Tuulivoimalaperustuksen laadunhallinta

LAB-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK), Rakennustekniikka, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus
2021
Mikko Kotro

Tiivistelmä

Tekijä(t)	Julkaisun laji	Valmistumisaika
Kotro, Mikko	Opinnäytetyö, AMK	2021
	Sivumäärä 39	

Työn nimi

Tuulivoimalaperustuksen laadunhallinta

Tutkinto

Insinööri (AMK)

Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio

Teemu Kemppe, Projektipäällikkö DI, Keski-Suomen Betonirakenne Oy (KSBR)

Tiivistelmä

Insinöörityössä käsiteltiin laadun määritelmää rakentamisessa, tuulivoimalaperustuksen laatuvaatimuksia määrittäviä tekijöitä sekä vaatimukset täyttävän perustuksen rakentamista ja todentamista. Työn tarkoituksena oli koota olennaista tietoa vaatimukset täyttävän gravitaatioperustuksen rakentamisen prosessista aina suunnittelun perusteista laadun todentamiseen ja olla hyödyllinen tuulivoimarakentamista aloittelevalle.

Työn toimeksiantaja oli Keski-Suomen Betonirakenne Oy, jonka ydinosaamiseen kuuluu massiiviset betonirakenteet sekä tuulivoimainfran kokonaistoimitukset. Työssä käytettiin apuna tuulivoimateollisuuden kirjallisuutta, sille ominaisia suunnittelustandardeja ja -ohjeita sekä rakennusalan kirjallisuutta ja internet-sivuja. Opinnäytetyö tarjoaa selkeän kuvauksen tuulivoimalaperustuksen laadunhallinnan prosessista, sekä käytännössä hyväksi todetuista toimintatavoista.

Asiasanat

laadunhallinta, tuulivoimalaperustus, tuulivoima, betonirakenteet, betonitekniikka, tuuliturbiini, gravitaatioperustus

Abstract

Author(s)	Type of Publication	Published
Kotro, Mikko	Thesis, UAS	2021
	Number of Pages	
	39	

Title of Publication

Quality management of wind turbine foundation construction

Name of Degree

Engineer (UAS), Civil and Construction Engineering

Name, title and organization of the client

Teemu Kemppe, Project Manager M.Sc. (Tech.), Keski-Suomen Betonirakenne Oy (KSBR)

Abstract

In this thesis is presented the definition of quality in construction, the factors determining the quality requirements of a wind turbine foundation, and the construction and verification of a foundation that meets the requirements. Purpose of the thesis was to gather essential information regarding the process of constructing a wind turbine gravity foundation that meets the requirements, from design principles and requirements to quality verification and to be useful for anyone starting in the wind power construction industry.

This thesis was commissioned by Keski-Suomen Betonirakenne Oy. The company's core competencies include the construction of massive concrete structure as well as turnkey construction of wind farm infrastructure.

Keywords

quality management, wind turbine foundation, wind power, concrete structures, concrete technology, wind turbine, gravity foundation

Sisällys

1 Johdanto ... 1
2 Tuulivoimala ... 2
2.1 Voimalaitos ... 2
2.2 Roottori ... 3
2.3 Konehuone ... 3
2.4 Tornirakenteet ... 3
2.5 Tuulivoimalaperustus ... 3
3 Tuulivoimalaperustusten rakentamista sekä suunnitteluja ohjaavat lait, standardit ja ohjeet ... 5
3.1 Rakennuslainsäädäntö Suomessa ... 5
3.2 Standardit ja ohjeet ... 5
3.2.1 SFS-EN ... 6
3.2.2 IEC ... 6
3.2.3 DNV GL ... 6
3.2.4 Betoninormit 2016, by 65 ... 7
4 Perustussuunnittelu ja sen periaatteet ... 8
4.1 Seuraamus-, toteutus- ja toleranssiluokat ... 8
4.2 Käyttöikä- ja rasitusluokat ... 9
5 Laatu ... 10
5.1 Rakentamisen laatu ... 10
5.2 Laatuvaatimukset ... 10
5.3 Laadunvarmistus työmaalla ... 11
5.4 Laadunhallinnan työkalut ... 12
5.4.1 Laatusuunnittelu ... 12
5.4.2 Valvonta, mallityöt ja tarkastukset ... 13
5.4.3 Kokeet ja mittaukset ... 13
5.4.4 Dokumentointi ja AsBuilt -aineisto ... 14
6 Materiaalien laadunvarmistus ... 15
6.1 Betoniteräkset ... 15
6.2 Valmisbetoni ... 16
6.3 Lujuudenkehitys ja sen seuranta ... 18
7 Ankkuripulttikehän asennus ja raudoitustyöt ... 20
7.1 Ankkuripulttikehä ... 20
7.2 Raudoitus ... 21

8 Betoni- ja muottityöt 25
8.1 Betonitöiden valmistelu ja suunnittelu 25
8.2 Muottityöt 26
8.3 Betonin kuljetus ja vastaanotto 27
8.4 Tuoreen betonin tutkiminen työmaalla 28
8.5 Betonointi 28
8.6 Jälkihoito 29
8.7 Talvibetonointi 30
8.8 Lämmönkehitys ja sen seuranta 31
8.9 Juotosvalu 32
8.10 Perustuksen viimeistely 34
9 Yhteenveto ja pohdinta 36
Lähteet 38

1 Johdanto

Keski-Suomen Betonirakenne Oy eli KSBR, joka on toimeksiantanut tämän opinnäytetyön on vuonna 2004 perustettu paikallavalettuihin massiivisiin betonirakenteisiin erikoistunut rakennusliike. Yrityksen toimialat voidaan jakaa pysäköintilaitoksiin, erikois- ja teollisuusrakentamiseen sekä tuulivoiman infrarakentamiseen. KSBR toimittaa tuulipuistot pääsääntöisesti KVR-urakoina asiakkaille. Toimitettavaan kokonaisuuteen voi kuulua, puustonpoisto, maanrakennustyöt, perustustyöt, sähköasema laitteineen sekä puiston sisäinen sähkö- ja tietoliikenneverkko sisältäen suunnittelun ja toteutuksen. Toimituksen laajuus vaihtelee asiakkaan tarpeen mukaan.

Tämän opinnäytetyön aiheena on tuulivoimalaperustuksen laadunhallinta rakennusvaiheessa. Tuulivoimaloiden koon kasvaessa ja puiston rakentamisvaiheelle annetun ajan lyhentyessä laadunhallintaprosessin tuntemuksen tärkeys korostuu. Halutun laatutason saavuttaminen vaatii urakoitsijalta jatkuvaa suunnittelun ja töiden ohjausta, sekä ajantasaista dokumentointia toimintatavoista, käytetyistä materiaaleista sekä valmiiden rakenteiden suoritustasoista ja siten vaatimustenmukaisuudesta. Työ rajataan KSBR:n yleisimmin toteuttamaan tuulivoimalan gravitaatioperustukseen.

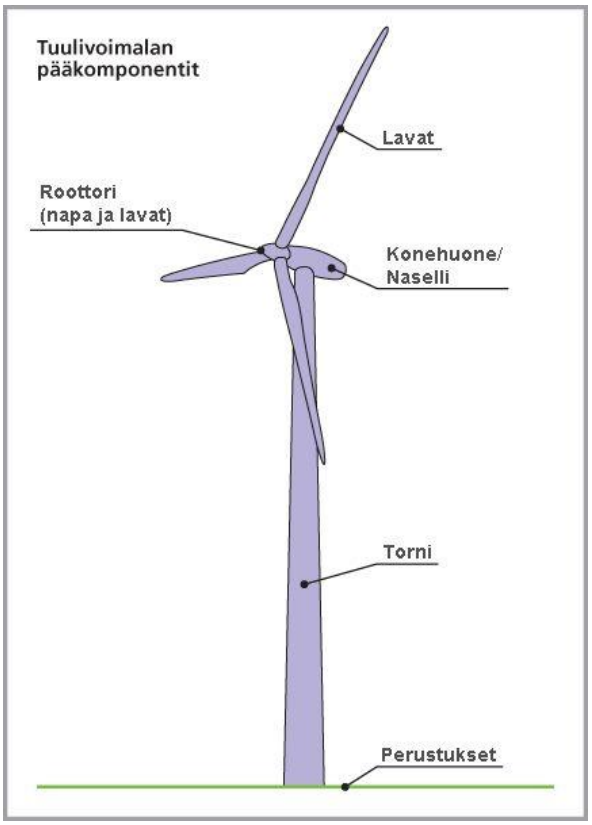
2 Tuulivoimala

2.1 Voimalaitos

Tuulivoimalaitos on roottorista, konehuoneesta, tornista sekä perustuksesta koostuva kokonaisuus, jonka avulla siirretään tuulen liike-energia lapojen avulla voimalan akseliin ja muutetaan edelleen generaattorilla sähköksi, jota syötetään sähköverkkoon.

Nykyaikaiset teollisen kokoluokan tuulivoimalat ovat kolmelapaisia ja vaaka-akselisia. Pienissä sovelluksissa on myös käytössä kaksilapaisia, sekä pystyakselisia voimaloita (Suomen Tuulivoimayhdistys ry).

Tuulivoimaloiden koko ja nimellisteho on kasvanut merkittävästi viime vuosikymmenten aikana. Maavoimaloiden koko on kasvanut 6000 kilowattiin ja merituulivoimaloiden yli 15 000 kilowattiin. Roottorin lapamääräksi on vakiintunut kolme, ja sen halkaisija vaihtelee 130 ja 160 metrin välillä. Suomessa suurimpien vuonna 2019 rakennettujen voimaloiden napakorkeus on 175 metriä. Nimellisteholtaan 10MW ylittävien merituulivoimaloiden rakenne on samantyyppinen, mutta yleisesti lavat ovat pidempiä ja torni matalampi. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry.) Kuvassa 1 on esitetty tuulivoimalaitoksen pääkomponentit.



Kuva 1. Tuulivoimalaitoksen pääkomponentit (Motiva)

2.2 Roottori

Vaaka-akselisen tuulivoimalan roottori koostuu navasta sekä lavoista. Roottorin lavat valmistetaan kevyistä komposiittimateriaaleista, kuten lasi- ja hiilikuidun sekä eri hartsien yhdistelmistä. Lapamateriaali, valmistusmenetelmä ja rakenne vaihtelee eri valmistajien sekä voimalatyyppien välillä. Uloimmat kerrokset koostuvat pääasiassa kuituvahvistetusta muovista ja lasikuidusta. Ydin voi sisältää myös puuta, esimerkiksi balsaa. (DNV/Risø 2002, 104–108.) Lavat toimivat myös laitoksen tehonsäätö- ja pysäytysmekanismina (Suomen Tuulivoimayhdistys ry). Napa yhdistää siivet akseliin. Monimutkaisesta muodosta ja siihen kohdistuvista rasituksista johtuen navan runko valmistetaan useimmiten valuraudasta (DNV/Risø 2002, 116).

2.3 Konehuone

Myös naselliksi kutsutussa konehuoneessa sijaitsee tuulivoimalan generaattori, voimansiirto, sekä säätö- ja ohjausjärjestelmät. Tuulivoimalan muuntaja voi sijaita voimalatyypin mukaan joko konehuoneessa tai tornin alaosassa. Konehuoneet valmistetaan pääosin teräksestä sekä lasikuidusta. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry.)

2.4 Tornirakenteet

Nykyaikaisissa tuulivoimaloissa torni valmistetaan pääsääntöisesti teräksestä. Tornirakenne koostuu putkimaisista lohkoista, jotka liittyvät toisiinsa sekä perustukseen pulttiliitoksin. Tuulivoimaloiden korkeuden kasvaessa alimman tornilohkon halkaisija voi kasvaa niin suureksi, ettei sen kuljettaminen voimalapaikalle ole kannattavaa tai edes mahdollista logistisista syistä. Muita vaihtoehtoja alimpien putkimaisten lohkojen tilalle ovat teräslevyistä kootut tornit tai osin betoniset, eli hybriditornit. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry.)

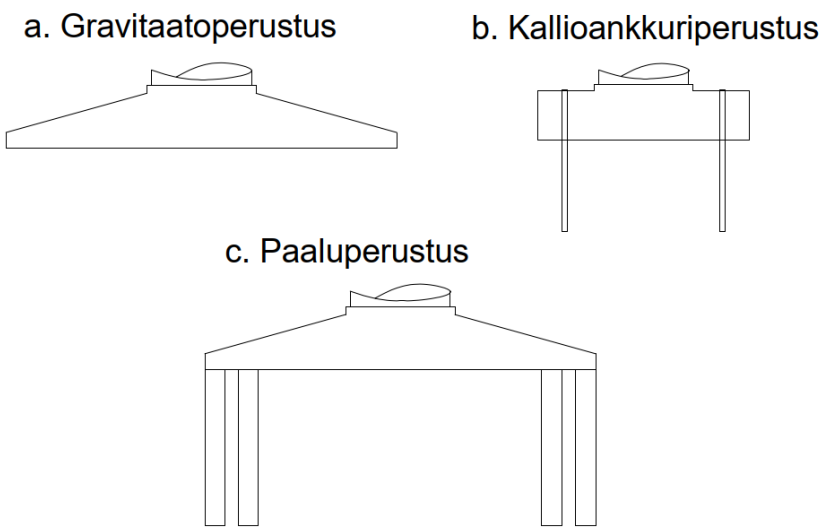
2.5 Tuulivoimalaperustus

Perustuksen tehtävä on välittää voimalasta johtuvat kuormat maaperään. Maalle rakennettujen tuulivoimaloiden yleisimpiä perustamistapoja ovat gravitaatioperustus, kallioankkuroitu perustus, sekä paaluperustus. Paikkakohtaiset pohjaolosuhteet useimmiten määrittelevät valittavan perustamistavan. (DNV/Risø 2002, 187.) Betonin ja raudoituksen lisäksi perustuksessa on olennaista myös tornin liittäminen betoniin, joka usein toteutetaan pulttiliitoksena ankkuripulttikehän avulla.

Gravitaatioperustus eli maanvarainen perustus on tuulivoimaloiden yleisin perustamistapa. Perustuksen pohjan muoto on usein ympyrä ja leikkaus reunoille oheneva. (Burton ym. 2011, 467).

Kallioankkuroidussa perustuksessa esijännitetyt ankkurit sitovat juotoksen välityksellä kallion stabiloivaksi kalliomassaksi. Kallioankkurointi vaatii erityisosaamista ja on siksi harvinaisempi perustamistapa (Burton ym. 2011, 468). Ankkurointi mahdollistaa kuitenkin huomattavan säästön betonin sekä raudoituksen määrässä, ja on siksi tarkasteltava vaihtoehto kallion ollessa lähellä maanpintaa.

Pohjaolosuhteiden ollessa huonot, paaluperustus voi säästää materiaaleja ja olla ainoa mahdollinen perustamistapa. (Burton ym. 2011, 468.) Paalut siirtävät kuormitukset syvälle maaperään suotuisten pohjaolosuhteiden lähelle. (DNV/Risø 2002, 187.) Kuvassa 2 esitetään yleisimpien perustamistapojen yksinkertaistetut poikkileikkaukset.



Kuva 2. Yleisimpien perustamistapojen yksinkertaistetut poikkileikkaukset

Kuvan 2 kohta a. esittää työssä käsiteltävän gravitaatioperustuksen poikkileikkausta. Perustuksen ja tornin mittojen suhteet, sekä perustuksen geometria voi vaihdella paljon turbiinivalmistajasta, perustuksen suunnittelijasta sekä perustamistavasta riippuen.

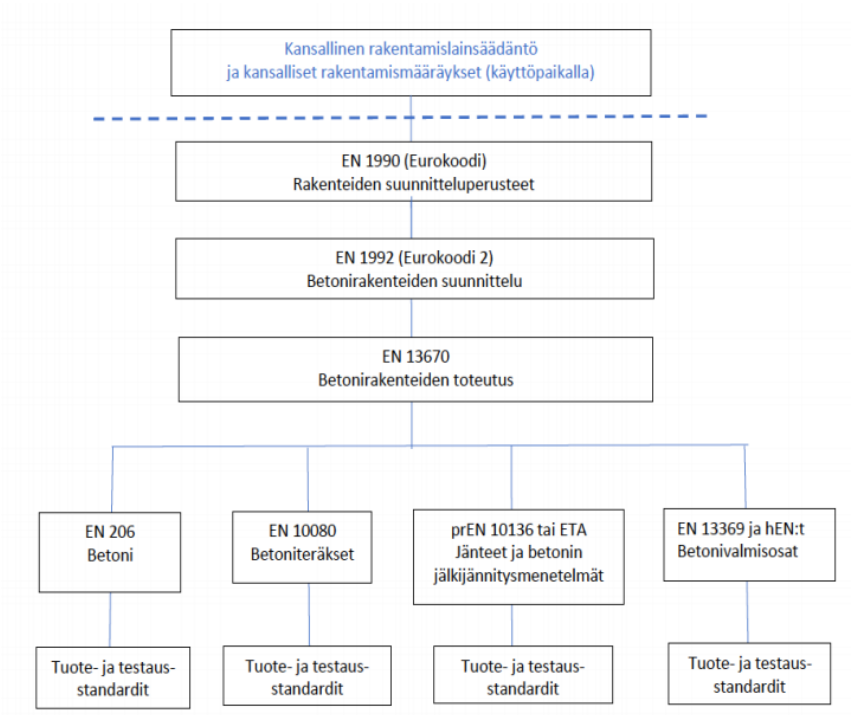
3 Tuulivoimalaperustusten rakentamista sekä suunnitteluja ohjaavat lait, standardit ja ohjeet

3.1 Rakennuslainsäädäntö Suomessa

Maankäyttö- ja rakennuslaki määrittelee rakentamisen yleiset edellytykset, tekniset vaatimukset sekä lupamenettelyn ja viranomaisvalvonnan. Suomen rakentamismääräyskokoelmaan on koottu tarkemmat asetuksena annetut säännökset sekä ministeriön ohjeet. Rakentamismääräyskokoelma määrittää suunnittelutehtävien sekä työnjohtotehtävien vaativuusluokat. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 14.)

3.2 Standardit ja ohjeet

Tuulivoimaloiden suunnittelua ohjaa kansallisen rakentamislainsäädännön ja rakentamismääräysten lisäksi standardit sekä alakohtaiset suunnitteluohjeet. Seuraavissa alaotsikoissa on esitetty olennaisia standardeja ja ohjeita suunnitteluun ja toteutukseen. Kuvassa 3 on esitetty eurooppalaisen standardijärjestelmän pääkohdat. Tuulivoimalaperustuksiin sovelletaan kuitenkin myös kansainvälisiä standardeja ja ohjeita kuten mm. IEC 61400-1, joka on avattu luvussa 3.2.2.



Kuva 3. Eurooppalaisen standardijärjestelmän pääkohdat (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 15)

3.2.1 SFS-EN

Suomen standardisoimisliitto SFS ry on Suomen standardisoinnin keskusjärjestö. SFS vastaa standardisoinnista ja ylläpitää standardikokoelmaa Suomessa pois lukien sähkö- ja telealalla. (SFS ry 2021.)

Yleensä kantavan betonirakenteen voidaan katsoa täyttävän rakennuslainsäädännön ja -asetusten varmuustaso- ja säilyvyysvaatimukset, kun se on suunniteltu eurokoodien SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet, SFS-EN 1991 Rakenteiden kuormat ja SFS-EN 1992 betonirakenteiden sekä niitä koskevien kansallisten liitteiden mukaan. Paikallavalettujen rakenteiden toteutuksessa tulee noudattaa standardia SFS-EN 13760 Betonirakenteiden toteuttaminen, ja sen liitettä SFS 5975. Betonin vaatimuksenmukaisuus on todettava standardin SFS-EN 206 ja sen kansallisen liitteen SFS 7022 mukaisesti. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 15.)

Tuulivoimaloiden perustukset poikkeavat esimerkiksi rakennuksen kantavista betonirakenteista siten, että voimalakuormitukset tulevat tuulivoimalatoimittajalta, joista suurin osa on sertifioinut tuotteensa GL 2010 suunnitteluohjeen mukaisesti, jossa esitetään kuormituksien määrittämisperusteet.

3.2.2 IEC

IEC eli International Electrotechnical Comission on kansainvälinen sähköalan standardisointiorganisaatio. Organisaatio on laatinut tuulivoimaloiden yleissuunnitteluun standardin IEC 61400, jossa linjataan suunnittelun vähimmäisvaatimuksia, mutta sitä ei ole tarkoitettu täydelliseksi suunnittelu- tai käyttöohjeeksi. (IEC 61400-1, 2005, 5.)

3.2.3 DNV GL

DNV GL, maaliskuusta 2021 eteenpäin DNV, on norjalaisen Det Norske Veritaksen ja saksalaisen Germanischer Lloydin yhdistymisestä muodostunut klassifikaatiojärjestö.

Det Norske Veritaksen laatiman suunnitteluohjeen DNV/RISØ: Guidelines for Design of Wind Turbines tarkoituksena on kerätä tietoa tuulivoimaloiden suunnittelusta ja rakentamisesta. Teos perustuu Tanskan kansallisen Risø-laboratorion kokeellisten projektien ja käytännön suunnittelun tuloksiin ja kokemuksiin. Teoksen tarkoituksena on ollut tuottaa ohjeita erilaisten tuulivoimaloiden suunnitteluun, mutta sillä ei ole standardin asemaa. (DNV/Risø, 2002, I-V.)

GL 2010: Guideline for the Certification of Wind Turbines on Germanischer Lloydin laatima tuulivoimaloiden suunnitteluohje, joka toimii tulkintaohjeena IEC 61400-1 standardille ja

soveltuu tuulivoimaloiden suunnitteluun, hyväksyntään ja sertifiointiin. (Germanischer Lloyd 2010, 30.)

3.2.4 Betoninormit 2016, by 65

By eli Suomen Betoniyhdistys ry on julkaissut betoninormeja vuodesta 1977. Viimeisin sarjanumero By 65 julkaistiin Ympäristöministeriön asetuksen kantavista rakenteista julkaisun jälkeen. Kirja sisältää ohjeita eurokoodeilla suunniteltujen betonirakenteiden säilyvyyssuunnitteluun, valmistukseen, laadunvalvontaan ja vaatimustenmukaisuuden osoittamiseen. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 3.) Päivitetty 65 Betoninormit 2021 julkaistaan vuoden 2021 lopussa.

4 Perustussuunnittelu ja sen periaatteet

Voimalatoimittaja antaa useimmiten rakenteiden mitoituksen vaatimat lähtötiedot suunnittelijoille. Perustusten suunnittelija määrittelee siis suuren osan koko rakenteen laatuvaatimuksesta niin toteutuksen kuin materiaalienkin osalta.

Standardissa IEC 61400-1 määritellään tuulivoimalan kuormitukset ja kuormitustyyppi. Tuulivoimalan rakenteet mitoitetaan inertian ja gravitaation, aerodynamiikan sekä voimalan käytöstä aiheuttamille kuormille. (IEC 61400-1, 2005: 33–34.)

Staattiset sekä dynaamiset inertia- ja gravitaatiokuormitukset johtuvat painovoimasta, värähtelystä, rotaatiosta sekä seismisestä toiminnasta. Ilmavirtaukset vaikuttavat koko voimalaan ja aiheuttavat aerodynaamisia kuormituksia. Käytönaikaiset kuormitukset aiheutuvat voimalan hallintalaitteiden käytöstä ja ohjauksesta, kuten käynnistyksestä, pysäyttämisestä, jarrutuksesta sekä kääntämisestä. (IEC 61400-1, 2005: 33–34.)

Suunnittelijan tulee tarkastella standardien määräämät kuormitusyhdistelmät ja löytää suunnittelulle kriittisimmät tapaukset eri tilanteissa. Yhdistelmät määritetään standardin IEC 61400-1 ja sen suunnitteluohjeen GL 2010 mukaisesti.

4.1 Seuraamus-, toteutus- ja toleranssiluokat

Seuraamusluokat määritellään rakenteiden suunnitteluperusteita koskevan standardin SFS-EN 1990 kansallisissa valinnoissa. Luokkien CC2 ja CC3 rakenteille on laadittava laatusuunnitelma (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 10). Eurokoodien ja IEC:n määrittelemät osavarmuuskertoimet eroavat toisistaan siten, että IEC mahdollistaa pienemmän varmuuskertoimen käytön epäedullisten muuttuvien kuormien yhteydessä (Germanischer Lloyd, 2010, 154).

Betonirakenteet jaotellaan toteuttamisen vaatimusten mukaisesti kolmeen luokkaan 1, 2 ja 3, joista 3 on vaativin. Toteutusluokka valitaan rakenteen riskitekijöiden, seuraamusluokkien sekä standardin SFS-EN 1990 mukaisesti. Korkealujuuksiset betonirakenteet, joiden lujuusluokka ylittää C50/60 katsotaan kuuluvaan toteutusluokkaan 3, mistä johtuen voimalaperustukset ovat usein kyseisessä luokassa. Muita perusteita vaativimmalle toteutusluokalle ovat esimerkiksi rakenteen toteuttamisen erityinen vaativuus, seuraamusluokan ollessa CC3 ja toleranssiluokan ollessa 2. Työmaan laadunvalvonnan ja dokumentaation taso määräytyy toteutusluokan mukaan. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 8.)

Toleranssiluokkia on kaksi, joista luokka 1 vastaa normaalitoleranssia, mikä voidaan saavuttaa normaalilla työsuorituksella ja tarkastusten tasolla. Toleranssiluokka 2 vaatii tarkempaa dokumentointia ja laadunhallintajärjestelmää, esimerkiksi mittausten ja tarkastusten

osalta. Luokka 2 on tarkoitettu käytettäväksi pienennettyjen materiaaliosavarmuuslukujen kanssa, jolloin myös toteutusluokan on oltava 3. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 9.)

4.2 Käyttöikä- ja rasitusluokat

Käyttöikäsuunnittelu tarkoittaa rakenteen säilyvyyden suunnittelua, jonka määrittelemänä ajanjaksona esimerkiksi perustuksen tulisi kestää ympäristöolosuhteista johtuvat vauriomekanismit. Käyttöikäsuunnittelussa perustuksen suunnittelija määrittelee rasitusluokat sekä ajanjakson minkä perustuksen on kestettävä annetuissa olosuhteissa, eli suunnittelukäyttöikä. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016b, 8–9.) Tuulivoimalan perustussuunnittelussa ilmenee usein, että perustuksen käyttöiän määrittävä tekijä on rakenteen väsyminen eikä niinkään ympäristöolosuhteet. Tarkastelluissa suunnitelmissa käyttöikä on ollut noin 25 vuotta, mutta työn tekijä on töidensä ohella havainnut, että uusien voimalatyyppien kohdalla käyttöiäksi tavoitellaan jo 35 vuotta. Suunnitteluohje GL 2010 sallii betonin väsymistarkastelulle käytettäväksi standardin CEB-FIP MODEL CODE 1990 (Germanischer Lloyd 2010, 193).

Rakennesuunnittelijan valitsemien rasitusluokkien tulee vastata mahdollisimman hyvin todellisuutta. Rasitusluokat voidaan valita By 68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu -julkaisun mukaisesti, ja ne luokitellaan SFS-EN 206 Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimuksenmukaisuus -standardia noudattaen. Rasitusluokkien ylimitoittaminen voi jopa haitata betonin säilyvyyttä. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016b, 29.) Rasitusluokat kuvataan ympäristöolosuhteiden mukaan seuraavasti:

- X0: Ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä
- XC 1-4: Karbonatisoitumisen aiheuttama teräskorroosio
- XD 1-3 ja XS 1-3: Kloridien aiheuttama teräskorroosio
- XF 1-4: Jäätymis-sulamisrasitus
- XA 1-3: Kemiallinen rasitus

XA luokan valinta voi olla aiheellista, mikäli tuulipuiston alueella havaitaan happamia sulfaattimaita. Sulfaattimaiden tyypillisimmät esiintymisalueet ovat Suomessa rannikkoalueilla. Sulfaattipitoisessa ympäristössä voidaan käyttää standardin SFS-EN 197-1 mukaista sulfaatin kestävää sementtiä, tai masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen määrästä. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016b, 24.)

5 Laatu

5.1 Rakentamisen laatu

Rakentamisen laatukäsitteen voi jakaa neljään elementtiin: suunnittelun, tuotannon, asiakkaan ja ympäristön laatuun (Talonrakennusteollisuus ry 2017, 11). Kaikki mainitut laadun elementit ovat sovellettavissa myös tuulivoimalaperustusten rakentamiseen. Laadukas suunnittelu johtaa toteutuskelpoisen ja vaatimukset täyttävän rakenteen tai kokonaisuuden rakentamiseen. Laadukkaat suunnitelmat ovat ristiriidattomia ja riittävän selkeitä työmaan tarpeisiin. Laadukas rakentaminen takaa suunniteltujen ja määrättyjen suoritustasojen täyttymisen sekä käyttökelpoisen lopputuotteen, ja johtaa kustannustehokkaaseen, aikataulua noudattavaan sekä turvalliseen rakentamiseen. Olennaista tuotannossa on myös yhteistyön ja kommunikaation ylläpitäminen tilaajan kanssa. Ympäristökeskeinen laatu tarkoittaa muiden sidosryhmien kuin asiakkaiden vaatimuksien, kuten viranomaismääräyksien ja säädösten täyttymistä. Asiakkaan havaitsema laatu voi tarkoittaa odotettua suoritustasoa, visuaalista laatua tai esimerkiksi sovituissa aikatauluissa pysymistä. Rakentamisen laatua voidaan mitata mm. laatupoikkeamien- ja virheiden, korjaustoimien sekä niistä johtuvien kustannusten määrällä.

Nykyaikaisessa laadukkaassa rakentamisessa myös työturvallisuudella ja ympäristöllä on vahva rooli onnistumista arvioitaessa. (Talonrakennusteollisuus ry 2017, 11.) Työturvallisuuden tasoa ja sen kehittymistä voidaan mitata esimerkiksi MVR-mittauksilla, joka tarkoittaa maa- ja vesirakennustyömaiden työturvallisuuden arviointimenetelmää.

5.2 Laatuvaatimukset

Rakennushankkeessa laatuvaatimukset koostuvat asiakkaan, suunnittelun, toteutuksesta vastaavan elimen sekä viranomaisten vaatimuksista. Laatuvaatimukset on määriteltävä selkeästi siten, että niiden saavuttaminen on mahdollista suunnitelmien mukaisilla työmenetelmillä.

Asiakkaan tekniset vaatimukset on useimmiten esitetty sopimuksessa ja sen teknisissä liitteissä. Vaatimukset tulee tarkastaa ja varmistaa että ne voidaan täyttää täyttäen myös standardien ja viranomaismääräysten vaatimukset. Osa laatuvaatimuksista määräytyy siis jo sopimusvaiheessa.

Rakentamista ohjataan lailla, asetuksilla sekä rakentamismääräyksillä, joiden tarkoitus on varmistaa vaatimustenmukaisuuden vähimmäistäyttymisen. Betonirakentamisen suunnittelua sekä toteutusta ohjaavat eurokoodit eli kantavien rakenteiden eurooppalaiset suunnittelustandardit, maankäyttö- ja rakennuslaki, ympäristöministeriön asetus kantavista

rakenteista, tyyppihyväksyntäasetukset sekä varmennustodistusten arviointiperusteet. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 14.) Näin ollen suunnittelu määrää suuren osan betonirakentamisen laatuvaatimuksista materiaalien ja rakenteiden osalta.

5.3 Laadunvarmistus työmaalla

Työmaalla suoritettujen laadunvarmistustoimenpiteiden avulla todennetaan sopimuksenmukainen laadun taso (RT S-1224, 4). Laadunvarmistus pitää sisällään kaikki laatuvaatimusten täyttymisen todentamiseen vaaditut toimenpiteet, mukaan lukien laadunvalvonnan. Laadunvalvonta on yhteisnimitys erilaisille laaduntarkastustoimenpiteille. Laadunvarmistaminen ei voi kuitenkaan perustua täysin laaduntarkkailuun, vaan se edellyttää myös toimivaa laatuvaatimuksiin liittyvää tiedonkulkua hankkeen eri osapuolten välillä. (Kankainen & Junnonen, 2001, 36.) Hankkeelle tulee perustaa laatukansiojärjestelmä, johon kerätään kaikki laadunvarmistukseen liittyvät dokumentit, kuten tarkastuspöytäkirjat, mittaustulokset ja laatupoikkeamaraportit (RT S-1224, 3).

Laadunvarmistustoimet voidaan esittää esimerkiksi laadunvarmistusmatriisilla. Matriisin laadinnassa ja käytössä tulee ottaa huomioon rakennusvalvonnan ja sopimusasiakirjojen vaatimukset, sekä riskianalyysin tulokset. Myös tehtäväkohtaiset laadunvarmistustoimenpiteet määritellään matriisissa. Kuva 4 on havainnollistava esimerkki laadunvarmistusmatriisista perustusten rakentamisessa

Laadunvarmistusmatriisi								
Laadunvarmistustoimi / Tehtävä	Tehtäväsuunnitelma	Aloituspalaveri	Mallityö	Tarkemittaus	Ongelmiin varautuminen	Oma valvonta	Kokeet ja mittaukset	Vastaanottokatselmus
Maarakennustyöt	x	x		x	x	x	x	x
Kaapelisuojaputket			x	x		x		x
Työbetonointi		x	x	x	x		x	
Pulttikehän kasaus	x			x		x		x
Raudoitus ja maadoitus	x	x	x	x	x	x		x
Muottityöt	x			x				
Betonointi	x	x		x	x	x	x	x
Suojaus ja lämmönseuranta	x				x	x	x	

Kuva 4. Laadunvarmistusmatriisi (Mukailtu Rakennustöiden laatu 2017)

Ennen töiden aloittamista on selvitettävä tehtäväkohtaiset laatuvaatimukset, sekä kustannus- ja aikataulutavoitteet. Tehtävään osoitetut työntekijät perehdytetään sitä koskeviin tavoitteisiin ja vaatimuksiin. Asetettujen vaatimuksien toteutumisen seuranta ja töiden ohjaaminen haluttuun laatutasoon jatkuu koko tehtävän ajan.

5.4 Laadunhallinnan työkalut

5.4.1 Laatusuunnittelu

Laatusuunnittelun tarkoitus on varmistaa sopimuksen ja vaatimusten mukaista laatua asiakkaalle laatujärjestelmien ja -suunnitelman avulla. Yrityksen laatua ja toimintaa ohjaavan laatujärjestelmän lisäksi urakoitsija tarvitsee hankekohtaiset laatujärjestelmät sekä työmaiden laatusuunnitelmat. Laatusuunnitelmat ovat osa rakennusyrityksen laatujärjestelmää ja niiden avulla sovitetaan laatujärjestelmän tehokas ja tarkoituksenmukainen käyttö kuhunkin kohteeseen. (RT S-1180, 1–2.) Työmaan laatusuunnitelman vaatimukset esitetään Ympäristöministeriön asetuksessa kantavista rakenteista (477/2014), 9 § Rakenteiden toteutuksen työsuunnitelma. Asetuksen mukaan seuraamusluokkien CC2 ja CC3 mukaisissa kohteissa on laadittava kirjallinen laatusuunnitelma (Suomen Betoniyhdistys ry 2019, 109).

Yrityksen johdon tehtävänä on ohjata yrityskulttuuria laadun tuottamiseen ja asiakastyytyväisyyden tavoittelemiseen. Projekti- ja työmaahenkilöstö tulisi kouluttaa laadun

kehittämiseen, sekä laatusuunnitelmien laatimiseen ja niiden hyödyntämiseen. Laatusuunnitelmia tulee edellyttää eri osapuolilta ja projektille on asetettava laadullisia tavoitetta. Laatusuunnittelun onnistuminen voidaan havaita työn parempana sujumisena, virheiden vähenemisenä, kustannustehokkuuden parantumisena sekä vastuualueiden selkeytymisenä. (RT S-1180, 1–2).

Keskeisiä asioita urakoitsijan laatusuunnitelmassa ovat projektin organisaation sekä toimenkuvien lisäksi laadunvarmistustoimenpiteiden toteutustapa sekä muut tehtävään oleellisesti liittyvät asiat. Suunnitelman yksityiskohtaisuuteen vaikuttaa urakan laajuus ja vaativuus. Oleellista on, että vastuulliset henkilöt ovat mukana suunnittelemassa laatutoimintoja. (Kankainen & Junnonen, 2001, 48.)

Projektin onnistumisen edellytyksenä on, että kaikki työmaan tahot tuntevat toistensa tavat ja noudattavat keskeisten asioiden hoidossa samoja periaatteita. Siksi myös sivu-urakoitsijoiden on laadittava omaa suoritustaan koskeva laatusuunnitelma, joka esitetään pääurakoitsijalle. (Junnonen J.)

5.4.2 Valvonta, mallityöt ja tarkastukset

Työmaavalvonnan yhtenä päätavoitteena on virheiden ja ongelmien ennaltaehkäisy. Ennaltaehkäisevä toiminta mahdollistaa tärkeimmän valvontatavoitteen saavuttamisen, eli teknisten asiakirjojen vaatimusten, hyvän rakennustavan mukaisen ja viranomaismääräysten, lakien sekä normien mukaisen rakenteen valmistamisen. Valvonta voi olla joko ennakoivaa tai todentavaa. Työsuoritusten valvontaan kuuluu muun muassa työmallien teettäminen sekä työmenetelmien ja -olosuhteiden valvonta. (Rakentajain kalenteri 2012, 58–60.)

Mallitöiden tekemisellä luodaan referenssi seuraaville työkohteille. Työstä vastaava työryhmä tekee mallityön, jolle suoritetaan mallityökatselmus. Havaitut puutteet ja virheet korjataan, ja katselmus dokumentoidaan pöytäkirjaan, joka taltioidaan työmaan laatukansioon. Seuraavia työsuorituksia verrataan mallityöhön, ja niiltä odotetaan vastaavaa laatutasoa. (Rakennustöiden laatu. 2014, 18.)

5.4.3 Kokeet ja mittaukset

Voimalaperustuksien rakentamisessa olennaisia kokeita ovat betonin ja sen osa-aineiden suoritustasoihin liittyvät kokeet ja mittaukset, kuten kiviaineksen rakeisuus ja petrografia, tuoreen betonin ominaisuuksien testaaminen sekä valmiin betonin lujuuden ja säilyvyyden toteaminen. Kokeiden suorittamisessa ja tulosten tulkitsemisessa tulee noudattaa voimassa olevia standardeja sekä ohjeita. On kuitenkin huomioitava, että asiakkaan laatuvaatimukset voivat edellyttää Eurokoodien sekä kansallisten liitteiden ulkopuolisia kokeita.

Rakenteiden kelpoisuuden ja suunnitelmien mukaisuuden todentaminen vaatii usein mittauksia, joita voidaan suorittaa esimerkiksi robottitakymetrillä sekä perinteisemmillä mittalaitteilla. Mittauksia varten tulisi laatia mittaussuunnitelma, joka toimii mittamiehelle kuin käsikirjana. Suunnitelmassa tulisi esittää mittausperusteet, laitteiden tarkkuusvaatimukset sekä kuinka mittaukset dokumentoidaan. Kantavien betonirakenteiden toleransseja on esitetty Betoniyhdistyksen kirjassa by 47 Betonirakentamisen laatuohjeet. Mittalaitteiden toimivuus tulee tarkastaa ja esittää kalibrointitodistus.

5.4.4 Dokumentointi ja AsBuilt -aineisto

Tuulivoimalaperustuksen dokumentoinnin laajuuden määrittelee useimmiten tilaajan vaatimukset. Dokumentaatiokaavio tai -lista, josta ilmenee eri työvaiheisiin ja niissä käytettyihin materiaaleihin yhdistettävät ja tuotettavat dokumentit sekä niiden vastuuhenkilö on hyödyllinen työkalu ajantasaisen laatudokumentaation varmistamiseksi. Dokumentaatiokaavio on siis käytännössä seurantalista, johon kirjataan ylös suoritetut toimenpiteet. Tilaajien sekä eri hankkeiden vaatimusten eriäväisyydet hankaloittavat laatudokumentoinnin yhdenmukaistamista urakoitsijan projektien välillä. Mikäli tilaajalla ei ole vaatimusta dokumenttien ja tiedostojen nimeämiskäytännölle, se olisi hyvä suunnitella projektin alussa.

Hyvän nimeämisen periaatteita ovat johdonmukaisuus ja selkeys. Tiedostonimen tulisi olla loogisesti jäsennelty ja kertoa sisällöstä. Hyvä tiedostonimi sisältää esimerkiksi projektin tunnuksen, luomispäivämäärän, viittauksen dokumentin sisältöön sekä versionumeron. (Helsingin yliopisto.)

Asbuilt -aineistolla tarkoitetaan projektin todellista tilaa vastaaviksi tarkastettuja suunnitelmia ja asiakirjoja. Aineiston avulla tulee olla mahdollista tarkastella suunnitellun ja toteutuneen perustuksen eroavaisuuksia. Suunnittelija tyypillisesti tuottaa aineiston. Suunnittelussa sekä työmaalla tapahtuneet muutokset kuvataan aineistossa, jonka tukena käytetään usein mittausdataa. (Ellis, 2021.) Tästä johtuen lopullisten mittausten selkeä dokumentointi työmaalla on tärkeää suunnittelijalle, ja voi johtaa huomattaviin säästöihin suunnittelun kustannuksissa. Voimalaperustuksien osalta yleisiä työmaalla tapahtuvia muutoksia ovat esimerkiksi raudoituksen sekä kaapelisuojaputkien sijanteihin ja kaapeleiden asennukseen liittyvät poikkeamat. Muutoksien selkeä dokumentointi ja valokuvaaminen työmaalla tukee aineiston tuottamista. Aineiston kattavuus ja sitä tukeva materiaali myös helpottaa tulevaisuudessa mahdollisesti tehtäviä muokkauksia sekä niiden suunnittelua.

6 Materiaalien laadunvarmistus

6.1 Betoniteräkset

Kun rakennustuote ei kuulu yhdenmukaistetun tuotestandardin soveltamisalaan, sitä koskee *Laki eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä* (954/2012). Laki siis koskee tuotteita, joita ei voida CE-merkitä, kuten valmisbetonia ja betoniraudoitteita. Betoniterästen eurokoodin mukaisen suunnittelun edellyttämät vähimmäisvaatimukset ovat esitetty standardissa SFS 1300, ja yleiset vaatimukset sekä määritelmät standardissa SFS-EN 10080.

Betonirakenteiden raudoituksessa käytettyjen betoniterästen kelpoisuus todennetaan tyyppihyväksynnällä. Terästen on oltava Ympäristöministeriön asetuksen 125/2016 *Hitsattavien betoniterästen ja betoniteräsverkkojen olennaiset tekniset vaatimukset* mukaisia. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 116) Asetus kattaa halkaisijaltaan 4–40 mm hitsattavasta hiiliteräksestä ja austeniittis-ferriittisestä, eli ruostumattomasta teräksestä valmistetut betoniteräkset. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 118.)

Kaikista työmaalle saapuvista teräsnipuista tulee löytyä tyyppihyväksyntämerkintä, ja lähetysluettelossa on oltava merkintä, jonka avulla voidaan osoittaa valmistuserän aineenkoetodistus. Myös esivalmistettujen raudoitteiden, kuten valmiiksi leikattujen ja taivutettujen, tulee olla Ympäristöministeriön asetuksen 125/2016 mukaisesta betoniteräksestä valmistettuja. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 116.)

STF-tyyppihyväksyntämerkki voidaan myöntää kattamaan vain katkaisemattomat tangot. Tyyppihyväksytty jatkojalostettu, esimerkiksi taivutettu betoniteräs luokitellaan raudoitteeksi, ja sille käytetään Inspectan FI-merkkiä. (Inspecta.)

Terästen teknisten vaatimusten täyttyminen on myös mahdollista todentaa ennakkoon vapaaehtoisella tyyppihyväksynnällä asetuksen 126/2016 *Hitsattavien betoniterästen ja betoniteräsverkkojen tyyppihyväksynnästä* mukaisesti. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 118.)

Valmistaja testaa ja hyväksyy valmistuserät. Tulokset arkistoidaan ja halutusta erästä voidaan teettää materiaalitodistus teräksen sulatusnumeron perusteella.

Betoniteräkset tulee tarkastaa niiden saapuessa työmaalle. Poikkeamista, kuten väärästä tai vaurioituneesta raudoitteesta ja mittapoikkeamisista tulee ilmoittaa valmistajalle. Taivutustyypit on esitetty standardissa SFS 1267 liite A. Toisin kuin hilseilevä ruoste, kiinteä ruoste raudoitteiden pinnassa ei varsinaisesti ole haitallista. Betoniterästen muutaman kuukauden varastointi ilman suojausta normaaleissa olosuhteissa on hyväksyttävää. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 118.) Varastoinnissa tulee ottaa huomioon terästen säilyttäminen irti maasta esimerkiksi puupalkkien avulla.

Vaatimusten mukaan teräsniput tulee merkitä tunnuslapulla, josta ilmenee valmistaja, tuotteen tunniste, koko ja nimellismitta, sertifiointielimen merkki ja valmistuserä- tai sulatusnumerotieto, joka mahdollistaa materiaalitodistuksen kohdistamisen. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 118.)

6.2 Valmisbetoni

Valmisbetonin toimittajan tehtävä on valmistaa vaatimusten mukaista betonia. Vaatimusten mukaisuus on kyettävä todistaa ennakkokokein, joiden valmistuminen tulee ottaa huomioon aikataulussa. Laadunvarmistuksen tulee noudattaa tehtaalla SFS-EN 206 standardia ja sen kansallista liitettä SFS 7022. Standardissa SFS-EN 206 määritellään itse betonin vaatimusten lisäksi vaatimukset laadunvalvontamenettelylle, sekä vaatimuksenmukaisuuden ehdot ja arviointi. Kansallisessa soveltamisstandardissa SFS 7022 annetaan täydentäviä sääntöjä ja viittauksia standardille SFS-EN 206.

Betonin valmistajalla tulee olla voimassa olevat kelpoisuuden osoittavat varmennustodistus ja sertifikaatti. Betoniasemat ovat kolmannen osapuolen valvomia tuotantolaitoksia. Pienet betoniasemat voivat toimittaa betonia vain rakenteisiin, joilla ei ole erityisvaatimuksia, kuten ei-kantavat rakenteet. Muita betoniasemia, kuten tuulivoimarakentamisessa käytettäviä liikuteltavia mobiilibetoniasemia koskevat samat vaatimukset kuin kiinteitä betonitehtaita. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 300.)

Koska valmisbetonia ei voida CE-merkitä eikä sillä ole eurooppalaista standardia, sille voidaan myöntää Suomalaisen tuotehyväksyntälain mukainen varmennustodistus. Varmennustodistuksia koskevat vaatimukset esitetään ympäristöministeriön julkaisemassa varmennustodistuksen arviointiperusteissa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 18.)

Kokonaisuudessaan sovellettavia vaatimusasiakirjoja ovat standardit SFS-EN 206 ja SFS-EN 12620 sekä niiden kansalliset liitteet SFS 7003 ja SFS 7022. SFS-EN 12620 määrittelee ominaisuudet betonissa käytettävälle kiviainekselle. Hyväksytty toimielin, valmisbetonin tapauksessa KIWA Inspecta Oy, myöntää varmennustodistuksen tuotantolaitoksen sekä sen sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastuksen ja jatkuvan valvonnan perusteella. (Ympäristöministeriö 2014). Betoniasemalla valmistuksesta ja laadunvalvonnasta vastaavalla henkilöllä tulee olla valmisbetonityönjohtajan pätevyys, sekä laitoksella tulee olla betoniteknologiaan riittävän perehtynyt betonilaborantti paikalla suorittamassa laadunvarmistuksen vaatimia toimenpiteitä. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 182.)

Betonin osa-aineita ovat sementti, kiviaines, seosaineet, vesi, lisäaineet sekä kuidut. Osa-aineiden soveltuvuutta Suomessa säätelevät SFS-EN standardit ja niiden kansalliset liitteet.

Raaka-aineiden ja betonin toimittajaa valittaessa on hyvä huomioida asiakkaan omat laatuvaatimukset, jotka voivat sisältää eurokoodien ulkopuolisia testauksia.

Sementti on epäorgaaninen jauhe, joka veteen sekoitettuna kovettuu ja sitoutuu hydrataatioreaktion kautta. Sementti voidaan CE-merkitä ja sen tulee olla standardin SFS-EN 197-1 mukaista. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 28.) Sementit jaotellaan lujuusluokkiin, joiden perässä merkintä N tarkoittaa normaalia varhaislujuutta ja merkintä R tarkoittaa korkeaa varhaislujuutta. Esimerkiksi merkintä 52,5 R tarkoittaa korkeaa varhaislujuutta, ja yli 52,5 MPa:n standardilujuutta 28 vuorokauden päästä valamisesta puristettuna. Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 20.) Sementti on tiukimmin säädelty betonin osa-aines, ja sen laadunvarmistus kuuluu valmistusprosessiin. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 32).

Kiviainekset toimivat betonin runkoaineena ja voivat olla joko standardin SFS-EN 12620 mukaisesti merkittyjä, tai betonivalmistajan omaa ei markkinoilla olevaa kiviainesta. Mikäli kiviainesta ei voida CE-merkitä, tulee valmistajan osoittaa, että kiviainestandardien mukaiset testaukset on suoritettu AVCP-luokan 2+ mukaan. AVCP-luokka tarkoittaa suoritustason pysyvyyden arviointi- ja varmentamisjärjestelmää. Kiviaineksen soveltuvuutta voidaan arvioida esimerkiksi petrografisella tutkimuksella. Kansallinen soveltamisstandardi SFS 7003 esittää kiviaineksen vaaditut ominaisuudet ja muut vaatimustasot. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 44.) Erityisesti mobiilibetoniasemaa käytettäessä on otettava huomioon, ettei kiviaines saa sisältää epäpuhtauksia kuten roskia tai öljyä, eikä lunta tai jäätä.

Seosaineista tuulivoimaperustuksien betonille olennaisia ovat tyypin 2 seosaineet, jotka ovat pozzolaanisia tai piilevästi hydraulisia. Tyypin 2 seosaineiden yleinen soveltuvuus on osoitettu lentotuhkalle standardissa SFS-EN 450-1, silikalle standardissa SFS-EN 13263-1 sekä jauhetulle granuloidulle masuunikuonalle standardissa 15167-1. Valmisbetonissa käytetyt seosaineet tulee CE-merkitä.

Veden laatu voi vaikuttaa betonin ominaisuuksiin, kuten lujuuden kehittymiseen ja raudoitteiden korroosiosuojaukseen. Veden soveltuvuuden arviointi ja testaus esitetään standardissa SFS-EN 1008. Betonin valmistuksesta syntyvää kierrätysvettä voidaan käyttää, mikäli sen kelpoisuus voidaan todistaa kokein. Työmaalla esimerkiksi porakaivosta otetun veden kelpoisuus tulee myös todistaa. Standardin SFS-EN 1008 mukaan talousvesi soveltuu lähes aina käytettäväksi betonin valmistuksessa, eikä sitä tarvitse testata. Raudoitetussa betonissa käytetyn veden suurin kloridipitoisuus on 1000 mg/l.

Lisäaineilla muutetaan betonin ominaisuuksia haluttuun suuntaan, esimerkiksi lisätään työstettävyyttä tai hidastetaan sitoutumista. Standardin SFS-EN 934-2 mukaisten lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä, sen ulkopuolella olevien lisäaineiden tulee täyttää standardin

SFS-EN 934-1 vaatimukset, sekä niillä on oltava varmennustodistus, tai kelpoisuus on muuten osoitettava. Lisäaineiden yhtäaikaisessa käytössä niiden yhteensopivuus tulee testata.

Tietyissä rakenteissa kuten voimalaperustuksen tasausvalussa voidaan käyttää kuitubetonia. Kuitubetoniin lisätään teräs- tai polymeerikuituja parantamaan sen lujuusominaisuuksia. Teräskuitujen soveltuvuus esitetään standardissa SFS-EN 14889-1 ja polymeerikuitujen standardissa SFS-EN 14889-2. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 30.)

6.3 Lujuudenkehitys ja sen seuranta

Betonin puristuslujuus on sen tärkein rakennetekninen ominaisuus. Puristuslujuus luokitellaan eurokoodin perusteella puristuslujuusluokkiin C eli cylinder, ja numeroyhdistelmällä esimerkiksi C55/67, jossa ensimmäinen numero kuvaa lieriölujuuden ominaisarvoa ja toinen kuutiolujuuden ominaisarvoa. Alin lujuusluokka on C8/10 ja ylin C110/115. Yksikkönä käytetään MN/m^2 tai MPa. Muutkin betonin ominaisuudet kuten vetolujuus ja kimmokerroin ovat siihen verrannollisia. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 85.) Tuulivoimalaperustuksissa käytetään usein korkealujuusbetoneja juotosvaluissa sekä itse perustuksessa.

Valmisbetonin normaali laadunvalvonta suoritetaan betonitehtaalla standardin SFS-EN 206 mukaisesti. Betonirakenteen lujuuskehitystä seurataan ensisijaisesti kypsyyslaskennalla, joka perustuu lämpötilan mittauksiin. Tämän lisäksi työmaalla voidaan erikseen ottaa koekappaleita, mikäli halutaan varmistaa tietyn betonierän lujuustaso. Tällöin noudatetaan standardin SFS-EN 206 liitteen B mukaista ohjeistettua tunnistetestausmenettelyä. Koekappaleiden valmistuksen, säilytyksen ja testauksen tulee noudattaa samoja standardeja kuin betonitehtaan laadunvalvonnassa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 112.)

Standardien mukaisen testausmenettelyn lisäksi tilaaja voi vaatia ylimääräisä kokeita. Tilaajan testausvaatimukset tulee selvittää myös betonitehtaalle ja koekappaleiden valmistuksesta vastaavalle henkilölle. Testaussuunnitelman laatiminen helpottaa vaatimusten mukaisten kokeiden suorittamista.

Puristuslujuus määritellään useimmiten 28 vuorokauden ikäisillä koekappaleilla. Tuulivoimaperustuksen lämmönkehityksen rajoittamisessa käytetty masuunikuonajauhe yleensä alentaa varhaislujuuksia, mutta kasvattaa myöhäisiän lujuuksia, minkä takia puristuslujuus voidaan määrittää testattavaksi 91 vuorokauden kohdalla. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 57.)

Mikäli on syytä epäillä rakenteeseen käytettyä betonia vaatimustenvastaiseksi, puristuslujuus voidaan määrittää rakennekoekappaleilla. Koekappaleen halkaisijana käytetään yleensä 100 mm, ja korkeuden suhteena 1 + 0,05. Lieriötulos muutetaan vastaamaan 150

mm:n kuutiotulosta. Koekappaleita on oltava vähintään 3 kappaletta. Puristuslujuuden testaus suoritetaan standardin SFS-EN 13791 mukaisesti. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 204.)

Ohuthietutkimuksella voidaan selvittää betonirakenteen laatua ja kuntoa, jossa porattua betoninäytettä tutkitaan polarisaatiomikroskoopilla. Tutkimuksella saadaan tarkkaa tietoa betonin koostumuksesta sekä mahdollisista laatupuutteista, ja sillä pystytään havaitsemaan mahdollisia vauriomekanismeja kuten alkalikiviainesreaktio.

7 Ankkuripulttikehän asennus ja raudoitustyöt

7.1 Ankkuripulttikehä

Ankkuripulttikehä on useimmiten voimalavalmistajan toimittama voimalamallikohtainen kiinnitysjärjestelmä, jonka avulla kuormat siirretään voimalasta perustukselle, josta ne edelleen siirtyvät maaperään. Pulttikehän kunto ja siihen kuuluvat komponentit tulee tarkistaa niiden saapuessa työmaalle, ja toimenpide tulee dokumentoida. Pulttikehä kasataan ja asennetaan perustamispaikalle ennen raudoitustöiden aloittamista. Asentaminen voidaan aloittaa suoraan pulttikehän lopullisella paikalla, tai kehä voidaan siirtää paikalleen nosturilla joko kokonaisena tai osissa riippuen valmistajan ohjeistuksesta. Nostotöissä tulee käyttää vain siihen soveltuvia nostureita ja nostolaitteita. Pulttikehän asentamista ja raudoitustöiden helpottamista varten voidaan tehdä työbetonilaatta voimalapaikalle, jonka avulla murskepatja tasataan. Kuvassa 5 nähdään valmis ankkuripulttikehä ja alapinnan työraudoitus. Taustalla nähdään myös nostokentälle varastoidut raudoitteet sekä raudoitustöitä varten varattu mobiilinosturi.

Kuva 5. Valmis ankkuripulttikehä (KSBR 2020)

Pulttikehän asennuksessa oleellisia asioita ovat torniin liittymisen käytettyjen komponenttien korkotasojen tarkastaminen, pulttien oikea asennuskorkeus ja etäisyys, sekä koko

ankkuripulttikehän geometria. Väärin asennettu pulttikehä voi aiheuttaa pulttien rikkoutumisen tai estää tornin asentamisen. Asennuksen jälkeiset tarkastusvaatimukset, toleranssit ja mittauspöytäkirjat ovat valmistajakohtaisia, mutta yleisesti pulttikehän geometria tarkastetaan ennen valua, ja valun jälkeen ennen juotosvalua. Juotosvalun jälkeen suoritetaan viimeinen tarkistusmittaus.

Pulttien kierteet tulee suojata ennen betonointia, ja pulttien ollessa korroosiolle alttiita niiden ruostesuojaus on otettava huomioon. Ruostesuojauksessa on noudatettava valmistajan ohjeita käytettävien tuotteiden osalta.

7.2 Raudoitus

Raudoitteita tulee käsitellä siten, ettei niihin synny pysyviä muodonmuutoksia. Varastoinnissa tulee ottaa huomioon raudoituksen viemä tila ja tarvittaessa suojaus. Maata vasteen varastointi ei ole sallittua. On huomioitava, että väsymiskuormitetun rakenteen raudoitus saa olla korkeintaan kevyesti pintaruostunut. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 58.)

Tuulivoimaperustukselle ominaisia raudoitteitta ovat radiaaliseen ja tangentiaaliseen suuntaan kulkevat pääteräkset, sekä leikkaus- ja halkeiluteräkset, jotka voivat kulkea eri raudoituskerrosten läpi. Perustuksen keskiosassa raudoitus usein tihenee, jonka takia raudoitteiden taivutusten ja asennuksen tulee olla erityisen tarkkaa. Kuvasta 6 voidaan nähdä perustuksen yläpinnan radiaalinen ja tangentiaalinen raudoitus. Väsymiskuormitettuna rakenteena perustuksen raudoitteiden hitsaaminen on kielletty, ellei sitä erikseen toteutuseritelmässä sallita (SFS 5975, 10). Työterästen hitsaaminen on sallittua niiden ollessa ei-toiminnallisia rakenneteräksiä.

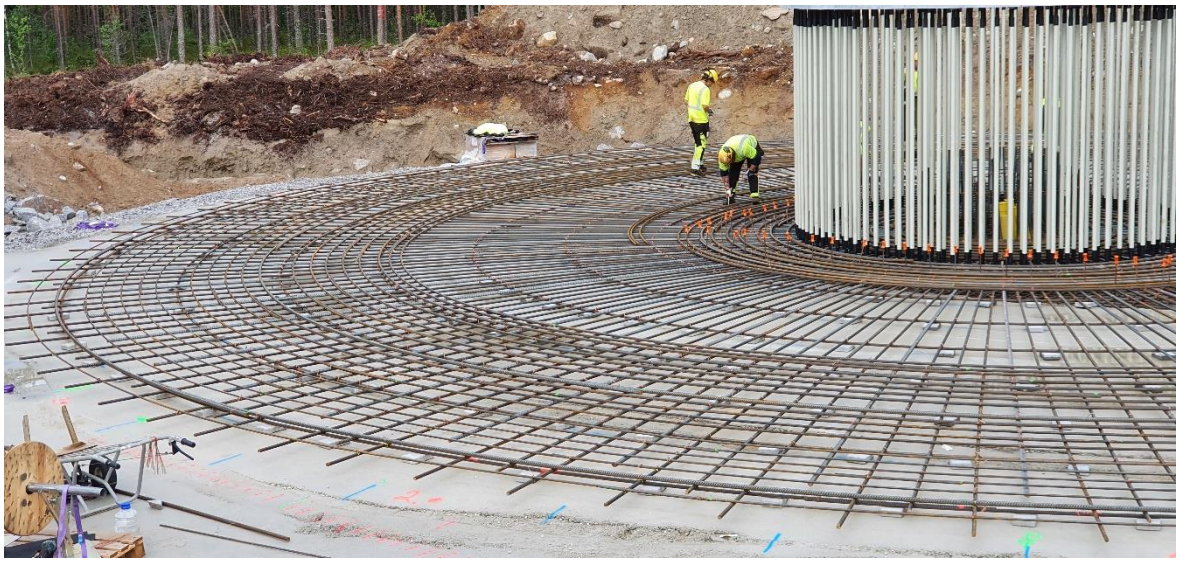
Kuva 6. Perustuksen yläpinnan raudoitus ja keltaisella merkatut valuaukot

Teräsbetonirakenteessa pääasiassa betoniteräkset ottavat vastaan vetojännityksiä. Jotta vetojännitykset siirtyisivät teräksille täysimääräisesti, betonin tulee halkeilla. Kantavissa rakenteissa vetojännityksestä johtuva halkeama saa olla enintään 0,3 mm. Tuulivoimalaperustuksessa halkeamaleveyttä voidaan rajoittaa esimerkiksi lisäämällä ja tihentämällä raudoitusta. Raudoitteita käytetään paikallisesti myös puristusjännityksiä varten. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 110.)

Opinnäytetyön tekijä on havainnut, että tuulivoimarakentamisessa raudoitustöiden ennakkosuunnittelu on erityisen tärkeää töiden onnistumisen kannalta. Suurien raudoitusmäärien toimitusajat voivat olla useita viikkoja yksittäisen perustuksen raudoitteiden määrän ollessa yli 100 tonnia. Raudoituksen määrän ja monimutkaisuuden takia raudoitusryhmä tulee perehdyttää erityisen hyvin suunnitelmiin ja työselostuksiin, ja raudoittamiseen on varatta riittävästi aikaa ja oikea kalusto.

Raudoittamisessa oleellisia dokumentteja ovat piirustukset, raudoitusluettelot sekä työselitykset, mutta raudoituksen on selvittävä raudoituspiirustuksista ilman luettelojakin. Raudoittajien työskentelyn kannalta tärkeitä raudoituspiirustuksessa esitettäviä asioita ovat teräksen tunnistetiedot, halkaisijat ja lukumäärät, sijainti ja toleranssit, jako, jatkospituudet ja niiden sijainti sekä betonipeitepaksuus. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 128.) Detaljipiirustusten tärkeys korostuu monikerroksisen muuttuvan poikkileikkauksen rakenteen kanssa työskennellessä.

Raudoituksen tuenta ja työraudoitus on osa raudoitusjärjestelmää. Betonipeite paksuus koskee myös työteräksiä, joten perustuksen alapinnan raudoitusvälikkeen on oltava vähintään betonipeitepaksuuden korkuinen. Raudoituksen tuentatapa ja työteräkset on esitettävä toteutusluokan 3 rakenteen rakennesuunnitelmassa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 125.) Raudoitteiden tuennan tulee kestää raudoituksen päällä liikkuminen etenkin betonoinnin aikana, joten sidontaan tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tuenta ei saa heikentää betonirakenteen säilyvyyttä (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 95). Kuvassa 7 nähdään perustuksen alapinnan raudoitus betonikivillä tuettuna.



Kuva 7. Perustuksen alapinnan raudoitus

Raudoitustankojen välin tulee olla vähintään betonin kiviaineksen maksimiraekoko +3 mm, ja limitettyjen raudoitusrankojen vapaa väli saa olla enintään neljä kertaa tangon halkaisija tai 50 mm. Rautojen niputtaminen voi vaikuttaa ankkurointipituuteen, ja tulee siksi tehdä rakennesuunnittelijan ohjeiden mukaisesti. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 96.)

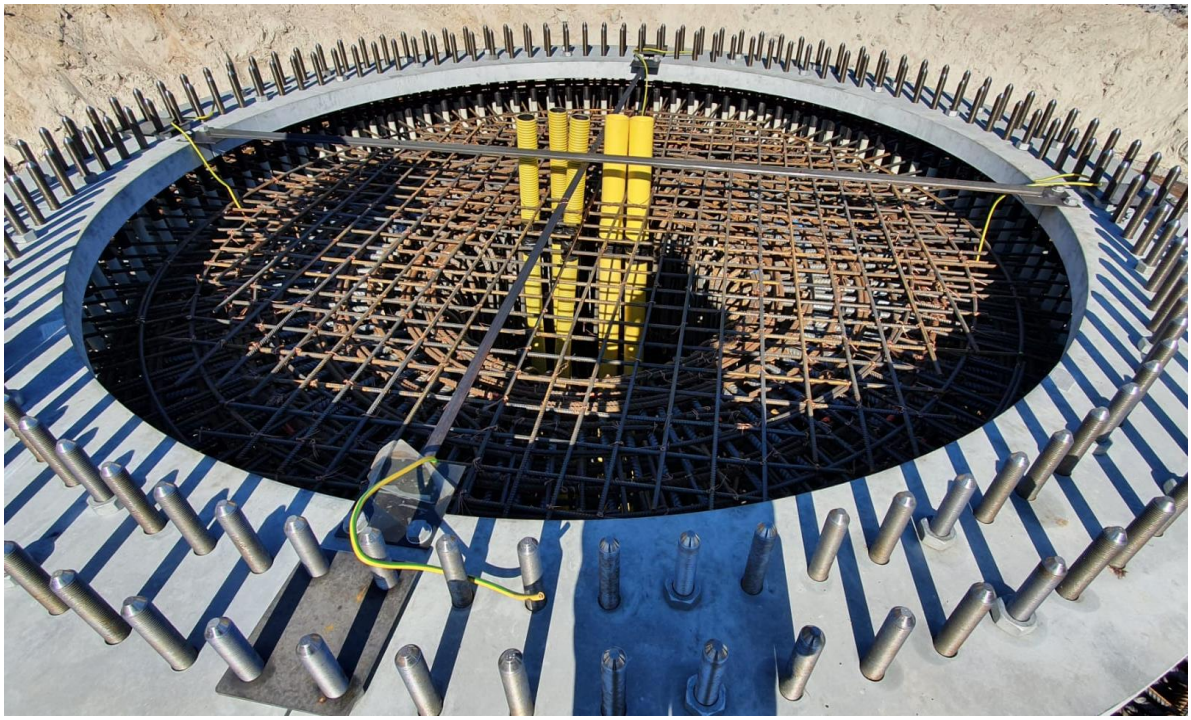
Voimalaperustuksen raudoitus tihenee etenkin lähellä pulttikehää, jolloin valuaukkojen tekeminen yläpinnassa tulee ottaa huomioon. Yli 1,5 m korkeissa rakenteissa on oltava vähintään halkaisijaltaan 150 mm:n aukot valuputkelle 1,2 metrin välein. Myös tiivistystä varten on tehtävä 80–100 mm:n aukkoja riittävän tiheästi. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 97.)

Raudoituksen pinnan korko tulee mitata ennen betonointia, jotta betonipeitepaksuudesta voidaan varmistua. Tässä vaiheessa on suositeltavaa merkata koeporauksille raudattomia paikkoja, mikäli niillä joudutaan myöhemmin todentamaan rakenteen kelpoisuus.

Betonipeitteen tarkoitus on turvata vetojännityksien siirtyminen raudoille sekä suojata teräksiä korroosiolta ja korkeilta lämpötiloilta. Piirustuksissa merkitään peitteen nimellis- ja vähimmäisarvo, joista vähimmäisarvon tulee toteutua rakenteessa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 113.)

Raudoituksen sijaintitoleranssit esitetään standardin SFS-EN 13670 kansallisessa liitteessä SFS 5975. Raudoitustarkastuksessa pyritään tarkastamaan raudoitustankojen oikea määrä ja suunnitelmien mukainen sijainti, sekä jatkosten pituus ja paikka. Työmaalla on havaittu, että kauluksen raudoituksen positiot, jatkosten sijainti suhteessa toisiinsa sekä leikkausterästen jako vaativat erityistä huomiota. Raudoitustarkastuksen yhteydessä on syytä

tarkistaa myös kaapelisuojaputkien sekä perustuksen maadoituksen suunnitelmien mukaisuus. Kaapelisuojaputkien tehtävä on mahdollistaa kaapeleiden asennus perustuksen läpi voimalan kojeistoon. Kuvassa 8 nähdään yhden voimalatyypin mukaiset keltaiset kaapelisuojaputket, sekä perustuksen ja tornin yhdistävät keltaiset maadoitusjohtimet.



Kuva 8. Kaapelisuojaputket ja maadoitusjohtimet

Maadoitus ja sen liitokset asennetaan tuuliturbiinitoimittajan perustuksien maadoitusohjeen sekä tuulipuiston maadoitussuunnitelman mukaisesti. Kaapelisuojaputkien asennusjärjestyksen suunnitelma on syytä hyväksyttää turbiinivalmistajalla. Suunnitelmasta on selvittävä putkien sijainti suhteessa tornin orientaatioon ja perustuksen keskipisteeseen, ja sen on oltava riittävän selkeä asentamista varten.

8 Betoni- ja muottityöt

8.1 Betonitöiden valmistelu ja suunnittelu

Betonitöiden aloituskokous järjestetään hankkeen eri osapuolten välillä. Kokouksessa käsitellään yleisten asioiden lisäksi tarkkoja teknisiä asioita betonivaluihin ja betonin valintaan liittyen. Tavoitteena on laadun varmistaminen ja että kaikilla osapuolilla on selkeä käsitys työn toteutuksesta sekä betonin valintaan liittyvistä asioista. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 91.)

Pääurakoitsijan tulee perehdyttää oma sekä aliurakoitsijoiden henkilöstö hankkeen toimintatapoihin, työturvallisuuteen sekä betonirakentamisen laatuvaatimuksiin

Hankkeen vastaavalla työnjohtajalla tulee olla kohteen vaativuuden mukainen osaaminen ja pätevyys, ja hänen on huolehdittava, että rakennustyössä on riittävä ja vaativuutta vastaavan pätevyyden omaava työnjohto. Yhdellä työnjohtajalla tulee olla pätevyys kohteen vaativuusluokkaan. Rakennusvalvontaviranomainen toteaa vaativuuden ja henkilöstön pätevyyden hankkeessa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 91.)

Betonitöiden työ- ja tehtäväsuunnittelu toimii tehokkaan, nopean ja laadukkaan betonoinnin perustana. Suunnitelmien lähtökohtana toimivat rakennesuunnitelmat, toteutuseritelmät, toteutusstandardit ja ohjeet (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 47). Voimalaperustuksen betonitöihin sovellettavia suunnitelmia ovat esimerkiksi mittaussuunnitelma, betonityösuunnitelma, betonointisuunnitelma, talvibetonointisuunnitelma sekä työturvallisuussuunnitelma. Rakennesuunnittelija laatii betonityöselityksen, joka on perustana edellä mainittuja suunnitelmia laadiattaessa.

Betonityösuunnitelma laaditaan toteutusluokan 2 ja 3 rakenteista koko työmaan betonitöitä varten ennen töiden aloitusta, sisältäen yleiset hankkeen betonitöiden toteuttamista koskevat toteutussuunnitelmat. Suunnitelman laatii kohteen betonityönjohtaja. Betonityönjohtajan vastuulla on myös perehdyttää työvaiheeseen kuuluvat vastuuhenkilöt betonityö- ja betonointisuunnitelmiin. Betonityösuunnitelmaa tarkennetaan tarvittavilta osin kunkin valun erillisellä betonointisuunnitelmalla. Betonointisuunnitelma sisältää betonoinnin vaatimukset, todentamisen ja toimenpiteet. (Suomen Betoniyhdistys ry2019a, 93, 97.) Betonityönjohtajan tulee tarkistaa jokainen työvaihe ja laatia hankkeen laatusuunnitelman mukaiset tarkastusasiakirjat (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 56).

8.2 Muottityöt

Gravitaatioperustuksessa muotti koostuu useimmiten perustuksen päällä olevasta kauluksen muotista sekä alapuolista ulkokehää kiertävästä reunamuotista. Muottimateriaalina on yleisesti käytetty pelti- ja teräsmuotteja, sekä vaneria. Peltimuotti on nopea koota, jonka takia perustuksen alareunan muotti pystytään kasaamaan ja tarkastamaan jopa betonoinnin aikana. Muotti kiinnitetään raudoitusvälikkeitä vasten, jotka varmistavat betonipeitepaksuuden täyttymisen. Perustuksen ulkoreunan tasainen täyttö varmistaa muotin paikallaanpysymisen. Yläreunan muotti kiinnitetään myös raudoitusvälikkeitä vasten peruspultteja ja pulttikehää apuna käyttäen. Muotin paikka mitataan takymetrilla ennen valua. Kuvassa 9 nähdään yhden perustustyypin kauluksen muotin asennus.

Kuva 9. Kauluksen muotin asennus

Kauluksen muottien asennuksessa tulee huomioida betonipeitepaksuuden täyttyminen. Kauluksen raudoitus voi vaatia muokkauksia, mistä johtuen muottien asennus on syytä suorittaa valua edeltävänä päivänä. Muotin purkaminen voidaan useimmiten suorittaa valusta seuraavana päivä sääolosuhteet ja betonin lämpötila huomioiden. Etenkin talviaikaan puretut muottipinnat suojataan ja tarvittaessa eristetään, jonka lisäksi raudoitukseen sidotaan lämpölanka.

8.3 Betonin kuljetus ja vastaanotto

Suomessa lähes kaikki työmaille toimitettava betoni toimitetaan valmisbetonitehtailta. Tehtaiden kapasiteetti vaihtelee riippuen laitteistosta ja betonilaaduista. Betonin toimituskyvyssä on huomattavia paikkakuntakohtaisia eroja. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 135.)

Hidastamattoman betonin tulisi olla työmaalla noin 45 minuutin kuluessa valmistuksesta (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 314). Tuulivoimapuistot sijaitsevat usein syrjäseuduilla, eikä valmisbetoniaseman sijainti välttämättä palvele voimalaperustuksen betonoinnin laatutavoitteitta. Valmisbetonitehtaan vaihtoehdoksi muodostuu mobiilibetoniasema, joka voidaan pystyttää esimerkiksi tuulipuistoon kuuluvalle nostokentälle. Mobiilibetoniasemaa käytettäessä betonin kuljetusajat voivat muuttua tunnista minuuteiksi. Myös ongelmatilanteissa kuljetusmatkan etäisyydestä johtuvat tarkoituksettomat valutauot vähenevät.

Betonin kuljetukseen käytetään pääasiassa pyörintäsäiliöautoja. Autojen säiliö on varustettu purkusiivillä, jotka mahdollistavat betonin uudelleensekoittamisen. Noin viiden minuutin massan sekoittaminen ennen purkua on suositeltavaa, jotta kuljetuksen aikana mahdollisesti erottunut massa palaa tasalaatuiseksi. Ongelmatilanteissa massaan voidaan lisätä notkistinta, joka antaa lisää aikaa massan työstämiseen. Hidastamaton betoni tulee kuitenkin valaa parin tunnin sisällä valmistuksesta. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 315.) Perustuksen suunnittelija voi tarkentaa betonin sallittua kuljetusaikaa sekä lisäaineiden kuten notkistimen käyttöä hankekohtaisesti. Pääsääntöisesti vain betoniaseman vastaava tai laborantti voi lisätä notkistinta massaan sen poistuttua asemalta. Betonin notkistaminen vedellä laskee sen lujuutta ja on kiellettyä.

Pyörintäsäiliöautoja käytettäessä kuljetuksen itsessään ei ole havaittu vaikuttavan betonin puristuslujuuteen eikä ilmapitoisuuteen, mikäli massa ei pääse erottumaan. Kuljetuksesta, purkamisesta ja pumppaamisesta johtuvan massan jäähtymisen arvioidaan olevan kuljetusmatkasta ja ilman lämpötilaerosta riippuen noin 1,5–4 ºC. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 318.)

Betonin vastaanotossa tulee ottaa huomioon pumppuauton sijoituspaikka. Pystytyspaikan maapohjan tulee olla riittävän kantava tukijalkojen pistekuormille pumpun kaatumisen estämiseksi. Purkupaikan sijainnissa on huomioitava säiliöautojen kääntösäde sekä mahdollisuus purkaa kahta autoa samanaikaisesti.

Valmisbetonin kuljetuksessa ei yleisesti ole pakkasrajaa, mutta pumppauskalustoa voi rajoittaa laitevalmistaman asettamat ohjeet (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 329).

Betonin laadunvalvonta alkaa betonin vastaanottotarkastuksella, jossa vastaanottaja tarkistaa rahtikirjasta toimituksen tilauksen mukaisuuden, kuten lujuusluokan, määrän sekä lisäainemerkinnät. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 314.)

8.4 Tuoreen betonin tutkiminen työmaalla

Työkohteessa on myös suositeltavaa suorittaa notkeustestejä valettavalle betonille. Yleisimpiä notkeuden testaustapoja ovat painumakoe ja leviämä. Testausmenetelmät esitetään standardeissa SFS-EN 12350-2 ja SFS-EN 12350-5. Betonia pumpatessa ja tärysauvalla tiivistäessä luokkaa S3 pidetään perusnotkeutena. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 71.)

Betoni olisi hyvä testata vähintään reseptin muuttuessa työn aikana, jolloin varmistutaan sen soveltuvuudesta kuten työstettävyydestä. Kokeiden aikana on myös helppo havaita poikkeamat, kuten väärä runkoaines ja liiallinen erottuvuus.

8.5 Betonointi

Betonityönjohtaja johtaa kantavien betonirakenteiden valmistusta, ja hänen on oltava paikalla etenkin betonoinnin aikana. Mikäli poikkeuksellisen vaativan luokan betonityönjohtaja joutuu poistumaan paikalta, tulee hänen tilallaan olla vähintään vaativan luokan betonityönjohtaja. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 91.)

Betonimassan on oltava homogeenistä pumpatessa, eikä se saa erottua pudotuskorkeuden takia (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 70). Tuulivoimaperustuksen korkeuden ollessa 3–4 metriä korkea, pumppuauton letkun tulee ulottua perustuksen pintaraudoituksen läpi lähelle pohjaa, enintään metrin korkeudelle.

Betonin tiivistämisen tarkoituksena on saada betoni ympäröimään raudoitus ja pulttikehän osat, poistaa massasta ylimääräinen ilma ja saada kiviaineksen osaset hakeutumaan mahdollisimman lähelle toisiaan. Betonimassan tulee tiivistyä kauttaaltaan ja sen tulee liittyä saumattomasti jo olevaan tuoreeseen betoniin ennen kuin tämä alkaa kovettua. Tärytys tulee tehdä riittävän tiheästi ulottuen noin 150 mm edelliseen valukerrokseen. Massa on tiivistynyt riittävästi, kun ilmakuplien nousu pinnalle loppuu, pinta tasoittuu ja alkaa kostua. Betonimassaa ei saa siirtää täryttämällä erottumisvaaran vuoksi. Tiivistyskalustosta sauvatärytin on yleisin ja luotettavin tiivistysmenetelmä. Kaluston teho ja määrä pitää mitoittaa valunopeus ja mahdolliset häiriöt huomioon ottaen (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 159). Pumppausnopeuden ollessa jopa 60 m^3/h riittävän tiivistyksen varmistamiseksi minimi yhtäaikainen sauvatäryjen määrä on massan notkeuden ja rasitusluokan mukaan 4–5 kappaletta (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 71). Paras tiivistysteho saadaan sauvatäryttimen painuessa massaan pystysuoraan omalla painollaan. Pistojen etäisyys on 200–600 mm

riippuen sauvatäryttimen tehosta. Voimalaperustuksen betonointiin soveltuva sauvakoko on 50–70 mm, yhden sauvan tiivistystehon ollessa 15–35 m^3/h. Toinen voimalaperustuksen betonointiin soveltuva tiivistystyökalu on tärypalkki. Palkkia voidaan käyttää perustuksen pintakerroksen tiivistämiseen ja linjarointiin, kun päämassa on tiivistetty sauvalla. Lopuksi pinta hierretään koneellisesti. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 161.)

Voimalaperustuksen betonoinnissa huomioitavia asioita ovat erityisesti ala- ja yläpinnan raudoituksen sekä pulttikehän alapuolisen ankkurilevyn ympäröivän betonin tiivistäminen. Maksimiraekoon pienentäminen pulttikehän syvennyksen ja perustuksen päämassan yläpinnan betonissa vähentää kavitaatioiden riskiä. Eri massojen maksimiraekoko tulee mainita rakennesuunnitelmassa. Pulttien kierteet on suojattava betoniroiskeilta esimerkiksi muovipeitteellä tai koteloimalla. Massiivisen gravitaatioperustuksen betonointi voi kestää perustuksen koosta ja olosuhteista riippuen yli 12 tuntia. Valuryhmän koko tulee mitoittaa siten että työntekijät saavat mahdollisuuden riittäviin taukoihin, ilman että betonointi keskeytyy. Kesällä kuumuus ja talvella kylmyys lisäävät taukojen tarvetta. Betonoinnin suunnittelematon keskeytyminen voi johtaa perustuksen purkamiseen. Suunnittelija määrittelee maksimiajan valukerrosten välille, jonka jälkeen perustus ei enää täytä vaatimuksia.

8.6 Jälkihoito

Jälkihoidolla tarkoitetaan toimenpiteitä betonin suunniteltujen ominaisuuksien saavuttamiseksi betonoinnin jälkeen. Standardin SFS-EN 13670 mukaan rakenteet jaetaan jälkihoitoluokkiin rasitusluokan perusteella. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019a, 103.)

Varhaisjälkihoidossa plastisen betonin pinnan veden haihtuminen estetään käyttämällä nestemäisiä jälkihoitoaineita. Suojaustoimenpiteisiin on ryhdyttävä, mikäli veden haihtuminen pinnalta ylittää 1,0 kg/m^2/h. (Rakentajain kalenteri 2012, 432.)

Varsinainen jälkihoito liittyy saumattomasti varhaisjälkihoitoon, ja sillä pyritään rajoittamaan suuria lämpötilaeroja, sekä estämään veden liian nopea haihtuminen (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 341–342). Voimalaperustuksessa kaulus suojataan välittömästi valun jälkeen. Muu perustus on suojattava niin pian kuin mahdollista, ilman että hierretty pinta vaurioituu. Plastisen kutistuman määrän ollessa suoraan verrannollinen pinnalta haihtuvan kosteuden määrään, tuulelta suojaaminen on erityisen tärkeää. Esimerkiksi 7 m/s ilmavirtaus voi aiheuttaa neljässä tunnissa jopa 10-kertaisen plastisen kutistuman normaaliin kuivumiskutistumaan verrattuna (Rakentajain kalenteri 2012, 428, 432–433). Peitteet poistetaan, kun kuivumiskutistumisen ei katsota enää olevan riski ja lämmönkehityksen voidaan katsoa päättyneeksi, jonka jälkeen perustuksen ympäryksen takaisintäyttö voidaan aloittaa.

Kuivumiskutistuman rajoittamiseksi suojausta suositellaan pidettäväksi 14 vuorokauden ajan (Rakentajain kalenteri 2012, 433).

8.7 Talvibetonointi

Kylmissä olosuhteissa tapahtuvaa betonointina kutsutaan talvibetonoinniksi. Talviolosuhteissa erikoistoimenpiteitä vaaditaan jokaisessa työvaiheessa laadun takaamiseksi. Matala lämpötila johtaa sementin ja veden välisten reaktioiden hidastumiseen, ja sitä kautta myös betonin lujuuskehitys hidastuu. Lujuuskehityksen puute voi johtaa laatuongelmiin, kuten rakennevaurioiden syntymiseen. Matalan lämpötilan lisäksi vesi- ja lumisade sekä pimeys voivat aiheuttaa laadullisia ja työturvallisuuteen liittyviä ongelmia. Betonirakenteita voidaan harvoin toteuttaa ilman kylmän sään vaikutusten huomioonottamista.

Säähäiriöiden vaikutuksia laatuun voidaan parhaiten ehkäistä ennakkosuunnittelulla ja varautumisella. Aikataulusuunnittelussa voidaan hyödyntää pitkän ajan säätilastoja. Alueelliset sääolosuhteet voivat kuitenkin vaihdella rajusti etenkin rannikkoalueilla. Ajankohtaisten lämpötilaennusteiden lisäksi sade-ennusteet helpottavat suojaus- ja lämmitystarpeen arviointia. Lämpötilojen laskuun varautumien tulee aloittaa jo varhain syksyllä ja valmius talvibetonointiin tulee ylläpitää pitkälle kevääseen. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 221.)

Ennen valua lähtöpinta kuten voimalaperustukselle tyypillinen työbetoni tulee tarvittaessa lämmittää, jotta jäätyminen rajapinnoissa voidaan estää. Myös lumi sekä jää tulee poistaa raudoituksesta ja työbetonin pinnasta. Voimalaperutuksen suuren pinta-alan takia raudoituksen peittämisen jälkihoitoon tarkoitetulla peitteellä on havaittu vähentävän jään poistamisen tarvetta huomattavasti. Peitteen reunojen alta voidaan myös puhaltaa lämmintä ilmaa. Suuria peitteitä käytettäessä tulee ottaa huomioon nosturin tarve peitettä poistaessa. Lumi voi myös kertyä peitteen päälle vaikeuttaen turvallista poistoa.

Lumen ja jään poistamiseen on varattava riittävästi aikaa sekä soveltuva kalusto. Mekaanisen poistamisen ollessa hankalaa on mahdollista käyttää höyryä. (Suomen Betoniyhdistys ry 2019b, 219–221.) Äärimmäisissä tilanteissa myös lauhdevedellä on pystytty sulattamaan jäätä ennen valutöitä. Lauhdeveden käytössä on otettava huomioon valupaikan kuivatus. Voimalaperustuksessa ankkuripulttikehän syvennys voi kerätä vettä, jonka poistaminen on haasteellista raudoituksen sekä kaapelisuojaputkien ollessa esteenä. Kuvassa 10 nähdään perustuksen keskisyvennyksen höyrytys käynnissä.

Kuva 10. Perustuksen syvennyksen höyrytys ennen betonointia

Työmaaolosuhteissa on havaittu, että perustuksille muotoon leikatut muovipeitteet hyvin asennettuina riittävät estämään betonin pinnan liiallisen jäähtymisen ja ennenaikaisen jäätymisen. Perustuksen ulkoreunalle sekä kaulukseen on talviolosuhteissa suositeltavaa asentaa lämmityskaapeli äärigeometrian lämpimänä pysymisen takaamiseksi. Muottien purkamisen jälkeen solumuovien asentaminen lisäeristeeksi on mahdollista. Massiivisen anturan oma lämmöntuotto pääsääntöisesti riittää jäätymislujuuden saavuttamiseksi. Betonin tulee saavuttaa 5 MN/m^2 lujuus ennen kuin sen lämpötila laskee alle 5 ºC. Betonin jäätyessä ennen jäätymislujuuden saavuttamista sen loppulujuus jää vajaaksi ja muut ominaisuudet heikkenevät veden jäätymisen seurauksena. Betoni ei menetä lujuuttaan jäätymisen seurauksena jäätymislujuuden saavutettuaan. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 515.) Todellisen loppulujuuden saavuttamiseksi on kuitenkin ylläpidettävä riittävää lämpötilaa aikataulun vaatimalla tavalla.

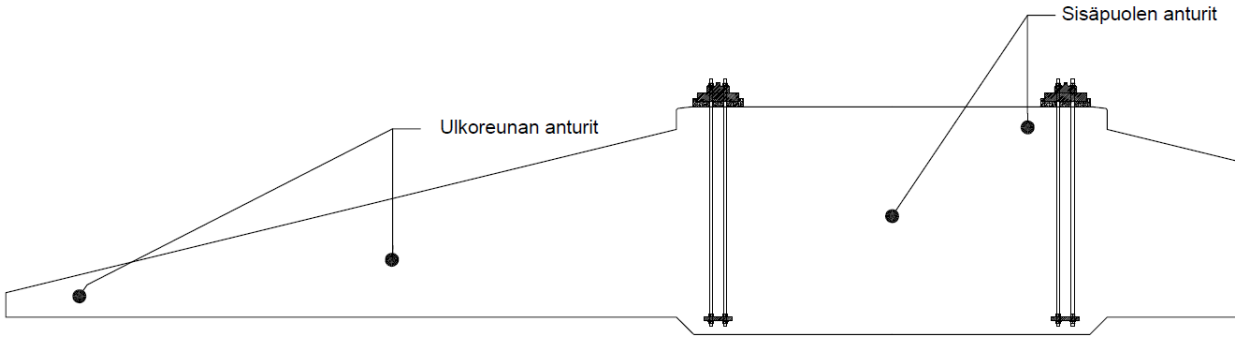
8.8 Lämmönkehitys ja sen seuranta

Betonin sideaineena käytetyn sementin hydrataatioreaktion kehittämä lämpö korreloi lujuuskehityksen kanssa erityisesti kovettumisen alkuvaiheessa, jonka takia lämmönkehitystä voidaan hyödyntää esimerkiksi alkuvaiheen lujuuden arvioinnissa. Kovettumisvaiheessa lämpötila voi myös tuottaa laadullisia ongelmia.

Voimalaperustuksen massiivisuudesta johtuen betonin hydrataatiolämpötila pyrkii nousemaan korkeaksi, mikä häiritsee reaktiota ja voi aiheuttaa lujuuskatoa. Lämpötilan vaikutukset on otettava huomioon, mikäli kovettumislämpötilan odotetaan nousevan yli 60 ºC esimerkiksi tavoitelujuutta nostamalla. Yli 70 ºC lämpötilassa betonissa alkaa tapahtua

haitallisia kemiallisia muutoksia. Sisäisten jännitysten estämiseksi betonoitavan rakenteen lämpötilaeron tulee pysy alle 20 ºC yhden metrin matkalla. Alentunut betonin lujuus voidaan selvittää poraamalla rakenteesta koekappaleita. Rakennesuunnittelija arvioi puristuslujuuden vaikutuksen rakenteen toimintaan. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 76.)

Talvella voimalaperustuksen ulkoreuna altistuu helposti kylmälle sen ollessa ohuin kohta rakenteesta. Reunan lämpötilaa voidaan seurata lämpötila-antureilla ja betonin pinnasta lämpökameralla. Kuvassa 11 on esitetty esimerkki lämpötilaseurannan mittauspisteistä. Antureiden sijoittelun tavoitteena on mitata perutuksen sisäisiä lämpötilaeroja.

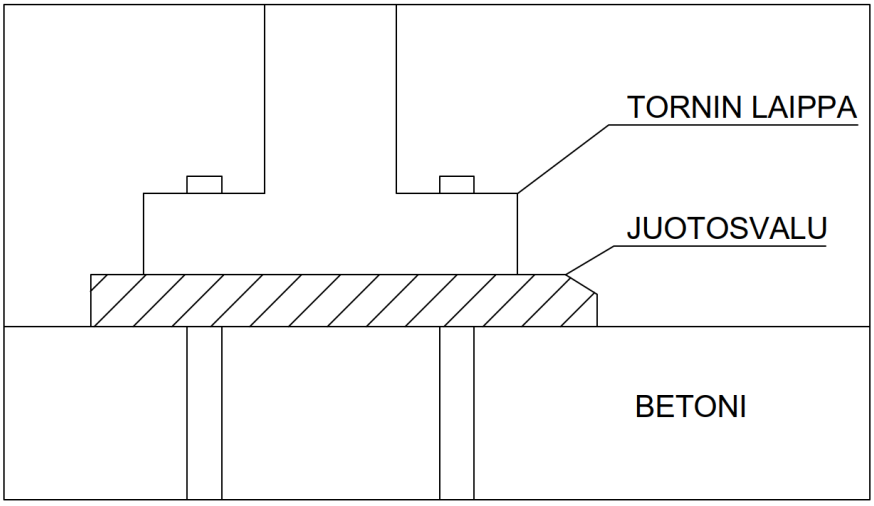


Kuva 11. Gravitaatioperustuksen lämpötila-antureiden sijoittelu

Myös liian nopea jäähtyminen voi aiheuttaa pinnan halkeilua. Nyrkkisääntönä on pidetty, että puolen metrin paksuinen rakenne saa jäähtyä 20 ºC ensimmäisen 24 tunnin aikana, ja vastaavasti kahden metrin paksuinen rakenne 10 ºC. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016a, 77.)

8.9 Juotosvalu

Juotoksen tehtävä on välittää puristukset tornilta perustukselle. Voimalatyypistä riippuen, joko tornin alin teräslohko tai pulttikehään kuuluva paineentasauslevy yhdistyy juotosvalun avulla perustuksen betonipintaan. Juotosvalussa käytetään korkean puristuslujuuden sementtipohjaisia, yleensä kemiallisia erikoismassoja, jotka ovat itsetiivistyviä ja joiden puristuslujuus voi ylittää 120 megapascalia. Juotosmassan soveltuvuus käyttökohteeseen tulee selvittää valmistajalta. Massa valmistetaan useimmiten valupaikalla käyttäen sekoitinpumppua, johon vesi ja kuiva juotosmassa annostellaan. Kuvassa 12 on havainnoitu yhden tyyppinen tornilohkon liitos perustukseen.



Kuva 12. Havainnekuva juotosvalusta

Juotosmassojen suositellut käyttölämpötilat ovat yleisesti +10–25 ºC, mutta oikeilla toimenpiteillä juotos voidaan suorittaa suosituslämpötilojen ulkopuolella. Korkeissa lämpötiloissa juotosmassaan valmistamiseen voidaan käyttää kylmää vettä, ja viileässä säilytetty materiaali pidentää työstettävyysaikaa. Juotettavien pintojen minimilämpötila voi rajoittaa juotoksen tekoa. Voimalaperustuksessa perustuksen betonipinta voidaan tarvittaessa lämmittää betonointivaiheessa asennetuilla lämmityskaapeleilla. Juotettavan rakenteen suojaaminen esimerkiksi sääsuojalla ja sen lämmittäminen mahdollistaa juotostöiden suorittamisen myös talviolosuhteissa. Juotoksista pidetään pöytäkirjaa, johon tulee merkitä massan säkissä näkyvä päivämäärä ja eränumero mahdollisten ongelmatilanteiden varalta, jolloin tuote-erä voidaan jäljittää.

Juotosvalua ennen on hyvä suorittaa koevalu. Valumuotin tulisi mukailla todellisen juotosvalun geometriaa, jotta käytetyn juotosmassan soveltuvuus voidaan varmistaa.

Juotettava alue tulee puhdistaa roskista ja sementtiliimasta. Sekoitinpumppu ja letku voidellaan, jonka jälkeen valmistettu massa kaadetaan ruuviin ja pumpataan muualle kuin muottiin kunnes valuletkusta tulee pelkästään puhdasta juotosmassaa. Ensimmäinen erä kierrätetään uudelleen ruuvin läpi, jonka aikana toinen erä valmistuu. Toisen erän ollessa valmis keskeyttämätön juottaminen voidaan aloittaa. Juotosmassasta otetaan laatusuunnitelman mukainen määrä puristuskappaleita. Leviämäkokeen suorittaminen ennen muotin täytön aloittamista on suositeltavaa. Juotosbetonin jälkihoidossa voidaan noudattaa betonoinnin jälkihoidon periaatteitta. (BASF 2012) Erityisen tärkeää juotosvalussa on varmistua koko juotettavan alueen täyttymisestä. Muotti tulisi täyttää vain yhdeltä puolelta, jolloin voidaan varmistua siitä, ettei juotettavien pintojen väliin jää ilmataskuja.

8.10 Perustuksen viimeistely

Perustus on usein pitkään alttiina ympäristöstä sekä perustuksen päällä työskentelystä johtuville rasituksille. Myöskään betonin jälkihoito ei aina poista kaikkia mahdollisia laatuvirheitä.

Jälkihoidon jälkeen havaittava halkeilu johtuu yleisesti plastisesta kutistumisesta ja painumasta, lämpötilaeroista kovettumisvaiheessa, hydrataatiokutistumasta sekä kuivumiskutistumisesta (Rakentajain kalenteri 2010, 428). Sallitun halkeamaleveyden ylittävä halkeilu vaatii aina lisätutkimuksia. Yleisesti perustuksen pinnassa esiintyvä lievä halkeilu on korjattu korjauslaasteilla, mikäli tutkimusten perusteella voidaan todeta, ettei halkeama ulotu raudoitukseen, jolloin tarkoituksena on raudoituksen suojaaminen korroosiolta. Matalaviskositeettisilla epoksihartseilla injektoitaessa materiaali liimataan yhtenäiseksi, jolloin estetään ulkopuolisten rasitusten vaikutus raudoitteisiin sekä saatetaan rakennelujuus alkuperäiselle tasolle. Halkeaman ulottuessa raudoitukseen tai sen ollessa laajempi rakenteellinen halkeama, on aina käytettävä injektointia.

Perustuksesta osa jää maan pinnalle ja on siksi erityisen altis rasituksille. Erityisesti tornista valuvan veden on havaittu aiheuttavan vaurioita perustuksen kaulukseen ja yläpintaan. Olosuhteista johtuvia rasituksia pyritään vähentämään käyttämällä vesieristystä näkyvällä osalla. Tuulivoimalan perustuksen vesieristys on altis voimalan käytön aikana lapoihin kertyvän jään putoamiselle, ja vaatii siksi tuotteen, joka kestää myös mekaanista rasitusta. Vesieristyksen asentamisessa on kiinnitettävä huomiota valmistajan määrittelemiin betonin ja ilman kosteuksiin. Voimalaperustuksille ei ole omaa ohjeistusta vesieristyksen suhteen, mutta esimerkiksi siltojen korjausohjeen mukainen alustan absoluuttinen kosteus saa olla korkeintaan 5 massa-% (Liikennevirasto 2018). Tuulivoimalakäyttöön suunniteltuja vesieristysjärjestelmiä on jo markkinoilla muutamalta valmistajalta. Vesieristeen asennuksessa tulee aina seurata valmistajan ohjeistusta myös edeltävien töiden osalta. Kuvassa 13 nähdään esimerkki lasikuitukangas vahvisteisen vesieristejärjestelmän asentamisesta.

Kuva 13. Lasikuituvahvisteinen vesieriste (KSBR)

Lasikuituvahvisteisen vesieristeen asentaminen on haasteellista, mikäli perustuksen kauluksen ja adapterilevyn alueella on esteitä, kuten tiettyjen kallioankkuriperustusten tapauksessa ankkureiden päät. Näissä tapauksissa perinteisemmät vesieristejärjestelmät on mahdollista korvata esimerkiksi ruiskutettavalla polyureapinnoituksella.

9 Yhteenveto ja pohdinta

Tämä opinnäytetyö käynnistyi projektissa havaitun tietotaidon ja asiantuntemuksen osittaisen puutteellisuuden johdosta, jota havaittiin projektiin osallistuneiden eri sidosryhmien ja henkilöiden välillä. Oletus laatuvaatimuksien täyttymisestä sekä niitä määrittelevistä tekijöistä vaihteli työmaatasolla, mikä johti tarpeeseen kerätä oleellinen tieto helposti saatavilla olevaksi kokonaisuudeksi, joka antaa näkemystä tuulivoimarakentamisen luonteesta.

Työn perustana käytettiin paljon betoniteollisuuden kirjallisuutta, jossa tuodaan selkeästi esille betonirakentamisen teoriaa sekä hyviksi todettuja toimintatapoja. Aikaisempi kokemus betonirakentamisesta antoi opinnäytetyön tekijälle hyvän pohjan tuulivoimarakentamiseen, mutta tuulivoimateollisuuden erityiset vaatimukset vaativat tottumista ja asioista selvää ottamista. Osa vaatimuksista on teknisiä, mutta myös asiakasyritykset sekä hankkeiden luonne poikkeaa perinteisestä rakentamisesta. Betonirakentamisen perusasiat eivät kuitenkaan ole merkittävästi muuttuneet viime aikoina, ja kirjallisuuden päivitetyt teokset eivät usein kumoa vanhoja, pois lukien suunnittelustandardit sekä niiden kansalliset liitteet. Tuulivoimalaperustuksen laadunhallinta eroaa yleisesti totutusta rakentamisen laadunhallinnasta lähinnä sille ominaisten lähtövaatimusten sekä rakenteen ominaisuuksien takia. Tästä syystä rakentamiseen ryhtyvän on varauduttava riittävällä soveltuvalla tietotaidolla, sekä tuntemuksella tuulivoima-alan erityispiirteistä, kuten suunnittelustandardit ja -ohjeet. Vaatimukset täyttävän perustuksen rakentaminen ei vaadi normaalista rakentamisesta merkittävästi poikkeavia toimenpiteitä, vaan tuttuja toimintatapoja muokataan vallitsevaan tilanteeseen sopivaksi. Laadunhallinnassa tämä esiintyy vahvasti tuttujen standardien sekä suunnittelu- ja työohjeiden käyttämisessä yhdessä tuulivoimateollisuudelle tyypillisten teosten kanssa.

Betonirakentamisen ongelmat ja riskit, jotka voivat johtaa vaatimukset täyttävän rakenteen epäonnistumiseen ovat hyvin tutkittuja sekä tunnettuja. Syiden joukko on kuitenkin laaja sekä olosuhteet vaihtelevat, kuten myös vaihtelee rakennustyömaiden toteutuksesta ja johtamisesta vastaavien tietotaidon taso. Siitä johtuen yksi tärkeistä keinosta virheiden ja laatuongelmien välttämiseen on vahva yhteistyö kaikkien hankkeeseen liittyvien osapuolten välillä. Perustukset toimittavan urakoitsijan tehtäväksi muodostuu siis myös sidosryhmien välisen yhteistyön edistäminen, sekä eri näkemysten esiin tuominen. Onnistunut laadunhallinta vaatii siis urakoitsijalta aktiivisuutta niin suunnittelupalavereissa kuin myös työmaalla. Tuulivoimateollisuuden kilpailu on kovaa, ja se ajaa alalla toimivia kehittymään sen mukana. Tuulivoimarakentaminen nopeasti kehittyvänä rakentamisen erikoisalana pakottaa urakoitsijan ja sen sidosryhmät, kuten suunnittelun, osin kehittämään uusia toimintatapoja, mutta myös soveltamaan jo hyväksi todettua. Laadunhallinnan kattaessa koko rakentamisen

prosessin aina suunnittelusta lopputuotteen vaatimustenmukaisuuden todentamiseen, avautuu mahdollisuus kehittää tehokkaampia toimintatapoja ja työkaluja vaatimusten täyttämiseksi. Urakoitsijalla on kuitenkin vain rajallinen mahdollisuus vaikuttaa laatuvaatimuksiin.

KSBR on sertifioinut laadunhallintajärjestelmänsä DNV GL:n toimesta täyttämään standardin ISO 9001:2015 vaatimukset. Sertifiointi vaatimuksena ei ole laatukäsikirjan laatiminen, mutta sen tekeminen voisi olla tapa kehittää laadunhallintaa kokonaisuutena. Sertifioinnin lisäksi laatukäsikirja voitaisiin suunnata asiakkaalle osoittamaan yrityksen toimintatapoja, sekä omalle henkilöstölle tukemaan toimintaa ja päätöksentekoa. Laadunhallintaa voidaan kehittää henkilöstön kautta myös tietotaitoa parantamalla, esimerkiksi eri koulutusten avulla. Tieto ja tietolähteet on oltava helposti saatavilla, ja työntekijää tulisi motivoida ratkaisukeskeiseen toimintaan. Myös laatupäällikkö tehtävän perustaminen voisi olla toimiva tapa ohjata nopeasti kasvavan yrityksen laadunhallinnan kehitystä. Laatupäällikön tehtäviin kuuluisi esimerkiksi edellä mainittujen koulutusten järjestäminen, sekä laatujärjestelmän kehittäminen toimintaohjeiden ja asiakirjapohjien avulla.

Lähteet

BASF Construction Chemicals GmbH. 2012. Installation guide for Masterflow 9300.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. 2001. Wind Energy Handbook. Chichester: John Wiley & Sons.

DNV/RISØ. 2002. Guidelines for Design of Wind Turbines. 2nd Edition. Kööpenhamina: Det Norske Veritas and Wind Energy Department, Risø National Laboratory.

Ellis G. 2021. What are As Built drawings? Viitattu 10.10.2021. Saatavilla https://constructionblog.autodesk.com/as-built-drawings/

Germanischer Lloyd. 2010. Guideline for the Certification of Wind Turbines. Edition 2010. Hampuri: Germanischer Lloyd.

Helsingin yliopisto. Datahallinnan perusopas. Viitattu 27.10.2021. Saatavilla https://libraryguides.helsinki.fi/datanhallinta/jarjestys.

IEC 61400-1. 2005. Wind turbines - Part 1: Design requirements. 3rd Edition. Geneve: International Electrotechnical Comission.

Junnonen J. Rakennushankkeen laadunvarmistus. Viitattu 5.4.2021. Saatavilla: https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK020202.pdf

Kankainen, J., Junnonen, J. 2001. Laatuajattelu ja rakennustyömaan laatutoiminnot. Helsinki: Rakennustieto.

Kiwa Inspecta. Tyyppihyväksyntä ja tyyppihyväksyntämerkki. Viitattu 6.6.2021. Saatavilla https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme/tyyppihyvaksynta-ja-tyyppihyvaksyntamerkki/

Liikennevirasto. 2018. Siltojen korjausohjeet. Viitattu 28.9.2021. Saatavilla https://julkaisut.vayla.fi/sillat/silko/kansio2/s2811_web.pdf

Motiva. 2021. Tuulivoimateknologia. Viitattu 8.4.2021. Saatavilla https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia

Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL Ry. 2010. Rakentajain kalenteri 2010. Helsinki: Rakennustieto.

Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL Ry. 2012. Rakentajain kalenteri 2012. Helsinki: Rakennustieto.

RT S-1180. 1997. Työmaan laatusuunnitelma. Helsinki: Rakennustieto.

RT S-1224. 2009. Rakennushankkeen laadunvarmistustoimet. Helsinki: Rakennustieto.

SFS 5975:2019 Betonirakenteiden toteutus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Suomen Betoniyhdistys Ry. 2018. BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2018. Helsinki: BY-Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys Ry. 2019a. BY 47 Betonirakentamisen laatuohjeet 2019. Helsinki: BY-Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys Ry. 2016a. BY 65 Betoninormit 2016. Helsinki: BY-Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys Ry. 2016b. BY 68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – Opas suunnittelijoille 2016. Helsinki: BY-Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys Ry. 2019b. BY 71/RIL 149-2019 Betonirakenteiden työmaatoteutus. Helsinki: BY-Koulutus.

Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry. Mitä standardi tarkoittaa? Viitattu 2.10.2021. Saatavilla https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/

Suomen Tuulivoimayhdistys Ry. Tuulivoimatekniikka. Viitattu 8.4.2021. Saatavilla https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka

Talonrakennusteollisuus Ry. 2014. Rakennustöiden laatu 2014. Helsinki: Rakennustieto.

Talonrakennusteollisuus Ry. 2017. Rakennustöiden laatu 2017. Helsinki: Rakennustieto.

Ympäristöministeriö. Varmennustodistus. Viitattu 8.4.2021. Saatavilla https://ym.fi/varmennustodistus