

# Aurinkovoimalan perustusten suunnittelu suomaastoon

Miki Rajamäki

OPINNÄYTETYÖ  
Joulukuu 2024

Konetekniikka  
Tuotantotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Tuotantotekniikka

RAJAMÄKI, MIKI:  
Aurinkovoimalan perustusten suunnittelu suomaastoon

Opinnäytetyö 46 sivua, joista liitteitä 7 sivua  
Joulukuu 2024

---

Opinnäytetyön aiheena oli aurinkoa seuraavan aurinkovoimalan perustusten suunnittelu suomaalle. Työ tehtiin 3Flash Finland Oy:n toimeksiannosta. Toimeksiantajalla on suunnitteilla hankkeita aurinkovoimaloiden rakennuttamiseksi soille. Suolle perustamisen haasteina ovat maaperän kosteus ja pehmeys, minkä vuoksi oli tärkeää löytää luotettava ratkaisu perustamiseen. Tavoitteena oli suunnitella aurinkovoimalalle perustukset, jotka kestävät voimalan elinkaaren aikana kohtaamat luonnonvoimat ja ovat samalla kustannustehokkaat.

Opinnäytetyön tuloksena kehitettiin perustuspaalu ja siipilevy, jonka tarkoitus on tukea paalua pehmeässä maaperässä. Lisäksi arvioitiin paalutuksen kustannuksia, eri paalutustekniikoiden soveltuvuutta suomaastoon ja hukan minimointia. Paalulle tehtiin lujuuslaskentaa ja vetokokeet kenttäolosuhteissa, joista saatiin tietoa paalujen käyttäytymisestä voimalan elinkaaren aikana. Testitulosten pohjalta laadittiin FEM-malli, jonka avulla voitiin arvioida paaluun kohdistuvia jännityksiä.

Opinnäytetyön tuotosta on tarkoitus hyödyntää 3Flash Finlandin sekä nykyisissä että tulevaisuudessa rakennettavissa aurinkovoimalahankkeissa. Tulevaisuudessa FEM-mallia on tarkoitus jatkokehittää siten, että sen avulla voidaan optimoida siipilevyn kokoa, mikä parantaa kustannustehokkuutta.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Production Engineering

RAJAMÄKI, MIKI:  
Designing the Foundations of a Solar Power Plant on Peat Bog

Bachelor's thesis 46 pages, appendices 7 pages  
December 2024

---

The subject of this thesis was the design of the foundations for a sun-tracking solar power plant on a peatland. The challenges of building on peatlands include soil moisture and softness which necessitate the implementation of a reliable solution for the foundations. The objective was to design the foundations for the solar power plant that would withstand the natural forces that would occur during the plant's lifespan while also being cost-effective. The thesis was commissioned by 3Flash Finland Oy.

As a result of the thesis, a foundation pile and a side plate were developed to provide support for the pile in soft soil. Furthermore, the costs of piling, the applicability of diverse piling methodologies in peatlands, and strategies for reducing waste were assessed. The strength calculations and the on-site pull tests were conducted on the pile to assess its behaviour under load. Based on the test results, a finite element model (FEM) was created to evaluate the stresses on the pile. In the future, the FEM model is intended to be further developed to optimise the size of the side plate, which will improve both cost-effectiveness and structural durability.

---

Key words: solar energy, foundations

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	TEORIA .....	6
	2.1 Aurinkovoimaloiden kiinnitysjärjestelmät.....	6
	2.2 Paalutustekniikat.....	7
	2.2.1 Kaivinpaalut.....	7
	2.2.2 Lyöntipaalut .....	8
	2.2.3 Ruuvipaalut .....	9
	2.3 Rahkaturveperäinen maaperä.....	9
	2.4 Tuuli- ja lumikuormat.....	10
3	SUUNNITTELU.....	12
	3.1 Paalutustekniikan valinta.....	12
	3.2 Paaluprofiilin valinta .....	13
	3.3 Paalutuksen kustannusten vertailu.....	15
	3.4 Lujuuslaskennat .....	16
	3.5 Tukilevyt.....	20
4	TESTAUS .....	22
	4.1 Vetokokeiden kulku .....	22
	4.2 Tulokset .....	24
5	FEM-LASKENTA .....	30
	5.1 FEM-mallin luominen .....	30
	5.2 Simuloinnin tulokset .....	34
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	37
	LÄHTEET.....	38
	LIITTEET .....	40
	Liite 1. Mittauspöytäkirja .....	40

## 1 JOHDANTO

Aurinkoenergia on tällä hetkellä yksi nopeimmin kasvavista uusiutuvan energian lähteistä, ja sen kasvupotentiaali on valtava. Vuonna 2022 maailmalla oli asennettuna lähes 1300 terawattitunnin edestä aurinkovoimaloita. Tuotanto kasvoi samana vuonna 270 terawattituntia, noin 26 % edellisvuoteen verrattuna. Suurin aurinkosähkön tuottajamaa on tällä hetkellä Kiina. (Bojek 2023.)

Yhden akselin aurinkoa seuraava aurinkovoimala on voimalatyyppejä, joka seuraa auringon liikettä päivän aikana yhden akselin ympäri. Järjestelmän tavoitteena on maksimoida sähköenergian tuotto siten, että auringon säteet osuvat mahdollisimman pitkän ajan päivästä suoraan paneelin pintaan, jolloin mahdollisimman vähän auringon säteilyä heijastuu paneelien pinnasta muualle. Tämä voi nostaa paneelien energiantuottoa jopa 30 %. Aurinkovoimala suunnitellaan siten, että paneelirivistöt kääntyvät itä-länsi-suunnassa, jolloin saavutetaan paras mahdollinen hyöty auringon seuraamisesta. (Lewandoski ym. 2022; Norbu ym. 2023.)

Suomessakin aurinkoenergia on nosteessa. Uusia voimala-alueita suunnitellaan ja toteutetaan esimerkiksi huonommille viljelysmaille ja suoalueille. Suomessa on tällä hetkellä asennettuna noin 1 100 MW aurinkoenergiaa, mikä on alle prosentin osuus kulutetusta sähköstä. Fingridin ennusteen mukaan aurinkovoimaloita olisi jopa 7 000 MW edestä vuosikymmenen loppuun mennessä. (Aurinkovoima 2024; Mattila 2023.)

Turvemaita on Suomessa yhteensä noin 9,4 miljoonaa hehtaaria, mikä on yli neljäsosa Suomen maa- ja sisävesien pinta-alasta (Suot n.d.). Aurinkovoimaloiden rakentaminen suoalueille houkuttelee, koska pinta-alaa on paljon ja yksittäisetkin suoalueet voivat olla pinta-alaltaan useita tuhansia hehtaareja, jolloin suuret voimalakokonaisuudet ovat mahdollisia.

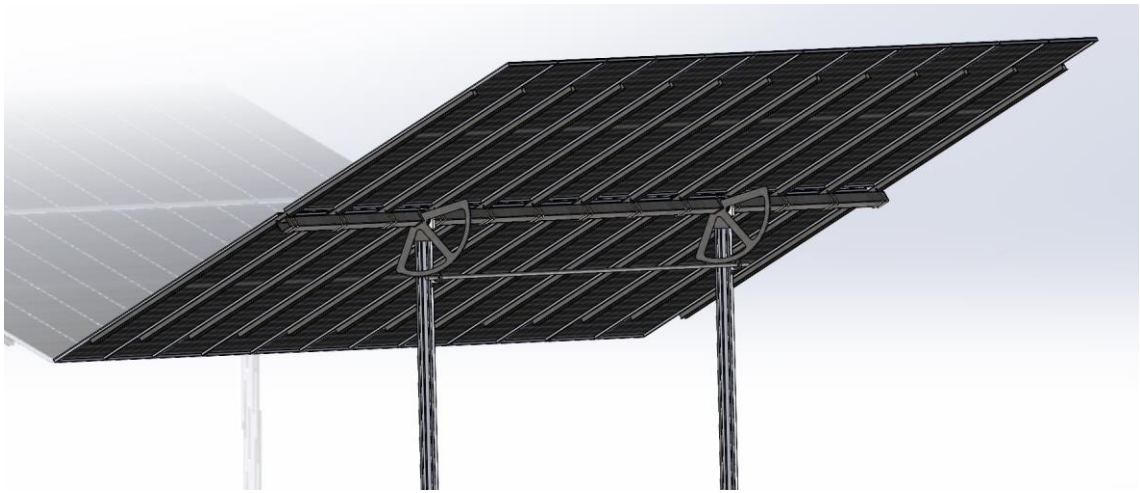
## 2 TEORIA

### 2.1 Aurinkovoimaloiden kiinnitysjärjestelmät

Kaksi yleisimmin käytettyä perustusta aurinkovoimaloiden maa-asennuksessa ovat yksi- ja kaksitolppaiset kiinnitysjärjestelmät. Yksitolppaisessa järjestelmässä on yksi rivi tolppia aurinkopaneelien keskilinjassa, kun taas kaksitolppaisessa järjestelmässä on kaksi riviä tolppia paneelien reunoilla. Yksitolppaisessa ratkaisussa perustuksiin syntyy suurempia voimia sekä vertikaali- että horisontaalisuunnassa, koska suurempi pinta-ala paneeleista on yhden tolpan varassa ja paneeleista syntyy pidempi vipuvarsi perustuksiin nähden. Sen sijaan kaksitolppaisessa telineessä kuorma jakautuu tasaisemmin molemmille paaluille. (Donaldson & Brearley 2015, 32.)

Paalutustekniikasta riippuen eri suuntaiset voimat ovat haasteellisia eri paalutustekniikoille. Erityisesti rahkaturveperäisellä maaperällä horisontaalisuuntaiset voimat aiheuttavat haasteita maaperän pehmeiden takia. Eri paalutustekniikoita ja rahkaturveperäisen maaperän ominaisuuksia käsitellään myöhemmin. (Donaldson & Brearley 2015, 32.)

Lähtökohtaisesti suuremman kokoluokan yhden akselin aurinkoa seuraavan aurinkovoimalan perustukset toteutetaan keskitolppamallilla, koska paneelit kääntyvät horisontaaliakselilla. Kuvassa 1 näkyy, miten keskitolpparatkaisussa aurinkopaneelien kiinnityskehikko saadaan laakeroitua tolpan päästä. Tämän toteuttaminen kaksitolppaisella perustuksella olisi mekaanisesti huomattavasti hankalampaa ja taloudellisesti kannattamatonta.



KUVA 1. Yhden akselin aurinkoa seuraava aurinkovoimala. (Kuva: Miki Rajamäki)

## 2.2 Paalutustekniikat

Paalutuksen tarkoituksena on kiinnittää aurinkovoimala maahan siten, että se kestää luonnon siihen aiheuttamat kuormat, kuten tuuli- ja lumikuormat sekä seismissen aktiivisuuden. Tuulikuormat aiheuttavat nostavaa voimaa perustuksiin, kun taas lumikuormat painavat niitä alaspäin. Tuuli ja seisminen aktiivisuus aiheuttavat perustuksiin myös horisontaalista kuormitusta. (Gilliss 2017.)

### 2.2.1 Kaivinpaalut

Kaivinpaalut ovat käytössä monien rakenteiden tukemiseen. Kaivinpaaluissa reikä porataan teräsputken avulla, jonka jälkeen reikä täytetään betonilla teräsputkea samanaikaisesti nostaen. Pienikokoisissa aurinkovoimala-asennuksissa nämä paalut ovat suosittuja, koska ne ovat suhteellisen helppoja asentaa ja porauksen syvyys on tyypillisesti matala, yleensä alle 3 metriä. Ongelmana tällaisten paalujen käytössä ovat asennuksen hitaus sekä poratusta reiästä tuleva maa-aines, joka pitää hävittää. (Chandran & Hoit 2016, 1875–1876.)

Toinen vaihtoehto kaivinpaalujen käyttöön on porata tai kaivaa ylisuuri reikä paalu varten. Kun paalu on asetettu reikään, sen ympärystä täytetään sopivalla täyttömateriaalilla. Paalut voidaan valaa paikan päällä käyttäen muottia, tai voidaan käyttää valmiiksi valettuja paaluja. Tällä tekniikalla voidaan parantaa perustusten

kestoa varsinkin ylöspäin suuntautuvia voimia vastaan, koska täyttömateriaali voidaan valita ympäröivään maaperään sopivaksi. Myös täyttömateriaalin asettelulla voidaan vaikuttaa perustuksen kestävyYTEEN. (Chandran & Hoit 2016, 1877.)

Kolmas betonista tehtävä perustusvaihtoehto on peruslaatta. Laatta valetaan matalaan kuoppaan, ja se voidaan peittää kuopasta kaivetulla materiaalilla. Peruslaattaan valetaan myös varsi, joka ulottuu maanpinnalle ja johon rakenne kiinnitetään. Tällaisen perustuksen etuna on, että valaminen ei vaadi erityisosaamista tai erityisiä välineitä valmistukseen. Kääntöpuolena on kallis hinta ja perustuksen tekemiseen kuuluva aika (Chandran & Hoit 2016, 1878.)

### **2.2.2 Lyöntipaalut**

Lyöntipaalut nimensä mukaisesti lyödään maahan. Asennus tapahtuu koneella, jossa on paalujunta tai täryvasara. Paaluprofiilina käytetään yleensä putkea tai H-profiilia, koska niiden saatavuus on hyvä, mikä tekee niistä myös yleensä halvempia muihin profiilivaihtoehtoihin verrattuna. Etuna lyöntipaalujen käytössä on, että se aiheuttaa hyvin vähän häiriötä maaperään, jolloin asentaminen on siistimpää. Asentamista pystytään myös monitoroimaan hyvin tarkasti, jolloin jokaiseen kohtaan voidaan asentaa paalu juuri oikeaan syvyyteen, jossa suunniteltu kapasiteetti täyttyy. Perustuksen kestävyYTEÄ voidaan myös parantaa asentamalla paalun kylkeen levyjä, jolloin se kestää paremmin nostoa ja taivutusta. (Chandran & Hoit 2016, 1878.)

Lyöntipaaluja käytetään enemmän suuremman kokoluokan voimaloiden perustuksissa niiden nopean asentamisen takia, koska rakentamisen pitää olla nopeaa ja kustannustehokasta. Paalujen asentamiseen tarvitaan vähemmän työvoimaa, koska asennus tapahtuu koneellisesti. Tämän takia lyöntipaalut soveltuvatkin huonommin pienempiin projekteihin, koska aloituskustannukset ovat korkeamat. (Kibriya 2017, 729.)

### 2.2.3 Ruuvipaalut

Ruuvipaalut ovat samankaltaisia kuin putkipaalut, mutta niihin on hitsattu kierremäisiä levynpaloja ympärille. Kierteiden avulla paalu voidaan ruuvata maahan esimerkiksi kaivinkoneeseen kiinnitetyllä työkalulla, jolloin paalua voidaan pyörittää ja painaa samaan aikaan. Ruuvipaalujen etuna on monien eri kokovaihtoehtojen saatavuus, ja kierrelevyjien kokoa ja määrää voidaan mukauttaa maaperän vaatimusten mukaan. Asentaminen on lähes yhtä nopeaa kuin lyöntipaaluilla, mutta maaperä häiriintyy hieman enemmän. Kierrelevyt antavat myös tarvittavaa tukea nostavaa voimaa vastaan. Kääntöpuolena ruuvipaalujen käytössä on, että ne ovat kalliimpia kuin lyöntipaalut, ja sorainen sekä kivinen maasto voi aiheuttaa vaikeuksia asennettaessa. (Chandran & Hoit 2016, 1879–1880.)

### 2.3 Rahkaturveperäinen maaperä

Rahkaturveperäinen maaperä koostuu pääasiassa rahkasammaleista, jotka ovat turpeen muodostumisen pääasiallinen lähde. Rahkasammalet kasvavat tyypillisesti suotyyppisillä alueilla, kuten rämeillä ja nevoilla. Rahkaturve eroaa muista turvetyypeistä, kuten saraturpeesta, biologisen alkuperänsä ja rakenteensa perusteella. (Eloperäiset maalajit n.d.)

Rahkaturveperäiselle suoalueelle rakentamisessa on useita haasteita, jotka johtuvat pääasiassa suon ainutlaatuisista geoteknisistä ominaisuuksista. Näitä haasteita ovat muun muassa korkea kosteuspitoisuus, matala leikkauslujuus sekä merkittävä painuvuus. (Peat Hazards and... 2023.)

Korkea kosteuspitoisuus on suoalueelle luontaista, ja se vaikuttaa maaperän kantavuuteen ja vakauteen, mikä voi aiheuttaa ongelmia erityisesti rakennusvaiheessa. Matala leikkauslujuus tarkoittaa, että maaperä on helposti muotoutuvaa, jolloin se kestää huonosti erityisesti horisontaalisuuntaisia voimia, mikä voi johtaa rakenteiden liian suureen liikkeeseen tai kaatumiseen. Jos paaluja ei asenneta turvekerroksen läpi, merkittävä maaperän painuvuus voi johtaa rakenteiden epätasaiseen painumiseen, mikä voi aiheuttaa jännityksiä, vaurioita tai kallistumisia. (Peat Hazards and... 2023.)

Suoalueille rakentamisen yhteydessä on otettava huomioon myös ympäristölliset tekijät, erityisesti suon rooli merkittävänä hiilivarastona. Rakentamisen yhteydessä on pyrittävä minimoimaan suon kuivatus ja kaivaminen, jotta voidaan vähentää hiilen vapautumista ja minimoida ympäristövaikutukset. (Peat Hazards and... 2023.)

## 2.4 Tuuli- ja lumikuormat

Tuuli- ja lumikuormat aiheuttavat haasteita aurinkovoimalan kiinnitysjärjestelmän suunnitteluun. Näiden kuormien huomiointi on tärkeää, koska voimala-alueet suunnitellaan lähtökohtaisesti kestäväksi noin 30 vuotta ja voimala altistuu Suomessa tuulelle käytännössä joka päivä, ja lumelle lähes puolet elinkaarestaan (Weckend, Andreas & Heath 2016, 19).

Tuulikuormien huomioiminen on tärkein yksittäinen parametri, kun suunnitellaan aurinkoa seuraavaa aurinkovoimalaa. Aurinkopaneelien suuren poikkipinta-alan vuoksi tuulesta aiheutuvat kuormat ovat suuria. Kuormat voivat myös kohdistua moneen eri suuntaan paneelien kulman mukaan. Jos tuulesta aiheutuvia kuormia ei huomioida oikein, rakenteen pettämisestä aiheutuvat kustannukset voivat olla valtavia. Aurinkoa seuraavassa voimalassa tuulikuormaan eniten vaikuttavat tuulen suunta ja paneelien kallistuskulma. (Ma ym. 2023.)

Tuulikuormat voivat aiheuttaa aurinkovoimalan rakenteisiin painetta, nostetta tai taivutusmomenttia. Perustuksia suunniteltaessa tuulen aiheuttama paine pitää huomioida, jotta perustuspaalut, ja maaperä, johon perustuspaalut asennetaan, kestää tuulesta aiheutuvan lisäkuorman. Perustusten ja maaperän välillä on oltava myös riittävästi kitka- tai koheesiovoimaa, jotta tuulen aiheuttama noste ei nosta paaluja maasta ylös. Maaperän leikkauslujuus täytyy huomioida, jotta perustuspaalu ei lähde kallistumaan tuulen aiheuttamasta taivutusmomentista. Koivilta tuuliilta suojautumiseen voidaan paneelirakenne pakottaa vaakatasoon, mikä vähentää tuulen siihen aiheuttamaa painetta. Tuulikuormien määrittämisessä käytetään SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1 -standardia. (Ma ym. 2023; Unrivalled Wind Resistance n.d.)

Lumikuormat voivat aiheuttaa paneelirakenteisiin painetta ja taivutusmomenttia. Paneelit voivat vaurioitua tai jopa romahtaa lumen painosta, jolloin riski tulipalolle kasvaa huomattavasti. Myös perustukset voivat painua tai taipua epätasaisesti lumen painosta, mikä voi vaikuttaa auringon seurantajärjestelmän toimintaan. Lumikuormia pyritään minimoimaan seurantajärjestelmällä, joka lumikuorman kasvaessa kääntää paneelit maksimikulmaan kipaten lumen paneelien päältä pois. Lumikuormien määrittämisessä käytetään standardia SFS-EN-1991-1-3 + AC + A1. (Ohje paneeliasennuksen tarkastukseen 2018; Unrivalled Wind Resistance n.d.)

### 3 SUUNNITTELU

#### 3.1 Paalutustekniikan valinta

Paalutustekniikkaa valittaessa on otettava huomioon monia tekijöitä, kuten kustannukset, paalutukseen kuluva aika ja olosuhteet paalutettavalla alueella. Kun suunniteltiin perustuksia suoalueelle, olosuhteet olivat suurin määräävä tekijä tekniikan valinnassa. Paalutustekniikan kannalta haasteita aiheuttivat märkyys ja heikko kantavuus.

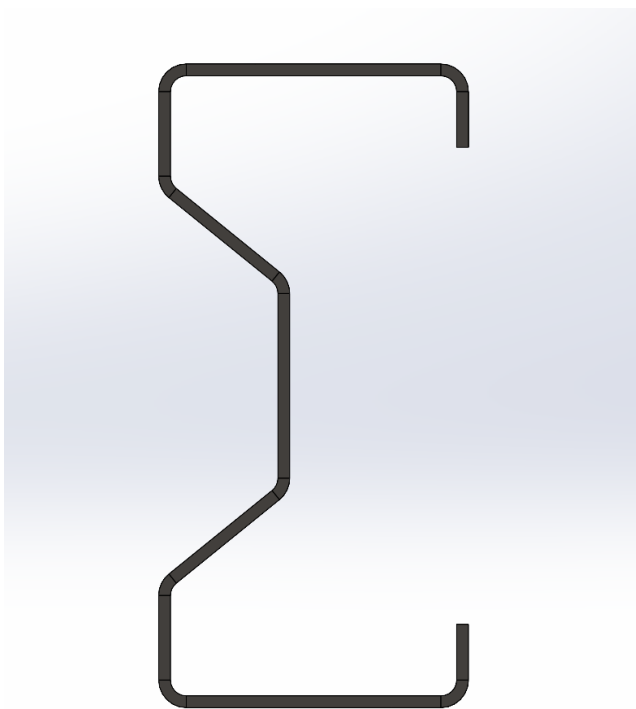
Olosuhteiden jälkeen tuli miettiä kustannuksia. Koska suuren kokoluokan aurinkovoimalan perustaminen voi vaatia monta kymmentä tuhatta paalua, pienikin säästö yksittäisessä paalussa oli kokonaiskustannuksien kannalta merkittävä. Paalutustekniikan piti olla myös tehokasta, koska paalut on tarkoitus asentaa yhden talven aikana. Kesän aikana suon kantavuus on huomattavasti heikompi, joten paalutusprosessi hidastuisi ja hankaloituisi niin paljon, että se ei olisi kannattavaa.

Olosuhteiden takia valettujen betoniperustusten käyttö ei ollut mahdollista, koska valukaluston saaminen suoalueelle osoittautui lähes mahdottomaksi. Tätä varten suolle olisi pitänyt rakentaa todella tiheä tiesto suurella kantavuudella, että jokaisen paalun valaminen olisi onnistunut. Valmiiksi valettujen paalujen käyttö olisi ollut mahdollista, mutta niiden hinta nousi korkeammaksi kuin muiden vaihtoehtojen, ja asentamiseen olisi kulunut huomattavasti enemmän aikaa.

Ruuvi- ja lyöntipaalujen käyttö oli olosuhteiden kannalta mahdollista, ja myös paalujen asennukseen kuluva aika oli hyvin samaa luokkaa. Kustannuksia vertailtaessa kuitenkin kävi ilmi, että lyöntipaalujen käyttö oli edullisempaa. Ruuvi- ja lyöntipaalujen valmistuskustannus on korkeampi hitsattujen siipien takia, vaikka materiaalia kuluu vähemmän kuin yhtä lujaan lyöntipaaluun. Tästä syystä päädyttiin käyttämään lyöntipaaluja.

### 3.2 Paaluprofiilin valinta

Paalun profiiliksi valittiin teräksinen rullamuovattu  $\Sigma$ -profiili (kuva 2), jota muun muassa Ideematec käyttää paneelirakenteissaan paaluprofiilina. Ideematec on saksalainen suuri paneelirakennevalmistaja, joka on toimeksiantajayrityksen käyttämä esimerkkitoimittaja paneelirakenteille. Ideematec antoi käyttöön materiaalia siitä, millaisia voimia perustusten tulee kestää, ja millaisia siirtymiä niissä sallitaan. Perustusten suunnittelu ja testaukset toteutettiin pitkälti tämän materiaalin pohjalta.



KUVA 2.  $\Sigma$ -profiili (Kuva: Miki Rajamäki)

Aurinkoa seuraavassa voimalassa on paalujen välillä kulkeva akseli, joka on laakeroitu paalun päähän. Kohteesta riippuen akseli voi olla noin 1,5–2,5 metrin korkeudella. On tärkeää, että paalujen päät ovat samalla tasolla, jotta akseli tulee suoraan. Paalutuskoneella päiden saaminen samalle tasolle on haastavaa, joten paalun ja paneelirakenteen tukivarren väliin pohdittiin liitoskohtaa. Liitoskohdan avulla jokainen paneelirakenne voidaan asentaa oikeaan korkeuteen, jolloin pa-

neelit asettuvat vertikaalisuunnassa samaan tasoon.  $\Sigma$ -profiilin käyttö myös maahan asennettavana paaluna helpotti liitoskohdan toteutusta, koska erillistä sovituskappaletta eri paaluprofiilin ja tukivarren välille ei tarvinnut suunnitella.

$\Sigma$ -profiilin suuremman poikkipinta-alan ansiosta sillä on korkeampi lujuus taivutusta ja nurjahtamista vastaan kuin esimerkiksi vastaavan kokoisella ja vahvuisella neliö- tai putkipalkilla. Tällöin materiaalia kuluu vähemmän, mikä tekee  $\Sigma$ -profiilista edullisemmän vaihtoehdon tavallisiin paaluprofiileihin verrattuna. Suurempi poikkipinta-ala tukeutuu myös paremmin maahan, mikä auttaa rakenteita pysymään pystyssä. Varsinkin suomaalla tämä on kriittistä, koska maaperän leikkauslujuus on erittäin heikko.

Ideematec oli alustavasti valinnut suohankkeisiin heidän käyttämistään profiilikoista ulkomitoiltaan 180 mm x 100 mm ja ainevahvuudeltaan 3 mm  $\Sigma$ -profiilia paaluissa, joissa on kiinni paneelirakenteen kääntäjän moottori. Muissa paaluissa käytetään 140 mm x 70 mm  $\Sigma$ -profiilia, joka on ainevahvuudeltaan 2,5 mm. Vaihtoehtoina paalun profiilin koon valinnassa oli tehdä ainevahvuuden verran suuremmat tai pienemmät, tai samankokoiset profiilit kuin Ideematec:lla. Tällä profiililla Ideematec:n paneelirakenteen ja maahan tulevan paalun väliin tulisi liitoskappale, joka yhdistää paalut toisiinsa. Käytännössä liitoskappale olisi ainevahvuuden verran suurempi pala  $\Sigma$ -profiilia, jolloin liitoskappale antaisi tukea sivuttaisuunnassa, ja paalut voitaisiin liittää ruuveilla liitoskappaleeseen. Kääntöpuolena liitoskappaleiden käytössä oli niiden aiheuttamat lisäkustannukset.

Suurempaa paaluprofiilia käyttämällä liitoksen tekeminen oli helpompaa kuin erillistä liitoskappaletta käyttämällä. Paneelirakenteen tukivarren pystyi liu'uttamaan maassa olevan paalun sisään, jolloin korkeuden säätäminen oli helpompaa. Saman tyylinen ratkaisu oli myös pienemmän paaluprofiilin kanssa. Tässä tapauksessa paneelirakenteen tukivarsi tuli maassa olevan paalun ulkopuolelle. Etuna pienemmän profiilin kanssa oli materiaalikustannuksissa säästö, kun pienempään profiiliin kului vähemmän terästä. Koska pienempi profiili oli luonnollisesti heikompi kuin alkuperäinen, paalulle tuli tehdä lujuustarkastelu, jotta voitiin varmistaa sen kestävyys paneelirakenteiden ja luonnonvoimien aiheuttamia kuormia vastaan.

### 3.3 Paalutuksen kustannusten vertailu

Paaluprofiilin valinnan jälkeen piti miettiä, minkä mittaisia paaluja alueelle tarvitaan. Aurinkovoimalahankkeen toteutusalueelle oli tehty kairauksia, joiden avulla pystyttiin arvioimaan turvesyvyyyksiä alueella. Turvesyvyyden tietäminen oli tärkeää, koska paalujen piti yltää turvekerroksen läpi kovempaan maaperään turpeen huonomman kantavuuden takia. Kairausten perusteella tiedettiin, että turvesyvyys vaihtelee alueella noin puolesta metristä noin kuuteen metriin. Tämä tarkoitti sitä, että pisimpien paalujen pitäisi olla noin kahdeksan metriä pitkiä ja lyhimpien noin kaksi metriä. Siipikairauksien mittaustulosten perusteella arvioitiin normaalijakaumaa hyödyntäen, kuinka paljon eri pituisia paaluja tarvittaisiin.

Ensimmäisenä vaihtoehtona vertailussa oli kuusi metriä pitkien paalujen käyttö, koska siipikairauksien keskiarvosyvyys ylöspäin pyöristettynä osui siihen. Ajatuksena oli, että jos turvesyvyys on alle kuusi metriä, paalut lyhennetään oikean mittaiseksi paalutuksen jälkeen, ja yli jäävistä paloista hitsataan uusia paaluja. Jos taas turvetta on yli kuusi metriä, käytetään liituskappaleita paalun jatkamiseen. Toisena vaihtoehtona oli mitata turpeen syvyys jokaisen paalun kohdalta, jolloin jokainen paalu voitaisi tilata oikean mittaisena puolen metrin tarkkuudella. Kolmantena vaihtoehtona oli tehdä alueelta syvyysmittausverkko, jolla saataisi arvioitua paremmin syvyyden vaihteluita alueella ja sitä kautta tietoa, paljonko minäkkin mittaisia paaluja tarvitaan. Verkon silmäkooksi pohdittiin 20 m x 20 m ja 40 m x 40 m.

Ensimmäisen vaihtoehdon etuna oli helpompi paalujen tilausprosessi, koska tarvitsisi tilata vain yhden mittaisia paaluja. Lisäksi tilattavien paalujen määrä olisi pienempi, koska hukkapaloista voitaisiin hitsata uudelleen täysimittaisia paaluja. Huonoja puolia tässä vaihtoehdossa oli paalujen hukkapalojen syntyminen, lyhentämisestä, hitsaamisesta, ja liituskappaleista ja niiden asentamisesta aiheutuvat lisäkustannukset. Paalujen lyhentämiseen ja liituskappaleiden asentamiseen tarvitsisi yhden työntekijän ja ammattihitsaajan, sekä liituskappaleet pitäisi tilata erikseen. Laskennassa arvioitiin, että työntekijän, joka lyhentää ja jatkaa paaluja, hinta olisi 30 €/h ja hitsaajan hinta olisi 45 €/h. Laskennassa ei otettu huomioon muita hitsaamisesta aiheutuvia kuluja, kuten sähkön kulutusta, hitsauslankaa ja suojakaasua.

Toisen vaihtoehdon etuna oli, että paaluja voitaisiin tilata tarkasti tarvittava määrä. Tämä vähentäisi materiaalihukkaa lähes olemattomaksi ja poistaisi tarpeen jatkaa paaluja liitoskappaleilla, mikä yksinkertaistaisi asennusprosessia. Vaihtoehtona tilaukselle pohdittiin myös rullamuovauslinjaston tuomista projekti-alueelle, jolloin paalut olisi voitu valmistaa paikan päällä. Tällä tavoin olisi saatu säästöä logistiikkakustannuksissa. Huonona puolena oli turvesyvyuden mittaukseen kuuluva aika ja sen hinta. Mittaukset suunniteltiin tehtävän koneellisesti esimerkiksi kaivinkoneella. Yhden reiän poraamiseen ja seuraavalle reiälle siirtymiseen laskettiin kuluvan aikaa viisi minuuttia. Tällöin neljälläkin koneella mittauksien suorittamiseen olisi kulunut noin kolme kuukautta. Koneen ja kuljettajan tunti hinnaksi arvioitiin 140 €/h. Lisäksi haastetta olisi aiheuttanut mittaustuloksen sitominen mittauspisteeseen, sekä miten paalutusvaiheessa oikean mittaiset paalut olisi saatu oikeaan paikkaan tehokkaasti.

Kolmannessa vaihtoehdossa yhdisteltiin kahden ensimmäisen vaihtoehdon ominaisuuksia kustannukset huomioiden. Mittausverkon avulla saataisiin arvio, paljonko minkäkin mittaisia paaluja tarvitsisi ja sen pohjalta voisi tilata esimerkiksi kolmea eri mittaista paalua, jolloin hukkaa ei syntyisi niin paljon, mutta liitoksiäkin ei tarvitsisi tehdä, jolloin säästöä tulisi työntekijä- ja materiaalikuluissa. Mittauksiin kuluisi myös huomattavasti vähemmän aikaa, koska mittauspisteitä olisi vähemmän. Tiheimmällä, eli 20 m x 20 m verkolla, mittauspisteitä olisi hieman alle 5000, ja harvimmalla, eli 40 m x 40 m verkolla mittauspisteitä olisi noin 1200. Jos kaikki paalujen paikat mitattaisiin, mittauspisteitä olisi noin 45000.

### **3.4 Lujuuslaskennat**

Koska pienempi profiili on heikompi, paaluille piti suorittaa lujuustarkastelut, jotta varmistutaan, että ne kestävät vaaditut kuormitukset. Lujuuslaskennat toteutettiin käsin sekä SolidWorks-CAD-ohjelmiston Simulation-lisäosalla. Ideematec:n tarjoamissa taulukoissa (taulukot 1 ja 2) oli kerrottu voimat ja momentit varmuusker-toimiseen, jotka paalun piti testauksissa kestää ylös, alas ja sivuille. Alas ja sivuille kohdistuvat voimat kuormittavat paalua eniten, joten laskenta keskittyi nii-

hin. 140 mm leveän paaluprofiilin piti kestää sisäkehällä alaspäin 13,9 kN ja ulkokehällä 15 kN sekä 180 mm profiilin sisäkehällä 12,8 kN ja ulkokehällä 18,2 kN. Ylöspäin suuntautuvat voimat vaikuttavat enemmän paalun pysymiseen maassa kuin itse paalun kestävyys.

TAULUKKO 1. 180  $\Sigma$ -profiilin testausvoimat (Ideematec)

	Sisäkehä	Ulkokehä
Nostava voima	3 kN	2,8 kN
Painava voima	12,8 kN	18,2 kN
Taivutus	4,3 kNm	7,0 kNm

TAULUKKO 2. 140  $\Sigma$ -profiilin testausvoimat (Ideematec)

	Sisäkehä	Ulkokehä
Nostava voima	2,9 kN	2 kN
Painava voima	13,9 kN	15 kN
Taivutus	3,3 kN	5,5 kN

Paalulle suoritettiin käsin laskemalla nurjahdustarkastelu ja testauksien pohjalta Solidworks-ohjelmiston FEM-laskennalla (Finite Element Method) Von Mises-jännitystarkastelu. Jännitystarkastelua käsitellään testausten yhteydessä. Kuvasta näkyy paalun asemointi suhteessa paneelirakenteeseen sekä koordinaatisto (kuva 3.) eli paalun pidempi sivu on kohtisuoraan X-suuntaan ja lyhyempi sivu Y-suuntaan. Tarkasteluiden kannalta tällä oli merkitystä, jotta rakenteeseen kohdistuvat voimat ja tuet sekä paalun lujuusominaisuudet huomioitiin oikealla tavalla.



KUVA 3. Paalun asento paneelirakenteeseen nähden (Kuva: Miki Rajamäki)

Nurjahdusvoiman kaava muuttuu sen mukaan, miten paalun ala- ja yläpäät ovat tuettu. Tässä tapauksessa paalun yläpää oli tuettu paneelirakenteeseen suuntaisesti laskiessa X-suunnassa, mutta ei Z-suunnassa. Kohtisuoraan paneelirakennetta vastaan laskiessa yläpäähän ei tullut tukea Y-suuntaan. Paalun alapää oli molemmissa tapauksissa tuettu molempiin suuntiin. Laskennassa ei huomioitu sivuttaissuuntaisia voimia tai maaperän mahdollisesti antamaa tukea paalulle.

Kun paalun alapää on tuettu täysin ja yläpää on tuettu vaakasuunnassa, nurjahdusvoima lasketaan kaavalla (1) (Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J. 2019, 142.)

$$F_n = \frac{2,046 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2}, \quad (1)$$

jossa  $E$  on kimmokerroin,  $I$  on neliömomentti, ja  $l$  on pituus.

Ensin laskettiin nurjahdusvoimat 140 mm profiilille. Paalut valmistettiin teräksestä, joten kimmokerroin on 210 GPa. Neliömomentti saatiin Solidworksin Section Properties -työkalulla, ja se oli X-akselin suuntaisesti  $316953,39 \text{ mm}^4$ . Koska nurjahdusvoima pienenee pituuden kasvaessa, pituus määritettiin pisimmän käytettävän paalun mukaan, eli pituus oli 8000 mm. Nämä lähtötiedot sijoittamalla kaavaan (1) nurjahdusvoimaksi X-akselin suuntaan saatiin

$$F_{n,x} = \frac{2,046 \cdot \pi^2 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 316953,39 \text{ mm}^4}{(8000 \text{ mm})^2} = 21,0 \text{ kN}$$

Paalun nurjahdusvoima Y-suunnassa, eli paalun alapää on tuettu täysin ja yläpää on vapaa, laskettiin kaavalla (2) (Mäkelä ym. 2019, 142.)

$$F_n = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{4 \cdot l^2}, \quad (2)$$

Muut lähtöarvot pysyivät samoina, paitsi paalun neliömomentti. Se oli Y-akselin suuntaisesti 2104375,51 mm<sup>4</sup>. Sijoittamalla kaavaan (2) nurjahdusvoimaksi saatiin

$$F_{n,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 2104375,51 \text{ mm}^4}{4 \cdot (8000 \text{ mm})^2} = 17,04 \text{ kN}$$

180 mm profiilille nurjahdusvoimat laskettiin samalla tavalla. Lähtöarvoista muuttui ainoastaan neliömomentti, joka oli X-suuntaan 1092830,51 mm<sup>4</sup> ja Y-suuntaan 5707937,32 mm<sup>4</sup>. Sijoittamalla kaavan (1), saatiin nurjahdusvoimaksi X-suuntaan

$$F_{n,x} = \frac{2,046 \cdot \pi^2 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 1092830,51 \text{ mm}^4}{(8000 \text{ mm})^2} = 72,41 \text{ kN}$$

Sijoittamalla kaavaan (2) saatiin Y-suuntaan nurjahdusvoimaksi

$$F_{n,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 5707937,32 \text{ mm}^4}{4 \cdot (8000 \text{ mm})^2} = 46,21 \text{ kN}$$

Laskujen perusteella varmistuttiin siitä, että rakenne ei pääse nurjahtamaan paa-lutuksen aikana eikä rakenteiden ja luonnonvoimien aiheuttamista kuormituk-sista.

### 3.5 Tukilevyt

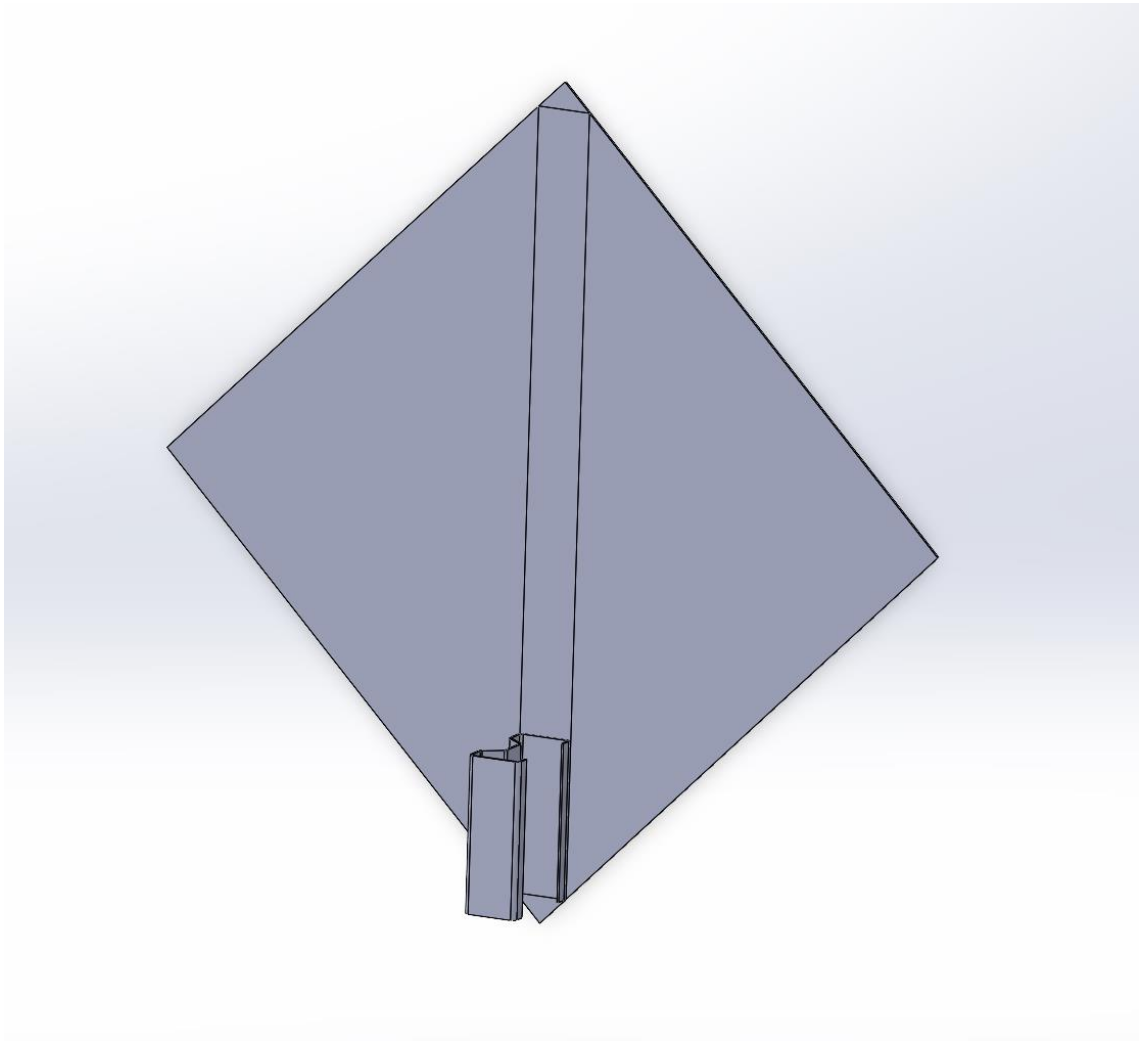
Turpeen pehmeuden vuoksi arvioitiin, että ainakin osaan paaluista olisi tarpeen asentaa tukilevyt. Ratkaisuksi pohdittiin teräksestä tai filmivanerista valmistettuja levyjä, jotka asennettaisiin paalutuksen yhteydessä heti maanpinnan alapuolelle. Vertailussa käytettiin 4 mm paksua teräslevyä ja 18 mm paksua vaneria, jotka taipuivat 5,5 kN kuormalla lähes yhtä paljon. Filmivanerin hinta oli hieman terästä halvempi. Teräslevyn hinnaksi ulkomailta ostettuna tuli noin 30 €/m<sup>2</sup> ja kotimainen filmivaneri maksoi noin 29 €/m<sup>2</sup>. Etuna teräslevyn käyttämisessä oli, että sen asennus oli helpompaa, koska se on huomattavasti ohuempi, jolloin se uppoaa maahan helpommin. Tukilevyjen pitäisi myös kestää aurinkovoimalan suunnittelun eliniän eli 30–40 vuotta. Filmivanerin kestävyYTEEN noin pitkää aikaa suohon upotettuna ei ollut varmuutta. Tämän vuoksi tukilevyt päätettiin tehdä teräksestä.

Paalun ja tukilevyn väliseen kiinnitykseen mietittiin eri ratkaisuja, kuten hitsaaminen, ruuviliitos ja pulttiliitos. Näistä vaihtoehdoista kaikissa oli omat ongelmansa. Hitsaaminen suoalueella on riskialtista turpeen syttymisvaaran takia, eikä levyjen etukäteen hitsaaminen paaluihin onnistu yksittäisen paalun tarkan paikoituksen vuoksi, koska tukilevy haluttiin mahdollisimman lähelle maanpintaa, jolloin se antaa parhaan mahdollisen tuen.

Ruuvi- ja pulttiliitosten huonoja puolia oli niihin kuluva aika. Ruuviliitoksessa aikaa kuluu ruuvien poraamiseen, koska niitä tarvitaan enemmän kuin pultteja. Pulttiliitoksessa taas pultteja varten pitäisi porata paaluun reikiä ja liittää tukilevy siinä vaiheessa, kun tiedetään, kuinka syvälle paalu upotetaan. Molemmat liitostavat pitäisi tehdä siinä vaiheessa, kun paalua ollaan lyömässä maahan. Tämä pidentäisi paalutusprosessia huomattavasti.

Neljäntenä vaihtoehtona keksittiin käyttää paaluprofiilia apuna tukilevyn kiinnittämisessä alapäästä. Tukilevyn alaosaan hitsattiin etukäteen 300 mm pitkä pala ainevahvuuden verran suurempaa paaluprofiilia, jolloin tukilevy pääsee liukumaan paalua pitkin karkaamatta sivuille. Yläpäähän kohdistuvat voimat jäävät pienemmiksi liukupalan ansiosta, joten sen kiinnitys voitiin suorittaa ruuveilla. Profiili hitsattiin 45 asteen kulmaan (kuva 4.) tukilevyn kylkiin nähden, jolloin levy uppoaa maahan terävä kärki edellä, mikä helpottaa sen maahan painamista ja

vähentää maaperän häiriintymistä. Tällä ratkaisulla tukilevy voidaan asentaa paalun asentamisen jälkeen.



KUVA 4. Tukilevy (Kuva: Miki Rajamäki)

Sopivaa kokoa tukilevyille ei tämän projektin puitteissa optimoitu. Testeissä käytettiin 750 x 750 mm ja 1100 x 1100 mm kokoisia levyjä, ja niiden hyöty oli osassa tuloksista havaittavissa. Tukilevyjen osalta otanta testeissä oli kuitenkin niin pieni, että ei voida päätellä, kumpi koko olisi parempi tai riittäisikö pienempikin levy.

## 4 TESTAUS

### 4.1 Vetokokeiden kulku

Perustuksen kestävyyttä testattiin Ideematecin antamien ohjeiden mukaisilla vetokokeilla, joissa paalut paalutettiin maahan, minkä jälkeen niille tehtiin vetokokeet. Testit toteutettiin, jotta saatiin tietoa, miten turve kestää kuormitusta ja miten paalutuksen syvyys vaikuttaa paalun pysymiseen annettujen reunaehtojen sisällä. Testien tarkoituksena oli simuloida voimia, joita paaluihin kohdistuu paneelirakenteen painosta, tuulesta ja lumesta voimalan elinkaaren aikana

Vetokokeet toteutettiin hankealueella Pohjois-Savossa seitsemässä eri pisteessä, joista oli tehty siipikairauksia. Siipikairauksien perustella oli saatu tietoa eri maa-aineskerroksista ja niiden paksuudesta, sekä kallioperän syvyydestä. Näin pystyttiin myös vertailemaan paalun käyttäytymistä eri turve-, siltti-, ja siltti-moreenikerroksien paksuuksilla.

Testeissä käytettiin kahta eripituista  $\Sigma$ -180 paaluprofiilia. Pisteissä, joissa turveysyvyys oli matalampi, käytettiin 5000 mm mittaisia paaluja ja syvemmissä pisteissä käytettiin 7500 mm mittaisia paaluja. Yhtä lukuun ottamatta jokaiseen pisteeseen paalutettiin kuusi paalua. Paalutukseen käytettiin kaivinkoneeseen kiinnitettävää Movax SGL-15 paalutuskonetta, jossa oli voima-anturointi (kuva 5). Anturoinnilla olisi voitu varmistaa alaspäin suuntautuvien voimien riittävyys ja tarkkailemaan paalutuksen aikana mahdollisia esteisiin, kuten kantoihin, kiviin tai kallioperään törmäämisiä. Anturointia ei kuitenkaan testeissä käytetty. Paikoitukseen ja suuntaamiseen käytettiin Novatron-paikoituslaitetta.



KUVA 5. Movax SGL-15 paalutuskone kaivinkoneessa (Kuva: 3Flash Finland Oy)

Paalutuksen jälkeen paalut annettiin olla maassa viikon ajan muutamaa paalua lukuun ottamatta, jotta maaperä olisi häiriintymätön vetokokeissa. Viikon jälkeen paaluille tehtiin ensin sivuvetokoe ja sen jälkeen ulosvetokoe. Sivuvetokokeessa paalua vedettiin paalun kapeamman kyljen suuntaan metrin korkeudelta maantasosta mitattuna ja sivuttaissiirtymää mitattiin maantasosta. Ulosvetokokeessa paalua vedettiin suoraa ylöspäin ja siirtymää mitattiin paaluun kiinnitetyllä mittarilla.

Vetokokeissa käytettävää voimaa mitattiin painemittarilla, jonka lukemista pystyttiin laskemaan paaluun kohdistuva voima. Kyseisellä testauskoonpanolla 10 bar paine vastasi noin 940 N voimaa. Vetokokeet tehtiin lisäämällä painetta asteittain 10 barin välein siihen asti, että saavutettiin 6,6 kN voima tai jokin hylkäyskriteeri täyttyi.

Sivuvetokokeessa paalu läpäisi testin sisäkehän osalta, jos se kesti 4,3 kN voiman. Ulkokehän osalta sen piti kestää 7 kN voima. Paalu hylättiin, jos sen siirtymä oli kuormitettuna yli 25 mm tai jos kuorman poistamisen jälkeen siirtymä oli yli kymmenen millimetriä lähtötilanteesta. Ulosvetokokeen paalu läpäisi ulkokehän osalta, jos se kesti 2,8 kN voiman ja sisäkehän osalta, jos se kesti 3 kN voiman. Ulosvetokokeen hylkäyskriteereinä olivat paalun nouseminen yli kymmenen millimetriä kymmenen sekunnin aikana tai kokonaisuudessaan yli 20 mm nouseminen.

## 4.2 Tulokset

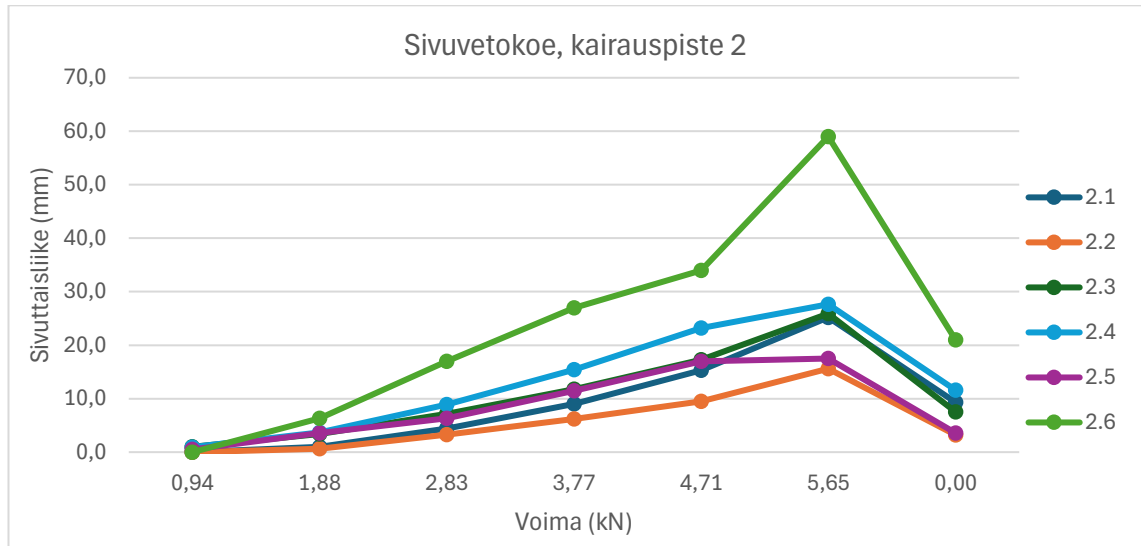
Paalutusvaiheessa hankaluuksia aiheutti paalujen epäsymmetrisyys. Paalutettaessa ne lähtivät helposti kaartumaan maan alla, esimerkiksi kanton törmäämisen takia. Tämä aiheutti sen, että paalun maan pinnan yläpuolelle jäävä osa kiertyi tai jäi vinoon, jolloin siihen ei paneelirakenteita asennettaessa pystyttäisi kiinnittämään rakennetta.

Vetokokeiden tulokset kirjattiin Excel-taulukkolaskentaohjelmistoon, jossa niitä analysoitiin tarkemmin (liite 1). Tuloksista eri kairauspisteissä muodostettiin viivakaaviot, jotta tuloksia oli helpompi tulkita ja vertailla. Kaavioissa X-akselilla on voima kilonewtoneina ja Y-akselilla paalun siirtymä millimetreinä. Kaavioista pystyttiin myös vertailemaan turvesyvyyden vaikutusta testaustuloksiin.

Kairauspisteessä numero 2 turvekerroksen paksuus oli noin 1,3 metriä. Turvekerroksen alapuolella oli silttiä, eli saven ja hiekan sekoitusta, noin 0,2 metriä ja silttikerroksen alapuolella silttimoreenia, eli siltin ja moreenin sekoitusta noin 0,45 metriä. Pohjakallio tuli vastaan noin 1,9 metrin syvyydessä ja kaikki paalut saatiin paalutettua siihen asti.

Sivuvetokokeessa paalujen 1–5 tulokset olivat samankaltaisia. Paalussa 6 siirtymä oli muita huomattavasti suurempi koko kokeen ajan. 5,65 kN voimalla vedettäessä tasaisesta joukosta eniten liikkui paalu 4, jossa siirtymä oli noin 28 mm, kun paalussa 6 se oli lähes 60 mm. Paalu 2 liikkui suurimmalla voimalla vähiten, noin 15 mm (kuvio 1). Ulosvetokokeessa paalut 1–5 kestivät vähintään 3,77 kN

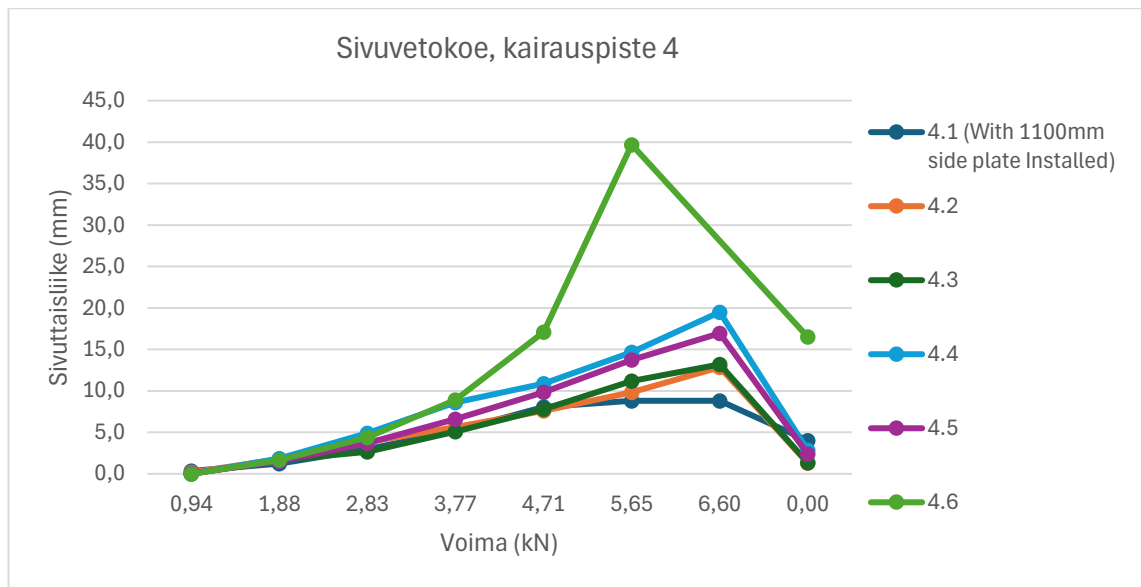
voiman, jonka jälkeen paalut 1 ja 3 lähtivät irtoamaan. Paras tulos oli paalulla 2, joka liikkui 5,65 kN voimalla vain 3 mm. Paalun 6 tiedot puuttuivat ulosvetokokeen osalta (liite 1).



KUVIO 1. Sivuvetokokeen tulokset kairauspisteessä 2.

Kairauspisteessä numero 4 turvetta oli kolme metriä ja siltiä puoli metriä eli pohjakallio tuli vastaan 3,5 metrin syvyydessä. Paalut 1 ja 4–6 jäivät turvekerrokseen, 2,67–2,94 metrin syvyyteen. Paalu 3 upposi 300 mm silttikerrokseen ja paalu 2 meni pohjaan asti. Paalut 5 ja 6 oli testattu jo aiemmin heti paalutuksen jälkeen.

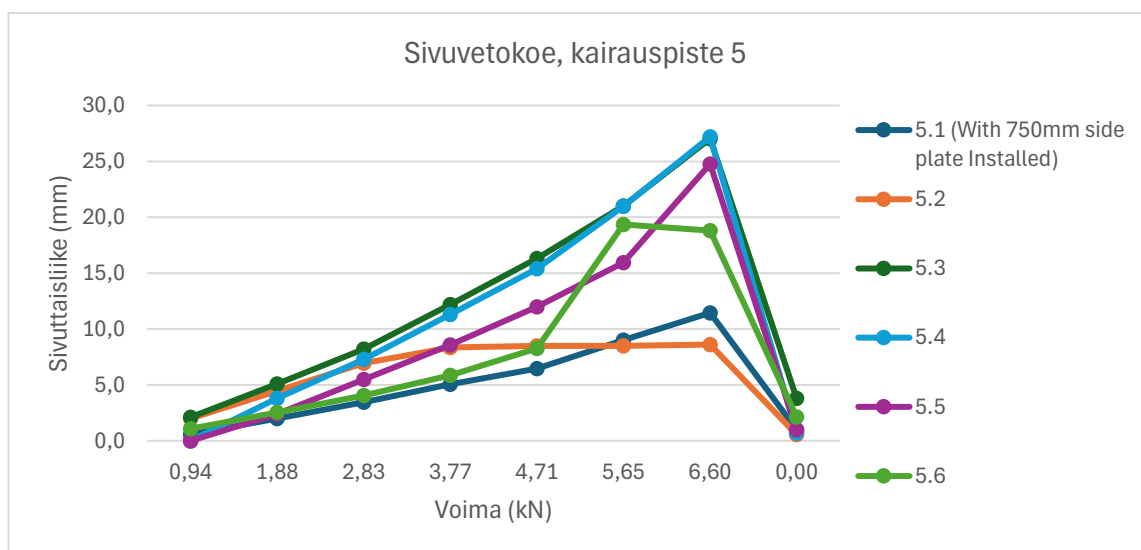
Myös tässä pisteessä sivuvetokokeessa paalut 1–5 käyttäytyivät lähes samalla tavalla. Paalu 6 erottui muista selvästi suuremmalla siirtymällä, kun voimaa nostettiin yli 3,77 kN. Voimalla 5,65 kN vedettäessä siirtymä paalussa 4 oli noin 15 mm, kun taas paalussa 6 se oli noin 40 mm. Paalu 1, johon oli asennettu 1100 x 1100 mm tukilevy, liikkui vähiten kaikista, mutta palautui myös huonommin kuin muut (kuvio 2). Ulosvetokokeessa kaikki paalut kestivät vähintään 3,77 kN voiman (liite 1).



KUVIO 2. Sivuvetokokeen tulokset kairauspisteessä 4.

Kairauspisteessä numero 5 siipikairaustuloksen perusteella turvekerroksen paksuus oli 2150 mm, silttikerroksen 800 mm ja silttimoreenikerroksen 500 mm eli yhteensä maaperä oli noin 3500 mm syvä. Kaikki kuusi paalua upposivat kuitenkin 4000 mm syvyyteen.

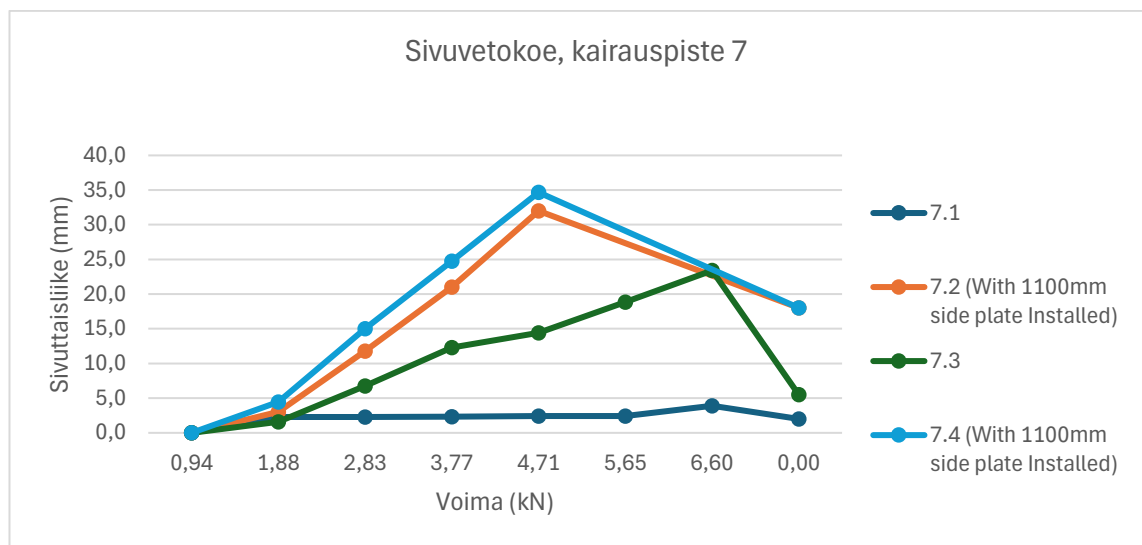
Paalut 3–5 liikkuivat samankaltaisesti ja suurin siirtymä 6,6 kN voimalla oli noin 27 mm. Paalussa 6 siirtymä oli aluksi pienempää, mutta 4,71 kN jälkeen se tuli samalle tasolle paalujen 3 ja 4 kanssa. Pienin siirtymä oli paalussa 1, johon oli asennettu 750 x 750 mm siipilevy (kuvio 3). Ulosvetokokeessa kaikki paalut kestivät 5,65 kN voiman (liite 1).



KUVIO 3. Sivuvetokokeen tulokset kairauspisteessä 5.

Pisteessä numero 7 turvekerros oli 6600 mm paksu ja pisteessä käytettiin 7500 mm pitkiä paaluja, eli kaikki paalut jäivät turvekerrokseen. Silttiä oli 2300 mm ja silttimoreenia 2200 mm. Paalut paalutettiin noin 6,5 metriin, jotta päät jäivät metrin maanpinnan yläpuolelle. Pisteelle asennettiin neljä paalua ja 1100 x 1100 mm siipilevyjä käytettiin kahdessa paalussa.

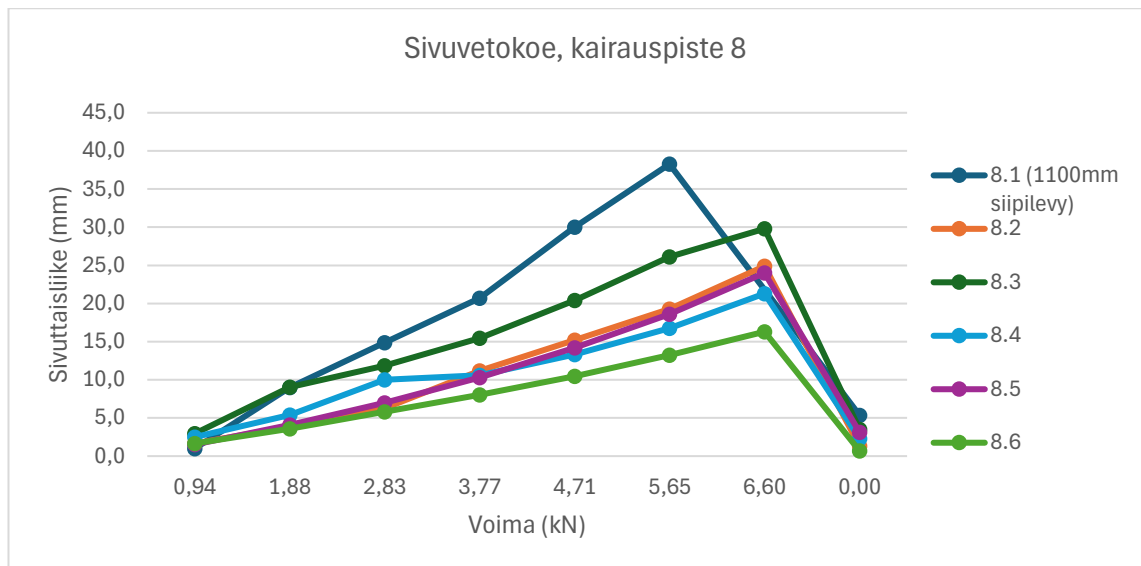
Paalut, joihin oli asennettu siipilevyt, suoriutuivat heikoiten tässä pisteessä. Molempien siirtymät kasvoivat tasaisesti, kunnes hylkäysraja ylittyi 4,71 kN kohdalla. Paalu 1 ei liikkunut koko kokeen aikana juuri ollenkaan ja siirtymä 6,6 kN kohdalla oli alle 5 mm (kuvio 4). Ulosvetokokeessa kaikki paalut pysyivät maassa 5,65 kN voimalla (liite 1).



KUVIO 4. Sivuvetokokeen tulokset kairauspisteessä 7.

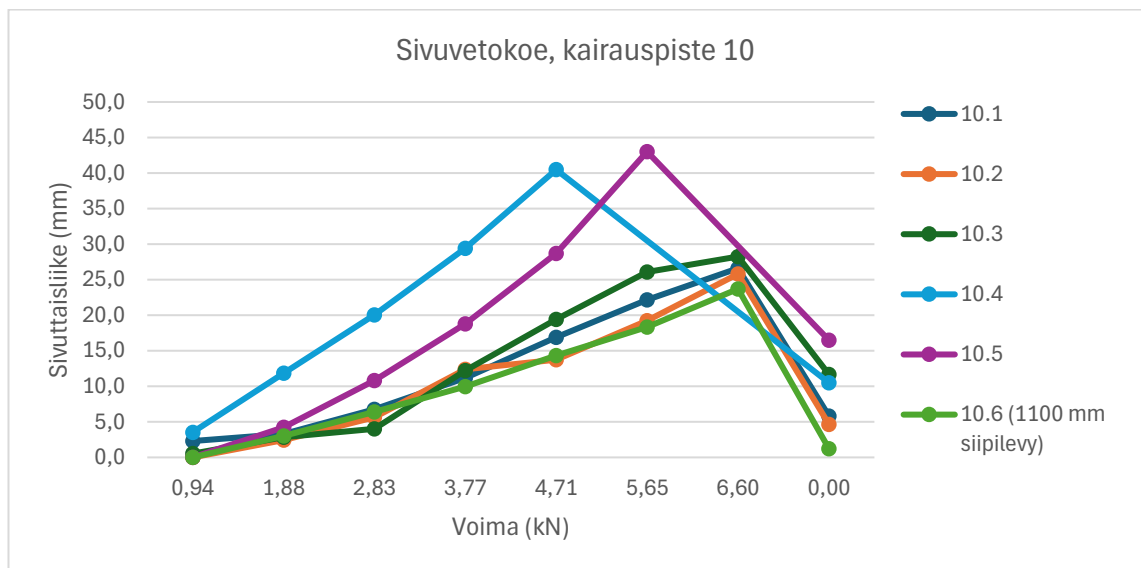
Kairauspisteessä numero 8 turvekerroksen paksuus oli 3200 mm, silttikerroksen 400 mm ja silttimoreenikerroksen 500 mm, eli pohjakallio tuli vastaan 4100 mm syvyydessä. Kaikki paalut paalutettiin 4000 mm syvyyteen ja yhteen paaluun asennettiin 1100 x 1100 mm siipilevy.

Paalu 1, johon siipilevy oli asennettu, suoriutui huonoiten sivuvetokokeesta. Sen siirtymä oli 5,65 kN voimalla hieman alle 40 mm. Paalujen 2–6 tulokset olivat kohtuullisen tasaisia. Paalussa 3 siirtymä olivat hieman suurempi kuin muissa, kun taas paalussa 6 se olivat hieman pienempi (kuvio 5). Kaikki paalut läpäisivät ulosvetokokeen 6,6 kN voimalla (liite 1).



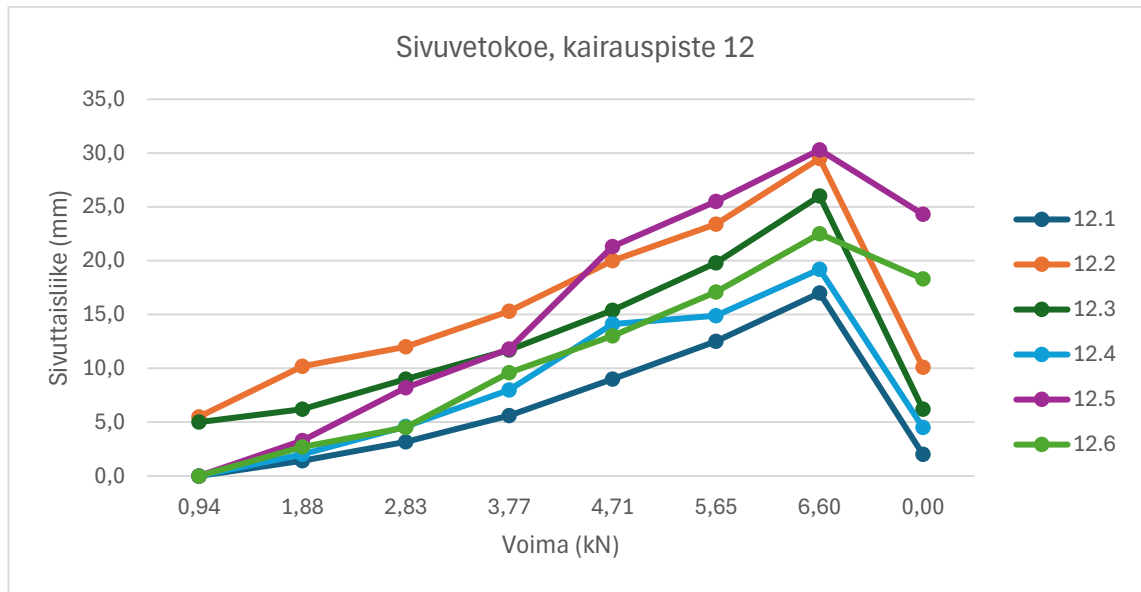
KUVIO 5. Sivuvetokokeen tulokset kairauspisteessä 8.

Kairauspisteessä numero 10 maaperän kerrokset olivat samanlaisia kuin pisteessä 8. Kaikki paalut paalutettiin 4000 mm syvyyteen ja yhteen asennettiin 1100 x 1100 mm siipilevy. Paalut 4–6 oli testattu aiemmin heti paalutuksen jälkeen. Tulokset olivat paalujen 1–3 osalta samansuuntaisia kairauspiste 8:n kanssa. Paaluihin 4 ja 5 tuli suurempia, yli 40 mm siirtymiä. Siipilevyllinen paalu suoriutui tässä pisteessä parhaiten. Sen siirtymä oli 6,6 kN voimalla hieman alle 25 mm (kuvio 6). Ulosvetokokeessa paalu 4 irtosi 3,77 kN voimalla ja paalu 5 4,71 kN voimalla. Muut paalut kestivät nostamisen 5,65 kN voimalla (liite 1.)



KUVIO 6. Sivuvetokokeen tulokset kairauspisteessä 10.

Kairauspisteessä numero 12 turvekerros oli 3700 mm, silttikerros 5000 mm ja silttimoreenikerros 2900 mm. Yhteensä syvyyttä kairauspisteessä oli 11600 mm. Tässä pisteessä käytettiin 5000 mm pitkiä paaluja, koska ne ylsivät silttikerrokseen ja kaikki paalut paalutettiin 4000 mm syvyyteen. Paaluihin 2 ja 5 syntyivät suurimmat siirtymät. 6,6 kN voimalla ne liikkuivat noin 30 mm. Pienimmät siirtymät olivat paaluissa 1 ja 4, joissa siirtymät jäivät alle 20 mm (Kuvio 7).



KUVIO 7. Sivuvetokokeen tulokset kairauspisteessä 12.

Vetokokeiden tulokset olivat pääosin onnistuneita. Kaikissa testipisteissä vähintään puolet paaluista pysyivät sallitun 25 mm siirtymän rajoissa tai ainakin hyvin lähellä sitä. Vetokokeet tehtiin pääosin viikko paalutuksen jälkeen, joten maaperä oli ehtinyt palautua paalutuksen aiheuttamasta häiriintymisestä. Paaluissa, jotka oli vedetty jo kerran heti paalutuksen jälkeen, esiintyi suurempia siirtymiä. Tästä voitiin päätellä, että maaperän asettumisella oli merkittävä vaikutus tuloksiin. Tulosten perusteella pääteltiin myös, että 140 mm paaluprofiili ei pysyisi sallittujen siirtymien rajoissa, joten sen käytöstä luovuttiin.

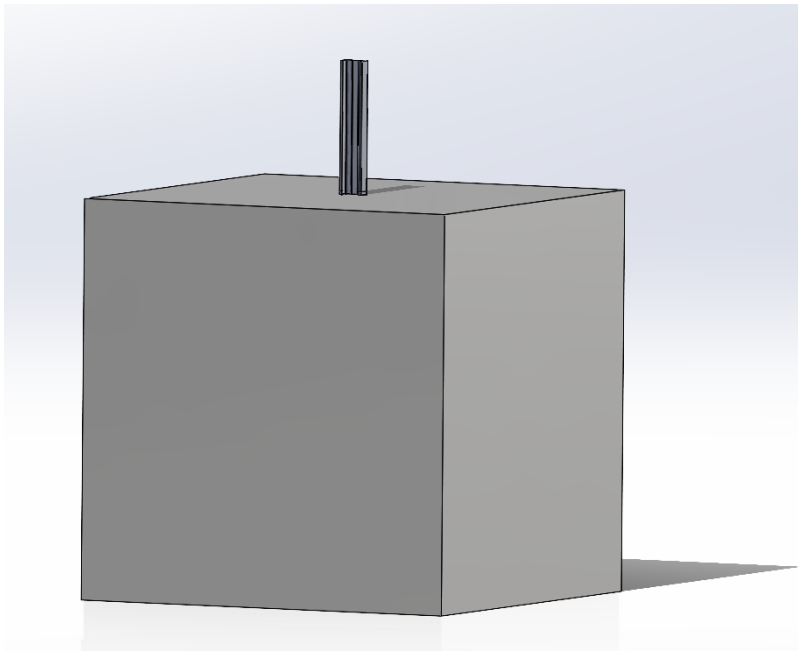
## 5 FEM-LASKENTA

### 5.1 FEM-mallin luominen

Jännityksiä ja siirtymiä laskettiin Solidworks-ohjelmiston Simulation-lisäosalla, jolla voi toteuttaa FEM-laskentaa. FEM-laskennassa kappale jaetaan pieniin elementteihin, jotka muodostavat verkon. Elementeille annetaan materiaaliominaisuudet ja rajoitteet. Näiden avulla laskettavaa kappaletta voidaan simuloida kokonaisuutena. FEM-laskennan avulla on mahdollista saada tarkkoja laskelmia esimerkiksi kappaleen jännityksistä ja venymistä. (Mitä on FEM-laskenta? n.d.)

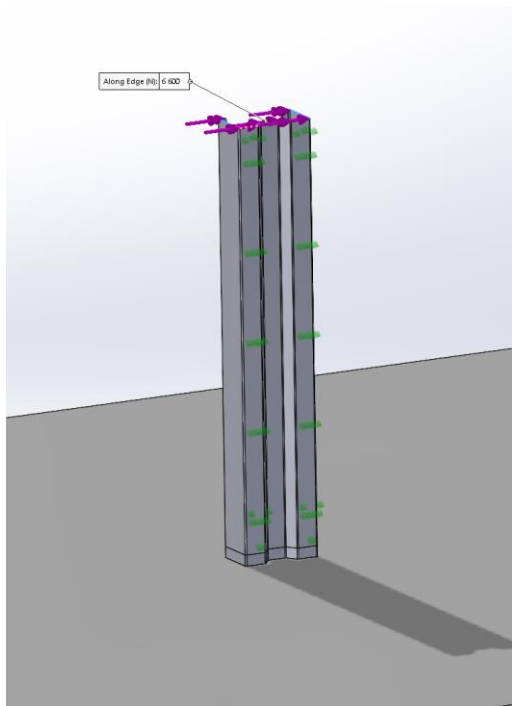
Jännityksiä arvioitiin testitulosten perusteella, koska tarkkaa tietoa turpeen materiaaliominaisuuksista ei löytynyt. Turpeen ominaisuudet myös riippuvat esimerkiksi sen kosteudesta, tiivyydestä ja hajoamisasteesta, joten mitään yksiselitteisiä vakioarvoja turpeelle ei ollut saatavilla. Suuntaa materiaalivakioille etsittiin internetistä ja tekoälyn avulla. ChatGPT-tekoälysovellus antoi löyhälle ja kostealle turpeelle kimmokertoimen arvoksi 1–5 MPa, Poissonin luvuksi 0,3–0,5, leikkausmoduuliksi 0,5–5 MPa ja myötölujuudeksi 5–20 kPa. Paalun materiaalina käytettiin S355 rakenneterästä.

Laskennassa mallina käytettiin kolmea eripaksuista kuutiota, jotka mallinsivat turvekerrosta. Poikkileikkauksen kooksi valittiin kolme kertaa kolme metriä, jotta elementtien koko pysyi mahdollisimman pienenä, mutta laskenta-ajat eivät nousseet liian pitkiksi. Poikkileikkauksen kasvattaminen suuremmaksi ei myöskään vaikuttanut tuloksiin merkittävästi. Kuution paksuutena käytettiin kolmea, neljää ja seitsemää metriä, koska vetokokeista oli tuloksia näille turvesyvyyksille. Matalampiin kuin kolme metriin turvekerroksiin simuloinnin tarkkuus kärsi liikaa, joten niitä ei huomioitu. Kuutioihin tehtiin  $\Sigma$ -profiilin muotoiset reiät paalun paikoittamista helpottamaan. Profiilin kokona käytettiin 180 mm profiilia ja paalut mitoitettiin niin, että ne olivat metrin korkeampia kuin kuutio, kuten testeissäkin (kuva 6).

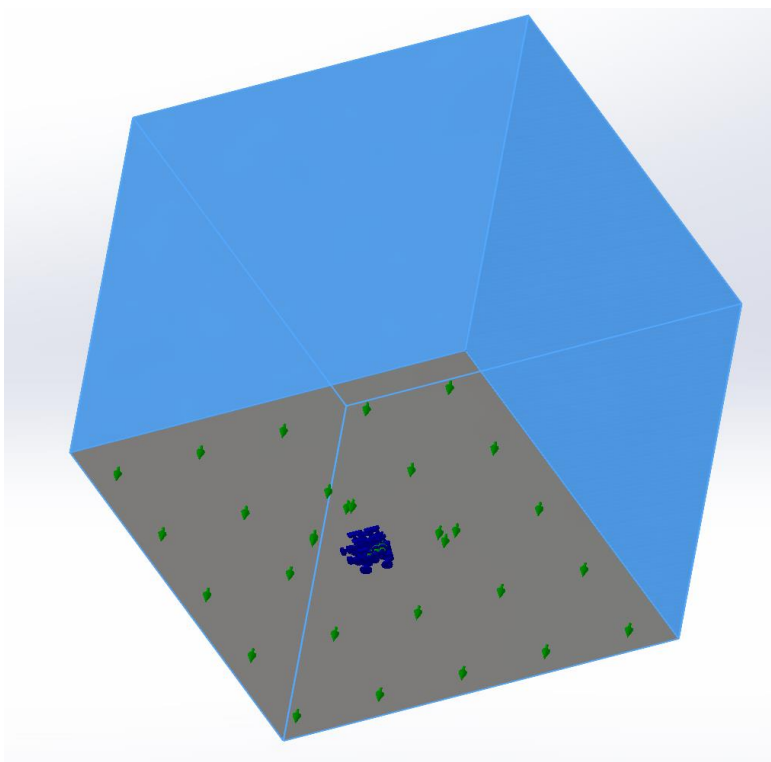


KUVA 6. 3D-malli FEM-laskentaan. (Kuva: Miki Rajamäki)

Tuenta laskentaa varten tehtiin kuvan 8 mukaisesti paalun pohjasta Fixed Support -tuella, eli se oli täysin lukittuna. Tämän tarkoituksena oli simuloida tukevampia maakerroksia, kuten silttiä, turvekerroksen alla (kuva 8). Paalu tuettiin myös maanpäälliseltä osalta voiman suuntaiselta kyljeltä Slider-tuella, joka esti paalun kiertymisen, kun siihen kohdistettiin voimaa (kuva 7). Tätä tukea käytettiin, koska paaluun tuleva paneelirakenne estää kiertymisen paalussa. Kuutio tuettiin pohjasta Slider-tuella ja kyljistä Elastic Support -tuella, johon sopiva jousivakion arvo etsittiin kokeilemalla. Molemmissa Normal Stiffness – ja Shear Stiffness kohdissa käytettiin samaa arvoa. Tukea käytettiin turpeen joustavuuden huomioimiseksi (kuva 8). Voima asetettiin paalun päähän kuvassa 7 näkyvällä tavalla (kuva 7). Voiman suuruus laskuissa oli sama 6600 N, jota käytettiin vetokokeissakin.



KUVA 7. Paalun kohdistettu voima (violettit nuolet) ja maanpäällisellä osalla oleva tuki (vihreät nuolet). (Kuva: Miki Rajamäki)



KUVA 8. Kuution tuenta kyljistä Elastic Support -tuella (sininen väri), Slider-tuki pohjassa (vihreät nuolet) ja Fixed-tuki paalun alapäässä (tummansiniset nuolet). (Kuva: Miki Rajamäki)

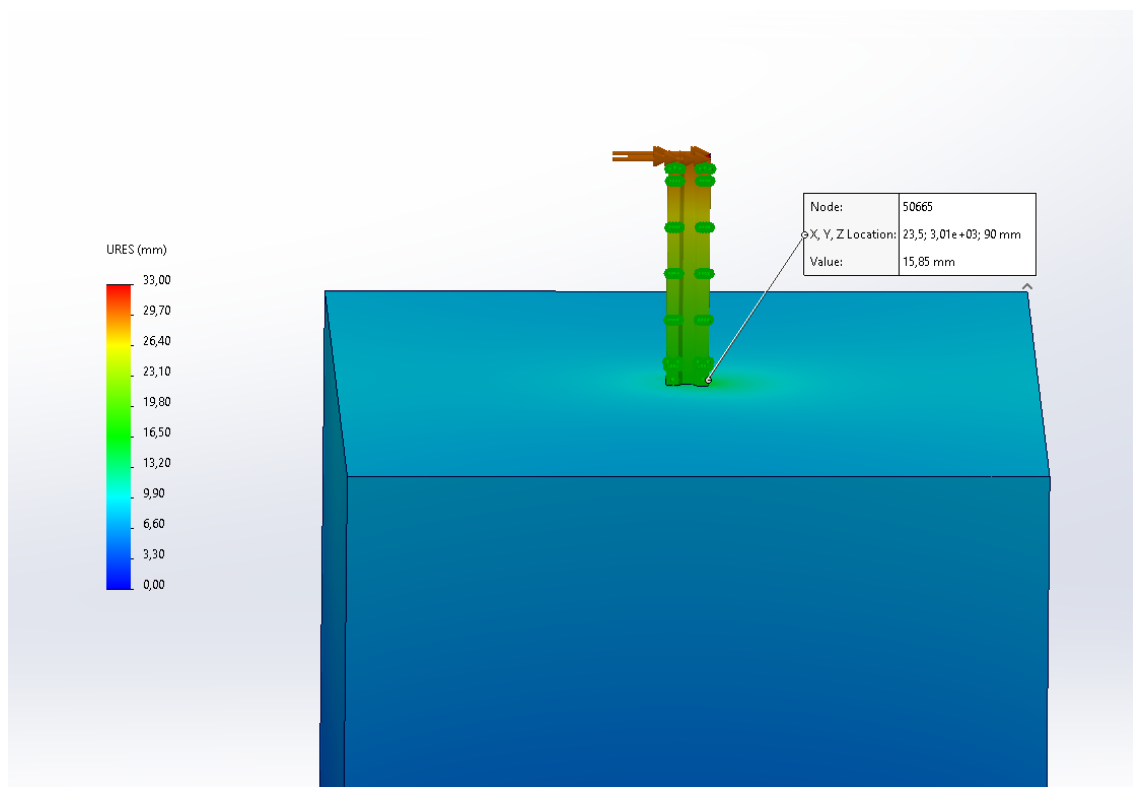
Laskenta aloitettiin kokeilemalla, mitkä olisivat sopivat arvot jousivakiolle ja turpeen lujuusarvoille. Sopivien arvojen etsimisessä käytettiin kolme metriä paksua

kuutiota, koska kolmessa testipisteessä turvekerroksen paksuus oli noin kolme metriä, eli siitä oli suurin otanta. Tavoitteena oli löytää arvot, joilla siirtymän tulokset vastaisivat testitulosten keskiarvoa, joka oli 21,20 mm.

Ensimmäisessä laskennassa käytettiin keskimääräisiä arvoja ChatGPT:n antamista vaihteluväleistä (taulukko 3). Jousivakion arvoksi asetettiin voiman kanssa samaa suuruusluokkaa oleva arvo. Näillä luvuilla siirtymän tulokseksi saatiin 15,85 mm (kuva 9).

TAULUKKO 3. Ensimmäiset laskenta-arvot

Kimmokerroin	3	MPa
Poissonin luku	0,3	
Leikkausmoduuli	2,75	MPa
Myötölujuus	0,0125	MPa
Jousivakio	5000	(N/m)/m <sup>2</sup>



KUVA 9. Ensimmäisen FEM-laskennan tulokset. (Kuva: Miki Rajamäki)

Usean kymmenen laskennan jälkeen saatiin siirtymälle tulokseksi 21,34 mm, jonka todettiin olevan riittävän lähellä testitulosten keskiarvoa. Myös muilla turvekerroksen paksuuksilla siirtymät olivat lähellä testituloksia. Turpeen lujuusarvoiksi ja Elastic Support -tuen jousivakioksi saatiin taulukossa 4 esitetyt arvot.

TAULUKKO 4. Lopulliset laskenta-arvot

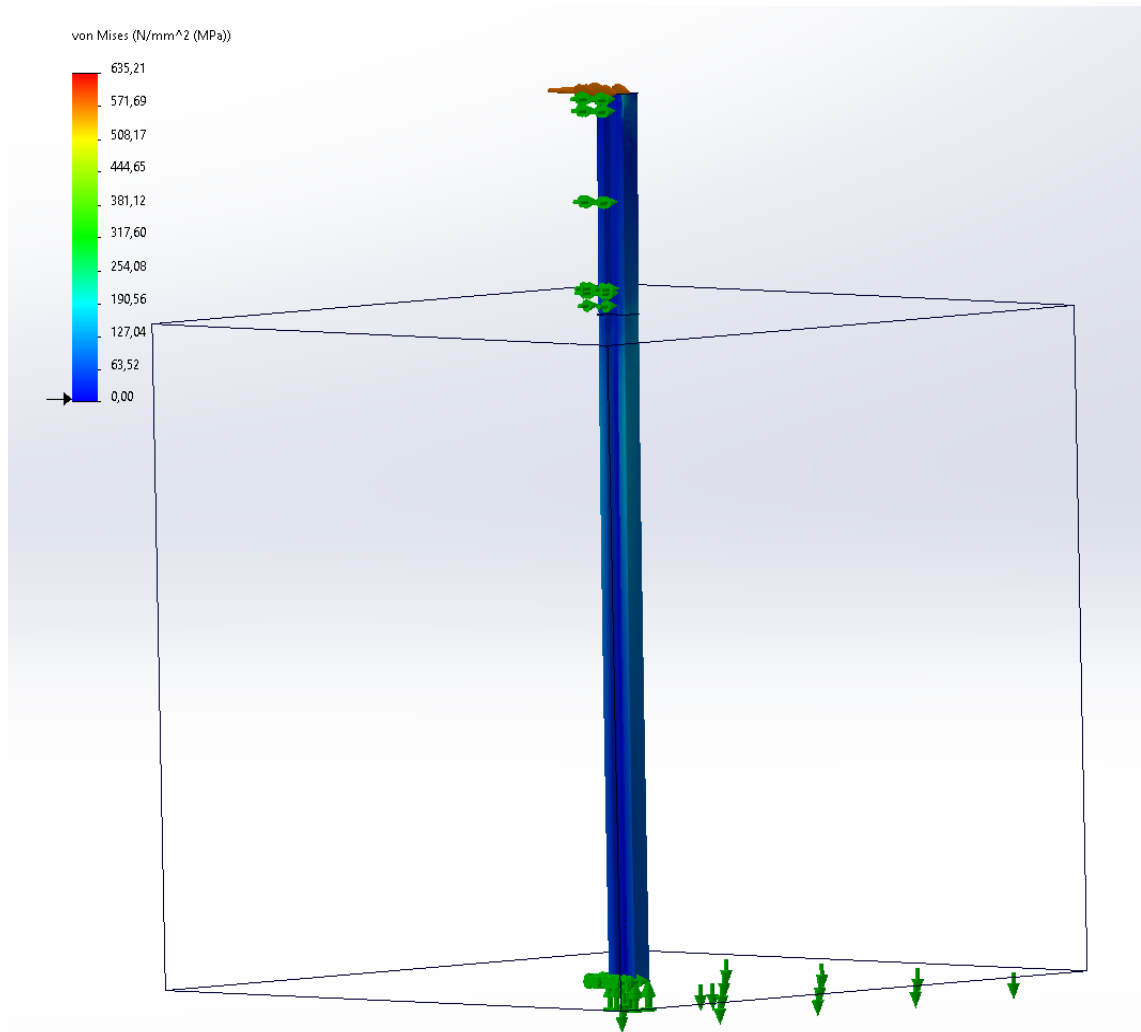
Kimmokerroin	1	MPa
Poissonin luku	0,3	
Liukumoduuli	0,5	MPa
Myötölujuus	0,0125	MPa
Jousivakio	50000	(N/m)/m <sup>2</sup>

## 5.2 Simuloinnin tulokset

Kun laskentaan tarvittavat arvot olivat löytyneet, vaihdettiin laskentamalliin ai-nevahvuuden verran pienempi profiili, jolla perustukset suunniteltiin tehtävän. Laskennassa käytettiin seitsemän kilonewtonin voimaa, kuten Ideematec:in vaatimissa testausvoimissa oli. Muilta osin laskenta suoritettiin samalla tavalla kuin aiemmin.

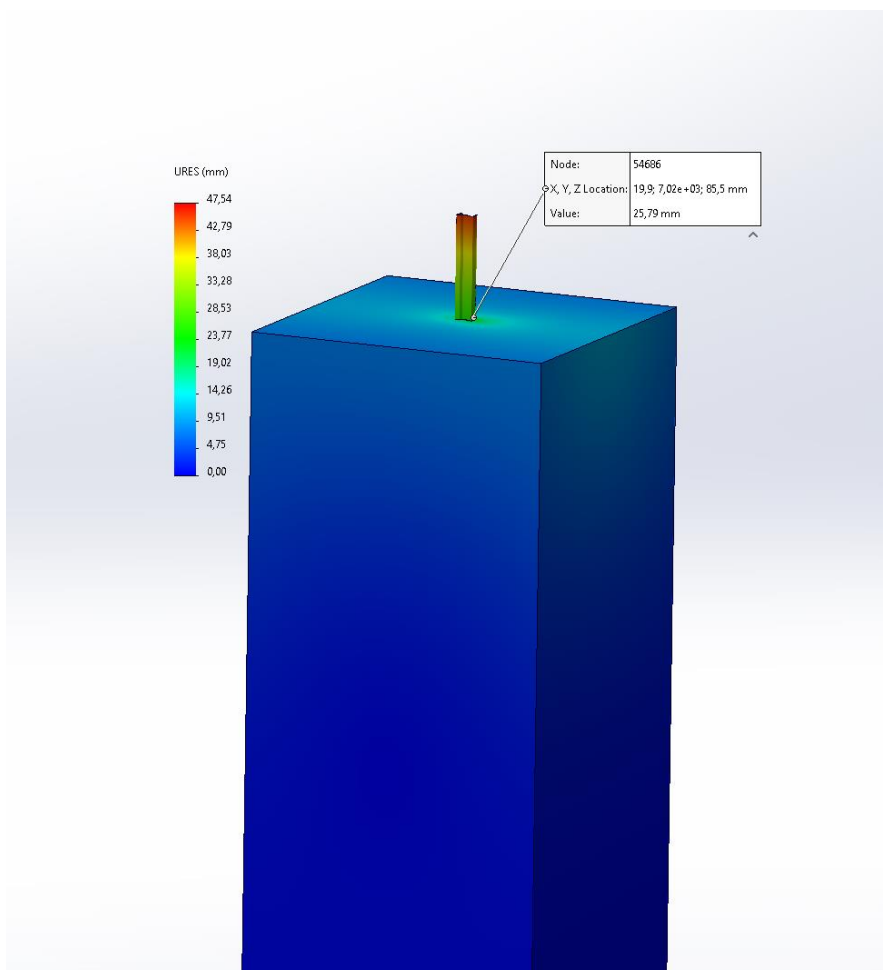
Jännitystarkasteluissa tarkasteltiin Von Mises -jännityksiä eli yhdistettyä jännitystä. Suurimmat jännitykset syntyivät kaikissa tapauksissa paalun kärkeen, johon voima oli asetettu vaikuttamaan. Todellisuudessa voima vaikuttaa laajemmalle alueelle, joten jännityspiikit paalun kärjessä voitiin jättää huomioimatta. Todelliset suurimmat jännitykset syntyivät noin metrin syvyyteen maanpinnasta, paalun puristuvalla puolella.

Kaikilla kolmella turvesyvyydellä, joita laskennassa käytettiin, yhdistetty jännitys paalun kyljessä oli noin 150 megapascalia (kuva 10). Paaluissa käytetty teräs oli S355 rakenneterästä eli sen myötöraja 355 megapascalia. Paaluihin kohdistuvat jännitykset ovat siis kohtuullisella tasolla ja varmuuskerroin myötörajaan nähden 2,37.



KUVA 10. Von Mises -jännitys kolmen metrin turvesyvyydellä. (Kuva: Miki Rajamäki)

Kolme metriä paksussa turvekerroksessa siirtymä pienemmällä profiililla oli 23,22 mm. Neljän metrin turvekerroksessa se oli 25,32 mm, ja seitsemän metrin turvekerroksessa 25,79 mm (kuva 11). Kolme metrisen turvekerroksen osalta tuloksia voidaan pitää luotettavina, koska vetokoetuloksia suurin piirtein tämän paksuisesta turvekerroksesta oli eniten ja arvot simuloitiin sen avulla. Neljän metrin turvekerroksenkin tuloksia voidaan pitää kohtuullisen luotettavina, koska muutos kolmesta metristä ei ole valtava. Myös vetokoetuloksia pisteestä 12 katsottaessa simuloinnin tulos on jopa hieman keskiarvoa suurempi. Seitsemän metrin turvekerroksen tuloksia sen sijaan ei voida pitää kovin luotettavina, koska hyppyä alemmista kerroksista on ja vetokokeiden tulokset pisteessä seitsemän on eriävät toisistaan.



KUVA 11. Siirtymä seitsemän metrin turvekerroksessa. (Kuva: Miki Rajamäki)

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella perustukset aurinkoa seuraavalle aurinkovoimalalle suomaastoon. Työn tuloksena saatiin paaluprofiili, jota voidaan käyttää perustuksena, sekä tukilevy, joka varmistaa perustusten kestävyden, kun voimala kohtaa luonnonvoimia. Paalulle suoritettiin lujuuslaskennat sekä vetokeet kenttäolosuhteissa. Lujuuslaskentojen avulla varmistuttiin, että paalu kestää sille annetut vaatimukset ja kenttätesteissä selvitettiin, miten paalu käyttäytyy paalutuksen aikana ja miten maaperä kestää paaluun kohdistuvia voimia.

Suunnittelun tavoitteena oli saada perustuksista mahdollisimman kustannustehokkaat ja minimoida perustusvaiheessa syntyvää hävikkiä. Hävikkiä pyrittiin vähentämään optimoimalla tarvittavia pohjatutkimuksia sekä paalumäärää ja niiden pituutta. Teoriaosuudessa käytiin läpi aurinkovoimaloiden eri kiinnitysjärjestelmiä ja perustustapoja, jotka toimivat pohjana paalutustekniikan valinnalle. Lisäksi käsiteltiin rahkaturveperäisen maaperän ominaisuuksia ja luonnonvoimia, joita perustukset kohtaavat aurinkovoimalan elinkaaren aikana. Näiden tietojen avulla määriteltiin ominaisuuksia, joita perustuksilta vaaditaan.

Tuloksena saatua perustustapaa olisi tarkoitus tulevaisuudessa hyödyntää aurinkovoimalan perustuksena nykyisissä ja tulevissa voimalahankkeissa. FEM-mallilla voidaan tulevaisuudessa tutkia myös muiden paaluprofiilien käyttäytymistä pehmeässä maaperässä.

Jatkotutkimuksina ennen paalun käyttämistä perustuksena voisi tutkia, että olisi mahdollista estää vetokokeissa havaittua paalujen kiertymistä ja vinoon jäämistä vai tarvitseeko paaluprofiilia vaihtaa symmetriseen. FEM-mallia voisi kehittää niin, että sillä voitaisiin optimoida tukilevyn kokoa. Sitä varten pitäisi olla lisää tuloksia vetokokeista, joissa on käytetty tukilevyjä, jotta voidaan olla varmoja sen vaikutuksesta paalun tukevuuteen.

## LÄHTEET

- Aurinkovoima. 2024. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 10.7.2024.  
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>
- Bojek, P. 2023. Solar PV. IEA. Verkkosivu. Viitattu 19.11.2024  
<https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
- Chandran, C., Hoit, M. 2016. Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016. Teoksessa Lutenegger, A. (toim.) Foundation Alternatives for Ground Mount Solar Panel Installations. American Society of Civil Engineers 14.2.2016. Viitattu 12.6.2024  
<http://dx.doi.org/10.1061/9780784479742>
- Donaldson, B. & Brearley, D. 2015. Geotechnical Analysis and PV Foundations Desing. Solarpro 4/14, 20-34.  
[https://definitivesolar.webvent.tv/uploads/assets/4789/document/0001-SP8.3\\_FE\\_Donaldson.pdf](https://definitivesolar.webvent.tv/uploads/assets/4789/document/0001-SP8.3_FE_Donaldson.pdf)
- Eloperäiset maalajit. n.d. Geologian tutkimuskeskus GKT. Verkkosivu. Viitattu 6.5.2024.  
<http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/eloperaisetmlajit.htm>
- Gilliss, M. 2017. Structural Overview of Earth Anchors for PV Ground Mounted Arrays. Nuance Energy. Verkkosivu. Viitattu 10.5.2024  
<https://nuanceenergy.com/solar-blog/structural-overview-of-earth-anchors-for-pv-ground-mounted-arrays>
- Kibriya, T. 2017. Design of Piles for Utility Scale Ground Mounted Solar Systems in Ontario, Canada. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. 5 (12), 728-737. Viitattu 13.5.2024.  
<https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=11952>
- Lewandoski, C., Santos, R., Sio, J., Canfield, D., Carmo, M., Silva, F., Siqueira, J., Oliveira, W., Ikpeheai, A., & Reginatto, R. 2022. Study of the Efficiency of the Solar Tracker System compared to the Fixed Solar Generation System. Research, Society and Development. 11 (6). Viitattu 14.5.2024.  
<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.28671>
- Ma, W., Zhang, W., Zhang, X., Chen, W. & Tan, Q. 2023. Renewable Energy. Experimental investigations on the wind load interference effects of single-axis solar tracker arrays. ScienceDirect 1.12.2022. 566–580. Viitattu 7.5.2024. Vaatii käyttöoikeuden.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.112>
- Mattila, V. 2023. Merituuli- ja aurinkovoimalat vauhdinotossa. Fingrid. Verkkosivu. Viitattu 10.7.2024.  
<https://www.fingridlehti.fi/merituuli-ja-aurinkovoimalat-vauhdinotossa/>
- Mitä on FEM-laskenta?. n.d. Hefmec. Verkkosivu. Viitattu 29.10.2024.  
<https://hefmec.fi/mika-on-fem-laskenta/>

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J. 2019. Tekniikan kaavasto. Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 20. painos. Tampere: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy

Norbu, K., Jamtsho, S., Zangpo, T., Tenzin, K. & Dorji, G. 2023. Performance Analysis of Dual Axis Solar Tracker, Single Axis Solar Tracker and Fixed Array Configuration. Bhutan Journal of Research & Development. 2023-02 (2). Viitattu 14.5.2024

<https://doi.org/10.17102/bjrd.rub.se2.041>

Ohje paneeliasennuksen tarkastukseen. 2018. Finnwind. Verkkosivu. Viitattu 3.9.2024.

[https://finnwind.fi/wp-content/uploads/upload\\_photos/ohjeet/Ohje%20paneeliasennuksen%20tarkastukseen%20-%20lumikuorma.pdf](https://finnwind.fi/wp-content/uploads/upload_photos/ohjeet/Ohje%20paneeliasennuksen%20tarkastukseen%20-%20lumikuorma.pdf)

Peat Hazards and Mitigation Measures when Constructing Foundations. 2023. Speedeck. Verkkosivu. Viitattu 6.5.2024.

<https://speedeck.uk/news/geotechnics/peat-hazards-and-mitigation-measures-when-constructing-foundations/>

Suot. n.d. Luonnontila. Verkkosivu. Viitattu 26.8.2024. <https://luonnontila.fi/indikaattorit-elinymparistoittain/suot/>

Unrivalled Wind Resistance. n.d. Ideematec. Verkkosivu. Viitattu 3.9.2024.

<https://www.ideematec.com/advanced-solutions/unrivalled-wind-resistance>

Weckend, S., Andreas, W. & Heath, G. 2016. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. E-kirja. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency IRENA.

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0135B1P4/end-life-management-solar/>

## LIITTEET

## Liite 1. Mittauspöytäkirja

1(7)

Pile #		2.1		2.2		2.3		2.4		2.5		2.6	
Bar	kN	Horizontal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Hori- zontal	Vertical	Hori- zontal	Vertical
		Movement	Movement	Move- ment	Movement	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Movement	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10,00	0,94	0,00	0,10	0,00	0,00	1,00	0,00	0,95	0,10	0,50	0,00	0,00	
20,00	1,88	1,00	0,37	0,65	0,25	3,40	0,15	3,70	0,20	3,60	0,25	6,30	
30,00	2,83	4,40	1,40	3,27	0,55	7,15	0,20	8,90	1,00	6,30	0,60	17,00	
40,00	3,77	9,00	4,83	6,20	0,96	11,80	8,00	15,40	3,85	11,50	2,40	27,00	
50,00	4,71	15,30	started moving	9,48	1,60	17,30	started moving	23,20	9,60	17,00	2,65	34,00	
60,00	5,65	25,20		15,60	3,00	25,90		27,65	started moving	17,50	18,90	59,00	
70,00	6,60												
0,00	0,00	9,30	withstood	3,20	withstood	7,50	withstood	11,60	withstood	3,60	withstood	21,00	

(jatkuu)

2 (7)

Pile #		4.1 (With 1100mm side plate Installed)		4.2		4.3		4.4		4.5		4.6	
Bar	kN	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
		Movement	Movement	Movement	Movement	Movement	Movement	Movement	Movement	Movement	Movement	Movement	Movement
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	0,94	0,35	0,12	0,18	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,06	0,17	0,00	0,00
20	1,88	1,25	0,58	1,78	0,16	1,65	0,18	1,85	0,00	1,50	0,37	1,65	0,00
30	2,83	2,96	1,39	3,82	0,49	2,65	0,35	4,90	0,08	3,70	0,28	4,40	0,09
40	3,77	5,17	3,17	5,64	1,33	5,11	0,65	8,60	0,21	6,60	0,40	8,90	0,09
50	4,71	8,05	started moving	7,61	started moving	7,80	3,16	10,90	0,38	9,85		17,10	0,50
60	5,65	8,81		9,85		11,20	started moving	14,67	0,62	13,72	0,53	39,70	10,00
70	6,60	8,81		12,85		13,20		19,50	3,44	16,95	started moving		started moving
0	0,00	4,00	withstood	1,30	withstood	1,35	withstood	2,85	withstood	2,40	withstood	16,50	withstood

3 (7)

Pile #	kN	5.1 (With 750mm side plate Installed)		5.2		5.3		5.4		5.5		5.6	
		Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal
Bar		Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10,00	0,94	0,57	0,16	1,98	0,29	2,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	0,34
20,00	1,88	2,00	0,39	4,45	0,47	5,10	0,24	3,80	0,13	2,40	0,00	2,53	0,82
30,00	2,83	3,45	1,10	6,95	0,80	8,20	0,46	7,30	0,20	5,50	0,01	4,05	1,45
40,00	3,77	5,07	1,50	8,35	1,25	12,20	1,30	11,29	0,50	8,58	0,38	5,87	2,20
50,00	4,71	6,45	1,62	8,50	4,40	16,30	2,80	15,40	1,00	12,00	0,92	8,26	2,91
60,00	5,65	9,00	2,20	8,50	5,91	21,00	2,90	20,99	2,30	15,93	1,95	19,35	4,24
70,00	6,60	11,45		8,61		27,03		27,20		24,76	3,30	18,81	started mo- ving
0,00	0,00	1,00	withstood	0,55	withstood	3,80	withstood	0,70	withstood	1,00	withstood	2,15	withstood

4 (7)

Pile #		7.1		7.2 (With 1100mm side plate Installed)		7.3		7.4 (With 1100mm side plate Installed)	
Bar	kN	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical
		Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,60	0,00	0,00
20,00	1,88	2,30	0,00	3,00	0,21	1,60		4,47	0,01
30,00	2,83	2,30	0,23	11,80	0,23	6,75	1,45	15,01	0,13
40,00	3,77	2,35	0,51	21,00	0,23	12,30	1,70	24,75	0,65
50,00	4,71	2,40	0,62	32,00	0,25	14,40	1,86	34,67	
60,00	5,65	2,40	0,86		0,32	18,85	3,06		1,25
70,00	6,60	3,90	1,27		0,44	23,40	3,31		
0,00	0,00	2,00	withstood	18,00	withstood	5,50	withstood	18,01	withstood

5 (7)

Pile #		8.1 (1100mm siipi-levy)		8.2		8.3		8.4		8.5		8.6	
Bar	kN	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal
		Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	0,94	1,00	0,00	1,67	0,00	2,95	0,00	2,50	0,24	1,52	0,00	1,65	0,07
20	1,88	9,00	0,12	3,90	0,00	9,03	0,28	5,40	0,65	4,10	0,24	3,58	0,13
30	2,83	14,87	0,27	6,28	0,02	11,86	1,05	10,00	1,40	7,00	0,28	5,80	0,16
40	3,77	20,70	0,50	11,20	0,04	15,45	2,35	10,60	2,20	10,32	0,69	8,05	0,23
50	4,71	30,00	0,95	15,20	0,07	20,40	3,36	13,30	3,8,	14,20	1,28	10,46	0,40
60	5,65	38,27	1,75	19,29	0,20	26,10	6,90	16,75	14,33	18,62	1,98	13,22	0,77
70	6,60		3,25	24,90	0,70	29,80	13,40	21,30	15,35	24,00	1,98	16,30	5,27
0	0,00	5,34	withstood	1,30	withstood	3,50	withstood	2,30	withstood	3,12	withstood	0,68	withstood

6 (7)

Pile #		10.1		10.2		10.3		10.4		10.5		10.6	
Bar	kN	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal	Horizon- tal	Verti- cal
		Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Movement	Move- ment	Movement	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	0,94	2,30	0,00	0,00	0,00	0,53	0,00	3,54	0,00	0,00	0,41	0,00	0,14
20	1,88	3,29	0,14	2,45	0,22	2,85	0,18	11,87	1,05	4,25	1,85	3,01	0,48
30	2,83	6,75	0,65	5,62	0,52	4,00	0,92	20,07	6,16	10,82	4,40	6,39	0,56
40	3,77	11,16	1,40	12,40	0,86	12,20	1,75	29,42	started mo- ving	18,80	9,32	9,95	0,96
50	4,71	16,90	2,60	13,76	1,12	19,42	4,30	40,48		28,70		14,35	2,29
60	5,65	22,15	6,55	19,25	5,80	26,10	started mo- ving			43,01		18,35	3,46
70	6,60	26,60		25,80		28,25						23,70	
0	0,00	5,80	withstood	4,65	withstood	11,69	withstood	10,50	withstood	16,50	withstood	1,20	withstood

7 (7)

Pile #		12.1		12.2		12.3		12.4		12.5		12.6	
Bar	kN	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical	Horizon- tal	Vertical
		Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment	Move- ment
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10,00	0,94	0,00	0,00	5,50	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
20,00	1,88	1,40	0,50	10,20	0,00	6,20	0,00	2,00	0,00	3,30	0,00	2,70	0
30,00	2,83	3,17	1,00	12,00	0,10	9,00	0,50	4,60	0,00	8,20	0,00	4,50	0
40,00	3,77	5,60	1,50	15,30	0,70	11,70	1,00	8,00	1,00	11,80	0,80	9,60	0
50,00	4,71	9,00	2,00	20,00	8,70	15,40	1,50	14,10	4	21,30	1,50	13,00	0
60,00	5,65	12,50	4,00	23,40	8,70	19,80	3,00	14,90	4	25,50	2,80	17,10	0
70,00	6,60	17,00		29,50	9,20	26,00		19,20	4,50	30,30	4,50	22,50	1
0,00	0,00	2,00	withstood	10,10	withstood	6,20	withstood	4,50	withstood	24,30	withstood	18,30	withstood