



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ville-Matti Varonen

MUUNTAJAN NOSTO- JA PURISTUS-
RUUVIEN MEKAANINEN LUJUUS JA
MITOITUS

Tekniikka
2017

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Ville-Matti Varonen
Opinnäytetyön nimi	Muuntajan nosto- ja puristusruuvien mekaaninen lujuus ja mitoitus
Vuosi	2017
Kieli	suomi
Sivumäärä	43
Ohjaaja	Vesa Verkkonen

Tämä opinnäytetyö toteutettiin ABB:n Vaasan muuntajatehtaan tuotekehitysprojektina vuonna 2017. Työssä käytettiin ulkopuolisia palveluja valtion teknologian tutkimuskeskuksesta VTT:ltä.

Työn tavoitteena oli tutkia koestamalla muuntajassa käytettäviä ei-standardin mukaisia vaarnaruuveja ja selvittää niiden mekaanisia ominaisuuksia. Tulosten pohjalta oli tarkoitus luoda mitoitushje muuntajatehtaan suunnitteluun.

Työ alkoi suunnittelemalla työssä tutkittava testaussarja. Lopulliseen testaussarjaan kuului yhdeksän erikokoista ruuvia, joita valmistettiin kolmesta eri materiaalista. Tutkittavat ruuvit valmisti ja toimitti yritys nimeltä Finvacon. Lopuksi esitetään tutkimuksen keskeisiä havaintoja sekä VTT:llä koestettujen ruuvien tulokset. Testituloksista saaduista arvoista laskettiin ruuvien mitoitusarvot.

Testituloksista voidaan kuitenkin todeta, että saatuja tuloksia ei voida soveltaa suoraan käytäntöön. Testeissä havaittujen poikkeamien ja epätasaisuuksien vuoksi olisi suositeltavaa, että muuntajatehtaalla jatkettaisiin ruuvien mekaanisten ominaisuuksien tutkimista ja tarkkailua.

ABSTRACT

Author	Ville-Matti Varonen
Title	Mechanical Strength and Dimensioning of Transformer Lifting and Compression Screws
Year	2017
Language	Finnish
Pages	43
Name of Supervisor	Vesa Verkkonen

This thesis was carried out with ABB Vaasa transformer factory as a product development project in 2017. In this task external services were used from VTT Technical Research Center of Finland.

The aim was to research the nonstandard headless screws used in a transformer and examine mechanical properties of the screws. The aim was also to create the dimensioning instruction for the planning unit of the transformer factory based on the results.

The research was started by planning the testing set. The final testing set included nine different sizes of screws which were manufactured of three different kind of materials. The screws were manufactured and delivered by a company called Finvacon. The overview of testing at VTT Technical Research Centre of Finland was also made. Dimensioning values for the screws were calculated by using the testing results.

It can be seen from the test results that calculated values cannot be used directly to practice. Due to anomalies and varying results in the test it is recommended that mechanical properties of the screws should be continued to research and observe.

Keywords	Transformer, tension test, mechanical strength, screw and connections
----------	---

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	OPINNÄYTETYÖN TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT.....	10
1.1	Työn tarve	10
1.2	ABB	10
2	MUUNTAJA	11
2.1	Muuntajan toiminta.....	12
2.2	Tehomuuntaja	13
2.3	Aktiiviosa.....	13
2.4	Nosto- ja puristusruuvit.....	15
3	RUUVILIITOKSET	16
3.1	Ruuvit.....	16
3.1.1	Taustatieto	16
3.1.2	Kierteet.....	16
3.1.3	Merkinnät	18
3.2	Ruuviliitokset.....	19
3.3	Asennustapa	20
3.4	Käytönaikaiset kuormitukset	21
3.4.1	Kuormitus.....	21
3.4.2	Staattinen kuormitus ja dynaaminen kuormitus.....	21
3.4.3	Käytönaikaiset kuormitukset.....	22
4	MATERIAALIEN KÄYTTÖOMINAISUUDET JA TESTAUS.....	23
4.1	Materiaalit	23
4.1.1	Ruuvien materiaaliominaisuudet.....	23
4.2	Koestusmenetelmät	24
4.2.1	Vetokoe	25
4.3	Materiaalien lujuusominaisuudet	26
4.3.1	Materiaalien kimmoisuus ja muodonmuutokset	26
4.3.2	Jännityksen ja venymän välinen yhteys	26

4.3.3	Vetomurtolujuus R_m	28
4.3.4	Myötöraja R_e	29
4.3.5	Venymisraja R_p	30
5	RUUVIEN TESTAUS.....	31
5.1	Testaussarja ja koekappaleet.....	31
5.2	Testauksen olosuhteet	32
5.3	Testitulokset.....	33
6	ANALYYSI JA TULOSTEN KÄSITTELY.....	34
6.1	Ruuvien sallittu kuormitus	34
6.2	Kiristysmomentin laskenta.....	35
6.3	Testitulosten arviointi	38
6.4	Kiristysmomentit.....	39
6.5	Vertailu standardin mukaisiin ruuveihin.....	40
7	YHTEENVETO	41
	LÄHTEET.....	42

LIITTEET

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. ABB:n tehomuuntaja.	11
Kuva 2. Muuntajan toimintaperiaate.	12
Kuva 3. Muuntajan aktiivisosan rakenne.	14
Kuva 4. Muuntajan aktiiviosa, jossa puristusruuvit merkitty punaisella ja nostoruuvit sinisellä.	15
Kuva 5. Tavallisimmat kierremuodot ja niiden käyttö.	17
Kuva 6. Kierreprofiilin eri mitat.	17
Kuva 7. Kierteen nousukulma.	18
Kuva 8. Kiinnittimissä sijaitsevat merkinnät.	19
Kuva 9. Vetokokeessa määritettävä jännitys-venymäkäyrä ja sen eri suureet.	25
Kuva 10. Myötörajan määrittäminen erilaisista jännitys-venymäkäyristä.	29
Kuva 11. Venymisrajan $R_{p0,0048d}$ määrittäminen jännitys-venymäkäyrästä.	30
Kuva 12. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu M16-koekappale.	32
Kuva 13. Standardinmukainen esimerkki vaarnaruuviin käytettävästä koelaitteistosta.	32
Kuva 14. Venymisraja $R_{p0,0048d}$ eri halkaisijoilla.	39
Taulukko 1. Ruuvien lujuusluokat.	19
Taulukko 2. Ruuvien koestetut tulokset venymisvoimana $F_{p0,0048d}$	33
Taulukko 3. Ruuvien koestetut venymisraja tulokset $R_{p0,0048d}$	33
Taulukko 4. Lasketut sallitut kuormitukset käyttäen varmuuslukua 1,2.	34
Taulukko 5. Lasketut sallitut kuormitukset käyttäen varmuuslukua 1,5.	35
Taulukko 6. Lasketut sallitut kuormitukset käyttäen varmuuslukua 2.	35
Taulukko 7. Lasketut kokonaiskieristysmomentit ruuveille.	37
Taulukko 8. Ruuvien myötölujuus paremmuusjärjestyksessä.	38
Taulukko 9. Testituloksista lasketut lujuusluokat	40
Taulukko 10. Vertailu koestetun ruuvin myötörajan vastaavan lujuusluokan teoreettiseen myötölujuuteen.	40

LIITELUETTELO**LIITE 1. Kiristysmomentin laskuesimerkki**

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	Pinta-ala
$A_{s\text{ nom}}$	Jännityspinta-ala
d	Kierteen halkaisija
d_1	Kierteen sisähalkaisija
d_2	Kierteen kylkihalkaisija
d_h	Ruuvin vapaareiän halkaisija
d_w	Kantavan pinnan ulkohalkaisija
E	Kimmokerroin
F	Voima
F_m	Murtokuorma
I_1	Ensiökäämin virta
I_2	Toisiökäämin virta
l_0	Sauvan alkuperäinen pituus
M_a	Kokonaiskristysmomentti
M_g	Kierteen aiheuttama kitkamomentti
M_k	Mutterin kierteen ja alustan välinen kitkamomentti
N_1	Ensiökäämin kierrosluku
N_2	Toisiökäämin kierrosluku
n	Varmuusluku

P	Kierteen nousu
R_e	Myötöraja
R_m	Murtolujuus
R_p	Venymisraja
$R_{p0,0048d}$	Kiinnittimen 0,2-venymisraja
U_1	Ensiökäämin jännite
U_2	Toisiökäämin jännite
Δl	Sauvan venymä
β	Kierteen kylkikulma
ε	Suhteellinen venymä
μ_G	Kierteen kitkakerroin
μ_K	Mutterin ja sen alustan välinen kitkakerroin
σ	Normaalijännitys
σ_{sall}	Sallittu jännitysvoima
φ	Kierteen nousukulma

1 OPINNÄYTETYÖN TAVOITTEET JA LÄHTÖKOHDAT

1.1 Työn tarve

Muuntajissa käytetään pyöröteräksestä valmistettuja vaarnaruuveja, joissa on koneistamalla tehtyjä kierteitä. Vaarnaruuvit ovat kokoluokkaa M12-M56 ja materiaaleina toimivat normaaliteräs, ruostumaton teräs ja nuorutettu suurlujuusteräs. Näiden ruuvien pituus vaihtelee välillä 1-4 m ja kuormituksen aiheuttama venymä on normaalikierteiden nousuun nähden merkittävä.

Standardien mukaiselle ruuvitavaralle löytyy selkeät lujuusarvot ja mitoitusohjeet, mutta näitä ei voida suoraan soveltaa muilla menetelmillä valmistettuihin ei-standardisoituihin ruuveihin. ABB:ltä löytyy sisällöltään vaihtelevaa ohjeistusta siitä, mitä mitoitusarvoa voidaan käyttää.

Insinööriyön tarkoituksena on määrittää koestamalla näiden kierteistettyjen nosto- ja puristusruuvien lujuus ja sallittu kuormitus, sekä luoda mitoitusohje saatujen tulosten perusteella.

1.2 ABB

ABB on ruotsalais-sveitsiläinen teollisuuskonserni, joka syntyi vuonna 1988, kun sveitsiläinen BBC Brown Boveri ja ruotsalainen ASEA yhdistyivät. ABB:n toimiala keskittyy sähkövoimatekniikan ja automaatiotekniikan aloille. ABB:llä on toimintaa yli 100 maassa ja Suomessa toimintaa on mm. Vaasassa ja Helsingissä. ABB:n asema Suomessa perustuu yhtiön Oy Strömberg Ab toimintaan, joka siirtyi ASEAn omistukseen vuonna 1987. /6/

2 MUUNTAJA

Muuntaja on sähkökone, joka muuttaa sähkömagneettisen induktion avulla vaihtojännitettä ja –virtaa kahden tai useamman käämin välillä. Muuntajat toimivat vain vaihtosähköllä. Muuntajan perusrakenne on pysynyt lähes samana sen keksimisestä lähtien. Muuntajan perusrakenteeseen kuuluu sähköä johtavat käämit ja magneettisesti johtava sydän. Muuntajat voidaan luokitella ja jakaa käyttötarkoituksensa perusteella eri ryhmiin: teho-, mitta- tai suojamuuntajiin.

Tehomuuntajia käytetään sähkövoiman siirrossa ja jakelussa. Tehomuuntajan yleisin käyttötarkoitus sähköverkossa on jännitteen nostaminen ja laskeminen verkon kannalta edulliseen arvoon verkon eri osissa. Tehomuuntajat sähköverkossa toteuttavat myös galvaanisen erotuksen, rajoittavat oikosulkuvirtaa ja tietyissä rajoissa säätelevät jännitettä. Kuvassa 1 on esitettyä ABB:n valmistama tehomuuntaja.

Mittamuuntajien tarkoituksena on mitattavan suureen muuttaminen mittalaitteille sopivaan arvoon. Yleisimpiä mittamuuntajia ovat virta- ja jännitemuuntajat. Yleisimpiä käyttötarkoituksia mittamuuntajille on pääpiirin virran ja jännitteen muuttaminen mittareille ja suojalaitteille sopivaan arvoon. /5/



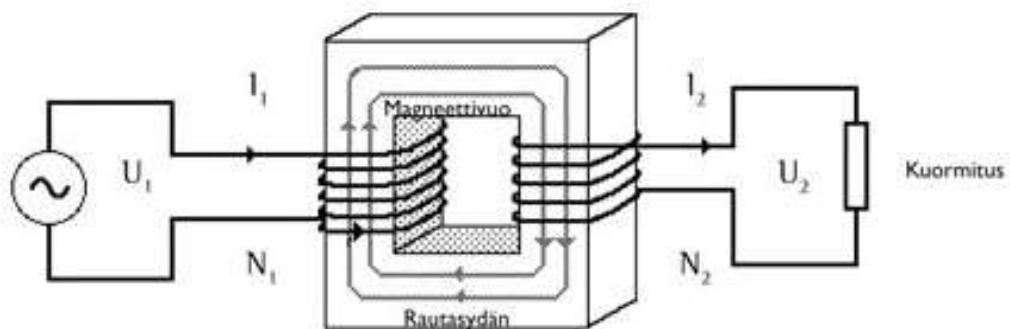
Kuva 1. ABB:n tehomuuntaja.

2.1 Muuntajan toiminta

Muuntajan varsinaisen tehtävän suorittaa sen aktiiviosa. Aktiiviosa koostuu sähkömagneettisesti johtavasta rautasydäimestä ja käämityksistä. Käämityksiä on aina vähintään kaksi kappaletta, ensiö- ja toisiokäämi. Muuntajan ensiökäämiksi kutsutaan käämiä, johon virta syötetään ja toisiokäämiksi käämiä, josta teho tulee ulos muuntajasta.

Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, jossa sähköenergia siirtyy virtapiiristä toiseen käämien välisen keskinäisinduktanssin avulla. Muuntajan ensiökäämiin kytketty vaihtovirta aiheuttaa magneettisydämeen muuttuvan magneettivuon. Magneettivuon lävistäessä toisiokäämin indusoituu toisiokäämin napoihin sen kierroslukua vastaava jännite kaavan 1 mukaisesti. Tällä tavoin sähköenergia siirretään ensin magneettiseksi energiaksi ja sitten magneettinen energia takaisin sähköenergiaksi. Muuntajan toimintaperiaate on esitettyä kuvassa 2. /5/

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$



Kuva 2. Muuntajan toimintaperiaate.

2.2 Tehomuuntaja

Tehomuuntajia voidaan jakaa eri ryhmiin usealla tavalla. Tehomuuntajat voidaan ryhmitellä käyttötarkoituksen, vaiheluvun, rakenteen tai tehon perusteella. Yleisin tapa luokitella tehomuuntajia on luokitella muuntaja sen tehon perusteella. Tällä tavoin luokiteltuna muuntajat jaetaan pienteho- eli jakelumuuntajiin ja suurtehomuuntajiin. Jakelumuuntajat toimivat sähköverkon jakeluverkossa ja laskevat jännitettä siirtoverkosta siirryttäessä jakeluverkkoon käyttäjille sopivaksi jännitteeksi. Suurtehomuuntajia käytetään sähkönsiirtoverkossa nostamaan ja laskemaan jännitettä sähkönsiirron kannalta edulliseen arvoon.

Sähköenergian tuotannosta vastaavat voimalaitokset sijoittuvat harvoin lähelle kuluspistettä erinäisten syiden takia. Tällöin sähkö on siirrettävä kuluttajalle sähkönsiirtoverkon avulla. Sähkönsiirron ja -jakelun kannalta on tärkeää, että häviöt pysyvät kohtuullisina. Sähköjohtimessa syntyvät häviöt ovat suoraan verrannollisia virran neliöön, kun taas verkossa siirrettävä teho on verrannollinen jännitteeseen ja virtaan. Tämän takia on edullisempaa siirtää suuria tehoja suurella jännitteellä, jolloin tehohäviöt pienenevät murto-osaan. /5/

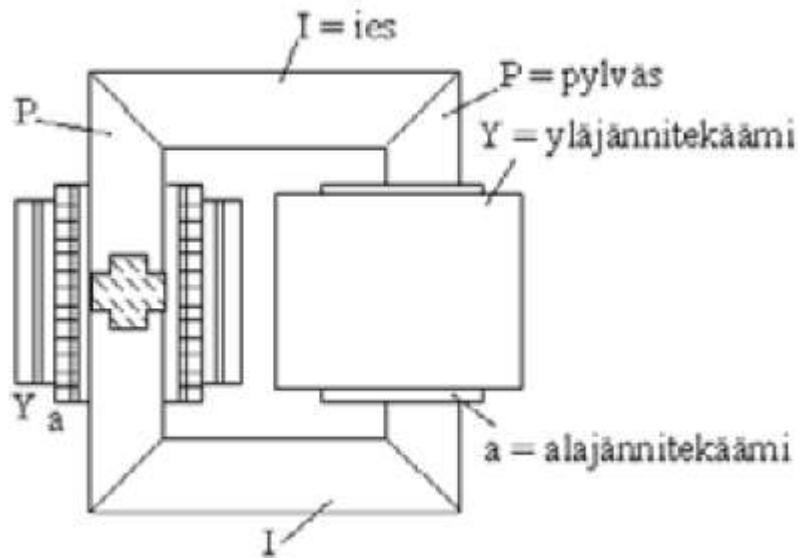
2.3 Aktiiviosa

Muuntajan aktiiviosaksi kutsutaan rakennekokonaisuutta, joka suorittaa muuntajan varsinaisen tehtävän. Aktiiviosa koostuu rautasydäimestä ja sitä ympäröivistä käämeistä. Muuntajan aktiiviosan rakenne on esitetty kuvassa 3.

Rautasydämen tarkoituksena on luoda suljettu magneettiipiiri, joka ohjaa magneettivuota haluttujen käämitysten kautta. Rautasydän koostuu kahdesta tai useammasta pylväästä ja pylväitä yhdistävistä ikeistä. Ikeet ja pylväät valmistetaan ohuista sydänlevyistä. Yhdessä ikeet ja pylväät muodostavat suljetun magneettiipiirin.

Muuntajan käämitykset ovat lieriömäisiä kokonaisuuksia, jotka sijoitetaan rautasydämen pylväiden ympärille. Muuntajan peruskäämit ovat ensiö- ja toisiökäämi. Peruskäämien lisäksi muuntajassa voi olla useita erilaisia alajännitekäämejä tai säätökäämi, joka kytketään ensiökäämin jatkeeksi. Käämit valmistetaan yleensä puh-

taasta kuparista tai sähköalumiinista. Ensiökäämi ja sitä vastaava toisiokäämi sijoitetaan usein samalla pylväälle, jolloin saavutetaan edullisin asema hajavuon ja hajareaktanssin kannalta. Alajännitekäämi sijoitetaan lähemmäksi sydäntä, koska se on helpompi eristää sydäimestä kuin yläjännitekäämi. /5/



Kuva 3. Muuntajan aktiivisosan rakenne.

2.4 Nosto- ja puristusruuvit

Aktiiviosan lisäksi muuntajaan kuuluu passiivisia osia, jotka eivät osallistu muuntajan tehon siirtoon ja jännitteen muutokseen. Passiivisiin osiin kuuluu mm. tukirakenteet, eristimet ja erilaiset jäähdytyslaitteet.

Nosto- ja puristusruuvit kuuluvat muuntajan puristusosiin. Puristusosien tarkoituksena on tukea ja puristamalla pitää aktiiviosaa paikallaan. Puristusosien tulee myös pystyä ottamaan vastaan käytönaikaiset rasitukset ja tukea aktiiviosaa niiden aikana. Käämeissä kulkeva sähkövirta saa aikaan mekaanisia voimavaikutuksia, jotka puristusosien tulee kestää. Muuntajan nosto- ja puristusruuvit ovat esitettynä kuvassa 4. /4/



Kuva 4. Muuntajan aktiiviosa, jossa puristusruuvit merkitty punaisella ja nostoruuvit sinisellä.

3 RUUVILIITOKSET

3.1 Ruuvit

3.1.1 Taustatieto







Ruuvi on mekaaninen laite, jonka tarkoituksena on muuntaa pyörivä liike eteneväksi liikkeeksi. Ruuveja käytetään useisiin tarkoituksiin, kuten kiinnittämiseen, kappaleiden liikuttamiseen ja säätämiseen. Ruuvit jaotellaan käyttötarkoituksensa mukaan kiinnitys- ja liikeruuveihin. Ruuvilla tarkoitetaan tankomaista koneenosaa, jota ympäröi kierre. Ruuvi on yleisin käytetty koneenosa koneenrakennuksessa.

Ruuvin historia voidaan jakaa kahteen eri osaan: kierteen historiaan ja kiinnikkeen historiaan. Kierteitä käytettiin jo vuonna 400 ekr alkeellisissa vedennostolaitteissa ja kiinnikkeissä. Nykyaikainen kierteinen kiinnitysruuvi on kuitenkin peräisin vasta 1400-luvulta, jonka jälkeen ruuvin käyttäminen, sen nykyisessä muodossa, on kehittynyt sen nykyiseen käyttötarkoitukseensa. /7/

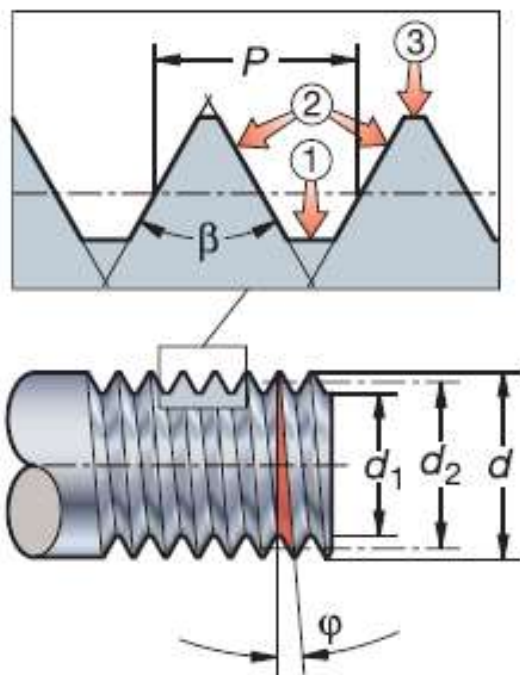
3.1.2 Kierteet

Ruuvin varsinaisen tehtävän suorittaa kierre. Kierteen avulla ruuvi muodostaa mekaanisen liitoksen, välittää pyörivän liikkeen suoraksi liikkeeksi tai kehittää pienellä voimalla suuremman voiman. Ruuvin kierteitä on lukuisia erilaisia ja ne luokitellaan kierreprofiilin mukaan. Erilaiset kierreprofiilit ja käyttötarkoitukset ovat esitettynä kuvassa 5. Kierreprofiili määrittää ruuvin kierteen geometrisen muodon. Kierteen muoto ja profiili vaikuttavat ruuvin valintaan ja käyttötarkoitukseen. Kierreprofiilien tärkeimmät mitat ovat kierteen nousu P , kylkikulma β ja nousukulma ϕ . Muita tärkeitä mittoja ruuville ovat halkaisija d , sisähalkaisija d_1 ja kylkihalkaisija d_2 . Kierreprofiilin eri mitat ovat esitettynä kuvassa 6.

Muita kierteeseen liittyviä määritelmiä ja termejä ovat kierteen pohja, kylki ja harja. Kierteen pohjalla tarkoitetaan kierteen pohjapintaa (kuva 5 merkintä 1). Kierteen kylki on kierteen pohjan ja yläpään yhdistävä pinta (kuva 5 merkintä 2). Kierteen harjalla tarkoitetaan vierekkäisten kylkien yhdistävää yläpintaa (kuva 5 merkintä 3). /10/

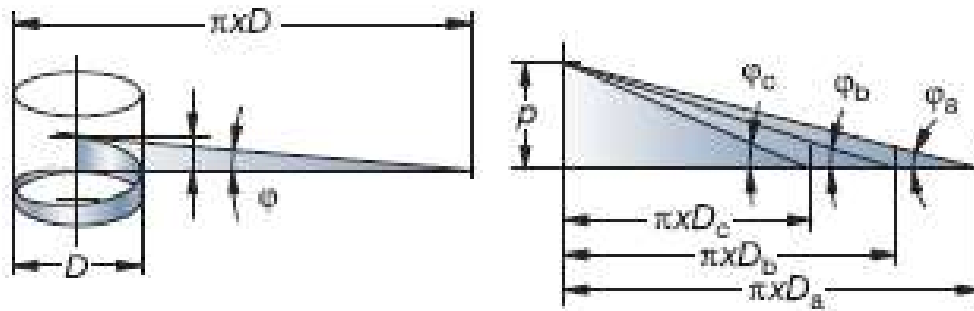
Käyttö	Kierremuoto	Kierre
Liitokset Yleinen käyttö		Metrisen ISO, American UN
Putkikierteet		Whitworth, brittiläinen standardikierre (BSPT), amerikkalaiset standardikierteet (NPT, NPTF)
Elintarvike- ja palontorjunta-ala		DIN 405 -pyörökierre
Ilmailuteollisuus		MJ, UNJ
Öljy- ja kaasuteollisuus		Pyöreä API, API Buttress, VAM
Liikeruuvit Yleinen käyttö		Trapetsi/DIN 103, ACME, Stub ACME

Kuva 5. Tavallisimmat kierremuodot ja niiden käyttö.



Kuva 6. Kierreprofiilin eri mitat.

Kierteen nousulla P tarkoitetaan matkaa, jonka ruuvi liikkuu kun sitä pyöritetään yksi kierros. Nousukulma φ perustuu kierteen nousuun P ja halkaisijaan d . Sama kierteen nousu aiheuttaa erilaisen nousukulman eri halkaisijalla. Kierteen nousu ja nousukulma ovat esitettyinä kuvassa 7. /10/

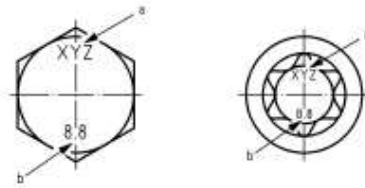


Kuva 7. Kierteen nousukulma.

Kierteiden halkaisijat ja nousut ovat standardisoituja, jolloin ruuvit ja mutterit ovat yhteensopivia ja vaihtokelpoisia valmistuspaikasta huolimatta. Yleisimmät kierreprofiilit ovat teräväkierteinen, trapetsikierteinen ja pyörökierteinen profiili. Suomessa eniten liitoksissa käytetty kierremuoto on ISO-standardin omaava teräväkierteinen profiili. /7/

3.1.3 Merkinnät

Ruuvien merkinnät ilmoittavat numero- tai kirjainyhdistelmällä ruuvien lujuuden ja valmistajan. Nämä merkinnät sijaitsevat usein ruuvien kannassa. Esimerkki ruuvien merkinnästä on esitettyä kuvassa 8. Valmistajan on lisättävä valmistusprosessin aikana lujuusluokkatunnukset kiinnittimiin. Lujuusluokkamerkinnät määrittelee kansainvälinen ISO 898-standardi. /2/



- a) Valmistajan tuotemerkki.
b) Lujuusluokan tunnus.

Kuva 8. Kiinnittimissä sijaitsevat merkinnät.

Taulukko 1. Ruuvien lujuusluokat.

Lujuusluokka	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9	<u>12.9</u>
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	-------------

Taulukossa 1 on esitettyä standardin mukaiset lujuusluokat. Lujuusluokan määrittävässä numeroyhdistelmässä ensimmäinen numero ilmoittaa vetolujuuden ja toinen numero myötölujuuden. Vetolujuus lujuusluokan numeroyhdistelmässä merkitään sadasosana ja myötölujuus kymmeninä prosentteina suhteessa vetolujuuteen.

/2/

Esimerkkinä lujuusluokan 8.8 kiinnitin:

-Kiinnittimen vetolujuus: $8 * 100 = 800 \text{ N/mm}^2$

-Kiinnittimen myötölujuus: $800 * 0,8 = 640 \text{ N/mm}^2$.

3.2 Ruuviliitokset

Ruuviliitos on yleisin purettava ja uudelleen asennettava liitos. Ruuviliitokset voidaan jakaa yksittäisiin ja moniruuviliitoksiin. Ruuviliitoksissa käytetään kiinnitysrivejä, joiden tarkoituksena on liittää rakenneosia toisiinsa. Ruuvia voidaan käyttää kiinnityksessä sellaisenaan tai ruavin vastakappaleena käytetään ruuviliitoksessa mutteria. Mutteri on ruuviin tai pulttiin vastakappaleeksi valmistettu liitososa. Ruuviliitoksessa voidaan käyttää myös muita liitososia, kuten aluslaattoja, varmistimia tai sokkia. Ruuviliitos toteutetaan puristamalla kiinnitettävät kappaleet ruavin ja mutterin väliin kiertämällä ruuvia ja mutteria toisiinsa nähden. Ruuviliitoksen

etuna voidaan pitää, että liitos voidaan purkaa ja asentaa uudelleen haluttaessa, liitososat ovat halpoja ja liitostyyppi soveltuu useimpiin käyttökohteisiin. Ruuviliitos on oikein asennettuna ja mitoitettuna luotettava liitostapa. /7/

3.3 Asennustapa

Ruuviliitoksen luotettavuuden edellytyksenä on oikean kokoinen kiristysmomentti. Kiristysmomentilla tarkoitetaan voimaa, jonka ruuvi aiheuttaa liitettävien kappaleiden välille. Kiristysmomentin laskeminen mitoituksessa on hankalaa useiden muuttujien takia. Kiristysmomenttiin vaikuttaa esimerkiksi kitka ja asennusmenetelmä. Erilaiset asennusmenetelmät voivat aiheuttaa erilaisen jännitystilän liitokseen, vaikka liitoksessa olisikin saavutettu sama kiristysmomentti.

Ruuviliitosten kiristämisessä käytetään useita erilaisia menetelmiä. Nämä menetelmät perustuvat kahteen erilaiseen toimintamalliin. Yleisin malli ruuvin kiristämiseen perustuu kiertämällä ruuvin kantaa tietyllä momentilla, tätä kutsutaan vääntökiristykseksi. Vääntökiristykseen käytetään yleisesti momenttiavainta. Toinen ruuvin kiristysmenetelmä on vetokiristys. Vetokiristyksessä ruuvia venytetään ruuvin päihin kiinnitetyillä hydraulisylintereillä. Hydraulisylinterit venyttävät ruuvia halutulla voimalla, joka saadaan aikaan hydraulipaineen avulla. Ruuvin ollessa venytettyinä, suoritetaan kiristys pyörittämällä mutteri kiinni liitoksen pintaan. Kiristyksen jälkeen vapautetaan ruuvi laskemalla hydraulipaine, jolloin ruuviin jää haluttu kiristysmomentti. Vääntökiristyksen huonona puolena pidetään kiristyksen jälkeen jäävää vääntöleikkausjännitystä, kun taas vetokiristyksellä saavutetaan puhdasta vetojännitystä.

Ruuvin kiristämiseen perustuvissa laskemissa lähtökohtana käytetään oletusta, että esikiristysvoima on laskettu mitoitusprosessin aikaisemmassa vaiheessa ja kiristämiseen perustuvissa laskelmissa lasketaan halutun esijännitysvoiman saavuttamiseksi tarvittava kiristysmomentti. Tätä laskettua kiristysmomenttia käytetään ohjeena asennuksessa työkalun asetuksena. /7/

3.4 Käytönaikaiset kuormitukset

Kuormitusten määrittäminen lujuuslaskennassa on usein hankalaa, koska kuormitukset ovat usein epämääräisiä ja muuttuvia sekä huonosti mitattavissa ja ennustettavissa. /3/

3.4.1 Kuormitus

Kuormituksella tarkoitetaan ulkoista rakenteeseen vaikuttavaa voimaa. Kuormitusten lähteitä on yleensä useita. Yleisimpiä kuormituksia ovat mm. painovoima, lämpölaajeneminen ja kontakti toisiin kappaleisiin. Kuormitukset jaetaan staattisiin ja dynaamisiin kuormituksiin. Kuormitusta määrittävissä laskemissa käytetään viittä erilaista perusvoimaa. Perusvoimia ovat veto-, puristus-, vääntö-, leikkaus- ja taivutusvoima. Nämä perusvoimat voivat olla staattisia tai dynaamisia. Laskelmissa yleensä oletetaan, että kappaleeseen kohdistuvat voimat on yksinkertaistettu vastaamaan jotain näistä perusvoimista. Tässä työssä tutkittavan kappaleen eli ruuvin tutkimiseksi tulee ymmärtää kappaleeseen vaikuttavien jännitysten, muodonmuutosten ja sisäisten rasitusten vaikutukset. Ruuvi on kappale, jota voidaan tarkkailla useammalla eri tavalla. Ruuvia voidaan käsitellä sauvamaisena kappaleena, johon kohdistuu useimmiten vain veto-, puristusvoimia tai palkin tapaisena kappaleena, jolloin ruuviin voi kohdistua myös leikkaus-, taivutus ja vääntövoimia. Veto- ja puristusvoimat ovat usein yksinkertaisia voimia lujuuslaskennan kannalta. /3/

3.4.2 Staattinen kuormitus ja dynaaminen kuormitus

Kuormitusta voidaan kutsua staattiseksi silloin, kun rakenne on tasapainossa ulkoisten kuormien kanssa ja rakenne pysyy paikallaan tai liikkuu vakionopeudella.

Kuormitusta kutsutaan dynaamiseksi silloin, kun kuormitus on alati vaihtelevaa. Dynaamista kuormitusta kutsutaan myös ”iskumaiseksi” kuormitukseksi. Dynaamista kuormitusta aiheuttavat useimmiten pyörivät ja iskevät koneenosat. Dynaamisten kuormitusten määrittäminen ja arvioiminen on usein niin vaikeaa, että mittaamisessa tyydytään arvioimaan vain staattista kuormaa.

Veto- ja puristusvoimalla tarkoitetaan sauvan pituusakselin suuntaisesti vaikuttavaa vetävää tai puristavaa voimaa. /3/

3.4.3 Käytönaikaiset kuormitukset

Sähkölaitteissa sen käytöstä aiheutuvat kuormitukset ovat yleensä dynaamisia tai termisiä rasituksia. Sähkövirralla on neljä erilaista päävaikutusta. Rasitukset voivat johtua lämpenemästä, valosta, magneettikentästä tai rasitus voi olla kemiallinen. Dynaamisella rasituksella tarkoitetaan sähkölaitteen virran aiheuttamia sähkömagneettisia voimia. Sähköjohtimessa kulkeva virta luo ympärilleen magneettivuon, joka riippuu virran suuruudesta ja väliaineesta. Tämä sähkövirrasta aiheutuva magneettivuoto aiheuttaa voimavaikutuksen toisiin sähköjohteisiin. Nämä voimat voivat kumota toisensa tai aiheuttaa vetäviä tai työntäviä voimia, riippuen virran suunnasta. Suurimman dynaamisen rasituksen nosto- ja puristusruuveille aiheuttaa dynaaminen oikosulkuvirta. Dynaamisten rasitusten lisäksi sähkölaitteisiin kohdistuu termisiä rasituksia. Termisellä rasituksella tarkoitetaan sähköisten häviöiden aiheuttamaa lämpenemistä laitteistossa. Lämpötilan nousu aiheuttaa materiaaleissa lämpölaajenemista, lujuusominaisuuksien muutoksia ja eristyksien vanhenemista. Nämä voimat aiheuttavat rasituksia itse johtimille, mutta myös tukirakenteille ja liitoksille, joita tässä työssä tutkitaan. /8/

4 MATERIAALIEN KÄYTTÖOMINAISUUDET JA TESTAUS

4.1 Materiaalit

Materiaalin valinnalla on suuri merkitys tuotteen elinkaarelle ja lujuuslaskennalle. Materiaalin ominaisuudet määräävät tuotteen lujuusarvot ja sallitut kuormitukset. Materiaalia valittaessa joudutaan usein ottamaan huomioon muutakin kuin sen mekaaniset ominaisuudet. Tällaisia reunaehtoja ovat esimerkiksi materiaalin hinta, kemiallinen ympäristö, muut kosketuksissa olevat materiaalit, käyttöalueen lämpötila ja osan haluttu elinikä. Materiaalien käyttäytyminen ja ominaisuudet riippuvat pitkälti materiaalin koostumuksesta ja rakenteesta. Materiaalin käyttäytymiseen ja ominaisuuksiin voidaan usein vaikuttaa erilaisilla seostuksilla. Teräksen yleisimmät seosaineet ovat pii, nikkeli, koboltti, kromi, volframi, molybdeeni ja alumiini.

/3/

Muuntajassa käytetyissä nosto- ja puristusruuveissa käytetyt materiaalit ovat normaali ja epämagneettinen teräs sekä nuorrutettu suurlujuusteräs.

4.1.1 Ruuvien materiaaliominaisuudet

Ruuvien mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäämällä käytettävään materiaaliin seosaineita tai erilaisia lämpökäsittelyjä. Seosaineiden lisäämisellä tai lämpökäsittelyllä pyritään parantamaan ruuvien lujuus- ja sitkeysominaisuuksia. Esimerkiksi muuntajassa käytettävissä ruuveissa pyritään seosaineilla parantamaan materiaalin magneettisia ominaisuuksia, joilla on suora vaikutus muuntajan sähkömagneettisiin rasituksiin. Yleisimpiä lämpökäsittelyjä ruuveille ovat nuorrutus ja karkaisu. Karkaisulla tarkoitetaan metallin lämpökäsittelyprosessia, jossa metallia kuumennetaan ja kuumennuksen jälkeen jäähdytetään. Metallin lämpötilan noustessa sen mikrorakenteessa tapahtuu muutoksia ja metallin lujuusominaisuudet parantuvat. Nuorrutus on karkaisun tapainen prosessi, jossa metallia ensin kuumennetaan ja sen jälkeen jäähdytetään. Nuorrutuksen tarkoitus ruuvissa on luoda sekoi-

tus sitkeyttä ja lujuutta. Seosaineet ja lämpökäsittely muokkaavat usein ruuvien materiaaliominaisuuksia paljon, minkä takia vetokokeessa saadut jännitys-venymäkäyrät eivät ole normaalin rakenneteräksen kaltaisia. /3/

4.2 Koestusmenetelmät

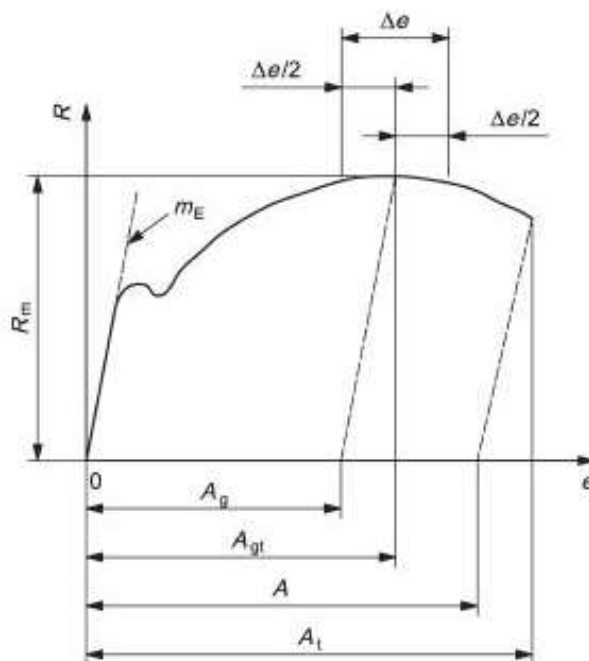
Materiaalien ominaisuuksien testaamiseksi ja toteamiseksi käytetään useita erilaisia koestusmenetelmiä. Koestusmenetelmien tarkoituksena on saada numerolla ilmaistavia tuloksia materiaalien eri ominaisuuksille. Aineenkoestusta tarvitaan useissa eri valmistusvaiheissa. Koestusmenetelmät jaetaan yleisesti aineen rikkoviksi ja rikkomattomiksi koestusmenetelmiksi. Koestusmenetelmät ovat standardisoituja, jotta koetulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään.

Rikkomattomalla aineenkoestuksella tarkoitetaan materiaalin testausta, jossa tutkittavaa kappaletta ei nimensä mukaisesti vaurioiteta. Rikkomatonta aineentestausta käytetään esimerkiksi säännöllisessä tuotantokappaleiden laaduntarkkailussa. Rikkomattomia aineenkoestusmenetelmiä on esimerkiksi magneettijauhe-, tunkeumaneste- ja ultraäänitarkastus.

Rikkova aineenkoestus sen sijaan vaurioittaa tutkittavaa materiaalia. Rikkovaa aineenkoestusta käytetään pääasiassa mekaanisten ominaisuuksien selvittämiseen ja silloin kun ominaisuuksia ei voida selvittää rikkomattomilla koestusmenetelmillä. Yleisimpiä rikkovan aineenkoestuksen tutkimuskohteita ovat esimerkiksi metallien lujuusominaisuuksien tai hitsausseaman kestävyuden selvittäminen. Rikkovat koestusmenetelmät kertovat, miten ja milloin tutkittavat kappaleet antavat periksi. Tällaisia menetelmiä ovat mm. veto-, kovuus- ja taivutuskoe. /9/

4.2.1 Vetokoe

Vetokoe on yksi tärkeimmistä materiaalin lujuuden määrittävistä lujuuskokeista. Vetokokeella voidaan määrittää esimerkiksi materiaalin vetolujuus ja myötöraja. Vetokoe suoritetaan vetämällä tutkittavasta materiaalista valmistettua koesauvaa tai kappaletta aineenkoestuskoneessa niin, että sen pituus kasvaa vakionopeudella. Koesauvaa venytetään sen katkeamiseen saakka. Kokeen tuloksena saadaan materiaalin lujuusominaisuuksia kuvaava jännitys-venymäkäyrä, joka näyttää koesauvaan tai -kappaleeseen kohdistuvan voiman koesauvassa tapahtuvan venymän funktiona. Esimerkki jännitys-venymäkäyrästä on esitettyä kuvassa 9. /1/



Selite

- A Murtovenymä [määritettynä venymämittarin signaalista tai suoraan koesauvasta]
- A_g Plastinen tasavenymä suurimmalla voimalla
- A_{gt} Kokonaistasavenymä suurimmalla voimalla
- A_t Kokonaisvenymä murtohetkellä
- e Venymä
- m_E Jännitys-venymäkäyrän kimmoisen osan kulmakertoin
- R Jännitys
- R_m Murtolujuus
- Δe Ylätasanteen koko (plastisen tasavenymän A_g määrittämiseksi kokonaistasavenymän A_{gt} määrittämiseksi)

Kuva 9. Vetokokeessa määritettävä jännitys-venymäkäyrä ja sen eri suureet.

4.3 Materiaalien lujuusominaisuudet

4.3.1 Materiaalien kimmoisuus ja muodonmuutokset

Materiaalin kimmoisuudella tarkoitetaan materiaalin ominaisuutta palata takaisin entiseen muotoonsa, kun siihen vaikuttavat kuormat tai jännitykset poistetaan. Jos materiaaliin vaikuttavat voimat ylittävät tietyn rajan, materiaali ei palaakaan enää entiseen muotoonsa, vaan siihen jää pysyvä muodonmuutos eli venymä. /9/

4.3.2 Jännityksen ja venymän välinen yhteys

Kokemus ja testaukset osoittavat, että täysin jäykkiä materiaaleja ei ole olemassaakaan ja kaikki materiaalit venyvät, kun niihin kohdistetaan tarpeeksi suuri voima. Kun sauvanmuotoiseen kappaleeseen kohdistetaan sen pituusakselin suuntainen voima, se joutuu veto- tai puristusjännityksen alaiseksi. Tällaista jännitystä kutsutaan normaalijännitykseksi. Normaalijännityksen yksikkönä käytetään SI-järjestelmän mukaista paineen yksikköä Pa, joka usein muutetaan yksikköön N/m^2 . Jos kappaleeseen vaikuttava voima vaikuttaa tasaisesti kappaleen pinta-alaan nähden, voidaan kappaleeseen vaikuttava normaalijännitys σ laskea kaavalla 2.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ jossa} \quad (2)$$

F on vetovoima

A on kappaleen pinta-ala.

Jännityksen ja venymän välistä yhteyttä kuvaa Hooken laki (kaava 3). Hooken lain mukaan kappaleeseen kohdistuva voima F on suoraan verrannollinen kappaleen venymään, jolloin kaavan 2 mukaisella voimalla F sauva pidentyy tietyn määrän Δl . Hooken lakia voidaan kuitenkin soveltaa vain materiaalin kimmoisella alueella. Voidaan myös todeta, että sauvan pitenemiseen vaikuttaa voiman lisäksi sauvan alkuperäinen pituus l_0 , materiaali ja poikkipinta-ala A. /3/

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E, \text{ jossa} \quad (3)$$

σ on kappaleeseen vaikuttava normaalijännitys

ε on sauvan suhteellinen venymä

E on kimmokerroin

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

l_0 on sauvan alkuperäinen pituus

Δl on sauvan venymä.

4.3.3 Vetomurtolujuus R_m

Vetomurtolujuudella tarkoitetaan suurinta pitkittäisakselin suuntaisesti vaikuttavaa vetävää voimaa, jonka materiaali kestää katkeamatta. Ruuvilla katkeaminen voi tapahtua kierteen tai varren kohdalta. Vetomurtolujuuden määrittämiseksi käytetään vetokoetta. Vetokoe voidaan suorittaa suoraan ruuvilla tai siitä koneistetulla vetosauvalla. Vetomurtolujuuden tarkka määrittäminen onnistuu vain koesauvan koestuksella, sillä kokonaisen ruuvin koestus antaa likimääräisen arvon. Jos koesauva valmistetaan suoraan ruuvista, tulee valmistuksessa ottaa huomioon koneistuksen aiheuttama ruuvin lämpeneminen ja ruuvin karkaisu, jotka voivat muuttaa koesauvan ominaisuuksia, jolloin testitulokset voivat antaa virheellisen arvon.

Murtolujuuden laskenta perustuu nimelliseen jännityspinta-alaan $A_{s,nom}$ ja koestuksen aikana mitattuun murtokuormaan F_m . /1/

$$R_m = \frac{F_m}{A_{s,nom}}, \text{ jossa} \quad (5)$$

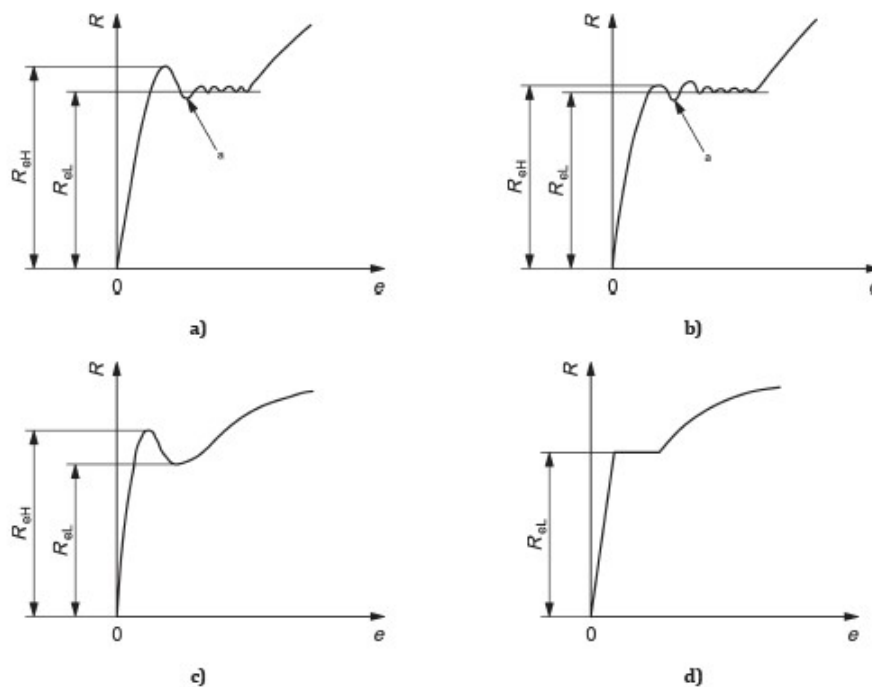
$$A_{s,nom} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_1}{2} \right)^2 \quad (6)$$

d_2 on kierteen kylkihalkaisija

d_1 on kierteen sisähalkaisija.

4.3.4 Myötöraja R_e

Myötörajalla tarkoitetaan rajaa, jolloin materiaalin vaikuttavan venyttävän voiman suuruus ylittää materiaalin kimmoisan alueen. Kimmoisan alueen ylittämisen jälkeen materiaaliin jää pysyviä plastisia muutoksia kuormituksen loputtua. Myös myötöraja määritetään yleensä vetokokeen avulla. Myötörajasta havaitaan joskus kaksi eri arvoa, joita kutsutaan alemmaksi myötörajaksi R_{eL} ja ylemmäksi myötörajaksi R_{eH} . Esimerkki myötörajan määrittämisestä erilaisista jännitys-venymäkäyristä on esitettyä kuvassa 10. /1/



Selite

- e Venymä
- R Jännitys
- R_{eH} Ylempi myötöraja
- R_{eL} Alempi myötöraja
- ^a Alkuvaiheen hetkellinen yliheilahdus

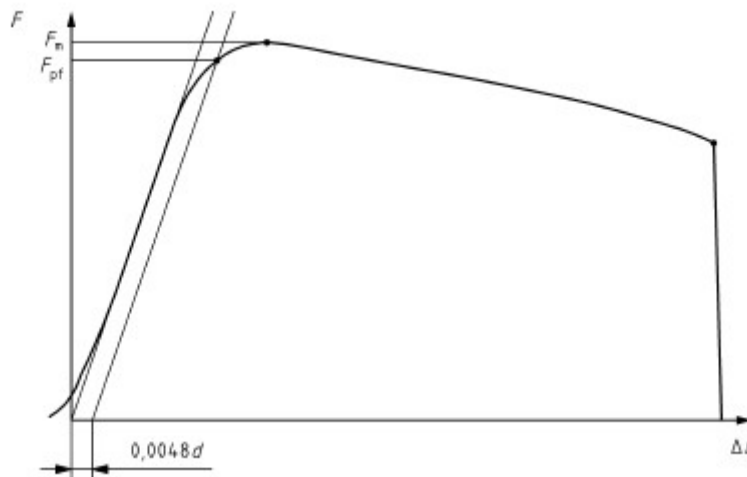
Kuva 10. Myötörajan määrittäminen erilaisista jännitys-venymäkäyristä.

4.3.5 Venymisraja R_p

Kaikilla materiaaleilla ei ole myötörajaa. Tällaisille materiaaleille käytetään ns. venymisrajaa R_p . Venymisrajalla tarkoitetaan rasiitusta, joka aiheuttaa pysyvän prosentuaalisen plastisen venymän tutkittavaan materiaaliin tai kappaleeseen, esimerkiksi 0,2 %. Valmiille kiinnittimille käytetään 0,0048d venymisrajaa. 0,0048d venymisrajalla tarkoitetaan voimaa, jolla tutkittavassa kiinnittimessä on tapahtunut 0,48 % plastinen venyminen suhteessa kiinnittimen nimellishalkaisijaan. Esimerkki venymisrajan määrittämisestä on esitettyä kuvassa 11. /1/

0,0048d –venymisrajan määrittämiseen käytetään kaavaa:

$$R_{pf} = \frac{F_{pf}}{A_{s, nom}} \quad (7)$$



Kuva 11. Venymisrajan $R_{p0,0048d}$ määrittäminen jännitys-venymäkäyrästä.

5 RUUVIEN TESTAUS

Ruuvien testausjärjestelyt päädyttiin suorittamaan valtion teknisellä tutkimuskeskuksella VTT:llä, jolla oli testaukseen sopiva laitteisto ja tietotaito. VTT on moniteknologinen soveltavaa tutkimusta tekevä tutkimuskeskus, joka myy palvelujaan kansainvälisille yrityksille ja julkiselle sektorille.

5.1 Testaussarja ja koekappaleet

Testaussarjan suunnittelussa otettiin huomioon standardit ja muuntajatehtaan tarpeet. Testauksessa noudatetut standardit olivat SFS-EN ISO 898-1 /2/ sekä SFS-EN ISO 6892-1 /1/. Lopullinen testaus päädyttiin suorittamaan valmiiksi valmistetuilla ruuveilla, jotka vastaisivat parhaiten tehtaalla käytettäviä ruuveja ja muuntajatehtaan tarpeita.

Lopulliseen testaussarjaan kuului yhteensä 54 koekappaletta. Koekappaleiksi valittiin yhdeksän halkaisijaltaan eri kokoista vaarnaruuvia, joita käytetään aktiivisesti muuntajatehtaalla. Koot olivat M12, M16, M24, M30, M36, M42, M46 ja M56. Kaikkia yhdeksää ruuvikokoa valmistettiin kolmesta eri materiaalista kaksin kappalein. Koekappaleiden valmistuksessa käytetyt materiaalit olivat normaali rakeneteräs, ruostumaton teräs sekä nuorrutettu teräs. Yhteensä variaatioita oli 27. Kahdennetulla koestuksella pyrittiin lisäämään koetuloksen tarkkuutta ja varmistamaan tuloksen paikkansapitävyys.

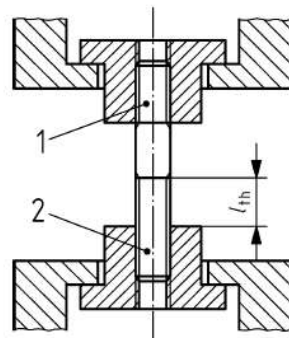
Koekappaleiden mitat ja suunnittelun ohjeisti VTT:n henkilökunta. VTT suositteli koekappaleiden pituudeksi 1500 mm, josta kierrettä olisi 350 mm ruuvin molemmista päistä. Koekappaleet valmistettiin VTT:n ohjeiden mukaisesti. Koekappaleet valmistettiin ja toimitti yritys nimeltä Finvacon. Kuvassa 12 on esimerkkinä koekappaleeksi ruostumattomasta teräksestä valmistettu M16 vaarnaruuvi.



Kuva 12. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu M16-koekappale.

5.2 Testauksen olosuhteet

Testaukset suoritettiin syksyllä 2017 Espoossa VTT:n toimitiloissa. Testausolosuhteet ja -tekniikat suoritettiin standardien EN ISO 6892-1 ja EN ISO 898-1 mukaisesti. Vetokokeessa ruuvin toinen pää kiinnitettiin mutterilla erikoisvetotyökalua vasten ja toinen pää kiinnitettiin kierteen kohdalta vetokoneen leukojen väliin. (Kuva 13.)



c) Esimerkki vaarnaruuvien koelaitteistosta

Selite

1 Ruuvipää

2 Mutteripää

d_h Reiän halkaisija

l_{th} Kiinnittimen vapaa kierteitetty pituus koelaitteessa

Kuva 13. Standardinmukainen esimerkki vaarnaruuviin käytettävästä koelaitteistosta.

5.3 Testitulokset

Vetokokeissa saadut testitulokset ilmoitettiin taulukkomuodossa venymisvoimana $F_{p0,0048d}$ ja venymisrajana $R_{p0,0048d}$.

Taulukossa 2 ja 3 on esitettyä vetokoneen tulokset.

Taulukko 2. Ruuvien koestettut tulokset venymisvoimana $F_{p0,0048d}$.

koko	Rakenneteräs (kN)	Ruostumatongeräs (kN)	Nuorrutettuteräs (kN)
M12	38,9	34,2	51,9
M16	88,7	66,1	66,4
M20	123	99	171
M24	152	162	243
M30	279	204	493
M36	361	268	601
M42	558	407	864
M48	689	535	1030
M56	881	577	1827

Taulukko 3. Ruuvien koestettut venymisraja tulokset $R_{p0,0048d}$.

koko	Rakenneteräs (N/mm ²)	Ruostumatongeräs (N/mm ²)	Nuorrutettuteräs (N/mm ²)
M12	461	406	616
M16	565	421	420
M20	502	404	698
M24	431	459	688
M30	497	364	879
M36	442	328	743
M42	498	363	771
M48	468	363	699
M56	434	284	874

6 ANALYYSI JA TULOSTEN KÄSITTELY

6.1 Ruuvien sallittu kuormitus

Lujuuslaskelmissa tehtyjen oletusten, lasku- ja arvioimisvirheiden takia käytetään mitoituksessa varmuuslukuja. Varmuusluvulla tarkoitetaan materiaalin lujuuden ja kuormituksen aiheuttaman rasituksen suhdetta. Varmuusluvun tarkoituksena on luoda turvalliset käyttöedellytykset mitoittavalle laitteelle ja huolehtia, että materiaaliin kohdistuvat rasitukset ovat selvästi materiaalin sietokyvyn alapuolella. Varmuusluvun arvolle ei ole yleistä mitoitusääntöä, vaan sen määrittäminen on usein tapauskohtaista. Joskus varmuusluvun voi määrittää suunnittelustandardit. Staattisen kuormituksen tapauksessa, varmuusluku perustuu sitkeillä aineilla materiaalin myötölujuuteen ja hauraila aineilla materiaalin murtolujuuteen.

Sallittu kuormitus σ_{sall} lasketaan sitkeällä aineella kaavalla 8, kaavassa R_p on materiaalin venymisraja ja n varmuusluku. Varmuusluvun n arvona pidetään yleensä 1,2...2. /9/

$$\sigma_{sall} = \frac{R_p}{n} \quad (8)$$

Taulukoissa 4, 5 ja 6 on esitettyinä lasketut ruuvien sallitut kuormitukset käyttäen eri varmuuslukuja.

Taulukko 4. Lasketut sallitut kuormitukset käyttäen varmuuslukua 1,2.

koko	Rakenneteräs (kN)	Ruostumatonteräs (kN)	Nuorutettuteräs (kN)
M12	32,4	28,5	43,3
M16	73,9	55,1	55,3
M20	102,5	82,5	142,5
M24	126,7	135,0	202,5
M30	232,5	170,0	410,8
M36	300,8	223,3	500,8
M42	465,0	339,2	720,0
M48	574,2	445,8	858,3
M56	734,2	480,8	1522,5

Taulukko 5. Lasketut sallitut kuormitukset käyttäen varmuuslukua 1,5.

koko	Rakenneteräs (kN)	Ruostumatonteräs (kN)	Nuorrutettuteräs (kN)
M12	25,9	22,8	34,6
M16	59,1	44,1	44,3
M20	82,0	66,0	114,0
M24	101,3	108,0	162,0
M30	186,0	136,0	328,7
M36	240,7	178,7	400,7
M42	372,0	271,3	576,0
M48	459,3	356,7	686,7
M56	587,3	384,7	1218,0

Taulukko 6. Lasketut sallitut kuormitukset käyttäen varmuuslukua 2.

koko	Rakenneteräs (kN)	Ruostumatonteräs (kN)	Nuorrutettuteräs (kN)
M12	19,5	17,1	26,0
M16	44,4	33,1	33,2
M20	61,5	49,5	85,5
M24	76,0	81,0	121,5
M30	139,5	102,0	246,5
M36	180,5	134,0	300,5
M42	279,0	203,5	432,0
M48	344,5	267,5	515,0
M56	440,5	288,5	913,5

6.2 Kiristysmomentin laskenta

Ruuviliitosta kiristettäessä ruuvin kohdistuu vetojännityksen lisäksi vääntöjännitystä, joka syntyy ruuvin kierteen kitkamomentista sekä mutterin ja sen alustan välisestä kitkamomentista. Oikean kokonaiskiristysmomentin laskeminen riippuu ratkaisevasti siitä, kuinka hyvin materiaalin kitkakertoimet tunnetaan. Tämän takia useimmiten ruuviliitokset tulevat vain likimäärin oikein kiristetyiksi.

Kokonaiskiristysmomentti M_A koostuu kierteen aiheuttamasta kitkamomentista M_G ja mutterin kierteen ja alustan välisestä kitkamomentista M_K .

Kiristysmomentin laskennassa lähtökohtana pidetään sitä, että vetojännitys saa olla enintään 90 % käytetyn kiinnittimen myötörajusta R_e tai venymisrajasta R_p . /9/

Sallittu vetojännitys kiristysvaiheessa saadaan kaavasta:

$$\sigma_{sall} = \frac{0,9 * R_p}{\sqrt{1 + 3 * \left(\frac{3 * d_2}{2 * d_0} * \left(1,155 * \mu_G + \frac{P}{\pi * d_2}\right)\right)^2}}, \text{ missä} \quad (9)$$

d_2 on ruuvien kierteen kylkihalkaisija

μ_G on kierteen kitkakerroin

P on kierteen nousu

$d_0 = \frac{d_2 + d_1}{2}$, missä d_1 on kierteen sydänhalkaisija.

Suurin sallittu aksiaalivoima asennuksessa saadaan kaavasta:

$$F_M = \sigma_{sall} * A_S, \text{ missä} \quad (10)$$

A_S on ruuvien jännityspinta-ala.

Metrisille ISO-kierteisille ruuveille, joiden kylkikulma on 60° , saadaan kierteen aiheuttama kitkamomentti M_G laskettua kaavalla:

$$M_G = \frac{1}{2} * d_2 * F_M * \left(1,155 * \mu_G + \frac{P}{\pi * d_2}\right) \quad (11)$$

Lisäksi mutterin ja sen alustan välinen kitkamomentti M_K saadaan kaavasta:

$$M_K = \frac{1}{2} * \mu_K * D_{km} * F_M, \text{ missä} \quad (12)$$

μ_K on Mutterin ja sen alustan välinen kitkakerroin

$$D_{km} = \frac{d_w + d_h}{2}, \text{ missä} \quad (13)$$

d_w on mutterin tai kantavan pinnan ulkohalkaisija

d_h on ruuvien vapaareiän halkaisija.

Kokonaiskiristysmomentti M_A saadaan kaavasta:

$$M_A = M_G + M_K \quad (14)$$

Laskettaessa koestettujen ruuvien kokonaiskiristysmomenttia, käytettiin kitkaker-
toimille μ_G ja μ_K arvoa 0,14. Ruuvien vapaareikien halkaisijan oletettiin olevan 1
mm suurempi kuin ruuvin halkaisija sekä sallitun vetojännityksen laskemisessa
käytettiin ruuvien venymisrajan $R_{p0,0048d}$ arvoja.

Taulukossa 7 on lasketut kiristysmomentit ruuveille. Kiristysmomentin laskenta-
esimerkki on liitteessä 1.

Taulukko 7. Lasketut kokonaiskiristysmomentit ruuveille.

Koko	Rakenneteräs (Nm)	Ruostumaton teräs (Nm)	Nuorrutettuteräs (Nm)
M12	68	60	91
M16	204	152	151
M20	352	283	489
M24	522	556	833
M30	1200	879	2123
M36	1860	1380	3127
M42	3370	2457	5218
M48	4765	3696	7117
M56	7032	4602	14162

6.3 Testitulosten arviointi

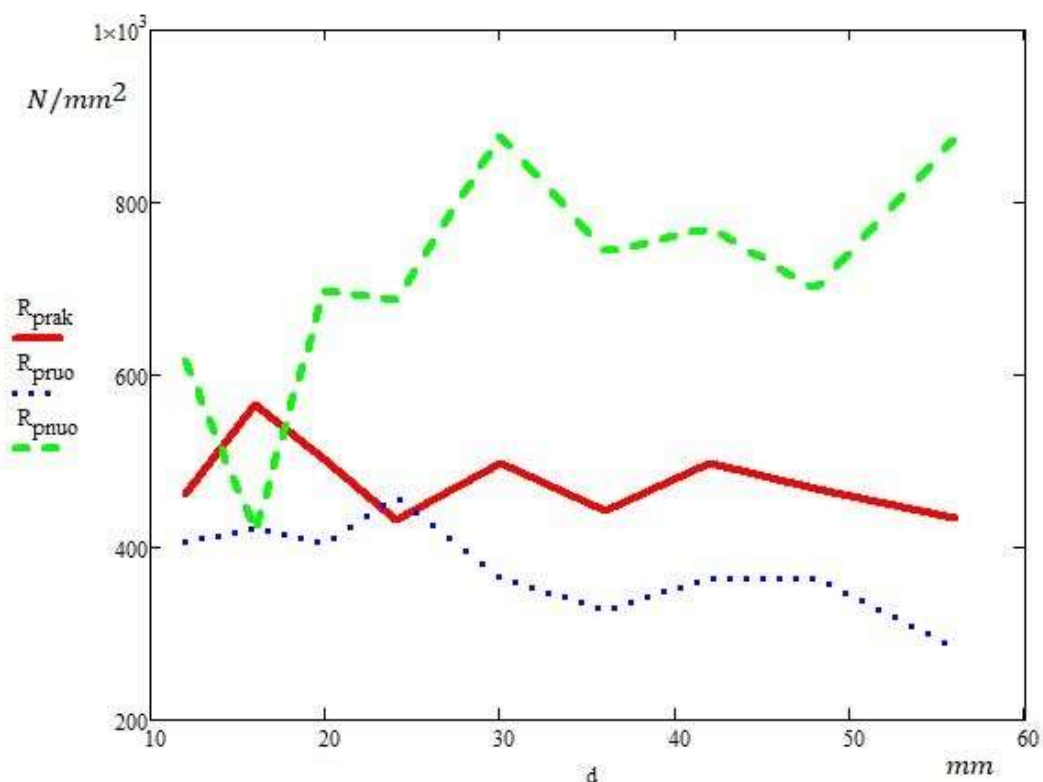
Lähtökohtaisesti ennen testituloksia oletettiin tunnettujen materiaalien perusteella, että ruuvien lujuus kasvaisi suhteessa halkaisijan kokoon nähden. Materiaalien odotettiin myös noudattavan järjestystä, halkaisijasta riippumatta, nuorrutettu teräs, rakenneteräs ja ruostumaton teräs, nuorrutetun teräksen ollessa vahvin materiaali ja ruostumattoman teräksen ollessa heikoin. Vetokokeesta saatujen tulosten perusteella oletukset pitivät paikkansa ja voidaan todeta, että ruuvien lujuus kasvaa suhteessa sen halkaisijaan. Materiaalit noudattivat myös oletettua lujuusjärjestystä, lukuun ottamatta kahta poikkeusta. Halkaisijaltaan 16 mm olevien ruuvien tuloksista voidaan huomata, että rakenneteräksestä valmistetut ruuvit olivat vahvimpia ja ohittivat reilusti nuorrutetusta teräksestä valmistetun ruuvin lujuusominaisuudet. Toinen poikkeavuus voidaan havaita 24 mm halkaisijaltaan olevista ruuveista, jossa ruostumattomasta teräksestä valmistettujen ruuvien lujuusominaisuudet ohittavat rakenneteräksestä valmistetun ruuvin ominaisuudet. Havaitut poikkeavuudet johtuvat todennäköisesti ruuvien valmistusmateriaalien pienistä laatueroista.

Taulukossa 8 on esitettyä ruuvien myötölujuus materiaalien paremmuusjärjestyksessä. Taulukossa paremmuusjärjestys on indikoitu väreillä, vihreällä merkityn ollessa vahvin materiaali ja punaisella merkityn heikoin.

Taulukko 8. Ruuvien myötölujuus paremmuusjärjestyksessä.

koko	Rakenneteräs (kN)	Ruostumatonteräs (kN)	Nuorrutettuteräs (kN)
M12	38,9	34,2	51,9
M16	88,7	66,1	66,4
M20	123	99	171
M24	152	162	243
M30	279	204	493
M36	361	268	601
M42	558	407	864
M48	689	535	1030
M56	881	577	1827

Kuvassa 14 on esitetty venymisraja $R_{p0,0048d}$ suhteessa koestettun ruuvien halkaisijan kokoon. Kuvasta voidaan huomata, että ruuvit eivät ole tasalaatuisia. Etenkin nuorrutetun teräksen arvot heittelevät paljon eri halkaisijoilla. Laatuerojen takia testituloksia ja niistä laskettuja kuormitusarvoja ei voida soveltaa suoraan käytäntöön, vaan tulokset ovat suuntaa antavia.



Kuva 14. Venymisraja $R_{p0,0048d}$ eri halkaisijoilla.

6.4 Kiristysmomentit

Kiristysmomentin laskennassa tehtiin paljon oletuksia, sillä laskennassa olevat muuttujat ovat usein vaikeasti ennustettavissa ja määriteltävissä. Vaikka ruuvien kierreprofiilien mitat, kuten kierteen nousu, kylki- ja sydänhalkaisija ovat standardisoituja, sallitaan niissä silti pieniä toleransseja. Suurin oletus on kuitenkin tehty kitkakertoimien määrittämisessä. Kitkakertoimien ennustaminen ja tunteminen on usein vaikeaa, etenkin kun käsitellään useita materiaaleja. Edellä mainituista syistä johtuen voidaankin todeta, että työssä lasketut kiristysmomenttien arvot ovat vain likimääräisiä.

6.5 Vertailu standardin mukaisiin ruuveihin

Testitulosten pohjalta testatuille ruuveille voidaan laskea standardia vastaava lujuusluokka. Testituloksista lasketut lujuusluokat on esitetty taulukossa 9. Laske- tuista lujuusluokista voidaan todeta, että nuorrutetusta teräksestä valmistetut ruuvit vastaavat parhaiten standardin mukaisista ruuveista lujuusluokan 9.8 ruuveja. Rakenneteräksiset ja ruostumattomasta teräksestä valmistetut ruuvit vastasivat taas parhaiten lujuusluokan 5.8 ruuveja. Vaikka työssä tutkittavat ruuvit eivät ole täysin vertailukelpoisia standardin mukaisten ruuvien kanssa, on taulukossa 10 esitetty koestetun ruuvin ja sitä vastaavan standardin mukaisen ruuvin myötölujuus.

Taulukko 9. Testituloksista lasketut lujuusluokat

Koko	Ruostumaton teräs	Rakenneteräs	Nuorrutettu teräs
M12	6.8	5.8	9.8
M16	6.8	6.8	6.8
M20	6.8	5.8	9.8
M24	6.8	5.6	9.8
M30	5.8	5.8	10.9
M36	5.8	5.6	9.8
M42	5.8	5.8	9.8
M48	5.8	5.8	9.8
M56	4.8	5.6	10.9

Taulukko 10. Vertailu koestetun ruuvin myötörajan vastaavan lujuusluokan teoreettiseen myötölujuuteen.

Koko	Rakenneteräs (kN)	Standardiruuvi (kN)	Ruostumaton teräs (kN)	Standardiruuvi (kN)	Nuorrutettu teräs (kN)	Standardiruuvi (kN)
M12	38,9	40,464	34,2	33,72	51,9	60,696
M16	88,7	75,36	66,1	75,36	66,4	75,36
M20	123	117,6	99	98	171	176,4
M24	152	169,44	162	105,9	243	254,16
M30	279	224,4	204	224,4	493	504,9
M36	361	326,8	268	245,1	601	588,24
M42	558	448,4	407	448,4	864	807,12
M48	689	589,2	535	589,2	1030	1060,56
M56	881	649,6	577	609	1827	1827

7 YHTEENVETO

Tämä opinnäytetyö toteutettiin ABB:n Vaasan muuntajatehtaan tuotekehitysprojektina vuonna 2017. Työssä käytettiin ulkopuolisia palveluja valtion teknologian tutkimuskeskuksesta VTT:ltä.

Työn tavoitteena oli tutkia koestamalla muuntajassa käytettäviä ei-standardinmukaisia vaarnaruuveja ja selvittää niiden mekaanisia ominaisuuksia. Tulosten pohjalta oli tarkoitus luoda mitoitusohje muuntajatehtaan suunnitteluun.

Mitoitusohjeen lisäksi työn teoriaosuudessa käsitellään muuntajan toimintaa, rakennetta, ruuviliitosten teoriaa, kierteiden erilaisia määritelmiä, materiaalien erilaisia lujuusominaisuuksia ja lujuusoppia.

Työ alkoi keväällä 2017 määrittämällä työssä tutkittavat ruuvien koot ja materiaalit eri variaatioineen. Työssä tutkittavat koekappaleet tilattiin Finvacon nimiseltä yritykseltä ja koekappaleiden koestukset suoritettiin kesällä 2017 VTT:llä.

Testitulokset ja niistä lasketut arvot ovat vain suuntaa antavia, eikä niitä tule soveltaa suoraan käytäntöön. Testeissä havaittujen poikkeamien ja epätasaisuuksien vuoksi olisi suositeltavaa, että muuntajatehtaalla jatkettaisiin ruuvien mekaanisten ominaisuuksien tutkimista ja tarkkailua.

Työn tuloksena syntyi mitoitusohje, jossa on määriteltynä koetulosten pohjalta taukkomuodossa ruuvien sallitut kuormitukset ja asennuksessa tarvittavat kiristysmomentit.

LÄHTEET

/1/ SFS-EN ISO 6892-1:2016 Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa

/2/ SFS-EN ISO 898-1 Kiinnittimien lujuusominaisuudet. Seostamattomat ja seosteräkset. Osa 1: Ruuvien ja vaarnaruuvien lujuusluokat. Vakiokierre ja taajakierre.

/3/ Hietikko. E, 2013. Palkki lujuuslaskennan perusteet. Helsinki. Books on demand.

/4/ Muuntajatekniikan perusteet, ABB sisäinen koulutusmateriaali. 2007.

/5/ Korpinen. L. Muuntajat ja sähkölaitteet. Viitattu 1.3.2017.

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf

/6/ ABB Suomessa. Viitattu 1.3.2017.

<https://fi.wikipedia.org/wiki/ABB>

/7/ Ansaharju. T, 2010. Koneenasennus ja kunnossapito. Sanoma Pro.

/8/ Hietalahti. L, 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tampere. Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.

/9/ Seppo Kivioja & Otatiето, 2009. Konetekniikka. Helsinki. Hakapaino Oy

/10/ Kierteiden perusteet. Sandvik coromant. Viitattu 10.6.2017

<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/fi-fi/c-2920-031.pdf>

LIIKTEET

LIIITE 1: Kiristysmomentin laskentaesimerkki

Kiristysmomentin laskuesimerkki M12 rakenneteräksinen ruuvi

d_2 on kierteen kylkihalkaisija = 10,829 mm

P on kierteen nousu = 1,75 mm

d_1 on kierteen sisähalkaisija = 1,819 mm

R_p on testituloksista saatu ruuvien venymisraja = 461 N/mm²

A_s on ruuvien jännitysala = 84,3 mm²

σ on sallittu vetojännitys kiristysvaiheessa [N/mm²]

F_m on suurin sallittu aksiaalivoima asennuksessa [N]

μ_G on kierteen kitkerroin = 0,14

μ_K on mutterin ja sen alustan välinen kitkerroin = 0,14

D_{km} on keskimääräinen kitkan vaikutusympyrän halkaisija [m]

M_G on kierteen aiheuttama kitkamomentti [Nm]

M_K on mutterin alla syntyvä kitkamomentti [Nm]

M_A on liitoksen kokonaiskiristysmomentti [Nm]

$$d_0 := \frac{d_2 + d_1}{2}$$

$$\sigma := \frac{0,9 \cdot R_p}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{3 \cdot d_2}{2 \cdot d_0} \left(1,155 \cdot \mu_G + \frac{P}{\pi \cdot d_2} \right) \right]^2}}$$

$$F_m := \sigma \cdot A_s$$

$$M_G := \frac{1}{2} \cdot d_2 \cdot F_m \left(1,155 \cdot \mu_G + \frac{P}{\pi \cdot d_2} \right)$$

$$D_{km} := \frac{d_w + d_h}{2}$$

$$M_K := \frac{1}{2} \cdot \mu_K \cdot D_{km} \cdot F_m$$

$$M_A := M_G + M_K$$

$$d_0 := \frac{10,829 \times 10^{-3} + 9,819 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,010324 \text{ m}$$

$$\sigma := \frac{0,9 \cdot 461}{\sqrt{1 + 3 \cdot \left[\frac{3 \cdot 10,829 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,010324} \left(1,155 \cdot 0,14 + \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 10,829 \cdot 10^{-3}} \right) \right]^2}} = 358,770489 \text{ N/mm}^2$$

$$F_m := 84,3 \cdot 358,77 = 30244,311 \text{ N}$$

$$M_G := \frac{1}{2} \cdot 10,892 \cdot 10^{-3} \cdot 30244,311 \cdot \left(1,155 \cdot 0,14 + \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 10,892 \cdot 10^{-3}} \right) = 35,057371 \times 10^0 \text{ Nm}$$

$$D_{km} := \frac{19 \cdot 10^{-3} + 13 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,016 \text{ m}$$

$$M_K := \frac{1}{2} \cdot 0,14 \cdot 0,016 \cdot 30244,311 = 33,873628 \text{ Nm}$$

$$M_A := M_G + M_K = 68,930999 \text{ Nm}$$

