

# TUULIVOIMALAN PERUSTUKSEN RAKENTAMINEN

Hoikkaniemi Konsta

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Insinööri (AMK)  
2022

---

<b>Tekijä</b>	Konsta Hoikkaniemi	<b>Vuosi</b>	2022
<b>Ohjaaja(t)</b>	Matti Moilanen		
<b>Toimeksiantaja</b>	Suvic Oy		
<b>Työn nimi</b>	Tuulivoimalan perustuksen rakentaminen		
<b>Sivu- ja liitesivumäärä</b>	30		

---

Opinnäytetyössä käsiteltiin tuulivoimalan perustuksen rakennusvaiheita työlaatan betonoinnista itse perustuksen betonointiin asti. Opinnäytetyössä käsitellään kunkin vaiheen suorittamiseen vaadittavat valmistelut ja kuinka työteknisesti se suoritetaan.

Opinnäytetyön tavoitteena oli käydä läpi tunnetut ja käytössä olleet menetelmät ja kehittää näiden rinnalle uusia menetelmiä, joilla voidaan helpottaa työn suorittamista. Työvaiheiden toteutuksessa on paljon erilaisia toimintatapoja ja menetelmiä, joiden käytössä tulee aina valita tilanteeseen sopiva menetelmä.

Työssä selvisi työvaiheisiin erilaisia vaihtoehtoisia menetelmiä, joilla tehtäviä voidaan suorittaa tehokkaammin ja turvallisemmin. Myös jo olemassa olevien menetelmien kehityksellä saavutettiin työvaiheiden parempi soveltuvuus. Esimerkiksi työlaattojen tekemisellä kahdessa osassa voidaan välttyä perinteisen työmenetelmän ongelmilta ja parantaa työturvallisuutta.

Degree Programme in Civil  
Engineering  
Bachelor of Engineering

---

<b>Author</b>	Konsta Hoikkaniemi	Year 2022
<b>Supervisor</b>	Matti Moilanen	
<b>Commissioned by</b>	Suvic Oy	
<b>Subject of thesis</b>	Building the Foundation of a Wind Turbine	
<b>Number of pages</b>	30	

---

The aim of this thesis was to go through step by step how the wind turbine generator foundation is made, and to identify new methods that can be used to make the building of the foundation more efficient.

The study focused on building of two kinds of foundations that Suvic Oy mainly uses. These types are Rock anchor foundation and Gravity Foundations. These foundation types also have variations that include adapter foundations and piling. The thesis was done by studying relevant literature and interviewing professionals. Author's experience in construction management work and knowledge of the building of wind turbine foundations helped the thesis process.

The goal set for this thesis was achieved. The results of the thesis can be used as overall guidelines for how foundation work can be done. New methods were also discovered supporting the same principles that the already existing methods have.

Key words                      Wind power, Wind turbine foundation, Renewable energy

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	PERUSTUSTYYPIT .....	8
2.1	Maanvarainen perustus .....	8
2.2	Kallioankkuriperustus .....	8
3	TYÖLAATTA .....	10
3.1	Työlaatan tarkoitus .....	10
3.2	RAF perustus .....	10
3.2.1	Työlaatan betonointi RAF .....	11
3.3	GRAV-perustus .....	11
4	ANKKURIKEHÄN ASENNUS .....	13
5	RAUDOITUS .....	15
6	BETONOINTI .....	17
6.1	Turvallisuus .....	18
6.2	Betonointi kohteen varustelu .....	19
6.3	Työn suorittaminen .....	21
6.3.1	Ankkurikehän aluslevyn betonointi .....	21
6.3.2	Kauluksen betonointi .....	21
6.3.3	RAF- perustuksen betonointi .....	22
6.3.4	GRAV- perustuksen betonointi .....	22
7	LUJUUDENKEHITYS/LAADUNVARMISTUS .....	25
7.1	Lämpötilan mittaus .....	25
7.2	Työmaakoekappaleet .....	25
8	JÄLKIHOITO JA SUOJAUS .....	27
8.1	RAF-perustus .....	27
8.2	GRAV-perustus .....	27
9	POHDINTA .....	29
	LÄHTEET .....	30

## ALKUSANAT

Haluaisin kiittää Suvic Oy:tä mahdollisuudesta tämän opinnäytetyön tekemiseen ja saamastani tuesta sen tekemiseen.

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

RAF	Rock anchor foundation
Grav	Gravity foundation

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on käsitellä tuulivoimalan perustuksen rakennusvaiheet perustustyypeittäin sekä käydä läpi työteknisesti eri työvaiheiden suorittaminen ja kehittää työvaiheiden läpiviemistä niiden helpottamiseksi. Työssä käytetyt menetelmät ovat käytössä olevia ja hyväksi havaittuja menetelmiä työn suorittamiseksi.

Työ on kirjoitettu usean eri perustustyyppin rakentamisen kokemuksella. Kuitenkin työvaiheet kaikissa eri perustustyypeissä ovat jakautuneet kallioankkuri- ja maanvaraisten perustuksien välille. Perustusten työvaiheiden työtekniinen toteuttamiseen on olemassa niin monta tapaa kuin on tekijöitä. Kaikkiin työvaiheisiin on olemassa selkeät toimintamallit, mutta ne eivät aina ole täydellisesti sopivia työvaiheeseen. Olemassa olevia toimintamalleja tuleekin pyrkiä aina kehittämään työvaiheen tehostamiseksi ja parhaan laadun takaamiseksi.

Perustuksen betonoiminen on koko perustuksen rakentamisen tärkein vaihe, johon kaikilla muilla työvaiheilla pyritään ja onkin tärkeää, että betonityönjohtaja on ammattitaitoinen parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Betonoinnissa työn suorittamiseen on selkeät toimintamallit, mutta betonoinnin yhteydessä suunnitelmiin voi tulla muuttujia. Haasteet ja muuttujat kuitenkin kuuluvat betonointiin ja tärkeintä on niihin reagoiminen sopivalla tavalla.

## 2 PERUSTUSTYYPIT

Tuulivoimaloissa perustustyypit jakautuvat kallioankkuri- ja maanvaraisiin perustuksiin. Perustustyypin valintaan vaikuttaa pääsääntöisesti perustuspaikan maaperän koostumus. Molemmissa perustuksissa voimalan koko voidaan pitää samana.

### 2.1 Maanvarainen perustus

Maanvaraisissa perustuksissa perustuksen koko on huomattavasti suurempi verrattuna kallioankkuri perustukseen. Perustus voidaan tehdä paikkaan, missä kallion pinta on niin syvällä, ettei kallioankkuriperustusta ole taloudellisesti järkevä rakentaa.

Maanvarainen perustus tehdään nimensä mukaisesti maa-aineksen päälle ja maaperän kantavuudella on suuri merkitys perustuksen kokoon. Muita perustuksen kokoon vaikuttavia tekijöitä ovat siihen kohdistuvat voimat ja pohjaveden aiheuttama noste.

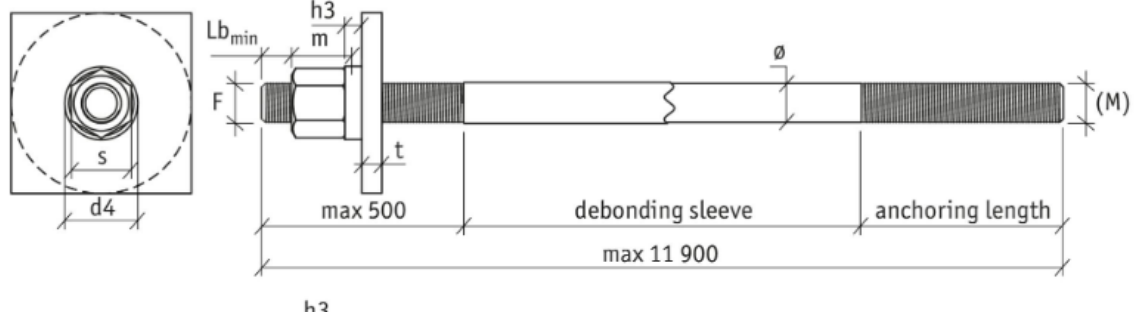
Huonosti kantavaan maaperään tehdessä perustus voidaan myös paaluttaa. Paalutukseen kannattaa ryhtyä siinä vaiheessa, kun massanvaihto perustusohjassa kasvaa niin suureksi, ettei ole taloudellisesti enää järkevää tehdä sitä. Paalutuksessa perustuksen kuorma välittyy paalujen avulla kallioon, jolloin maaperän kantavuudella ei ole enää niin suurta merkitystä.

### 2.2 Kallioankkuriperustus

Kallioankkuriperustuksessa erona maanvaraiseen perustukseen on kallioankkurit, joilla perustus kiinnitetään kallioon. Tässä tyypissä perustuksen kokoon vaikuttaa käytetyt ankkurit ja niiden määrä. Normaalia ankkurikehää käytettäessä

perustuksen halkaisija on tyypillisesti 10–12 metriä ja ankkureita asennetaan 15–18 kpl riippuen kuormitustekijöistä ja ankkurien tyypistä.

### FATBAR Rock Anchors



Kuvio1. Ankkuripultin leikkaus (Peikko Oy)

Kallioankkureita käytettäessä perustuksen betonoinnin ja muottien purkamisen jälkeen perustus monttu täytetään maa-aineksella. Täytön jälkeen voidaan aloittaa ankkureiden reikien poraaminen. Poraamista varten rauditusvaiheessa perustukseen asennetaan ankkureiden kohdalle putkia, jotka menevät perustuksen pinnalta perustuksen alapintaan asti. Esimerkiksi ankkuripulttia käytettäessä kuvion 1 mukainen pultti asennetaan porattuun reikään ja juotetaan juotos betonilla kiinni kallioon. Juotosbetonin sitouduttua riittävän pitkän ajan jälkeen voidaan ankkuri jännittää rakennesuunnittelijan vaatimaan voimaan.

Kallioankkuriperustuksissa etuna maanvaraisiin perustuksiin on niiden pienempi rakennusmateriaalien tarve. Kallioankkuriperustuksissa betonin ja raudan määrä on jopa yli 50 % pienempi kuin maanvaraisessa laatassa. Pienemmät rakennusmateriaalien määrät vaikuttavat perustuksen rakennuskustannuksiin ja hiilijalanjälkeen vähentämällä molempia.

Kallioankkuri perustuksia voidaan myös tehdä niin sanottuina adapteriperustuksina, joissa itse perustuksen koko pienenee huomattavasti. Tässä tyypissä adapteriosa ankkuroidaan kallioon kiinni moninkertaisella ankkurimäärällä verrattuna tavanomaisempaan kallioankkuri perustukseen. Perustusratkaisun käytössä suurissa voimaloissa ongelmaksi muodostuu ankkureiden ja adapteriosan koon kasvaminen kohtuuttoman suuriksi nostoen rakennuskustannuksia verrattuna tavanomaisiin kallioankkuri perustuksiin. (Norrkniivilä,2022.)

### 3 TYÖLAATTA

#### 3.1 Työlaatan tarkoitus

Työlaatatalla tarkoitetaan betonilaattaa, jonka tarkoitus on mahdollistaa ankkurikehän asennus tasaiselle pinnalle. Työlaatan koko vaihtelee perustustyypeistä riippuen hyvinkin paljon. Gravitaatio-perustuksessa työlaatan halkaisija tyypillisesti on pienempi kuin RAF-perustuksessa johtuen perustuskaivannon ominaisuuksista. Gravitaatio-perustuksessa työlaatan ei tarvitse kattaa koko perustuksen halkaisijaa toisin kuin RAF-perustuksessa. Työlaatan halkaisija tyypillisesti gravitaatio-perustuksissa on noin 5–6 metriä riippuen ankkurikehän koosta. Tietyissä tilanteissa on kuitenkin järkevää tehdä koko perustuksen halkaisijan kokoinen työlaatta. RAF perustuksissa työlaatan halkaisija on yleensä hieman suurempi kuin itse perustuksen halkaisija noin 13 metriä.

#### 3.2 RAF perustus

Tässä perustamistavassa kaivanto toteutetaan tyypillisesti louhimalla kalliota. Kalliopinta louhitaan T400 tarkkuudella, mikä tarkoittaa, ettei louhitun irtokiviaineksen jäljiltä kaivannossa saa esiintyä yli 400 mm:n poikkeamia. (Suvic oy, 2021.) Louhinnan jälkeen kaikki kiviaines tulee olla poistettuna kaivannosta kaivinkoneella. Kun kiviaines on saatu poistettua, tulee aloittaa paljastuneen kalliopinnan puhdistus hienommasta aineksestä. Tässä työvaiheessa on järkevää aloittaa harjakoneella kalliopinnan harjaus, jotta suurin osa hienoaineksesta on saatu pois työlaatan alueelta. Tämän jälkeen kalliopinta tulee pestä korkeapainepesurilla, sekä käyttää suurtehoimuria poistamaan irronnut hienoaines perustuskaivannosta. Kun kalliopinta on saatu puhdistettua hienoaineksesta, voidaan asentaa kaapelisuoja-putket sekä perustuksen keskipiste voidaan merkitä. Talvella kalliopinnan puhdistuksessa haasteena on jäänyt hienoaines, jonka poisto on haastavaa. Talvella onkin suositeltavaa suorittaa pesu kuumalla vedellä, joka sulattaa hienoaineksen. Tämän jälkeen sula hienoaines on helppo poistaa perustuksesta suurtehoimurilla.

### 3.2.1 Työlaatan betonointi RAF

Ennen betonointia tulee olla merkittynä perustuksen keskipiste ja työlaatan pinnan korkeus sekä kaapelisuoja-putket tulee olla asennettuna. Lisäksi talvella on järkevää asentaa lämmityskaapeleita, joilla betoni saadaan kovettumaan nopeammin. Betonoinnissa tulee käyttää erityistä varovaisuutta kalliopinnan epätasaisuuden vuoksi. Kalliopinnan epätasaisuus aiheuttaa haasteita myös laatan pinnan tasaisuuden saavuttamisessa.

Työsuunnittelussa on järkevää ottaa huomioon työlaatan betonointi kahdessa osassa paremman lopputuloksen saavuttamiseksi. Ensimmäisessä osassa tavoitteena on ainoastaan tasata kallion epätasaisuuksia betonin pinnan tasaisuudella ei ole merkitystä tässä vaiheessa. Kun ensimmäinen betonointi on suoritettu ja betoni on saavuttanut lujutta tarpeeksi, jotta laatan päällä kävely on mahdollista, voidaan aloittaa toisen osan betonointi. Toisessa osassa betonoidaan työlaattaa oikeaan korkoon.

Kun betonointi suoritetaan kahdessa osassa, voidaan saavuttaa huomattavasti parempi lopputulos. Betonoinnin suorittaminen on myös turvallisempaa, koska tiedetään koko ajan tuoreen betonin syvyys ja näin ollen voidaan välttää vahingossa syvään betoniin astuminen.

### 3.3 GRAV-perustus

GRAV-perustamistavassa tyypillistä ovat suuret kaivannot ja massanvaihdot. Poiketen RAF-perustuksesta GRAV-perustus rakennetaan paikkaan, jossa kallioperustus ei ole mahdollinen. Massanvaihdon ollessa loppusuoralla tulee asentaa kaapelisuoja-putket, mikäli ne on suunniteltu asennettavaksi työlaatan alle. Kun massanvaihto ja levypainemittaukset on suoritettu, tulee määrittää perustuksen keskipiste ja työlaatan haluttu halkaisija. Halkaisijan määrittämisessä tulee ottaa huomioon vallitsevat sääolosuhteet sekä ankkurikehän halkaisija. Talvella työlaatta kannattaa tehdä koko perustuksen halkaisijalle, sillä lumen ja jään

poisto on huomattavasti helpompi toteuttaa betonin päältä verrattuna murskepin-  
taan.

#### 4 ANKKURIKEHÄN ASENNUS

Ankkurikehän tehtävänä perustuksessa on lukita tuulivoimalan torniosa perustukseen. Ankkurikehän muoto ja koko vaihtelevat perustustyypistä ja valmistajasta riippuen. Ankkurikehän asentamisen aikana tulee varmistua siitä, että valmistajan ohjeita noudatetaan asennustyön aikana. Ankkurikehän valmistaja antaa asennuksessa käytettävät toleranssit, asennusjärjestyksen ja tiedot halutuista dokumenteista. Asennuksen aikana tulee varmistua siitä, että työ suoritetaan turvallisesti ja valmistajan ohjeiden mukaisesti. Yleensä ankkurikehän toimittaja vaatii kurssin suorittamisen kyseessä olevan ankkurikehän asentamiseksi.



Kuva 2. Ankkurikehä (Peikko Oy)

Ankkurikehien malleja on useita erilaisia, kuitenkin ne muistuttavat pääsääntöisesti kuvan 2 mukaista ankkurikehää. Kuitenkin on olemassa niin sanottuja hybridi torneja, joissa ankkurikehä poikkeaa ulkonäöltään hyvin paljon tornin rakenteen vuoksi. Kuvan 2 mukaisiin ankkurikehiin kiinnitetään terästorni, joka kiinnitetään ankkurikehässä oleviin pultteihin kiinni.

Hybriditorneissa osa tornista on toteutettu betonielementeillä, jotka jännitetään ylhäältä vaijereilla kiinni ankkurikehässä oleviin pultteihin jännittäen rakenteen. Betonielementtien päälle tornia jatketaan terästornilla, joka kiinnitetään betonielementtiin pulteilla.

Ennen ankkurikehän asentamista on tärkeää varmistaa asennuspaikalla vallitsevien olosuhteiden olevan ankkurikehän asentamiselle suotuisat. Asennuspaikan tulee olla tasainen ja mahdollisimman puhdas kaikesta irtoaineksesta, sekä jäästä. Kaivannon ollessa pohjaveden pinnan alapuolella veden nousua kaivantoon ei voida estää, mutta sitä voidaan hallita asentamalla kaivantoon pumppuja. Pumput tulee asentaa kaivantoon työlaatan pinnan alapuolelle, jotta vesi ei pääse nousemaan työlaatan päälle. Työlaatan päälle tulee myös olla merkittynä perustuksen keskipiste, sekä ankkurikehän asennuspaikan sijainti.

## 5 RAUDOITUS

Raudoituksen tehtävänä on vahvistaa betonia, jonka vetomurtolujuus on pienempi kuin puristuslujuus. Tuulivoimalan perustuksessa raudoitus on tyypillisesti ympyrän muotoinen ja symmetrinen. Käytetty perustustyyppi vaikuttaa hyvinkin paljon raudoituksen muotoon.

Raudoitus koostuu tyypillisesti ulkoreunasta keskipisteeseen suunnatuista radiaanisista harjateräksistä ja kaaren muotoisista tangentiaalisista teräksistä, sekä pystysuorassa olevista leikkaus teräksistä.

Kuvan 3 mukaisissa GRAV-perustuksissa tyypillisesti raudoituksen yläpinnan ulkoreuna on matalalla ja keskelle siirryttäessä korkeus kasvaa tasaisesti kaulukseen asti, jonka jälkeen perustuksen reuna nousee pystysuorasti ylöspäin.



Kuva 3. Gravitaatio perustuksen raudoitus (Suvic Oy)

Kuvan 4 mukaisissa RAF-perustuksissa raudoituksen muoto on sylinterimäisempi kuin gravitaatiossa ja halkaisija on huomattavasti pienempi. Raudoitus työn turvallisuuden varmistamiseksi yläpinnan raudoituksen aikana raudoittajien tulee käyttää turvalajaita, jotka voidaan kiinnittää ankkurikehään.



Kuva 4. RAF- perustuksen rauditus (Nord Rauditus Oy)

## 6 BETONOINTI

Tuulivoimalan perustukset kuuluvat massiivisiin betonirakenteisiin. Massiiviseksi betonirakenteeksi tulkitaan sellainen rakenne, joka on kooltaan tavallista betonirakennetta suurempi. Massiivisissa betonirakenteissa betonin hydrataatiolämpötila pyrkii nousemaan huomattavan korkeaksi ja tämän seurauksena halkeamien ja lujuuskadon riski kasvaa. Rakenteen suunnittelussa hydrataatiolämpötila tulee ottaa huomioon tilanteissa, joissa betonin sitoutumislämpötila kasvaa yli 60 C. (Lahdensivu ym. 2019, 105.) Hydrataatiolämpötila voidaan huomioida sementin laadulla sekä esimerkiksi masuunikuonan lisäämisellä betoniin. Masuunikuonan ominaisuudet ovat samankaltaisia kuin sementillä paitsi, että sitoutuessaan se tuottaa huomattavasti sementtiä vähemmän lämpöä.

Teoksessa betonirakentamisen laatuohjeet 2019 by 47 käsitellään massiivisen betonirakenteen sisäisiä lämpötilan vaihteluja seuraavalla tavalla: Massiivisen betonirakenteen sisäisen lämpötila vaihtelun tulee pysyä tietyissä raja-arvoissa, jotta betoniin ei kohdistu tästä syystä sisäisiä jännityksiä. Lämpötila erojen tulee pysyä seuraavien rajojen sisäpuolella:

- Hydrataatiolämpötila ei saa nousta yli + 70C:n.
- Lämpötilaerot rakenteen eriosien tai 1 m:n matkalla ei saa ylittää 20C, myös betonipinnan ja rakenteen sisäosien välillä. (Lahdensivu ym. 2019, 105.)

Betonointisuunnitelmassa tulee olla esitettynä miten massiivisen betonirakenteen hydrataatiolämpötila saadaan pidettyä yllä olevissa rajoissa. Teoksessa betonirakentamisen laatuohjeet 2019 by 47 annetaan esimerkkejä, joilla voidaan edesauttaa raja-arvojen täytyminen. Esimerkkejä ovat:

- Betonin sideaineen valinta siten, että hydrataatiolämpötilat pysyvät maltillisina.
- Ennakkolaskelmat ja – kokeet hydrataatiolämpötilojen selvittämiseksi.
- Valujen välttäminen kuumimpaan vuodenaikaan.
- Jäähdytysputkien asentaminen valuun.

- betonin kastelu valun jälkeen

Näissä ratkaisuissa pidän ongelmana betonin kastelua valun jälkeen, sillä betonin lämpötila vaihtelut eivät saa ylittää 20°C 1 m:n matkalla. Betonin kastelu alentaa pinnan lämpötilaa, mikä voi aiheuttaa sen, että kyseinen raja arvo ei täyty. Jäähdytysputkien asentaminen tämänkaltaisiin betonirakenteisiin vaatisi kohtuuttoman tehokkaan jäähdytysjärjestelmän, jolla betonin lämpötilaa saataisiin pidettyä hallinnassa. Lisäksi jäähdytysputkia pitäisi asentaa rakenteeseen todella paljon, jottei lämpötilat putkien välissä pääse nousemaan yli sallitun raja arvon. Pahimmassa tapauksessa jäähdytys voi väärin asennettuna edesauttaa sisäisten jännitysten syntymisessä betoniin.

Parhaana ratkaisuna hydrataatiolämpötilojen hillitsemiseen näen kuonan lisäämisen betoniin sekä betonoinnin kuumimpien aikojen ulkopuolella. Kuumimpaan vuodenaikaan betonoidessa myös betonin liian nopea sitoutuminen on ongelma, mikä voi johtaa kylmäsaumojen muodostumiseen rakenteessa. Jos betonointi tehdään kuumimpana vuodenaikana, betonointi on järkevää aloittaa illalla ja toteuttaa yön aikana, jotta ulkolämpötilat pysyvät riittävän alhaisina.

## 6.1 Turvallisuus

Betoni on emäksinen aine, jonka PH on noin 12–13. Tuoreen betonimassan käsittelyssä tulee olla varovainen, jotta betoni ei pääse kosketukseen ihon tai silmien kanssa. (RATU TT 8.23.) Betonoinnin suorittavilla työntekijöillä tulee olla asianmukainen varustus työn suorittamiseen turvallisesti. Varustuksessa tulee kiinnittää erityisesti huomiota siihen, ettei betoni pääse kosketukseen paljaan ihon kanssa. Tästä syystä kumisaappaiden käyttö on suositeltavaa tuoreen betonin päällä kävelemisen mahdollistamiseksi turvallisesti. Jos betoni pääsee kosketukseen ihon kanssa, tulee altistunut kohta huuhdella mahdollisimman nopeasti puhtaalla vedellä, muutoin on riski betonin aiheuttamiin palovammoihin kasvaa huomattavasti. Missään tapauksessa työtä ei saa jatkaa, jos kengän sisään pääsee

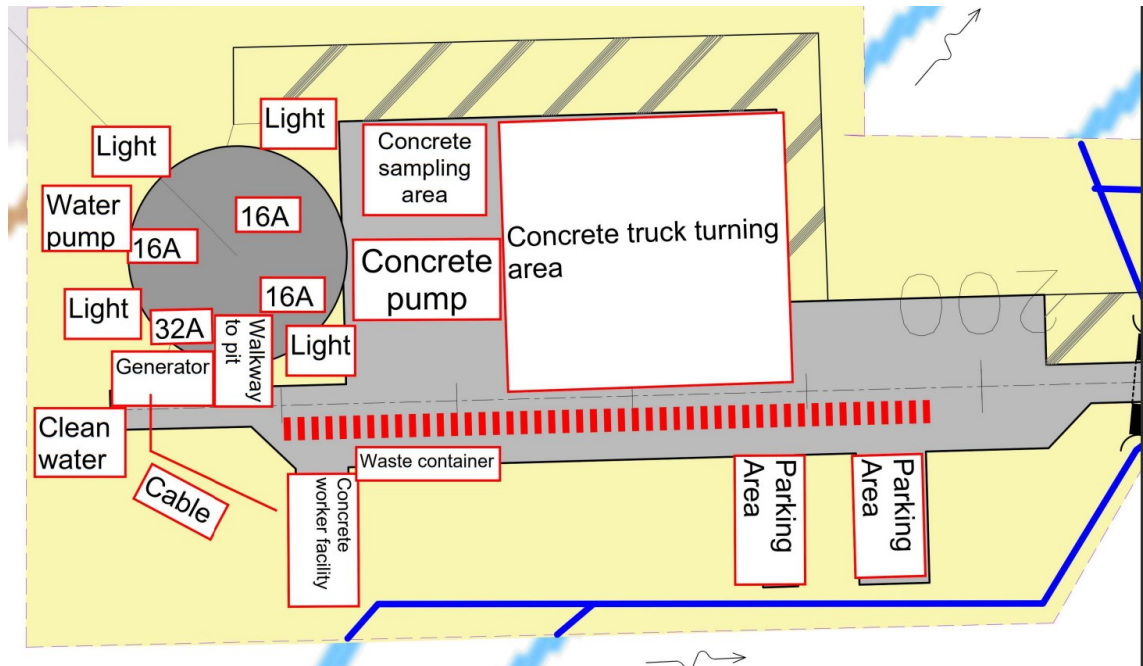
betonia, sillä kengän sisään päästessään betoni syövyttämisen lisäksi myös hankaa jalkoja. Hankautumisen ja betonin emäksisyyden yhteisvaikutus aiheuttaa nopeasti vaurioita iholle.

## 6.2 Betonointi kohteen varustelu

Ennen betonoinnin aloittamista työkohteessa pitää olla seuraavia varusteita betonoinnin ja siihen liittyvän toiminnan onnistumisen varmistamiseksi:

- Työpisteellä pitää olla saatavilla sähköä riittävästi sauvatäryttimien toimintaan.
- Työvälineiden pesu vesi.
- Ylimääräinen generaattori varmistamaan sähkön saatavuus tilanteessa, jossa käytössä oleva generaattori rikkoontuu.
- Vesi-imuri veden poistoon betonin päältä.
- Taukotila betonityöntekijöille.
- Riittävä valaistus.
- Koekappaleiden säilömiseen tarkoitettu eristetty arkku tai taukovaunu.
- Roska-astia.
- Ylimääräisiä sauvatäryttimiä korvaamaan rikkoutuneita.

Lisäksi betonointikohteesta olisi hyvä luoda kuvan 5 mukainen aluesuunnitelma, jotta tarvikkeiden sijaintien hahmottaminen on helpompaa.



Kuva 5. Esimerkki betonointipaikan aluesuunnitelmasta

Talvella betonoidessa valukohde on peiteltävä ja lämmitettävä, jotta perustuksessa ei olisi lunta ja jäätä. Jos perustukseen on raudoitusvaiheessa päässyt muodostumaan paksu jääkerros, ei ole järkevää yrittää sulattaa sitä pelkällä ilman lämmityksellä. Jään ja lumen poistaminen on järkevää toteuttaa joko höyryttämällä tai kuumalla vedellä. Höyrytys on tehokas keino, jos jään paksuus on yli 5 cm perustuksen pohjalla. Jos jään paksuus on alle 5 cm on järkevää laskea perustukseen kuumaa vettä.

Perustus pohjan sulatuksessa kuumalla vedellä tarvittava vesimäärä vaihtelee 10–30 m<sup>3</sup> välillä riippuen jään paksuudesta. Veden lämpötilan olisi hyvä olla yli 70°C, jotta saavutetaan tehokas sulatusteho. Veden pumppaus perustukseen on helpointa toteuttaa tilaamalla vesi betoniasemalta ja käyttämällä betonipumppua. Betonipumppua käytettäessä vesi saadaan pumpattua nopeasti perustukseen ja paine on riittävän suuri jään sulattamiseksi. Veden käyttö sulatuksessa verrattuna höyrytykseen on huomattavasti nopeampaa ja kustannustehokkaampaa.

Kun perustus on saatu sulatettua jäädä perustuksen uudelleen, jäätyminen tulee estää peittelemällä ja lämmittämällä perustusta. Lämmitykseen kannattaa valita tarpeeksi iso lämmitin, jotta lämmön tuotanto riittää perustuksen sulana pitämiseen. Peittelyssä on tärkeää saada perustus mahdollisimman tiiviiksi, jotta lämpö

ei pääse karkaamaan perustuksesta. Peittely voidaan tehdä kevytpeitteillä, jotka sidotaan yhteen mahdollisimman tiiviisti. Kevytpeitteitä käytettäessä tulee kiinnittää erityistä huomiota siihen, etteivät kevytpeitteet lähde perustuksen päältä tuulen voimasta. Vaihtoehtoisesti peittely voidaan tehdä perustuksen muotoisella raskaspeitteellä, joka kiinnitetään muottiin kuormaliinoilla. Perustuksen muotoisella raskaspeitteellä voidaan saavuttaa tiivis suojaus, josta lämpö ei pääse karkaamaan. Raskaspeite ei myöskään irtoa niin helposti sen suuremman massan avulla.

### 6.3 Työn suorittaminen

Tuulivoimalan perustuksen betonointi on pitkäkestoinen ja vaativa työvaihe. Perustus tyypistä riippuen betonia tarvitaan 300–1200 m<sup>3</sup>. Betonoinnissa on useita kriittisiä vaiheita, joihin tulee kiinnittää huomiota.

#### 6.3.1 Ankkurikehän aluslevyn betonointi

Ensimmäinen kriittinen vaihe on betonin saaminen ankkurikehän aluslevyn alle tiiviisti. Tässä vaiheessa betonia tulee laskea ankkurikehän sisäpuolelle tarpeeksi korkeaksi rintaukseksi, jotta tärysauvaa käyttämällä betoni saadaan siirrettyä ankkurikehän aluslevyn alapuolelta ulkopuolelle. Betonityönjohtajan tulee seurata betonin siirtymistä ankkurikehän ulkopuolelle. Kun voidaan varmistua betonin täyttäneen aluslevy. Betonipumpun letku voidaan siirtää seuraavaan kohtaan ja toistetaan sama prosessi, kunnes koko ankkurikehä on kierretty.

#### 6.3.2 Kauluksen betonointi

Kauluksen betonoinnissa haasteena estää betonin valuminen muotin alta pois. Muotti on ympyrän muotoinen ja se ei ole alaosasta tiivis, joten ilman huolellista suunnittelua on suuri riski, että betoni valuu muotin alta perustuksen reuna alueille. Kauluksen onnistumiseksi betonin tulee olla muotin alaosassa tarpeeksi jäykkää, jotta se pysyy muotin sisällä. Kun muotin alaosa on saatu tiivistettyä niin sanotulla tulppamassalla on järkevää siirtyä hetkeksi reuna alueelta betonoimaan

keskiosaa, jotta betoni saa hetken aikaa rauhoittua. Kun reunalle lisätään betonia, tulee kiinnittää huomiota kerrospaksuuksiin ja sauvatäryttimien käyttöön. Muotin läheisyydessä betonoidessa on tärkeää seurata koko ajan betonin käyttäytymistä ja keskeyttää betonointi välittömästi, jos huomataan betonin alkavan valua muotin alta muualle perustukseen.

Jos betoni alkaa valua muotin alta on parasta odottaa puolesta tunnista tuntiin seuraten samalla betonin sitoutumista. Kun betoni on sitoutunut hieman, voidaan jatkaa betonointia tarkkaillen betonin käyttäytymistä.

### 6.3.3 RAF- perustuksen betonointi

Kallioankkuri-perustuksessa betonointi aloitetaan keskeltä perustusta siirtyen reunaa kohti, jotta mahdollinen vesi saadaan ajettua pois työlaatan päältä. Kun ensimmäinen kierros on tehty valmiiksi, jatketaan betonointia vaihdellen kolmen kierroksen välein suuntaa ankkurikehän ja raudoituksen mahdollisen vääntymisen estämiseksi. (Erkkilä, 2021.)

### 6.3.4 GRAV- perustuksen betonointi

Maanvaraisen perustuksen betonoinnissa menetelmiä on kaksi ja kummassakin on omat hyvät, sekä huonot puolensa. Kummatkin menetelmät voidaan toteuttaa kahdella tai yhdellä betonipumpulla. Yhdellä betonipumpulla voidaan pumpata jopa 60 m<sup>3</sup>/h. Yleensä betonin toimitusmatkan ollessa pitkä ei voida toimittaa betonia tätä suurempia määriä pumpulle. Kahdella pumpatessa on mahdollisuus siihen, että toinen pumpuista odottaa aina betonia ja tästä syystä ei betonointia ole järkevää toteuttaa kahdella pumpulla. Jos kuljetusmatkat ovat lyhyitä ja asema pystyy tuottamaan betonia yli 50 m<sup>3</sup>/h betonia, voidaan harkita kahden pumpun käyttöä, jolloin betonointi aika pienenee.

Ensimmäinen menetelmä on perustuksen betonoiminen ulkoreunasta keskipistettä kohti. Tässä menetelmässä hyvinä puolina on betonoitavan alueen pieneneminen keskipistettä kohti mennessä ja näin ollen kylmäsaumojen riski pienenee

koko ajan. Ulkoa sisälle päin betonoidessa työ tehdään aloittaen reunasta ja kiertäen perustusta tehden 2–3 metrin levyisiä rintauksia, joiden korkeus on 30–50 cm. Kun rintauksia on tehty peräkkäin kaksi, voidaan edellisten rintausten päälle lisätä uusi kerros. Betonityönjohtajan tulee seurata kerrosten sekoittumista toisiinsa, sekä estää kylmäsaumojen muodostuminen betonoimalla tasaisin väliajoin vanhojen kerrosten päälle. Hyvänä nyrkkisääntönä pidetään tuulivoimalan perustuksissa maksimissaan 3 tunnin viivettä viileissä olosuhteissa ennen uuden kerroksen lisäämistä vanhan päälle. Jos ulkoilman lämpötila on korkea ja aurinko paistaa suoraan tuoreeseen betoniin lyhentää tämä työstöaikaa jonkin verran.

Sauvatäryttimiä tulee varata työhön tarvittava määrä, jotta perustusta kierrettäessä täryttimiä voidaan vaihtaa. Yhdellä sauvatäryttimellä tulisi kiertää vain puoliperustusta, jonka jälkeen vaihdetaan toiseen täryttimeen. Tällä voidaan vähentää täryttimien kierrättämistä pitkin perustusta ja näin vähentää täryttimien siirteilyä.

Kuvassa 6 olevat keltaiset putket, jotka kulkevat perustuksen päällä renkaina ovat pinnan betonoinnissa käytettäviä kiskoja. Näiden putkien avulla voidaan varmistua riittävän suojabetonikerroksen saavuttaminen. Putkien toiminta perustuu pintojen teossa käytettävän tärypalkin kannattelemiseen, jotta betonin suojaetäisyys täyttyy väkisillä. Putken paksuus tulisi olla noin 80 mm, jotta varmistetaan riittävä suoja etäisyys. Kun pinta on tiivistetty tärypalkilla, odotetaan betonin kovettuvan tarpeeksi, jotta pinta voidaan hiertää koneellisesti.

Yllä olevia prosesseja jatketaan, kunnes betonoinnissa on siirrytty kauluksen sisäpuoliselle alueelle, jonka jälkeen betonointi voidaan viedä loppuun kohdassa 6.3.4 esitetyllä tavalla.

Tässä menetelmässä haasteena on veden kerääntyminen perustuksen keskelle. Tätä voidaan hallita poraamalla työlaattaan reikiä, joista vesi pääsee pakenemaan perustuksesta. Lisäksi keskiosalle kulkeminen tulee järjestää erillisellä sillalla, jotta tuoreen betonin päällä ei jouduta kävelemään.

Toinen menetelmä on betonoida keskeltä ulospäin ja tässä menetelmässä betonointi periaate toteutetaan hyvinkin samalla tavalla kuin ensimmäisessä menetelmässä. Keskeltä aloitettaessa tulee kiinnittää huomiota riittävän suurten rintojen tekemiseen reunaa kohti, jotta betoni saadaan nostettua perustuksen yläpintaan.

Tässä tavassa ongelmaksi kasvaa tuoreena pidettävän betonin määrä betonoinnin edetessä reunaa kohti. Lisäksi kaltevia vaakapintoja ei voida alkaa tekemään yhtä nopeassa vaiheessa, mikä hidastaa betonointia hieman.



Kuva 6. Gravitaatio perustus valmiina betonointiin (Suvic Oy)

## 7 LUJUUDENKEHITYS/LAADUNVARMISTUS

Betonirakenteen lujuudenkehitystä tulee seurata tuotteen laadun varmentamiseksi ottamalla betonista lujuuskoe kappaleita sekä mittaamalla betonin lämpötilaa.

### 7.1 Lämpötilan mittaus

Betonin lujuudenkehitystä sitoutumisen aikana seurataan mittaamalla betonin lämpötilaa riittävän pitkällä aikavälillä. Mittaus toteutetaan asentamalla betonoitavaan kohteeseen lämmönmittaus suunnitelman mukaisesti lämpötila-antureita. Antureiden asentamisella betonoitavaan kappaleeseen saavutetaan tarkka tieto betonin lämmönkehityksestä ja sen vaihteluista rakenteessa. Antureiden sijainti vaihtelee aina perustustyyppin mukaan, mutta tyyppillisesti sijainnit ovat rakenteen keskellä, sekä reunassa.

Betonin lämpötilojen mittauksen avulla saadaan arvokasta tietoa betonin lujuudenkehityksestä ja mahdollisista lujuuskatoa aiheuttavista tekijöistä. Yleisin lujuuskatoa aiheuttava tekijä massiivissa betonirakenteissa on betonin liiallinen lämpeneminen.

### 7.2 Työmaakoekappaleet

Betonoinnin yhteydessä työmaalla tulee ottaa työmaakoekappaleita. Kappaleet ovat standardin SFS-EN 12390-1 mukaan kalibroituja lieriöitä. Koekappaleiden tarkoituksena on selvittää betonin lopullinen lujuus ihanne olosuhteissa. Koekappaleiden määrä vaihtelee ja riippuu tilaajan laatuvaatimuksista. Koekappaleita otetaan kuitenkin aina kahteen eri kypsyyss aikaan. Ensimmäisenä betonin puristuslujuus testataan 28 päivän kohdalla betonoinnista ja toinen näyte erä 91 päivää betonoinnista. Ensimmäisillä näytteillä saadaan suuntaa antava tieto betonin lujuudesta ja 91 päivän näytteistä saadaan lopullinen lujuus.

Lisäksi perustuksesta voidaan ottaa poranäytteitä, joilla itse perustuksen betoni voidaan tutkia. Poranäytteitä ei oteta yleensä, ellei ole epäilyksiä betonin lujuudesta. Jos perustukseen ryhdytään tekemään koe porauksia yleensä seuraavat esimerkit ovat syitä siihen:

- Perustuksen hydrataatiolämpötila on yli 70°C.
- Työmaakoekappaleiden lujuudet eivät ole vaaditulla tasolla.
- Epäillään betonoinnin aikaisen tiivistyksen epäonnistumista.
- Tilaaja vaatii jokaisesta perustuksesta poranäytteet, vaikka ei epäiltäisi mitään lujuuteen heikosti vaikuttavia tekijöitä.

## 8 JÄLKIHOITO JA SUOJAUS

Jälkihoidon päätehtävä on estää betonipinnan halkeilu betonin liian nopean kuivumisen tai liiallisen lämpötilan vaihtelun seurauksena. Talvella jälkihoidon ja tuoreen betonin suojaus korostuu erityisesti pinnan korkean jäätymisriskin seurauksena. Jälkihoito voidaan toteuttaa monella eri tavalla, mutta vakiintunut käytäntö on betonipinnan suojaaminen pakkasmatoilla ja jälkihoitoaineen avulla.

### 8.1 RAF-perustus

Yleisesti RAF- perustuksissa jälkihoidon ja suojauksen toteuttaminen on helpompaa sillä, suojattavaa betonipintaa on huomattavasti vähemmän suhteessa gravitaatioon. Perustus voidaan myös suojata välittömästi betonoinnin loputtua ilman betonin kovettumisen odottelua. Perustuksen valun jälkeinen suojaus on helppointa toteuttaa asettelemalla betonipintojen päälle routamattoja siten, että paljasta betonipintaa ei jää näkyville. Tämän jälkeen perustuksen päälle asetetaan kevytpeite, joka sidotaan tukevasti muotteihin kiinni. Talviolosuhteissa lisäksi betonin lämmitys kaapelit kytketään päälle ja kevytpeitteen sisään asetetaan lämmittimiä estämään betonin jäätyminen.

Muutaman päivän päästä betonoinnista muottien purku voidaan aloittaa. Muottien irrotuksen jälkeen tulee muottia vasten olleet betonipinnat suojata asettamalla routamattoja muottipinnan päälle mahdollisimman nopeasti, jotta betonin pinta ei ehdi jäähtyä ja haljeta. Routamattojen asettamisen jälkeen koko perustus peitetään kevytpeitteellä ja kevytpeite kiinnitetään perustukseen kuormaliinojen avulla.

### 8.2 GRAV-perustus

Perustuksen suojaaminen tässä perustustyyppissä on huomattavasti haastavampaa toteuttaa perustuksen koon vuoksi. Kesäolosuhteissa perustus voidaan suojata betonin kovettuttua niin paljon, että sen päällä kävely on mahdollista. Betonoinnin loputtua tuoreen betonin päälle levitetään jälkihoitoaine, jolla betonin suojaus aikaa saadaan pidennettyä. Kun betoni on kovettunut tarpeeksi, voidaan

aloittaa suojaaminen. Suojaus toteutetaan levittämällä pakkasmattoja betonipintojen päälle, jonka jälkeen perustus voidaan peitellä kevyt- tai raskaspeitteillä.

Talviolosuhteissa peittäminen pitää aloittaa betonoinnin ollessa käynnissä ja se toteutetaan peittelemällä betonipinta lohkoittain pakkasmatoilla. Kun suojattu lohko on kovettunut tarpeeksi koneellista hierontaa varten suojaus pitää poistaa ja hieron jälkeen asettaa takaisin. Välipeittäminen talvella on tehtävä, jotta estetään betonin jäätyminen ja mahdollistetaan sen kovettuminen hierontaa varten.

## 9 POHDINTA

Opinnäytetyössä tavoitteena oli käydä tuulivoimalan perustuksen työvaiheet ja pohtia työmenetelmiä ja kehittää mahdollisesti jo olemassa olevia menetelmiä. Tiedonhankinta työhön oli helppoa, sillä työyhteisön sisältä löytyi luotettavaa tietoa ja käytännön kokemuksia. Myös työskenteleminen työnjohtajana perustustöissä oli hyödyllistä kokonaiskuvan ja työvaiheiden yksityiskohtien tunnistamisessa.

Työn painopiste muuttui kirjoittamisen aikana hieman. Alkuperäinen tavoite työssä oli keskittyä tuulivoimalan betonointiin pääsääntöisesti. Kirjoittamisen aikana tavoite muuttui käsittelemään tuulivoimalan perustuksen rakentamista kokonaisuutena. Työmenetelmien käsittelyssä suuressa roolissa ovat omat kokemukseni kyseisistä työvaiheista sekä työkavereilta saamani haastattelut.

Opinnäytetyön tekeminen kyseisestä aiheesta on laajentanut omaa käsitystäni perustusten rakentamisesta ja auttanut omien menetelmieni kehittämisessä. Työssä käsitellään rakennusvaiheita riittävällä tarkkuudella yleisen käsityksen saamiseksi perustusten tekemiselle.

## LÄHTEET

Suvic Oy, RAF-perustus työohje. Viitattu 20.3.2021.

Lanhdensivu, J., Köliö, A., Pakkala, T., Kylliäinen, M. & Lietzèn, J. 2019. Betonirakentamisen laatuohje 2019 by 47. 2 painos. Helsinki: BY-koulutus.

Erkkilä, E 2022. Vastaava työnjohtaja, Suvic Oy. Haastateltu 1.4.2022.

Norrkniivilä, J 2022. Suunnittelupäällikkö, Suvic Oy. Haastateltu 18.4.2022.

Tikkanen, J. 2021. Betoninormit 2021 by 65. 5 painos. Helsinki: BY-koulutus.

Peikko Oy. Fatbar-ankkurointipultit tuulivoimalaperustukseen. Peikko. Viitattu 10.4.2022 <https://www.peikko.fi/tuotteet/tuote/fatbar-ankkurointipultit-tuulivoimalaperustuksiin/technical-information/>.

Peikko Oy. Maanvarainen perustus. Peikko. Viitattu 4.4.2022 <https://www.peikko.fi/tuotteet/tuulivoimaloiden-perustusratkaisut/maanvarainen-perustus/>.

Suvic Oy. 2021. Suvic rakentaa karhunevakankaan tuulivoimahankkeeseen 33 perustusta. Suvic 20.4.2021. Viitattu 4.4.2022 <https://www.suvic.fi/suvic-rakentaa-karhunevakankaan-tuulivoimahankkeeseen-33-perustusta/>

Nord raudoitus Oy. 2021. Referenssit. Nord raudoitus. Viitattu 10.4.2022 <https://www.nordraudoitus.fi/referenssit/>.

Suvic Oy. 2021. Suvic toteuttaa infratyöt puutikankankaalle Sieviin. Suvic 23.2.2021. Viitattu 4.4.2022 <https://www.suvic.fi/suvic-toteuttaa-infratyot-puutikankankaalle-sieviin/>.