,1. Kaavalla 1.2 ratkaistaan taivuttava voima F_x aksiaalisen voiman F_y ollessa 100 kN.

$$F_x = \frac{\left(\frac{355 \text{ N/mm}^2}{1,1} - \frac{100000 \text{ N}}{628,3 \text{ mm}^2} \right) \cdot 1570,8 \text{ mm}^3}{40 \text{ mm}} = 6,4 \text{ kN}$$

2.5 Lopputulokset

Laskemien lopputuloksena saatiin kaksi kuvaajaa sekä suoran paikan pylväille että pääte-, kiristys- ja kulmapylväille. Niissä jaettiin yhteen kuvaajaan pulttikoot UM 20, UM 24, UM 30 ja toiseen kuvaajaan UM36 ja UM 42. Kuvaajissa pystyakselilla oli taivuttava voima F_x ja vaaka-akselilla aksiaalinen voima F_y . Kuvaajien selkeyden vuoksi on vaaka-akselin laajuus valittu mahdollisimman käytännölliseksi. Kuvaajat ja Excel-laskelmat ovat työn liitteinä (1 ja 2).

3. Kulmaulokkeet

3.1 Yleistä

Kulmaulokkeet (Ks. kuva 7) ovat pyöröteräksestä taivuttamalla ja liitososia käyttäen hitsaamalla valmistettuja välikappaleita voimajohtopylvään orsirakenteen ja eristinketjun välille. Kulmapylväillä eristinketju kallistuu johtokulman suuntaan, ja näin ketjun alapäässä olevat jännitteiset osat pyrkivät taantumaa liian lähelle pylvään teräsosia. Kulmaulokkeella voidaan siis varmistaa orsirakenteen ja jännitteisten osien riittävä etäisyys toisistaan.



Kuva 7: Kulmauloke H = 1,2 m (Kuva: Mika Alisaari)

Erikokoisia kulmaulokkeita tarvitaan johtokulman suuruuden vaihdellessa. Periaatteessa suuremmalla johtokulmalla tarvitaan suurempi etäisyys orresta johdinketjun liitoskohtaan, eli tarvitaan suurempi kulmauloke. Jännitteisten osien minimietäisyydet muihin rakenteisiin on määritetty voimajohtorakenteiden suunnittelustandardissa SFS-EN 50341-1.

Kulmaulokkeet kiinnitetään orsirakenteeseen yläpäästään kahdella U-pultilla kuvassa 8 näkyviin kohtiin 1 ja 2 niin, että pylvään orren suuntainen liike estetään. U-pultit mahdollistavat kuitenkin kulmaulokkeen kallistumisen sivuttaissuunnassa, jolloin voimien epäkeskeisyydestä ei tule taivuttavia voimia tässä kyseessä olevassa tasossa.

3.2 Lähtötiedot

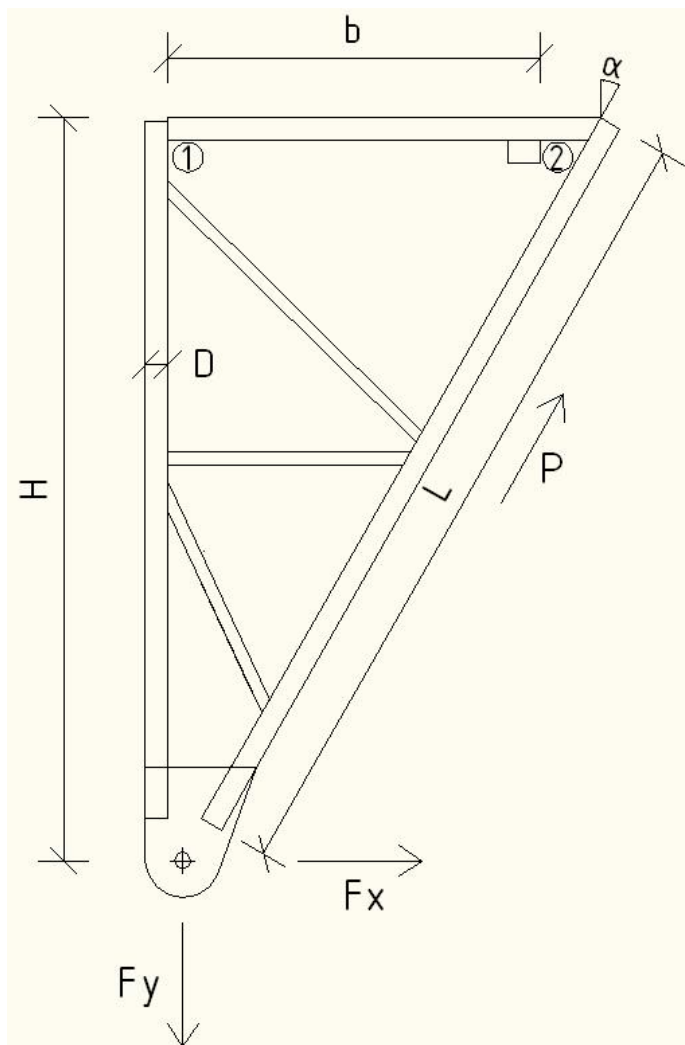
Kulmaulokkeet valmistetaan käyttäen standardin EN 10025-2 mukaista S355J2-terästä, jonka myötölujuus on 355 N/mm^2 (SFS-EN 1993-1-1, 26). Tätä arvoa voidaan käyttää jokaisella koolla, sillä myötölujuuden vaikutus nurjahduskestävyyteen ei ole kovinkaan suuri. Yleisessä käytössä on kuusi erikokoista kulmauloketta, jotka on nimetty kuvassa 8 näkyvän pystysuoran osan pituuden mukaan seuraavasti:

- H = 0,5 m
- H = 0,75 m
- H = 1,0 m
- H = 1,2 m
- H = 1,8 m
- H = 2,4 m.

Laskelmissa käytetään osavarmuuslukuna $\gamma_M = 1,21$, koska useimmiten kulmaulokkeita käytetään yli 10 asteen kulmilla ja toisaalta epäkeskeisyyksien vuoksi on hyvä käyttää suurempaa varmuutta. Kiinnikkeinä käytettävien U-pulttien tiedot ja mitoitus on esitetty luvussa 2.

3.3 Laskenta

Kulmaulokkeiden laskennassa huomioidaan vaakavoima F_x sekä pystyvoima F_y , jotka on esitetty kuvassa 8. Voima F_y aiheuttaa ulokkeen vertikaalille osalle vetoa ja voima F_x diagonaalille osalle puristusta P . Puristusta vastaanottava osa pyrkii nurjahtamaan, ja siksi mitoittavaksi tekijäksi tuleeekin sen nurjahduskestävyys, koska teräksen puhdas vetokestävyys on paljon nurjahduskestävyyttä suurempi.



Kuva 8: Kulmaulokkeen muuttuvat mitat ja voimat (Kuva: Mika Alisaari)

Suuremmissa kulmaulokkeissa on horisontaaleja ja diagonaaleja sauvoja, jotka toimivat enemmänkin askelpuina kuin nurjahdustukina, joten nurjahduspituutena käytetään koko diagonaalin osan mittaa.

Kulmaulokkeiden nurjahduskestävyydet on laskettu kaavalla 2.1. (SFS-EN 1993-1-1,61)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.1)$$

jossa $N_{b,Rd}$ on puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo
 χ on nurjahduskestävyyden pienennystekijä
 A on puristetun sauvan poikkipinta-ala

f_y on materiaalin myötöraja
 γ_M on materiaalin osavarmuuskerroin.

Muunnettua hoikkuutta $\bar{\lambda}$ (kaava 2.4) vastaava nurjahduskestävyyden pienennystekijä χ lasketaan kaavalla 2.2. (SFS-EN 1993-1-1, 61)

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (2.2)$$

jossa $\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$. (2.3)

Kaavassa 2.3 oleva termi α on epätarkkuustekijä, joka määräytyy kyseessä olevaa poikkileikkausta vastaavan nurjahduskäyrän mukaan. Pyöreillä rakenneteräksillä nurjahduskäyrä on c käytettäessä terästä S 355 (SFS-EN 1993-1-1, 63). Nurjahduskäyrää c vastaava termin α arvo on 0,49 (SFS-EN 1993-1-1, 62).

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (2.4)$$

Muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}$ laskemiseen tarvitaan kriittinen voima N_{cr} , joka saadaan laskettua kaavalla 2.5. (Kinnunen, Saarinen, Tiira, Ulvinen, Väänänen (2001, 76)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\lambda^2} \quad (2.5)$$

jossa E on kimmokerroin.

Kriittistä voimaa N_{cr} laskettaessa tarvitaan kyseisen teräsosan hoikkuus λ , joka saadaan laskettua kaavalla 2.6. (Kinnunen, ym. 2001, 76)

$$\lambda = \frac{L_{eff}}{i} \quad (2.6)$$

jossa L_{eff} on mitoitetavan osan tehollinen pituus
 i on jäyhyyssäde.

Nurjahduskestävyyden kautta on trigonometriaa hyväksi käyttäen laskettu suurin sallittu vaakavoima F_x kullekin koolle käyttäen kaavaa 2.7.

$$F_x = \cos \alpha \cdot N_{b,Rd} \quad (2.7)$$

U-pulttien mitoituksessa on edellä olevan esimerkin mukaisesti otettava huomioon vetävä voima F_y ja taivuttava voima F_x . Taivuttavana voimana kulmaulokkeen tapauksessa käytetään ylimitoitamisen ehkäisemiseksi kolmea erisuuruista voimaa, jolloin mitoitettu U-pultti-koko vastaisi lujjuustarvetta eri tilanteissa. Käytettävät voimat ovat 110 kV:n pylväillä 10, 20 ja 30 kN ja 400kV:n pylväillä 20, 40 ja 60 kN. Voima F_x jaetaan tasan kahdelle U-pultille. Voima F_x lasketaan siis kaavan 2.8 mukaisesti.

$$F_{x,u-pultti} = \frac{F_x}{2} \quad (2.8)$$

Vetävänä voimana F_{y1} käytetään voimajohtopylvään jännitteen mukaan määräytyvää voimaa, joka on 110 kV:n pylväällä 20 kN ja 400 kV:n pylväällä 50 kN. Tämän voiman lisäksi tulee huomioida voimasta F_x muodostuvan momentin kautta tuleva vetovoima F_{y2} toiselle U-pultille. Kyseinen voima lasketaan tasapainoyhtälöiden kautta, jolloin vetävä voima saadaan kaavasta 2.9 johdetulla kaavalla 2.10. Toisin sanoen kokonaisuudessaan vetovoima ΣF_y lasketaan kaavalla 2.11.

$$F_{y2} \cdot b = F_x \cdot H \quad (2.9)$$

$$F_{y2} = \frac{b}{H} \cdot F_x \quad (2.10)$$

$$\Sigma F_y = F_{y1} + F_{y2} \quad (2.11)$$

U-pultin koko määritetään saatujen voimien avulla käyttäen edeltävässä osiossa laskelmien tuloksena saatuja päätte-, kiristys- ja kulmapylväiden ($\geq 10^\circ$) kuvaajia.

3.4 Esimerkkilaskelma

Tässä laskelmassa ratkaistaan kulmaulokkeen $H = 1,8$ m nurjahduskestävyys $N_{b,Rd}$ nurjahduskaavojen avulla. Nurjahduskestävyydestä ratkaistaan trigonometrian avulla vaakavoima F_x .

$$\lambda = \frac{1,0 \cdot 1910 \text{ mm}}{\left(\frac{60 \text{ mm}}{4}\right)} = 127,3$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 2827,4 \text{ mm}^2}{(127,3)^2} = 0,3614 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{2827,4 \text{ mm}^2 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{0,3614 \cdot 10^6 \text{ N}}} = 1,67$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,49(1,67 - 0,2) + 1,67^2] = 2,25$$

$$\chi = \frac{1}{2,25 + \sqrt{2,25^2 - 1,67^2}} = 0,27$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,27 \cdot 2827,4 \text{ mm}^2 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,21} = 220,8 \text{ kN}$$

$$F_x = \cos 65^\circ \cdot 220,8 \text{ kN} = 93,3 \text{ kN}$$

Kyseiselle kulmaulokkeelle ratkaistaan käytettävät U-pultit 110 kV:n pylvällä, jossa voima $F_x = 30 \text{ kN}$.

$$F_{x,u-pultti} = \frac{30 \text{ kN}}{2} = 15 \text{ kN}$$

$$F_{y2} = \frac{750 \text{ mm}}{1800 \text{ mm}} \cdot 30 \text{ kN} = 72 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_y = 20 \text{ kN} + 72 \text{ kN} = 92 \text{ kN}$$

Tämän työn liitteenä (1) olevan kuvaajan perusteella määritetään käytettävien U-pulttien kooksi UM 30.

3.5 Lopputulokset

Lopputuloksena laskelmista saatiin kullekin kulmaulokekoolle maksimi vaakavoima F_x , jonka avulla pystytään todentamaan kulmaulokkeen kestävyys pylvään osien lujuuslaskelmissa. Käytännössä pylvälle tulevat vaakavoimat harvoin ylittävät 110 kV:n pylvällä arvoa 30 kN ja 400 kV:n pylvällä arvoa 60 kN. Tarkasteltaessa kulmaulokkeiden maksimi F_x -voimia, voidaan huomata, että niissä on jonkin verran ylimääräistä lujuuskapasiteettia. Tämän vuoksi kulmaulokkeissa käytettäviä teräsosapaksuuksia voitaisiin pienentää, jolloin niistä saataisiin kustannustehokkaampia. Excel-laskuista selviää myös käytettävä U-pultti-koko kullekin kulmaulokekoolle niitä käytettäessä joko 110 kV:n tai 400 kV:n pylvällä voiman F_x vaihtuessa. Excel-laskelmat ovat tämän työn liitteenä (3).

4. Peruspulttiliitos

4.1 Yleistä

Vapaastiseisovien voimajohtopylväiden jalat kiinnitetään perustuselementteihin kuvassa 9 olevalla peruspulttiliitoksella. Pylvään jalan pääosana toimivaan L-profiiliin hitsataan kiinni pohjalevy sekä jäykistelevyt. Pylvään jalka kiinnitetään perustuselementtiin tuplapultein. Peruspulttiryhmä (kuva 10) on lisätty valun yhteydessä perustuselementtiin. Kuvassa 9 näkyy myös maadoitusjohto, joka kiinnitetään toiseen jäykistelevyyn. Kaikki hitsiliitokset tehdään teräsosavalmistajan puolesta pajalla.



Kuva 9: Peruspulttiliitos / Kuva 10: Peruspulttiryhmä (kuvat: Mika Alisaari)

Pohjalevy kiristetään pultein kiinni perustuselementtiin niin, ettei itse peruspulteille tule rasituksia pylvään jalan puristuksesta, sillä ne siirtyvät suoraan betoniin. Pylvään pystytyksen yhteydessä ei tehdä jälkivalua, joten perustuselementit vaaitaan riittävällä tarkkuudella suoraan jo perustusvaiheessa.

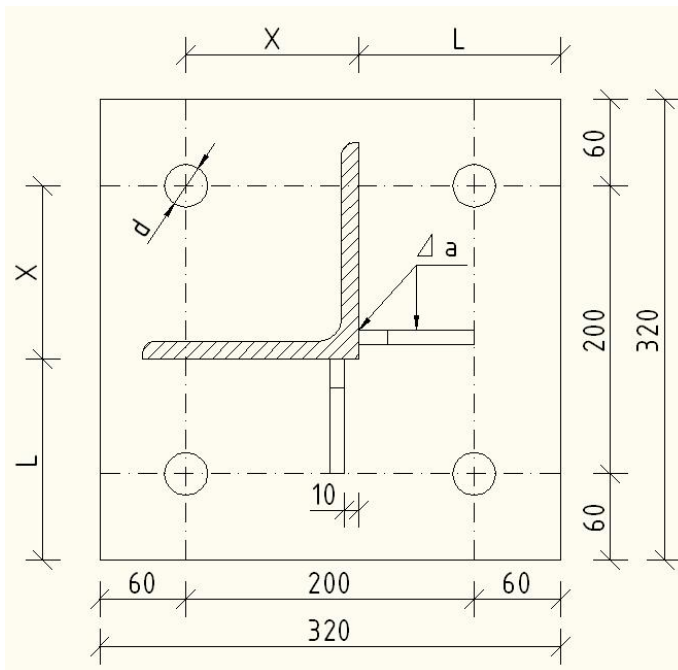
4.2 Lähtötiedot

Pohjalevyn ja jäykistelevyjen valmistuksessa käytetään standardin EN 10025-2 mukaista S355J2-terästä, jonka myötölujuus on 355 N/mm^2 (SFS-EN 1993-1-1, 26). Peruspulttien valmistuksessa käytetään rakenneterästä, jonka myötölujuus on 355 N/mm^2 ja vetomurtolujuus 510 N/mm^2 .

Peruspulttiryhmiä on käytössä viisi erilaista nimettynä käytettävän peruspultin koon ja määrän mukaan seuraavasti:

- 3 M 30
- 3 M 36
- 3 M 42
- 4 M 42
- 4 M 48.

Kaikilla peruspulttiryhmillä pulttiliitoksen toimintaperiaate on sama. Kuitenkin eri pulttiryhmillä käytetään erikokoisia L-profiileja pylvään jalkoina, jotta voitaisiin hyödyntää kunkin ryhmän lujuusominaisuudet mahdollisimman hyvin. Pylvään jalan kasvaessa se sijoitetaan mahdollisimman järkevästi pohjalevylle, jonka vuoksi jokaisella eri paarrekoolla kuvassa 11 näkyvät mitat x ja L muuttuvat. Voimien kasvaessa täytyy myös pohjalevyn paksuutta t ja pienahitsiliitoksen a -mittaa kasvattaa. Peruspulttikoon kasvaessa täytyy myös pohjalevyn reikien halkaisijaa d suurentaa.



Kuva 11: Pohjalevyn muuttuvat mitat (Kuva: Mika Alisaari)

4.3 Laskenta

Vapaastiseisovan voimajohtopylvään peruspulttiliitos mitoitetaan pylvään paarteelta tulevalle vedolle, koska ristikkorakenteen ansiosta perustuksille ei synny sitä rasittavaa momenttia ja paarteelta tuleva puristus ei tule mitoittavaksi, sillä puristusvoima siirtyy perustuksen betonisille

osille. Ensiksi mitoitetaan peruspulttien vetokestävyys kullekin peruspulttikoolle kaavan 3.1 mukaisesti. (SFS-EN 1993-1-8, 28)

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (3.1)$$

jossa $F_{t,Rd}$ on pultin vetolujuus
 k_2 on kerroin, tässä tapauksessa 0,9
 f_{ub} on pultin vetomurtolujuus
 A_s on pultin teräspoikkipinta-ala
 γ_{M2} on osavarmuusluku.

Pohjalevyn minimipaksuutta tarkastellaan kahdella tavalla. Ensiksi tarkastellaan liitosta vedettynä ekvivalenttina T-osana. T-osan kestävyysmitoitussarvo $F_{t,Rd}$ määritetään käyttäen SFS-EN 1993-1-8 kohdan 6.2.4 mukaista mitoitusta. Tässä tapauksessa käytetään murtumismallia 1 ja menetelmää 1, koska murtumismalli kuvastaa kyseistä tapausta parhaiten sekä menetelmä 1 antaa varmemmalla puolella olevia arvoja verrattuna menetelmään 2. Liitoksessa ei käytetä taustalevyjä, joten $F_{t,Rd}$ voidaan laskea kaavalla 3.2. Murtumismallin 1 mukainen $M_{pl,Rd}$ on sijoitettu kaavaan 3.2 ja kaava on lopuksi sievennetty.

$$F_{t,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,Rd}}{m} = \frac{4 \cdot 0,25 \Sigma l_{eff} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{m \cdot \gamma_{M0}} = \frac{\Sigma l_{eff} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{m} \quad (3.2)$$

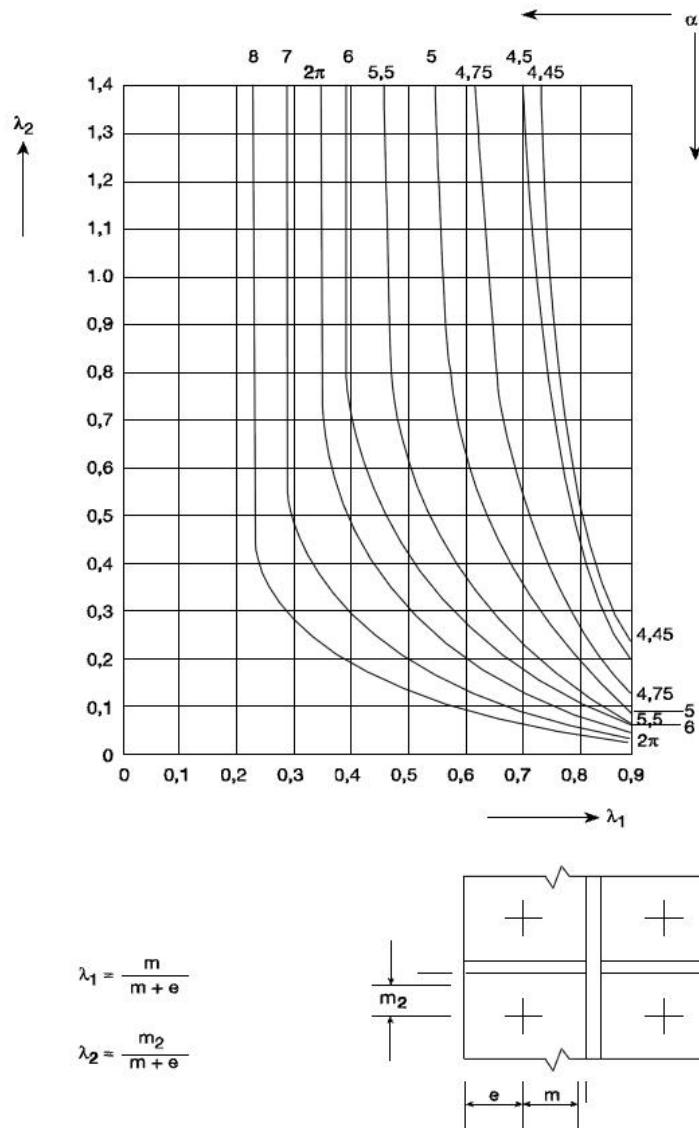
jossa l_{eff} on T-osan tehollinen pituus
 t_f on pohjalevyn paksuus
 m on pultin keskipisteen etäisyys paarteen reunasta.

Peruspulttiliitoksen jokaisen ruuvin voidaan ajatella olevan palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ruuvirivi, jolloin T-osan tehollinen pituus l_{eff} voidaan laskea kaavalla 3.3.

$$l_{eff} = \alpha \cdot m \quad (3.3)$$

jossa α on kuvasta (12) saatava termi.

Euronormin esimerkin mukaisesti I-profiilin uuman ja laipan oletetaan muodostavan samanlaisen tilanteen kuin L-profiilin ja jäykistelevyjen yhdistelmän. Kuvassa 12 olevan leikkauksen voidaan hyvällä varmuudella siis olettaa toimivan tässä tapauksessa mitoituksellisesti samalla tavalla, jolloin käyrästön kaavoja ja arvoja voidaan käyttää suoraan.



Kuva 12: Käyrästä alfan arvojen määrittämiseen (Kuva: SFS-EN 1993-1-8, 88)

Kuvan 12 mukaisesti termille α saadaan laskettua arvo käyttäen kaavoja 3.4 ja 3.5.

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} \quad (3.4)$$

jossa m ja e on kuvan (12) avulla määritettävät etäisyydet.

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} \quad (3.5)$$

jossa m_2 on kuvan (12) avulla määritettävä etäisyys.

Yhdistämällä kaavat ja ratkaisemalla siitä pohjalevyn paksuus t_f saadaan lopullinen kaava 3.6.

$$t_f = \sqrt{\frac{F_{t,Rd}}{\alpha \cdot f_y}} \quad (3.6)$$

Pohjalevyn paksuutta tutkittiin vielä pultin läpivetokestävyyden kannalta, jolloin varmistetaan, ettei pulttiliitoksen mutteri pääse leikkautumaan läpi pohjalevystä. Läpileikkautumista tutkittiin kaavan 3.7 avulla, josta ratkaistiin pohjalevyn paksuus t kaavalla 3.8.

$$F_{p,Rd} = \frac{d_w \cdot t \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (3.7)$$

$$t = \frac{F_{p,Rd} \cdot \gamma_{M2}}{d_w \cdot f_{ub}} \quad (3.8)$$

jossa $F_{p,Rd}$ on pultille tuleva vetovoima
 d_w on pultin kannan halkaisija
 f_{ub} on pultin vetomurtolujuus.

Vapaastiseisovan voimajohtopylvään jalkana käytettävä L-profiili ja pohjalevy liitetään toisiinsa pienahitsillä. Hitsiliitoksen vaatima a-mitta määritettiin kullekin peruspulttiryhmä- ja L-profiili-koolle kaavasta 3.9, josta se ratkaistiin kaavalla 3.10. (SFS-EN 1993-1-8, 47)

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot a \quad (3.9)$$

$$a = \frac{F \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}}{l_w \cdot f_u / \sqrt{3}} \quad (3.10)$$

jossa F on liitokselle tuleva vetovoima
 β_w on korrelaatiokerroin
 l_w on pienahitsin pituus.

Viimeiseksi tarkistetaan jäykistelevyjen riittävä paksuus kokemusperäisellä menetelmällä käyttäen kaavaa 3.11. Jäykistelevy ottaa puristusvoimaa vastaan kuvan 13 osoittamalta alalta A_1 , joten laskemalla jäykistelevyn kestävä voima saadaan siitä laskettua koko liitoksen kestävyys alan A_1 ja koko pohjalevyn alan suhteella käyttäen kaavaa 3.12. (Kinnunen, ym. 2001, 126)

$$R_d = \frac{60 \cdot t \cdot b \cdot f_y \cdot k_1 - b^2 \cdot f_y}{50 \cdot k_1^3 \cdot k_2} \quad (3.11)$$

jossa R_d on jäykistelevyn puristuskestävyys

t on jäykistelevyn paksuus

b on jäykistelevyn leveys

f_y on teräksen myötölujuus

$$k_1 = \sqrt{\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 1}$$

h on jäykistelevyn korkeus

$$k_2 = \frac{1}{2 \cdot \left(1 - \frac{a}{b}\right)}$$

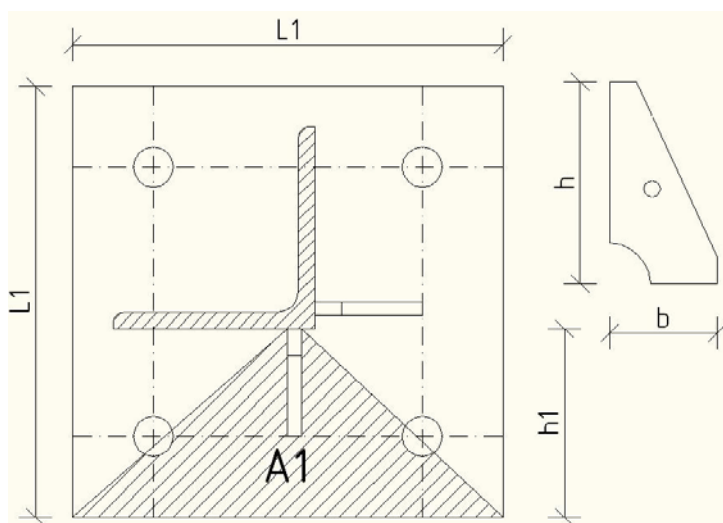
a on puristusvoiman painopiste.

$$N_d = \frac{R_d \cdot L_1^2}{L_1 \cdot h_1} \quad (3.12)$$

jossa N_d on maksimi paarteelta tuleva puristusvoima

L_1 on pohjalevyn leveys

h_1 on L-profiilin ja pohjalevyn reunan välinen etäisyys.



Kuva 13: Jäykistelevyjen mitat ja niihin liittyvät pinta-alat (Kuva: Mika Alisaari)

4.4 Esimerkkilaskelma

Tässä laskelmassa tutkitaan 3 M 30-peruspulttiryhmää käytettäessä paarteena L100x100x10-profiilia. Lasketaan 30 mm:n peruspultille vetokestävyys kaavalla 3.1.

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 \cdot 708,86 \text{ mm}}{1,25} = 259,56 \text{ kN}$$

Seuraavaksi lasketaan pohjalevyn vaadittu minimivahvuus t kaavalla 3.6. Kaavassa oleva termi α on selvitetty kuvan 12 käyrästä kaavojen 3.4 ja 3.5 avulla.

$$\lambda_1 = \frac{90 \text{ mm}}{90 \text{ mm} + 60 \text{ mm}} = 0,6$$

$$\lambda_2 = \frac{90 \text{ mm}}{90 \text{ mm} + 60 \text{ mm}} = 0,6$$

$$t_f = \sqrt{\frac{259560 \text{ N}}{5,05 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}} = 12 \text{ mm}$$

Pohjalevyn paksuus lasketaan myös läpivetokestävyden kannalta kaavalla 3.8.

$$t = \frac{259560 \text{ N} \cdot 1,25}{46 \text{ mm} \cdot 510 \text{ N/mm}^2} = 13,8 \text{ mm}$$

Pohjalevyn ja paarteen välisen hitsiliitoksen a -mitan minimiarvo lasketaan kaavalla 3.10. L100x100x10-paarteen tapauksessa itse paarteen vetokestävyys on pienempi kuin 3 M 30-pulttiryhmän, joten hitsiliitoksen tarkastelussa käytetään paarteen vetokestävyyttä maksimi vetovoimana.

$$a = \frac{681600 \text{ N} \cdot 0,9 \cdot 1,25}{389,7 \text{ mm} \cdot 510 \text{ N/mm}^2 / \sqrt{3}} = 6,7 \text{ mm}$$

Viimeisenä tarkistetaan jäykistelevyjen kestävyys liitoksessa. Jäykistelevyjen paksuudeksi valittiin 10 mm ja tälle paksuudelle laskettiin maksimi puristava voima kaavalla 3.11 ja koko liitoksen maksimi puristuskestävyys kaavalla 3.12. Jos paarteelta tuleva voima ylittää lasketun maksimi voiman, täytyy silloin levyn paksuutta suurentaa. Sidelevyt ovat kaikilla paarre- ja pulttiryhmäkoilla samat.

$$R_d = \frac{60 \cdot t \cdot b \cdot f_y \cdot k_1 - b^2 \cdot f_y}{50 \cdot k_1^3 \cdot k_2} = \frac{60 \cdot 10 \text{ mm} \cdot 80 \text{ mm} \cdot 355 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,13 - 80^2 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{50 \cdot 1,13^3 \cdot 1,5} = 156,1 \text{ kN}$$

$$N_d = \frac{R_d \cdot L_1^2}{L_1 \cdot h_1} = \frac{156100 \text{ N} \cdot (320 \text{ mm})^2}{320 \text{ mm} \cdot 120 \text{ mm}} = 832,4 \text{ kN}$$

4.5 Lopputulokset

Laskelmien tuloksena saatiin kullekin peruspulttiryhmälle määritettyä kestävyysarvot eri paarrekokojen kanssa sekä saatiin määritettyä niille pohjalevyn minimipaksuus ja hitsiliitoksen a-mitalle minimiarvo. Kaikissa eri tapauksissa käytetään samoja sidelevyjä, ja tämän vuoksi niille onkin laskettu vain puristuskestävyydelle arvo, jota voidaan verrata paarteen puristusvoimaan kussakin eri tapauksessa. Levyn paksuutta kasvattamalla päästään suurempiin lujuuksiin, jos siihen on tarvetta. Excel-laskelmat ovat työn liitteenä (4).

Lähteet

Kinnunen, J.; Saarinen, E.; Tiira, S.; Ulvinen, S.; Väänänen, E. 2001. Teräsrakenteiden suunnittelu. 4. Uusittu painos. Helsinki. Rakennustieto Oy.

Lallukka, Janne. 2010. Rakennesuunnittelija DI. Empower Oy.

SFS-EN 1993-1-1: Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt

SFS-EN 1993-1-8: Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus

SFS-EN 1993-1-10: Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-10: Materiaalin sitkeys ja paksuussuuntaiset ominaisuudet

SFS-EN 50341-1: Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt

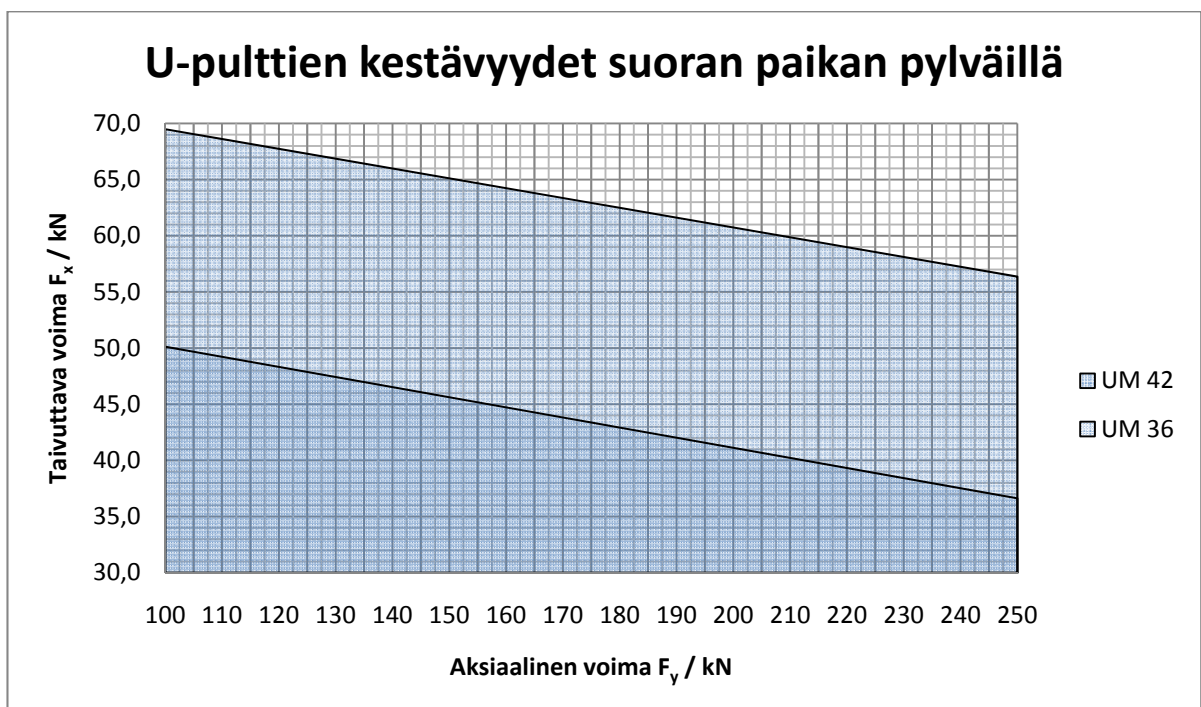
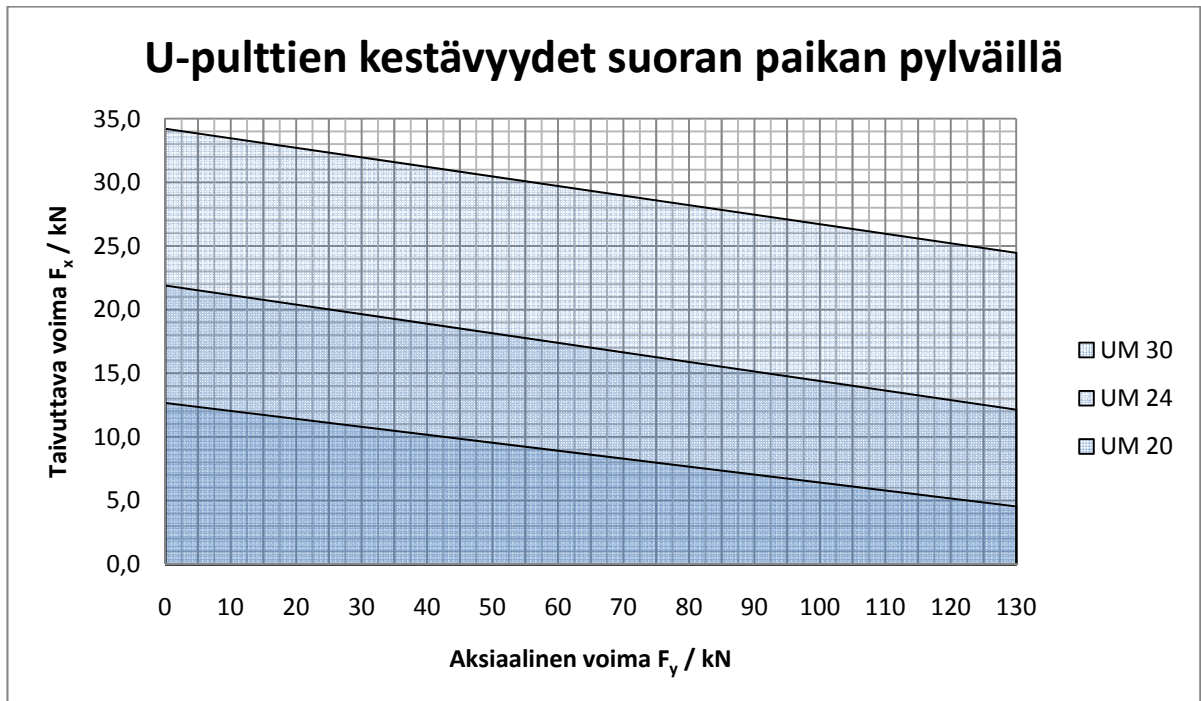
SFS-EN 50341-3-7: Vaihtosähköilmajohdot yli 45 kV jännitteillä. Osa 3-7: Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt

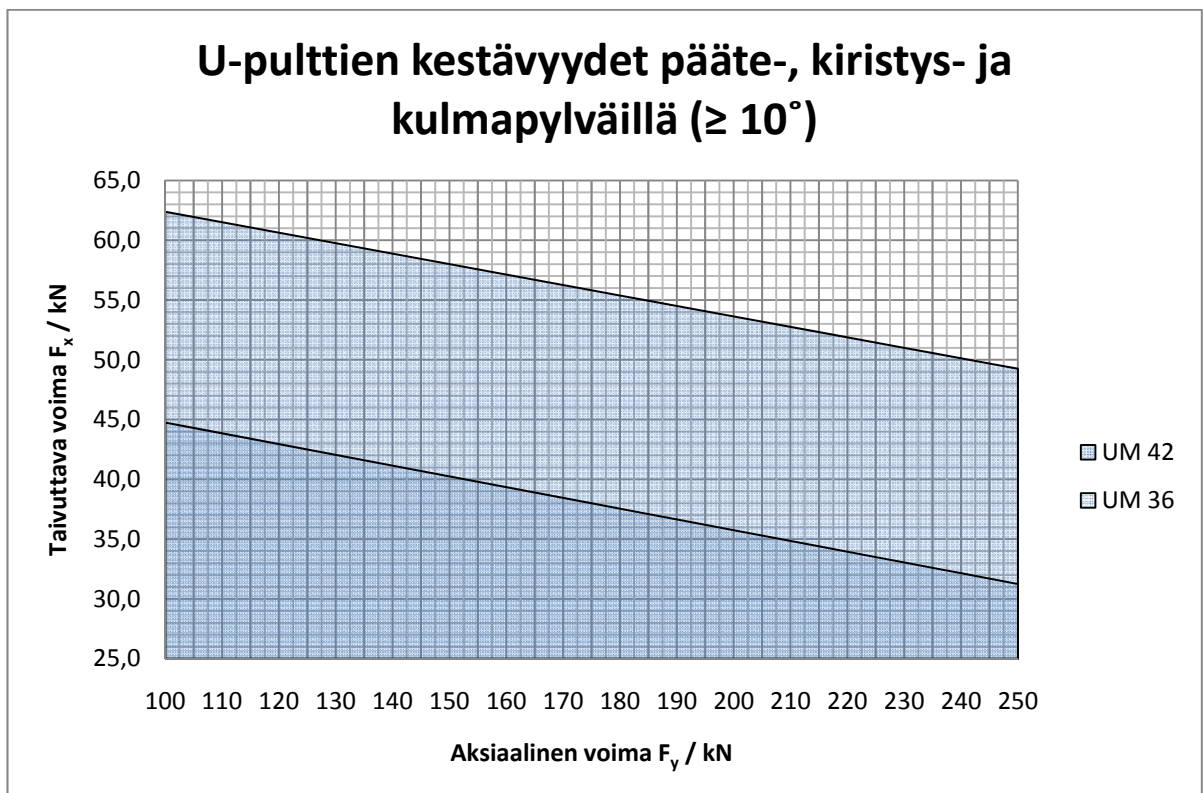
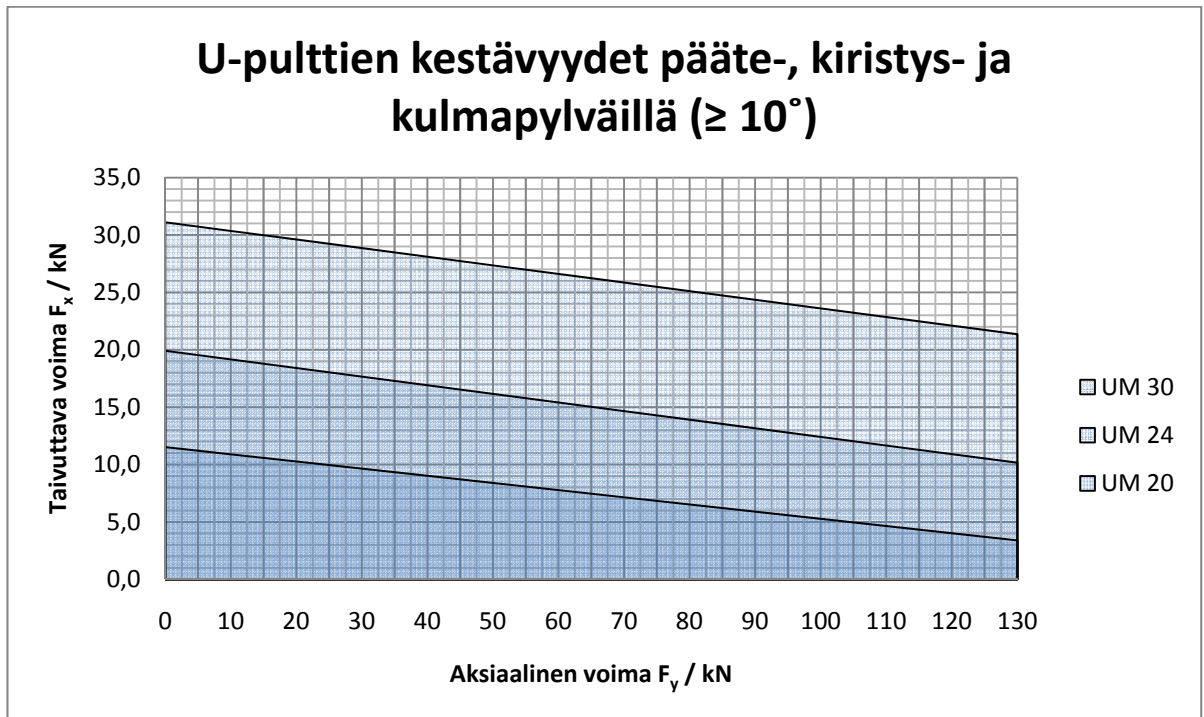
Uski, Arto. 2010. Rakennesuunnittelija DI. Empower Oy.

Liitteet

Liite 1: U-pulttien kuvaajat

1/2





Liite 2: U-pulttien Excel-laskelmat

1/4

U-pulttien kestävydet suoran paikan pylväillä

U-pultti d= 20 mm

d=	20,0	mm
A=	628,3	mm ²
W=	1570,8	mm ³
e=	40,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	322,7	N/mm ²
γ =	1,1	

U-pultti d= 24 mm

d=	24,0	mm
A=	904,8	mm ²
W=	2714,3	mm ³
e=	40,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	322,7	N/mm ²
γ =	1,1	

U-pultti d= 30 mm

d=	30,0	mm
A=	1413,7	mm ²
W=	5301,4	mm ³
e=	50,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	322,7	N/mm ²
γ =	1,1	

F _y / kN	F _x / kN
0	12,7
5	12,4
10	12,0
15	11,7
20	11,4
25	11,1
30	10,8
35	10,5
40	10,2
45	9,9
50	9,5
55	9,2
60	8,9
65	8,6
70	8,3
75	8,0
80	7,7
85	7,4
90	7,0
95	6,7
100	6,4
105	6,1
110	5,8
115	5,5
120	5,2
125	4,9
130	4,5

F _y / kN	F _x / kN
0	21,9
5	21,5
10	21,1
15	20,8
20	20,4
25	20,0
30	19,6
35	19,3
40	18,9
45	18,5
50	18,1
55	17,8
60	17,4
65	17,0
70	16,6
75	16,3
80	15,9
85	15,5
90	15,1
95	14,8
100	14,4
105	14,0
110	13,6
115	13,3
120	12,9
125	12,5
130	12,1

F _y / kN	F _x / kN
0	34,2
5	33,8
10	33,5
15	33,1
20	32,7
25	32,3
30	32,0
35	31,6
40	31,2
45	30,8
50	30,5
55	30,1
60	29,7
65	29,3
70	29,0
75	28,6
80	28,2
85	27,8
90	27,5
95	27,1
100	26,7
105	26,3
110	26,0
115	25,6
120	25,2
125	24,8
130	24,5

U-pultti d= 36 mm

d=	36,0	mm
A=	2035,8	mm ²
W=	9160,9	mm ³
e=	50,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	322,7	N/mm ²
γ =	1,1	

U-pultti d= 42 mm

d=	42,0	mm
A=	2770,9	mm ²
W=	14547,1	mm ³
e=	60,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	322,7	N/mm ²
γ =	1,1	

F _y / kN	F _x / kN
100	50,1
105	49,7
110	49,2
115	48,8
120	48,3
125	47,9
130	47,4
135	47,0
140	46,5
145	46,1
150	45,6
155	45,2
160	44,7
165	44,3
170	43,8
175	43,4
180	42,9
185	42,5
190	42,0
195	41,6
200	41,1
205	40,7
210	40,2
215	39,8
220	39,3
225	38,9
230	38,4
235	38,0
240	37,5
245	37,1
250	36,6

F _y / kN	F _x / kN
100	69,5
105	69,1
110	68,6
115	68,2
120	67,7
125	67,3
130	66,9
135	66,4
140	66,0
145	65,6
150	65,1
155	64,7
160	64,2
165	63,8
170	63,4
175	62,9
180	62,5
185	62,1
190	61,6
195	61,2
200	60,7
205	60,3
210	59,9
215	59,4
220	59,0
225	58,6
230	58,1
235	57,7
240	57,2
245	56,8
250	56,4

U-pulttien kestävyudet pääte-, kiristys- ja kulmapylväillä ($\geq 10^\circ$)

3/4

U-pultti d= 20 mm

d=	20,0	mm
A=	628,3	mm ²
W=	1570,8	mm ³
e=	40,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	293,4	N/mm ²
γ =	1,21	

U-pultti d= 24 mm

d=	24,0	mm
A=	904,8	mm ²
W=	2714,3	mm ³
e=	40,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	293,4	N/mm ²
γ =	1,21	

U-pultti d= 30 mm

d=	30,0	mm
A=	1413,7	mm ²
W=	5301,4	mm ³
e=	50,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	293,4	N/mm ²
γ =	1,21	

F _y / kN	F _x / kN
0	11,5
5	11,2
10	10,9
15	10,6
20	10,3
25	10,0
30	9,6
35	9,3
40	9,0
45	8,7
50	8,4
55	8,1
60	7,8
65	7,5
70	7,1
75	6,8
80	6,5
85	6,2
90	5,9
95	5,6
100	5,3
105	5,0
110	4,6
115	4,3
120	4,0
125	3,7
130	3,4

F _y / kN	F _x / kN
0	19,9
5	19,5
10	19,2
15	18,8
20	18,4
25	18,0
30	17,7
35	17,3
40	16,9
45	16,5
50	16,2
55	15,8
60	15,4
65	15,0
70	14,7
75	14,3
80	13,9
85	13,5
90	13,2
95	12,8
100	12,4
105	12,0
110	11,7
115	11,3
120	10,9
125	10,5
130	10,2

F _y / kN	F _x / kN
0	31,1
5	30,7
10	30,4
15	30,0
20	29,6
25	29,2
30	28,9
35	28,5
40	28,1
45	27,7
50	27,4
55	27,0
60	26,6
65	26,2
70	25,9
75	25,5
80	25,1
85	24,7
90	24,4
95	24,0
100	23,6
105	23,2
110	22,9
115	22,5
120	22,1
125	21,7
130	21,4

U-pultti d= 36 mm

d=	36,0	mm
A=	2035,8	mm ²
W=	9160,9	mm ³
e=	50,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	293,4	N/mm ²
γ =	1,21	

U-pultti d= 42 mm

d=	42,0	mm
A=	2770,9	mm ²
W=	14547,1	mm ³
e=	60,0	mm
f _y =	355,0	N/mm ²
f _{yd} =	293,4	N/mm ²
γ =	1,21	

F _y / kN	F _x / kN
100	44,8
105	44,3
110	43,9
115	43,4
120	43,0
125	42,5
130	42,1
135	41,6
140	41,2
145	40,7
150	40,3
155	39,8
160	39,4
165	38,9
170	38,5
175	38,0
180	37,6
185	37,1
190	36,7
195	36,2
200	35,8
205	35,3
210	34,9
215	34,4
220	34,0
225	33,5
230	33,1
235	32,6
240	32,2
245	31,7
250	31,3

F _y / kN	F _x / kN
100	62,4
105	61,9
110	61,5
115	61,1
120	60,6
125	60,2
130	59,8
135	59,3
140	58,9
145	58,4
150	58,0
155	57,6
160	57,1
165	56,7
170	56,3
175	55,8
180	55,4
185	54,9
190	54,5
195	54,1
200	53,6
205	53,2
210	52,8
215	52,3
220	51,9
225	51,4
230	51,0
235	50,6
240	50,1
245	49,7
250	49,3

400 kV pylväs Fx / kN= 20

Fy1 / kN	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Fy2 / kN	25,0	37,5	33,3	40,0	48,0	48,0
Σ Fy / kN	75,0	87,5	83,3	90,0	98,0	98,0
Fx / kN	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
U-pultti	UM 24	UM 24	UM 24	UM 24	UM 24	UM 24

400 kV pylväs Fx / kN= 40

Fy1 / kN	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Fy2 / kN	50,0	75,0	66,7	80,0	96,0	96,0
Σ Fy / kN	100,0	125,0	116,7	130,0	146,0	146,0
Fx / kN	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
U-pultti	UM 30	UM 30	UM 30	UM 30	UM 36	UM 36

400 kV pylväs Fx / kN= 60

Fy1 / kN	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Fy2 / kN	75,0	112,5	100,0	120,0	144,0	144,0
Σ Fy / kN	125,0	162,5	150,0	170,0	194,0	194,0
Fx / kN	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
U-pultti	UM 36	UM 36	UM 36	UM 36	UM 36	UM 36

Liite 4: Peruspulttiliitoksen Excel-laskelmat

1/4

Peruspulttiryhvät ja pohjalevyt

Pulttien vetokestävyydet

Pultti	M30	M36	M42	M48
k2	0,9	0,9	0,9	0,9
fub / N/mm ²	510	510	510	510
As / mm ²	706,86	1017,88	1385,44	1809,56
γM2	1,25	1,25	1,25	1,25
Ft,Rd / kN	259,56	373,76	508,73	664,47

Pohjalevyn min. paksuus t eri pulttiryhmillä/kulmarautoilla

Pulttiryhmä	3M30				
Kulmarauta	L80x80x8	L90x90x9	L100x100x10	L110x110x10	L120x120x11
e / mm	60	60	60	60	60
m / mm	92	91	90	100	100
m2 / mm	92	91	90	100	100
λ1	0,61	0,60	0,60	0,63	0,63
λ2	0,61	0,60	0,60	0,63	0,63
α	5	5,05	5,05	4,9	4,9
leff,nc / mm	460	459,55	454,5	490	490
Ft,Rd / kN	259,56	259,56	259,56	259,56	259,56
t / mm	12,09	12,03	12,03	12,22	12,22

Pulttiryhmä	3M36		
Kulmarauta	L100x100x10	L110x110x10	L120x120x11
e / mm	60	60	60
m / mm	100	100	99
m2 / mm	100	100	99
λ1	0,63	0,63	0,62
λ2	0,63	0,63	0,62
α	4,9	4,9	4,95
leff,nc / mm	490	490	490,05
Ft,Rd / kN	373,76	373,76	373,76
t / mm	14,66	14,66	14,58

Pulttiryhmä	3M42		
Kulmarauta	L120x120x11	L130x130x12	L150x150x12
e / mm	60	60	60
m / mm	99	108	108
m2 / mm	99	108	108
λ_1	0,62	0,64	0,64
λ_2	0,62	0,64	0,64
α	4,95	4,9	4,9
leff,nc / mm	490,05	529,2	529,2
Ft,Rd / kN	508,73	508,73	508,73
t / mm	17,01	17,10	17,10

Pulttiryhmä	4M42		
Kulmarauta	L150x150x12	L160x160x15	L180x180x16
e / mm	60	60	60
m / mm	108	115	114
m2 / mm	108	115	114
λ_1	0,64	0,66	0,66
λ_2	0,64	0,66	0,66
α	4,9	4,8	4,8
leff,nc / mm	529,2	552	547,2
Ft,Rd / kN	508,73	508,73	508,73
t / mm	17,10	17,28	17,28

Pulttiryhmä	4M46		
Kulmarauta	L160x160x15	L180x180x16	L200x200x18
e / mm	60	60	60
m / mm	118	118	122
m2 / mm	118	118	122
λ_1	0,66	0,66	0,67
λ_2	0,66	0,66	0,67
α	4,8	4,8	4,75
leff,nc / mm	566,4	566,4	579,5
Ft,Rd / kN	664,47	664,47	664,47
t / mm	19,75	19,75	19,85

Läpivetokestävyys

3/4

Pulttikoko	M30	M36	M42	M46
F _{p,Rd} / kN	259,56	373,76	508,73	664,47
d _w / mm	46	55	65	75
f _u / N/mm ²	510	510	510	510
γ _{M2}	1,25	1,25	1,25	1,25
t / mm	13,83	16,66	19,18	21,71

Pienahitsiliitoksen a-mitta

β _w	0,9
f _u / N/mm ²	510
γ _{M2}	1,25

3M30	L80x80x8	3M30	L90x90x9	3M30	L100x100x10
Fed / kN	436,65	Fed / kN	550,25	Fed / kN	681,60
L _w	311,40	L _w	350,60	L _w	389,70
a / mm	5,36	a / mm	6,00	a / mm	6,68

3M30	L110x110x10	3M30	L120x120x11
Fed / kN	752,60	Fed / kN	778,68
L _w	429,70	L _w	468,80
a / mm	6,69	a / mm	6,35

3M36	L100x100x10	3M36	L110x110x10	3M36	L120x120x11
Fed / kN	681,60	Fed / kN	752,60	Fed / kN	901,70
L _w	389,70	L _w	429,70	L _w	468,80
a / mm	6,68	a / mm	6,69	a / mm	7,35

3M42	L120x120x11	3M42	L130x130x12	3M42	L150x150x12
Fed / kN	901,70	Fed / kN	1063,94	Fed / kN	1236,47
L _w	468,80	L _w	507,98	L _w	586,30
a / mm	7,35	a / mm	8,00	a / mm	8,06

4M42	L150x150x12	4M42	L160x160x15	4M42	L180x180x16
Fed / kN	1236,47	Fed / kN	1635,13	Fed / kN	1966,26
L _w	586,30	L _w	625,40	L _w	704,55
a / mm	8,06	a / mm	9,99	a / mm	10,66

4M46	L160x160x15	4M46	L180x180x16	4M46	L200x200x18
Fed / kN	1635,13	Fed / kN	1966,26	Fed / kN	2453,32
Lw	625,40	Lw	704,55	Lw	784,55
a / mm	9,99	a / mm	10,66	a / mm	11,95

Jäykisteiden paksuus

$f_y / \text{N/mm}^2$	355
b / mm	80
h / mm	150
a / mm	53,33
k1	1,13
k2	1,5
t / mm	10
Rd / kN	156,08
Nd / kN	832,40