

Miika Kröger

TUULIVOIMALAN TORNIN VÄSYMISTARKASTELU

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Syyskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Miika Kröger: Tuulivoimalan tornin väsymistarkastelu
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Syyskuu 2023

Tässä työssä tarkastellaan tuulen vaikutusta tuulivoimalan tornin väsymiseen. Tarkastelu suoritetaan elementtimenetelmällä, hyväksikäyttäen kaupallista Ansys-ohjelmistoa ja sen tarjoamaa Fatigue Tool -työkalua. Väsymiseen liittyvä teoria käydään läpi ja simuloinnissa käytetty tuulennopeuden arvo lasketaan hyväksikäyttäen Weibull-todennäköisyysjakaumaa, sekä Eurocode 1 -standardia. Väsymiseen ja Weibull-analyysiin liittyvien teoriaosuuksien aineistoina on käytetty aiheisiin liittyvää kirjallisuutta, sekä tieteellisiä tutkimuksia. Lisäksi Eurocode 3 -standardin mukainen S-N-käyrän muodostaminen käydään läpi.

Työn tavoitteena on muodostaa yksinkertainen simulointimalli tuulivoimalan tornin väsymistarkastelua varten. Simuloinnissa on otettu huomioon vain tuulesta torniin aiheutuva voima, joten malli on hyvin yksinkertaistettu ja siitä saisi tarkemman ottamalla huomioon esimerkiksi nasellista ja roottorin lavoista aiheutuvat voimat tornin huipulla.

Simuloinnissa käytetyn yksinkertaistetun mallin, sekä 15 m/s tuulen nopeuden arvolla tornissa ei esiintynyt väsymistä.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. VÄSYMISEN TEORIAA.....	2
2.1Väsymisen vaiheet.....	3
2.2Väsymismallit.....	3
2.3Väsyminen tuulivoimaloissa	5
3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO	6
3.1Tuulikuorman laskeminen.....	6
3.2Voimalan torni.....	7
3.3Numeerinen analyysi	8
3.4S-N-käyrä.....	9
4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	12
4.1Tuulen ominaisuuksien laskenta	12
4.2Simulointi	14
5. YHTEENVETO	16
LÄHTEET	17

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	rakenteen tuulelle altis pinta-ala
A_c	rakenteen kokonaispinta-ala
A_{ref}	rakenteen pinta-ala
C_0	tuulisuus kerroin
C_{dir}	tuulen suunnasta riippuva kerroin
C_f	rakenteen voimakerroin
$C_{f,0}$	voimakerroin pinnankarheuden ja halkaisijan osamäärän, sekä Reynoldsin luvun suhteen
C_r	maaston epätasaisuudesta riippuva kerroin
$C_s C_d$	rakennekerroin
C_{season}	vuodenajasta riippuva kerroin
D	halkaisija
F_w	tuulen vaikuttava voima rakenteen pintaan
l	sylinterimäisen kappaleen korkeus
l_v	tuulen turbulenssin intensiteetti
k	pinnankarheus
k_l	turbulenssikerroin
k_r	maastokerroin
N_R	suunniteltu käyttöikä
p_U	tuulennopeuden todennäköisyys
q_p	tuulen aiheuttaman paine rakenteen pintaan
Re	Reynoldsin luku
U	tuulennopeus
U_{ka}	tuulennopeuden keskiarvo
v_b	tuulennopeuden perusarvo
$v_{b,0}$	tuulen nopeuden 10 minuutin nopeuskeskiarvo
v_m	keskimääräinen tuulennopeus
Z	korkeus
Z_0	maaston epätasaisuuden pituus
Z_{max}	maksimikorkeus
Z_{min}	minimikorkeus
Z_x	maastoluokasta riippuva kerroin
α	muotokerroin
β	määräkerroin
$\Delta\sigma_C$	normaalijännityksen väsymislujuus
$\Delta\sigma_D$	vakioamplitudisen normaalijännityksen väsymisraja
$\Delta\sigma_R$	nimellinen normaalijännitys
$\Delta\sigma_{TC}$	leikkausjännityksen väsymislujuus
$\Delta\sigma_{TL}$	vakioamplitudisen leikkausjännityksen väsymisraja
$\Delta\sigma_{TR}$	nimellinen leikkausjännitys
ρ	ilman tiheys
Ψ_λ	korjauskerroin tuulelle alttiin pinta-alan ja kokonaispinta-alan osamäärän, sekä sylinterimäisen kappaleen korkeuden ja halkaisijan osamäärän suhteen

1. JOHDANTO

Ilmastonlämpenemisen seurauksena on syntynyt kasvava tarve fossiilisten energialähteiden korvaajalle. Ympäristöystävällisempien ja uusiutuvien energialähteiden, kuten biomassan, aurinko- ja tuulienergian, sekä maalämmön käyttö ja kehitys vähentää energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä ja hidastaa ilmastonlämpenemistä huomattavasti, jonka takia kiinnostus näihin energiamuotoihin on huomattavassa kasvussa. Maailmanlaajuisesti tuulivoiman osuus uusiutuvien energialähteiden energiantuotannossa oli vuonna 2017 52% ja tuulivoiman asennetun kapasiteetin määrä on ollut eksponentiaalisessa kasvussa koko 2000-luvun alun, nousseen 24 GW:sta 591 GW:iin vuosien 2001 ja 2018 välisenä aikana. (Sadorsky, 2020, s. 4) Tuulivoimaa voidaan siis pitää yhtenä potentiaalisena uusiutuvien energialähteiden kehityskohteena.

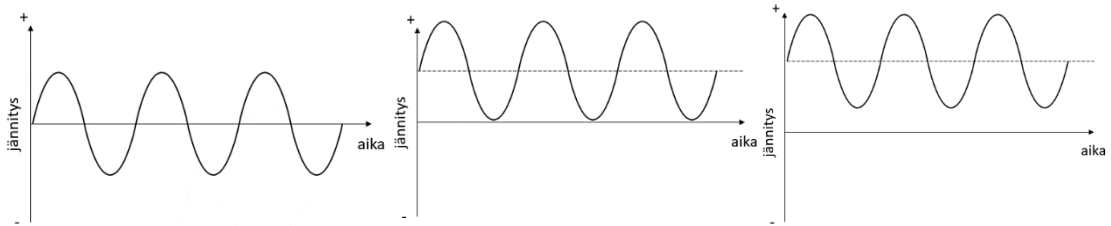
Väsymisen tarkastelu ja tutkiminen alkoi 1800-luvulla, kun veturien ja junavaunujen pyörien akselit alkoivat murtumaan ennen aikojaan. Tuohon aikaan ei osattu vielä ottaa huomioon akseleihin vaikuttavien voimien vaihtelevuutta ajan suhteen, vaan suunnittelussa käytetyt voimat oletettiin olevan staattisia ja suuruudeltaan vakioita. (Norton, 2011, s. 331) Nykyään väsymisen tarkastelu on keskeinen osa rakenne- ja koneensuunnittelua. Väsymistarkastelulla pyritään ennustamaan ja mitoittamaan suunnitteluvaiheessa rakenteiden kestävyys ja näin ollen ehkäisemään ennenaikainen pettäminen ja pahimmissa tapauksissa katastrofaaliset onnettomuudet.

Tuulienergiaa tuotetaan suurilla tuulivoimaloilla, joista yleisimpiä ovat vaaka-akseliset tuuliturbiinit, joiden vaakasuuntaisen akselin päässä pyörivä roottori sijaitsee pystysuoran tornin yläpäässä. Vaaka-akseliset tuuliturbiinit muodostuvat karkeasti ottaen tornista, nasellista, sekä roottorista. Näistä tuulikuorman aiheuttamalle väsymiselle alttiita komponentteja ovat varsinkin roottorin lavat, sekä voimalan torni. (Sutherland, 1999, DNV/Risø, 2002, s. 2)

Tässä työssä tarkastellaan tuulikuorman vaikutusta tuulivoimalan tornin väsymisessä käyttäen avuksi numeerista simulointia Ansys-ohjelmistolla. Työn tarkoituksena on väsymismallien tarkastelu, tuulikuorman laskenta standardin mukaan, sekä laskentaesimerkki näiden yhteisestä käytöstä. Työn alussa tarkastellaan väsymisen teoriaa, jonka jälkeen käydään läpi tuulikuorman laskemiseen tarvittavat yhtälöt Eurokoodi 1 osien 1-4 mukaan, sekä S-N-käyrän muodostaminen Eurokoodi 3 osien 1-9 mukaan. Tämän jälkeen lasketaan tuulikuormat ja saatuja kuormia käytetään hyväksi numeerisessa simuloinnissa. Lopuksi saatuja tuloksia verrataan S-N-käyrän kanssa.

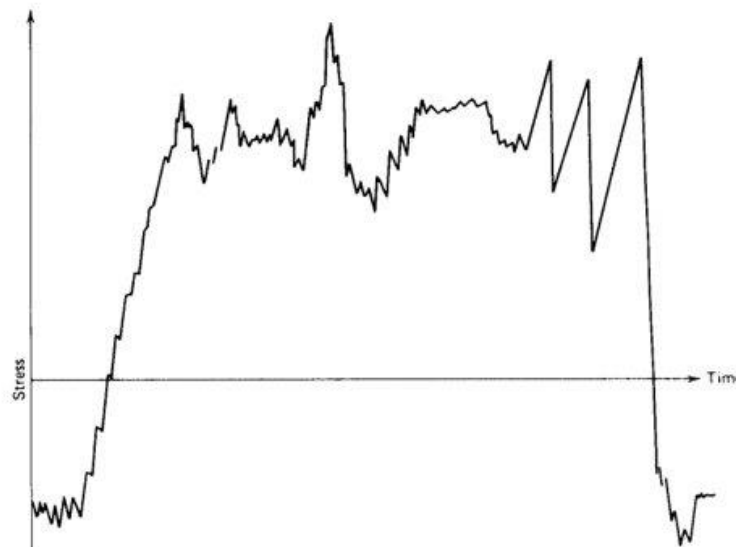
2. VÄSYMISEN TEORIAA

Rakenteisiin vaikuttava kuormitus voi olla pysyvää, eli staattista, tai muuttuvaa, eli dynaamista. Useimmat rakenteissa tapahtuvat murtumiset aiheutuvat pitkäaikaisesta dynaamisesta rasituksesta, jolloin rakenteen materiaali menettää useamman rasitusyökin jälkeen kuormankantokykynsä ja murtuu. Kuvassa 1 on esitetty kolme mahdollista tapaa, joilla kuormituksen aiheuttama jännitys voi vaihdella rakenteessa, kun jännityksen amplitudi on vakio.



Kuva 1. Rakenteessa vallitsevan jännityksen vaihtelu ajan funktiona. (mukaillen Norton, 2011, s. 332)

Kuvassa 1, vasemmalla olevassa kuvaajassa, rakenteessa vallitseva jännitys vaihtelee positiivisen ja negatiivisen maksimin välillä, eli jännityksen suunta muuttuu jokaisella syklillä. Keskimmäisessä kuvaajassa kuormitus käy joka syklillä levossa, jolloin kuormitus poistuu hetkellisesti. Oikealla olevassa kuvaajassa rakennetta rasitetaan jatkuvasti vaihtelevalla kuormalla. (Norton, 2011, s. 334-335) Kun jännitys ei olekaan enää vakio, kuten kuvan 1 tapauksissa, voi kaikkia kolmea tapausta tapahtua satunnaisesti vuorotellen ja tapaus on tällöin muuttuva-amplitudinen. Kun amplitudin muutoksen lisäksi myös kuormitusyökin taajuus on muuttuva, on kyseessä täysin satunnainen kuormitustilanne, jonka ennustaminen ja mallintaminen on monimutkaista ja hankalaa. (Kutz, 1986, s. 270-273) Kuvassa 2 on esitetty erään lentokoneen lentotehtävän aikana mitattu todenmukainen jännitys-aika-kuvaaja.



Kuva 2. Todellista kuormitustilannetta vastaava jännitys-aika-kuvaaja. (Kutz, 1986, s. 273)

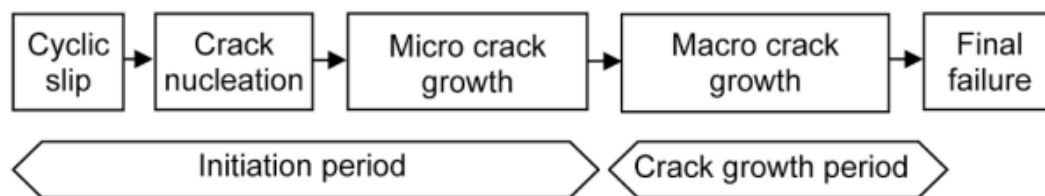
Koneenosissa väsymisestä aiheutuneet murtumat johtuvat yleensä toistuvista, vaihtelevista ja äkkinäisistä kuormituksen aiheuttamista jännityksistä, minkä takia staattisen kuormituksen tapauksia tarkastellaan vain harvoin. Jännityskeskittymät muodostuvat tyypillisesti osissa olevien epäjatkuvuuskohtien, kuten kulmien, reikien ja hitsaussaumojen yhteyteen. (Kutz, 1986, s. 270-273) Väsymistapaukset voidaan jakaa myötöväsymiseen ja jännitysväsymiseen (low-cycle ja

high-cycle fatigue). Myötöväsymisessä jokaisella kuormitussyklillä tapahtuu makroskooppista plastista muodonmuutosta/venymää ja sitä esiintyy korkeiden kuormitusten ja vähäisten syklien aiheuttamien murtumien tilanteissa. Jännitysväsymistä esiintyy päinvastaisesti pienten kuormitusten tilanteissa, kun murtumiseen vaadittavien syklien määrä on korkea. Tällöin makroskooppista plastista muodonmuutosta ei esiinny. Myötöväsymisen katsotaan tapahtuvan syklien määrän ollessa välillä 1 ja $10^2 - 10^4$ ja jännitysväsymisen tästä korkeammilla sykleillä. (Norton, 2011, s. 337)

2.1 Väsymisen vaiheet

Rakenteen murtumiseen johtava väsyminen alkaa rakenteessa olevasta säröstä. Särö on voinut saada alkunsa pitkäaikaisen ja vaihtelevan kuormituksen lisäksi myös jo rakenteen, tai rakenteessa käytetyn materiaalin valmistusvaiheessa, esimerkiksi hitsauksen vaikutuksesta, tai rakenteeseen kohdistuneesta iskusta. (Schijve, 2009)

Väsyminen voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen: alkusärön syntymisvaiheeseen, särön kasvuvaiheeseen, sekä rakenteen lopulliseen pettämiseen. Kuvassa 3 on esitetty väsymisen vaiheiden jaottelu.



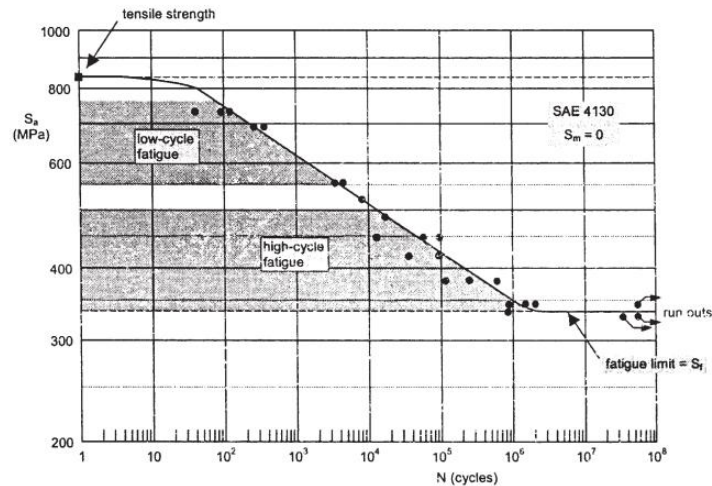
Kuva 3. Väsymisen vaiheet. (Schijve, 2009)

Kuten kuvasta 3 nähdään, voidaan särön syntymisvaihe jakaa tarkemmin kolmeen alivaiheeseen. Särön syntymisvaiheessa materiaaliin kohdistuu muuttuva rasitus, jonka vaikutuksesta materiaalissa alkaa tapahtumaan paikallisesti plastista muodonmuutosta. Tällöin materiaalissa syntyy mikroskooppisen pieniä säröjä, joiden kärjissä esiintyy ympäröivää materiaalia korkeampia jännityskeskittymiä. Särön kasvuvaiheessa vaihteleva kuormitus liikuttaa materiaalia särön ympärillä eri suuntiin, jolloin kärkeen syntyy vaihtelevan suuruisia jännityspiikkejä. Tällöin jännitys vaihtelee myötölujuuden molemmiin puoliin ja särö hiljalleen kasvaa. (Norton, 2011, Schijve, 2009)

2.2 Väsymismallit

Väsymisen mallintamiseen voidaan käyttää kolmea eri periaatemenetelmää: jännitysmenetelmä, venymämenetelmä, sekä murtumismekanismimenetelmä.

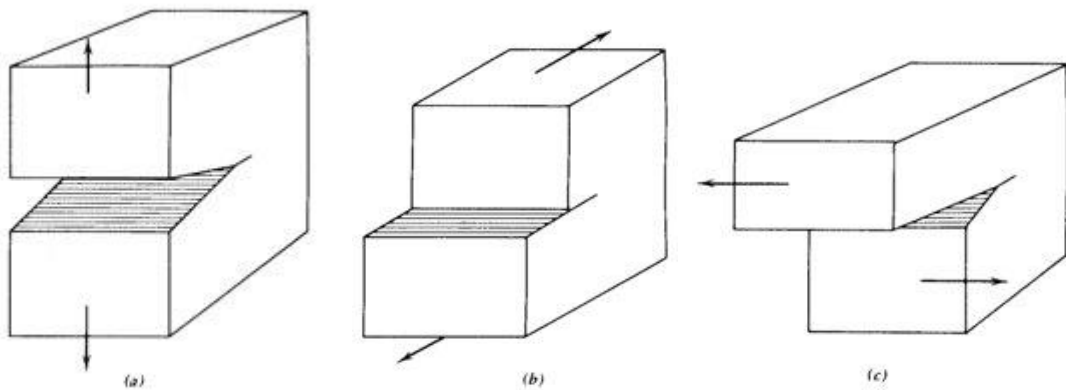
Jännitysmenetelmä ilmaisee tietyllä vakiojännityksellä materiaalin murtumiseen vaadittavan rasitusyhtymäärän. Suunnittelussa malli sopii tilanteisiin, joissa kuormitussyklien määrä on korkea, vähintään useita tuhansia syklejä, sekä kohteeseen vaikuttavat voimat ovat hyvin ennustettavissa. Lisäksi menetelmällä pyritään suunnittelemaan rakenne niin, että säröjen jännityspiikit pysyvät niin matalina, että särö ei pääse etenemään, eikä rakenteessa tapahdu plastista muodonmuutosta. Materiaaleille on kokeellisesti määritetty S-N-käyriä, joiden avulla voidaan ennustaa murtumiseen vaadittava kuormitussyhtymäärä tietyllä vakiojännityksellä, tai päinvastoin vaadittuun kuormitussyhtymäärään johtava maksimijännitys. S-N-käyrän pystyakselilla on jännitys ja vaakakselilla murtumiseen vaadittava syhtymäärä. Kuvassa 4 on esitetty rasitustestin tuloksena saatu S-N-käyrä SAE 4130 seosteräkselle. (Norton, 2011, s. 339, Schijve, 2003)



Kuva 4. S-N-käyrä. (Schijve, 2003)

Venymämenetelmä sopii tilanteisiin, joissa materiaali alkaa myötää, eli kun materiaalissa tapahtuu plastista muodonmuutosta. Lisäksi menetelmää käytetään tilanteissa, joissa kohteen materiaaliin kohdistuvat jännitykset ovat suuria ja jännityssyklimäärä matala. Menetelmä sopii myös tilanteisiin, joissa esiintyy erityyppisiä rasituksia ja virumisilmiötä. (Norton, 2011, s. 339) Myötöväsymisen (low-cycle fatigue) alue on merkitty kuvassa 4 ylempänä tummennettuna alueena ja jännitysväsymisen (high-cycle fatigue) alue alempana tummennettuna alueena.

Kun särön ympäröimän myötävän alueen koko on kappaleen kokoon verrattuna huomattavasti pienempi, voidaan olettaa särön käyttäytyvän lineaarisesti elastisesti. Tällöin särö voi kasvaa kolmella eri tavalla. Ensimmäisessä tapauksessa jännitys pyrkii vetämään säröä auki. Toisessa tapauksessa jännitys pyrkii leikkaamaan säröä tasossa säröön nähden samansuuntaisesti. Kolmannessa tapauksessa jännityksen aiheuttama leikkaus vaikuttaa särön tasossa sivuttain. Kuvassa 5 on esitetty särön kasvutavat, jossa ensimmäistä tapausta kuvaa kuva (a), toista tapausta (b) ja kolmatta tapausta (c).



Kuva 5. Särön kasvutavat. (Kutz, 1986, s. 261)

Materiaalin murtumismekanismimenetelmä soveltuu parhaiten särön kasvuvaiheen ja materiaalin lopulliseen murtumiseen vaaditun ajan ennustamiseen. (Kutz, 1986, s. 260-261, Norton, 2011, s. 339)

2.3 Väsyminen tuulivoimaloissa

Tuulivoimaloiden yleistyessä niiden rakenteellinen mitoitus oli yksinkertaista ja vaikuttavat kuormat ajateltiin staattisiksi. Tuulivoimalan roottorin lavat ovat kriittinen osa voimalaa ja niiden tulee olla mahdollisimman kevyitä, mutta samalla kestää suuri määrä rasisussyklejä. (Sutherland, 1999) Roottorin lavat ovat suuria, useamman kymmenen metrin pituisia rakenteita, joiden valmistaminen on haastavaa ja kallista. Tämän takia lapoja mitoittaessa käytetään tietokoneavusteisia elementtimenetelmää soveltavia ohjelmistoja ennen varsinaisen prototyypin valmistamista. Kong et al. artikkelissaan (Kong et al. 2004) mitoittavat tuulivoimalan roottorin lavan ja suorittavat sille lujuus- ja väsymistarkastelun käyttämällä elementtimenetelmää, sekä Palmgren-Miner-menetelmää. Todettuaan lavan rakenteen tietokonemallin kestäväksi, siitä valmistettiin fyysinen prototyyppi, jolle tehtiin staattisia kuormituskokeita rakenteen kestävyuden varmistamiseksi. Lopuksi fyysisten testien tuloksia verrattiin teoreettisiin tuloksiin, jotka vastasivat hyvin toisiaan.

Energiantuotto tuulivoimalassa perustuu roottorin mekaanisen energian muuttamiseen sähköenergiaksi generaattorin avulla. Roottori- ja generaattorisysteemi vaatii toimiakseen laakereita pyörivän liikkeen akseleille aiheuttavan kitkan minimoinniksi, sekä vaihteistoja roottorin pyörimisnopeuden muuttamiseen generaattorille sopivammaksi. Tuulen puuskaisuuden takia erityisesti laakerit ja vaihteistojen hammasrataspyörät ovat alttiita suurille ja äkkinäisille rasituksille, rasisuspiikeille, sekä liukumisille, jolloin komponenteissa alkaa ajan myötä tapahtua naarmuuntumista, kulumista ja halkeilua. Greco et.al. tutkivat artikkelissaan (Greco et al. 2013) tuulivoimalan vaihdelaatikosta ja roottorin akselilta irrotetuista laakereista esiintyviä vaurioita mikroskoopilla kuvaten. Tutkimuksissa laakerien kehien pinnoilta löytyi painaumuksia ja aksiaalisia säröjä.

3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Tässä luvussa on esitetty yhtälöt tuulikuorman laskemiselle, numeerisen analyysin vaiheet, sekä S-N-käyrän muodostaminen.

3.1 Tuulikuorman laskeminen

Tämän osion laskentakaavat (1-8) ja -teoria pohjautuvat Eurokoodi 1:n (Eurocode 1, 2005) osien 1-4 standardeihin. Tuulenoisuuden perusarvo v_b voidaan laskea hyväksikäyttämällä 10 minuutin nopeuskeskiarvoa, $v_{b,0}$, 10 metrin korkeudella maanpinnasta. Perusarvo voidaan laskea kaavalla

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0}, \quad (1)$$

jossa c_{dir} on tuulensuunnasta riippuva ja c_{season} vuodenaajasta riippuva kerroin. Nopeuskeskiarvo voidaan selvittää esimerkiksi suorittamalla tuulenoisuuden mittaus kohteessa, johon tuulivoimalaa suunnitellaan. Eurokoodin mukaan tuulensuunta- ja vuodenaikakerroin suositellaan asetettavaksi arvoon 1, jolloin perusarvo on siis suoraan 10 minuutin nopeuskeskiarvo. Keskimääräinen tuulenoisuus v_m tietyllä korkeudella z voidaan laskea kaavalla

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b, \quad (2)$$

jossa c_r on maaston epätasaisuudesta riippuva kerroin. Kerrointa c_o käytetään, kun kohteen tuulisuus kasvaa vähintään 5% maaston korkeuserojen, esimerkiksi mäkien, johdosta, tai kun korkeuden kasvu on yli 3°. Maaston epätasaisuuskerroin tietyllä korkeudella z voidaan laskea kaavalla

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ kun } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}), \text{ kun } z \leq z_{min}. \quad (3)$$

Kaavassa (3) z_{min} on minimikorkeus, joka voidaan lukea maastoluokan mukaan taulukosta 1, z_{max} on maksimikorkeus, jonka arvona käytetään 200 m. Muuttuja z_0 on epätasaisuuden pituus ja k_r epätasaisuuskertoimesta riippuva maastokerroin, joka voidaan laskea kaavalla

$$k_r = 0.19 * \left(\frac{z_0}{z_x}\right)^{0.07}, \quad (4)$$

jossa z_x on maastoluokasta riippuva kerroin. Maastoluokat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Maastoluokat ja niistä riippuvat parametrit. (Eurocode 1, 2005)

Terrain category		z_0 , m	z_{min} , m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0.003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0.01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights	0.05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0.3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1.0	10

Luonnossa esiintyvän tuulen nopeusprofiili on käytännössä aina turbulентtinen. Turbulenssin intensiteetti I_v tietyllä korkeudella z voidaan laskea kaavalla

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_o(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}, \text{ kun } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}), \text{ kun } z \leq z_{min}, \quad (5)$$

jossa k_l on turbulenssikerroin, jolle Eurokoodi suosittaa arvoa 1. Tuulen rakenteen pintaan aiheuttaman paineen maksimi-arvo q_p korkeudella z voidaan laskea kaavalla

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z), \quad (6)$$

jossa ρ on ilman tiheys.

Paineen avulla voidaan laskea rakenteen pintaan vaikuttava voima kaavalla

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z) * A_{ref}, \quad (7)$$

jossa $c_s c_d$ on rakennekerroin, c_f on voimakerroin rakenteelle ja A_{ref} on rakenteen pinta-ala. Voimakerroin voidaan laskea kaavalla

$$c_f = c_{f,0} * \Psi_\lambda. \quad (8)$$

Voimakerroin $c_{f,0}$ voidaan lukea Eurokoodin kuvaajasta 7.28 kun tiedetään materiaalin pinnankarheuden k ja halkaisijan D suhde k/D , sekä Reynoldsin numero Re . Vakio Ψ_λ voidaan puolestaan lukea Eurokoodin kuvaajasta 7.36 kun tiedetään rakenteen tuulelle alttiin pinta-alan A ja kokonaispinta-alan A_c suhde A/A_c , sekä sylinterimäisen kappaleen korkeuden l ja halkaisijan D suhde l/D .

Tuulennopeuden keskimääräinen arvo voidaan laskea kaavalla (2), selvittää kokeellisesti mittauksilla, tai se voidaan lukea suoraan tietokannasta, jos sellainen on suunniteltavan tuulivoimalan kohteelle laadittu. Vuotuisen keskimääräisen tuulennopeuden avulla voidaan mallintaa matemaattisesti vuoden aikana esiintyvien tuulennopeuksien esiintymistodennäköisyydet käyttämällä Weibull-todennäköisyysjakaumaa p_U

$$p_U = \left[\frac{\alpha}{\beta}\right] * \left[\frac{U}{\beta}\right]^{\alpha-1} * \exp\left[-\left(\frac{U}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad (9)$$

jossa U on tarkasteltava parametri, tässä tapauksessa tuulennopeus, sekä α muotokerroin ja β määräkerroin. (Sutherland, 1999) Muotokerroimen arvoksi voidaan mannertuulien mallinnustapauksissa asettaa 2. Määräkerroin voidaan laskea kaavalla

$$\beta = \frac{U_{ka}}{\Gamma\left[1 + \frac{1}{\alpha}\right]}, \quad (10)$$

jossa U_{ka} on tarkasteltavan parametrin keskiarvo ja Γ yleinen gammafunktio. Weibull-jakauman avulla saadaan suunnittelun avuksi tietoon todennäköisin vuotuinen tuulennopeus, sekä huomioon otettava tuulennopeuden teoreettinen maksimi-arvo.

3.2 Voimalan torni

Tuulivoimalan tornin mallina käytettiin Uys et al. esitettyä tornimallia. Tornin on alhaalta ylöspäin kapeneva ja pystysuunnassa pyörähdysymmetrinen torni, jonka dimensiot pohjalla ja huipulla on esitetty taulukossa 2. Tornin koostuu kolmesta pulttiliitoksilla yhteen liitetystä osasta, joista jokainen koostuu viidestä yhteen hitsatusta osasta. Lisäksi torni on pultattu pohjasta kiinni petiin. Tornissa on siis pulttiliitoksia neljässä kohdassa, sekä 12 hitsausliitosta. Laskennassa kuitenkin yksinkertaistettiin pois tornin geometriasta hitsaus- ja pulttiliitokset, sekä tornin pohja.

Taulukko 2. Tuulivoimalan tornin dimensiot. (Uys et al., 2007)

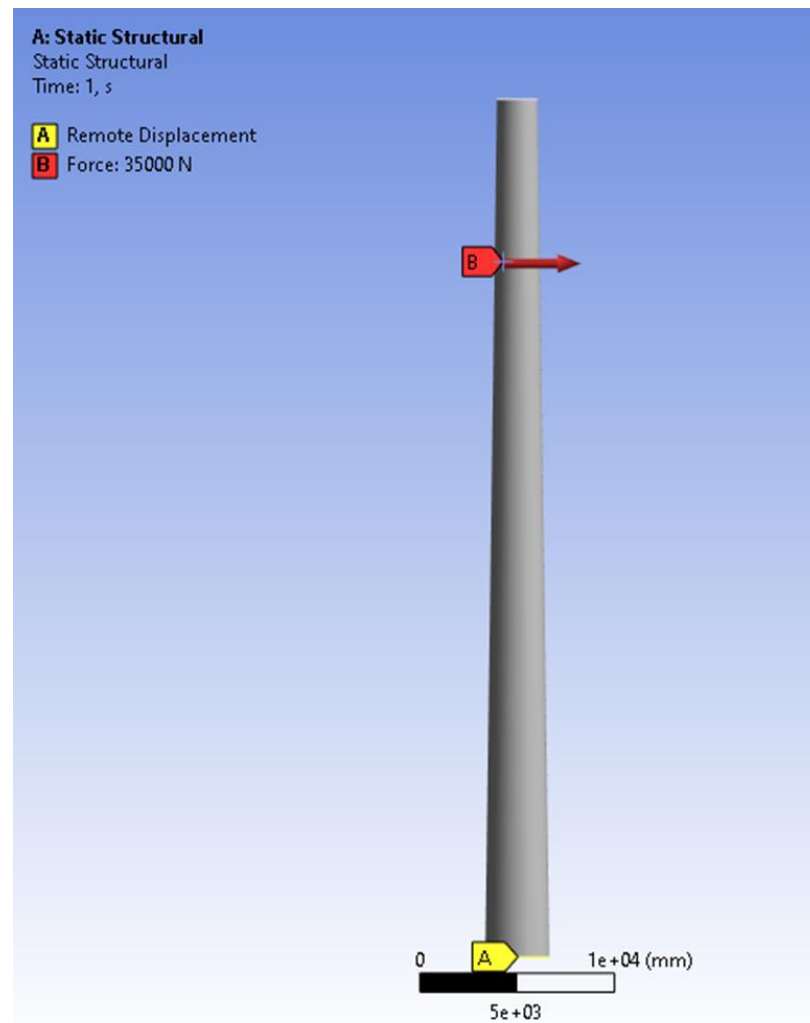
korkeus (m)	44.075
halkaisija pohjalla (m)	3.3
halkaisija huipulla (m)	2.1
seinämän paksuus (m)	0.018

Laskennassa jätettiin huomioimatta myös voimalan nasellin ja roottorin paino, sekä roottorin pyörimisestä aiheutuvat voimat. Laskennassa otettiin siis huomioon pelkästään tuulen torniin aiheuttama voima.

Voimala sijaitsee maalla, eli se on ns. onshore-voimala ja sen maantieteelliseksi sijainniksi valikoitui Haapajärvi.

3.3 Numeerinen analyysi

Numeerinen simulointi suoritettiin Ansys Workbench -ohjelmiston Mechanical-sovelluksella. Tornista tehtiin ensin 3D-kuorimalli SpaceClaim-ohjelmistolla, jonka jälkeen se siirrettiin Workbenchiin. Tornin seinämän paksuudeksi asetettiin 18 mm ja materiaaliksi rakenneteräs, jolle tiheys on 7850 kg/m^3 , kimmokerroin 200 GPa ja Poissonin vakio 0.30. Laskentaverkon elementtikooksi asetettiin 300 mm ja tornin juuresta noin 10 metrin korkeudelle 100 mm. Elementtityyppinä käytettiin kvadraattisia nelikulmioelementtejä. Tornin pohja asetettiin kiinteästi tuetuksi ja vakiosuuruinen voima, joka lasketaan luvussa 4.1, asetettiin vaikuttamaan tornin pintaan vaaka-akselin suuntaisesti. Laskennan reunaehdot on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Laskennan reunaehdot.

Laskennan materiaalimallina käytettiin lineaarisesti isotrooppista mallia ja väsymismallina Goodmanin mallia.

3.4 S-N-käyrä

Tämän osion laskentakaavat (11-17) ja -teoria pohjautuvat Eurokoodi 3:n (Eurocode 3, 2005) osien 1-9 standardeihin. Tarkasteltavalle tilanteelle voidaan valita väsymislukka Eurokoodi 3:n taulukoiden 8.1 - 8.10 mukaisesti. Väsymislukka vastaa väsymislajuuden arvoa $\Delta\sigma_C$ normaalijännitykselle ja $\Delta\tau_C$ leikkausjännitykselle jännityssykkien ollessa kaksi miljoonaa sykliä. Väsymislajuus vakioamplitudisille, nimellisille normaalijännityksen $\Delta\sigma_R$ ja leikkausjännityksen $\Delta\tau_R$ vaihteluväleille voidaan laskea kaavoilla

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m * 2 * 10^6, \quad (11)$$

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m * 2 * 10^6, \quad (12)$$

joissa N_R on suunniteltu käyttöikä ilmaistuna vakioamplitudista jännitysvaihteluväliä vastaavana syklien lukumääränä. Kaavassa (11) $m = 3$, kun $N \leq 5 * 10^6$ ja kaavassa (12) $m = 5$, kun $N \leq 5 * 10^8$. Väsymisrajat vakioamplitudiselle normaalijännitykselle $\Delta\sigma_D$ ja leikkausjännitykselle $\Delta\tau_L$ voidaan laskea kaavoilla

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} * \Delta\sigma_C = 0.737 * \Delta\sigma_C, \quad (13)$$

$$\Delta\tau_L = \left(\frac{2}{100}\right)^{1/5} * \Delta\tau_C = 0.457 * \Delta\tau_C. \quad (14)$$

Kun jännitysvaihteluvälit ovat vakioamplitudisen väsymisrajan ylä- ja alapuolella, voidaan väsymislajuus laskea kaavan (11) mukaan, sekä kaavalla

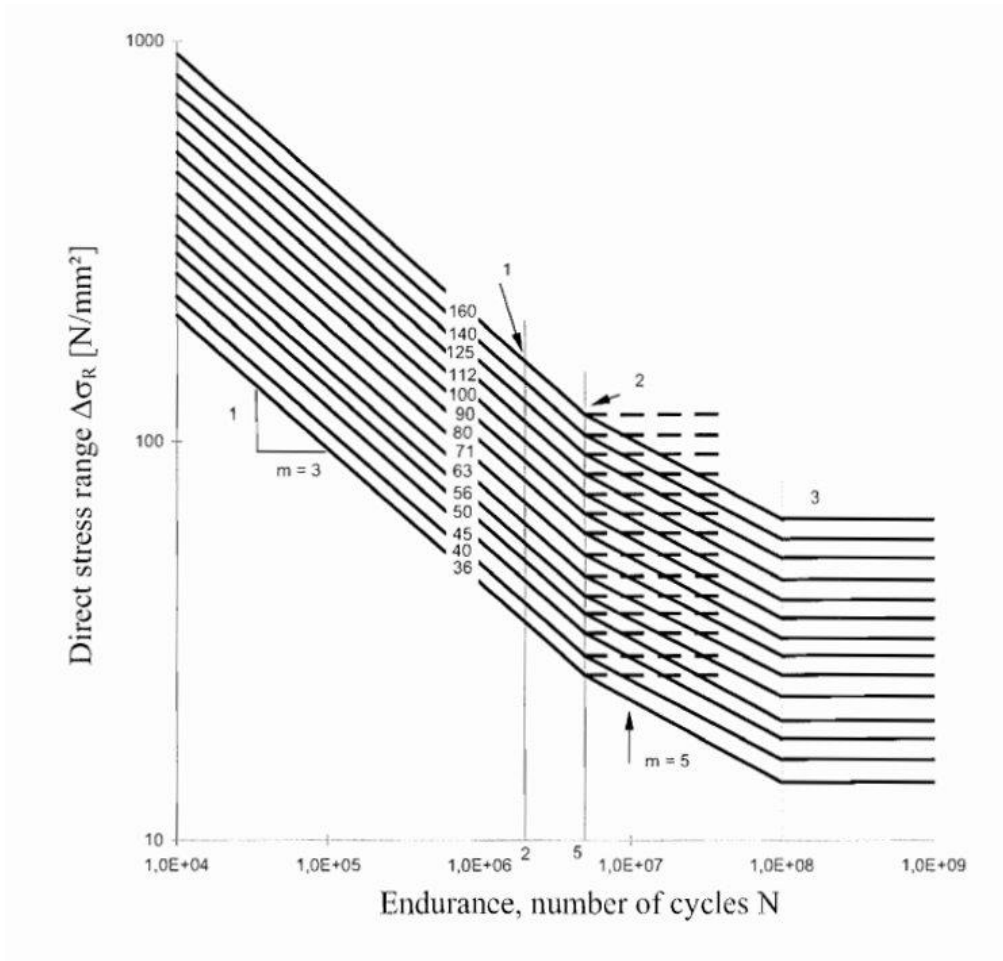
$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m * 5 * 10^6, \quad (15)$$

jossa $m = 5$, kun $5 * 10^6 \leq N \leq 10^8$.

Alempi väsymisraja normaalijännityksen vaihteluvälille voidaan laskea kaavalla

$$\Delta\sigma_L \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} * \Delta\sigma_D = 0.549 * \Delta\sigma_D. \quad (16)$$

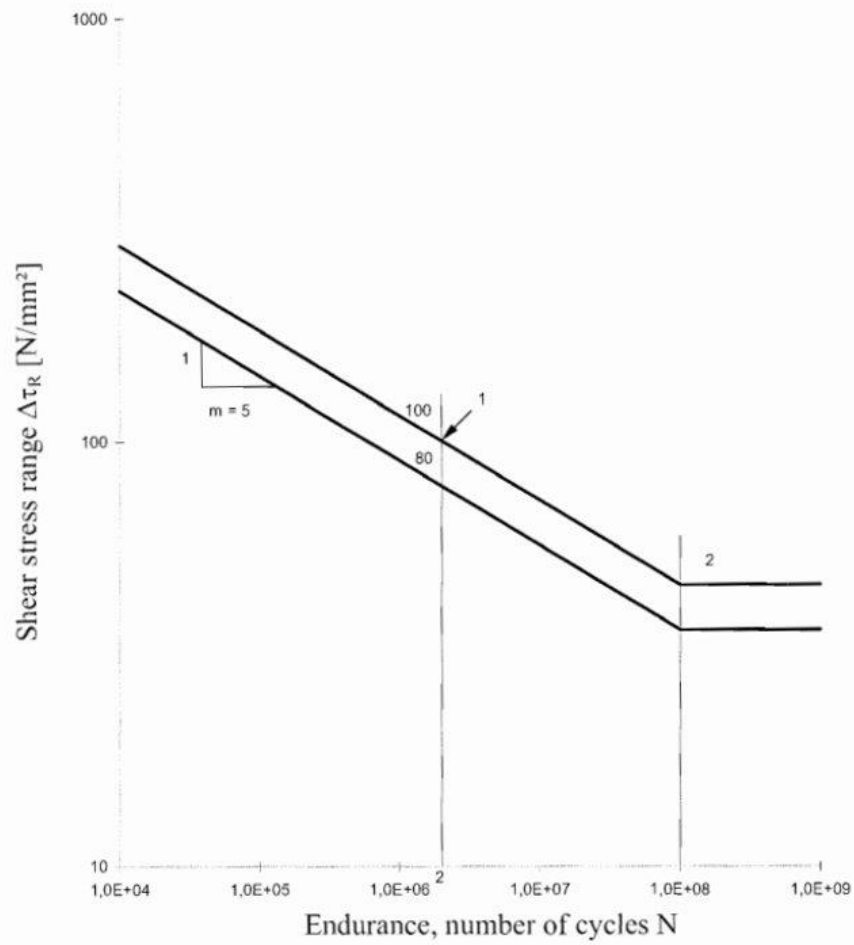
Kuvassa 7 on esitetty S-N-käyrä normaalijännityksen $\Delta\sigma_R$ vaihteluväleille.



Kuva 7. Normaalijännityksen S-N-käyrä. (Eurocode 3, 2005)

Kuvassa 7 nuoli 1 osoittaa väsymisloukkakäyriä $\Delta\sigma_C = 36 - 160$ N/mm², sekä $2 \cdot 10^6$ syklin rajaa. Nuoli 2 osoittaa vakioamplitudisen väsymisrajan $\Delta\sigma_D$ syklijäajan $5 \cdot 10^6$ sykliä ja 3 alemman väsymisrajan $\Delta\sigma_D$ syklijäajan 10^8 sykliä.

Kuvassa 8 on esitetty S-N-käyrä leikkausjännityksen $\Delta\tau_R$ vaihteluväleille.



Kuva 8. Leikkausjännityksen S-N-käyrä. (Eurocode 3, 2005)

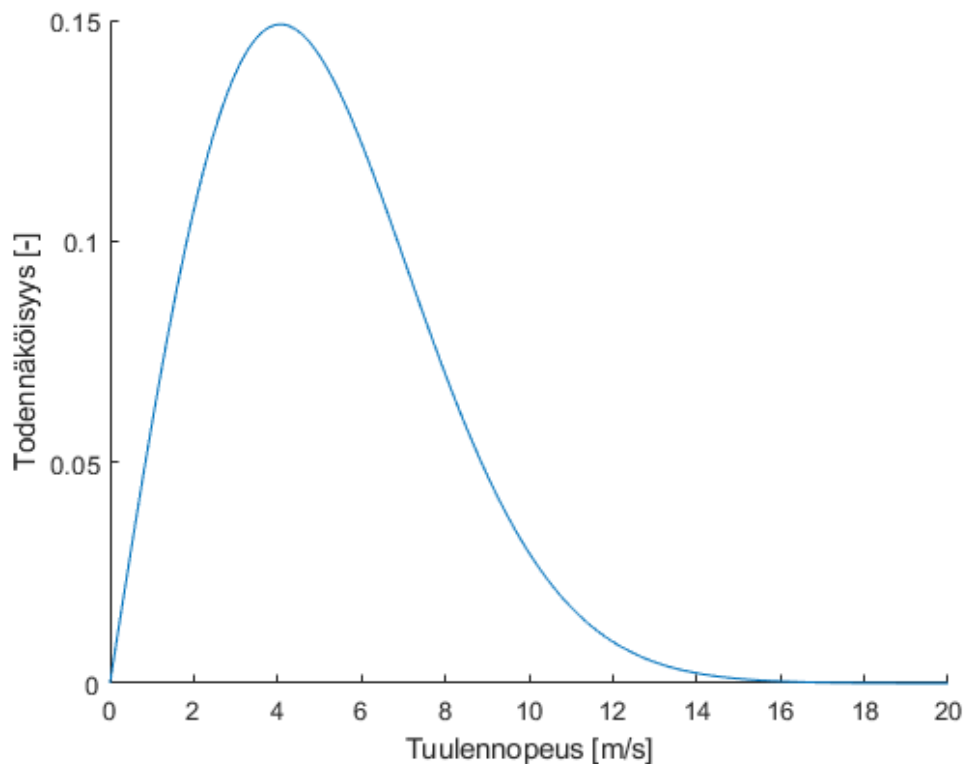
Kuvassa 8 nuoli 1 osoittaa väsymisloukan $\Delta\tau_C = 80 - 100$ N/mm², sekä $2 \cdot 10^6$ syklin rajaa ja kohta 2 väsymisrajan $\Delta\tau_L$ sykliä 10^8 sykliä.

4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä osiossa on selostettu laskennan tulokset ja niiden tarkastelu. Ensinnä esitetty tuulen nopeuden, paineen ja voiman laskenta, joka suoritettiin Matlab-ohjelmistolla. Tämän jälkeen siirrytään numeerisen laskennan tuloksiin.

4.1 Tuulen ominaisuuksien laskenta

Haapajärven vuotuinen keskituulennopeus 50 metrin korkeudella on Ilmatieteenlaitoksen Suomen tuuliatlas-karttaliittymän mukaan 5.1 m/s (Ilmatieteenlaitos, 2022). Kyseisellä keskituulennopeudella, muotokertoimen arvolla $\alpha = 2$ ja kaavalla (9) laskettu Weibull-kuvaaja on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Weibull-kuvaaja tuulennopeudella 5.1 m/s ja muotokertoimella 2.

Weibull-analyysillä saatu alueen todennäköisin tuulennopeus on 4 m/s, jonka todennäköisyys on 0.149. Suurin huomioitu tuulennopeus on 15 m/s, jonka todennäköisyys on 0.001.

Paineen laskentaan tarvittava turbulenssin intensiteetti laskettiin kaavalla (5). Maastoluokkana käytettiin luokkaa II, jolloin $z_0 = 0.05$ m ja $z_{\min} = 2$ m. Kerroin $c_0 = 1$ ja turbulenssikerroin $k_1 = 1$. Ilman tiheys riippuu lämpötilasta ja laskennassa käytettiin tiheyden arvoa 15 °C lämpötilassa, jolloin $\rho = 1.225$.

Voiman laskentaan tarvittavan rakennekertoimen $c_s c_d$ arvoksi annettiin Eurokoodin mukaan 1, koska tarkasteltava rakenne on poikkileikkaukseltaan pyöreä ja alle 60 metriä korkea. Voimakertoimen $c_{f,0}$ luettiin Eurokoodin kuvaajasta 7.28. tornin pinnankarheuden ja keskihalkaisijan suhteen k/D ja Reynoldsin luvun Re avulla. Pinnankarheuden k arvona käytettiin teräksen pinnankarheutta $k = 0.05$ Eurokoodin taulukon 7.13 mukaan ja halkaisijan D arvona käytettiin tornin keskihalkaisijaa $D = (3.3+2.1)/2 = 2.7$ m. Tällöin $k/D = 0.0185$. Reynoldsin luku laskettiin

kaavalla $Re = D \cdot U / \nu$, jossa U on tuulen keskinopeus ja ν ilman kinemaattinen viskositeetti, jolle käytettiin arvoa $15 \cdot 10^6$, jolloin $Re = 918000$. Edellä määritettyjen k/D ja Re arvojen perusteella $c_{f,0} = 1.05$.

Vakio Ψ_λ luettiin Eurokoodin kuvaajasta 7.36 tehollisen pinta-alan A/A_c , sekä tornin korkeuden ja keskihalkaisijan suhteen l/D avulla. Tuulivoimalalle $A/A_c = 1$ ja $l/D = 45.075/2.7 = 16.69$, jolloin $\Psi_\lambda = 0.74$.

Tuulivoimalan tuulipinta-alana A_{ref} käytettiin tornin poikkipinta-alaa pystysuunnassa, joka voidaan laskea esimerkiksi kaavalla $A_{ref} = [r + (R-r)/2] \cdot l$, jossa l on tornin korkeus, R pohjan säde ja r huipun säde, tällöin $A_{ref} = 60.851 \text{ m}^2$.

Torniin vaikuttava voima laskettiin kaavan (7) avulla. Saadut voiman arvot todennäköisimmällä, keskimääräisellä, sekä suurimmalla tuulennopeuden arvolla on esitetty taulukossa 3.

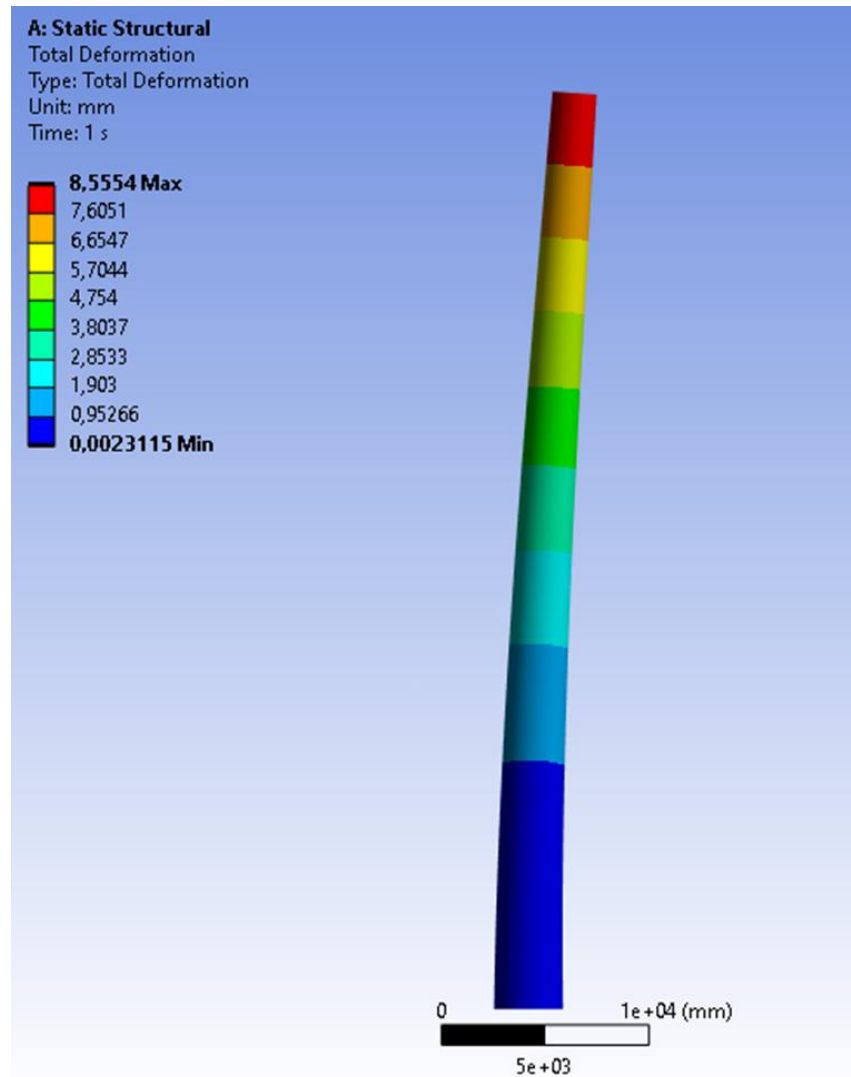
Taulukko3. Laskettuja voiman arvoja.

Tuulennopeus (m/s)	Voima (kN)
4	2.478
5.1	4.029
15	34.856

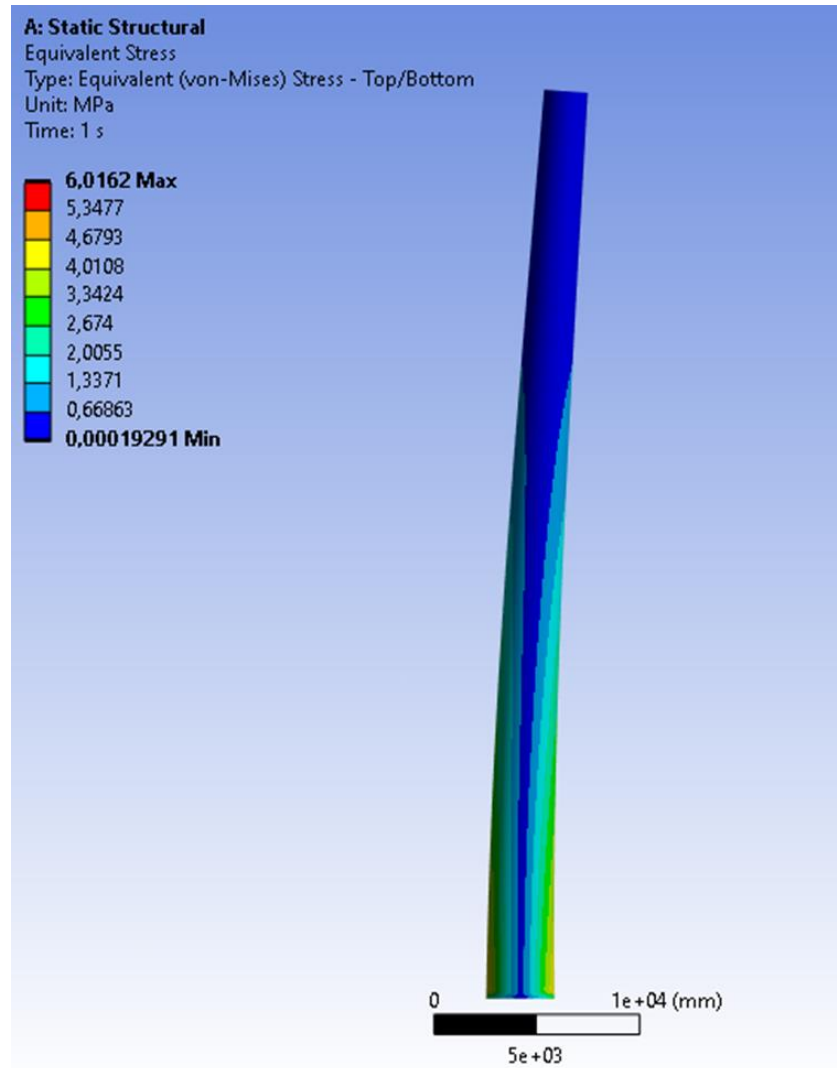
Taulukon 3 voiman arvoista Ansys-simuloinnissa käytettiin suurinta arvoa, eli 34.856 kN, joka pyöristettiin 35 kN.

4.2 Simulointi

Simuloinnista saatu kokonaissiirtymäresultantti on esitetty kuvassa 10 ja von Mises -jännitykset kuvassa 11.



Kuva 10. Tornin kokonaissiirtymät millimetreinä.



Kuva 11. Tornin von Mises -jännitykset megapascalina.

Kuvasta 10 nähdään, että suurin siirtymä on 8.6 mm ja se sijaitsee tornin huipulla. Suurin jännitys kuvasta 11 nähdessä sijaitsee tornin pohjalla ja sen suuruus on 6.0 MPa, joka on noin 59 kertaa alhaisempi, kuin rakenneteräksen myötölujuus 355 MPa. Plastista muodonmuutosta ei esiinny tornin rakenteessa. Huomattavat jännitysalueet sijaitsevat tuulensuuntaa kohtisuorassa olevilla sivuilla.

Muuttamalla tuulennopeuden arvoksi 33 m/s, joka vastaa Ilmatieteenlaitoksen internet-sivujen mukaan hirmumyrskyä, on torniin vaikuttava voima 168.7 kN. Simuloinnin mukaan tällä voimalla tornissa esiintyvä maksimijännitys on 28.4 MPa ja plastista muodonmuutosta ei esiinny.

5. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli muodostaa yksinkertainen elementtimenetelmää soveltava laskentamalli tuulivoimalan tornin väsymistarkastelua varten. Arvio simuloinnissa käytetyille tuulen nopeuksille laskettiin Eurocode 1 -standardin mukaan, sekä Weibull-todennäköisyysjakaumaa hyväksikäyttäen. Lisäksi käytiin läpi väsymisen teoriaa ja S-N-käyrän muodostaminen Eurocode 3 -standardin mukaan.

Weibull-analyysin ja standardin mukaan laskettu todennäköisin tuulennopeus oli 4 m/s ja suurin tuulennopeus 15 m/s, joilla torniin vaikuttavaksi voimaksi saatiin 2.5 kN ja 35 kN. Numeerisessa simuloinnissa käytettiin voimana 35 kN, jolla tornissa ei esiintynyt plastista muodonmuutosta, tai väsymistä Ansys-ohjelmiston Fatigue-työkalun mukaan.

Työn tuulivoimalan mallista rajattiin tarkasteltavaksi osuudeksi ainoastaan voimalan torni. Lisäksi torniin vaikuttavista voimista huomioon otettiin vain tuuleen tornin pintaan aiheuttavasta paineesta syntyvä voima.

Työssä käytetty voimalamalli on yksinkertaistettu suuresti. Laskennasta ja siitä saaduista tuloksista saisi todenmukaisemmat lisäämällä mukaan voimalan nasellin ja roottorinlapojen massoista aiheutuvat voimat tornin huipulle. Lisäksi todellisessa tilanteessa tuulen suunta ja nopeus vaihtelevat satunnaisesti ja tämäkin tulisi ottaa tarkemmin laskennassa huomioon. Työssä tarkasteltu voimala on sijoitettu mantereelle ja mallia voisi kehittää myös meriolosuhteisiin ottamalla huomioon edellä mainittujen lisäksi myös meren aalloista torniin aiheutuvat voimat.

LÄHTEET

DNV/Risø. (2002). Guidelines for Design of Wind Turbines. Det Norske Veritas, Copenhagen, Wind Energy Department, Risø National Laboratory. s. 2.

<http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>. Viitattu 18.3.2022.

<https://www.ilmatiiteenlaitos.fi/tuulet>. Viitattu 27.4.2022.

Kong, C., Bang, J., Sugiyama, Y. (2004). Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life. Elsevier.

Kutz, M. (1986). Mechanical Engineers' Handbook. John Wiley & Sons. s. 260-261, 270-273.

Norton, R.L. (2011). Machine Design: An Integrated Approach. Pearson Education Inc. s. 331–339.

Sadorsky, P. (2020). Wind energy for sustainable development: Driving factors and future outlook. Elsevier.

Schijve, J. (2003). Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. Elsevier. s. 680-700.

Schijve, J. (2009). Fatigue of Structures and Materials. Springer. s. 13-20.

Sutherland, H.J. (1999). Fatigue Analysis of Wind Turbines. Sandia National Laboratories. s. 121.

The European Standard. (2005). Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions – Wind actions.

The European Standard. (2005). Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-9: Fatigue.

Uys, P.E., Farkas, J., Jármai, K. & van Tonder, F. (2007). Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure. Elsevier.