



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Valtteri Syynimaa

# PULTTILIITOKSEN LASKENTAOHJELMA

Hitachi Energy

Tekniikka  
2024

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Valtteri Syynimaa
Opinnäytetyön nimi	Pulttiliitoksen laskentaohjelma Hitachi Energy
Vuosi	2024
Kieli	suomi
Sivumäärä	43
Ohjaaja	Patrik Holm, Petri Saari

---

Opinnäytetyössä käsitellään pulttiliitosten laskentaa. Pulttiliitokset ovat yleisiä koneenrakennuksessa ja muissa teknisissä sovelluksissa. Niiden luotettava mitoitus on tärkeää, jotta liitokset kestävät kuormitusta ja ovat turvallisia. Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää Excel-pohjainen laskentaohjelma, joka helpottaa suunnittelijoiden työtä muuntajavalmistuksessa.

Opinnäytetyössä esitellään pulttiliitosten teoreettista taustaa, kuten kitkakertoimia ja materiaalien ominaisuuksia. Lisäksi käsitellään laskentaohjelman rakennetta ja sen perustana olevaa standardia VDI 2230. Opinnäytetyössä on hyödynnetty Exceliä ja ohjelmaa on testattu erilaisilla liitoksilla sekä kuormituksilla.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että laskentaohjelma on käyttökelpoinen työkalu pulttiliitosten suunnittelussa. Ohjelma nopeuttaa laskentaprosessia ja vähentää virheiden riskiä. Lisäksi se perustuu standardien mukaisiin arvoihin, mikä tekee siitä luotettavan.

## ABSTRACT

Author	Valtteri Syyrimaa
Title	Calculation Tool for Bolted Joints
Year	2024
Language	Finnish
Pages	43
Name of Supervisor	Patrik Holm, Petri Saari

---

The thesis addresses the calculation of bolted joints. These joints play a critical role in connecting components in various structures. However, manual calculations can be time-consuming and error prone. The research seeks to alleviate this by developing an Excel tool that automates the process.

The theoretical background covers essential concepts related to bolted joints, including friction coefficients and material properties. The calculation tool relies on established standard VDI 2230. The methodology involves implementing the tool in Excel and testing it with different joint configurations and loads.

The results demonstrate that the calculation tool is an asset for engineers. By using standardized values and automating calculations, it accelerates the design process. Additionally, the tool provides error alerts, ensuring reliable results.

---

Keywords                      transformer, bolt connection, VDI2230, calculation program

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	7
2	HITACHI.....	8
	2.1 Hitachi Energy .....	8
	2.2 Teollisen muuntajavalmistuksen historia Suomessa sekä Vaasassa .....	8
3	SÄHKÖMUUNTAJA.....	10
	3.1 Muuntajan toiminta .....	11
	3.2 Muuntajan rakenne .....	11
4	PULTTILIITOS.....	13
	4.1 Pulttiliitoksesta yleisesti.....	13
	4.2 Pulttiliitosten suunnittelu ja laskenta .....	13
	4.2.1 Pultin kiristys momenttimenetelmällä.....	14
	4.2.2 Kulmamenetelmä .....	14
	4.2.3 Hydraulinen menetelmä .....	15
	4.2.4 Voitelu .....	16
	4.2.5 Pulttiliitoksen suunnittelu .....	16
	4.2.6 Pultit .....	17
	4.2.7 Mutterit.....	18
	4.2.8 Kierteet.....	18
	4.2.9 Pintakäsittely.....	18
	4.2.10 Lujuusluokat .....	19
5	PULTTILIITOKSEN LASKENTAOHJELMA EXCELISSÄ .....	20
	5.1 Syötettävät arvot .....	20
	5.1.1 Ympäristö .....	20
	5.1.2 Kiristysmenetelmät .....	21

5.1.3	Pulttitiedot .....	23
5.1.4	Voitelu .....	24
5.1.5	Aluslaatat .....	25
5.1.6	Puristetut materiaalit.....	25
5.1.7	Ulkoisten kierteiden materiaali.....	26
5.2	Laskentatulokset .....	27
5.2.1	Pulttiliitoksen kuvaaja .....	27
5.2.2	Hälytykset.....	28
5.2.3	Valittu pultti .....	29
5.2.4	Kierteiden materiaali.....	29
5.2.5	Pulttiliitoskaavio.....	30
5.2.6	Pulttiliitos .....	31
5.2.7	Kiristysvoiman vähentäminen.....	33
5.2.8	Kosketuspintapaineet .....	33
6	SUUNNITTELU .....	35
6.1	Kaavat.....	35
6.1.1	Kiristysmomentin laskenta annetulla käyttökertoimella.....	35
6.1.2	Kiristysvoima annetulla käyttökertoimella .....	36
6.1.3	Käyttökerroin annetulla vääntömomentilla .....	37
6.1.4	Käyttökerroin annetulla kulmalla.....	38
6.1.5	Hydraulisen kiristyksen hyötysuhde annetulla kiristysvoimalla .	39
6.1.6	Kiristysvoima hydraulisessa kiristyksessä annetulla käyttökertoimella.....	40
6.1.7	Esilatauksen muutos upotuksen vuoksi.....	40
6.1.8	Lämpölaajenemisen vaikutus kiristysvoimaan .....	40
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	41
	LÄHTEET .....	42

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Vaasan muuntajatehdas vuodelta 1960.....	9
Kuva 2. 3D-kuva muuntajasta. ....	10
Kuva 3. Ympäristössä vaikuttavat tekijät .....	21
Kuva 4. Kiristysmenetelmä kaavio .....	22
Kuva 5. Kiristysmenetelmä.....	23
Kuva 6. Pultti tiedot.....	24
Kuva 7. Voitelu .....	24
Kuva 8. Aluslaatat.....	25
Kuva 9. Puristettu materiaali 1.....	26
Kuva 10. Kierteiden materiaali.....	27
Kuva 11. Pulttiliitoksen kuvaaja .....	28
Kuva 12. Hälytykset .....	29
Kuva 13. Valittu pultti.....	29
Kuva 14. Kierteiden materiaali.....	30
Kuva 15. Pulttiliitos kaavio .....	31
Kuva 16. Pulttiliitos .....	32
Kuva 17. Kiristysvoiman vähentäminen .....	33
Kuva 18. Kosketuspintapaineet.....	34

## 1 JOHDANTO

Hitachi Energyllä on käytössä useita eri pulttikokoja muuntajan valmistuksessa, alkaen M4:stä ja jatkuen standardin mukaisissa pulttiko'oissa aina M64:än asti. Pulttityyppejä on myös monia. Niiden sijoitus sekä koon ja oikean tyyppin valinta riippuvat pulttiin kohdistuvasta kuormasta, rasituksesta, lujuusluokasta, pintakäsittelystä ja materiaaleista, jotka ehkäisevät tarvittaessa korroosiota. Kiinnityksessä on käytetty myös muttereita ja aluslaattoja.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli harmonisoida muuntajassa käytetyt kiinnitysosat ja luoda suunnittelijoille työkalu, jota voitaisiin käyttää muuntajan pulttiliitosten suunnittelussa, mitoituksessa, kiinnitysosien valinnassa ja laskennassa. Pulttiliitoksien laskentaohjelma perustuu VDI 2230 standardiin.

Hitachi Energyllä ei ollut asianmukaista laskentaohjelmaa pulttiliitosten mitoitukseseen sekä analysointiin. Nyt tähän tarvittiin muutosta ja pulttiliitoksen laskentaohjelmaa tarvittiin parantamaan suunnittelun laatua.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Hitachi Energyllä pulttiliitoslaskentaohjelma Excelliin. Työ aloitettiin perehtymällä VDI 2230- ja ISO-standardeihin sekä Koneenosien suunnittelukirjaan (WSOY 1995).

Tavoitteena oli parantaa ohjelman avulla tuotekehitysinsinöörien ymmärrystä pulttiliitoksien toiminnasta ja mitoituksesta. Yksi päätavoitteista oli luoda helppokäyttöinen laskentaohjelma suunnittelijoille pulttiliitosten alustavaan mitoitukseseen sekä ohjelma, jolla voidaan tehdä tarvittavat laskennat esikiristysvoimista, joita puolestaan tarvitaan FE-analyyseissä ANSYS ohjelmalla.

## **2 HITACHI**

### **2.1 Hitachi Energy**

Hitachi Energy on maailmanlaajuinen teknologiayritys ja sen pääkonttori sijaitsee Zurichissä, Sveitsissä. Se on osa maailmanlaajuisista Hitachi-konsernia. Yritys tarjoaa kestävän kehityksen energiaratkaisuja rakennuksille, sähkölaitoksille sekä teollisuuteen. Yhtiön liiketoiminta koostuu suurjännitelaitteista, muuntajista, verkkointegraatioista, verkkoautomaatiotekniikoista sekä erilaisista palveluista uusiutuvan energian aloille. Hitachi Energy on maailman suurin muuntajien valmistaja. Vuonna 2020 Hitachi osti ABB:n Power Grids -liiketoiminnasta enemmistöosakkuuden, jonka nimeksi tuli Hitachi ABB Power Grids. Vuosi tämän jälkeen yhtiön nimeksi tuli Hitachi Energy. Vuonna 2022 Hitachi Energy osti loputkin osakkeet ABB:ltä. /1/

### **2.2 Teollisen muuntajavalmistuksen historia Suomessa sekä Vaasassa**

Strömberg-yhtiö aloitti muuntajien valmistuksen Suomessa Helsingin tehtaalla jo vuonna 1914. Muuntajatuotanto eteni kohti suurmuuntajatuotantoa ja markkinoille tuli 1930-luvulla kokonaan uudistetut kolmi- ja yksivaiheiset muuntajatyypit. Sotien jälkeen vuonna 1945 Suomi sähköistyi nopeasti ja vuosittainen sähkön kulutus kasvoi 10 % useita vuosia. Muuntajat olivat myös yksi sotakorvausten tuote. Edellä mainituista asioista johtuen tuotantokapasiteettia kasvatettiin.

Vaasassa alettiin valmistamaan pienten standardien mukaisia jakelumuuntajia vuonna 1948 ja samana vuonna tehtiin päätös siirtää koko Suomen muuntajatuotanto Vaasaan. Suurmuuntajatehdas valmistui ja aloitti toimintansa Vaasassa Strömbergin Parkissa pian tämän jälkeen vuonna 1956. Tehdasta laajennettiin vuosina 1961 ja 1966, koska suurmuuntajat nousivat yhtiön kasvun kannalta kriittisiksi ja nousivat viennin päätuoteryhmäksi. Teknologia kansainvälistyi 1990-luvulla ja jakelumuuntajille kehitettiin yhteinen CT-teknologia (Common Technology), joka loi selkärangan koko Hitachi Energyn jakelumuuntajavalmistukselle. Se

avasi mahdollisuuden samankaltaiseen teolliseen tuotantoon Vaasan tehtaan sekä yhtiymätehtaiden välillä. Tuotantoa uudelleenorganisoitiin 2000-luvulla, minkä seurauksena Vaasa sai globaalin vastuun erikoismuuntajista paikallisolosuhteisiin suunniteltujen tehomuuntajien lisäksi. Vuonna 2013 WindSTAR-tuulimuuntajat tulivat tukemaan merituulivoiman kasvua.

Vaasan muuntajatehtaalta valmistuu keskimäärin yksi muuntaja päivässä. Suurimmat niistä voivat painaa jopa 250 tonnia. Vaasan muuntajatehtaalla on 300 ammattilaista, jotka työskentelevät myynnissä, tuotekehityksessä, projektihallinnassa sekä tuotannossa ja huollossa. Viennillä on erittäin suuri osuus, jopa 90 %.

/1/

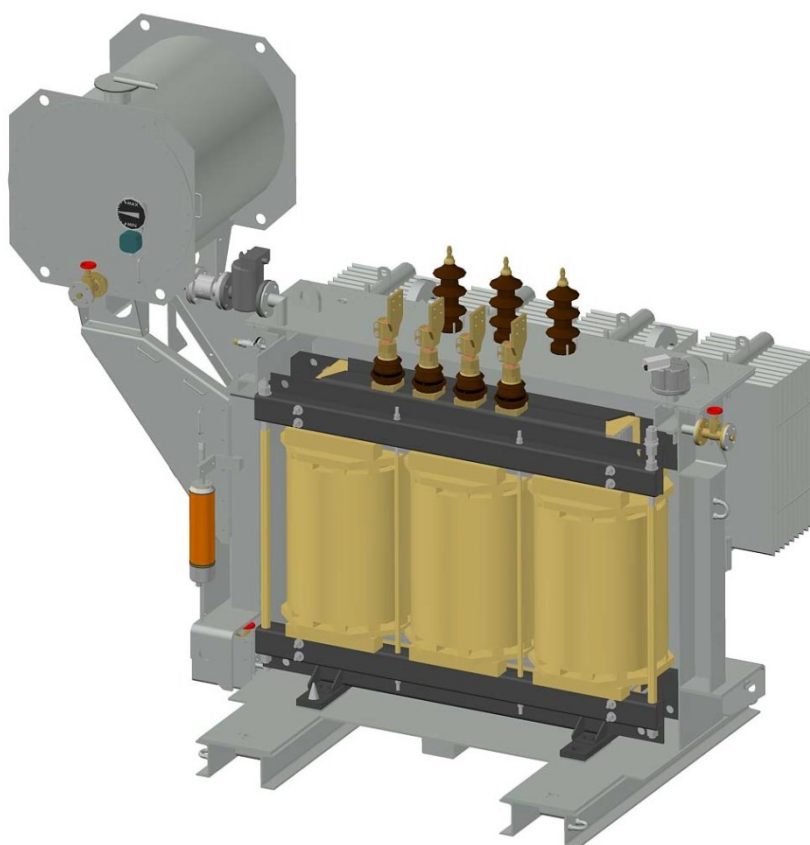


Kuva 1. Vaasan muuntajatehdas vuodelta 1960.

### 3 SÄHKÖMUUNTAJA

Muuntaja on yli 100 vuotta vanha keksintö, eikä sen rakenne ei ole juuri muuttunut vuosien varrella. Sähköverkot on jaettu jännitetason mukaan siirto- ja jakeluverkkoihin. Suomessa siirtoverkon jännitteet ovat 400, 220, 110 kV. Keski- ja pienjänniteverkot kuuluvat puolestaan jakeluverkkoon. Yleisin keskijännite Suomessa on 20 kV ja pienjännite 400 V. /2/

Muuntajat ovat sähköverkon avainteknologioita. Näiden avulla sähköä voidaan siirtää sähköntuotannosta kuluttajille pitkiä matkoja pienin häviöin. Muuntajat kohoavat sähkön jännitteen suurjännitetasolle siirtoa varten ja alentavat sen sitten vaiheittain turvallisesti pienjännitetasolle mahdollistaen sähkön toimittamisen teollisuudelle ja kotitalouksille. /1/



Kuva 2. 3D-kuva muuntajasta.

### 3.1 Muuntajan toiminta

Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kun muuntajan ensiökäämiin kytketään vaihtojännite, muodostuu sydämeen muuttuva magneettivuo. Kun magneettivuo lävistää samalla sydämellä olevan toisiokäämin, indusoituu siihen jännite. Ensiö- ja toisiojännitteiden suuruudet ovat suoraan verrannollisia käämien kierroslukujen suhteeseen. Ensiö- ja toistovirrat puolestaan ovat kääntäen verrannollisia kierroslukujen suhteeseen. Muuntajassa on erittäin vähän häviöitä. Sen hyötysuhde onkin erittäin suuri; se liikkuu tyypillisesti 99,0–99,5 % välillä. /2/

### 3.2 Muuntajan rakenne

Muuntaja koostuu aktiiviosien lisäksi pääosin säiliöstä, kannesta, paisuntasäiliöstä, aktiiviosasta sekä läpivienneistä. Muuntajaan saa asiakkaan toiveiden sekä tarpeiden mukaan lisävarusteita ja ne suunnitellaan aina projektikohtaisesti. Yleisimpiä muuntajan varusteita ovat jäähdyttimet, radiaattorit, virtamuuntajat, ylipaineventtiilit, kaasureleet, käämikytkimet, ilmankuivaimet sekä lämpömittarit. /2,3/

Muuntajan **säiliö** toimii samanaikaisesti sen rakenteellisena runkona, öljysäiliönä, jäähdyttimenä ja aktiiviosan suojana. Säiliö täytetään öljyllä ja sen on oltava tarpeeksi tiivis, jotta vuotoja ei synny. Säiliön on myös kestävä ympäristöolosuhteet. Säiliö muodostuu seinälevyistä, pohjalevyistä ja kaulavanteesta, jotka yhdistetään kokoonpanohitsauksessa tai pulttiliitoksella. Säiliö täytetään öljyllä, joka palvelee sekä jäähdytysnesteinä että sähköisenä eristeaineena muuntajassa. /2/

**Kansi** kiinnitetään hitsaamalla tai pulttiliitoksilla muuntajan säiliön päälle. Muuntajan aktiiviosa on yleensä kiinnitettynä kanteen ja tuettu säiliön pohjasta. Läpiviennit sekä useat muuntajan varusteet on myös kiinnitetty kanteen. /2/

**Paisuntasäiliön** tehtävän on toimia muuntajan öljyn paisuntatilana, mahdollistaen öljyn tilavuuden vaihtelun lämpötilan muuttuessa. Pinnankorkeuden vaihtelu tapahtuu nimenomaan paisuntasäiliössä. Paisuntasäiliön koko mitoitetaan niin, että lämpötilan ollessa korkeimmillaan, on paisuntasäiliö suunnilleen täynnä öljyä. Öljyn taas ollessa kylmimmillään, täytyy paisuntasäiliössä olla vielä riittävästi öljyä, että itse säiliö olisi aina täynnä öljyä. Muuntajan aktiiviosan on oltava aina ehdottomasti öljyn peitossa. /2/

Muuntajan **aktiiviosa** koostuu sydäimestä ja käämityksistä. Niitä on muuntajassa vähintään kaksi kappaletta: ensiö- ja toisiokäämi. Muuntajassa yläjännite on suurin jännite ja alajännite on pienempi jännite. Lisäksi erikoismuuntajissa on mahdollisesti useita eri alajännitteitä. /2/

Muuntajat kytketään sähköverkkoon käyttäen **läpivientejä**. Ne toimivat eristeinä muuntajan käämeiltä tulevien kytkentäjohtimien sekä muuntajan rakenteen välillä. Läpivientien sijainti vaihtelee ja ne ovat yleisimmin muuntajan kannella, mutta silloin tällöin myös muuntajan kyljessä. Yleisimmät muuntajassa käytetyt läpiviennit ovat posliiniläpivientejä. Korkeampien jännitteiden kohdalla käytetään kondensaattoriläpivientejä. /2/

Hitachi Energyllä on käytössä useita eri **kiinnitysosia** eli pultteja, vaarnapultteja, kierretankoja, muttereita ja aluslaattoja.

## 4 PULTTILIITOS

Liitosmenetelmiä on useita, esimerkiksi hitsattu liitos, niittiliitos ja juottaminen, mutta kaikista yleisin liitoksissa käytetty menetelmä on pulttiliitos. Tämä johtuu siitä, että pulttiliitos erottuu edukseen muista liitosmenetelmistä sen takia, koska se on helppo avata ja purkaa sekä uudelleenasettaa tarvittaessa. Muut liitosmenetelmät ovat kaikki jollain tapaa pysyviä ratkaisuja.

### 4.1 Pulttiliitoksesta yleisesti

Pultin ja ruuvin ero on se, että ruuvi tekee kierteen itse, kuten puuruuvi tai peltiruuvi. Pultilla taas on valmiit kiehteet itsessään ja vastakappaleessa. Kiinnitys tapahtuu mutterin avulla tai vastakappaleessa olevien kierteiden avulla. Pulttiliitos on oikein mitoitettuna ja suunniteltuna oikein luotettava ratkaisu. Lisäksi pulttiliitos on verrattaen edullinen valinta. Pultteja löytyy eri materiaaleissa, eri pintakäsittelyillä ja eri kokovaihtoehdoilla useita. Haasteena pulttiliitoksen käytössä on se, että sen käyttö täytyy suunnitella. Lisäksi se täytyy mitoittaa ja kiristää oikein. Muuten pulttiliitoksen luotettavuus kärsii.

Useimmiten pulttiliitoksessa on enemmän kuin yksi pultti, mutta opinnäytetyöni Excel laskentaohjelma on yksinkertaistettu siten, että se perustuu yhden pultin laskentaan ja sen kuorma sekä pultin sijainti ja ulkoinen kuormitus ovat keskellä materiaalia ja pulttia.

### 4.2 Pulttiliitosten suunnittelu ja laskenta

Pultin kiristyksen takia pultissa on jo erittäin suuri jännitys. Hyvin suunniteltu liitos aiheuttaa sen, että pultin liitoksen kuorma näkyy hyvin vähän pulteissa vetojännityksen lisäyksenä ja enimmäkseen vain puristetussa materiaalissa puristusjännityksen vähennyksenä. Jännityksen lisäyksenä ja vähennyksenä pulttikaaviossa täytyy huomioida mitoituksessa, jotta ulkoinen kuorma ei ole liian suuri pulteille. Pulttiliitoksessa täytyy tarkastella pulttien kiinnipysymistä sekä pultteihin kohdistuvaa

ulkoista kuormaa. Pintapaineet liitoksessa ovat myös yksi tarkastuskohde, erityisesti pultin pään alainen pintapaine. Sitä voidaan vähentää aluslaattoja käyttämällä ja niiden käyttöä suositellaan varsinkin silloin, kun kokoonpuristuva materiaali on pehmeää, kuten esimerkiksi alumiini tai kupari.

Lautasjousia käytetään sellaisissa pulttiliitoksissa, jotka ovat alttiita lämpötilanvaihteluille tai, jos pulttiliitoksessa on normaalia enemmän asettumaa. Lautasjousia käytetään muun muassa kuparikiskojen liitoksissa. Jos tällaisissa liitoksissa käytettäisiin joitain muita aluslaattoja, saattaisi pultin kiristys löystyä ajan saatossa. Lautasjouset ylläpitävät pultin esikiristyksen riippumatta lämpötilavaihtelusta tai asettumisesta.

#### **4.2.1 Pultin kiristys momenttimenetelmällä**

Pultit voidaan kiristää erilaisilla menetelmillä. Yleisin kiristystapa on momenttimenetelmä. Se ei kuitenkaan ole tarkin menetelmä johtuen olosuhteista, momenttiavaimen tarkkuudesta, kitkakertoimista, inhimillisistä tekijöistä sekä pulttiliitoksen suunnittelusta.

Pulttien mitoitus tapahtuu minimikitkakertoimeen, mutta kun maksimikitkakeroin astuu voimaan ja huomioidaan muut tekijät kuten asettuminen, momenttiavaimen tarkkuus sekä kiristysprosessin tarkkuus, voi esikiristys usein olla useamman kymmenen prosenttia pienempi. Tämän hajonnan vähentämiseksi pulttiliitoksien kiristämisessä käytetään kierteiden voiteluaineita, puhtaita ja koristetuja liitospintoja, tarkkoja momenttiavaimia sekä kiristysmenetelmiä pienellä hajonnalla.

#### **4.2.2 Kulmamenetelmä**

Kulmamenetelmän kiristys on jaettu kahteen vaiheeseen: alkukiristys ja loppukiristys. Alkukiristys tehdään tavallisella momenttiavaimella, jotta liitetyt komponentit sopivat tiiviisti toisiinsa ennalta määriteltyyn kiristysmomenttiin. Seuraa-

vaksi aloitetaan lopullinen kiristys. Lopullinen kiristyskulma määräytyy pultin halkaisijan ja puristetun materiaalin paksuuden sekä jäykkyyden perusteella. Kun pulttia tai mutteria kiristetään ennalta määrättyyn kulma-arvoon, pultin kireys saavuttaa vaaditun esijännitysarvon.

Kiristyskerroin on suhdeluku saavutetusta jännityksestä suhteessa myötörajaan, joka kertoo, kuinka monta astetta pulttia tai mutteria pitää kiertää tietyn esikiristytksen saavuttamiseksi. Jos pultti on pidempi, ovat venymä sekä kulma isompia, vaikka pultin halkaisija olisi sama. Kiristyskerroin  $\alpha_A$  on kulmamenetelmällä ainoastaan 1,1 eli paljon tarkempi kuin momentti menetelmä, jonka kiristyskerroin liikkuu 1,4–2,5 alueella. Kulmamenetelmän huono puoli on se, että jos käytössä on lyhyt pultti, niin pultti venyy vähemmän, jolloin kulmamenetelmän kulma on pienempi ja siten epätarkkuus on isompi. /4,5/

#### **4.2.3 Hydraulinen menetelmä**

Hydraulinen kiristysmenetelmä on kaikista tarkin, siinä kiristyskerroin  $\alpha_A$  on 1,1 tai vähemmän, riippuen kiristyspituuden ja pultin halkaisijan suhteesta. Hydrauliikan avulla kiristysvoimaa saadaan paljon enemmän, mitä perinteisillä kiristystyökaluilla. Kun pulttia kiristetään hydraulisesti, aiheuttaa se pultissa venyttävää voimaa tuottaen siihen ainoastaan vetojännitystä. Hydraulisella menetelmällä on mahdollista kiristää useampi pultti samanaikaisesti.

Muita kiristysmenetelmiä ovat iskevät työkalut, joita ei pitäisi koskaan käyttää tarkoissa pulttiliitoksissa, niiden kiristyskerroin on 2,5–4. Tämä tarkoittaa sitä, että hyvin usein pultit ovat jopa ylikiristettyjä. Se on epätarkka menetelmä kiristää pulttiliitoksia ja sitä käytettäessä tulee paljon meteliä, joten kuulosuojaimien käyttö on erittäin suositeltavaa. Lisäksi iskevät työkalut voivat vaurioittaa työntekijän käsiä sekä ranteita, mistä voi koitua sairauslomapäiviä työntekijöille. Nykyään käytössä on tarkkoja akkukäyttöisiä kiristystyökaluja, jotka mittavat samanaikaisesti sekä kiristysmomenttia että kiristyskulmaa ja täten saadaan tuplavarmistus siitä, että pultin kiristys on tapahtunut onnistuneesti. /6/

#### 4.2.4 Voitelu

Voiteluaineena voidaan käyttää esimerkiksi Molykoten tuotteita, joita on useita. Muita voiteluaineita ovat öljy, kierrevoiteluaineet tai kierrelukiteaineet. Kierrelukite on hyvä vaihtoehto, sillä se voitelee pulttiliitoksen kierteet kiristysvaiheessa, ja se toimii myös lukitteena, jotta pulttiliitoksen kiinni pysyminen parantuisi. Kierrelukite kestää korkeaa lämpötilaa ja sitä löytyy eri voimakkuuksilla, riippuen käyttökohteen vaatimuksista.

Tunnetuin kierrelukitetta valmistava merkki on Loctite. Loctite 220-sarja on kevyt ja 240-sarja on keskivahva kierrelukite. 240-sarjaa käytetään yleisesti eniten siksi, koska se on aika voimakas kierrelukite, mutta pulttiliitoksen saa vielä mahdollisesti haluttaessaan auki. 270-sarja on niin vahva kierrelukite että jos sitä käytetään pehmeän materiaalin, kanssa kuten alumiinin, ja pulttiliitosta yritetään avata jälkepäin, se saattaa jopa hajottaa kierteet alumiinimateriaalista. On eri voiteluaineita ja eri kitkakertoimia samalle pulttikoolle sekä eri kiristysmomentteja, joten näiden kanssa tulee helposti virheitä asentajille tai suunnittelijoille. Tämän takia täytyisi minimoida virhemarginaali standardisoimalla myös voiteluaineet.

#### 4.2.5 Pulttiliitoksen suunnittelu

Pulttiliitoksen suunnittelussa täytyy huomioida pultin jännitystila esikiristyksessä, mutta myös ulkopuolisesta kuormituksesta syntyvä lisäjännitys pultissa sekä pintapaineet koko pulttiliitoksessa. Korroosion kestävyys on huomioitava pultin ja mutterin valinnoissa ja/tai korroosion suojauksessa. Sähköisessä laitteessa, kuten muuntajassa, käytetään myös austeniittisia, haponkestäviä ja ruostumattomia pultteja, johtuen niiden huonosta sähkönjohtavuudesta. Jos pulttiliitoksissa käytettäisiin sähköä johtavia materiaaleja, kuten martensiittisiä pultteja, ne rupeaisivat kuumenemaan magneettikierteissä. Muuntajan säiliön ulkopuolella olevat kiinnityskohdat ovat myös haponkestäviä ja niiden pulttiliitoksessa tulisi myös

käyttää haponkestävää pulttia. Pulttiliitoksissa ei saa aiheuttaa galvaanista korroosiota käyttämällä erilaisia materiaaleja. Jos materiaali on pehmeää, pinta on maalattu tai pinnassa on epäpuhtauksia, menee se enemmän kasaan ja asettuminen syntyy pulttiliitoksessa.

Pulttiliitos on erittäin huono, jos siinä on käytössä lyhyt pultti, suuri pultin halkaisija, useampi kokoon puristettava pinta, useita aluslaattoja, pehmeitä aluslaattoja, pinta on maalattu, pintaa ei ole koneistettu, likaa liitospinnassa sekä epätasaisuudet pinnassa. Näistä syistä kokoon puristettava materiaali menee paljon kasaan ja pultin venymä on pieni ja pulttiliitos löystyy. Jos taas käytössä on pitkiä vaarnapultteja, kuten esimerkiksi moottorin sylinterin kannessa, jossa on puhtaat koneistetut pinnat sekä kokoon puristava materiaali on niin jäykkää, että materiaali ei mene paljoa kasaan ja pultti venyy paljon, on kiinnipysyminen hyvä ja ulkopuolisen kuorman osuus pulteissa on hyvin pieni. /4,5/

#### **4.2.6 Pultit**

Yleisimpiä pulttivaihtoehtoja ovat kuusiokolopultti tai kuusiopultti. Pulteissa vaihtoehtona ovat täysikierteinen tai osakierteinen pultti. Kuusiokolopultin käytön hyödyt ovat se, että sen pultinpään halkaisija on pienempi ja sen asentaminen vie vähemmän tilaa. Näitä käytetään ahtaissa paikoissa. Sen huonona puolena on se, että kuusiokolon käyttö ulkoisissa tiloissa, kuten muuntajan säiliön ulkopuolella, altistaa sen säätiloille. Kuusiokolo voi kerätä vettä sekä likaa tai siihen voi tulla korroosiota, joka vaikeuttaa pulttiliitoksen avaamista. Kuusiokolopultin työkalun kosketuspinta-ala on pieni ja, siten työkalun kuluma on iso. Siksi kuusiopultti on suositeltava, jos työ sen sallii.

Hitachi Energyllä on lisäksi käytössä vaarnapultteja sekä kierretankoja osakierteisenä että täysikierteisenä. Ne on kiristetty sekä momentilla että hydraulisesti vetämällä. Momenttikiristystä tulisi välttää pitkissä vaarnapulteissa, sillä momentin aiheuttama kiertymä vaikuttaa haitallisesti jo aikaisemmin esitettyjen haittojen lisäksi.

#### **4.2.7 Mutterit**

Mutterivalikoima on erittäin laaja, mutta yleisimmät muuntajassa käytetyt mutterit ovat normaalimutteri ja lisäksi hattu- sekä kupumutteri siitä syystä, että terävät reunat sekä korkea jännite ovat huono yhdistelmä. Haluamme muuntajan säiliön sisäpuolella terävät reunat halutaan minimoida ja käyttää mahdollisimman paljon hattu- tai kupumuttereita.

#### **4.2.8 Kierteet**

Pulttiliitos perustuu kiilaukseen, eli siinä on kierre ja nousu, joka on kiilan muotoinen, ja joka mahdollistaa voiman saamisen kiertäessä. Laskentaohjelmasta löytyy hienokierre ja normaalikierre. Voisi luulla, että hienokierre on näistä parempi siitä syystä, että sen pohjahalkaisija on hieman isompi, mutta hienokierteiden takia siinä on vähemmän materiaalia, joka kantaa leikkauskuormaa. Hienokierteisessä pultissa pohjasäde on pienempi, mikä on väsymislajuuden kannalta huonompi vaihtoehto. Väsyttävässä kuormituksessa tulisi aina käyttää normaalikierteistä pulttia. Hienokierteistä pulttia voidaan käyttää erikoistapauksissa, kuten nosto- tai siirtopulteissa.

Pulttien sekä kierretankojen kierteet olisi hyvä valssata siksi, että valssauksessa syntyy puristusjännitystä kierteiden pinnassa ja raevirtaus pysyy ehjänä. Väsyttävässä kuormassa syntyvä loppujännitys jää pienemmäksi, kun kierteissä on valmiiksi puristusjännitystä. Koneistetusti leikkaamalla kierteitä, syntyy kierteiden pinnassa vetojännitystä ja raevirtaus on katkaistu. Tähän vielä lisätään kiristyksistä sekä ulkopuolisesta kuormasta tuleva vetojännitys. Siksi aina kun on väsyttävä kuorma, pitäisi käyttää valssattuja kierteitä. Standardipulteissa kierteet ovat aina valssattuja, sillä se on hyvä ja nopea massatuotantotapa pulteille.

#### **4.2.9 Pintakäsittely**

Yleisimpiä pintakäsittelyjä ovat kuumasinkitys, sähkösinkitys sekä epäorgaaninen sinkkihiutalepinnoite. Kuumasinkitys voi aiheuttaa vetyhaurautta pulteissa. Se

syntyy, kun pultit käsitellään ennen sinkitystä hiilivetypuhdistusaineella. Jos pultin valmistuksessa on sattunut virhe ja siinä sattuu olemaan mikroskooppisen pieni kolo tai rako raerajojen välissä, johon hiilivety pääsee tunkeutumaan, on vaarana, että pultti voi katketa jo esikiristysvaiheessa tai sen jälkeen.

Sähkötolpissa käytetään kuumasinkittyjä pultteja johtuen niiden hyvästä korroosiokestävyydestä ja staattisesta kuormituksesta. Sähkösinkitys ei kestä säätilojen korroosion rasitusta. Tästä syystä sen käyttöä tulee välttää, jos kohde sijaitsee ulkotiloissa. Epäorgaanisen sinkkihiutalepinnoitteen käyttöä suositellaan, koska sen paksuutta voidaan vaihdella riippuen käyttötarpeista. Korroosion kestävyys paranee paksummalla epäorgaanisella sinkityksellä. Tällä ei ole taipumusta vetyhaurauteen. /8/

#### **4.2.10 Lujuusluokat**

Käytetyimmät pulttien lujuusluokat ovat 8.8, 10.9 sekä 12.9. Muita ei niin yleisiä lujuusluokkia ovat 4.6, 5.6 sekä 6.8. Paras lujuusluokka tavallisille teräspulteille on 8.8. Se on hyvä kompromissivaihtoehto, sillä se on tarpeeksi kestävä ja sen murtovenymä on isompi kuin 10.9 ja 12.9 lujuusluokilla. 8.8 pultin käyttöä suositellaan aina. Lujuusluokat ovat A2 ruostumaton kiinnike ja A4 haponkestävä kiinnike.

Ruostumattoman ja haponkestävän materiaalin hintaerot eivät ole suuret, niin haponkestävää materiaalia suositellaan aina, koska sillä on parempi korroosion kestävyys sekä paremmat lujuusominaisuudet ja samalla pultin koolla saadaan isompi esikiristysvoima. Tämän lisäksi A4 haponkestävän pultin myötöraja on noin 600 MPa kun taas 8.8 pultin myötöraja on 640 MPa. Tämä tarkoittaa sitä, että niiden myötörajat ovat hyvin lähellä toisiaan. A4 haponkestävässä pultissa on hieman suuremmat kitkakertoimet, mitä 8.8 pultissa. Näille molemmille voidaan käyttää samaa kiristysmomenttia, mikä helpottaa asennusta, sillä silloin ei tarvitse muistaa useita eri kiristysmomentteja eri pulteille. /5,7/

## 5 PULTTILIITOKSEN LASKENTAOHJELMA EXCELISSÄ

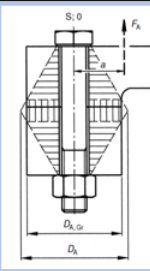
Laskentaohjelman käytössä ei ole tarvetta hakea lähtötietoja standardeista. Excelissä on kymmeniä välilehtiä, joihin on syötetty kaikki mahdollinen data, mitä tarvitaan laskennoissa. Laskentaohjelmassa on otettu huomioon kitkakertoimet, kokoon puristettavan materiaalin mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet. Pulttien, muttereiden ja aluslaattojen mitat sekä niitten mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet. Lisäksi on huomioitu lautasjousien mitat sekä voimat. Laskentakaavat perustuvat VDI 2230 standardiin. Välilehdet on suojattu, jotta käyttäjät eivät pääse muokkaamaan standardisoituja arvoja. Laskurin käyttäjä pystyy ainoastaan antamaan pyydettyjä lähtöarvoja Main Sheetissä.

### 5.1 Syötettävät arvot

Excelissä täytyy täyttää vain punaisella olevat solut. Riippuen, mitä halutaan laskea, on pulttiliitoslaskuri ohjelmoitu siten, että se näyttää punaisella ne solut, joiden arvot tarvitaan laskentaan.

#### 5.1.1 Ympäristö

Kuten kuvassa 3 esitetään, pulttiliitoksen laskentaohjelmassa täytyy ensin syöttää ympäristössä vaikuttavat tekijät. Ensimmäisenä syötetään aksiaalinen ulkoinen kuorma sekä muodonmuutostartion maksimiulkohalkaisija. Tämä on fiktiivinen, missä käytetään minimi sädettä sylinteriä luodessa. Tämän jälkeen lisätään liitokseen kohdistuvat lämpötilat. Ne ovat kokoonpanossa oleva lämpötila, toimintalämpötila sekä säilytyslämpötila.

1.1 Environment		Fill in the red cells			
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Axial external load, a component, directed in the bolt axis and proportionally related to the bolt of a working load $F_B$ in any direction	$F_A$	N	20 000	Should be applied with a load safety factor of 1,3.	
Limiting outside diameter, maximum diameter of the deformation cone. This is the minimum material in the bolt joint. If there is a multi bolt joint use the smallest radius of material and multipli it with two to have this diameter.	$D_{A,Gr}$	mm	50		
Assembly temperature	$T_{assembly}$	°C	20	Lowest possible	
Operation temperature	$T_{operation}$	°C	70	Highest possible	
Storage temperature	$T_{storage}$	°C	-30	Lowest possible for outside	

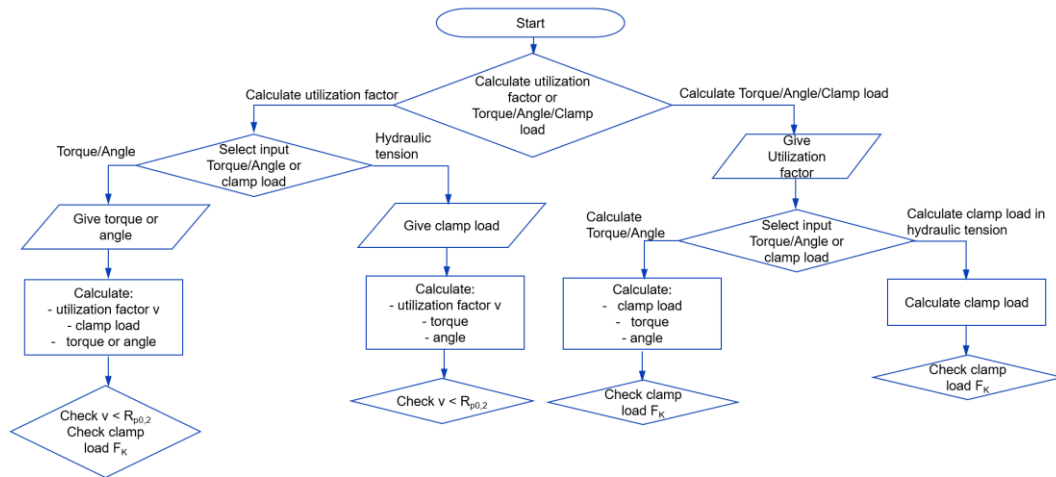
Kuva 3. Ympäristössä vaikuttavat tekijät.

### 5.1.2 Kiristysmenetelmät

Kuvassa 4 esitetty kaavio on selvennys kiristysmenetelmästä. Aluksi valitaan, halutaanko laskea käyttökerroin vai vääntömomentti/kulma/kiristysvoima. Jos halutaan laskea käyttökerroin (reitti vasemmalle), niin seuraavaksi täytyy valita antaaako laskentaohjelmalle kiristysmomentin, kiristyskulman tai kiristysvoiman, riippuen valittavasta kiristysmenetelmästä. Tämän jälkeen, jos valitaan kiristysmenetelmä momentti/kulma menetelmästä, ohjelmalle täytyy antaa kiristysmomentti tai kiristyskulma. Jos taas kiristysmenetelmäksi valitaan hydraulinen kiristys, ohjelmalle annetaan seuraavaksi kiristysvoima. Jos ohjelmalle syötetään momentti/kulma, niin se laskee käyttökerroimen, kiristysvoiman sekä momentin tai kulman, riippuen kumman arvot syötettiin aiemmassa vaiheessa laskentaohjelmaan. Jos aiemmin kiristysmenetelmäksi valittiin hydraulinen kiristysmenetelmä, ohjelma laskee käyttökerroimen, kiristysmomentin sekä kiristyskulman.

Kun taas halutaan laskea momentti/kulma/kiristysvoima (reitti oikealle), laskentaohjelmalle täytyy syöttää käyttökerroin. Tämän jälkeen on kaksi vaihtoehtoa: laskea kiristysvoima hydraulisella jännityksellä tai laskea momentti/kulma. Jos halutaan laskea kiristysvoima hydraulisella vetämisellä, syötetään käyttökerroin. Jos

taas lasketaan momentti/kulma, vastaukseksi ohjelma antaa kiristysvoiman, kiristysmomentin sekä kiristyskulman.



Kuva 4. Kiristysmenetelmä kaavio

Pulttiliitoksen laskentaohjelmassa ympäristössä vaikuttavien tekijöiden jälkeen syötetään kiristysmenetelmän lähtötiedot. Ensin valitaan kiristysmenetelmä kolmesta vaihtoehdosta: momentti-, kulma- tai hydraulisesta kiristyksestä. Sitten valitaan pultin laskentatapa elastisesta tai plastisesta vaihtoehdosta. Normaalisissa elastisessa väännössä on laskennallisesti suurin vääntöjännite pinnassa ja keskiössä vääntöjännitystä ei ole lainkaan. Korkeassa vääntöjännityksessä tapahtuu plastisoitua ja oletetaan, että on sama jännitys poikkipinnassa. Plastista vaihtoehtoa suositellaan VDI 2230:n mukaan momentti- sekä kulmamenetelmässä. Seuraavaksi valitaan, halutaanko laskea käyttökerroin, joka on prosenttiluku myötörajan tai vaihtoehtoisesti vääntömomentti, kulma tai kiristysvoima. Tämän jälkeen, jos halutaan laskea vääntömomentti, kulma tai kiristysvoima, Excelliin syötetään myötörajan käyttökerroin käytössä. Se on yleensä 80 % - 90 %. Seuraavaksi annetaan kiristysmomentti sekä momenttiavaimen ja kiristysprosessin tarkkuus. Momenttiavaimen sekä kiristysprosessin tarkkuudeksi laitetaan se mitä avaimen käyttöohjeessa lukee. Tämän jälkeen laskuriin voidaan syöttää kiristyskulma sekä kul-

maavaimen tarkkuus. Tämän jälkeen syötetään hydraulinen jännitysvoima ainoastaan, jos se aikaisemmin valittu. Kuvan 5 esimerkkinä on jätetty kiristysprosessin tarkkuus tyhjäksi. Solu näkyy punaisella, mikä tarkoittaa, että sille täytyy vielä syöttää jokin arvo, jotta laskeminen on mahdollista.

1.2 Tightening method				
Description	Designation	Unit	Value	Notes
Tightening method	Tightening method		Torque	Select from list.
Torsional section modulus consideration in torque or angle tightening			Plastic	Select from list. Plastic recommended by VDI 2230. In hydraulic tension elastic.
Do you wish to calculate utilization factor or torque/angle/clamp load			Utilization factor	Select from list.
Utilization factor of the yield point stress in operation	v	%		Generally 80 - 90 %
Tightening torque	$M_A$	Nm	80.0	In case of hydraulic tightening "NA"
Torque wrench accuracy	$M_{accuracy\ wrench}$	±%	5 %	
Tightening angle	$\Phi_A$	°		In case of torque or hydraulic tightening "NA"
Angle wrench accuracy	$\Phi_{accuracy}$	±%		
Hydraulic tension force	$F_{hydraulic}$	kN		
Tightening process accuracy	$M_{accuracy\ process}$	±%		

Kuva 5. Kiristysmenetelmä

### 5.1.3 Pulttitiedot

Ensimmäisenä kuvan 6 mukaisesti valitaan valikosta pulttityyppi: valittavana on viisi eri pulttia. Tämän jälkeen valitaan pultin materiaali listalta, vaihtoehtoja listalla on kahdeksan. Standardipulteilla on kolme hiiliterästä ja kaksi austeniittista vaihtoehtoa. Loput materiaaleista ovat kierretangoille ja vaarnapulteille. Seuraavaksi valitaan pultille hienokierre tai normaalikierre. Pultin nimellinen halkaisija valitaan tämän jälkeen. Pienin listalla oleva pultti on M6 ja suurin M64. Seuraavaksi valitaan pultin varren muotoilu.

Pultin varsi voi olla samaa halkaisijaa kuin kierteessä tai redusoidulla varrenhalkaisijalla. Toistaiseksi laskentaohjelma ei sisällä redusoitujen varren halkaisijoiden laskentaa. Tämän jälkeen laskuri näyttää automaattisesti pultin varren halkaisija. Seuraavaksi laskuriin voi sijoittaa kierteiden pituuden, jos pulttityyppinä on valittuna osittain kierteinen tanko.

1.3 Bolt data					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Bolt type			Hexagon shank bolt DIN931 ISO4014 partly threaded	Select from list	
Bolt material			8.8	Select from list	
Thread pitch			Normal	Select from list	
Nominal bolt diameter	d	mm	M12	Select from list. Recommended M8, M12, M16, M20, M24, M36, M48, M56, M64	
Select shank design	shank diameter same as nominal diameter			Select from list	
Calculated recommended necked-down diameter	$d_{\text{necked down rec}}$	mm		$d_{\text{necked down rec}} = 0,9 * (d - 1,22687 * p) = 0,9 * d_s$	
Given necked down diameter	$d_{\text{necked down}}$	mm		To be given only if bolt has necked down diameter	
Selected shank diameter	$d_{\text{shank}}$	mm	12.0		
Length of threads in partially threaded bar	$L_{\text{thread bar}}$	mm			

Kuva 6. Pulttitiedot

### 5.1.4 Voitelu

Kuvassa 7 esitetään kuinka, voitelussa ensimmäisenä valitaan kierteille sekä pultin pään alle voiteluaine kiristyksessä. Vaihtoehtona ovat Molykoten tai Loctiten tuotteet, mutta myös mineraaliöljy tai ilman voiteluaineita. Seuraavaksi laskuri näyttää taulukosta kierteiden sekä pultin pään minimi- ja maksimikitkakertoimet, jos niistä on kirjallisuudesta löydetty arvoja. Valitettavasti on vaikeaa löytää kitkakertoimia erilaisille materiaaleille ja voiteluaineille ja tämän takia laskentaohjelmassa on paljon tyhjiä soluja kitkakertoimille. Tämän jälkeen laskurin käyttäjä pystyy vielä lisäämään käsin toisenlaiset mitta-arvot.

1.4 Lubrication					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Thread lubrication during tightening			Molykote P1000	Select from list	
Bolt head lubrication during tightening			Molykote P1000	Select from list	
Thread min friction coefficient from data table	$\mu_{\text{threadmin}}$		0.13	Automatic from data table	
Thread max friction coefficient from data table	$\mu_{\text{threadmax}}$		0.16	Automatic from data table	
Bolt head min friction coefficient from data table	$\mu_{\text{headmin}}$		0.08	Automatic from data table	
Bolt head max friction coefficient from data table	$\mu_{\text{headmax}}$		0.10	Automatic from data table	
Thread min friction coefficient given by user	$\mu_{\text{threadmin}}$		0.12	Values given by user	
Thread max friction coefficient given by user	$\mu_{\text{threadmax}}$		0.18	Values given by user	
Bolt head min friction coefficient given by user	$\mu_{\text{headmin}}$		0.12	Values given by user	
Bolt head max friction coefficient given by user	$\mu_{\text{headmax}}$		0.18	Values given by user	

Kuva 7. Voitelu

### 5.1.5 Aluslaatat

Aluksi valitaan aluslaattatyyppe kuvan 8 mukaisesti. Vaihtoehtona listalta voi valita normaaleja aluslaattoja, paksuja aluslaattoja, lautasjousialuslaattoja tai kokonaan ilman aluslaattoja. Tämän jälkeen valitaan, kuinka monta aluslaattaa on pultin kannan alla ja kuinka monta aluslaattaa mutterin alla. Jos ei ole mutteria, levyaihiassa tehty pohjakierre tulisi aluslaattojen määrä muttereiden alla olla nolla.

1.5 Washers					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Type of washer			Spring DIN 6796	Select from list	
Number of washers below bolt head	$n_{washerhead}$		1	Drawing maximum 4	
Number of washers under nut	$n_{washernut}$		0	Drawing maximum 1, 0 in tapped hole	

Kuva 8. Aluslaatat

### 5.1.6 Puristetut materiaalit

Kuvassa 9 näytetään, kuinka ensimmäisenä valitaan valikosta puristettu materiaali pultin kannan alla. Seuraavaksi annetaan materiaalin paksuus. Tämän jälkeen valitaan valikosta vapaan reiän halkaisija. Vaihtoehtoina on hieno, keskiverto tai karkea. Seuraavaksi määritetään viisteen koko vapaa reiässä. Tämän jälkeen valitaan, onko pultin pään alla (vaihtoehdot Compressed material 1 – Compressed material 2, Compressed material 2 – mutteri tai Compressed material 2 – kierrytetty materiaali) oleva materiaali koneistettu vai onko siinä maaliväriä, pinnoitetta tai onko siinä tiivistettä. Jos valitaan koneistettu pinta, seuraavana valitaan koneistetun pinnan karheus. VDI 2230:ssä pinnankarheus on annettu Rz arvoina, vastaavat Ra arvot ovat arvioituna. Jos taas valitaan pinnaksi maaliväri, pinnoite tai tiiviste, tulee seuraavanaksi asettaa näiden paksuus pultin kannan alla. Tämän jälkeen tulee asettaa arvioitu maaliväri/pinnoitteen/tiivisteiden asettuminen kaikissa liitospinnoissa. Lopuksi asetetaan vielä samat arvot pultin toisella puolella olevalle materiaalille. Excel laskurissa pystyy asettamaan kahdelle puristetulle materiaalille arvot.

1.61 Compressed material 1				
Description	Designation	Unit	Value	Notes
Compressed material 1 under bolt head	Mat1 <sub>compr</sub>		S355JO	Select from list
Thickness of compressed material 1 under bolt head	T1 <sub>matcompr</sub>	mm	20	
Diameter of free hole			Average	Select from list
Size of chamfer for free hole		mm	1	Increasing contact diameter radially
Surface under bolt head			Machined	Select from list
Machined surface roughness under bolt head			$R_z < 40 \mu\text{m}$ or $0,6 - 2,8 \mu\text{m}$ $R_a < 3,6 - 12 \mu\text{m}$	Select from list
Paint/Plating/Gasket thickness under bolt head		$\mu\text{m}$		
Estimated compression of Paint/Plating/Gasket under bolt head		%		
Surface opposite to bolt head side			Machined	Select from list
Machined surface roughness opposite side to bolt head			$R_z < 40 \mu\text{m}$ or $0,6 - 2,8 \mu\text{m}$ $R_a < 3,6 - 12 \mu\text{m}$	Select from list
Paint/Plating/Gasket thickness surface opposite to bolt head side		$\mu\text{m}$		
Estimated compression of Paint/Plating/Gasket surface opposite to bolt head side		%		

Kuva 9. Puristettu materiaali 1

### 5.1.7 Ulkoisten kierteiden materiaali

Kuvassa 10 ensin valitaan, tapahtuuko kiinnitys mutterin avulla vai vastakappaleessa olevien kierteiden avulla. Tämän jälkeen valitaan listalta ulkoisten kierteiden materiaali. Jos kiinnitys tapahtuu vastakappaleessa olevien kierteiden avulla, seuraavaksi asetetaan vastakappaleen materiaalin paksuus. Tämän jälkeen valitaan valikosta avustavan porauksen halkaisija. Vaihtoehtoina on hieno, keskiverto tai karkea.

Seuraavaksi asetetaan viisteen koko vapaata reikää varten. Tämän jälkeen valitaan kevennysreiän syvyysetaisyys kierteiden loppumisesta porareian loppuun. Seuraavaksi valitaan puristetun materiaalin pinnan valinta koneistetusta tai maaliväristä/pinnoitteesta/tiivisteestä. Tämän jälkeen, jos puristettu pinta on koneistettu, asetetaan koneistetun pinnan karheus. Lopuksi vielä asetetaan maaliväriin/pinnoitteen/tiivisteiden paksuus sekä sen arvioitu puristus puristetusta pinnasta, jos pinta ei ole koneistettu.

1.7 Threaded material				
Description	Designation	Unit	Value	Notes
Nut or tapped thread			Tapped thread	Select from list
Threaded material			8.8	Select from list
Thickness of tapped material		mm	40	
Relief drilling diameter			Average	Recommended for improved bolt joint contact pressure. Can at minimum be a 45 degree chamfer.
Size of chamfer for free hole		mm	2	Increasing contact diameter radially
Relief drilling depth		mm	1	Recommended for increasing clamping length.
Distance thread end to bottom			Min	Select from list
Surface towards compressed material			Machined	Select from list
Machined surface roughness towards compressed material			$Rz < 40 \mu\text{m}$ or $0,6 - 2,8 \mu\text{m}$ $Ra < 3,6 - 12 \mu\text{m}$	Select from list
Paint/Plating/Gasket thickness towards compressed material		$\mu\text{m}$		
Estimated compression of Paint/Plating/Gasket towards compressed material		%		

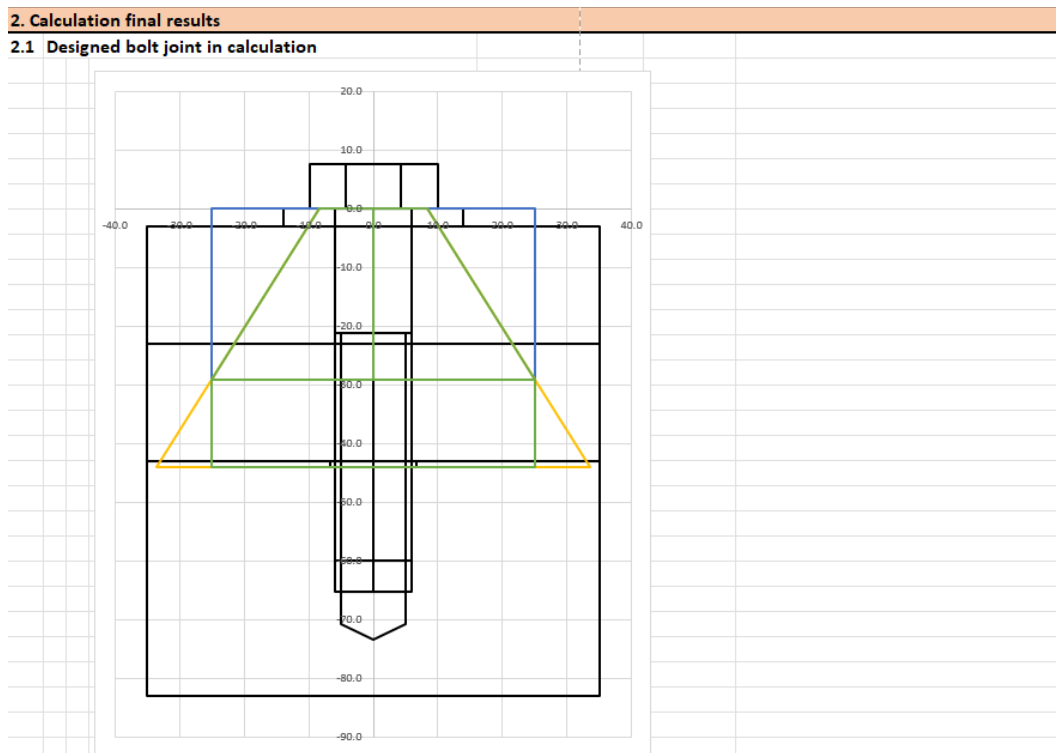
Kuva 10. Kierteiden materiaali

## 5.2 Laskentatulokset

Laskentatuloksissa Excel piirtää annetuista arvoista pulttiliitoksesta kuvaajan, josta näkee kaikki komponentit ja ne ovat mittakaavassa. Lisäksi tuloksiin on lisätty hälytykset, jotka ilmoittavat, jos jokin annetuista arvoista on väärässä tai sitä ei ole mahdollista laskea. Hälytykset myös ilmoittavat, mikä on vialla ja mitä arvoja tulisi muuttaa, jotta laskenta olisi mahdollista. Laskentatuloksissa on listattu pultin sekä kierteiden tietoja, jotka on jo aiemmin laskuriin syötetty. Tässä luvussa on annettu kaikki Excelin laskemat laskentatulokset.

### 5.2.1 Pulttiliitoksen kuvaaja

Excel piirtää kuvan 11 mukaisesti annetuista arvoista kuvaajaa pulttiliitoksesta, ja siitä näkee kaikki lisätyt komponentit kuten aluslaatat, pultin ja mutterin. Kuva päivittyy reaaliajassa aina, kun pulttiliitoksen arvoja muokataan. Pultin koko sekä pulttityyppi myös päivittyvät kuvaan.



Kuva 11. Pulttiliitoksen kuvaaja

### 5.2.2 Hälytykset

Hälytyksiin tulee ilmoituksia syötettyjen arvojen virheistä, kuten kuvassa 12 esitetään. Ensimmäisenä ilmoitukseen tulee valitun pultin saatavuus. Seuraavana se ilmoittaa, onko puristimen pituuden ja halkaisijan suhde riittävä. Tämän jälkeen tulee maksimaalinen käyttökerroin, joka sisältää käyttölämpötilan ja ulkoisen aksiaalikuorman vaikutuksen. Seuraavaksi hälytyksissä ilmoitetaan kosketuspaineen tarkistus sekä aluslevyn vähimmäiskovuus. Tämän jälkeen tulee jäljellä oleva kiristysvoima ennen liitoksen avautumista. Viimeisenä on rajoittava ulkohalkaisija, muodonmuutoskartion suurin halkaisija.

2.2 Alerts		Area	Description
		Available bolt length	Bolt length exist
		Clamp length to diameter ratio	Clamping length to diameter 3.7 ratio is sufficient
		Maximum utilization factor incorporating impact of operation temperature and external axial load FA	Utilization factor is 93 %, and beneath 100%
		Contact pressures check	Contact pressures in all contacts are ok
		Safety factor to yielding $R_{p0.2}$	Safety factor to yielding is 2.1, the minimum is 1.1 and in lifting 2.0
		Safety factor to rupture $R_m$	Safety factor to rupture is 6.7, in lifting limit is 3.0
		Minimum hardness of washer	200 HV
		Remaining clamp load before joint opens with reduced clamp load in tightening	Margin in external load FA is 5.2 kN before joint opens
		Limiting outside diameter, maximum diameter of the deformation cone	Increase outside diameter cell G6 if possible to min 50.5 mm

Kuva 12. Hälytykset

### 5.2.3 Valittu pultti

Kuvassa 13 esitetään seuraava: valitussa pulttityypissä ilmoitetaan aiemmin syötetyt pulttiarvot sekä pultin kiinnityspituus, pultin pituus, kierteiden pituus sekä kiinnityspituuden ja halkaisijan suhde.

2.3 Selected bolt					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Bolt type	Hexagon shank bolt DIN931 ISO4014 partly threaded				
Bolt material			8.8		
Thread pitch			Normal		
Nominal bolt diameter	d	mm	M12		
Clamping length of bolt	lk	mm	44		
Bolt length	Lbolt	mm	60		
Length of the threads	Lthread	mm	38.8		
Clamping length to diameter ratio			3.7	Recommended 3 - 5 VDI 2230 - Studs > 5	

Kuva 13. Valittu pultti

### 5.2.4 Kierteiden materiaali

Kuva 14 esittää, kuinka kierteiden materiaali kohdassa aluksi on listattu syötettyjä arvoja kierteille, kuten kierteiden materiaali, kierteiden materiaalin paksuus, porauksen halkaisija, viisteen koko vapaata reikää varten. Tämän jälkeen Excel ilmoittaa kevennysporasyvyyden sekä vähimmäispituuden kiinnitetyille kierteille. Seuraavaksi tulee kiinnittyneen kierteen pituuden ja halkaisijan suhde. Tämän jälkeen ilmoitukseen tulee ei aktiivisten kierteiden pituus sekä pultin kierteiden pituus

päästä pohjaan, pultin päästä poratun reiän pohjaan asti sekä myös etäisyys poran kärjestä kierretyn materiaalin pintaan.

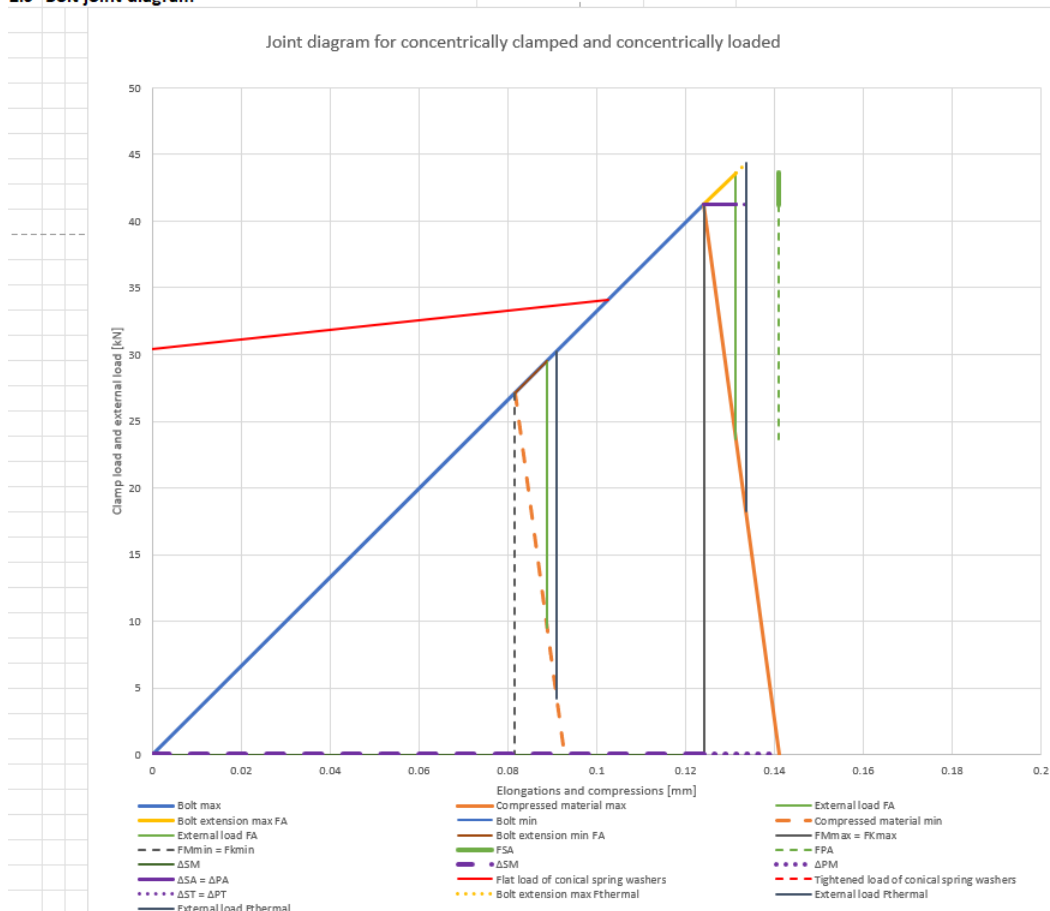
2.4 Tapped material					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Tapped material			8.8	Select from list	
Thickness of tapped material		mm	40.0		
Relief drilling diameter			Average	Recommended for improved bolt joint contact pressure. Can at minimum be a 45 degree chamfer.	
Relief drilling diameter		mm	13.5		
Size of chamfer for free hole		mm	2.0	Increasing contact diameter radially	
Relief drilling depth		mm	1.0	Recommended for increasing clamping length.	
Minimum engaged thread length in tapped thread	$L_{engaged\ threads\ final}$	mm	8.0		
Engaged thread length to diameter ratio	$L_{engaged\ threads} / d$		0.7		
Inactive threads in tapped threads	$L_{inactive\ threads}$	mm	5.3	3 x Pitch	
Distance thread end to bottom			Min		
Distance thread end to drill bottom		mm	5.5		
Distance from drill tip the surface of tapped material		mm	9.5		

Kuva 14. Kierteiden materiaali

### 5.2.5 Pulttiliitoskaavio

Pulttiliitoskaavio (kuva 15) on visuaalinen esitys pultin venymästä ja kokoon puristavan materiaalin puristamisesta. Sininen viiva on pultin jousivakio ja se on kuvan mukaan kiristetty 41 kN:iin. Oranssi viiva näyttää kokoon puristettavan materiaalin puristumisen. Tämä on ideaali tilanne missä käytössä on pienin kitkakerroin. Oranssi katkoviiva näyttää taas vähennetyn kitkakertoimen, joka näyttää kun käytössä on maksimikitka, maksimiasettuminen, pienin mahdollinen tarkkuus työkälussa ja kiristysmenetelmässä. Oikeanpuolimmainen vihreä viiva osoittaa ulkopuolisen kuorman vaikutuksen pulttiliitoksessa.

## 2.5 Bolt joint diagram



Kuva 15. Pulttiliitoskaavio

### 5.2.6 Pulttiliitos

Tässä kuvassa esitetään useita tuloksia pulttiliitoksesta. Tuloksissa näkyy muun muassa kiristysmomentti, kiristyskulma, käyttökerroin kiristyksessä, myötöraja sekä murtoraja. Tuloksista näkee myös suurimman että pienimmän kiristysvoiman kiristyksen yhteydessä sekä hydraulisen jännitysvoiman maksimi ja minimiarvon.

Tulokset esittävät muuntajan käytössä sekä varastoinnissa olevan lämpötilan vaikutukset kiristysvoimaan ja työkalun sekä kiristysmenetelmän vaikutukset. Tuloksista ilmenee suurin kiristysvoima, joka sisältää ulkoisen aksiaaliskuorman vaikutuksen ja käyttölämpötilan vaikutukset ulkoiseen aksiaaliseen kuormaan. Lopuksi esitetään vielä pultin venymäarvoja sekä muita tuloksia.

2.6 Bolt joint					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Tightening torque	$M_A$	Nm	80.0		
Maximum tightening angle	$\Phi_{A \max}$	°	29.0		
Minimum tightening angle	$\Phi_{A \min}$	°	19.1		
Utilization factor at tightening	$v$	%	85.0 %	Should not exceed 90%	
Reduced utilization factor at tightening	$v_{\text{red}}$	%	56.6 %	Reduced due to max friction, tool accuracy, tightening process accuracy and embedding.	
Maximum utilization factor incorporating impact of external axial load $F_A$	$v_{FA}$	%	91.1 %		
Maximum utilization factor incorporating impact of operation temperature and external axial load $F_A$	$v_{\text{operation temp} + FA}$	%	92.6 %	Should not exceed 100%. The embedding will reduce this clamp load. On the other hand might the tool accuracy and the tightening process accuracy increase the clamp load.	
Safety factor to yielding	$SF_{\text{yield}}$		2.1	Material safety factor limit 1,1	
Safety factor to rupture	$SF_{\text{rm}}$		6.7		
Maximum clamp load at tightening	$F_k$	kN	41.2		
Reduced clamp load for bolt joint analyses	$F_{k \text{ reduced}}$	kN	27.1	Reduced due to max friction, tool accuracy, tightening process accuracy and embedding.	
Hydraulic tension force maximum	$F_{\text{hydraulic max}}$	kN	0.0		
Hydraulic tension force minimum	$F_{\text{hydraulic min}}$	kN	0.0	Reduced due to tool accuracy and tightening process accuracy and embedding.	
Increase in clamp load with impact of temperature in operation	$F_{k \text{ temperature operation}}$	kN	0.6	Negative value decrease of clamp load	
Increase in clamp load with impact of temperature in storage	$F_{k \text{ temperature storage}}$	kN	3.0	Negative value decrease of clamp load	
Decrease in clamp load due to embedding of contact surface	$F_{k \text{ embedding}}$	kN	-5.1	Negative value decrease of clamp load	
Decrease in clamp load due to tool accuracy and tightening process accuracy	$F_{k \text{ tightening accuracy}}$	kN	-6.2	Negative value decrease of clamp load	
Maximum clamp load incorporating impact of external axial load $F_A$	$F_{k \text{ FA}}$	kN	43.6		
Maximum clamp load incorporating impact of operation temperature external axial load $F_A$	$F_{k \text{ operation temp} + FA}$	kN	44.4	The embedding will reduce this clamp load. On the other hand might the tool accuracy and the tightening process accuracy increase the clamp load.	
Axial external load, a component, directed in the bolt axis and proportionally related to the bolt of a working load $F_B$ in any direction	$F_A$	kN	20.0		
External load $F_A + F_T$ at joint opening with maximum clamp load at tightening	$F_{A \text{ joint open max}}$	kN	46.9		
External load $F_A + F_T$ at joint opening with reduced clamp load at tightening	$F_{A \text{ joint open reduced}}$	kN	30.8		
Margin in external load before joint opens with reduced clamp load at tightening	$F_{A \text{ margin joint open rec}}$	kN	20.8		
Margin in external load before joint opens with reduced clamp load at tightening	$F_{A \text{ margin joint open rec}}$	kN	4.7		
Flat load of conical spring washers	$F_{\text{washers}}$	kN	34.1		
Deflection of one spring washer to flat	$\Delta l_{\text{washer}}$	mm	0.950		
Maximum elongation of bolt at tightening	$\Delta l_{\text{max assembly}} = f_{SM}$	mm	0.124		
Maximum compression of clamped material at tightening	$\Delta l_{\text{min assembly}} = f_{SM}$	mm	0.017		
Minimum elongation of bolt at tightening	$\Delta l_{\text{min assembly}} = f_{SM}$	mm	0.082		
Minimum compression of clamped material at tightening	$\Delta l_{\text{min assembly}} = f_{SM}$	mm	0.011		
Reduction of clamped length due to embedding in contact	$\Delta l_{\text{embedding}} = f_Z$	mm	0.018		
Increased displacement in operation	$\Delta l_{\text{thermal}} = f_{\text{thermal}}$	mm	0.002		
Additional elongation of bolt and compression due to external axial load $F_A$	$\Delta l_{FA}, \Delta l_{FA} : f_{SA}, f_i$	mm	0.007		

Kuva 16. Pulttiliitos

### 5.2.7 Kiristysvoiman vähentäminen

Kiristysvoiman vähentämisenä ilmoitetaan kuvassa 17 työkalun ja kiristys menetmän tarkkuudet sekä myös asettumisen ja lämpötilan vaikutukset.

2.7 Clamp load reductions					
<b>Tool accuracy</b>					
	Description	Designation	Unit	Value	Notes
	Torque or angle tool accuracy	M <sub>accuracy wrench</sub>	±%	5 %	
<b>Tightening process accuracy</b>					
	Description	Designation	Unit	Value	Notes
	Tightening process accuracy	M <sub>accuracy tightening</sub>	±%	10 %	
<b>Total embedding</b>					
	Description	Designation	Unit	Value	Notes
	Total embedding	f <sub>z</sub>	µm	17.5	
<b>Temperature change impact</b>					
	Description	Designation	Unit	Value	Notes
	Increased displacement in operation	Δf <sub>operation temperature</sub>	µm	2.2	Negative value decrease of displacement
	Increased displacement in storage	Δf <sub>storage temperature</sub>	mm	10.4	Negative value decrease of displacement

Kuva 17. Kiristysvoiman vähentäminen

### 5.2.8 Kosketuspintapaineet

Kuvassa 18 näkyy, että kosketuspaineiden tuloksissa tulee ilmi muun muassa pultin pään kosketuspinnan kosketuspaine kiristyksessä ilman lämpötilan vaikutuksia sekä aksiaalikuormaa että ne huomioon ottaen. Tämän jälkeen tulee rajoittava pintapaine, joka ei saa ylittyä sekä ilmoitus joka kertoo, onko pintapaine hyväksyttävällä tasolla. Näitä tuloksia saadaan pultin päästä, puristetusta materiaalista, aluslaatasta joka sijoittuu pultin pään alle sekä puristetusta materiaalista, kahdesta eri puristetusta materiaalista, puristetusta materiaalista kierteistä materiaalia vasten ja viimeisenä puristettu materiaali aluslaatan tai mutterin kanssa.

2.8 Contact pressures					
<b>Bolt head</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on bolt head contact surface in tightening	$P_{\text{bolt head tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>			
Contact pressure on bolt head contact surface including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>		The embedding will reduce this clamp load. On the other hand might the tool accuracy and the tightening process accuracy increase the clamp load.	
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>			
Surface pressure check			OK		
<b>Bolt head - compressed material 1</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on compressed material 1 under bolt head in tightening	$P_{\text{head compr 1 tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>			
Contact pressure on compressed material 1 under bolt head including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>			
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>			
Surface pressure check			OK		
<b>Washer bolt head side - compressed material 1</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on bolt head contact surface in tightening	$P_{\text{bolt head tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>	181	$d_{Wa} = d_W + 1,6 h_S$	(194)
Contact pressure on bolt head contact surface including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>	195	$d_{Wa} = d_W + 1,6 h_S$	(194)
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>	760		
Surface pressure check			OK		
<b>Compressed material 1 - 2</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on bolt head contact surface in tightening	$P_{\text{bolt head tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>	5		
Contact pressure on bolt head contact surface including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>	6		
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>	760		
Surface pressure check			OK		
<b>Compressed material 1/2 - tapped material</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on bolt head contact surface in tightening	$P_{\text{bolt head tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>	5		
Contact pressure on bolt head contact surface including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>	6		
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>	760		
Surface pressure check			OK		
<b>Compressed material 2 - washer</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on bolt head contact surface in tightening	$P_{\text{bolt head tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>		$d_{Wa} = d_W + 1,6 h_S$	(194)
Contact pressure on bolt head contact surface including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>		$d_{Wa} = d_W + 1,6 h_S$	(194)
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>			
Surface pressure check			OK		
<b>Compressed material 2 - nut</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on bolt head contact surface in tightening	$P_{\text{bolt head tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>			
Contact pressure on bolt head contact surface including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>			
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>			
Surface pressure check			OK		
<b>Nut</b>					
Description	Designation	Unit	Value	Notes	
Contact pressure on bolt head contact surface in tightening	$P_{\text{bolt head tightening max}}$	N/mm <sup>2</sup>			
Contact pressure on bolt head contact surface including impact of temperature and external axial load $F_A$	$P_{\text{bolt head temp + FA}}$	N/mm <sup>2</sup>			
Limiting surface pressure	$p_G$	N/mm <sup>2</sup>			
Surface pressure check			OK		

Kuva 18. Kosketuspintapaineet

## 6 SUUNNITTELU

### 6.1 Kaavat

#### 6.1.1 Kiristysmomentin laskenta annetulla käyttökertoimella

$$M_A = M_G + M_K \quad 7.1.1.1$$

$$M_G = F_M \times \frac{d_2}{2} \times \tan(\varphi + \rho') \quad 7.1.1.2$$

$$\tan(\varphi + \rho') \approx \tan \varphi + \tan \rho' \quad 7.1.1.3$$

$$\tan \varphi = \frac{P}{\pi \times d_2} \quad 7.1.1.4$$

$$\tan \rho' = \mu'_G = \frac{\mu_G}{\cos(\alpha/2)} \quad 7.1.1.5$$

$\alpha = 60^\circ$  kierteen kylkikulma

$$M_G = F_M \times \frac{d_2}{2} \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_G \min}{\cos 30^\circ} \right) \quad 7.1.1.6$$

$$M_G = F_M \times \left( \frac{P}{2 \times \pi} + \frac{d_2 \times \mu_G \min}{2 \times \cos 30^\circ} \right) \quad 7.1.1.7$$

$$M_G = F_M \times (0,16 \times P + 0,58 \times d_2 \times \mu_G \min) \quad 7.1.1.8$$

$$M_K = F_M \times \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_{K \min} \quad 7.1.1.9$$

$$M_A = M_G + M_K \quad 7.1.1.10$$

$$M_A = F_M \times \left( \frac{P}{2 \times \pi} + \frac{d_2 \times \mu_G \min}{2 \times \cos 30^\circ} + \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_{K \min} \right) \quad 7.1.1.11$$

$$D_{Km} = \frac{(d_W + D_{Ki})}{2} \quad 7.1.1.12$$

$$D_{Ki} = \max(D_a, d_{ha}, d_h, d_a) \quad 7.1.1.13$$

### 6.1.2 Kiristysvoima annetulla käyttökertoimella

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2} \quad 7.1.2.1$$

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_0} \quad 7.1.2.2$$

$$\tau_{max} = \frac{M_G}{W_P} \quad 7.1.2.3$$

$$\text{Elastinen: } W_P = \frac{\pi \times d_0^3}{16} \quad 7.1.2.4$$

$$\text{Plastinen: } W_P = \frac{\pi \times d_0^3}{12} \quad 7.1.2.5$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3 \times \tau_M^2} = v \times R_{P0,2} \quad 7.1.2.6$$

$$v \times R_{P0,2} = \sqrt{\frac{F_M^2}{A_0^2} + 3 \times \frac{M_G^2}{W_P^2}} \quad 7.1.2.7$$

$$M_G = F_M \times \frac{d_2}{2} \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right) \quad 7.1.2.8$$

$$v \times R_{P0,2} = \sqrt{\frac{F_M^2}{A_0^2} + \frac{3 \times F_M^2 \times d_2^2 \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right)^2}{4 \times W_P^2}} \quad 7.1.2.9$$

$$v \times R_{P0,2} = F_M \times \sqrt{\frac{1}{A_0^2} + \frac{3 \times d_2^2}{4 \times W_P^2} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right)^2} \quad 7.1.2.10$$

$$F_M = \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{\frac{1}{A_0^2} + \frac{3 \times d_2^2 \times 12^2}{4 \times \pi^2 \times d_0^6} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right)^2}} \quad \text{Plastinen} \quad 7.1.2.11$$

$$F_M = \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{\frac{1}{A_0^2} + \frac{3 \times d_2^2 \times 4^2 \times 3^2}{4 \times \pi^2 \times d_0^6} \times \left( \frac{P}{\pi \times d} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right)^2}} \quad \text{Plastinen} \quad 7.1.2.12$$

$$A_0^2 = \frac{\pi^2 \times d_0^4}{4^4} \quad 7.1.2.13$$

$$F_M = A_0 \times \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{1 + \frac{3 \times d_2^2 \times 3^2}{4 \times d_0^2} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right)^2}} \quad \text{Plastinen} \quad 7.1.2.14$$

$$F_M = A_0 \times \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}} \quad 7.1.2.15$$

Plastinen K=3 7.1.2.16

Elastinen K=4 7.1.2.17

### 6.1.3 Käyttökerroin annetulla vääntömomentilla

$$F_M = A_0 \times \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}} \quad 7.1.3.1$$

$$v = \frac{F_M \times \sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}}{A_0 \times R_{P0,2}} \quad 7.1.3.2$$

$$M_A = F_M \times \left[ \frac{P}{2 \times \pi} + \frac{d_2 \times \mu_{Gmin}}{2 \times \cos 30^\circ} + \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_{Kmin} \right] \quad 7.1.3.3$$

$$M_A = \frac{F_M}{2} \times \left[ \frac{P}{\pi} + \frac{d_2 \times \mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} + D_{Km} \times \mu_{Kmin} \right] \quad 7.1.3.4$$

$$F_M = \frac{2 \times M_A}{\left[ \frac{P}{\pi} + \frac{d_2 \times \mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} + D_{Km} \times \mu_{Kmin} \right]} \quad 7.1.3.5$$

$$F_M = \frac{M_A}{\left[ \frac{P}{2 \times \pi} + \frac{d_2 \times \mu_{Gmin}}{2 \times \cos 30^\circ} + \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_{Kmin} \right]} \quad 7.1.3.6$$

$$v = \frac{M_A \times \sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}}{A_0 \times R_{P0,2min} \times \left[ \frac{P}{2 \times \pi} + \frac{d_2 \times \mu_{Gmin}}{2 \times \cos 30^\circ} + \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_{Kmin} \right]} \quad 7.1.3.7$$

Plastinen K=3 7.1.3.8

Elastinen K=4 7.1.3.9

$$d_0 = d_s = \frac{d_2 + d_3}{2} \quad \text{Varren pulteille} \quad 7.1.3.10$$

$$d_0 = d_T = 0,9 \times d_3 \quad \text{Kauluspulteille} \quad 7.1.3.11$$

$$D_{Km} = \frac{d_w + D_{ki}}{2} \quad 7.1.3.12$$

$$D_{ki} = \max(D_a, d_{na}, d_h, d_a) \quad 7.1.3.13$$

#### 6.1.4 Käyttökerroin annetulla kulmalla

$$F_M = A_0 \times \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu_{Gmin}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}} \quad 7.1.4.1$$

$$\frac{\beta}{\Delta l_{smax} + \Delta l_{pmax}} = \frac{360^\circ}{P} \quad 7.1.4.2$$

$\beta$  kulma pultin venyessä sekä puristettu materiaali

$$\frac{(\Delta l_{smax} + \Delta l_{pmax}) \times 360^\circ}{P} = \beta \quad 7.1.4.3$$

$$\Delta l_{Smax} = F_M \times \delta_S \quad 7.1.4.4$$

$$\Delta l_{Pmax} = F_M \times \delta_P \quad 7.1.4.5$$

$$\beta = \frac{360^\circ}{P} \times (F_M \times \delta_S + F_M \times \delta_P) \quad 7.1.4.6$$

$$\beta = \frac{360^\circ \times (\delta_S + \delta_P)}{P} \times F_M \quad 7.1.4.7$$

$$F_M = \frac{\beta \times P}{360^\circ \times (\delta_S + \delta_P)} \quad 7.1.4.8$$

$$F_M = A_0 \times \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{\pi \times d_2} + \frac{\mu G_{min}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}} \quad 7.1.4.9$$

$$\frac{\beta \times P}{360^\circ \times (\delta_S + \delta_P)} = A_0 \times \frac{v \times R_{P0,2}}{\sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{2\pi} + \frac{\mu G_{min}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}} \quad 7.1.4.10$$

$$v = \frac{\sqrt{1 + 3 \times \left[ \frac{K \times d_2}{2 \times d_0} \times \left( \frac{P}{2\pi} + \frac{\mu G_{min}}{\cos 30^\circ} \right) \right]^2}}{A_0 \times R_{P0,2}} \times \frac{\beta \times P}{360^\circ \times (\delta_S + \delta_P)} \quad 7.1.4.11$$

Plastinen K=3 7.1.4.12

Elastinen K=4 7.1.4.13

### 6.1.5 Hydraulisen kiristysen hyötysuhde annetulla kiristysvoimalla

$$A_0 = \frac{\pi \times d_0^2}{4} \quad 7.1.5.1$$

$$d_0 = d_S = \frac{d_2 + d_3}{2} \quad \text{Varren pulteille} \quad 7.1.5.2$$

$$d_0 = d_T = 0,9 \times d_3 \quad \text{Kauluspulteille} \quad 7.1.5.3$$

$$V = \frac{F_M}{R_{P0,2} \times A_0} \quad 7.1.5.4$$

### 6.1.6 Kiristysvoima hydraulisessa kiristyksessä annetulla käyttökertoimella

$$A_0 = \frac{\pi \times d_0^2}{4} \quad 7.1.6.1$$

$$d_0 = d_S = \frac{d_2 + d_3}{2} \quad 7.1.6.2$$

$$d_0 = d_T = 0,9 \times d_3 \quad 7.1.6.3$$

$$F_M = V \times R_{P0,2} \times A_0 \quad 7.1.6.4$$

### 6.1.7 Esilatauksen muutos upotuksen vuoksi

$$F_Z = \frac{f_Z}{\delta_S + \delta_P} \quad 7.1.7.1$$

### 6.1.8 Lämpölaajenemisen vaikutus kiristysvoimaan

$$F_{vth} = \frac{l_k \times (\alpha_S \times \Delta T_S - \alpha_P \times \Delta T_P)}{\delta_S \times \frac{E_{SRT}}{E_{ST}} + \delta_P \times \frac{E_{PRT}}{E_{EPT}}} \quad 7.1.8.1$$

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Pulttiliitoksen laskentaohjelma tarjoaa suunnittelijalle helpon tavan laskea pulttiliitoksen mitoitusarvot Excelissä ilman erillistä manuaalista laskentaa, mikä säästää aikaa ja vähentää virheiden määrää. Ohjelma perustuu VDI 2230 standardin mukaisiin arvoihin, jolloin käyttäjän ei tarvitse etsiä näitä tietoja erikseen, vaan ne ovat valmiiksi ohjelmassa.

Ohjelma auttaa suunnittelijaa valitsemaan oikeat pultit ja mutterit sekä aluslaatat muuntajan tuotekehityksessä. Ohjelma ilmoittaa myös käyttäjälle mahdollisista virheistä, kuten kiristysvoiman ja halkaisijan suhteesta, tai maksimaalisesta käyttökertoimesta. Tämä auttaa varmistamaan luotettavat laskentatulokset. Käyttäjä voi syöttää tarvittavat tiedot ja saada laskentatulokset nopeasti, jolloin laskentaohjelman käyttö on sujuvaa ja helppoa, mikä tekee suunnitteluprosessista tehokkaampaa.

Jatkokehitysideana ohjelmaan voisi lisätä graafisia ominaisuuksia tai mahdollisuuden tallentaa laskentatulokset raporttimuotoon.

## LÄHTEET

- /1/ Teollisen muuntajavalmistuksen historia Suomessa (hitachienergy.com)  
Viitattu 11.03.2024 <https://www.hitachienergy.com/news/features/2024/02/fi-teollisen-muuntajavalmistuksen-historia-suomessa>
- /2/ Muuntajatekniikan perusteet. Hitachi Energy:n sisäinen koulutusmateriaali. Viitattu 11.03.2024
- /3/ Perusrakenne ja valmistus. Hitachi Energy:n sisäinen koulutusmateriaali. Viitattu 11.03.2024
- /4/ Luijen pulttien laskentamenetelmä ja varotoimet - Uutiset (jinruibolts.com) Viitattu 26.03.2023 <https://fi.jinruibolts.com/news/calculation-method-and-precautions-for-high-st-68466520.html>
- /5/ tekn\_fin.pdf (ferrometal.fi) Viitattu 26.03.2024 [https://www.ferrometal.fi/media/downloads/catalogues/tekn\\_fin.pdf](https://www.ferrometal.fi/media/downloads/catalogues/tekn_fin.pdf)
- /6/ Pulttien kiristäminen turvallisesti suorituskykyisillä korkeapainetuotteilla | CEJN (FI) Viitattu 28.03.2024  
<https://www.cejn.com/fi-fi/articles/quick-couplings-for-safe-and-efficient-hydraulic-bolt-tensioning/>
- /7/ etra ruuvien-tekniiset-mitat taulukot 2021 muokattu.pdf  
Viitattu 10.04.2024 [https://www.etra.fi/media/mageworx/downloads/attachment/file/e/t/etra ruuvien-tekniiset-mitat taulukot 2021 muokattu.pdf](https://www.etra.fi/media/mageworx/downloads/attachment/file/e/t/etra_ruuvien-tekniiset-mitat_taulukot_2021_muokattu.pdf)

/8/ NG Kuumasinkityskäsikirja 2020.pdf (aurajoki.fi) Viitattu 10.04.2024  
[https://www.aurajoki.fi/aj/wp-content/uploads/2020/08/NG\\_Kuumasin-  
kitysk%C3%A4sikirja\\_2020.pdf](https://www.aurajoki.fi/aj/wp-content/uploads/2020/08/NG_Kuumasin-<br/>kitysk%C3%A4sikirja_2020.pdf)