

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# TUULIVOIMALAN PAINEENTASAUS- LEVYN JUOTOSBETONOINTI

TEKIJÄ Aki Paananen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Aki Paananen			
Työn nimi Tuulivoimalan paineentasauslevyn juotosbetonointi			
Päiväys	14.4.2023	Sivumäärä/Liitteet	30
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Keski-Suomen Betonirakenne Oy			
Tiivistelmä			
<p>Keski-Suomen Betonirakenne Oy rakensi tuulivoimaloiden perustuksia Lestijärvelle. Työt alkoivat vuonna 2022. Tuulivoimapuisto on Suomen suurin ja koostuu laitetoimittaja Siemens Gamesan 69 tuulivoimalasta. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tuulivoimalan perustukseen kuuluvan paineentasauslevyn juotosbetonoinnin työvaiheita ja -tapoja sekä työmaolosuhteiden vaikutusta juotosbetonoinnin lopputulokseen.</p> <p>Opinnäytetyössä esiteltävät työvaiheet koostuivat Keski-Suomen Betonirakenteen omasta työsuunnitelmasta, opinnäytetyön tekijän työnjohtokokemuksesta tuulivoimalatyömaalla sekä kahden tuuliturbiinin laitetoimittajan juotosbetonoinnin ohjeistuksista. Työmaan työvaiheista sekä työmaapalavereista kerättiin tietoa juotostyöhön liittyvistä haasteista ja huomioista. Näiden pohjalta laadittiin sekä päivitetty työsuunnitelma paineentasauslevyn juotosbetonointiin tilaajaa varten että kehitysideoita työvaiheisiin liittyen.</p> <p>Työsuorituksessa havaittiin haasteellisimmaksi juotosbetonoinnin lämmönhallinta, joka on suoraan yhteydessä betonirakenteen lujouden kehitykseen. Aiemmassa työsuunnitelmassa korostettiin lämpötilojen merkitystä juotostyöhön, mutta keinoja lämmönhallintaan ei ollut esitelty. Työmaahavaintojen ja tuuliturbiinien laitevalmistajien ohjeista kerättiin käytännön tapoja betonoinnin lämmön- ja laadunhallintaan työsuunnitelman päivittämistä varten. Lisäksi muihin työvaiheisiin liittyen tehtiin kehitysehdotuksia parhaiden kokemusten ja ohjeiden mukaisesti. Päivitettyä työsuunnitelmaa tullaan hyödyntämään tilaajan vastaavanlaisilla työmailla jatkossa.</p>			
Avainsanat tuulivoimalaperustus, betonitekniikka, juotosbetonointi			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degerå Programme Degree Programme in Civil Engineering	
Author Aki Paananen	
Title of Thesis Wind turbine foundation joint grouting	
Date 14 April 2024	Pages/Appendices 30
Client Organisation /Partners Keski-Suomen Betonirakenne Oy	
<p>Abstract</p> <p>Keski-Suomen Betonirakenne Oy built wind turbine foundations at Lestijärvi, Finland. The project started in 2022. The windmill farm is the biggest in Finland consisting of 69 Siemens Gamesa wind turbine units. The aim of the thesis was to examine the stages of wind turbine joint grouting and the methods for achieving the targeted results.</p> <p>At first, the material for the introduction of joint grouting was gathered from the client's current work plan, the author's own work experience at a windmill site and from two different wind turbine manufacturers' guidelines for grouting. Then, information on the challenges in joint grouting was gathered by using the author's observations on the best practices used at the different stages. In addition, the author's notes from the documented site meetings were utilized.</p> <p>As a result, the work plan for joint grouting was updated for the client based on the received information. It was found out that the greatest challenge regarding joint grouting is the temperature management allowing optimal curing of the concrete. The previous work plan emphasized the effect of ambient temperatures but never guided how to control temperatures at the site. The work plan will be utilized by the client at other similar sites.</p>	
<p>Keywords</p> <p>Wind turbine foundation, concrete structures, grouting</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	5
2	TUULIVOIMALAN RAKENNE.....	6
2.1	Voimala .....	6
2.2	Perustus .....	6
2.3	Pulttikehä .....	7
2.4	Juotos .....	7
3	JUOTOSTYÖT YLEISESTI .....	9
4	KUORMIEN SIIRTÄMINEN PERUSTUKSILLE .....	11
4.1	Tuulivoimalan kuormat .....	11
4.2	Juotoksen suunnittelu .....	11
4.3	Voimalatoimittajien ohjeet ja eri juotostavat .....	12
4.3.1	Siemens Gamesan yleiset ohjeet.....	12
4.3.2	Vestas Wind Systems A/S:n yleiset ohjeet .....	16
5	TUULIVOIMALAN JUOTOSBETONOINNIN NYKYINEN TYÖSUUNNITELMA .....	20
5.1	Olosuhteet ja niihin varautuminen.....	21
5.2	Valmistelevat työt ja muottityöt .....	21
5.3	Massan valmistus ja juotosbetonointi .....	21
5.4	Laadunhallinta .....	23
6	KEHITYSTYÖ.....	24
7	TYÖSUUNNITELMAN KEHITYSTYÖN TULOKSIA.....	25
7.1	Työn haasteet.....	25
7.2	Korkealujuusmassat ja lämmönhallinta .....	25
7.3	Paineentasauslevyn tasaaminen .....	26
7.4	Kaulusmuotiton juotosbetonointi .....	27
7.5	Juotostöiden työsuunnitelma .....	28
8	POHDINTA.....	29
	LÄHTEET .....	30

## 1 JOHDANTO

Keski-Suomen Betonirakenne Oy on perustettu vuonna 2004, jonka erikoisalana ovat massiiviset paikallavaletut betonirakenteet. Yritys työllistää hieman yli sata henkeä ja sen liikevaihto oli vuonna 2022 yli 130 miljoonaa euroa. Toimipisteitä yrityksellä on Vantaalla, Lappeenrannassa, Oulunsalossa ja Pihtiputaalla. KSBR:n (yrityksen lyhenne) päämääränä on kasvaa ja tähdätä kansainvälisille markkinoille lähivuosina. (Keski-Suomen Betonirakenne, 2023a)

OX2 toteuttaa Lestijärvelle Suomen suurimman tuulivoimalahankkeen, joka on kokonaisteholtaan 400 megavattia. (OX2, 2021a) Tuulipuistoon rakennetaan 69 kappaletta Siemens Gamesan SG 6.6.-170- voimalaa, joiden yksikköteho on 6,6 MW ja roottorin halkaisija 170 m. (OX2, 2021b). Keski-Suomen Betonirakenne urakoi tuulivoimaloiden perustuksia sekä tuulivoimapuistoon liittyvää infrastruktuuria.

Opinnäytetyössä esitellään tuuliturbiinivoimalaa ja sen rakennetta juotosbetonoinnin näkökulman kautta. Lisäksi työssä taustoitetaan tuulivoimalan kuormien siirtämistä perustuksille.

Opinnäytetyön kehitystyön tarkoituksena on päivittää tilaajan työsuunnitelma vastaamaan paremmin paineentasauslevyn juotosbetonoinnin työvaiheiden haasteisiin. Työssä esitellään tuulivoimalan perustuksen ja paineentasauslevyn juotosbetonointi ja siihen liittyviä työvaiheita kahden eri tuuliturbiinitoimittajan Siemens Gamesan sekä Vestas Wind Systems A/S ohjeen kautta. Lisäksi opinnäytetyössä tarkastellaan juotosbetonissa käytettävän laastivalmistajan ohjeita sekä tilaajan käytössä olevaa paineentasauslevyn juotosbetonoinnin nykyistä työsuunnitelmaa.

Esiteltäviä teoriaosuutta verrataan Lestijärven työmaalta kerättyihin havaintoihin, jonka kautta saadaan puitteet päivitettävän työsuunnitelman kehitystyölle. Uutta työsuunnitelmaa tullaan käyttämään jatkossa tilaajan muissa vastaavanlaisissa töissä.

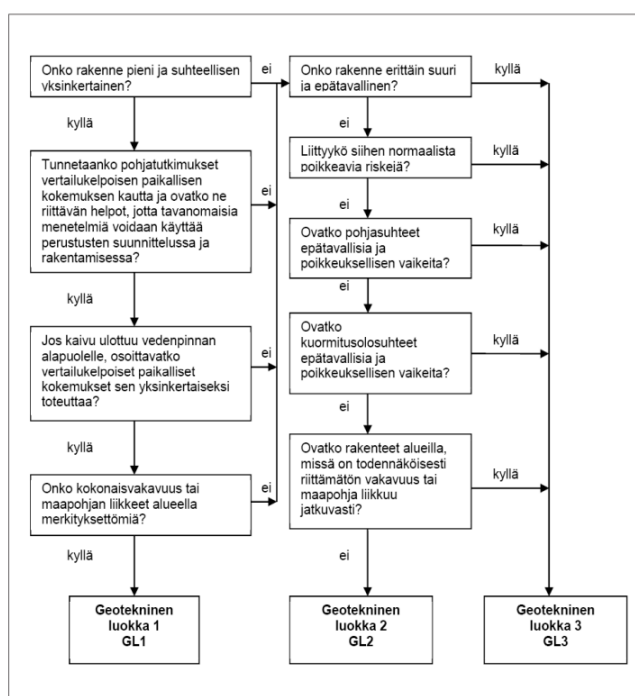
## 2 TUULIVOIMALAN RAKENNE

### 2.1 Voimala

Tuulivoimalat voidaan jakaa maa- ja merituulivoimaan perustuksen sekä sähkökaapeleiden kulkureitin mukaan. Merivoimalan perustukset ovat merenpohjassa ja kaapeli kulkee merenpohjaa pitkin. Keinotekoisille saarille perustetut voimalat luokitellaan yleensä merituulivoimaksi, mikäli niiden kaapelointi kulkee merenpohjassa. (Suomen tuulivoimayhdistys, 2024). Nykyiset tuulisähkön tuottamiseen tarkoitettut tuulivoimalat ovat Suomessa lähes poikkeuksetta kolmelapaisia ja vaaka-akselisia voimaloita. Tyypillisesti teräksinen putkirakenteinen torni on kiinnitetty betoniperustukseen. Konehuone sekä roottori ja sen lavat sijaitsevat voimalan huipulla tornin päällä. Konehuoneen päälaitteita ovat vaihteisto, generaattori, muuntaja sekä ohjausjärjestelmät. (Suomen tuulivoimayhdistys, 2022). Tuulivoimalayksiköiden koko Suomessa on kasvanut jatkuvasti sekä keskimääräisellä napakorkeudella että roottorin keskimääräisen halkaisijalla mitattuna. Vuoteen 2022 loppuun mennessä napakorkeus oli keskimäärin lähes 145 m ja roottorin keskimääräinen halkaisija 160 m. Kasvaneet voimalakoot kasvattavat tehon tuoton lisäksi myös perustuksen mitoitus. (Suomen tuulivoimayhdistys, 2023).

### 2.2 Perustus

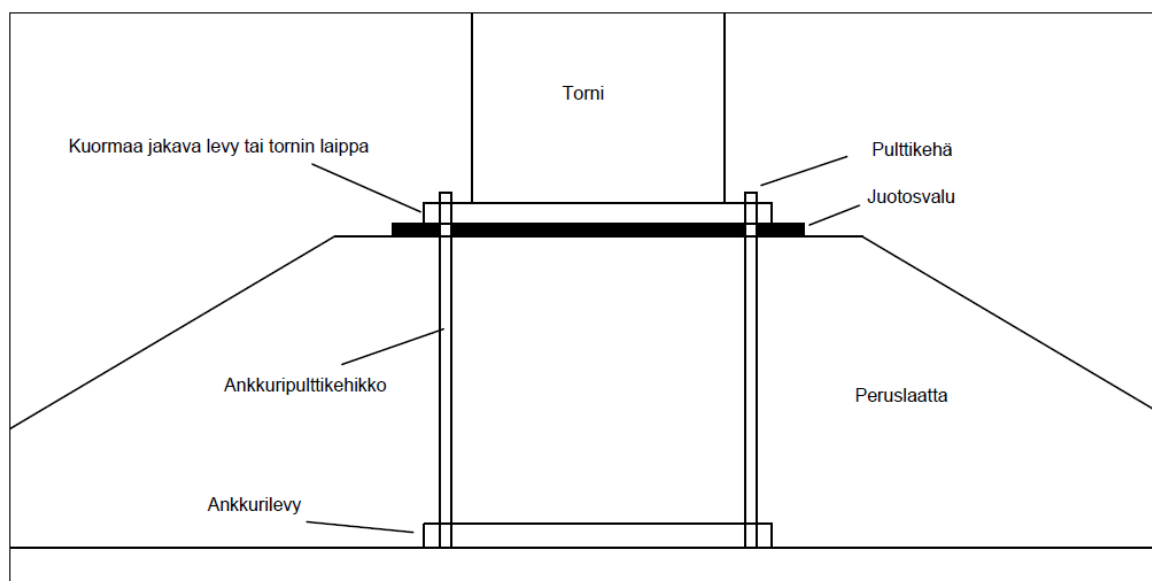
Maatuulivoimalan perustus toteutetaan joko gravitaatio-, kallioankkuri- tai paaluperustuksena, riippuen rakennuspaikan maaperän olosuhteista. Laittevalmistajan ilmoittamat kuormitukset ovat suuria, jotka johtavat käytännössä aina niin sanottuihin taitorakenteisiin, joita tämän mittaluokan massiiviset betonirakenteet, kallioankkuroinnit tai paalutukset ovat. Eurokoodin EN 1997-1 Yleiset sääntömuukaisesti perustuksen rakenteet jaotellaan kolmeen geotekniseen luokkaan. GL1 helpot kohteet, GL2 vaativat kohteet ja GL3 erittäin vaativat kohteet. Käytännössä tuulivoimalakohteet asettuvat luokkaan GL2 tai GL3, kuten kuva 1. auttaa hahmottamaan.



Kuva 1 Geoteknisen luokan valintakaavio (EN1997-1, 2023)

## 2.3 Pulttikehä

Gravitaatioperusteisesti eli maanvaraisesti perustetussa voimalassa ankkuripulttikehikko sijaitsee tuulivoimalan perustuksessa siirtäen voimalan tornin kuormat massiiviseen betoniperustukseen eli peruslaattaan. Pulttikehä on pulttikehikon peruslaatan valamisen jälkeen näkyviin jäävä yläosa, johon tornin alaosan lohko kiinnitetään suoraan tai paineentasauslevyn kanssa. Pulttikehikon alaosassa on ankkurilevy, joka jää peruslaatan alapintaan. Kehikossa on pultit, jotka jälkijännitetään mutterein levyjä vasten. Yksinkertaistettu poikkileikkaus tornin perustuksesta havainnollistaa rakennetta (kuva 2).



Kuva 2. Perustuksen havainnollistava poikkileikkaus, ei mittakaavassa (Paananen, 2023)

## 2.4 Juotos

Juotosbetonoinnin tarkoituksena on tehdä korkealujuinen betonirakenne tornin kiinteän laipan tai pulttikehän päällä olevan paineentasauslevyn ja betonisen perustuksen väliin. Hienorakeinen juotosbetonimassa valmistetaan lähes aina koe-erineen työmaalla. Tuuliturbiini on rakenteeltaan kapea ja korkea, joten alaosa ja juotos altistuvat voimakkaasti dynaamisille kuormille, kuten taivutusliikkeelle ja tärinälle. (Master Builders Solution, 2024) Juotoksen eli veden ja kuivalaastin yhdistelmän on oltava väsytystä kestävä. Valmisbetonitehtaat sijaitsevat usein kaukana rakennuskohteesta ja valuun tarvittava betonimassan määrä on suhteellisen pieni, joten massan valmistus on kustannustehokampaa työmaalla itse tehden. Kuvassa valmis juotosprofiili kiertää paineentasauslevyä (Kuva 3.)



Kuva 3. Valmis juotos paineentasauslevyn ja perustuksen välissä (Paananen, 2023)



### 3 JUOTOSTYÖT YLEISESTI

Betoniteollisuus voidaan karkeasti jakaa valmisbetoniin, betonielementteihin, betonituotteisiin ja kuivatuuotteisiin (Betonitieto, 2023a). Betonin valmistusta Suomessa määrittelevät standardit: SFS-EN 206 Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus ja SFS 7022 Betoni sekä Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. Edellä mainittuja standardeja sovelletaan sekä betonielementeissä, sekä niin sanotuissa märkämassoissa, eli paikallaanvalettavissa työmaakohteissa. (Betonitieto, 2023b)

Kuutiomäärisesti lähes kaikki rakennustyömailla käytettävästä paikallavalubetonista on valmisbetonitehtaalla valmistettuja erilaisia massoja, jotka toimitetaan pyörintäsäiliöllä betoniautolla rakennuskohteeseen, jossa se pumputaan tai puretaan suoraan pyörintäsäiliöstä rakenteeseen. Tällöin puhutaan paikallavaletusta betonirakenteesta. Näin ollen vastuu massan laadusta valmistusvaiheessa kuuluu valmisbetonitoimittajalle eikä rakennuskohteen työmaalle. Betonimassan laatu ja määrät tarkistetaan kuormakirjasta ennen sen käyttämistä rakennuskohteessa. Betonointityöstä ja betonirakenteen riittävästä lujuudesta vastaa kuitenkin aina työmaan betonityönjohtaja. (Betonitieto, 2023c).

Yleisesti juotostyöllä tai juotosvalulla tarkoitetaan betonointia, jossa useimmiten betonisia rakenteita kiinnitetään toisiinsa tai metalliin hienorakeisemmalla korkealujuisella betonimassalla. Tyypillisimpiä esimerkkejä juotostöistä ovat talonrakennustyömaiden ontelolaattojen väliset saumavalut, joilla elementtitehtaalla valmistetut betonilaatat kiinnitetään toisiinsa (kuva 4.).



Kuva 4. Kuvaleike saumavaletuista ontelolaatoista (Villa hirvi, 2011)

Valmisbetonitehtaiden valmistamia notkeimpia ja itsetiivistyviä valmisbetonimassoja voidaan käyttää juotostöihin soveltuvilta osin, mutta massa voidaan valmistaa myös työkohteessa käyttötarkoitukseen soveltuvasta kuivalaastista ja puhtaasta juomakelpoisesta vedestä eli hanavedestä. Tämä käytännössä vaatii sekoittimen, jossa vesi ja kuivalaasti sekoitetaan laastivalmistajan ohjeiden mukaisesti suhteitus, huomioiden massan lämpötila ja tasalaatuisuus. Pumppu ja letkut tarvitaan massan

pumppaamiseen käyttökohteeseen, ellei kyse ole erittäin yksinkertaisesta rakenteesta, jonne massan voi esimerkiksi lapioida tai nostaa jassikassa. Valmistu juotettua betonirakennetta hoidetaan kuten muitakin valettuja betonirakenteita huolehtien jälkihoidosta.

Betonin notkeus eli juoksevuus voidaan ilmoittaa standardien mukaisesti mitattujen painumaluokkien avulla. Mitä suurempi määritetty painuma tai painuma-leviämä, sitä suurempi notkeus massalla on.

## PAINUMA

Yleisin tapa ilmoittaa betonin notkeus on painuman avulla. Betonit jaetaan painumaluokkiin alla olevan taulukon mukaan.

Luokka	Standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti määritetty painuma [mm]
S1	10...40
S2	50...90
S3	100..150
S4	160...210
S5 <sup>a)</sup>	≥ 220

<sup>a)</sup>Koska tiettyjen notkeusarvojen ulkopuolella testausmenetelmät eivät ole tarkkoja, suositellaan käytettäväksi muita menetelmiä.

Itsetiivistyvät betonit jaetaan painuma-leviämäluokkiin alla olevan taulukon mukaan.

Luokka	Standardin SFS-EN 12350-8 mukaisesti määritetty painuma-leviämä [mm]
SF1	550...650
SF2	660...750
SF3	760..850

Luokitus ei sovellu betonille, jonka kiviaineksen maksimiraekoko ylittää 40 mm.

Kuva 5. Betonin notkeusluokat sekä itsetiivistyvän betonin painuma-leviämä luokat (Betonitieto, 2024)

## 4 KUORMIEN SIIRTÄMINEN PERUSTUKSILLE

### 4.1 Tuulivoimalan kuormat

Tuulivoimalan perustukseen kohdistuvat kuormat voidaan jakaa pystyvoimaan, vaakavoimaan, kaatavaan momenttiin ja vääntömomenttiin. Tuuliturbiinin laitevalmistaja ilmoittaa nämä kuormat kuormitusdokumentissaan valmistamille laitteilleen, joita perustuksen suunnittelija käyttää osana perustuksen mitoitus- ja suunnittelutyötä. (Lehtonen M., 2022, 20-21)

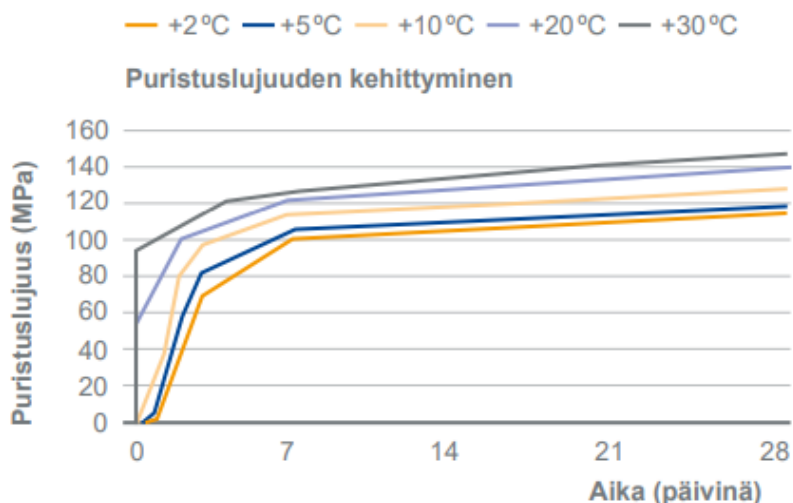
Tuulivoimalan pysyvät kuormat muodostuvat roottorista, konehuoneen, tornin ja perustuksen painosta. Voimalaa kohdistuu myös ulkoisia kuormia, joista merkittävin on tuulikuorma. Tuulivoimalan kuormat on määritelty IEC-standartissa, joka jakaa tuuliturbiinit kolmeen luokkaan I-III. Jokaiselle luokalle on muun muassa määritelty referenssit keskimääräiselle tuulen nopeudelle ja vuotuiselle keskimääräiselle tuulennopeudelle. Lisäksi puuskaisille alueille on omat parametrinsa. Tämän lisäksi kuormaa muodostuu laitteen toiminnasta ja ohjaamisesta, jotka ovat toimintakuormia. (Lehtonen M., 2022, 21-22).

Laitevalmistajien ilmoittamien kuormitusten lisäksi perustusten rakenteen suunnittelussa sovelletaan useita Eurokoodeja ja niihin liittyviä Suomen kansallisia liitteitä. Näitä ovat muun muassa SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu ja SFS-EN 1997-1. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. (Lehtonen M., 2022, 38)

### 4.2 Juotoksen suunnittelu

Tuulivoimalan laitevalmistaja, kuten Siemens Gamesa tai Vestas Wind Systems A/S esittävät ohjeissaan juotosbetonointiin soveltuvat, heidän hyväksymät laastivalmistajat ja tuotteet. Työmaalla tehtävä juotosbetonimassa valmistetaan poikkeuksetta kuivalaastista, johon lisätään vain vesi. Muutamat laastivalmistajat ovat tehneet nimenomaan tuulivoimalan juotosbetonointiin sopivia massoja kuten Master Builders Solution MasterFlow 9300:n. Kyseisellä laastilla on hyvä väsymyksen kestävyys ja se vaimentaa dynaamisia kuormia. Laasti sisältää metallisia runkoaineita toisin kuin perinteinen betonimassa, jossa runkoaines muodostuu kiviaineksesta. Juotosmassan paksuus on määritelty rakennesuunnitelmissa, MasterFlow 9300 laastivalmistaja suosittelee 30 – 200 mm tuotteelleen. (Master Builders Solution, 2017, 8-10).

Kuvassa 6. esitetään Master Flow 9300- laastin puristuslujuuden kehittyminen eri lämpötiloissa EN 196-1 standardin mukaisesti:



Kuva 6 Valmiin Master Flow 9300-laastilla tehdyn juotoksen puristuslujuuden kehittyminen (Master Builders Solution, 2014a)

Tuuliturbiinin juotosbetonille asetetaan puristuslujuuden lisäksi vaatimuksia mm. taivutus- ja vetolujuuden suhteen tuuliturbiinin valmistajan toimesta. Kuivalaastin valmistuksessa on huomioitu myös autogeeninen kutistuminen, mikä tarkoittaa massassa olevien komponenttien tilavuuden pienenemisen kemiallisen reaktion jälkeen. Kutistuminen voi saada valun irtoamaan paineentasauslevystä tai tornin alalapaista. Tämän vuoksi tilavuusvakaus on pitkällä aikavälillä todella tärkeää, joten oikeanlainen juotos ja rakenne on ehdottomasti saatava aikaan. (Master Builders Solution, 2014b)

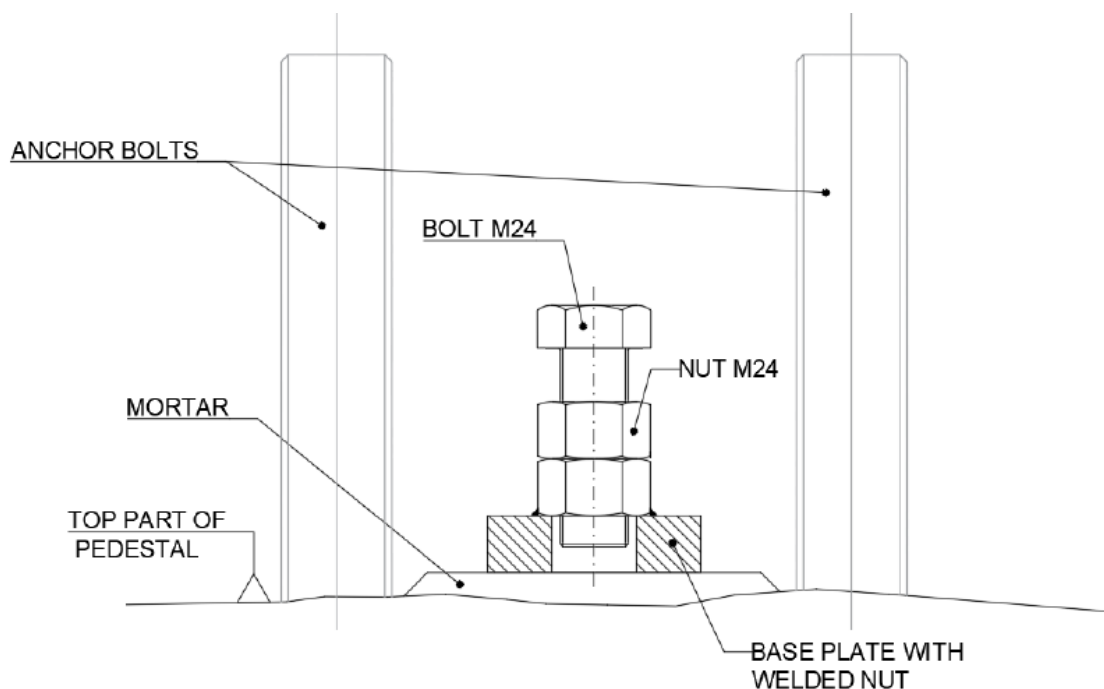
#### 4.3 Voimalatoimittajien ohjeet ja eri juotostavat

Tuulivoimaloiden laitetoimittajat, kuten Siemens Gamesa ja Vestas tarjoavat sekä valmiita ohjeita että tarvikkeita pulttikehän juotosbetonointiin ja osaan sitä edeltäviin ja sen jälkeisiin työvaiheisiin. Ohjeita suositellaan noudattamaan, vaikka ne eivät ole rakennuskohteen virallisia asiakirjoja. Näin ollen ne eivät korvaa tai täydennä muita kohteeseen liittyviä rakenne- tai työsuunnitelmia eikä myöskään laadunvalvontadokumentteja. Näiden kahden voimalatoimittajan ohjeet rakentuvat ja painottuvat eri tavalla eri osa-alueille.

##### 4.3.1 Siemens Gamesan yleiset ohjeet

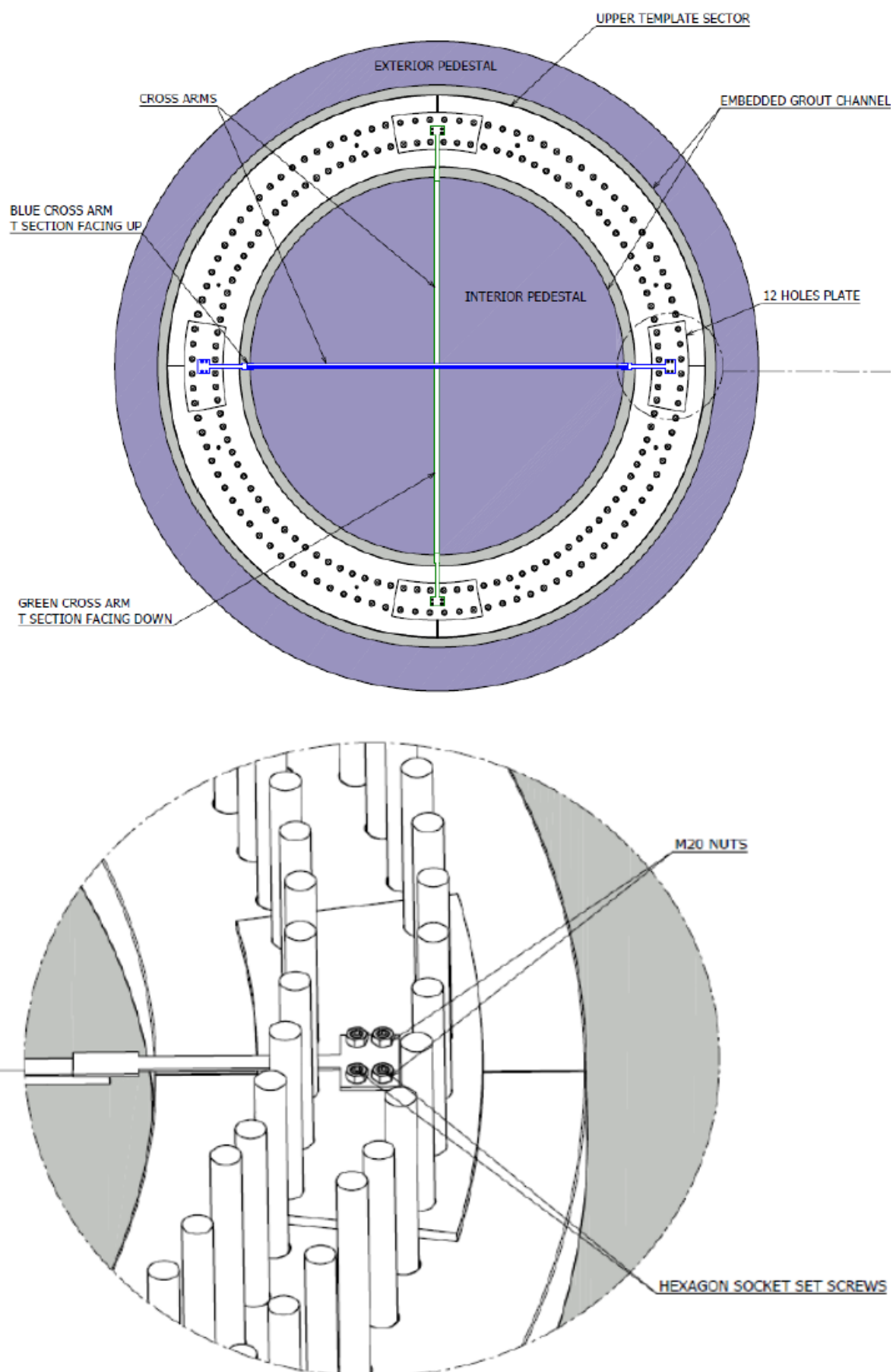
Siemens Gamesan yleiset ohjeet käsittelevät joko tornin alimman laippaosan ja perustuksen välistä pulttikehän juotosta tai paineentasauslevyn ja perustuksen välistä pulttikehän juotosta. Tuulivoimalatoimittaja vaatii juotoslaastin olevan ennakkoon heidän hyväksymiä tarkoitukseen sopivia laastituotteita, joilla on myös ohjeita valun tekoon. (Siemens Gamesa, 2022a, 2).

Neliosainen paineentasauslevy tasataan vaakasuoraksi ennen valua ohjeiden mukaan kahdella eri tavalla, joko shimmilevyin tai säätöjaloilla eli tunkeilla. Säätöjalat ovat työmaalla helpompi säätää käsin, eikä erikoistyökaluja tai jatkuvaa nosturia paineentasauslevyn nosteluun tarvita kuten shimmilevyjen kanssa. Ennen säätöjalkojen asettelua tehdään tasausvalu niiden alapuolelle, kuvassa merkitty englanniksi *mortar*. (kuva 7.)



Kuva 7. Poikkileikkauskuvat paineentasauslevyn säätöjaloista (Siemens Gamesa, 2022b)

Säätöjalkoja asetellaan 4-osaisen paineentasauslevyn alle vähintään 12 kappaletta, 3 kpl per paineentasauslevyn sektori. Säätöjalat asetellaan ohjeen mukaan mahdollisimman tasaisesti kehälle ankkuripulttien väliin. Jalat säädetään korkoon huomioiden juotosvalun suunniteltu paksuus, eli varsinaisen peruslaatan ja paineentasauslevyn alapinnan väli on betonivalun paksuus. Ohjeen mukainen toleranssi jalkojen tasokorkojen eroon on +1 mm. Säätöjalat jäävät juotosvalun sisään betoniin paineentasauslevyn alle. Pulttikehän pultit ovat suojattuna muovisin suojaputkin, mutta niiden päät tulee peittää teipillä tai muilla keinoin, jotta juotosbetonia ei pääse suojaputken sisäpuolelle. Kun ankkurikehä on aiemmin valettu peruslaattaan, ovat paineentasauslevyt olleet kiinni paikallaan, tulee niiden asentoa kääntää 45- astetta, joten niiden peruslaatan valamisen aikainen asento tulee olla tiedossa. Kääntö tehdään ettei ylä- ja alalaipan saumat olisi linjassa, jolloin rakenne saadaan vahvemmaksi. Paineentasauslevyt kiinnitetään toisiinsa laipoilla sekä ristituilla (2kpl), niihin käytetään pulttikehikon mukana tulleita muttereita sekä priikkoja, kuten kuvassa 8 esitetään. (Siemens Gamesa, 2022a).



Kuva 8. Havainnekuva paineentasauslevystä ja sen ristituista (Siemens Gamesa 2022a)

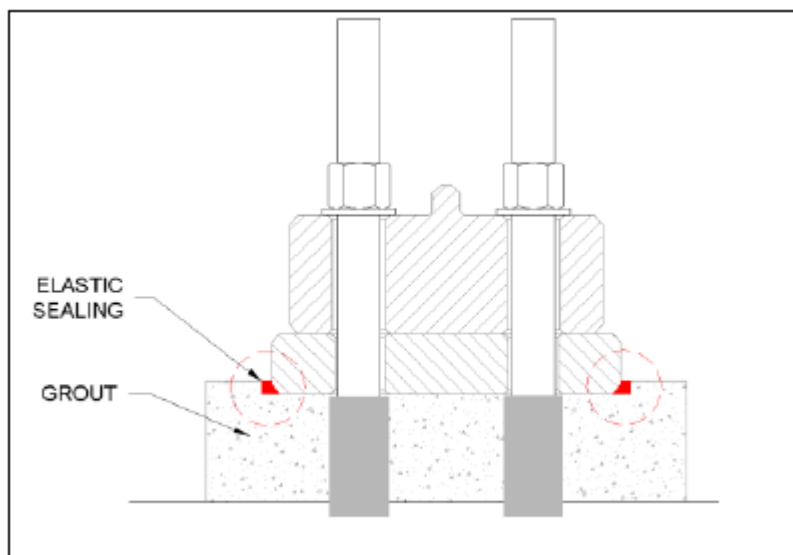
Mikäli paineentasauservyt käännön jälkeen, ristituet tai muu asetelma kehällä ei asetu paikalleen helposti, ei niitä saa vääntää tai taivuttaa paikalleen vaan silloin on otettava yhteyttä pulttikehän toimitajaan. Tämän jälkeen tehdään muottityö. Kumi- tai neopreenitiivisteet asetetaan kiertämää paineentasauservyn sivujen alaosaan. Lisäksi tiivistetään muottien liitoskohdat sekä muotin ja peruslaatan väli, jottei juokseva massa leviä muotin alta. (Siemens Gamesa 2022a).

Peruslaatan betonimassa tulee olla täysin lujittunut ja jälkihoito on oltava tehty kunnolla loppuun ennen kuin juotosbetonointia voidaan aloittaa. Juotosmassan valmistus ja valun jälkihoito tulee tehdä Siemens Gamesan hyväksymän kuivalaastivalmistajan ohjeiden mukaisesti, sekä sen ohjeistamalla massan valmistukseen ja pumppaukseen tarvittavalla kalustolla. Juotostyö tulee pyrkiä tekemään olosuhteissa, joissa ei ole liian kylmä tai kuuma hyödyntäen lämmönhallintaan sopivia keinoja, kuten sääsuojaa ja lämmittimiä tai kylmää vettä muun muassa rakenteiden viilennykseen ennen valua. Tarkemmat ohjeet lämpötilojen suhteen löytyy laastivalmistajan käyttöohjeista. (Siemens Gamesa 2022a).

Valua tehdessä on oikea pumppausnopeus tärkeää, liian nopea tahti heikentää valun onnistumista. Nopeuden tulisi olla koko valun ajan tasainen, eikä valua saa keskeyttää. Valuletkua ei saa liikutella turhaan valun aikana, liikkeiden on oltava rauhallisia. Valun aikana on tarkkailtava jatkuvasti sen tasaista asettumista muottiin sekä paineentasauservyn sisä- että ulkokehällä. Valu voidaan päättää vasta, kun valun pinnan taso on saavuttanut suunnitellun koron. (Siemens Gamesa 2022a).

Juotosbetonoinnin jälkihoito tehdään laastivalmistajan ohjeiden mukaisesti, se on yhtä tärkeä osa betonointia kuin varsinainen juotosvalutyö. Valmiin valutyön suojaaminen liian nopealta kuivumiselta on suositeltavaa. (Siemens Gamesa 2022a).

Paineentasauservyt, niiden liitoslaipat sekä ristituet puretaan pois vuorokauden päästä valun valmistamisesta. Tämä tulee aina tehdä ennen kuin ensimmäisiä tornin alaosaan rakenteita voidaan pulttikehälle kiinnittää. (Siemens Gamesa 2022a). Kun betonointi on tarkistettu onnistuneeksi juotoksen (*grout*) ja paineentasauservyn väli tulee tiivistää elastisella massalla (*elastic sealing*) kuvan 9 esittämälle paikalle. Paineentasauservyjen välit tulee myös tiivistää siihen soveltuvalla massalla. Vedeneristystä suositellaan tehtäväksi ruiskuttamalla valmiiseen valupintaan elastinen massa, esimerkiksi BASF:n Masterceal 6100 FX. (Siemens Gamesa 2022a).



Kuva 9. Poikkileikkauskuvaa juotoksen ja paineentasauslevyn välin tiivistämisestä. (Siemens Gamesa 2022a)

Mikäli juotosbetonoinnin ja tornin rakenteiden kiinnittämisen välillä on yli kuukausi aikaa, tulee ankkurikehän pultit käsitellä korroosion alkamisen ehkäisemiseksi siihen soveltuvilla rasvoilla. Lisäksi on suositeltavaa suojata pultit esimerkiksi asettelemalla niihin sopivat muovi- tai kumitulpat. (Siemens Gamesa 2022a).

Juotosbetonointi on yksi tärkeimpiä työvaiheita tornin perustamisen onnistumiseksi. Tämän vuoksi oikeanlaisten työhön hyväksytyjen tarvikkeiden käyttö ja työhön koulutettujen työntekijöiden osaminen on ensiarvoisen tärkeää. (Siemens Gamesa 2022a).

#### 4.3.2 Vestas Wind Systems A/S:n yleiset ohjeet

Vestaksen ohjeen tavoite on opastaa pulttikehän juotosbetonointi kaikki sääolosuhteet huomioiden. Oikein tehty ankkuripulttikehän juotostyö takaa betonimassan tiiviin ja tasaisen asettumisen, jolloin ilmataskuja ei valuu jää. Juotosbetonointi valetaan kerralla tauotta. kalustoluettelo (Vestas 2017, 8) Ohjeen mukaan betonointityöhön tarvitaan taulukon 1 mukainen kalusto ja varusteet.



Lukumäärä	Kuvaus
2	Betonisekoitin, minimikapasiteetti 300 litraa
1	Betonipumppu (Putzmeister p715 tai vastaava), vähintään 50 mm pumppausletkut, sekä varaletkuja tukoksia varten
1	Painepesuri & kuivamärkäimuri
1	Kurottaja nostoihin
1	Aggregaatti / virtalähde
1	Vesisäiliöitä ja tarvikkeet veden annostelua varten
1	Juotosmassan laadun mittausvälineet: <ul style="list-style-type: none"> <li>- DafStb tuottaman RiLi:n mukainen juoksuakanava (saksalainen standardi) tai</li> <li>- Painumakokeen EN12350-2 mukaiset välineet; kartio, aluslevy, sekuntikello.</li> <li>- Lasermittari pinnan lämpötilanmittaukseen ja loggerit seuraamaan betonin lämmönkehitystä</li> <li>- Koevalumuotit 150 x 150 x 150 mm</li> </ul>
Tarvittaessa	Termostaateilla varustettuja lämmitys- ja eristysmattoja
Tarvittaessa	Suojapeitteitä jälkihoitoa varten

Taulukko 1. Vestaksen juotosvaluohjeen mukainen kalustoluettelo (Vestas 2017, 9)

Juotosmassan valmistukseen voidaan käyttää BASF Masterflow 9200:ta tai Nautic AWT NaX Q130:ta. Ne suositellaan tilattavan suursäkeissä työn sujuvuuden helpottamiseksi. Kuivalaasteja tulee säilyttää viileässä ja kuivassa tilassa. Juotosmassan valmistamiseen käytetään juomakelpoista vettä. Muita materiaaleja käytettäessä tulee ne hyväksyttää Vestaksella.

Perustus tulee siistiä irtoroskista, rasvoista tai muista aineista. Puhdistuksen voi tehdä painepesurilla. Valupintojen tulee olla kostea, mutta seisovaa vettä ei saa olla. Kuten Siemensinkin ohjeissa kehän pultit tulee suojata mukana tulevin suojaputkin sekä estää esimerkiksi teipillä valun joutuminen putkiin. Paineentasauslevyn asetteluun tai tornin alaosan tasaamiseen on Vestaksella erillinen ohje.

Juotosbetonointia ei voi tehdä, mikäli tulevan valun vieressä rakenteiden lämpötila on alle +3 C tai niiden lämpötila voi laskea sen alle seuraavan 48 tunnin aikana, ellei lämpötilaa pidetä jatkuvasti lämmittämällä yli +5C- asteen. Alle +10C- asteessa tulee käyttää lämmitysmattoja (siniset matot kuvassa 10.) , jonka päälle laitetaan vielä eristysmatto (punaiset matot kuvassa 10.)



Kuva 10. Juotosbetonointi kylmässä, lämmitys ja eristysmatot käytössä (Vestas, 2017)

Mattojen ollessa paikallaan tarkistetaan ennen juotoksen aloitusta pintarakenteiden lämpötila digimittarilla. (Vestas 2017, 14-15).

Kuumalla, yli +25C- asteen lämpötilassa, tulee tarkistaa, ettei rakenteiden lämpötila ylitä +30 C. Mikäli tämä raja ylittyy, valua ei voida tehdä. Yli +25 C- asteessa juotostyö on vaikeaa ja se vaatii määrättyjä valmisteluja lämpötilojen laskemiseksi: Säilytä kuivalaastit viileässä sekä käytä jäähdytettyä vettä massan valmistukseen, viilennä valuun käytettävä kalusto kylmällä vedellä ja käytä valkosisia pumppausletkuja, suojaa työalue suorilta auringonpahteelta sekä suorita valutyö mahdollisuuksien mukaan aamulla tai illalla, jolloin viileämpää. Sateella tulee käyttää sääsuojaa, jotta valumassan suhteitus ei muutu sadeveden sekoittuessa massa. (Vestas 2017, 15-16).

Sekoittimet, pumppu ja letkut voidellaan pumppaamalla 10 litran vesi/sementti- seoksella. Painumakoe tehdään (Suomessa) euronormi EN12350-2 kartiokokeen mukaisesti. Arvon tulee olla 550 - 640 mm, mikäli kyseessä on Vestaksen valmistaman tuuliturbiinin perustus. (Vestas 2017, 16).

Kuivalaastia käsitellään ja säilötään sen valmistajan ohjeiden mukaisesti, mutta sekoituserä tehdään näin:

1. Lisätään 500 kg kuivalaastia sekoittimeen
2. Lisätään 35 kg puhdasta vettä sekoittimeen (7 % - vettä kokonaismassasta)
3. Sekoitetaan sekoittimella vähintään 6 minuuttia
4. Tehdään leviämätesti EN12350-2 mukaan
5. Betonimassa juoksevuuteen vaikuttaa merkittävästi sitä ympäröivä lämpötila. Jos massa ei juokse riittävästi muotissaan, vettä voidaan lisätä. Veden osuus kokonaismassasta ei saa kuitenkaan ylittää 8,8 % - 9,3 % osuutta riippuen laastivalmistajasta. (Vestas 2017, 17).

Massaa annostellaan koekappaleiden muotteihin ja ne testataan EN-12390 mukaisesti. Varsinainen juotostyö ja betonimassan pumppaus yhtenee melko lailla Siemens Gamesan, Vestaksen ja laastivalmistajan ohjeissa.

## 5 TUULIVOIMALAN JUOTOSBETONOINNIN NYKYINEN TYÖSUUNNITELMA

Juotosbetonointiin liittyy paljon samoja piirteitä ja työvaiheita kuin sekä lainalaisuuksia kuten muuhunkin betonointiin. Valmis betonirakenne on hyvä puristuslujuudeltaan, mutta heikkoa vetolujuudeltaan ilman raudoitusta. Juotosbetonimassa on kuitenkin juoksevaa ja itsetiivistyvää eikä vaadi välttämättä raudoitusta rakenteessa, sillä laastin sisältämät partikkelit paikkaavat sen tarvetta. Juotosbetonista ei tehdä muutenkaan mitään raudoitteita vaativia massiivibetonirakenteita. Juotosta tehdessä oleellista on massan tasainen leviäminen muottiin ja betonimassan lämmönhallinta, jotta betonirakenteesta tulisi tiivis ja luja. Luonnollisesti vallitseva vuodenaika ja säätila vaikuttavat työsuoritukseen.

KSBR on tehnyt työsuunnitelman juotostyöstään omaan käyttöön, eikä sen tässä esiteltäviä työsuoritteita voi soveltaa sellaisenaan muihin juotostöihin. Työsuunnitelman sisältö perustuu pääasiassa tilaajan erään kohteen perustussuunnitelmiin, Siemens Gamesan ohjeisiin sekä juotostmassalaastivalmistaja BASF:n valuohjeisiin. KSBR on BASF:n valtuuttama tuulivoimalan juotosbetonointiurakoitsija (KSBR 2023b). Betonoinnista pidetään myös erillistä betonointipöytäkirjaa, josta selviää betonin määrät laatuineen ja se allekirjoitetaan betonityönjohtajan toimesta.

<p><b>ERITYISESTI HUOMIOITAVIA TYÖTURVALLISUUS-ASIOITA</b> <b>PARTICULARLY CONSIDERED SAFETY MATTERS</b></p>	<p>Juotostmassa on haitallista joutuessaan iholle tai silmiin. juotostmassan valmistuksessa, valussa sekä pesujen yhteydessä käytetään pitkähihaista työvaatetusta, hengityssuojaimia, kemikaalikestäviä työkalineita sekä riittävää silmäsuojausta. Tarvittaessa voidaan käyttää kasvot peittävää visiiriä suojaamaan roiskeilta. Varmistetaan, että lähellä on käytössä puhdasta vettä tai silmähuuhdonta-apulloja silmiin menneiden roiskeiden varalle.</p> <p>Pumppu ja sekoittajat asennetaan tasaiselle alustalle ja huomioidaan sekoittimiin annosteltavien kuiva-aineiden turvallinen käsittely. Varataan suursäkkien käsittelylle alue, jossa ei ole tarvetta henkilöiden työskennellä ja nostot voi tehdä turvallisesti. Taakan alle ei saa mennä. Sijoitetaan 25 kg säkit siten, että ne voidaan nostaa turvallisesti sekoittimille.</p> <p>Grouting concrete is harmful if it gets on the skin or in the eyes. Long-sleeved work clothes, masks chemical-resistant work gloves and adequate eye protection are used during grouting concrete production, casting and washing. If necessary, a visor covering the face can be used to protect against splashes. Make sure that clean water or eye wash bottles are available nearby in case of splashes in the eyes.</p> <p>The pump and the mixers are installed on a flat surface and the safe handling of the dry materials dosed into the mixers is taken into account. An area for handling large bags is reserved, where there is no need for people to work and lifting can be done safely. You must not go under the burden. Place the 25 kg sacks in such a way that they can be safely lifted onto the mixers.</p>
--	---

Kuva 11. Työsuunnitelman työturvallisuushuomioita englanniksi (KSBR, 2023b)

Erilaisia nostotöitä varten käytössä on hydraulisella nostimella varustettu traktori. Nostotyötä tehdessä tulee olla erityisen tarkkana, ettei taakan alle mennä. Betonimassan pumppaamisen käytetään Putzmeister P270 liikuteltavaa betonipumppua, massan sekoittajina toimivat kaksi Baron F300 taseosekoitinta eli ruuvia. Pumppu ja sekoittajat tulee asentaa tasaiselle kantavalle alustalle. Pumpauslinjassa käytetään yleisesti betonin pumppaukseen soveltuvia letkuja. (Keski-Suomen Betonirakenne, 2023a). Laastivalmistaja BASF suosittelee letkulinjan ollessa alle 10 metrin mittainen käyttämään sisähalkaisijaltaan 25 mm letkua ja 10 – 25 m pumppauslinjassa 35 mm letkua. Yli 25 metrin päähän pumppaamiseen suositellaan 50 mm letkua. (Master Builders Solution, 2020, 15).

### 5.1 Olosuhteet ja niihin varautuminen

Kesäaikaan tehtävät betonityöt vaativat työmaalta aktiivista seurantaan betonirakenteen lämmönkehityksen suhteen. Työsuunnitelmassa juotosbetonointi suositellaan tekemään alle +20C- asteen ulkolämpötilassa, massan työstettävyys heikkenee merkittävästi sen lämpötilan noustessa yli +25C- asteen. Betonimassan lämpötilaan vaikuttavat ulkolämpötilan lisäksi alla olevien rakenteiden ja muotien ym. lämpötila. (KSBR, 2023b).

### 5.2 Valmistelevat työt ja muottityöt

Kohteessa käytettävät teräsmuotit käsitellään muottiöljyllä ja kiinnitetään pultein ja mutterin suunniteltuihin paikkoihin. Muotin alareunaan asennetaan tiivistenauha- tai kumi. Lisäksi tarkistetaan vielä kerran, että asennettu muotti vastaa perustussuunnitelmissa esitettyjä mittoja. (Keski-Suomen Betonirakenne, 2023a).

Pumppauslinjan letkut esikäsitellään voiteluvaluna, siihen voidaan käyttää Plus-sementtiä, jonka massa tehdään erillisessä astiassa. Tällä varmistetaan massan jouheva liikkuminen linjastossa varsinaisessa valutyössä. (Keski-Suomen Betonirakenne, 2023a).

Valmistelevina töinä tehdään mallityö, jotta varmistutaan sekä työtavasta että juotosmassan leviämisestä. Paineenjakolevyn alareunaan sekä sisä- että ulkopuolelle liimataan 10 - 12 mm korkeakruunu-tiiviste. Valupinnat kostutetaan ennen juotosvalua, mutta vettä ei saa jäädä seisomaan. Tarvittavat massamäärät ja pumppauskalusto letkuineen sekä varakalusto tarkistetaan ennen töiden ryhtymistä. Työnjohtaja tarkistaa erityisesti myös työhön osallistuvien suojavarustuksen. Koekappaleiden muotit tulee myös tarkistaa epäpuhtauksista ja öljytä. (Keski-Suomen Betonirakenne, 2023a).

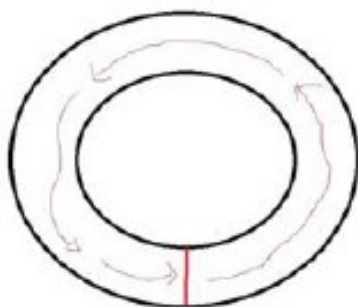
### 5.3 Massan valmistus ja juotosbetonointi

Juotosmassa valmistetaan laastivalmistajan ohjeiden mukaisesti, esimerkiksi laastivalmistajan BASF Masterflow 9300- käyttäen. Suuntaa antava tarvittavan juotosbetonin määrä erääseen Lestijärven tuulivoimalan perustukseen: 6300 kg Masterflow 9300-kuivalaastia ja 550 litraa vettä. Käytännössä massa valmistetaan erissä sekoittimeen, kuten kuvassa 10. ohjeistetaan. Betonimassan sekoitusaika on n. 7 minuuttia.

<b>JUOTOKSEN TOTEUTUS/ GROUTING WORKS</b>	<p>Juotostyöt suoritetaan BASF:n ohjeita noudattaen.</p> <p><b>Juotosmassan valmistusohje per sekoitus:</b></p> <p><b>-MasterFlow 9300:</b>  -A: 1 kpl 25kg säkkiä ja 1 kpl 400kg säkki  -B: 1 kpl 25 kg säkkiä ja 1 kpl 500kg säkki</p> <p><b>-Vettä:</b>  Vettä käytetään 2,0 – 2,25 litraa / 25 kg  -A: 34 - 38,3 litraa  -B: 42 – 47,3 litraa</p> <p><b>-Sekoitusaika: n. 7 min</b></p>
---	---

Kuva 12. Sekoituserän valmistus KSBR:n työsuunnitelman mukaan

Linjastoa pumpataan betonimassalla erilliseen astiaan niin kauan että voitelumassa muuttuu varsinaiseksi betonimassaksi. Tämän jälkeen varsinainen työvalu eli juottaminen voi alkaa. Letku ohjataan muottiin. Juottaminen tehdään yhdeltä puolelta alusta loppuun. Juotoksen alkupäähän voidaan asettaa kuvan 12 mukaisia stoppareita 1-4 kpl, jota vasten aloitus tapahtuu. Stoppareiden avulla saadaan juotosmassa kiertämään muottia yhteen suuntaan. Tällä vältetään betonimassan muotissa kahteen suuntaa kiertäminen mikä taas estää massojen kohdatessa syntyviä ilmataskuja ja auttaa massan hallitussa leviämisessä. Ilmataskut heikentävät betonirakenteen lujuutta merkittävästi. Tällä estetään myös massan erottumista.



Kuva 13. Stopparilevy ja massan yhdensuuntainen kierto muotissa. (KSBR, 2023b).

Juottamista jatketaan yhtäjaksoisesti ilman katkoja ja taukoja, kunnes tavoiteltu valukorkeus saavutetaan. Valun etenemistä tulee jatkuvasti seurata pulttikehän ulko- ja sisäpuolelta, että paineenjakolevyn alapuoli täyttyy. Juotosvalua tulee jatkaa, kunnes valupinnan taso on 10 mm paineenjakolevyn alapinnan päällä. Valun päätyttyä levitetään jälkihoitoaine ja valu peitetään tarvittaessa. Valun aikana pidetään juotospöytäkirjaa. (KSBR, 2023b).

#### 5.4 Laadunhallinta

Koekappaleita tehdään niihin varattuihin muotteihin 5 kpl per perustus. Valua seuraavana päivänä koekappaleet irrotetaan muoteista paineilman avulla ja siirretään vesihauteeseen. Yhdelle koekappaleista tehdään puristuslujuustesti 7 päivän ikäisenä. 3 kpl koekappaleista tehdään vastaava testi 28 vuorokauden kuluttua euronormien mukaan. Viides koekappale jää varalle. Lujuusluokitus tulee olla 28 vuorokauden jälkeen vähintään C90/105. Puristuslujuustestit teetetään ulkopuolisella toimijalla ja niiden tulokset dokumentoidaan mittauspöytäkirjaan. (KSBR, 2023b).

Juotoksen leviämätesti tehdään ennen valun aloittamista betonoinnissa käytettävälle massalle. Materiaalitoimittaja toimittaa kuivalaastin lisäksi mittauslevyn. Leviämä tulee olla vähintään 230 mm, tavoitteena 250 mm, tulokset kirjataan mittauspöytäkirjaan. (KSBR, 2023b).

## 6 KEHITYSTYÖ

Lestijärven työmaalla laitetoimittaja on Siemens Gamesa ja tilaaja on valinnut paineentasausslevyn käyttöönoton kohteessaan, joten kehitystyö painottuu tämäntyyppiseen tuulivoimalan ja perustuksen väliseen rakenteeseen. Opinnäytetyön kirjoittaja on osallistunut lukuisiin Siemens Gamesa- tuuliturbiinin perustuksen urakointiin työnjohtajan roolissa. Muiden turbiinilaitevalmistajien, kuten teoriaosuudessa esitellyn Vestaksen juotosbetonoinnista ei ollut saatavilla dokumentoitua tietoa käytännön kokemuksista työmaalla, vaikka osa työryhmästä olikin aiemmin myös sellaisia urakoineet. Työnjohto ja tilaaja olivat aiemmin pohtineet olisiko mahdollisesti eri laitevalmistajien ohjeissa ja niiden esittämissä työtavoissa jotain hyödyllistä tietoa tuulivoimalan perustuksen osien juotosbetonointiin ylipäätään.

Tietoa paineentasausslevyn juotosbetonointiin kerättiin tuuliturbiinin laitevalmistajien ohjeista sekä juotosbetonimassaan käytettävän laastin valmistajan käyttöohjeista. Kerättyä tietoa verrattiin sekä KSBR:n työmaalla käytettävään työsuunnitelmaan sekä opinnäytetyön kirjoittajan Lestijärven tuulivoimalatyömaalla tehtyihin havaintoihin paineentasausslevyn juotosbetonoinnista. Havaintoja kirjattiin työvaiheen jälkeen sekä työmaapalavereissa, joissa myös muu työnjohto ja työn suorittajat antoivat kommentteja.

Tuuliturbiinin laitevalmistajan sekä kuivalaastin valmistajan ohjeista kerättiin vain juotosbetonointiin oleellisesti liittyvää aineistoa, eikä kaikkea niiden sisältämää ohjeistusta ollut tarpeellista tutkimustyön näkökulmasta esitellä.

Työmaalta kerätyt havainnot painoutuivat käytännön haasteisiin eri työvaiheista, joista oleellisimmat nostettiin esille mukaan tutkimustyöhön. Työmaahavaintojen merkitystä korostaa se, että pääosin sama työryhmä ja työnjohtajat ovat tehneet kymmeniä samanlaisia juotosbetonointeja Lestijärven työmaalla. Monet samat haasteet erinäisissä työvaiheissa ovat toistuneet kerta toisensa jälkeen.

Toimivalla työsuunnitelmalla hallitaan ja pienennetään juotostyön laadullisia riskejä sekä pyritään saavuttamaan resurssiviisas ja turvallinen työsuoritus. Päivitetyssä työsuunnitelmassa on huomioitu työvaiheissa työmaalla todetut haasteet ja annettu käytännön ohjeita niiden ratkaisemiseen.



## 7 TYÖSUUNNITELMAN KEHITYSTYÖN TULOKSIA

### 7.1 Työn haasteet

Sekä Siemens Gamesan, Vestaksen ja laastivalmistajan BASF:n ohjeet antavat juotostyölle erittäin hyvän perustan. Sekä Siemens, että Vestas viittaavat omissa ohjeissaan useasti laastivalmistajan ohjeisiin varsinaisen juotostyön suorittamiseen. Ohjeita noudattamalla saadaan juotostyön perusasiat kuntoon. Työn haasteet havaitaan luonnollisesti helpoiten työmaalla työsuorituksen aikana. Työn suunnittelun ja työn suoriutumisen onnistumista voidaan mitata vertaamalla kulunutta työaika ja kaikkien materiaalin menekkiä suunniteltuun.

### 7.2 Korkealujuusmassat ja lämmönhallinta

Työhön soveltuvia turbiinilaittevalmistajan hyväksymiä kuivalaasteja on useita. Sekä Siemens Gamesan, että Vestas hyväksyvät BASF:n laasteja. Laastivalmistajan 9000- sarja on kehitetty nimenomaan tuulivoimaloiden rakenteissa käytettäväksi. Master Flow 9200 ja 9300 ovat suunniteltu maalla ja Master Flow 9500 merellä olevaan tuulivoimalaan, Master Flow 9200 on suunniteltu nimenomaan Vestas- tuuliturbiinin perustuksille (Master Builders Solution, 2017). Keski-Suomen Betonirakenne käytti myös Master Flow 9300- laastia Siemens Gamesan tuulivoimalakohteissa.

Työmaalla yleiseksi haasteeksi koettiin juotettavan betonimassan lämmönhallinta, työstettävyys ja lujuuden kehitys. Juotostyötä tehtiin Lestijärven työmaalla kesäaikaan, joten lämpötilat olivat korkeita. Sekä laastivalmistajan, että kummankin turbiinivalmistajan ohjeissa mainitaan, että juotosbetonointi alkaa olla haastavaa yli +20 C- asteen olosuhteissa. Nykyisessä KSB:n työohjeessa on todettakin +20C ulkolämpötilan tekevän betonoinnista haastavaa lämmönhallinnan vuoksi, joten valutyön tekoa tuolloin on pyrittävä ohjeen mukaan välttämään mahdollisuuksien mukaan. Mahdollisuus on suorittaa työvaihe ilta- ja yöaikaan, mutta tämä johtaa työvuoroaasteisiin ja työmaan rytmitykseen. Lisäksi illasta ja yöstä johtuva normaali väsymys nostaa työvirheiden riskiä.

Korkeassa lämpötilassa massan juoksevuus heikkenee, mikä vaikeuttaa tasalaatuisen valun tekemistä muottiin. Tämä kasvattaa sekä havaintojen ja että ohjeiden mukaan ilmataskujen jääntiä rakenteeseen. Massaan pystyy lisäämään vettä, mutta laastivalmistajilla on yläraja veden osuudelle massassa. Tämän vuoksi työsuunnitelmaan lisätään ohjeita muunlaiseen työmaalla tapahtuvaan lämmönhallintaan, kuten kuva 12 osoittaa.

Päivitettyyn työsuunnitelmaan on kerätty ohjeita lämmönhallintaan, joita aiemmin ei näin laajalti ole ollut. Kaikissa sääolosuhteissa tarkistetaan ulkolämpötilan lisäksi muita lämpötiloja. Laserlämpömittarilla on helppo ja nopea tarkistaa pistemäisesti pintalämpötiloja. Oleellista on mitata perustuksen, paineentasausslevyn ja muotin lämpötilan seuranta. Juotosbetonissa käytettävän veden lämpötilan mittaamiseen kannattaa käyttää jatkuvasti vedessä olevaa vesilämpötilamittaria, vesi ei saa olla kuitenkaan alle +5C. Jään lisääminen betonimassassa käytettävän veden kylmänä pitämiseen tulee käyttää harkiten. Jääpalat ja jäämurska voivat päätyä betonirakenteeseen heikentäen sen lujuutta. Kylmällä vedellä voidaan kuitenkin huoletta jäähdyttää betonimassan kanssa tekemisessä olevaa kalustoa ja pumppausletkua sekä muitakin varsinaisia rakenteita. Valettavassa muotissa ei saa kuiten-

kaan olla seisovaa vettä. Päivitettyyn työsuunnitelmaan lisättiin keinoja lämmönhallintaan sekä kylmässä että lämpimässä ulkolämpötilassa. Rakenteen lämmönseuranta voisi mahdollisesti seurata siihen tarkoitetuilla loggereilla.

Alle +10C olosuhteet	Yli +20 C olosuhteet
Tarkista rakenteiden lämpötila mittarilla, jos alle +3C → lämmitä ja pidä yli +5 C. Käytä termostaattilla varustettuja lämmitysmattoja sekä eristemattoja / sääsuojaa	Tarkista rakenteiden lämpötila, jos yli +25C ei voi valaa. Suojaa työalue auringonpaahteelta. Kastele viileällä vedelle pumppauskalustoa, letkuja ja rakenteita.
Kuivalaastin säilyttäminen vähintään +10C - lämpötilassa	Kuivalaastin säilyttäminen viileässä paikassa, auringolta suojattuna.
Lämpimän veden käyttö betonimassassa, kuitenkin alle +25C	Kylmän veden käyttö betonimassassa, kuitenkin yli +3C.
Rakenteen jatkuva lämmönseuranta <u>loggereilla</u>	Rakenteen jatkuva lämmönseuranta <u>loggereilla</u>

Kuva 14. Kuva lämmönhallinnan ohjeista. (Paananen, 2024)

Koska asianmukaiseen juotosbetonointiin on tarjolla muitakin kuivalaasteja kuin Masterflow 9300, voisi muidenkin valmistajien tuotteita harkita. Tuotetta ei voi vaihtaa työnjohdon päätöksellä vaan se tulee sopia työmaan tilaajan ja mahdollisesti laitevalmistajankin kanssa. Mikäli mahdollista muilla juotosbetonimassoilla voisi tehdä koevaluja, jonka avulla saattaisi löytyä lämmönhallinnan kannalta parempi massa.

### 7.3 Paineentasauslevyn tasaaminen

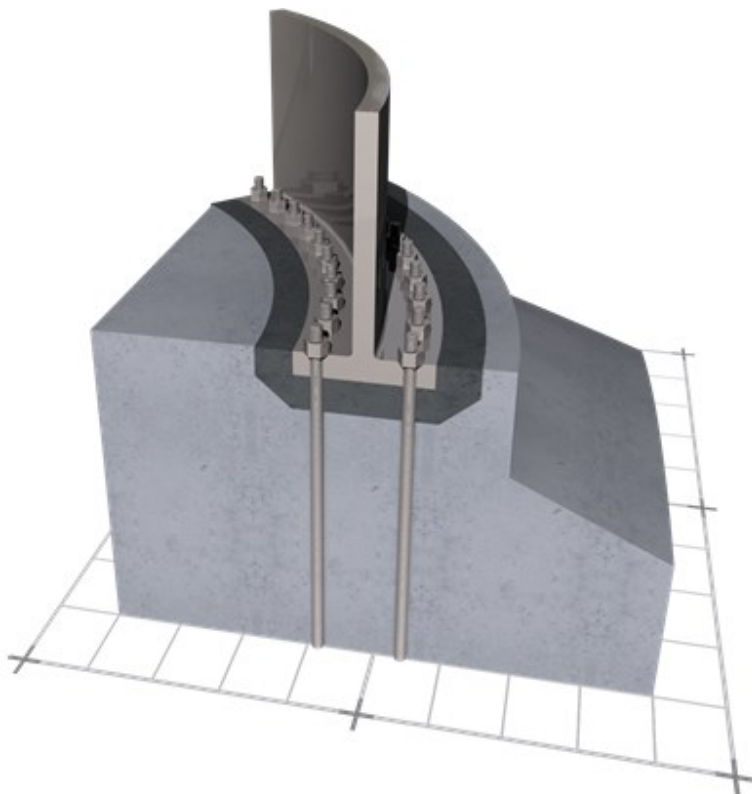
Siemens Gamesan ohjeessa paineentasauslevyn säätöjalat neuvotaan laittamaan pulttikehälle pulttien väliin. Käytännössä tämän toteuttaminen on hankalaa kahdestakin syystä. Ensinnäkin tasausvalun tekeminen säätöjalan alle keskelle pulttiriviä on ylimääräinen työvaihe, ilman tätä jalkoja ei saada suoraan tai tukevaksi. Toiseksi, mikäli säätöjalka asetetaan pulttirivin keskelle, on sekä lukko- että säätömuttereiden kiertäminen hankalaa liian pienen työtilan vuoksi, työkalut ja kädet eivät mahdu kunnolla kääntämään muttereille. Tasainen pinta jalan asettelulle löytyy pulttikehän sisä- ja ulkokehältä sen viereltä (kuva 15). Säätöjaloista (12 kpl) joka toinen asetellaan sisäkehälle ja joka toinen ulkokehälle, jolloin säätyötyö on huomattavasti helpompaa ja nopeampaa.



Kuva 15. Pulttikehän säätöjalka pulttikehän sisäpuolella vierellä. (Paananen, 2023)

#### 7.4 Kaulusmuotiton juotosbetonointi

Vestaksen perustuksen juotosbetonointi poikkeaa Siemens Gamesan vastaavasta työvaiheesta siten, että Vestas tarjoaa vaihtoehtoa, jossa peruslaatan valun yhteydessä asetellaan vaahtomuovista valmistettu muotti peruslaatan yläosaan. Peruslaatan valun jälkeen muotti poistetaan, jolloin juotosbetonointi voidaan tehdä tähän valliin eikä kaulusmuottia tarvita. Vestaksen ohjeesta ja kuvasta poiketen myös paineentasauslevy voitaisiin juottaa tällaiseen valliin (kuva 14.). Tämä mahdollisesti olisi nopeampi ja helpommin hallittava tapa kuin erillisen kaulusmuotin käyttäminen, jossa tulee huolehtia mm. sen tiiveydestä ja asettelusta. Tätä vaihtoehtoa nykyiselle muottityölle ei lisätty työsuunnitelmaan, mutta sen käyttömahdollisuutta tulisi pohtia.



Kuva 16. Juotos valmiina muotin avulla tehtyyn valliin (Vestas, 2017)

#### 7.5 Juotostöiden työsuunnitelma

Työmaalla tehtyjen havaintojen perusteella juotostöiden työsuunnitelma on päivitetty kehitystyön lopputuloksena. Suunnitelmaa voidaan käyttää erinomaisesti voimalakohteissa, joissa on käytössä paineentasauslevy, johon voimalan alin tornilohko kiinnitetään. Työsuunnitelma otetaan käyttöön opinnäytetyön tilaajayrityksessä Keski-Suomen Betonirakenne Oy:ssä. Se jää yrityksen haltuun eikä sitä julkaista yleiseen jakeluun.

## 8 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli päivittää tuuliturbiinin perustuksen paineentauslevyn juotosbetonoinnin työsuunnitelmaa ohjeiden ja käytännön kokemuksen avulla. Sekä työmaalla kerätyt käytännön havainnot että ohjeet auttoivat työsuunnitelman kehitystyössä paljon.

Perustuksen sisässä oleva pulttikehikko siirtää tornin kuormia perustukseen, joten pulttikehikon paineentauslevyn onnistunut juotosbetonointi on erittäin tärkeää koko rakenteen toimivuuden kannalta. Juotosbetonoinnin lämmönhallinta osoittautui haasteeksi Lestijärven työmaalla, siten että massan korkea lämpötila oli huolenaiheena. Massan notkeus ja työstettävyyys heikkenee lämpötilan noustessa mikä voi johtaa ilmataskuihin sekä rakenteen huonoon lujuudenkehitykseen. Tämän vuoksi työsuunnitelman päivittäminen oli tärkeää lämmönhallintaan liittyvien ohjeiden kannalta. Nähtäväksi jää kuinka hyvin betonimassan lämmönhallinnan ohjeita voidaan työmaalla käytännössä toteuttaa. Muut asiat jäivät hieman lämmönhallintaan liittyvien asioiden varjoon. Työmaahavaintoja tulisi jatkossa kirjata herkemmin, sekä selvittää saisiko työvaiheisiin työsuunnitelman avulla lisää toistettavissa olevaa tehokkuutta.

Päivitetty työsuunnitelma saatiin tavoitteen mukaan tehtyä. Se on edeltäjään laajempi, joten sen omaksuminen ja käyttöönotto vaatii alkuvaiheessa ponnisteluja työnjohdolta ja työryhmältä. Osaa kehitysideoista ei voinut lisätä työsuunnitelmaan vaan ne vaativat jatkoselvittelyä, kuten kuivalaastien vertaaminen kokeilemalla ja Vestaksen peruksessa käytettävän muotin soveltaminen Siemens Gamesan paineentauslevyn betonointiin. Mikäli muiden tuuliturbiinivalmistajien juotosvaluista olisi tarjolla työmaalta dokumentoituja havaintoja olisivat myös haasteet niissä mahdollisesti erilaisia, mutta osaa opinnäytetyön kehitystyöstä voidaan varmasti hyödyntää esimerkiksi Vestaksen tuuliturbiinityömaalla. Työsuunnitelman käyttöönottoa ja toimivuutta tulisi seurata seuraavalla vastaavanlaisella työmaalla, sekä päivittää jälleen tarvittaessa.

Opinnäytetyön kirjoitusprosessi ja työsuunnitelman päivittäminen auttoivat hahmottamaan työmaalla koettuja haasteita ja oppimista. Vaikka työvaiheiden haasteet saatiin ratkaistua työmaalla eivät ne olisi jääneet mieleen ilman dokumentointia seuraava haaste kohdatessa. Ammatillinen kehittyminen muun muassa juotosbetonoinnin suhteen olisi jäänyt alemmalle asteelle ilman opinnäytetyöprosessia, vaikka työmaalla työnjohtotehtävissä aiheeseen konkreettisesti perehtyikin.

## LÄHTEET

- Keski-Suomen Betonirakenne 2023a. Yrityksen verkkosivut. <https://ksbr.fi/yritys/>. Viitattu 25.9.2023
- OX2 2021a. Yrityksen tiedote. <https://www.ox2.com/fi/suomi/ajankohtaista/tiedotteet-ja-uutiset/ox2-ostaa-yitlta-suomen-suurimman-tuulivoimahankkeen>. Viitattu 25.9.2023
- OX2 2021b. Hankkeet, Lestijärvi. <https://www.ox2.com/fi/suomi/hankkeet/lestijarvi/>. Viitattu 25.9.2023
- Suomen tuulivoimayhdistys, 2024. Yleistä merituulivoimasta. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/merituulivoima/yleista-merituulivoimasta>. Viitattu 12.3.2024
- Suomen Tuulivoimalayhdistys 2022. Tuulivoimaloiden rakenne. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>. Viitattu 10.10.2023
- Suomen Tuulivoimalayhdistys 2023. Tuulivoima Suomessa 2022. [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot\\_2022-1.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2022-1.pdf). Viitattu 12.3.2024.
- Betoni yhdistys 2023a. Betoniteollisuus. <https://www.betonitieto.fi/betoniteollisuus.html>. Viitattu 2.2.2024
- Betoni yhdistys 2023c. Betonin tilaus, toimitus ja vastaanotto. <https://www.betonitieto.fi/betoniteollisuus/valmisbetoni/betonin-valinta-ja-toimitus/betonin-tilaus-toimitus-ja-vastaanotto.html>. Viitattu 2.2.2024
- Betoni yhdistys 2023b. Betonin valmistus. <https://www.betonitieto.fi/betoniteollisuus/valmisbetoni/betonin-valmistus.html>. Viitattu 12.3.2024
- Betoni yhdistys 2024d. Betonin notkeus. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/tuoreen-betonimassan-ominaisuudet/notkeus.html>. Viitattu 14.3.2024
- Siemens Gamesa 2022a. Grouting Guideline. Dokumentti tilaajan hallussa.
- Siemens Gamesa 2022b. User Manual of Levelling Legs for grouting. Dokumentti tilaajan hallussa
- Lehtonen M. 2022. Diplomityö. Tuulivoimalaloiden gravitaatioperustusten suunnittelu.
- Vestas 2017. Grouting for anchor cage. Dokumentti tilaajan hallussa
- Keski-Suomen Betonirakenne 2023b. Tehtäväsuunnitelma. Dokumentti tilaajan hallussa.
- Master Builders Solution, 2020. Käyttöohje. Installation Guide for MASTERFLOW 9300. <https://mbcc.sika.com/en-vn/download-area?page=3>. Viitattu 2.2.2024
- Master Builders Solution, 2014a. Esite. Masterflow 9300 – erittäin kestävä laasti maalla oleviin tuuliturbiinien perustuksiin. <https://mbcc.sika.com/fi-fi/products/masterflow/masterflow-9300>. Viitattu 14.3.2024
- Master Builders Solution, 2014b. Esite. Masterflow 9300 – jälkivalumassa kestää rasitusta: tutkimustulokset
- Master Builders Solution, 2017. Uutistiedote. <https://www.basf.com/hk/en/media/news-releases/jp/2017/07/MFlow-launch.html>. Viitattu 16.2.2024
- Villa Hirvi 2011. Rakentamisen blogi. <https://lakkahirvikallio.blogspot.com/2011/09/juotosvalu.html>. Viitattu 11.3.2024