



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Risto Linnanmäki

Laippakytkinsarjan suunnittelu teollisuusvaihteisiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

2.5.2020

Tekijä Otsikko	Risto Linnanmäki Laippakytkinsarjan suunnittelu teollisuusvaihteisiin
Sivumäärä Aika	39 sivua + 3 liitettä 2.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneautomaatio
Ohjaajat	Lehtori Janne Nuotio Teknologiajohtaja Mika Lämsä Aluemyyntipäällikkö Juho Ala-Jääski
<p>Tämän insinööriyön aiheena oli laippakytkinsarjan suunnittelu Sew Industrial Gears Oy:n suurimpiin teollisuusvaihteisiin. Tavoitteena oli selvittää isoille vaihteille tarvittavien kytkimien materiaalit, mitat ja suorituskyvyt myyntiä varten, sekä tehdä 3D-mallit ja tarvittavat kuvat.</p> <p>Työn aikana perehdyttiin alan kirjallisuuteen ja standardeihin, sekä keskusteltiin alan ammattilaisten kanssa. Suunnittelussa hyödynnettiin kirjallisen tiedon lisäksi yrityksen kokemusperäisiä tietoja. Kytkimet mitoitettiin käyttäen apuna yrityksen käytössä olevia laskentaohjelmia ja taulukkolaskentaohjelmaa.</p> <p>Insinööriyöhön liittyi useita lujuusopillisia asioita kuten, materiaalin lujuusarvojen määrittämistä, erilaisten liitosten laskentaa sekä FEM-laskennan tulosten analysointia. Lisäksi työn aikana selvitettiin koneistukseen ja aihioihin liittyviä vaatimuksia.</p> <p>Lopputuloksena saatiin toimiva laippakytkinsarja yrityksen suurimmille vaihteille. Kytkimiä on nyt helppo tarjota asiakkaille, kun materiaalit, mitat ja suorituskyvyt ovat tiedossa. Myös suunnittelu nopeutuu, kun 3D-malleja ja valmistuskuvia on valmiina.</p>	
Avainsanat	Teollisuusvaihde, Laippakytkin, Kutistusliitos, Kiilaliitos, Ruuviliitos

Author Title	Risto Linnanmäki Flange Coupling Series for Industrial Gears
Number of Pages Date	39 pages + 3 appendices 2 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Professional Major	Machine Automation
Instructors	Janne Nuotio, Senior Lecturer Mika Lämsä, Technology Manager Juho Ala-Jääski, Area Sales Manager
<p>The topic of this Bachelor's thesis was the design of the flange coupling series for the largest industrial gears of Sew Industrial Gears Oy. The objective was to determine the materials, dimensions and performances of the couplings needed for large gears for sale, as well as to create 3D models and the necessary drawings.</p> <p>For the thesis, topic-related literature and standards were studied. Also industry professionals were interviewed. In addition to written information, the company's experiential information was used in the design process. The couplings were dimensioned with the calculation programs and spreadsheet programs used by the company.</p> <p>The Bachelor's thesis examines several strength calculation theories issues, such as the determination of material strength values, calculation of different joints and analysis of the results of the FEM calculation. Furthermore, the requirements relating to machining and preforms were defined.</p> <p>The result was a functional flange coupling series for the company's major gears. Couplings are now easy to provide for customers when materials, dimensions and performance are known. In addition, it can speed up the design process that the 3D models and manufacturing drawings are ready.</p>	
Keywords	flange coupling, shrink fit, key connection, screw connection

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Laippakytkin	2
2.1	Aiheen rajaus ja reunaehdot	3
2.2	Materiaalit	4
2.2.1	Valurauta	5
2.2.2	Nuorrutusteräs	5
2.3	Aihiot	6
2.3.1	Valuaihio	6
2.3.2	Takeet	6
2.4	Kutistusliitos	7
2.5	Ruuviliitos	10
2.6	Tasakiilaliitos	11
3	Suunnittelu	14
3.1	Kutistusliitos	14
3.2	Öljyurien suunnittelu	17
3.3	Ruuviliitoksen suunnittelu	18
3.4	Tasakiilaliitoksen laskenta	20
3.5	FEM-laskenta	22
3.5.1	Laskennan suorittaminen	22
3.5.2	Laskennan tulokset	24
3.6	Nostaminen	28
3.7	3D-mallit ja valmistuskuvat	28
3.7.1	Valumallin suunnittelu	29
3.7.2	Koneistuksien suunnittelu ja koneistuskuvat	30
4	Kytkimen asennus ja irrotus	33
5	Taulukot	35
6	Yhteenveto	36
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1. Taulukko ja mittakuva Hytorc MTX-hydraulivääntimestä

Liite 2. WNVapp-asiakasdokumentti

Liite 3. Kytkimen irroituksessa tarvittava öljynpaine

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on suunnitella suurien laippakytkimien sarja teollisuusvaihdokäyttöön. Työ tehdään SEW Industrial Gears Oy:n teollisuusvaihdetehtaalla Karkkilassa.

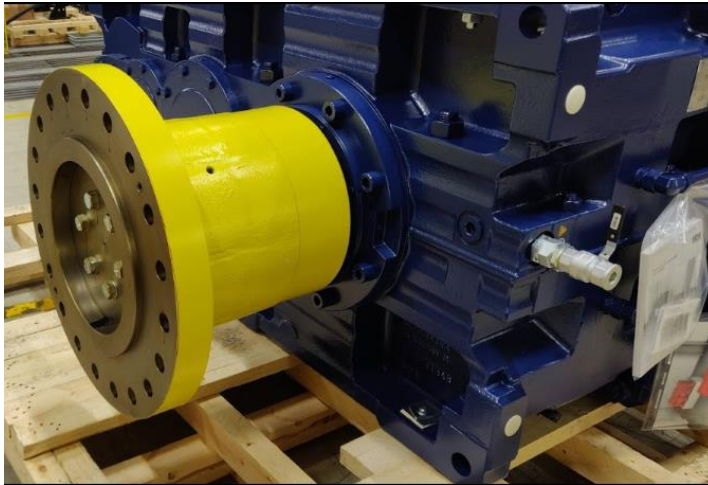
SEW Industrial Gears Oy on osa maailmanlaajuista SEW-EURODRIVE-konsernia, jonka liikevaihto oli 2017–2018 yli kolme miljardia euroa. Konsernin palveluksessa on 17 000 työntekijää, joista 160 työskentelee Karkkilassa. Konserni tarjoaa monipuolisia voimansiirtoratkaisuja teollisuuden tarpeisiin. Karkkilan tehtaalla suunnitellaan ja valmistetaan teollisuusvaihteita ja käyttöpaketteja. [19.]

Isoille teollisuusvaihteille tarkoitetun laippakytkinsarjan suunnittelulle oli tarve, jotta niitä voidaan helpommin tarjota asiakkaille. Kun mitat, materiaalit ja suorituskyvyt ovat tiedossa, voidaan arvioida valmistuskustannuksia ja myyntihinnan määrittäminen on helpompaa. 3D-mallien ja valmistuskuvien tekemisellä vähennetään suunnittelun työkuormaa.

Kytкимиä tullaan käyttämään pääasiassa MD-vaihdesarjassa, joten ne suunnitellaan kyseisen vaihdesarjan vaatimusten mukaan. MD-vaihteita on saatavilla 17 eri kokoa, ja niiden toisiomomentit ovat välillä 528–2584 kNm. [17, s. 50]. Kyseisistä vaihteista suurin osa menee kuljetin- ja sekoitinkäyttöihin. Kytkimien suunnittelussa käytetään yrityksen sisäisiä ja ulkoisia standardeja, kirjallisuutta sekä kokemukseen perustuvaa tietoa.

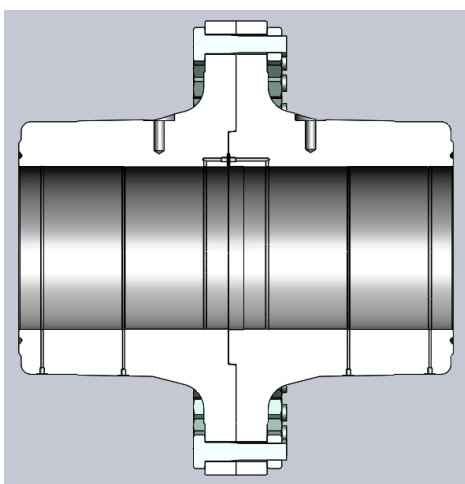
2 Laippakytkin

Laippakytkimet ovat jäykkiä kytkimiä, joilla liitetään kaksi samansuuntaista akselia toisiinsa. Suunniteltavat laippakytkimet kiinnitetään teollisuusvaihteen toisioakselille joko lieriömäisellä kutistusliitoksella tai tasakiilaliitoksella (kuva 1).

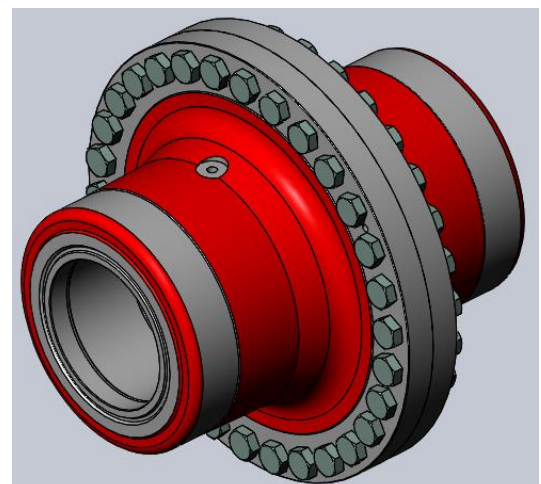


Kuva 1 Laippakytkin vaihteen toisioakselilla

Tasakiilaliitoksen etuna on, että sen avulla tehty liitos on helpompi kokoonpanna ja purkaa väljemmän sovitteen ansiosta. Kutistusliitoksen etu on siinä, että se pystyy välittämään saman momentin lyhyemmällä liitoksella. Kytkimen puolikkaat keskitetään ohjausolakkeella, joka näkyy kytkimen poikkileikkauksessa (kuva 2) ja yhdistetään toisiinsa ruuveilla (kuva 3). Laippakytkimet välittävät vääntömomenttisysäykset vaimentamattomana. [3, s. 226.]



Kuva 2 Kytkimen poikkileikkaus



Kuva 3 Laippakytkin

2.1 Aiheen rajaus ja reunaehdot

Kytkimien suunnittelun alussa tiedossa on MD-vaihdesarjan vakioakselien pituus- ja halkaisijamitat, sekä vaihteiden suurimmat vääntömomentit, jotka toimivat suunnittelun tärkeimpänä perustana. Vaihteita on kahdesta viiteen portaisia. Kytkimet suunnitellaan yli kaksiportaisten vaihteiden akseleille. Taulukossa 1 on lueteltu akselikoot ja kunkin akselikoon suurimmat nimelliset vääntömomentit.

Taulukko 1 MD-vaihdesarjan vakioakselimitat ja vääntömomentit

Akselin pituus [mm]	Akselin halkaisija [mm]	Suurin nimellinen vääntömomentti [kNm]
450	360	617
450	380	675
540	400	822
540	420	998
540	440	1209
540	460	1452
540	480	1760
680	500	2134
680	520	2584

Suunnittelun alussa selvitettiin mahdollisuuksia ottaa huomioon materiaalien väsyminen. Suurin osa kytkimistä menee kuljetin- ja sekoitinkäyttöihin. Tällaisissa käytöissä kuormitus on todellisuudessa dynaamista, mutta vaihde pyörii kuitenkin yleensä vain yhteen suuntaan ja iskukuormitus on vähäistä. Näistä syistä yritykseltä saatiin suunnitteluun ohjeistus, että kytkimien mitoituksessa ei oteta huomioon väsymistä.

Vaihteille luvataan hetkellisesti kaksinkertainen nimellismomentin kesto, joten kutistusliitokselliset kytkimet mitoitetaan kestävänsä sen keskimääräisellä akselisoovitella. Varmuus pysyviä muodonmuutoksia vastaan on tällöin pieni tiukimmalla sovitella, mutta tämä hyväksytään, koska laskennassa on niin paljon sisäisiä varmuuskertoimia. Kiilaliitos on kutistusliitosta harvemmin käytetty liitostapa tämän kokoluokan kytkimissä, eikä akselin pituutta haluta kasvattaa kytkimen takia. Tämän takia kytkimien pituudet määritellään kutistusliitoksen mukaan. Lisäksi mitoituksessa huomioidaan taivutusmomentti ja aksiaalivoima. Suurin taivutusmomentti kytkimeen kohdistuu kuljetinkäytöissä, jolloin

moottori, vaihde ja lisävarusteet asennetaan alustalle, joka tuetaan momenttituella. Kytkimien liitosten tulee olla riittävän jäykkiä, jotta niissä ei tapahdu haitallisia muutoksia, jotka vaikuttavat niiden momentinvälityskykyyn.

Sekoitinkäytössä vaihde kiinnitetään suoraan alustaan ja sekoitin kiinnitetään laippakytkimellä toisioakseliin. Sekoittimen paino voi olla kymmeniä tuhansia kiloja, mikä aiheuttaa kytkimeen aksiaalivoiman.

Asentamisen ja irrotuksen yhteydessä kytkintä lämmitetään ja tarvittaessa akselia jäähdytetään välyksen aikaan saamiseksi. Kutistusliitoksellisiin kytkimiin tulee irrotusta varten öljyurat ja liitännät pumppuja varten. Akseliliitoksesta tehdään porrastettu, koska tällöin kytkintä asennettaessa kytkin menee helposti puoleen väliin liitosmittaa. Vastaavasti myös irrotus on helpompaa.

Yritys on aiemmin suunnitellut Saksassa uudistetun kytkinsarjan MD-vaihdesarjaa pienemmälle X-vaihdesarjalle. Insinööriyön aikana tiedustellaan siinä käytettyjä kertoimia ja suunnittelumenetelmiä, jotta kytkinsarjoista saadaan mahdollisimman yhdenmukaiset.

2.2 Materiaalit

Kytkimissä käytettävät materiaalit esivalittiin aiemmin tehtyjen kytkimien perusteella ja todettiin suunnittelun aikana näihin kytkimiin sopiviksi. Materiaalina käytetään EN-GJS-600-3-valurautaa ja 42CrMo4-nuorrutusterästä. Tässä työssä suunniteltavien kytkimien kokoluokassa oletetaan kytkimen valmistamisen valuraudasta olevan kustannustehokkaampaa pienempien kytkinkokojen osalta, johtuen pienistä valmistuseristä. Suunnittelun aikana päätettiin, että kytkimet suunnitellaan niin, että neljälle pienimmälle akselihakaisijalle saadaan valurautakytkin.

Materiaalien rajapintapaineet laskentaa varten määritettiin standardin VDI 2230 [6] materiaalitulukon pohjalta. Taulukossa ei ole suoraan sopivia lujuusarvoja, mutta, koska materiaalin rajapintapaine riippuu sen murtolujuudesta, rajapintapaineet voidaan laskea käytettäville materiaalilujuuksille taulukon arvojen pohjalta. Rajapintapaineet ovat valuraudalla 1,5 ja nuorrutusteräksellä 1,3 kertaa murtolujuuden verran.

2.2.1 Valurauta

Pienemmissä kytkimissä käytetään pallografiittivalurautaa EN-GJS-600-3. Pallografiittivaluraudalla on monia hyviä suomugrafiittivaluraudan ja valuteräksen ominaisuuksia. Valurautojen sulamislämpötilat ovat matalampia kuin terästen. Matalammassa valulämpötilassa valupinnasta tulee tasaisempi, ja säästetään energiassa ja materiaalikustannuksissa. Pallomaisena esiintyvä grafiitti vaikuttaa positiivisesti vaimennuskykyyn, liukuominaisuuksiin ja työstettävyyteen. Tempervalurautoihin verrattuna pallografiittivaluraudan etuna on, että edullinen grafiitin muoto saavutetaan jo valuvaiheessa, eikä lämpökäsittelyä vaadita. Myös haluttu ferriitin ja perliitin suhde saavutetaan yleensä ilman lämpökäsittelyä. Suomugrafiittivalurautoilla on mitätön muodonmuutoskyky, kun taas pallografiittivalurautoilla esiintyy vetokokeessa venymä. [20, s.101.]

2.2.2 Nuorrutusteräs

Suuremmissa kytkimissä käytetään nuorrutusterästä 42CrMo4. Terästen lujuus- ja sitkeysominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erilaisilla lämpökäsittelyillä. Teräskytkimille tehdään nuorutus, jossa teräs karkaistaan, sammutetaan ja päästetään korkeassa lämpötilassa. Tällä materiaalille pyritään saamaan kova martensiittinen rakenne. Nuorrutetulla materiaalilla on erinomaiset lujuus-, sitkeys- ja väsymislujuusominaisuudet. [22, s. 59–60.]

Karkaisuhehkutuksessa teräksen rakenne on tarkoitus saada austeniittiseksi. Tämän jälkeen tehdään sammutus, joka tarkoittaa teräksen nopeaa jäädyttämistä austeniittialueella. Viimeisenä tehtävällä päästöhehkutuksella vaikutetaan materiaalin mikrorakenteeseen ja kovuuteen. Näihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa päästölämpötilalla. Päästämisellä vähennetään myös karkaisujännityksiä. Nuorrutusteräkselle voidaan tehdä myös pehmeäsihehkutus, jonka tavoitteena on saada materiaali helpommin koneistettavaksi. [22, s. 59–60.]

2.3 Aihiot

2.3.1 Valuaihio

Valurautaisille kytkimille valmistetaan valimossa aihio, joka pohjamaalataan kaksikomponenttisella pohjamaalilla jo valimolla korroosion estämiseksi. Mitään öljy- tai vahapohjaisia ruostesuoja-aineita ei kannata käyttää, koska ne imeytyvät valuraudan huokosiin ja huonontavat maalin tarttuvuutta, vaikka kytkin hiekkapuhallettaisiin. [4.]

Kuljetuksen ja varastoinnin aikaista suojausta voidaan tarvittaessa parantaa pakkaamalla kytkin VCI-muoviin [4]. VCI-kalvo on kyllästetty VCI:llä (*Volatile Corrosion Inhibitors*). Kalvo luovuttaa aktiivisia aineita ja tekee metallin pinnalle vettähyllivän ruosteelta suojaavan suojakerroksen, joka haihtuu, kun pakkaus avataan. VCI-pakkausten käyttö ei vaikuta metallin jatkokäsittelyyn. [11.]

2.3.2 Takeet

Teräskytkimet voidaan valmistaa joko valssatusta renkaasta tai muototakeesta. Muototakeesta tehdessä koneistettavaa materiaalia on huomattavasti vähemmän. Tuhansien kilojen painoiset kytkimet ovat oletettavasti tästä syystä järkevämpää valmistaa muototakeesta kuin valssatusta renkaasta. Esikoneistettuun aihioon tarvitsee tehdä koneistuksia saman verran kuin valuaihiosta tehtäviin. Teräsaihioiden toimitusaika on pitkä ja vaihtelee noin kuukauden ja puolen vuoden välillä. Takeita voidaan hankkia valmiiksi nuorrutettuna tai muussa terässtandardin ilmoittamassa tilassa, jolloin ne nuorrutetaan rouhintasorvauksen jälkeen [8. s. 118].

Takominen on metallin muovaamista plastisesti haluttuun muotoon ja kokoon. Muovaaminen voidaan tehdä kylmä- tai kuumamuokkaamalla. Nuorrutusteräs soveltuu hyvin kuumataottavaksi lämpötilassa 850–1300 °C [22, s. 33]. Taonnassa valetun aihion rae-koko pienenee ja mekaaniset ominaisuudet paranevat. Teollisuudessa taontaa käytetään yleensä sarjatuotteiden valmistukseen, mutta myös yksittäiskappaleiden valmistus on mahdollista. Taontaa voidaan tehdä sähkö-, paineilma- tai hydraulikäyttöisillä vasaaroilla ja puristimilla. [22, s. 9.]

Takeelle saadaan hyvä lujuus ja sitkeys, kun materiaalin syy rakenne muovautuu takeen muotojen mukaan. Takeesta tuotetta valmistettaessa materiaalihukkaa tulee verrattain vähän esimerkiksi tangosta koneistamiseen verrattuna. Taonta on sarjatuotantomenetelmä, joka on sarjakoon kasvaessa koneistusta edullisempi menetelmä. Kytkimien taeta on kuitenkin yksinkertainen ja takomolla on oletettavasti valmiina taemuotit riittävän tarkan takeen valmistamiseen. Taonnassa materiaalin sisäinen puristusjännitys kasvaa erittäin suureksi, mikä vähentää pintavikoja ja tiivistää materiaalin sisäisiä huokosia. [22, s. 11–12.]

Taetta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon jakotaso, jonka tulisi olla suora, mikäli mahdollista. Takeisiin tarvitaan päästökulma kaikille jakotasoon kohtisuorassa oleville pinnoille. Yleisimmin käytetään päästökulmaa, joka on viidestä kymmeneen astetta. Pienempiä kulmia käytettäessä voi tulla ongelmia takeen irrottamisessa muotista. Myös pyörityssäteet kannattaa pitää mahdollisimman suurina, koska liian pieni pyörityssäde voi aiheuttaa muotin rikkoutumisen tai voi tapahtua materiaalin kaksin kerroin taittumista, joka aiheuttaa ns. takoryppyjä. [22, s. 42, 44, 46, 48.]

Takomolta on kysytty tarjoutua vähän pienemmästä kytkimestä, jolloin takomo on tarjonut kahta vaihtoehtoa. Joko raakatakeena pehmeäksi hehkutettuna ilman reikää tai rouhittuna ja nuorrutettuna, jolloin takeeseen tulee myös reikä. Pehmeäksi hehkutettuna muuten kova materiaali on paremmin koneistettavissa.

2.4 Kutistusliitos

Kutistusliitos on kitkasulkeinen liitos, jossa akseli ja napa ovat puristuksissa toisiaan vastaan ja liitoksen kuormankantokyky on verrannollinen aineparien väliseen tartuntakertoimeen ja liitoksen pintapaineeseen. Liitoksen päätarkoitus on siirtää vääntömomentti akselin ja navan välillä luistamatta. Kutistusliitoksen etuja ovat hyvä keskittäminen ja hyvä kestävyys vaihtokuormituksessa. Valmistus vaatii kuitenkin tarkkuutta pienten toleranssien takia. [5, s. 347–348.]

Kutistusliitoksen laskennassa käytetään apuna saksalaista standardia DIN 7190 ja siihen pohjautuvaa suomalaista standardia SFS 5595. Standardeissa on lieriömäisellä lii-

tospinnalla olevien kutistus- ja puristusliitosten suunnittelussa käytettäviä laskentaperusteita ja suunnitteluohjeita [1, s. 1]. Standardeissa on esitetty laskentatavat liitoksille, joissa materiaalien muodonmuutokset ovat elastisella ja elastis-plastisella alueella.

Kaava, joka määrittää liitoksen vääntömomentin siirtokyvyn pintapaineella p on

$$T = \frac{\pi}{2} D_F^2 l_F v_{ru} \frac{p}{S_r} \quad (1)$$

T on vääntömomentti

D_F on liitospinnan halkaisija (nimellismitta)

l_F on liitoksen pituus

v_{ru} on tartuntakerroin tangentiaalisuunnassa liukumiseen

p on pintapaine

S_r on varmuusluku liukumiseen nähden.

Tartuntakerroin valitaan liitoksen materiaalin ja liitostavan mukaan. Standardin SFS 5595 mukaiset kertoimet on taulukossa 2. Tartuntakertoimen valinnalla on suuri vaikutus liitoksessa tarvittavaan sovitteeseen.

Taulukko 2 Kutistuliitosten tartuntakertoimia akseli- ja tangentiaalisuunnassa tapahtuvan liukumisen suhteen [1, s. 6]

Materiaalipari, voitelu, liittämismenetelmä	Tartuntakerroin μ_r, μ_{cl}, μ_u
Teräs-teräs-parit	
Normaali paineöljyliitos liitettynä mineraaliöljyllä	0,12
Paineöljyliitos, rasva poistettu liitospinnoilta, liitettynä glyseriinin avulla	0,18
Normaali kutistusliitos, napa kuumennettu enint. 300 °C asti sähköuunissa	0,14
Kutistusliitos, rasva poistettu liitospinnoilta, kuumennettu enint. 300 °C asti sähköuunissa	0,20
Teräs-valurauta-parit	
Normaali paineöljyliitos liitettynä mineraaliöljyllä	0,10
Paineöljyliitos, rasva poistettu liitospinnoilta	0,16
Teräs-alumiini-pari, kuiva	0,10 ... 0,15
Teräs-messinki-pari, kuiva	0,17 ... 0,25

Materiaalin murtovenymän ollessa alle 10 % tai murtokurouman ollessa alle 30 %, on käytettävä hauraiden materiaalien laskentatapaa, jossa materiaaliin ei saa tulla pysyviä muodonmuutoksia. Valurautakytkimille on käytettävä elastisten liitosten laskentatapaa, koska murtovenymä kytkimessä käytettävälle valuraudalle on liian pieni. Tässä työssä tarvittavilla sovitteilla myös teräskytkimien muodonmuutokset ovat elastisella alueella, joten niille käytetään samaa laskentatapaa. [1, s. 1–2.]

Tässä työssä Excel-laskentaohjelmassa tehtävissä laskuissa pintapaineen laskennassa käytetään tehollisen ahdistuksen kaavaa. Kaavassa käytetään sovitteena porauksen pienemmän ja isomman halkaisijan sovitteiden keskiarvoa. Tehollinen ahdistus lasketaan kaavalla 2.

$$|P_w| = |P| - 0,8(R_{zA} + R_{zI}) \quad (2)$$

P_w on tehollinen ahdistus

P on sovite

R_{zA} on kytkimen pinnanlaadun profiilinsyvyys

R_{zI} on akselin pinnanlaadun profiilinsyvyys.

Akselin halkaisija on suurempi kuin siihen liitettävän navan reiän halkaisija. Ennen kytkimen asennusta se lämmitetään ja tarvittaessa akselia jäähdytetään riittävän välyksen saavuttamiseksi asentamista varten. Tarvittava kytkimen liittämislämpötila lasketaan kaavalla 3.

$$\theta_{Aerf} = \theta_R + \frac{P_{\dot{U}F}}{\alpha_A D_F} + \frac{\alpha_1}{\alpha_A} (\theta_1 - \theta_R) \quad (3)$$

θ_{Aerf} on tarvittava kytkimen liittämislämpötila

θ_R on ympäristön lämpötila liitettäessä

$P_{\dot{U}F}$ on ahdistus liitettäessä

α_A on kytkimen lämpöpitenemiskerroin

D_F on liitospinnan halkaisija (nimellismitta)

α_1 on akselin lämpöpitenemiskerroin

θ_1 on akselin lämpötila liitettäessä

θ_R on ympäristön lämpötila liitettäessä.

Siirrettävissä oleva aksiaalivoima lasketaan kaavalla 4.

$$F_{ax} = \pi D_F l_F v_{rl} \frac{p}{s_r}, \quad (4)$$

v_{rl} on tartuntakerroin aksiaalisuunnassa tapahtuvaa liukumista vastaan. [6, s. 2–3.]

2.5 Ruuviliitos

Ruuviliitosta käytetään kytkimissä sen helpon asennettavuuden ja purettavuuden takia. Ruuveissa on kuitenkin paljon epäjatkuvuuskohtia, joihin muodostuu suuria jännityshuipuja, ja oikea kiristysmomentti on vaikeasti hallittavissa [5, s.157]. Ruuviliitoksen mitoituksessa käytetään useita kertoimia, joilla on iso merkitys kytkimen ruuvien koolle ja määrälle, sekä jakohalkaisijalle. Tässä insinöörityössä laskennassa käytetään VDI 2230 -standardin taulukoita. Ruuviliitoksen laskennassa käytetään KISSsoft-ohjelmaa, jonka laskenta perustuu VDI 2230- standardiin [9].

Ruuviliitos on mahdollista laskea niin, että kaikki vääntö välittyy kitkalla tai että osa vääntöstä välittyy ruuvien leikkausjännityksen kautta. Jos ruuvien halutaan välittävän vääntöä, niiden täytyy olla soviteruuveja, mikä aiheuttaa sen, että kytkimen molempien puolikkaiden ruuvien reiät tulisi koneistaa yhdessä riittävän tarkkuuden aikaan saamiseksi. On myös tilanteita, joissa asiakas tarvitsee vain toisen kytkimen puolikkaan. Näistä syistä soviteruuveja ei haluta käyttää tässä työssä suunniteltavissa kytkimissä. Laippojen liitospinnassa täytyy olla riittävä ruuvien kiristyksen aiheuttama puristusvoima, jotta liitos kestää luistamatta siihen kohdistuvan leikkausvoiman.

Liitoksen momentinvälityskyky silloin, kun liitoksen halutaan välittävän momentin ruuvien aksiaalivoiman aiheuttamalla laippojen välisellä kitkalla, lasketaan kaavalla 5. Kitkakerroin kytkimen laippojen välissä riippuu liitettävien osien materiaalista ja pinnankarheudesta.

$$T = z\mu F_n D_o / 2 \quad (5)$$

z on ruuvien lukumäärä

F_n on ruuvin aksiaalivoima

μ on liitospintojen välinen kitkakerroin

D_o on ruuvikehän jakohalkaisija.

Tämän lisäksi varmistetaan, että ruuvit pystyvät välittämään momentin myös leikkauksella [14, s. 194]. KISSsoft antaa varmuusluvut myötöä, väsymistä ja pintapainetta vastaan sekä varmuusluvun luistoa ja leikkautumista vastaan pienimmällä kiristysmomentilla.

Kiristämiseen liittyviä epävarmuuksia kompensoidaan käyttämällä kiristyskerrointa, joka määräytyy kiristystavan mukaan. Liitoksen lopulliseen momentinvälityskykyyn vaikuttaa ulkoinen aksiaalikuorma ja pinnankarheuksien tasoittumisen aiheuttama kiristysvoiman alenema. Nämä otetaan huomioon laskennassa.

2.6 Tasakiilaliitos

Tasakiilaliitos on muotosulkeinen liitos, jossa vääntömomentti välittyy akselilta kiilaan ja siitä napaan. Jotta osat kestävät, niiden sallittuja vääntömomentinsiirtokykyjä ei saa ylittää. Yleisesti käytetyt toleranssit kiilauran leveydelle ovat navassa puristussovitteella P9, liukusovitteella H9 ja akselille P9. [3, s. 246.]

Tasakiilaliitoksessa vääntömomentin aiheuttama pintapaine ei saa ylittää sallittua pintapainetta akselin ja kiilan, eikä kiilan ja navan välillä kaavojen 6 ja 7 mukaan. Yleisesti tasakiilaliitoksen momentinvälityskyky voidaan laskea seuraavilla ohjeilla.

$$M_{v,n} = p_n l t_2 \frac{1}{2} (d + t_2) \quad (6)$$

$$M_{v,a} = p_a l t_1 \frac{1}{2} (d - t_1) \quad (7)$$

$M_{v,n}$ on vääntömomentin siirtokyky navalla
 $M_{v,a}$ on vääntömomentin siirtokyky akselilla
 p_n on navan pintapaine
 p_a on akselin pintapaine
 l on kiilan pituus
 d on akselin halkaisija
 t_1 on akselin kiilauran syvyys
 t_2 navan kiilauran syvyys
 h on kiilan korkeus.

Tasakiilan momentinvälityskyky kiilan leikkautumisen mukaan voidaan laskea kaavalla 8.

$$M_{v,k} = \tau A \frac{1}{2} d \quad (8)$$

$M_{v,k}$ on tasakiilan siirtämä vääntömomentti
 A on kiilan leikkauspinta-ala
 τ on leikkausjännitys.

Suurimmalle sallitulle leikkausjännitykselle voidaan käyttää yhtälön 9 arviota.

$$\tau_{sall} = \frac{\tau_e}{N} = 0,58R_e/N \quad (9)$$

τ_{sall} on sallittu leikkausjännitys
 τ_e on leikkausmurtolujuus
 N on varmuusluku
 R_e on myötöraja.

Varmuuslukuna voidaan käyttää 1,5:tä. [3, s. 246–247.]

Tässä insinööriyössä laskenta tehdään WNVapp-ohjelmalla, joka laskee standardin DIN 6892 [21] mukaan. Ohjelma ottaa huomioon paljon enemmän liitokseen vaikuttavia asioita, kuten kuormanjakautumisen, sekä materiaalin tuki- ja kovuuskertoimet.

Standardin mukaan rajapintapaine lasketaan sitkeille materiaaleille kaavalla 10 tai 11. Materiaalin 0,2-rajasta puhutaan, kun materiaalilla ei ole selvää myötörajaa. 0,2-raja on se voima, jolla materiaaliin syntyy vetokokeessa 0,2 %:n pysyvä venymä.

$$p_{zul} = f_S f_H R_e \quad (10)$$

$$p_{zul} = f_S f_H R_{p0,2} \quad (11)$$

p_{zul} on sallittu pintapaine
 f_S on tukikerroin
 f_H on kovuuskerroin
 $R_{p0,2}$ on materiaalin 0,2-raja.

Hauraille materiaaleille rajapintapaine lasketaan kaavalla 12.

$$p_{zul} = f_S R_m \quad (12)$$

R_m on murtolujuus.

Tuki- ja kovuuskertoimet laskentaan valitaan materiaalin mukaan standardin taulukosta. Tasakiilaliitoksen yhteydessä voidaan käyttää lisäksi puristussovitetta, jolloin kiilan rasitus vähenee ja liitoksen momentinvälityskyky kasvaa.

3 Suunnittelu

Suunnittelu eteni pääpiirteittäin seuraavasti. Ensin suunniteltiin kutistusliitos, joka määrittää kytkimen navan ulkohalkaisijan. Tämän jälkeen laskettiin ruuviliitos. Laskennan jälkeen tehtiin kutistusliitoksellisten 3D-mallit ja suunniteltiin kytkimen yksityiskohdat, sekä tehtiin valmistuskuvia. Heti kun 3D-malleja oli valmiina, kytkimille alettiin tehdä FEM-laskentaa. Lopuksi määritettiin nimellismomentit tasakiilaliitoksille ja taulukoitiin kytkimien mitat ja suoritusarvot.

Kytкимиä suunniteltiin tehtäväksi viidestä aihioista. Pienin tehdään jo olemassa olevasta X-vaihdesarjan vanhan kytkinsarjan suurimmasta valusta. 400–500 mm:n akselihalkaisijoille suunniteltiin kolme kytkintä. Näin ruuvikehät pysyvät mahdollisimman pienenä ja samaan aihioon voidaan koneistaa useampia porauksia. Suurimmalla 520 mm:n akselihalkaisijalla akseli on pidempi, joten sille suunniteltiin oma kytkin.

3.1 Kutistusliitos

Kutistusliitoksen laskentaa varten tehtiin aluksi Excel-laskentaohjelma, jolla voitiin tutkia eri arvojen vaikutusta kutistusliitoksen varmuuksiin monella eri kytkinkoolla. Excel-laskennassa käytetyt materiaaliarvot ovat taulukossa 3.

Taulukko 3 Excel laskennan materiaaliarvot

	Akseli	Kytkin	Kytkin	Yksikkö
	42CrMoS4+QT	EN GJS 600-3	42CrMo4+QT	
EN	1.7227+QT	5.3201	1.7225+QT	
Kimmokerroin E	210000	174000	210000	N/mm ²
Poissonin luku	0.3	0.275	0.3	
Pinnankarheus Rz	0.0063	0.0063	0.0063	mm
Murtovenymä A	15	3	15	%
Murtolujuus Rm	700	550	700	N/mm ²
Myötöraja Re	460	340	460	N/mm ²

Kutistusliitoksellisiin kytkimiin keskiporaukseen tehdään asennuksen helpottamiseksi porrastus, jonka täytyy olla suurempi kuin sovitteen maksimiahdistus, jotta porrastuksen

välille jää varmasti riittävä välys asennusta varten. Porrastus tehdään sorvaamalla kytkimen päähän vakioakselihalkaisijaa pienempi osuus, jonka pituus on puolet kytkimen liitospituudesta.

Kutistusliitoksessa käytettävällä tartuntakertoimella on suuri vaikutus liitoksen varmuuksiin ja tarvittavaan sovitteeseen, sekä materiaaliin. Jotta saatiin riittävä varmuus luistoa ja plastisia muodonmuutoksia vastaan, päädyttiin käyttämään rasvattoman liitoksen kerroksia. Valurautaisille kytkimille käytettiin standardin mukaista tartuntakerrointa 0,16. Tämä mahdollisti esivalitun valuraudan käytön, jolla ei olisi muuten toteutunut riittävä varmuus plastisia muodonmuutoksia vastaan. Teräskytkimille valittiin lopulta hieman standardin suurinta arvoa pienempi arvo 0,18, lisävarmuuden saamiseksi. Näiden arvojen käyttäminen aiheuttaa sen, että liitos on ehdottomasti koottava rasvattomana.

Tarvittavaa sovitetta lähdettiin aluksi määrittämään yleisesti koneenrakennuksessa käytettävistä sovitteista (DIN 286), tavoitteena mahdollisimman pienikokoinen kytkin. Standardissa sovitteet on määritetty vain 500 mm:n halkaisijaan asti, joten 520 mm:n halkaisijalle piti määrittää itse ylä- ja alarajamat.

Ensin selvitettiin, voidaanko X-vaihdesarjan kytkimille tarkoitettua jo olemassa olevaa valua hyödyntää, ja tutkittiin minkä kokoinen poraus valuun voidaan tehdä. Tästä valusta valmistettava kytkin vaati sovitteeksi H7/x6, jolla varmuus luistoa vastaan jäi 380 mm:n akselihalkaisijalla hieman alle tavoitteen. Tiukempaa sovitetta ei voitu käyttää, koska haluttu varmuus pysyvään muodonmuutokseen ei olisi täytynyt. Varmuutta olisi voitu nostaa luopumalla öljyurasta ja porrastuksesta, mutta sitä ei koettu tarpeelliseksi.

Valmistuskustannuksellisista syistä päätettiin, että 440 mm:n akselihalkaisijasta ylöspäin kytkimet valmistetaan teräksestä. Oleellisimmin kutistusliitoksen momentinvälityskykyyn vaikuttavat materiaalin ja liitosmitan lisäksi kytkimen ulkohalkaisija ja valittu sovite. Varmuuksia laskettiin kaikille akselikoille eri sovitteilla ja ulkohalkaisijoilla. Laskennassa täytyi ottaa huomioon myös asennuksen vaatima lämpötila, joka ei saanut nousta liian korkeaksi. Useamman iterointikierroksen jälkeen päädyttiin käyttämään sarjan yhtenäistämiseksi kaikissa kytkimissä samaa sovitetta H7/x6. Tämä johti kahdessa suurimmassa kytkimessä melko suureen navan ulkohalkaisijan kasvuun. Samalla saatiin lisävarmuutta

liitoksen asennuksen onnistumiseen, kun vielä tiukemmista soviteista voitiin luopua. Excelillä tehdyt laskut tarkastettiin lopuksi KISSsoft-ohjelmalla, jolla saatiin hyvin lähelle samat varmuudet luistoa vastaan.

Kutistusliitosta suunniteltaessa piti ottaa huomioon myös kytkimen asentamisessa vaadittava akselin ja kytkimen lämpötilaero. Kytöntä ei voi lämmitellä liikaa, että sen materiaaliominaisuudet eivät muutu. Taulukosta 4 nähdään standardin mukaiset suurimmat sallitut liittämislämpötilat eri materiaaleilla. Tässä työssä suurin sallittu lämpötila on 250 °C, jotta pystytään olemaan varmempia, että kytkimen lämpö ei vahingoita mahdollisia kumitiivisteitä tai vaihteen muita osia. Tämä lämpötila saavutetaan yrityksen käytössä olevalla uunilla.

Taulukko 4 Suurimmat sallitut liittämislämpötilat [1, s. 9]

Navan materiaali	Liittämislämpötila °C maksimi
Pienilujuuksinen rakenneteräs Valuteräs Pallografiittivalurauta	350
Nuorrutettu teräs tai valuteräs	300
Pintakarkaistu teräs	250
Hiiletyskarkaistu teräs tai nuorrutettu rakenneteräs	200

Tarvittavat liittämislämpötilat laskettiin Excelissä standardin SFS 5595 [1] laskentakaavoilla. Standardin mukaisilla liittämisvälyksillä teräskytkimien liittämislämpötilat olisivat lopullisilla soviteilla olleet liian suuret. Liitosvaiheessa tarvittavaksi välykseksi on kuitenkin isoilla, yli 250 mm:n halkaisijoilla todettu standardin riittäväksi suosittelemaa pienempi välys. Lopulliset kytkimen lämpötilat asennuksen aikana ovat taulukossa 5.

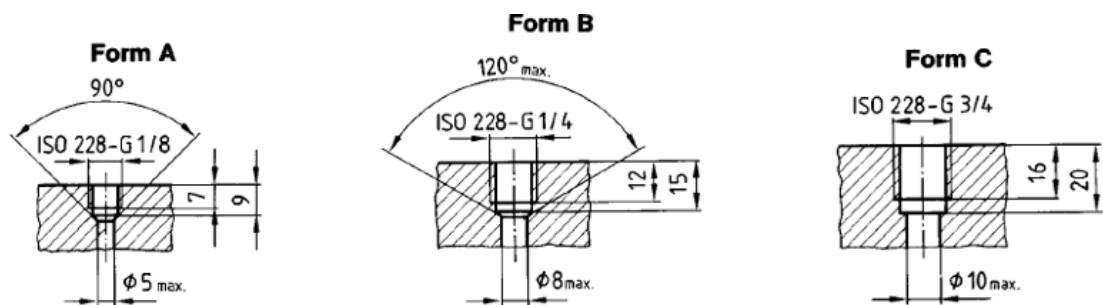
Taulukko 5 Tarvittavat kytkimen asennuslämpötilat huoneenlämmössä

Nimellisakselihalkaisija (mm)	Tarvittava akselin lämpötila (°C)
360	224
380	216
400	208
420	218
440	237
460	245
480	238
500	232
520	226

3.2 Öljyurien suunnittelu

Öljyurat tehdään kytkimen irrottamista varten. Kaksi öljyuraa sijoitettiin lähelle reunoja, joissa on suurin pintapaine ja yksi öljyura porrastuksen kohdalle. Porrastuksen kohdalle sijoitetulla öljyuralla tavoiteltiin kytkimen irrotuksen helpottamista, kun öljynpaine pyrkii painamaan kytkintä irti aksiaalisuunnassa tähän kohtaan syntyvän sylinterimäisen rakenteen takia.

Öljypumppujen liitännöistä kaksi tehtiin ulkokehälle ja yksi laippapintaan. Liitännän laippapintaan tekemisellä vältetään muuten laipan lähelle tulevalta vinoporaaukselta, joka on vaikeampi tehdä ja rajoittaa näin toimittajien valintaa. Paineöljyliitäntä on standardoitu DIN 15055 standardissa [24] (kuva 4). Käytettävä muoto valitaan käytössä olevan liittimen perusteella.



Kuva 4 Paineöljyliitännän muotoilu DIN 15055 mukaan

Näihin kytkimiin öljypumppujen liitännät suunniteltiin yleisimmin käytetylle ¼” liittimelle (kuva 5).



Kuva 5 Paineöljyliitin 1/4”

3.3 Ruuviliitoksen suunnittelu

Ruuvikehän halkaisijan sekä ruuvien määrän, koon ja lujuusluokan määrittäminen oli iteraatiivinen prosessi, jossa jouduttiin huomioimaan navan koko sekä ruuvien kiristämiseen tarvittavan hylsyn ja hydraulisen vääntimen tilantarve. Myös valamalla tai takomalla tehtävän aihion epätarkkuus huomioitiin. Tässä tapauksessa hylsyn tilantarve oli määräävä, koska käytettävät hylsyt sopivat 1½”:n vääntiöön ja niille sopivan momenttiavaimen tilantarve on pienempi. Liitteessä 1 on käytettävissä olevien momenttiavaimien taulukko ja mittakuva. Hylsyjen mitat on määritetty standardissa DIN 3129 [25].

Laippapinnan kitkakertoimella ja ruuvien kiristyskertoimella oli erittäin suuri vaikutus kytkimen laipan ulkohalkaisijaan, sekä ruuvien kokoon ja määrään. Tästä syystä ne piti määrittää heti laskennan alussa. Kytkimien ruuvit kiristetään hydraulisesti, jolloin käytetään kiristyskerrointa 1,2–1,6.

VDI 2230-standardin [6] mukaan laippojen liitospinnassa voidaan molempien kytkimen puolikkaiden ollessa valurautaa käyttää suurempaa kitkakerrointa kuin teräskytkimillä. Laippojen liitospinnassa vaikuttavana kitkakertoimena päätettiin kuitenkin käyttää kaikilla materiaaleilla samaa arvoa, koska on tilanteita, joissa asiakkaalla voi olla käytössä eri materiaalista valmistettu kytkimen puolikas. Tällöin kitkakerroin voi olla pienempi kuin molempien puolikkaiden ollessa valurautaa. Kytkimissä ei voi käyttää taulukon suurimpia kitkakertoimia, koska kytkimissä on aina jonkin verran taivutusmomenttia, joka pienentää liitospinta-alaa [15].

Ruuviliitosten laskenta tehtiin pääasiassa KISSsoft-ohjelmalla, joka laskee liitoksen standardin VDI 2230 [9] mukaan. Ruuveiksi valittiin metrisellä vakiokierteellä olevat 10.9:n lujuusluokan ruuvit. Mutterit valittiin ruuvin lujuusluokan mukaan, ja niiden lujuusluokka on 10. Lopulta päädyttiin käyttämään valukytkimissä M48, ja teräskytkimissä M56-ruuveja. Kiristysmomenteina käytetään ohjelmasta saatuja arvoja (taulukko 6).

Taulukko 6 Ruuvien kiristysmomentit

Ruuvi	Kiristysmomentti [Nm]
M48 10.9	9594
M56 10.9	15371

Pintapaine ruuvin ja mutterin alla ei saa ylittää yhteen puristettavien materiaalien rajapintapaineita [6, s. 96]. KISSsoft-ohjelma antaa materiaalin rajapintapaineiksi liian suuret arvot, koska liitettävien materiaalien ominaisuuksia ei voitu määrittää tarkasti ohjelmassa. Tämän takia varmuus rajapintapainetta vastaan laskettiin erikseen. Teräskytkimien ruuvireikiä pienennettiin, jotta saavutettiin riittävä varmuus. Ruuvit valittiin standardin DIN-EN ISO 4014 [26] mukaan ja mutterit DIN-EN ISO 4032 [27] mukaan.

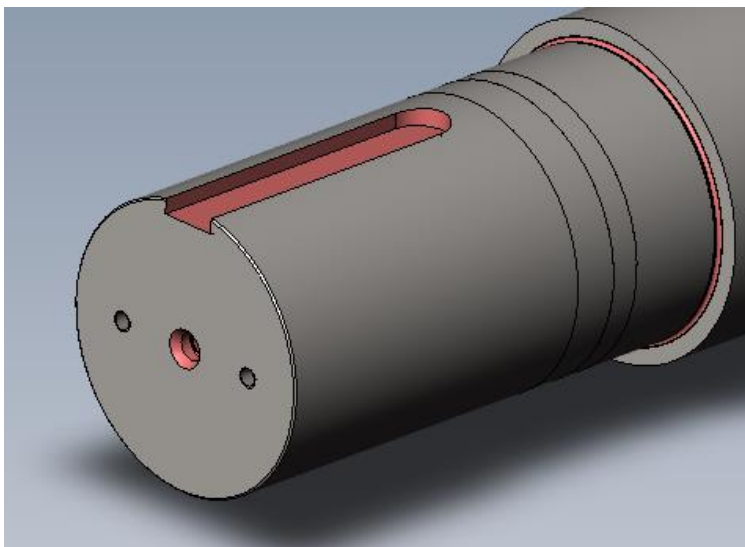
Sekoitinkäytössä kytkimeen kohdistuu aksiaalivoima, jonka suuruus pahimmassa tapauksessa tilausten ja tarjottujen käyttöjen perusteella voidaan laskea kaavalla 13. Tämä voima jakautuu kuitenkin kaikkien ruuvien kesken, joten sen vaikutus laskentaan oli erittäin pieni.

$$F_{aks} = 0,3 \frac{M_{nom}}{m} \quad (13)$$

F_{aks} on kytkimeen kohdistuva aksiaalivoima
 M_{nom} vaihteen nimellinen vääntömomentti.

3.4 Tasakiilaliitoksen laskenta

Tasakiilaliitoksen laskennassa käytettiin WNVapp-ohjelmaa, jonka laskenta perustuu standardiin DIN 6892 [21]. Koska tasakiilaliitos ei kykene välittämään aksiaalivoimia, tasakiilaliitosta käytettäessä kytkimeen pitää tehdä tila päätylaipalle, joka kiinnitetään ruuveilla akselin päähän ja ottaa vastaan aksiaalivoiman. Tämä lyhentää liitospituutta verrattuna kutistusliitokseen. Laipan lisäksi kytkimien väliin pitää jäädä tilaa ruuvien kannoille. Tässä päätylaipan laskennassa hyödynnettiin akselin päässä olevia kahta kierreikää (kuva 6). 360–440 mm:n akselihalkaisijalla kierre on vaihdesarjan katalogin mukaan M30 ja sitä suuremmilla M36.



Kuva 6 Esimerkki MD-vaihteen toisioakselin päästä.

Päätylaippa suunniteltiin tehtäväksi rakenneteräksestä S355, jonka myötöraja on 355 N/mm^2 . Laipan paksuus määritettiin ruuvien kohdalle tulevan leikkausjännityksen mukaan. Tasakiilalaskentaa varten määritettiin kaksi eri laipan paksuutta, kummallekin ruuvikoolle yksi. Kiilauran pyöristys vähentää kiilan pituutta kaikilla, paitsi pienimmällä kytkimellä, joka on akselia lyhyempi. Taulukossa 7 on kiilan pituuden laskennassa käytettyjä arvoja.

Taulukko 7 Kiilan pituuteen vaikuttavat mitat

Toisioakselin halkaisija [mm]	Ruuvien koko	Kytkimen pituus [mm]	Päätylaipan paksuus [mm]	Ruuvien kannan paksuus [mm]	Kiilauran pyöristys [mm]
360–380	M30	389	13	18.7	0
400–440	M30	540	13	18.7	20
460–500	M36	540	23	22.5	20
520	M36	680	23	22.5	20

Laskennassa selvitettiin nimellisvääntömomentti yhdellä tasakiilalla kaikille vakioakselihalkaisijoille (taulukko 8). Tässä laskennassa ei otettu huomioon sovittaa, eikä taivutusmomenttia. Hetkellinen nimellistä suurempi vääntömomentin kesto on enemmän, mutta sitä ei laskettu tämän insinööriyön aikana.

Taulukko 8 Tasakiilaliitoksen nimelliset vääntömomentit

Kytinkoko	Poraus [mm]	Nimellinen vääntömomentti [kNm]
1	360	470
1	380	495
2	400	806
2	420	838
3	440	1185
3	460	1350
4	480	1426
4	500	1515
5	520	2300

WNVapp-ohjelmasta saadaan yrityksen sisäiseen käyttöön ja asiakkaalle tarkoitetut laskentadokumentit, joista selviää mm. varmuuskertoimet liitoksen eri osille. Liitteessä 2 on asiakkaalle tarkoitettu ohjelmasta tulostettu laskentadokumentti 420 mm:n akselihalkaisijalle.

Navan kesto kiilan kohdalla varmistettiin yksinkertaistetulla laskutavalla; kytkimen välittämän momentin aiheuttama voima ei saa aiheuttaa myötörajan ylittämistä navan ohuimassa kohdassa. Näillä kytkimillä pintapaine jää huomattavasti myötörajan alle.

3.5 FEM-laskenta

FEM on lyhenne englannin kielen sanoista *Finite Element Method*, ja tarkoittaa elementtimenetelmää. Menetelmää hyödynnetään rakenteen optimaalisen muodon, materiaalin käytön ja lujuuden tarkasteluun. Lujuuslaskenta pohjautuu erilaisiin tutkimuksiin perustuviin lujuushypoteeseihin, joiden pohjalta arvioidaan, kestääkö kappale tietyn jännitystilan vaurioitumatta. [16.]

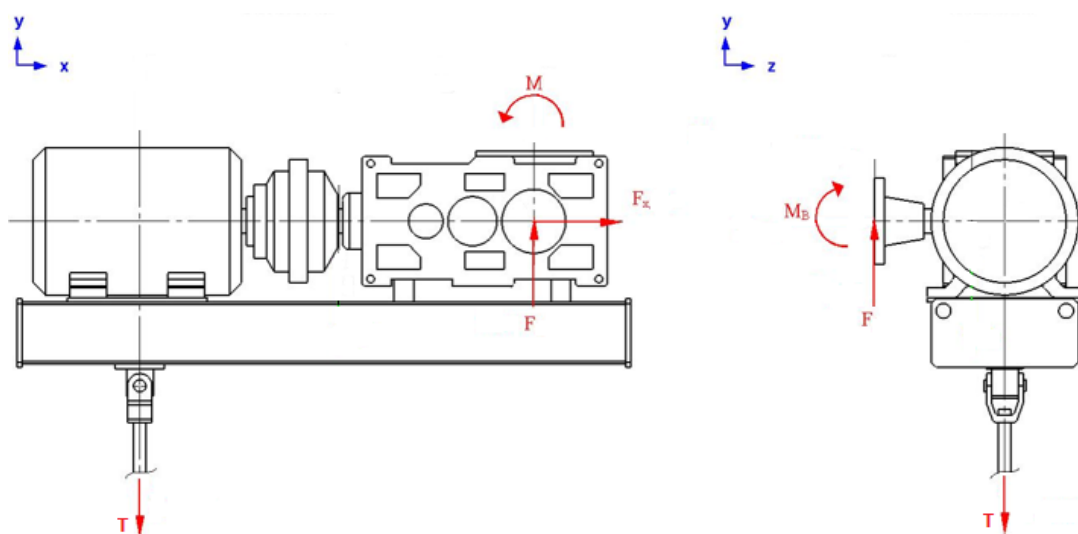
Sitkeiden materiaalien vaurioitumisen tarkastelussa käytetään vakimuodonvääristymisenergiyahypoteesia, josta käytetään myös nimitystä von Misesin jännitys. Tätä jännitystä verrataan myötörajaan. [10, s. 308.]

Kytkimille tehdyllä FEM-laskennalla varmistettiin muilla menetelmillä tehtyjen laskujen oikeellisuutta, sekä tutkittiin kutistus- ja ruuviliitoksen käyttäytymistä kuorman alla. Myös kutistusliitoksellisten kytkimien suurimmat sallitut taivutusmomentit määritettiin laskennan avulla. Kiilaliitoksille ei tehty FEM-laskentaa.

3.5.1 Laskennan suorittaminen

Laskentaa varten määritettiin kytkimeen kohdistuvat voimat. Varsinainen laskenta tehtiin kytkimille yrityksen laskentaosaston toimesta ANSYS-ohjelmalla. Laskentaan valittiin teräskytkin 500 mm:n porauksella ja uusi valukytkin 420 mm:n porauksella. Tulokset ovat vertailukelpoisia kaikkien muiden paitsi pienimmän kytkimen osalta, jolla liitosmitta on suhteessa lyhyempi. Sille suurin taivutusmomentti täytyy laskea tarvittaessa myöhemmin.

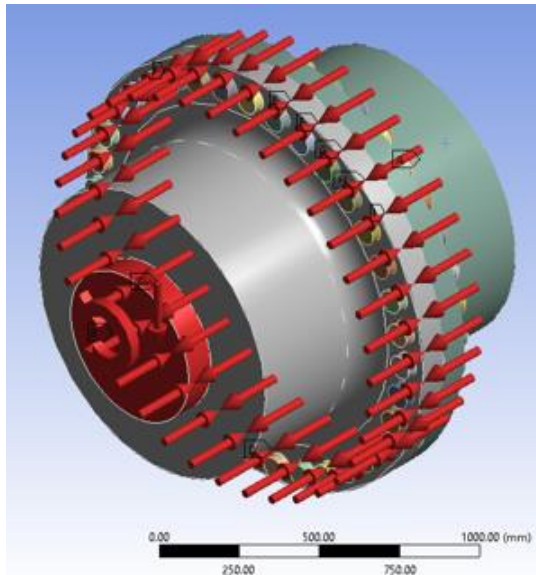
Kyttimeen kohdistuu suurin taivutusmomentti kuljetinkäytössä käynnistysvaiheessa, kun momenttituella tuettu vaihde pyrkii kallistumaan sivulle. Kuvassa 7 on esitetty voimat, jotka vaihdekokoonpanoon kohdistuvat gravitaatiovoimien lisäksi. Kutistusliitokseen ja laippojen liitospintaan syntyy tällöin muutoksia, jotka voivat vaikuttaa momentinvälityskykyyn. Karkeassa arviossa tässä työssä suunniteltaviin kytkimiin kohdistuva suurin taivutusmomentti voi olla noin 50 % nimellisestä vääntömomentista, joten laskenta tehtiin tällä taivutusmomentilla. Lisäksi laskennassa kytkimeen kohdistettiin kaksi kertaa nimellinen vääntömomentti ja ruuvien aksiaalivoimat.



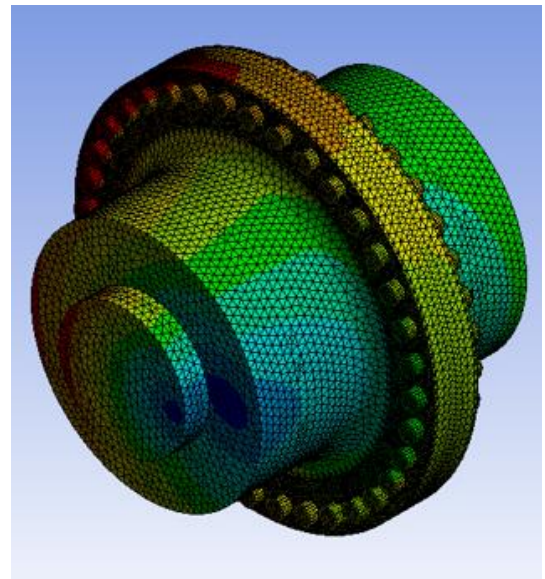
Kuva 7 Gravitaatiovoimien lisäksi vaihdekokoonpanoon kohdistuvat voimat

Laskennan nopeuttamiseksi kytkimen 3D-mallia yksinkertaistettiin. Siitä poistettiin ulkopuolen pyöristyksiä ja öljyurat. Erityisesti öljyurien poistolla saatiin laskenta-aikaa vähennettyä huomattavasti. Koska kytkimet ovat ylimitoitettuja, yksinkertaistamisesta johtuvaa laskennan varmuuden pienenemistä ei pidetty merkittävänä.

Kuvassa 8 näkyvät voimat, jotka kytkimeen kohdistetaan laskennassa. Ohjelma muodostaa kytkimeen verkotuksen (kuva 9), jonka tiheydellä ja muodolla pystytään vaikuttamaan laskennan tarkkuuteen. Liian tiheällä verkotuksella laskenta-aika kasvaa kohtuuttomasti, eikä sillä saada merkittävää lisäarvoa. Tässä tarkastelussa käytetään esimerkkinä $\varnothing 500$ mm:n porauksella olevaa teräskytkintä.



Kuva 8 Laskennassa käytetyt voimat

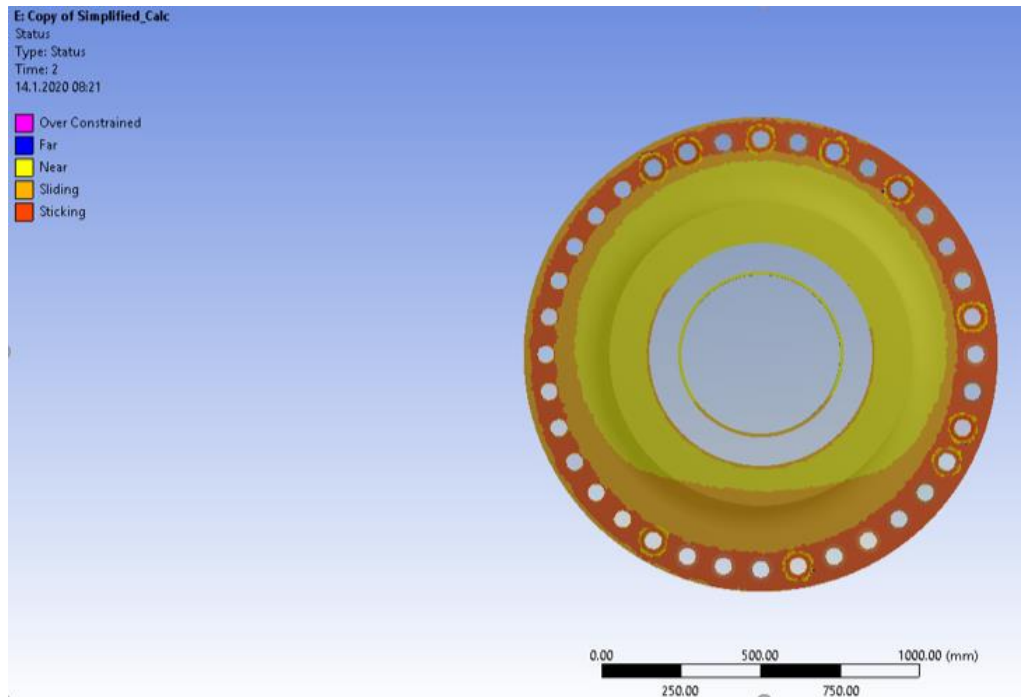


Kuva 9 Verkotus

3.5.2 Laskennan tulokset

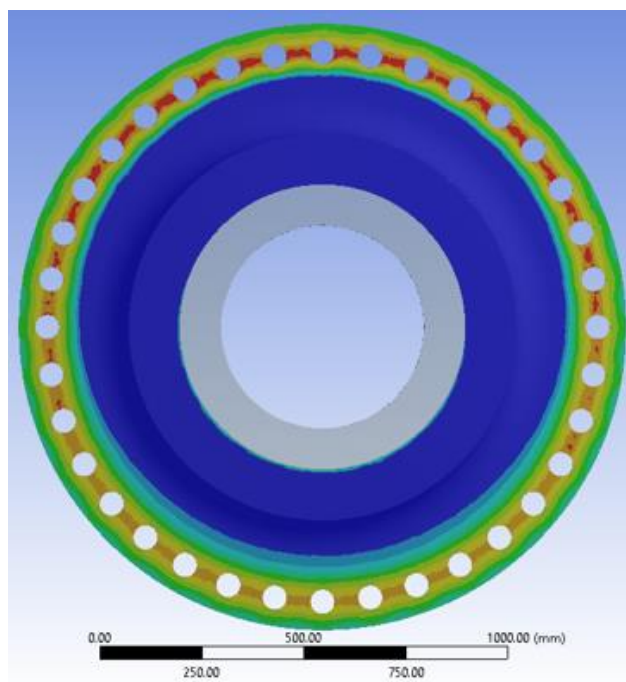
FEM-laskennan tulokset ovat hyvin lähellä Excelillä ja KISSsoft-ohjelmalla laskettuja arvoja, joten laskentaa voidaan pitää luotettavana. Teräs- ja valukytkimien käyttäytymisessä ei ollut suurta eroa.

Kuvasta 10 nähdään, että laipat pysyvät hyvin kiinni ruuvien lähellä koko kehällä. Keskeemmälle liitokseen tulee todella pieni välys, millä ei ole merkitystä, koska laskennassa ei huomioida lainkaan tämän alueen kitkaa.



Kuva 10 Laippaliitoksen kiinnipysyminen

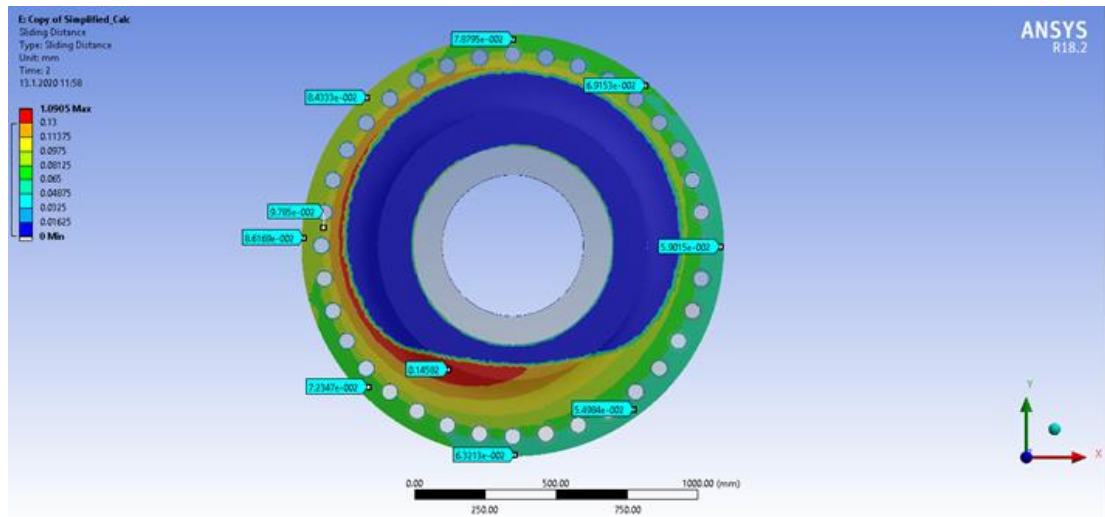
Kuvasta 11 nähdään laippaliitoksen pintapaineen jakautuminen, joka on myös tasaista.



Kuva 11 Pintapaine laippojen liitospinnassa

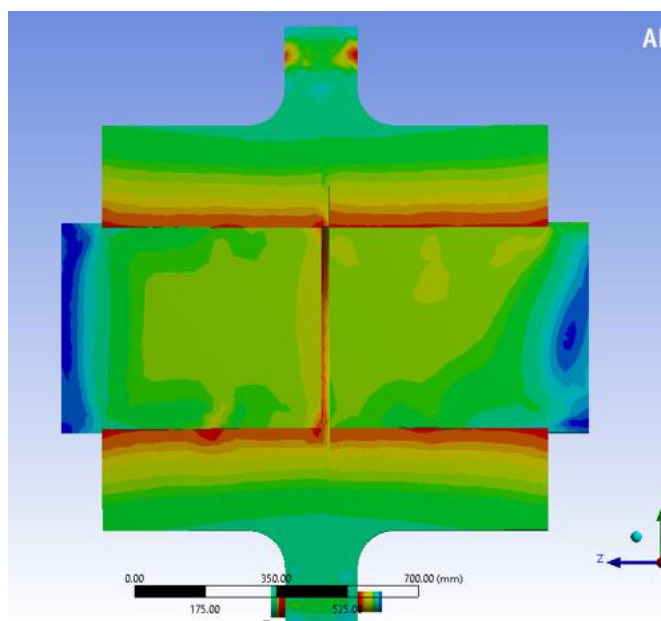
Kytkimien laipan paksuus määritettiin skaalaamalla pienemmistä kytkimistä. FEM-laskennan perusteella skaalattujen laipan paksuuksien voidaan todeta olevan riittäviä, eikä niitä ole syytä lähteä kasvattamaan.

Liitoksessa tapahtuu annetuilla arvoilla pientä luistamista (kuva 12), joka on hyväksyttävää, koska laskennassa käytettiin kytkimen laskennallista maksimivääntömomenttia.



Kuva 12 Liitoksen luistaminen

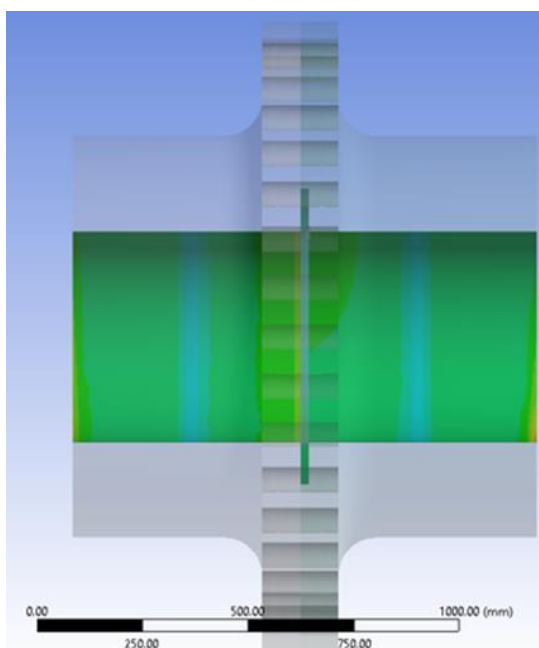
Kuvasta 13 nähdään hyvin jännitysten kasvaminen kutistusliitoksen päissä.



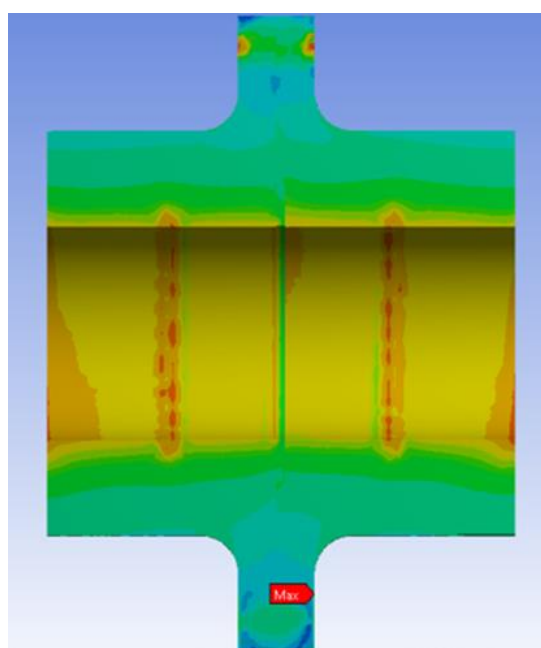
Kuva 13 Jännitysjakauma kutistusliitoksessa

Kuvasta nähdään hyvin myös, kuinka paljon vähemmän jännitystä akseliin aiheutuu kytkimeen verrattuna. Ruuviliitoksen kohdalla nähdään myös ruuvivoimista aiheutuva jännityshuippu.

Pintapaine pysyy kuorman alla tasaisena (kuva 14). FEM-laskennan mukaan pintapaine porrastuksen kohdalla laskee lähelle nolaa, mutta laskennassa ei ole porrastuksen kohdalle tulevia pyöristyksiä. Von Misesin jännitykset (kuva 15) ovat korkeimpia liitoksen epäjatkuvuuskohdissa ja liitoksen päissä ja pysyvät molemmilla materiaaleilla huomattavasti alle myötörajan koko liitoksen matkalla.



Kuva 14 Pintapaine kutistusliitoksessa



Kuva 15 Von Misesin jännitykset kytkimessä

Pienimmästä kytkimestä voidaan joutua vielä tekemään koko akselin mittainen, mikäli käytössä on paljon taivutusmomenttia. Insinööriyön aikana tehtyjen FEM-laskentojen pohjalta voidaan kuitenkin päätellä kytkimen materiaalit ja sovitteet, joilla saadaan hyvä vääntö- ja taivutusmomentin kesto.

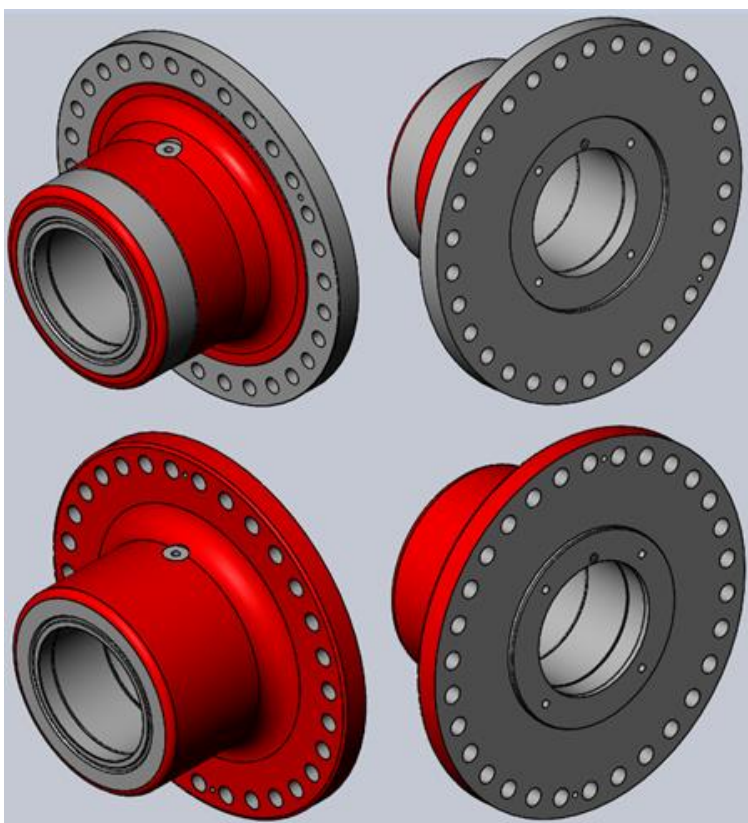
Kytkimien ohjausolakkeen halkaisija muuttuu hieman, kun kytkin asennetaan akselille. Tämän muutoksen suuruutta mitattiin kummassakin kytkimen puolikkaassa ja havaittiin sen olevan saman verran molemmilla puolilla, joten sovitetta ei tarvinnut muuttaa tämän takia.

3.6 Nostaminen

Kytkimien painopisteiden kohdalle tehtiin kierteet nostolenkkiä varten. Kierteet valittiin DIN 580 [7] mukaisia nostolenkkejä varten. Suurimpaan kytkimeen tarvittiin M36-kierre ja pienempiin tehtiin kaikkiin M30-kierre. Osassa kytkimistä nostolenkit tulevat kytkimessä olevan pyöristykseen kohdalle, joten kytkimiin tehtiin tähän kohtaan tasoporaus. Tasoporaus halkaisija määritettiin nostolenkin vaatiman tilan perusteella. Poraus vaikuttaa kytkimen kestoon huonontavasti, mutta kytkimien ylityönsä takia sitä ei pidetty merkittävänä asiana.

3.7 3D-mallit ja valmistuskuvat

3D-mallit, valukuvat ja koneistuskuvat tehtiin Solidworks-ohjelmistolla. Koska kyseessä on sarja samankaltaisia osia, osittain parametrinen mallien tekemisellä saatiin helpotettua työtä. Kuvassa 16 on kaksi esimerkkiä 3D-malleista. Ylempi on valuraudasta valmistettava ja alempi teräksestä valmistettava kytkimen puolikas.



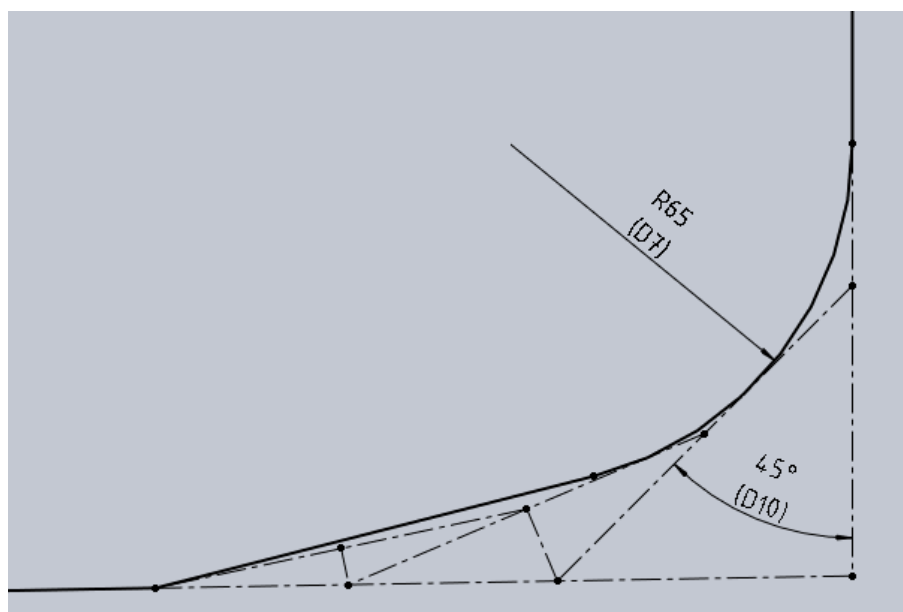
Kuva 16 Valmiita 3D malleja.

3Dmallien ja kuvien tekovaiheessa selvitetiin tarkemmin kytkimen yksityiskohtiin liittyviä suunnittelussa huomioitavia asioita. Osalle kytkimistä tehtiin koneistuskuvat ja uudelle valukytkimelle valukuva. Takeita varten ei ollut tarpeen tehdä kuvia. Kytkimien keston kannalta oleellinen materiaalin myötöraja riippuu materiaalin kovuudesta. Materiaalin tarvittavat kovuusarvot merkattiin valmistuskuviin.

3.7.1 Valumallin suunnittelu

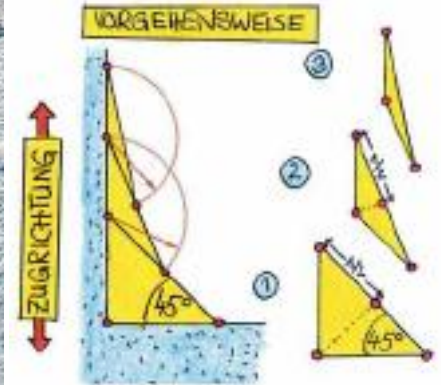
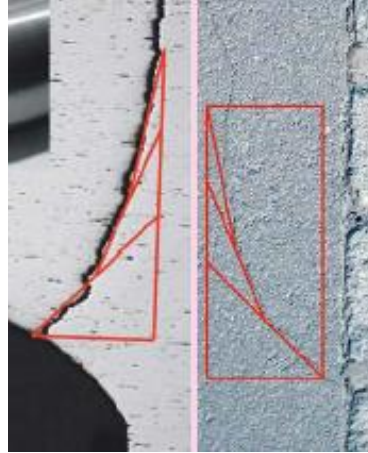
Pienimmät kytkimet valmistetaan X-vaihdesarjan kytkimien valusta ja niille oli valmiina valukuva. Toiseksi pienintä kytkintä varten tehtiin uusi valukuva. Valimoiden tekemien osien laatu vaihtelee paljon, ja usein onkin syytä lähettää valimolle valukuvan lisäksi koneistuskuva, jotta voidaan varmistua riittävästä laadusta [13]. Työn aikana valukuva lähetettiin valimoon kommentoitavaksi valettavuuden osalta, josta saatiin vastaukseksi, että valaminen onnistuu. Silloin kuvassa ei vielä ollut seuraavana esiteltävää pyöristyksen muotoa, mutta se päätettiin silti tehdä.

Valumallin muotoilussa otettiin huomioon navan ja laipan kohdalle tuleva valamisen kannalta huono nopea materiaalipaksuuseron muutos tekemällä pyöristyksestä kuvan 17 mukainen. Kuvassa laippa on oikealla. Mallia on SEW:n pienemmissä kytkimissä ja se perustuu luonnossa esiintyviin muotoihin.



Kuva 17 Navan ja laipan välinen pyöristys

Muotoa esiintyy mm. puiden juurissa ja kallioiden seinämissä sekä rakennuksiin syntyvissä halkeamissa (kuvat 18 ja 19). Muoto perustuu lujustekniikkaan ja peräkkäisiin tasakylkisiin kolmioihin, jotka ovat kuvan 20 järjestyksessä. [12.]



Kuva 18 Puun juuren muoto [12] Kuva 19 Halkeamia [12]

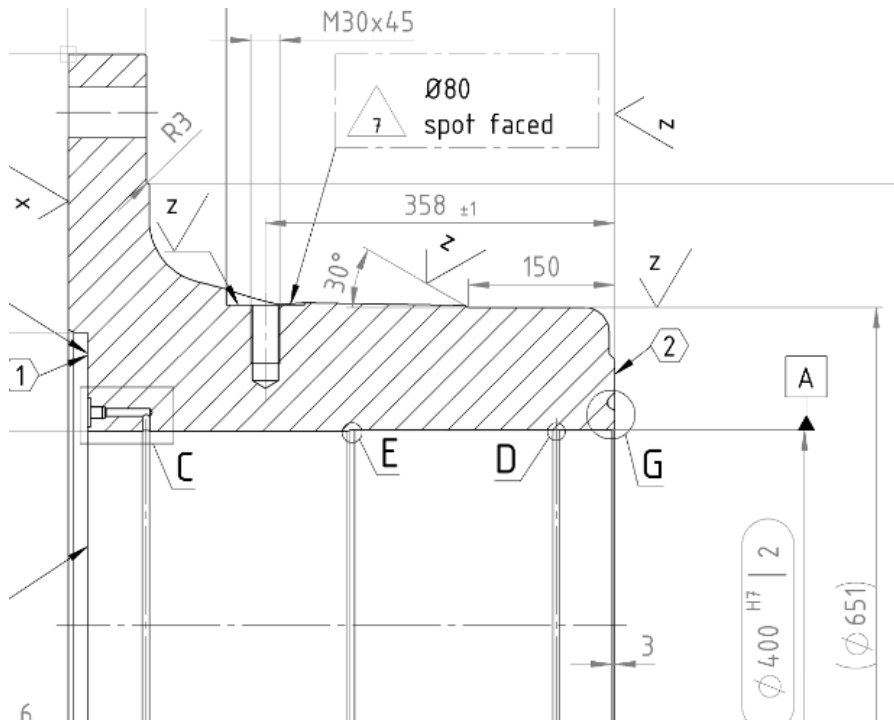
Kuva 20 Kolmiomenetelmä [12]

Kytkimen porausta varten tehtävä reikä mitoitettiin niin, että siihen voidaan tehdä tarvittaessa vakioakselimittaa pienempikin poraus. Ruuvien alle jäävä pinta voidaan joskus joutua koneistamaan valun epätasaisuuksien takia. Tämän takia pintaan lisättiin koneistusta varten 3 mm:n työvara. Pinnan koneistuksella varmistetaan myös, ettei laipassa ole huokosia, jotka heikentävät rakennetta. Muut työstövarat määritettiin standardin SFS-EN ISO 8062-3 [28] mukaan. Valukuvien mittatoleranssi poikkeaa standardista, mutta se valittiin yrityksen aiemmin valimoiden kanssa tehtyjen sopimusten perusteella.

3.7.2 Koneistuksien suunnittelu ja koneistuskuvat

Valusta ja teräksestä tehtävien kytkimien koneistuskuvat eroavat hieman toisistaan, koska valusta ei koneisteta kaikkia ulkopintoja. Kytkimiä ei koneisteta SEW:llä, joten koneistamiseen liittyviä asioita tiedusteltiin koneistamolta. Näitä olivat mm. järkevästi saatavat toleranssien IT-luokat, koneistusjärjestys ja kytkimen sisälle tulevan öljyporaus toteutus. Vastauksesta ilmeni, että kytkimet ovat koneistettavissa kuvien tiedoilla, eikä muutoksia tarvitse tehdä.

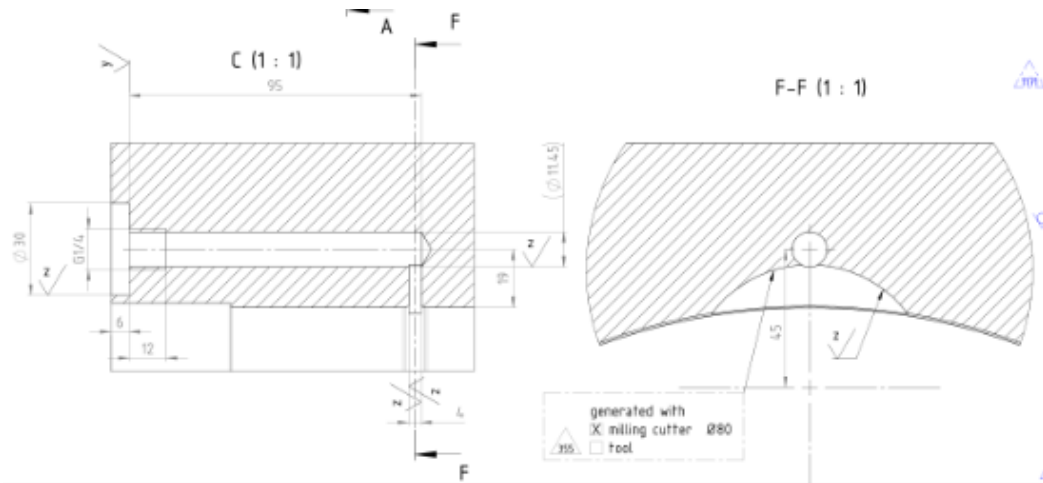
Koska valukytkimien ulkoreuna on kartiomainen valupäästöjen takia, siihen pitää koneistaa tasainen pinta, mikäli kytkin pitää saada kiinni sorviin ulkopinnalta (kuva 21). Taakkeesta tehtävät kytkimet rouhitaan suoraksi ennen varsinaista koneistusta, jolloin tätä ongelmaa ei ole. Koneistusjärjestys riippuu käytettävistä koneista, eikä tällä koneistuksella ole kytkimelle toiminnallista merkitystä, joten se voidaan jättää myös tekemättä.



Kuva 21 Tasainen pinta navassa sorviin kiinnittämistä varten (kuvassa mitalla 150 mm).

Kytkimen geometrisessa toleroinnissa on oleellista, että akselireiän molemmat halkaisijat ja ruuvikehä ovat keskenään riittävän samankeskisiä ja kohtisuorassa laippapintaan. Näin varmistetaan kytkimen liitosten luotettavuudesta ja siitä, että se saadaan asennettua akselille. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että molemmat porauksen halkaisijat on koneistettava samalla kiinnityksellä. Kytkimien heittotoleransseissa käytetään usein toleranssiluokan IT6 mukaisia arvoja. Tämän kokoluokan kytkimissä se voi kuitenkin olla tarpeettoman tiukka vaatimus. Kytkimen ohjausolakkeen sovitteeksi valittiin H7/k6, jotta kytkimen puolikkaat on helppo painaa toisiaan vasten.

Kytkimen sisäpuolelta tehtävä laippapinnan öljyporaus voidaan tehdä kiekkojyrsimellä (kuva 22) tai poraamalla. Jyrsimellä tehtäessä öljyä tarvitaan enemmän, mikä voi tulla joillain pumpuilla ongelmaksi. Lisäksi pitäisi tietää koneistamoilla käytössä olevien työkalujen koko.



Kuva 22 Kiekkojyrsimellä tehtävän puhkaisun muoto

Näissä kytkimissä päädyttiin poraamiseen, koska kiekkojyrsimellä tehtäessä kytkimeen tulee pidempi epäjatkuvuuskohta, joka heikentää kytkintä. Porattava matka on vain 13 mm, ja kytkimien keskiporaus on niin suuri, että se voidaan tarvittaessa tehdä vaikka käsiporalla.

Pinnankarheuksien laippapinnassa ja akselireiässä täytyy olla laskentaa vastaavat. Poraus pinnankarheuden vaatimukseksi asetettiin standardin suosittelemaa pienempi arvo. Tämän seurauksena liitoksen varmuus paranee hieman pinnankarheuksien tasoittumisen vaikutuksen pienemisen takia. Sileämpi pinta vähentää myös asennettaessa kytkimen ennenaikaista kiinnijäämisen riskiä. Pinnankarheuksien öljyurien reunoilla pitää olla riittävän sileät, että asennus on sujuvaa, eikä akseli ota niissä kohdissa vastaan.

4 Kytkimien asennus ja irrotus

Kytkimien liitospinnat täytyy ehdottomasti puhdistaa ennen asennusta. Tämä johtuu siitä, että mitoituksessa on käytetty kitkakertoimia, jotka vastaavat pintoja, joilta on poistettu kaikki rasva. Kytkin lämmitetään uunissa ja työnnetään paikalleen useimmiten akselin olaketta vasten. Tarvittaessa vaihteen tiiviste täytyy suojata asianmukaisesti kuumuutta vastaan.

Lopullisilla sovitteilla tarvittavat liittämislämpötilaerot pystytään saavuttamaan huoneenlämpöisellä akselilla. Jos akselia pitää kuitenkin jäähdyttää, siihen voidaan käyttää hiilihappojäätä tai nestemäistä typpeä (taulukko 9). Nestemäisellä tyypellä saavutetaan suurempi lämpötilaero.

Taulukko 9 Jäähdytysaineet [1, s. 10]

Jäähdytysaineet	Kemiallinen kaava	Kaasun kiehumispiste	Ohjeita
Hiilihappojää	CO ₂	-78,4 °C	Liitososa jäähtyy suhteellisen hitaasti, nopeampi esijäähdytys käyttämällä spritiä lämmönsiirtäjänä. Trikloorieteenin lisääminen estää liitospintojen jäätymisen.
Nestemäinen typpi	N ₂	-195,8 °C	Käyttö vaatii suljetun tilan hyvällä tuuletuksella! Muutoin ei erityistä vaaraa.
Nestemäisen hapen tai nestemäisen ilman käyttö on kiellettyä suuren räjähdysvaaran takia.			

Ruuvit kiristetään hydraulisella momenttiavaimella, joka liitetään hydraulipumppuun. Kuvassa 23 on yrityksen käytössä oleva momenttiavain. Kiristysmomentti määrätään sää-

tämällä pumpun paine tiettyä kiristysmomenttia vastaavaksi. Ensin kaikki ruuvit esikiristetään, jotta varmistetaan kytkimen osien oikeanlainen asettuminen. Tämän jälkeen tehdään varsinainen kiristys lopullisella momentilla.



Kuva 23 Hydraulinen momenttiavain

Kutistusliitoksellista kytkintä irrotettaessa öljyuriin pumpataan öljyä, minkä jälkeen odotetaan öljyn tunkeutumista liitokseen. Painetta nostetaan asteittain ja annetaan sen vaikuttaa liitoksessa. Öljynpaine venyttää kytkintä ja öljykalvo voitelee liitoksen, minkä jälkeen kytkin voidaan vetää irti akselilta hydraulisella ulosvetäjällä. [23.]

Öljyurien paineistamiseen käytettävien pumppujen tulee kyetä tuottamaan kahdesta viiteen kertainen paine laskettuun pintapaineeseen verrattuna [1, s. 9]. Tässä työssä suunniteltujen kytkimien tapauksessa tarvittava vähimmäispaine on 1800–2600 bar. Arvot ovat taulukoituna liitteessä 3. Yrityksellä on käytössä pumppuja, joilla pystytään saavuttamaan 3000–4000 bar:in paine.

Kytkimien irrottamiseen tarvittava aksiaalivoima voidaan laskea, mutta se on niin teoreettinen, ettei siitä ole hyötyä. Kytkimien irrotuksen yhteydessä niitä voidaan lämmittää esimerkiksi induktiokuumentimella.

5 Taulukot

Yrityksen käyttöön tehtiin taulukot, joissa on kytkimien tärkeimmät mitat ja suoritusarvot MD-vaihteiden vakioakselimitoilla sekä parametrusten mallien ja valmiiden piirustusten numerot. Kutistusliitoksellisten kytkimien painot taulukoitiin (taulukko 10). Kokonaisuudessa ei ole otettu huomioon ruuvien ja mutterien massaa. Ruuvit valittiin standardin DIN-EN ISO 4014 [26] mukaan ja mutterit standardin DIN-EN ISO 4032 [27] mukaan (taulukko 11).

Taulukko 10 Kytkimien massat

Coupling size	Nominal bore [mm]	Raw part weight [kg]	Weight female [kg]	Weight male [kg]	Weight total [kg]
1	360	944	808	846	1654
1	380	944	776	811	1587
2	400	1600	1267	1311	2578
2	420	1600	1217	1257	2474
3	440	-	1401	1422	2823
3	460	-	1342	1361	2703
4	480	-	2936	2916	5852
4	500	-	2872	2850	5722
5	520	-	3637	3629	7266

Taulukko 11 Ruuvit ja mutterit

Coupling size	Bolt length [mm]	Thread	Bolt Item ID	Nut Item ID
1	190	M48	19076835	19161239
2	210	M48	19134908	19161239
3	240	M56	-	13281062
4	240	M56	-	13281062
5	260	M56	19052502	13281062

6 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella sarja uusia laippakytkimiä, sekä taulukoida kytkimien tiedot. Myynnin kannalta tärkein tavoite saavutettiin. Nyt kun mitat ja materiaalit ovat tiedossa, niiden pohjalta voidaan arvioida valmistuskustannuksia ja tehdä tarjouksia asiakkaille. Nyt tiedetään myös, minkälaisia kuormia laippakytkimillä pystytään välittämään. Suunnittelua varten saatiin tehtyä 3D-mallit ja kutistusliitoksellisten kytkimien valmistuskuvat. Näitä voidaan käyttää tasakiilallisten kytkimien kuvien tekemiseen tai pohjana tilauskohtaisten kytkimien suunnittelussa.

Työn aikana selvitettiin kytkimen mitoitusperiaatteita lukemalla alan kirjallisuutta ja keskustelemalla alan ammattilaisten kanssa. Saksalaiset SEW:n työntekijät olivat suunnitelleet aiemmin laippakytkinsarjan pienempään vaihdesarjaan, joten myös heidän käyttämiään suunnitteluperiaatteita tiedusteltiin ja hyödynnettiin soveltuvilta osin.

Tällä tavalla mitoitettuna kutistusliitokselliset kytkimet ovat suurimpaan osaan tapauksista reilusti ylimitoitettuja, koska vaihteita ei juuri koskaan käytetä maksimimomentilla. Kytkimien haluttiin kuitenkin soveltuvan myös vaativimpiin käyttöihin.

Työssä jäi vielä selvittämättä ainakin, mitkä ovat suurimmat mahdolliset poraukset tasakiilaliitosta käytettäessä ja miten hetkellinen maksimimomentti määritetään. Koneistuksien yksityiskohtien muodoista ja tarkkuuksista on myös eriäviä mielipiteitä, mutta kytkimet on todettu valmistuskelpoisiksi näillä kuvilla.

Insinööriyöhön liittyi useita lujuusopillisia asioita kuten materiaalin lujuusarvojen määrittämistä, erilaisten liitosten laskentaa, sekä FEM-laskennan tulosten analysointia. Lisäksi työn aikana selvitettiin koneistukseen ja aihioihin liittyviä vaatimuksia.

Työn aikana opittiin ainakin se, että näennäisesti yksinkertaisenkin tuotteen suunnitteluun voi liittyä paljon kysymyksiä ainakin aloittelevalla suunnittelijalla. Tässä työssä erityisesti haasteita aiheutti materiaaliarvojen rajoilla työskentely ja monien eri laskentatapojen väliltä sopivan valinta.

Insinööriyön lopputuloksena saatiin toimiva laippakytkinsarja yrityksen suurimmille vaihteille. Tämä nopeuttaa tilauksien käsittelyä ja helpottaa suunnittelijan työtä.

Lähteet

- 1 SFS 5595. Kutistus- ja puristusliitos. 1989. Laskentaperusteet ja muotoiluohjeet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 2 Laine, Simo. 2019. Kehityspäällikkö, Sew Industrial Gears Oy, Karkkila. Keskustelu 27.12.2019.
- 3 Björk, Timo & Hautala, Pekka & Huhtala, Kalevi & Kivioja, Seppo & Kleimola, Matti & Lavi, Markku & Martikka, Heikki & Miettinen, Juha & Ranta, Aarno & Rininen, Jari & Salonen, Pekka. 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro.
- 4 Hytorc MTX hydraulinen momenttiavain. Verkkoaineisto. Haitor Oy. Luettu 29.12.2019.
- 5 Airila, Mauri & Karjalainen Jussi A. & Mantovaara Urpo & Nurmi Lasse & Ranta Aarno & Verho Arto. 1985 Koneenosien suunnittelu 2. Porvoo: WSOY.
- 6 VDI 2230-1. Systematic calculation of highly stressed bolted joints. 2015. Joints with one cylindrical bolt. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V..
- 7 DIN 580. Lifting eye bolts. 2018. Berlin: Deutsches Institut für normen e. V..
- 8 Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET. 2001. Muokatut teräkset. Tampere: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- 9 VDI 2230-2. Systematic calculation of highly stressed bolted joints. 2014. Multi bolted joints. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V..
- 10 Karhunen, Jouko & Lassila Veikko & Pyy Seppo & Ranta Aarno & Räsänen Satu & Saikkonen Matti & Suosara Eero. 1992. Lujusoppi. 11. muuttumaton painos. Otatieto.
- 11 VCI lavahuput ja pussit. Verkkoaineisto. Napakka Oy. < <https://www.napakka.fi/vci-lavahuput-ja-pussit>>. Luettu 19.1.2020.
- 12 Mattheck, Claus. 2011. Universalformen der Natur. Labor & more Tammikuu 2011.
- 13 Ala-Jääski, Juho. 2020. Aluemyyntipäällikkö, Sew Industrial Gears Oy, Karkkila. Keskustelu 21.1.2020.

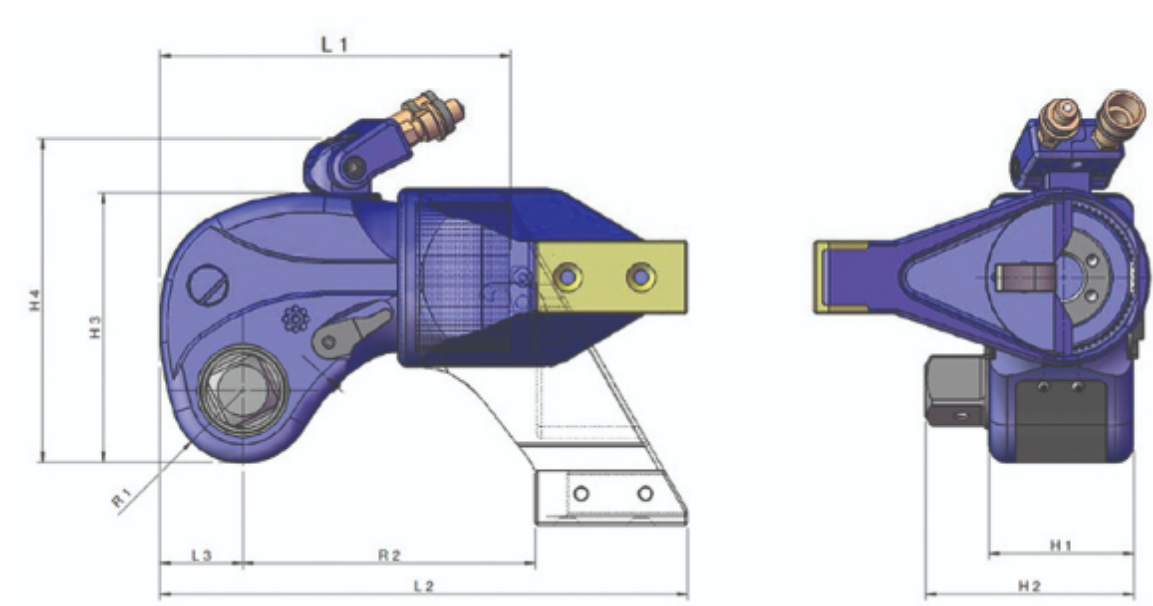
- 14 Airila, Mauri & Karjalainen, Jussi A. & Mantovaara, Urpo & Nurmi, Lasse & Ranta, Aarno & Verho, Arto. 1985. Koneenosien suunnittelu 3. Porvoo: WSOY.
- 15 Saar, Steffen. 2019. Tuotekehitysinsinööri, SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal. Sähköpostikeskustelu 27.11.2019.
- 16 FEA-laskennan teoriaa. Verkkoaineisto. Vertex Systems Oy. <<https://kb.vertex.fi/fea2017fi/tutustu-tarkemmin-ominaisuuksiin/yleiset-aiheet/fea-laskennan-teoriaa>>. Luettu 25.1.2020.
- 17 Industrial Gear Units. M1..N, X and MD series. Horizontal Helical and Bevel-Helical Gear Units. Tuotekatalogi. SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal.
- 18 Sew Industrial Gears Oy. Verkkoaineisto. Sew Industrial Gears Oy. <https://www.sew-eurodrive.fi/company/our_drive/lc_karkkila.html>. Luettu 26.1.2020.
- 19 Yritysesittely. Verkkoaineisto. Sew Industrial Gears Oy. <https://www.sew-eurodrive.fi/yritys/mikae_meitae_liikuttaa/yritysesittely/yritysesittely.html>. Luettu 26.1.2020.
- 20 Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET. 2001. Valuraudat ja valuteräkset. Tampere: Metalliteollisuuden Kustannus Oy
- 21 DIN 6892. Drive type fastening without taper action. 2012. Parallel keys. Calculation and design. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V..
- 22 Järvinen, Tommi. 2016. Teollinen taonta valmistusmenetelmänä. Tampere: Eräsalon kirjapaino Oy.
- 23 Laitonen, Jari. 2019. Kenttähuoltoapäällikkö. Sew Industrial Gears Oy, Karkkila. Keskustelu 8.11.2019.
- 24 DIN 15055. Drucköl-Preßverbände. 1982. Anwendung, Maße, Gestaltung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V..
- 25 DIN 3129. Assembly tools for screws and nuts. 2012. Square drive socket wrenches, power-driven and accessories- Technical specifications and test torques. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V..
- 26 DIN-EN ISO 4014. Hexagon head bolts. 2011. Product grades A and B. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

- 27 DIN-EN ISO 4032. Hexagon regular nuts (style 1). 2013. Product grades A and B. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

- 28 SFS-EN ISO 8062-3. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). 2007. Muotilla valmistettujen kappaleiden mittatoleranssit ja geometriset toleranssit. Osa 3: Valukappaleiden mittojen yleistoleranssit, geometriset yleistoleranssit ja työstövarat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Taulukko ja mittakuva Hytorc MTX-hydraulivääntimestä [lähde: 4].

Malli	Vääntiö	L1	L2	L3	H1	H2	H3	H4	R1	R2	Paino	Momentti (min)	Momentti (max)
	tuumaa	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg	Nm	Nm
0.7 MXT	¾"	100,6	151,9	23,6	41,2	64,3	76,2	108	20,6	84,3	1,2	167	1 114
1 MXT	¾"	123,9	186,2	28,7	50	72,4	93	124,5	25	104,7	1,8	273	1 817
3 MXT	1"	161	243,8	38,4	66,8	96,8	124	155,5	33,3	135,1	3,8	657	4 379
5 MXT	1 ½"	193,3	292,6	46	80,3	125	148,6	183,4	39,9	162,6	6,5	1 137	7 578
10 MXT	1 ½"	241,6	365,3	57,4	100,3	142,8	185,9	223,5	49,8	202,4	11,3	2 343	15 617
15 MXT	2 ½"	268,1	388,3	63,6	111,1	177,8	204,7	245,6	55,4	219,2	16,4	3 238	21 584
20 MXT	2 ½"	289,8	438,7	68,8	120,1	180,3	223	260,1	59,9	243,3	19,7	4 018	26 787
35 MXT	2 ½"	356,3	539,2	84,6	147,8	211,3	274,1	313,9	73,7	298,2	35,2	7 544	50 293



WNVapp-asiakasdokumentti

Linnanmäki Risto (SAL), 22.01.2020, WNVApplet V3.0.9



Calculation of safety factor for keys according DIN6892:2012

Application data

Shaft diameter [mm]	420.0	Nominal torque [Nm]	838320.0
Hub diameter [mm]	650.0	Equivalent torque [Nm]	838320.0
Application factor	1.0	Maximum torque [Nm]	838320.0

Number of alternating loads 100 Peakload factor 1.0 Number of keys 1

Hub

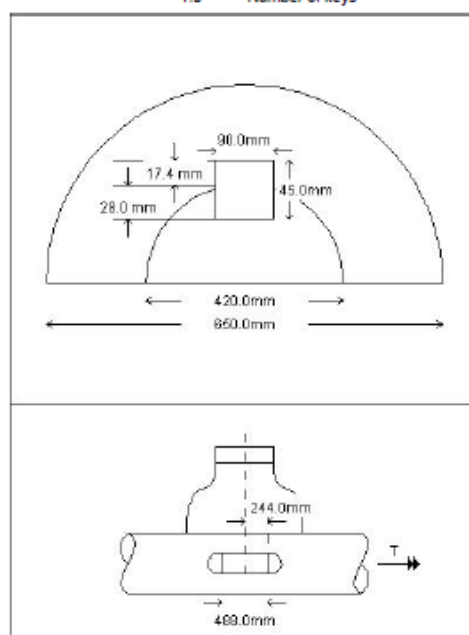
Material	GGG-80	0.7080
Keyway depth for hub [mm]	17.4	
Keyway edge [mm]	1.6	

Key

Key	B90X45X488	
Material	42CrMo4	1.7225
Carrying length [mm]	488.0	
Load distance [mm]	244.0	

Shaft

Material	42CrMoS4+QT	1.7227
Keyway depth for shaft [mm]	28.0	
Keyway edge [mm]	0.2	

**Result**

	Shaft	Hub	Key
Safety factor at eq. load	1.32	1.0	1.58
Safety factor at max. load	1.32	1.0	1.58
Carrying keyway depth / height [mm]	20.38	18.14	18.14
Load distribution factor	1.13		

(C) SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG Postfach 3023 D-76642 Bruchsal. All rights reserved.

Kytkimen irrotuksessa tarvittava öljynpaine.

Akselin halkaisija	Pintapaine liitoksessa	Pumpun paine min	Pumpun paine max
mm	(N/mm ²)	bar	bar
360	112,2	2244	5610
380	100,4	2008	5020
400	91,5	1830	4576
420	91,6	1832	4579
440	100,8	2015	5039
460	100,0	2000	5000
480	131,0	2620	6549
500	122,1	2442	6104
520	113,7	2274	5686