

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

NYMTES13

2019

Miikka Frantti

AURINKOPANEELIEN LAATUTESTAUS

– Staattinen mekaaninen kuormitustestaus

Miikka Frantti

AURINKOSÄHKÖPANEELIEN LAATUTESTAUS

- Staattinen mekaaninen kuormitustestaus

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa aurinkopaneelien lujuustestauksia varten Turun ammattikorkeakoulun käyttöön jäävä testilaitte, sekä suorittaa rakennetulla laitteella koetestaukset.

Laitteen rakentamista ja opinnäytetyön teoriapohjan rakentamista varten perehdyttiin aurinkopaneelien rakenteeseen sekä niiden laatutestauksia käsitteleviin, SFS-EN 61215 -sarjan standardeihin. Työn tuloksena rakennetulla testilaitteella tutkittiin perinteisten, kiteiseen piihin perustuvien aurinkopaneelien kuormankestävyyttä. Laitteella luodaan aurinkopaneelin päälle tasaista mekaanista kuormaa paneelin valmistajien ilmoittamien tietojen ja relevantin standardin määritelmien mukaisesti.

Testilaitteen suunnittelua varten tutkittiin SFS-EN 61215 -sarjan standardeja testausvoimien ja -prosessin määrittämiseksi. Suunnitteluosuus sisälsi laitteen kehikon ja erilaisten kiinnityskomponenttien 3D-mallintamisen, pneumatiikka- ja alipainejärjestelmien suunnittelun, sekä itse testausjärjestelyiden ja tulosten mittausmahdollisuuksien määrittelyn. Rakennusvaiheessa suunnitelmia lähdettiin toteuttamaan ja niitä muokattiin aina tarpeen mukaan.

Työn tuloksena syntyi aurinkopaneelien testauslaitte, jolla saatiin suoritettua aiotut testaukset ongelmitta, vaikka laitteeseen jäikin vielä huomattavasti kehittämistä. Laitteella suoritetuista testauksista saatiin mitattua kunkin paneelin osalta laitteen järjestelmäpaine ja sitä kautta testausvoima, paneelin taipuma keskeltä, sekä paneelin läpi kulkenut jännite. Testatuille paneeleille suoritettiin ennen ja jälkeen testien elektroluminesenssikuvaukset, sekä virran ja jännitteen mittaus, ja sähköisen turvallisuuden testaus. Odotetusti lähes kaikkien testattujen paneelien maksimiteho heikkeni kuormitustestien tuloksena. Vaikka elektroluminesenssikuvien perusteella monesta paneelistä oli merkittävä määrä piikennoja pirstaloitunut, niiden välittömät tehon heikkenemät eivät olleet kovin suuria. Merkittävänä tuloksena oli, että kaikkien paneelien sähköinen turvallisuus säilytettiin, eikä riskiä sähköiskuista olisi testatuilla paneeleilla ollut.

ASIASANAT:

Aurinkopaneeli, aurinkoenergia, laatutestaus, elektroluminesenssikuvaukset

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy and Environmental Engineering

2019 | Total number of pages 78 + 17

Miikka Frantti

QUALITY TESTING OF PHOTOVOLTAIC PANELS

- Static Mechanical Load Testing

The purpose of this thesis was to design and build a device to test the static mechanical load bearing abilities of photovoltaic (PV) panels and to perform the first experiments with it. After the thesis was finished the device was meant to stay in the possession of Turku University of Applied Sciences.

To build the device and to construct a comprehensive theory base for the thesis, it was necessary to study the structure of PV modules as well as the relevant standards in SFS-EN 61215 and SFS-EN 61730 series focusing on the quality, testing and safety of PV modules. The purpose of the testing device was to be able to do research on the load bearing abilities of traditional crystalline silicon based solar photovoltaic panels. With the device, relatively uniform mechanical loads are placed on PV modules according to manufacturers' design loads and relevant regulations in the standards.

Relevant parts of the SFS-EN 61215 standards series were studied as a part of the design process of the device to define proper testing loads and other factors related to the testing process. The design process of the device included the 3D designing of the frame, its' brackets and other parts as well as figuring out the configurations of the pneumatic and vacuum systems. The testing process, variables to be measured and the means of measurement were also contemplated. In the building phase of the thesis, all the designs were implemented, and modifications were made when necessary.

The result of this thesis was a photovoltaic module load testing device with which the planned experiments succeeded without problems even though there were some aspects of the device still in need of further development. Three variables were measured from all the PV modules tested with the device: displacement of the modules at the center, voltage going through the modules and the system pressure of the device with which the testing forces could be calculated. All the tested modules also went through an electroluminescence imaging, *I-V*-curve measurement and an electrical safety test before and after the load tests. As was expected, almost all the panels showed signs of reduced peak power after the load tests. However, the immediate power output drops of the modules seemed relatively small compared to the amount of cracked and broken cells that were seen in the EL images. As another positive result of the tests, all the panels passed the criterion of electrical safety so there was no danger of shock or personal injuries had the modules been put to real use after the tests.

KEYWORDS:

Photovoltaic modules, solar energy, quality testing, electroluminescence imaging.

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Testaamisen ja laadunvalvonnan merkitys aurinkopaneelien tuotannossa	9
1.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja kulku	10
2 KITEISEEN PIIHIN PERUSTUVAT AURINKOPANEELIT	11
2.1 Rakenne	12
2.1.1 Kehys	12
2.1.2 Lasi	13
2.1.3 Kapselointiaine	14
2.1.4 Piikennomatriisi	15
2.1.5 Takakalvo	17
2.1.6 Jakorasia	18
2.2 c-Si -paneelin valmistusprosessi	18
3 AURINKOSÄHKÖPANEELIEN TESTAUS JA NIIHIN LIITTYVÄT MÄÄRÄYKSET	21
3.1 Aurinkosähköpaneelien testaus	21
3.2 Sertifiointi	22
3.3 Aurinkopaneelien testauksiin liittyvät standardit	22
3.3.1 SFS-EN 61730 -standardisarja	23
3.3.2 SFS-EN 61215 -standardisarja	24
3.4 SFS-EN 61215-standardin testausprosessi	25
3.4.1 Testaussarja E	28
3.4.2 Staattisen mekaanisen kuorman kestävyys (MQT 16)	33
3.5 Muita paneeleille suoritettavia testejä	36
4 TESTAUSLAITE JA SEN RAKENTAMINEN	37
4.1 Testausmetodin määrittäminen	37
4.2 Laitteen rungon suunnittelu ja rakentaminen	40
4.3 Paineilmajärjestelmän suunnittelu	41
4.3.1 Tarvittavien voimien laskenta	42
4.3.2 Sylinterien voimat ja mitoitus	43
4.3.3 Järjestelmäpaineiden määrittäminen	44

4.4 Alipainejärjestelmän suunnittelu	45
4.5 Laitteen rakentaminen	48
4.6 Testien aikaiset mittaukset	51
5 PANEELITESTAUKSET	54
5.1 Testiasetelma	55
5.2 Testaukset ja niiden tulokset	57
5.2.1 Kiinnitystapa 1	58
5.2.2 Kiinnitystapa 2	60
5.2.3 Kiinnitystapa 3	63
5.3 Jatkotestit	65
5.3.1 EL-kuvaus	66
5.3.2 Muut tulokset	68
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	71
6.1 Työn tulos	71
6.2 Kehitysehdotukset ja testien epävarmuustekijät	72
6.2.1 Testilaitteen kehityskohteita	72
6.2.2 Testausprosessin kehityskohteita	73
6.3 Työn arviointi	74
LÄHTEET	75

LIITTEET

- Liite 1. Testauslaitteen kehikon ja sen liitospalkkeiden piirustukset
- Liite 2. Paineilmajärjestelmän kiinnikkeiden ja osien piirustukset
- Liite 3. Yli- ja alipainepuolen paineilmakaaviot
- Liite 4. Testilaitteen sähkökaavio
- Liite 5. Testitulokset

KAAVAT

Kaava 1. Paneelin tehon stabiloituminen. (SFS-EN 61215-2:2017, s.44)	30
Kaava 2. Testikuorman laskeminen. (SFS-EN 61215-2:2017, s.37)	33
Kaava 3. Imukuppien teoreettisen pitovoiman laskeminen. (J. Schmalz GmbH 2019)	46

KUVAT

Kuva 1. c-Si aurinkopaneelin osat eroteltuina. (DuPont 2018)	12
Kuva 2. Taipuneita aurinkopaneelien alumiinikehyksiä. (Herfurth & Tost 2010)	13
Kuva 3. EVA-kalvon laminointi on pettänyt paikoitellen, mikä on johtanut ilmataskujen syntymiseen. (Hacke ym. 2016)	15
Kuva 4. Vasemmalla valokuva aurinkopaneelistä ja paljaalla silmällä havaittavista etanan jäljistä. Oikealla samasta paneelistä otettu EL-kuva. Mustat alueet kennoissa eivät tuota sähköä. (Köntges 2014, 68)	16
Kuva 5. Palojälkiä paneelien takakalvossa ja piikennon johtimessa. (Köntges 2014, 87)	17
Kuva 6. Aurinkopaneeleja, joiden takakalvo ei ole kestänyt yli 3000 tuntia kostea/kuuma -olosuhdetestin vaatimissa olosuhteissa. (Gambogi 2010)	18
Kuva 7. Esimerkkejä mahdollisista sertifikaattimerkeistä, joita jotkin alan toimijat voivat myöntää standardien mukaiset testit läpäisseille aurinkopaneeleille. (VDE 2016; TÜV Rheinland 2019; TÜV SÜD America 2019b)	22
Kuva 8. Mekaanisen kuorman kestävyyttä voidaan testata esimerkiksi paineilmatoimisella imukuppijärjestelmällä (vasemmalla), tai perinteisillä hiekkasäkeillä (oikealla). (iTechworld 2016; PSE AG 2018)	34
Kuva 9. Paneelin pinnalle kohdistuva tasainen kuormitus vasemmalla ja sylintereillä tuotettu kuormitus oikealla.	39
Kuva 10. Esimerkkikuva rakennettavasta paineilmatoimisesta testilaitteesta. (PSE AG 2018a)	40
Kuva 11. 3D-malli suunnitellusta kehikosta kiinnikkeineen.	41
Kuva 12. Imukuppien mitoittamisessa käytetty laskentakaava. (J. Schmalz GmbH 2019)	46
Kuva 13. Tyhjiöpumpun mittari ja pumpulla saavutettu suurin alipaine.	47
Kuva 14. Laitteeseen suunniteltuja kiinnikkeitä.	48
Kuva 15. Sylintereiden ripustuksen sarana vasemmalla ja imukupin pallonivel oikealla.	49
Kuva 16. Laitteen käyttötaulun etuosan suunnitelma ja toteutunut asettelu.	49
Kuva 17. Paineilma- ja alipainelinjojen jakotukit sekä 3-tieventtiilit sylinterien tukipalkkien yläpuolella, kiinnitettyinä suunniteltuun kappaleeseen.	50
Kuva 18. Testilaitte tämän työn puitteissa rakennetussa lopullisessa muodossaan.	51
Kuva 19. Mittauksissa käytetty ALMEMO®-tarkkuusmittari.	52
Kuva 20. Testauksissa käytetyt sensorit. Vasemmalta oikealle, painesensori, siirtymäsensori, sekä jännitemittari.	53
Kuva 21. Kolme eri kiinnitystapaa, joilla paneeleja testattiin. Kiinnityspisteet/-alueet punaisella, kehikon tukipalkit vihreällä.	55
Kuva 22. Imukuppien sijoittelu tasaisesti aurinkopaneelin pinnalle.	55
Kuva 23. Kiinnitystapa 1:llä kehikkoon kiinnitetty aurinkopaneeli, veto ylöspäin.	58
Kuva 24. Vasemmalla kehyksen taipuminen testin aikana, oikealla juuri ja juuri havaittavissa oleva kehyksen taipuma testin jälkeen (kulmat keskiosaa ylempänä).	59
Kuva 25. Kiinnitystapa 2:lla kehikkoon kiinnitetty aurinkopaneeli.	61
Kuva 26. Rikkoutunut paneeli, jonka toisella pitkällä sivulla näkyy alumiinikehyksen murtumisesta aiheutunut romahdus.	62
Kuva 27. Kiinnitystapa 3:lla kehikkoon kiinnitetty aurinkopaneeli.	64
Kuva 28. Kiinnitystapa 3:lla kehikkoon kiinnitetyn aurinkopaneelin lasin taipuminen molempiin suuntiin.	64

Kuva 29. Testipaneeli numero 1:n elektroluminesenssikuvien vertailua paneelin oikeasta reunasta. Vasemmalla alkuperäinen kuva ehjästä paneelistä ja oikealla kuormitustestausten jälkeinen tilanne samoissa piikennoissa.	66
Kuva 30. Testipaneeli numero 7:n elektroluminesenssikuvan vertailua painonjakauman tutkimista varten tehtyyn simulaatiokuvaan (vasen).	67

KUVIOT

Kuvio 1. Eri aurinkopaneeliteknologioiden prosenttiosuudet kaikista valmistetuista paneeleista vuosien aikana. (Fraunhofer ISE 2018)	11
Kuvio 2. Standardin mukainen testausprosessi 10 aurinkopaneelille. (SFS-EN 61215-1:2016)	27
Kuvio 3. Paneelin nro. 1 taipuman kehitys ja jännitteen seuranta tasaisessa paineessa tunnin ajan.	60
Kuvio 4. Paneelin nro. 4 taipuman kehitys ja jännitteen seuranta järjestelmäpaineen noustessa, paneelin hajoamispisteeseen asti.	63
Kuvio 5. Paneelin nro. 7 taipuman kehitys ja jännitteen seuranta tasaisessa paineessa tunnin ajan.	65

TAULUKOT

Taulukko 1. SFS-EN 61215-2:2017 -standardin määrittelemät testit.	25
Taulukko 2. Joitakin SFS-EN 61215 -standardisarjan ulkopuolelle jääviä testaustoimenpiteitä.	36
Taulukko 3. Eri kokoisten sylinterien voimat dekaNewtonina määritellyissä paineissa. (Metal Work S.p.A. 2016, 23)	44
Taulukko 4. Valittujen imukuppien nostovoimat tietyillä alipaineilla. (Piab AB 2019)	47
Taulukko 5. Ahlborn FDA 602 L painesensorien mittatarkkuustiedot. (Ahlborn 2018d)	52
Taulukko 6. Suoritettavien testien testaussuunnitelma.	56
Taulukko 7. Suoritetut testit ja niiden onnistuminen.	57
Taulukko 8. Testipaneelien arvoja <i>I-V</i> -käyrän mittauksesta ennen ja jälkeen niille suoritettuja kuormitustestauksia.	69
Taulukko 9. Kunkin testipaneelin tehon alenema watteina ja prosentteina.	70

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Bar	baari, paineen yksikkö
c-Si	Crystalline Silicon, kiteinen pii, aurinkopaneelin kennojen raaka-aine
EL	Elektroluminesenssi
EN	Euroopassa vahvistetun standardin tunnus
EVA	Etyleenivinyylisetaatti, piikennojen kapselointiaine
F.F.	Fill Factor
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälisen sähkötekniikan komission tunnus
I_{MP}	Virta maksimitehopisteessä
I_{SC}	Oikosulkuvirta
MQT	Module Quality Test, aurinkopaneelin laatutesti
NMOT	Nominal Module Operating Temperature, Aurinkopaneelien nominaalinen toimintalämpötila
Pa	Pascal, paineen yksikkö
P_{MP}	Maksimiteho
PV	Photovoltaic, Valosähköinen ilmiö
SFS	Suomessa vahvistetun standardin tunnus
STC	Standard Test Conditions, standarditestaolosuhteet
V_{OC}	Avoimen piirin jännite
V_{MP}	Jännite maksimitehopisteessä

1 JOHDANTO

Aurinkoenergiamarkkinat kukoistavat ja paneelien hinnat jatkavat edelleen laskuaan kasvavan kilpailun ja valmistusteknologian kehittymisen myötä. Vuonna 2019 maailmanlaajuisesti asennettavien aurinkopaneelijärjestelmien tehon määräksi on ennustettu hieman yli 120 GW:n, ja määrän odotetaan vain kasvavan seuraavina vuosina. Kiina on edelleen johtavassa asemassa aurinkosähkön asentamisessa, mutta yhä useampi maa saavuttaa 1 GW:n rajapyykin lähivuosina. Ennusteiden mukaan seuraavan viiden vuoden aikana vuotuinen globaalisti asennettujen järjestelmien teho saavuttaa jo 200 GW:n rajan. (Beetz 2018; Bellini 2019)

1.1 Testaamisen ja laadunvalvonnan merkitys aurinkopaneelien tuotannossa

Hintojen laskun myötä kasvanut kysyntä on aiheuttanut paineita aurinkopaneelien valmistukseen ja vastavuoroisesti kasvava tarjonta on johtanut hintojen laskuun. Kuitenkin, kun tuotantomäärät ratkaisevat, on helppoa sortua hakemaan säästöjä karsimalla valmistuskustannuksista. Halvemmat materiaalit, valmistusprosessin nopeutuminen ja testauskriteerien laskeminen, tai peräti laadunvarmistuksen puuttuminen kokonaan, johtavat vääjäämättä ladullisesti huonompiin tuotteisiin. (Woody 2013)

Tätä varten on olemassa kansainvälisiä standardeja, jotka määrittelevät esimerkiksi aurinkopaneeleille kriteerejä niiden valmistukseen ja laadunvarmistukseen. Laadunvarmistuksen kannalta on ehdottoman tärkeää, että valmiita paneeleja testataan valmistajien, ja parhaimmassa tapauksessa puolueettomien testilaboratorioiden toimesta. Testilaboratorioiden antamat sertifikaattimerkinnot tuovat lisäarvoa sekä paneelien valmistajille että niiden jälleenmyyjille. Paneelinvalmistajat puolestaan saavat sertifikaateilla tuotteelleen kilpailuetua ja pääsevät mukaan markkinoille, joille niiden tuotteella ei ilman laatu-merkintää olisi ollut asiaa. (Kelly-Detwiler 2013; TÜV Rheinland 2019)

Aurinkopaneelit altistuvat jatkuvasti erilaisille ulkoisille dynaamisille ja staattisille voimille, jotka määrittelevät paneelien monikerroksisen rakenteen eliniän. Suurimmat mekaaniset voimat, jotka paneeleja koettelevat, ovat tuulen aiheuttama noste ja värähtely, lumimassojen paino sekä tietyissä paikoissa myös raekuurojen iskut. Lisäksi kosteus ja ultravio-

lettisäteily rappeuttavat aurinkopaneelien materiaaleja. Kaikki nämä luonnonilmiöt vaikuttavat suoraan paneelien rakenteen kestävyysasteeseen, ja näin ollen huomattavasti myös sähköntuottoon, etenkin pidemmällä aikavälillä. (Fromm ym. 2014)

Aurinkopaneelien suoritettavilla testeillä pyritään tutkimaan muun muassa paneelien fyysistä kestävyysasteen monenlaisilla rasitustesteillä, jotta saataisiin selville, kuinka hyvin paneelit kestävät edellä mainittuja luonnonolosuhteita. (Lugue & Hegedus 2011, 300)

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja kulku

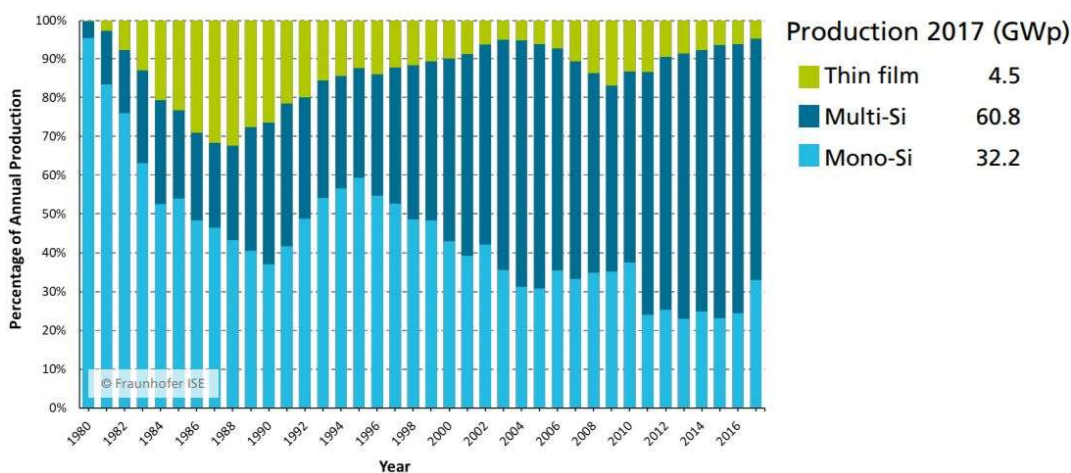
Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa testilaitte aurinkopaneelien staattisen mekaanisen kuorman kestävyysasteen testaamiseksi. Lisäksi tarkoituksena oli selkeyttää paneelien rakenteeseen perehtymällä, miksi aurinkopaneelien testaaminen on tärkeää ja standardien avulla avata miten ja millaisia testejä paneelien suoritusasteeseen. Painopiste työssä oli aurinkopaneelien, joissa käytetään puolijohdemateriaalina kiteistä piitä (c-Si). Työn toiminnallisen osuuden tuloksena rakennettiin testilaitte, jolla suoritettiin asiaankuuluvaa standardia mukailevat testit. Laitteen on määrä jäädä Turun ammattikorkeakoulun opetus- ja tutkimuskäyttöön tämän opinnäytetyön valmistuttua.

Teoriapuolella perehdytään kiteisen piin (c-Si) käyttöön perustuvien aurinkopaneelien eri komponentteihin, jotta saavutettaisiin parempi ymmärrys siitä, mitä aurinkopaneelien tapahtuu, kun niitä testausolosuhteissa altistetaan erilaisille voimille. Paneelien jokaisen pääkomponentin tarkoitus rakenteessa, sekä niiden mahdolliset heikkoudet esitellään lyhyesti ja lisäksi käydään läpi piikennopaneelien valmistusprosessia. Työn toisessa teorianosiossa tarkastellaan, miten aurinkopaneelien kuuluu asianmukaisten standardien perusteella testata. SFS-EN 61730- ja SFS-EN 61215 -standardisarjojen relevantit osat esitellään lyhyesti yleisellä tasolla, minkä jälkeen perehdytään opinnäytetyön toiminnallisen osuuden kannalta oleellisiin osiin SFS-EN 61215 -sarjan standardeissa.

Toiminnallinen osuus opinnäytetyöstä on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäisessä kuvataan testilaitteen suunnittelua, mitoituslaskelmia sekä rakentamisprosessia. Toisessa osuudessa pääosassa ovat laitteella suoritettavat testit sekä testien vaikutusten arviointi jatkotutkimusten avulla. Opinnäytetyö päättyy yhteenvetoon, jossa laitteen rakentamista ja sillä suoritettujen testien luotettavuutta arvioidaan, esitetään parannusehdotuksia laitteeseen ja testausprosessiin sekä pohditaan opinnäytetyön onnistumista yleisesti.

2 KITEISEEN PIIHIN PERUSTUVAT AURINKOPANEELIT

Aurinkovoimasta on hyvää vauhtia tulossa maailman halvin energian lähde. (Pothecary 2017) Vaikka tarjolle on vuosien aikana tullut eri teknologioita hyödyntäviä aurinkosähköpaneeleja, markkinoita dominoivat edelleen paneelit, joiden puolijohdemateriaalina on käytetty kiteistä piitä (c-Si), kuten kuviossa 1 on havainnollistettu. (Fraunhofer ISE 2018) Yksi- tai monikiteisestä piistä valmistettuja ohuita kennoja on käytetty aurinkosähköpaneeleissa jo vuosikymmeniä piin hyvien ominaisuuksien ja erinomaisen saatavuuden takia. Ennusteiden mukaan c-Si -paneelit tulevat myös jatkamaan johtoasemaansa aurinkopaneelimarkkinoilla vielä vuosia. (Green 2005; Lin 2018)



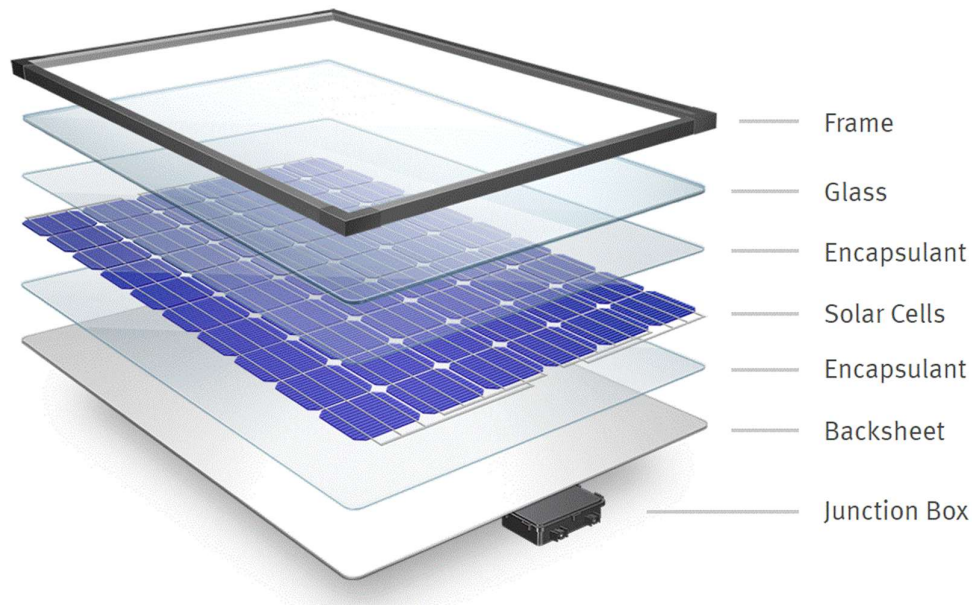
Kuvio 1. Eri aurinkopaneeliteknologioiden prosenttiosuudet kaikista valmistetuista paneeleista vuosien aikana. (Fraunhofer ISE 2018)

Viime vuosikymmenten aikana piikennoja sähköntuotantoon käyttävät aurinkopaneelit ovat kehittyneet valtavasti. Paneelit ovat monin verroin tehokkaampia ja niissä käytettävät piikennot huomattavasti ohuempia kuin aiemmin. (Cunow 2017) Piikennopohjaisten aurinkopaneelien odotetaan toimivan ulkona säiden armoilla yli 25 vuotta. Näin ollen niiden rakenteen tulee olla tarpeeksi tukeva kestääkseen lumen ja tuulen vaikutuksesta syntyvän mekaanisen kuormituksen sekä mahdollisten raekuurojen tai muiden tekijöiden aiheuttamat iskut. Lisäksi, paneelien toimivuuden takaamiseksi, niiden tulee olla täysin vedenpitäviä sateiden ja ilmankosteuden varalta sekä sähköisesti eristettyjä onnettomuuksien välttämiseksi. (Chudnovsky 2017, 357)

2.1 Rakenne

Yksi- ja monikiteisestä piistä valmistetut aurinkosähkökennot ovat vuosikymmenien aikana tehostuneet huomattavasti. Kennonvalmistustekniikan kehittyessä ja kustannusten optimoinnin vuoksi piikennot ovat ohentuneet, mutta vaativat huomattavasti tukimateriaalia ympärilleen, jotta niitä voidaan järkevästi hyödyntää energian tuotannossa. (Green 2005)

Aurinkopaneelien perusrakenne on pysynyt muuttumattomana jo pitkään. Alla olevassa kuvassa 1 on havainnollistettu erinomaisesti tavallisen piikennopaneelin eri kerrokset. Kaikessa yksinkertaisuudessaan, aurinkopaneeli koostuu kuvassa sinisenä olevasta piikennomatriisista, jonka molemmiin puolin on kapselointiainekalvot. Tämän polymeerikalvoon suljetun kennomatriisin alapuolella on kerros komposiittimuovia, jonka taakse on kiinnitetty jakorasia johtoineen. Uloin kerros on karkaistua lasia ja kokonaisuus kehystetään alumiiniprofiililla. (Lugue & Hegedus 2011, 296; DuPont 2018)



Kuva 1. c-Si aurinkopaneelin osat eroteltuina. (DuPont 2018)

2.1.1 Kehys

Aurinkopaneelien kehykset on useimmiten valmistettu anodisoidusta alumiinista. Kehyksen tarkoituksena on tuoda aurinkopaneelin rakenteeseen jäykkyyttä, ja pitää paneelin

kaikki kerrokset paikoillaan. Lisäksi alumiinikehys, ja etenkin sen kiinnityksessä käytetty massa, toimivat tiivisteinä, jotta eri kerrosten väliin ei pääse missään tilanteessa kosteutta. Kehyksellä varustettujen aurinkopaneelien asennus tapahtuu myös aina kiinnittämällä paneeli kehuksestaan erilliseen tukirakenteeseen. (Herfurth & Tost 2010; Luggage & Hegedus 2011, 299; Vanek ym. 2017) Nykyään markkinoilla on myös kehuksettomia paneeleja, joissa on piikennot ovat kahden lasikerroksen välissä.



Kuva 2. Taipuneita aurinkopaneelien alumiinikehyksiä. (Herfurth & Tost 2010)

Alumiinisen kehysten suurin heikkous on sen suhteellisen helppo taipuminen. Erityisesti runsaslumisilla alueilla on riskinä, että aurinkopaneelien päälle kertyy liian suuria kuormia liian pitkäksi ajaksi. Paneelien kallistuksen takia lumi kerääntyy aurinkopaneelien alareunaan ja aiheuttaa alueelle moninkertaisen painolastin verrattuna paneelin muihin osiin. Kun lumi hieman sulaa ja jäätyy uudelleen, se rasittaa kehystä ja pahimmassa tapauksessa vääntää kehysten irti lasista, kuten kuvassa 2 on tapahtunut. Useiden aurinkopaneelien alumiiniprofiilikehykset on pursotettu siten, että profiilin sisällä on suljettu, tyhjä putki. Mikäli putken sisään pääsee kosteutta, se voi jäätyessään rikkoa kehysten ja lisäksi aiheuttaa vahinkoa paneelin muille osille. (Pearsall 2017, 88; Vanek ym. 2017)

2.1.2 Lasi

Kehyksen lisäksi aurinkopaneelien rakennetta jäykistävänä ja piikennoja suojaavana tekijänä toimii muutamien millimetrien paksuinen karkaistua lasi. Lasin tulee olla karkaistua iskunkestävyyden parantamiseksi sekä turvallisuussyistä jos paneeli hajoaa. Haluttuja

ominaisuuksia ovat lisäksi hyvä valon läpäisevyys, jotta energiantuotantoon tarvittava valosäteily ei heijastu pois (Lugue & Hegedus 2011), ja UV-suojaus, sillä ultraviolettisäteily aiheuttaa paneelin muiden osien rappeutumista. (Hsieh ym. 2017)

Aurinkopaneelin lasi ottaa vastaan suuren osan paneeliin kohdistuvasta rasituksesta, oli kyse sitten tuulen aiheuttamasta dynaamisesta kuormasta, lumen staattisesta painosta tai valmistus- ja asennusvaiheessa tapahtuvasta rasituksesta. (Dietrich ym. 2011; Pear-sall 2017, 87)

2.1.3 Kapselointiaine

Kapselointiaineella luodaan piikennostolle ilmatiivis kuori, jonka tehtävänä on sitoa kennot ja johtimet yhtenäiseksi matoksi, sekä toimia suojana kosteudelta ja lialta. Kapselointiin käytettyjä aineita on muutamia, joista yleisimmin paneelinvalmistuksessa on käytössä etyleenivinyyliaasettaatti (EVA). (Chudnovsky 2017, 367)

EVA:sta valmistettu ohut kalvo on termoplastisten ominaisuuksiensa vuoksi ideaalinen kapselointiaine aurinkopaneeleissa. Se suojaa piikkenoja, sitoo ne paikoilleen ja parantaa mekaanisen kuorman kestävyyttä mahdollistamalla hieman lisää taipumista. Vaikka EVA-kalvoon on yleensä lisätty suoja-aineita ultraviolettisäteilyä vastaan, on se silti altis UV-säteilyn vaikutuksille. Kuten monet muutkin muovit, EVA saattaa hiljalleen hapertua ja kellertyä UV-säteilyn vaikutuksesta. Heikentynyt kalvo ei ole enää niin elastinen eli sen kyky ottaa vastaan mekaanisen kuorman rasitusta heikentyy. (Lugue & Hegedus 2011, 299; Fromm ym. 2014; Hsieh ym. 2017)

Sääolosuhteilla on myös mainittava merkitys EVA-kalvon kestävyudessa. Standardin mukaiset testit tehdään poikkeuksetta noin 25 °C lämpötilassa, kun taas todellisuudessa paneelit voidaan asentaa paikkaan, jossa lämpötila saattaa laskea kymmeniä asteita pakkaselle. Termoplastisena materiaalina etyleenivinyyliaasettaatti reagoi alhaiseen lämpötilaan jäykistymällä, jolloin sen kimmokertoimen kasvaminen vaikuttaa suoraan piikkenojen kestävyteen. (Mickiewicz ym. 2011; Mülhofer ym. 2013) Sähkövirran ja ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta EVA-kalvon laminointi saattaa huonoimmassa tapauksessa pettää paikoitellen, jolloin kalvon ja piikkenojen väliin syntyy ilmataskuja, kuten kuvassa 3 on havainnoitu. Syntyneisiin ilmataskuihin voi päästä kerääntymän kosteutta, mikä aiheuttaa kennojen johtimissa korroosiota ja näin ollen kennojen sekä koko paneelin tehon heikkenemistä. (Hacke ym. 2016)



Kuva 3. EVA-kalvon laminointi on pettänyt paikoitellen, mikä on johtanut ilmataskujen syntymiseen. (Hacke ym. 2016)

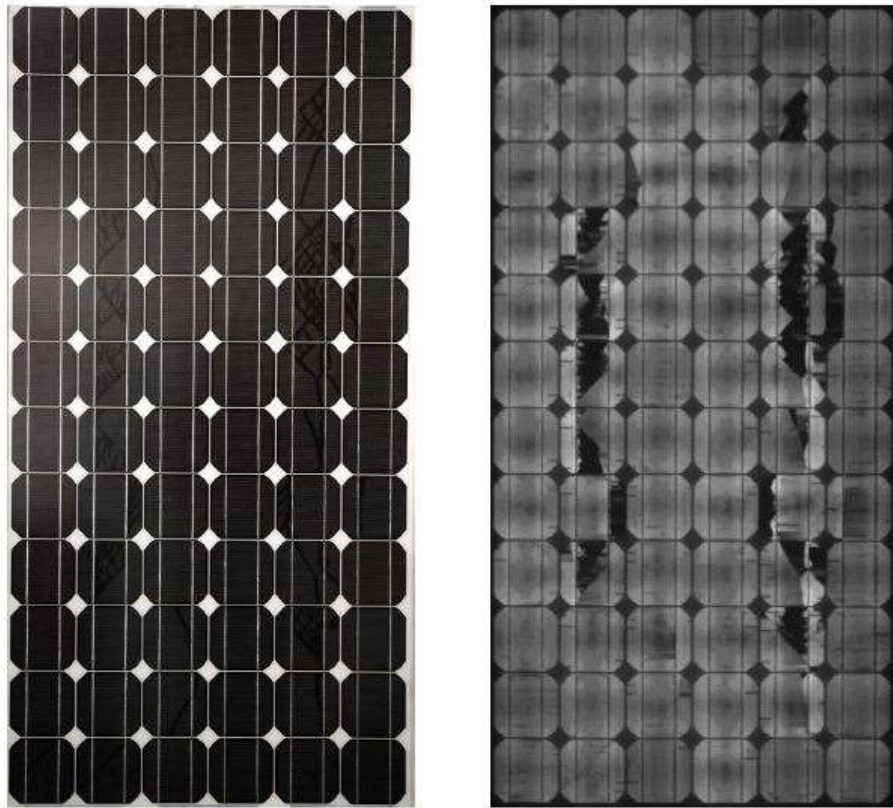
2.1.4 Piikennematriisi

Aurinkopaneelien keskiössä, sähköä tuottavana elementtinä, toimii piikkennoista ja kuparijohtimista rakennettu matto. Nämä paneelin tärkeimmät osat ovat myös kaikkein haavoittuimpia ja vahinkoalttiita. Kaikki muut osat ja materiaalit ovat tarkoitettu nimenomaan suojaamaan piikkennoja ja eristämään ne ulkoisilta tekijöiltä sekä sähköisesti, jotta paneelien toimivuus ja turvallisuus olisi taattu. (Köntges ym. 2011)

Piikennot ovat hyvin ohuita, joten ne halkeilevat erittäin helposti. Jo aurinkopaneelien valmistusprosessissa osa piikkennoista pirstoutuu ja halkeilee käyttökelvottomiksi. Vioittuneet kennot ja paneelit pyritään karsimaan pois valmistuksen aikana, mutta lopputuotteiden joukossa saattaa silti olla paneeleja, joissa on mikrohalkeamia sisältäviä piikkennoja. Halkeamia saattaa syntyä myös valmistuksen jälkeen pakkauksen, kuljetuksen ja asentamisen aikana. Ajan myötä nämä halkeamat voivat luonnonolosuhteiden vaikutuksesta kasvaa suuremmiksi, jolloin kennojen ja paneelin teho laskee. (Köntges 2014, 67)

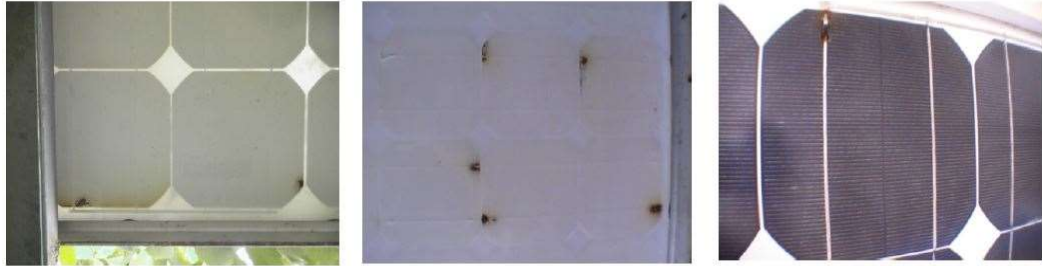
Asennetuissa aurinkopaneeleissa mahdolliset halkeamat voidaan ajan myötä havaita paljain silmin niin kutsutuista etanan jäljistä (engl. "snail trail"). Lämpötilavaihtelut ja muut ympäristötekijät vaikuttavat näiden etanan jälkien ilmestymiseen. Ne ovat piikennon johtimissa ja EVA-kalvossa ilmeneviä värimuutoksia, jotka useimmiten myötäilevät kennoissa olevia, silmälle muutoin näkymättömiä halkeamia. Nopeasti katsottuna jäljet muistuttavat etanoiden jättämiä limavanoja paneelin lasissa. Kuvassa 4 on esitetty paneeli, jossa etananjäljet ovat selkeästi nähtävissä. Kuvassa oikealla samasta paneelistä on otettu elektroluminesenssikuva, josta näkyy, kuinka etananjälkien kohdilta piikennot ovat

haljenneet ja kuvassa mustalla näkyvät osat ovat irronneet paneelin virtapiiristä. (Köntges 2014, 67-68)



Kuva 4. Vasemmalla valokuva aurinkopaneelista ja paljaalla silmällä havaittavista etanan jäljistä. Oikealla samasta paneelista otettu EL-kuva. Mustat alueet kennoissa eivät tuota sähköä. (Köntges 2014, 68)

Piikkennoissa ja niiden johtimissa saattaa joskus ilmetä palojälkiä, kuten kuvassa 5. Ne johtuvat yleensä niin kutsutuista "hot-spoteista", eli juotossaumojen ja johtimien rikkoutumisesta tai pettämisestä. Tällöin kyseisiin osiin kehittyy oikosulku, ne kuumenevat ja syntyy palojälkiä. Äärimmäisissä tapauksissa oikosulkukohdista voi syttyä tulipalo. (Köntges 2014, 71)



Kuva 5. Palojälkiä paneelien takakalvossa ja piikennon johtimessa. (Köntges 2014, 87)

2.1.5 Takakalvo

Aurinkopaneelien takakalvo peittää paneelin takaosan kauttaaltaan. Sen tehtävänä on toimia sähköeristeenä, sekä esteenä kosteutta ja korroosiota vastaan. (Lugue & Hege-dus 2011, 299)

Takakalvo rakentuu tyypillisesti kolmesta eri kerroksesta, joilla jokaisella on oma funkti-
onsa. Kapselointikalvon kanssa kontaktiin laitetun kerroksen odotetaan olevan yhteen-
sopiva sen kanssa sekä kemiallisesti että tarttumisominaisuuksiltaan. Lisäksi takakalvon
täytyy kestää lasin ja kapselointimateriaalin läpi tulevaa suoraa auringon valoa. Kalvon
keskimmäinen kerros on yleensä paksumpi ja sen tarkoituksena on tuoda mekaanista
suojaa sekä sähköneristävyttä paneelin takaosaan. Ulommainen kerros puolestaan
suojaa muita kahta kerrosta ympäristön vaikutuksilta, kuten epäsuoralta UV-säteilyltä ja
kosteudelta. (Gambogi 2010; Hsieh ym. 2017)

Ultravioletisäteilyn lisäksi rajut vaihtelut lämpötilassa ja ilmankosteudessa rasittavat huomattavasti paneelin takakalvoa. Jos paneelissa käytetyn kalvon materiaali ei ole ollut riittävän kestävä, saattaa esimerkiksi laatutestausten jälkeen lopputulos näyttää samalta kuin kuvassa 6, jossa kalvo on hapertunut ja alkanut kuoriutua pois. (Gambogi 2010)



Kuva 6. Aurinkopaneeleja, joiden takakalvo ei ole kestänyt yli 3000 tuntia kostea/kuuma-olosuhdetestin vaatimissa olosuhteissa. (Gambogi 2010)

2.1.6 Jakorasia

Aurinkopaneelin takapuolelle on kiinnitetty jakorasia, josta lähtevät paneelin kaapelit. Jakorasian sisällä paneelin kaapelit yhdistyvät piikennostosta takakalvon läpi tuleviin johtimiin, sekä ohitusdiodeihin. Sen tehtävänä on suojata sähköliitoksia sekä ympäristön vaikutuksilta että fyysisiltä iskuilta. (Förster ym. 2010)

Jakorasioissa on muutamia tyypillisesti ilmentyviä vikoja, jotka syntyvät pääasiassa valmistusprosessin aikana. Niistä ilmeisimmät ovat rasian liimauksen ja tiivisteiden pettäminen. Rasia saattaa liikkua paikoiltaan, etenkin vedon vaikutuksesta, jolloin rasian sisällä olevat liitokset joutuvat rasituksen alaisiksi. Tiivisteiden pettäminen tai huonosti suljettu rasian kansi johtaa luonnollisesti kosteuden tunkeutumiseen rasian sisälle, minkä seurauksena on sähköliitosten mahdollinen korroosio. Vaarallisin jakorasiassa ilmenevä vika on sen sisällä syntyvä, huonoista kytkennöistä johtuva valokaari, joka saattaa pahimmassa tapauksessa synnyttää tulipalon. (Köntges 2014, 56)

2.2 c-Si -paneelin valmistusprosessi

Tämän hetken yleisimmät aurinkopaneelit ovat perusrakenteeltaan pysyneet lähes muuttumattomina jo vuosikymmeniä. Tästä johtuen niiden valmistusprosessikaan ei ole

pitkään aikaan muuttunut merkittävästi. Suurin muutos prosessissa on todennäköisesti ollut sen automatisoituminen. (Lugue & Hegedus 2011, 300)

Aurinkopaneelien piikennot ovat yleensä kytketty sarjaan. Piikentöiden pintaan on jo niiden valmistusvaiheessa tehty ohuet johtimet, jotka kuljettavat kennoissa syntyvän sähkövarauksen eteenpäin. Näihin johtimiin kiinni juotetaan tai liimataan poikittain paksummat, tinattua kuparia olevat johdinlangat, jotka kuljettavat virtaa eteenpäin piikennosta toiseen, samalla toimien hauraana kennoja yhdistävänä tekijänä. (Lugue & Hegedus 2011, 297)

Verkkoon kytkettävät aurinkopaneelit ovat nykyään melko standardikokoisia, joten kennot ladotaan ja yhdistetään 10 tai 12 kappaleen riveihin. Rivit puolestaan kiinnitetään päistään vielä johdinlangalla, niin että kennot ovat joko yhdessä tai useammassa sarjassa aurinkopaneelin sisällä. Standardimäärät kennoille ovat tällä hetkellä 60 tai 72 kappaletta paneelia kohden. (Lugue & Hegedus 2011, 297)

Aurinkopaneelin rakenteen luo karkaistu lasi, jonka päälle asetetaan EVA-kalvot, niiden väliin jäävä piikennematriisi sekä lopuksi takakalvo. Nämä osat viedään yhteen valmistusprosessin kriittisimmistä ja aikaa vievimmistä vaiheista, eli laminointiin. Laminointikoneessa eli laminaattorissa on lämmitettävä taso, jonka päälle keskeneräinen paneeli asetetaan. Koneen sisään luodaan tyhjiö, samalla kun paneelirakennetta lämmitetään ja pidetään mekaanisen paineen alaisena. Kun laminaattorin lämpötila saavuttaa noin 120°C lämpötilan, EVA-kalvo sulaa ja leviää ympäröiden piikentöitä täysin. Laminointivaiheessa on tärkeää varmistaa, ettei paneelin niin sanotun voileipä-rakenteen väliin jää ilmataskuja, likaa tai kosteutta. (Lugue & Hegedus 2011, 298–299; Chudnovsky 2017, 367)

Kun paneeli on laminointivaiheen jäljiltä jäähtynyt, ja EVA-kalvo jähmettynyt, ylimääräiset kapselointiaineet leikataan lasin reunoilta pois. Tämän jälkeen kiinnitetään jakorasia paneelin takapuolelle ja kytketään piikennoston johtimet rasiaan diodeihin. Lopuksi kiinnitetään paneelin alumiinikehykset. Kehyksen ja lasin väliin laitetaan silikonipohjaista massaa, joka toimii sekä sidosaineena että joustavana saumana minimoimassa lasin ja alumiinin lämpöliikkeiden vaikutuksia. Alumiinikehyksen kiinnitysvaiheessa tulee myös huomioida, ettei kehyksen ja piikennoston johtimien välillä ole mahdollisuutta minkäänlaisen sähköjohtavuuteen. (Lugue & Hegedus 2011, 298–299)

Lopuksi, kun aurinkopaneelit ovat valmiita, niiden toimivuus tarkastetaan erilaisilla testeillä. Valmistajasta riippuen testejä saattaa olla useampia, mutta yksi yleensä suoritettavista testeistä on I-V -käyrän, eli virta - jännite -käyrän mittaaminen, josta saadaan selville muun muassa paneelin maksimiteho oikosulkuvirran ja avoimen piirin jännitteen avulla. (Lugue & Hegedus 2011, 299–300)

Valmistusprosessi on siis monivaiheinen ja siinä käytetään useita eri komponentteja. Tämä johtaa siihen, että prosessissa on useita kohtia, joissa saattaa syntyä paneelin laatuun ja turvallisuuteen liittyviä virheitä. Optimaalisessa tilanteessa valmistusprosessissa on tarkkaan otettu huomioon SFS-EN 61730- ja SFS-EN 61215 -standardisarjojen vaatimukset paneelien sähköiselle turvallisuudelle, sekä niiden laadulle. (SFS-EN 61215-1:2016; SFS-EN 61215-1:2017; SFS-EN 61730-1:2018; SFS-EN 61730-2:2018)

3 AURINKOSÄHKÖPANEELIEN TESTAUS JA NIIHIN LIITTYVÄT MÄÄRÄYKSET

Menestyäkseen aurinkoenergiasektorilla, paneelivalmistajien ja paneelimyymyjien tulee varmistaa, että heidän tuotteensa täyttävät standardien määrittelemät laatu- ja suorituskykyvaatimukset. Tuotteiden täytyy siis todistettavasti kyetä kestämaan ympäristön niille aiheuttamat rasitteet ja tuottamaan energiaa tasaisesti pahimmissakin ympäristöolosuhteissa tuotekuvausten määrittelemällä luotettavuudella. Paneelien turvallisuudesta ja kestävydestä ei pidä karsia edullisempien valmistuskustannuksien saavuttamiseksi. Lähtökohtaisesti paneelien on tarkoitus pystyä tuottamaan sähköä vuosikausia ilman merkittävää heikkenemistä tuottokapasiteetissa. (TÜV Rheinland 2019a)

3.1 Aurinkosähköpaneelien testaus

Kuten jo aiemmin on todettu, aurinkopaneelit ovat jatkuvasti vaihtelevien luonnonvoimien armoilla, ovat ne sitten asennettuina erilaisten rakennusten katoille, tolppien varaan maahan tai vaikka kelluvilla alustoilla vesialtaiden pinnalle. (Chudnovsky 2017, 357; Bellini 2018) Maapallon ilmasto-olosuhteet vaihtelevat sijainnin mukaan todella paljon. Suhteellinen ilmankosteus voi nousta 95 %:n lämpötilan ollessa 35 °C, ja raekuurojen aikana voi sataa jopa 200 g:n painoisia jääkimpaleita. Vuorokauden aikana lämpötila voi tietyillä alueilla vaihdella 30 °C, kun taas suurimmat mitatut lämpötilavaihtelut vuoden aikana ovat yli 100 °C. (Chudnovsky 2017, 357)

Merten, maatilojen ja esimerkiksi suolattujen teiden lähellä ilman pH-arvo voi nousta jopa yhteentoista, kun taas teollisuuslaitosten ympäristössä se saattaa olla kolme. Mekaanisesti kuormittavien sääilmiöiden, kuten raekuurojen, lumisateiden ja myrskytuulien lisäksi aurinkopaneelien tulee siis sietää äärimmäisiä lämpötilavaihteluja ja ilmankosteuksia sekä hyvin happamia ja emäksisiä olosuhteita. Juuri näiden muuttuvien ja vaihtelevien ympäristöolosuhteiden takia paneeleissa ilmenee aiemmin mainittuja vikoja ja kyseisten vikojen välttämiseksi aurinkopaneelit on rakennettava riittävän kestäviksi. Jotta paneelit valmistuttuaan todistetusti täyttäisivät ympäristöolosuhteiden asettamat vaatimukset, on niitä testattava tarkoitukseen kehitetyillä testausmenetelmillä. (Chudnovsky 2017, 357)

3.2 Sertifiointi

Tuotesertifiointi ja tuotteiden määräystenmukaisuus on monilla eri tuotteiden valmistajilla kaupankäynnin edellytyksenä, etenkin kun kyse on maailmanlaajuisista markkinoista. Pakollisten sertifiointivaatimusten lisäksi, valmistajat voivat myös selvittää, läpäisevätkö heidän tuotteensa joidenkin vapaaehtoisten standardien määrittelemät tekniset vaatimukset. Tällä tavoin yritykset voivat erottautua kilpailijoistaan ja osoittaa kuluttajille sitoutumistaan laadukkaiden ja turvallisten tuotteiden tuottamiseen. (TÜV SÜD America 2019a)

Aurinkopaneelien tuotesertifiointipalveluja saa useammalta eri testilaitokselta ympäri maailman. Näistä tunnetuimpia ovat esimerkiksi TÜV Rheinland, TÜV SÜD ja VDE, joiden sertifikaattimerkintöjä alla olevassa kuvassa on. (de Rooij 2015)



Kuva 7. Esimerkkejä mahdollisista sertifikaattimerkeistä, joita jotkin alan toimijat voivat myöntää standardien mukaiset testit läpäisseille aurinkopaneeleille. (VDE 2016; TÜV Rheinland 2019; TÜV SÜD America 2019b)

3.3 Aurinkopaneelien testauksiin liittyvät standardit

Aurinkopaneelien testaamiselle on määritelty useita erilaisia testaustoimenpiteitä, joista tärkeimmät on sisällytetty standardisarjoihin SFS-EN 61730 (Photovoltaic (PV) module safety qualification), sekä SFS-EN 61215 (Terrestrial photovoltaic (PV) modules. Design qualification and type approval). Sekä SFS-EN 61730 -, että SFS-EN 61215 -sarjat sisältävät suomalaisiksi kansallisiksi SFS-standardeiksi vahvistetut eurooppalaiset EN-standardit, jotka puolestaan perustuvat kansainvälisen sähköalan standardiorganisaation IEC:n (International Electrotechnical Commission) standardeihin. Niissä esitetään, kuten englanninkielisistä nimistä käy ilmi, IEC:n vaatimukset aurinkopaneelien turvallisuudelle 61730-sarjassa, sekä suunnittelulle ja tyyppihyväksynnälle 61215-sarjassa. Standardit on tarkoitettu koskemaan kaikkia pitkäaikaiseen ulkoilmakäyttöön tarkoitettuja

jäykkärakenteisia, sekä kiteisestä piistä valmistettuja, että erilaisiin ohutkalvoteknologi-
oihin perustuvia aurinkopaneeleja. (SFS-EN 61215-1:2016; SFS-EN 61215-1:2017;
SFS-EN 61730-1:2018; SFS-EN 61730-2:2018)

Tässä työssä keskitytään enemmän SFS-EN 61215 -standardisarjaan, sillä työn puit-
teissa suoritettava testi mukaillee pääpiirteittäin SFS-EN 61215-2:2017 -standardissa ku-
vattua ja määritettyä aurinkopaneelin staattisen kuorman kestävyuden testiä.

3.3.1 SFS-EN 61730 -standardisarja

SFS-EN 61730 -sarja koostuu kahdesta osasta, jotka käsittelevät aurinkopaneelien tur-
vallisuutta. Ensimmäinen osa, SFS-EN 61730-1:2018, sisältää turvallisuusvaatimuksia,
jotka tulee ottaa huomioon paneelien rakennusvaiheessa. SFS-EN 61730-2:2018 puo-
lestaan esittelee testit, jotka paneelien pitää läpäistä täyttääkseen turvallisuusvaatimuk-
set. (SFS-EN 61730-1:2018; SFS-EN 61730-2:2018)

Aurinkopaneelien turvallisuusvaatimuksista puhuttaessa tarkoitetaan hyvin pitkälti niiden
sähköistä turvallisuutta, sekä paloturvallisuutta. Paneelien rakennusvaiheessa pitää
luonnollisesti ottaa huomioon kaikki mahdolliset tekijät, jotka saattavat aiheuttaa turvalli-
suusriskin sekä ihmisille, että rakennuksille. SFS-EN 61730-1:2018 keskittyy hyvin pit-
kälti määrittelemään kriteerejä paneelien sähköisille kytkennöille, jännitteisten osien etäi-
syyksille toisistaan, paneelien merkinnöille, sekä sähköluokituksille. Paljon huomiota
kiinnitetään paneelien sähköneristykseen. Standardisarjan ensimmäisen osan vaatimus-
ten tavoitteena on, että niitä seuraavien valmistajien paneelit eivät ole riskialttiita tuotta-
maan sähköiskuja, tai esimerkiksi sähköisen vian takia syttymään tuleen. (SFS-EN
61730-1:2018)

Jotta turvallisuusvaatimukset voidaan katsoa täytyneiksi, pitää aurinkopaneeleja luon-
nollisesti testata. SFS-EN 61730-2:2018 määrittelee testaustoimenpiteet, joilla tarkaste-
taan SFS-EN 61730-1:2018 -standardin vaatimusten täytyminen. Testausprosessi ja lä-
päisyvaatimukset ovat suunniteltu havaitsemaan paneeleista potentiaaliset sisäiset ja
ulkoiset viat, jotka saattaisivat aiheuttaa sähköisku- tai tulipalovaaran. SFS-EN 61730-
2:2018 sisältää useita eri testejä, joista monet on lainattu joko suoraan tai soveltaen
muista standardeista. Esimerkiksi suurin osa SFS-EN 61215-2:2017 -standardin tes-

teistä on lainattu turvallisuusstandardin käyttöön. SFS-EN 61730-2 -standardin testaus-toimenpiteet on jaettu viiteen luokkaan, jotka ovat ympäristövaikutukset, yleiset testit, sähköturvallisuus, paloturvallisuus, sekä mekaaninen rasitus. (SFS-EN 61730-2:2018)

Ympäristöolosuhteiden vaikutusta paneelien turvallisuuteen testataan erilaisilla lämpötila-, UV- ja kosteustesteillä. Yleisiin testaus-toimenpiteisiin kuuluu visuaalisen tarkastuksen ja paneelin maksimitehon määrittämisen kaltaisia testejä. Lisäksi mitataan muun muassa eristysten paksuutta ja tutkitaan merkintöjen kulutuskestävyyttä. Sähköturvallisuustestauksissa testataan esimerkiksi liitäntöjen kestävyyttä, paneelin eri osien viiltoherkkyyttä ja paneelin sähköistä eristävyyttä, myös nesteeseen upotettuna. Neljäs kategoria on paloturvallisuustestaukset. Niiden puitteissa testataan muiden muassa paneelien lämpötilan ja hot-spot:ien sietoa, syttymisherkkyyttä, sekä ulkoisista lähteistä paneelihin levinnyttä tulta. Loput SFS-EN 61730-2:2018 testeistä testaavat mekaanisten rasitusten vaikutuksia paneelien turvallisuuteen. Paneeleilla testataan muutamien muun toimenpiteen lisäksi niiden liitosaineiden vedon kestoa eri testeillä, sekä paneelien kuormankestävyyttä. (SFS-EN 61730-2:2018)

3.3.2 SFS-EN 61215 -standardisarja

SFS-EN 61215 -sarjaan kuuluu kaksi pääosaa yleisiä testausvaatimuksia (osa 1) ja testaus-toimenpiteitä (osa 2) varten, sekä neljä alalukua osalle 1, jotka määrittävät erityisvaatimuksia eri puolijohdeteknologioita hyödyntävien aurinkopaneelien testaamiselle. Standardisarjan piiriin eivät kuulu keskitetystä auringonvalosta energiaa tuottavat aurinkopaneelit. Ensimmäinen osa, SFS-EN 61215-1:2016, erittelee yleiset vaatimukset kaikkien aurinkopaneelien testaamiseen. Lisäksi standardi määrittelee paneelin tyyppikilvessä ja datalehdessä kerrottavat tiedot, ja erittelee SFS-EN 61215-2:2017 -standardin osana suoritettavan visuaalisen tarkastuksen kriteerit. (SFS-EN 61215-1:2016, s. 8-10, 13-14.)

Sarjan ensimmäisen osan ensimmäinen alaluku, SFS-EN 61215-1-1:2016, määrittelee erityisvaatimukset nimenomaan kiteistä piitä puolijohdemateriaalina hyödyntäville aurinkopaneeleille. Muutamaa testausparametrin tarkennusta lukuun ottamatta c-Si -aurinkopaneelien testausprosessi voidaan suorittaa SFS-EN 61215-2:2017 -standardissa määriteltyjen ohjeiden mukaisesti. (SFS-EN 61215-1-1:2016)

Standardisarjan toinen pääosa, SFS-EN 61215-2:2017, sisältää tarkan kuvauksen ensimmäisessä osassa mainituista testeistä. Standardi määrittelee yhteensä 19 erilaista aurinkopaneelille suoritettavaa testausmenettelyä, joista käytetään nimitystä MQT (Module Quality Test). Testit on lueteltu alla olevassa taulukossa 1. (SFS-EN 61215-2:2017)

Taulukko 1. SFS-EN 61215-2:2017 -standardin määrittelemät testit.

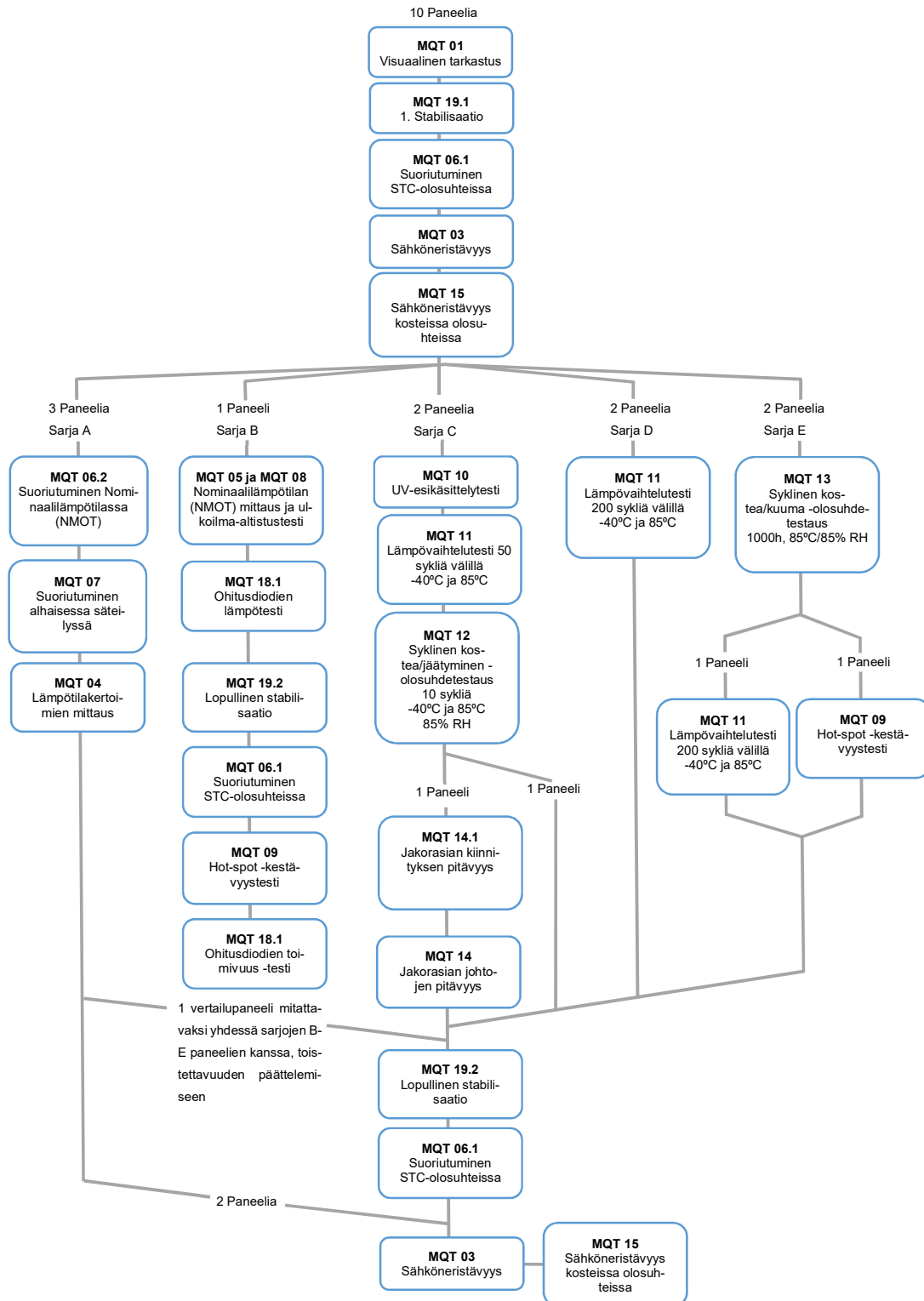
MQT	Testin nimi
01	Visuaalinen tarkastus
02	Maksimitehon määrittely
03	Sähköneristävyyden testaus
04	Lämpötilakertoimien mittaaminen
05	Paneelien nominaalilämpötilan (NMOT) mittaaminen
06	Suoriutuminen STC- (06.1) ja NMOT- (06.2) olosuhteissa
07	Suoriutuminen alhaisessa valosäteilyssä
08	Ulkoilma-altistustesti
09	Hot-spot -kestävyydesti
10	UV-esikäsittelytesti
11	Lämpövaihtelutesti
12	Syklinen kosteus/jäätymisen -olosuhdetestaus
13	Syklinen kostea/kuuma -olosuhdetestaus
14	Jakorasian ja sen liitännöiden mekaaninen kestävyys
15	Sähköneristävyys kosteissa olosuhteissa
16	Staattisen mekaanisen kuorman kestävyys
17	Raekuurotesti
18	Ohitusdiodien testaus
19	Stabilisaatio, alustava (19.1) ja lopullinen (19.2)

3.4 SFS-EN 61215-standardin testausprosessi

Testausprosessin tavoitteena on määrittellä aurinkopaneelien sähkö- ja lämpöominaisuudet, sekä osoittaa mahdollisimman tarkasti, aika ja kustannukset huomioon ottaen, että paneelit kykenevät kestävästi jatkuvaa altistusta ulkoilmalle yleisissä sääolosuhteissa.

Testit läpäisseiden aurinkopaneelien todellinen eliniänodote riippuu kuitenkin täysin niiden suunnittelusta, paikallisista ympäristöolosuhteista, sekä niiden käsittelystä eri valmistus- ja käyttövaiheissa. (SFS-EN 61215-2:2017)

SFS-EN 61215-1:2016 -standardissa on erikseen määritelty prosessi, joka kertoo, miten ja missä järjestyksessä aurinkopaneeleja tulee testata. Testejä varten valitaan 10 aurinkopaneelia, jotka jaetaan viiteen eri testausarjaan (A-E), standardissa olevan, alle hahmotellun kuvion 2 määrittelemällä tavalla. Testausprosessi alkaa muutamalla, kaikille paneeleille suoritettavalla testillä, joiden jälkeen paneelit jaetaan viiteen ryhmään. Kullekin ryhmälle suoritetaan oma testisarjansa, joiden lopuksi kaikille paneeleille tehdään vielä viimeiset yhteiset testit. (SFS-EN 61215-1:2016, s.15-17)



Kuvio 2. Standardin mukainen testausprosessi 10 aurinkopaneelille. (SFS-EN 61215-1:2016)

Jotta paneelit läpäisisivät testausprosessin, tulee niiden testien jälkeen täyttää SFS-EN 61215-1:2016 -standardissa määritellyt kriteerit. Jos enemmän kuin yksi paneeli kymmenestä ei täytä vaatimuksia, kyseinen tuote hylätään kokonaan. Mikäli vain yksi paneeli ei täytä vaatimuksia, se korvataan kahdella uudella paneelilla, joille suoritetaan korvatuspaneelin testisarjan kaikki testit. Molempien paneelin pitää läpäistä testit, jotta tuotteen hyväksytään kokonaisuudessaan läpäisseen testit. (SFS-EN 61215-1:2016)

Kaikkien paneelin pitää siis läpäistä visuaalinen tarkastus, niissä ei saa testien aikana ilmetä virtapiirin katkeamista, ja paneelien täytyy pysyä sähköisesti turvallisina testausprosessin jälkeen. Lisäksi, paneelin tulee täyttää valmistajan ilmoittama teholuokitus ennen testejä, ja testien jälkeen paneelien teho saa olla pudonnut korkeintaan 5% alkupe- räisestä arvostaan. (SFS-EN 61215-1:2016)

3.4.1 Testaussarja E

Tämän työn kannalta oleellisin testi, MQT 16 eli staattisen mekaanisen kuorman testaus, kuuluu SFS-EN 61215-1:2016 -standardin testaussarjaan E, joka näkyy kuviossa 2 osana testausprosessi. Muita sarjoja ei siis tässä työssä käsitellä syvällisemmin. Testikaavion esittämän testausprosessin alussa suoritettavat testit ovat visuaalinen tarkastus (MQT 01), alustava stabilisaatio (MQT 19.1), suoriutuminen STC-olosuhteissa (MQT 06.1), sähköneristävyys (MQT 03), sekä sähköneristävyys kosteissa olosuhteissa (MQT 15). Nämä testit tehdään kaikille prosessin kymmenelle paneelille, jonka jälkeen paneelit jaetaan eri testisarjoihin. Yksinomaan testaussarjaan E kuuluvat syklinen kostea kuumuus -testi (MQT 13), staattisen mekaanisen kuorman testaus (MQT 16) ja raekuurotesti (MQT 17). Testit 16 ja 17 suoritetaan kumpikin ainoastaan yhdelle paneelille. (SFS-EN 61215-1:2016, s.17)

Kun testisarjaan E kuuluvat testit on suoritettu, tehdään paneeleille vielä testausprosessin viimeiset yhteiset testit. Nämä testit ovat suoriutuminen STC-olosuhteissa (MQT 06.1), sähköneristävyys, (MQT 03) sekä sähköneristävyys kosteissa olosuhteissa (MQT 15). Kyseessä ovat siis visuaalista tarkastusta lukuun ottamatta samat testit, jotka suoritetaan prosessin aluksi kaikille paneeleille. (SFS-EN 61215-1:2016, s.17) Lopullista stabilisaatiota (MQT 19.2) ei c-Si-paneeleille tarvitse tehdä. (SFS-EN 61215-1-1:2016, s.8)

Visuaalinen tarkastus (MQT 1)

Selkeät näkyvät viat aurinkopaneeleissa saattavat aiheuttaa haittaa niiden toiminnassa ja heikentää paneelien tuotantoa. Visuaalisen tarkastuksen tarkoituksena on tutkia, ettei paneeleissa ilmene standardissa SFS-EN 61215-1:2016 lueteltuja näkyviä vikoja. Haittaa aiheuttavat näkyvät viat voivat olla seuraavanlaisia:

- a) Rikkinäiset, halkeilleet tai repeytyneet ulkoiset pinnat.
- b) Paneelin toimintaa mahdollisesti haittaavat vääntyneet tai pois paikoiltaan olevat ulkoiset pinnat, kuten kehys, lasi, kalvot tai jakorasia.
- c) Jatkuvan väylän virtapiirin ja paneelin reunan välille muodostavat kuplat tai pettänyt laminointi.
- d) Kuplia saa olla yhteensä korkeintaan 1 %:n verran koko paneelin pinta-alasta, mikäli paneelin mekaaninen kestävyys on riippuvainen laminoinnin tartuntavoimasta.
- e) Sulamis- tai palamisjälkiä missä tahansa aktiivisen virtapiirin kanssa kosketuksissa olevassa osassa.
- f) Paneelin asennusta ja toimintaa haittaava heikentyminen paneelin mekaanisessa rakenteessa.
- g) Piikennot, joiden rikkinäisten tai haljenneiden alueiden takia yksittäisen kennon aktiivisesta pinta-alasta yli 10 % voi olla irti paneelin virtapiiristä.
- h) Missä tahansa paneelin sisäisessä kerroksessa olevat tummat alueet tai näkyvä korroosio, jotka peittävät yli 10 % alueen mistä tahansa yksittäisestä kennosta.
- i) Katkenneet johtimet piikenoissa, niiden ulkopuolella, tai jakorasiassa.
- j) Mikä tahansa oikosulussa oleva tai paljastunut jännitteinen osa.
- k) Paneelin tyyppikilpi on irronnut tai sen merkinnät eivät ole luettavissa.

(SFS-EN 61215-1:2016, s.13-14)

Aurinkopaneelien visuaalinen tarkastus tulee suorittaa vähintään 1000 luxin valotehossa. (SFS-EN 61215-2:2017, s.10-11)

Stabilisaatio (MQT 19)

Stabilisaatiolla tarkoitetaan aurinkopaneelien sähköistä tasapainottamista. Paneelit altistetaan määrätylle määrälle valosäteilyä (noin 500-1000 W/m²), joko ulkona luonnollisissa

olosuhteissa, tai sisätiloissa keinotekoisesti. Paneelien tuottama teho mitataan heti altistuksen alettua, ja tehon mittauksia suoritetaan niin kauan, kunnes paneelin arvioidaan saavuttaneen stabiilin tilan tehon tuotannon suhteen. Arviointiin käytetään apuna alla esitettyä kaavaa 1, jossa P on paneelien teho ja x on testissä käytettävä vertailuarvo. (SFS-EN 61215-2:2017, s.43-44)

$$P_{max} - P_{min} / P_{keskiarvo} < x$$

Kaava 1. Paneelin tehon stabiloituminen. (SFS-EN 61215-2:2017, s.44)

Standardin SFS-EN 61215-1-1:2016 mukaan piikennopohjaisille c-Si -paneeleille vertailuarvo on $x = 0,01$. (SFS-EN 61215-1-1:2016, s. 8)

Alustava stabilisaatio (MQT 19.1) tehdään, jotta varmistetaan valmistajan tyyppikilven arvojen paikkansapitävyys. Loppustabilisaation (MQT 19.2) tarkoituksena puolestaan on selvittää paneelissa testien aikana mahdollisesti syntyneen rappeutumisen määrä. Se saadaan selville, kun loppustabilisaation tuloksia verrataan alustavan stabilisaation tuloksiin. (SFS-EN 61215-2:2017, s.45)

Kuten jo aiemmin mainittu, testejä suoritettaessa on huomattava, että piikennopohjaisille c-Si -paneeleille loppustabilisaatiota ei standardin SFS-EN 61215-1-1:2016 mukaan vaadita suoritettavaksi. (SFS-EN 61215-1-1:2016, s. 8)

Suoriutuminen STC-olosuhteissa (MQT 06.1)

STC-olosuhteilla (Standard Testing Conditions) tarkoitetaan vakiotestausolosuhteita, jotka aurinkopaneeleja testattaessa ovat 25 ± 2 °C lämpötila, 1000 ± 100 W/m² säteily määrä, ja auringon säteily spektri 1,5 kertaisella ilmassalla. (SFS-EN 60904-3:2016; SFS-EN 61215-2:2017, s.14)

Aurinkopaneelit pidetään siis näissä olosuhteissa, joko luonnollisesti tai keinotekoisesti, ja niiden virran sekä jännitteen ominaisuuksia seurataan. Virran ja jännitteen mittaamiseen käytetään SFS-EN 60904-1 mukaisesti toimivaa $I-V$ -käyränmittauslaitetta. Halutun säteily määrän varmistamiseksi käytetään standardin SFS-EN 60904-2 mukaista referenssilaitetta. Testin tarkoituksena on varmistaa, että paneeli toimii valmistajan ilmoittamalla tehotasolla. (SFS-EN 61215-2:2017, s.14)

Sähköeristävyys (MQT 03)

Sähköeristävyystestin tarkoituksena on varmistaa, että osat, joissa kulkee sähkövirta ja osat, joihin esimerkiksi paneeleja huollettaessa ja puhdistettaessa pääsee koskemaan, ovat riittävän hyvin sähköisesti eristetty. (SFS-EN 61215-2:2017, s.11)

Paneelin oikosulkuun kytketyt johdot kytketään tasasähkötestilaitteen positiiviseen sisääntuloon. Paneelin paljaat metalliosat, eli yleensä paneelin kehys, kytketään puolestaan laitteen negatiiviseen sisääntuloon. Testilaitteella johdetaan paneeliin jännitettä ja sitä lisätään enintään 500 V/s vauhdilla testin maksimijännitteeseen, joka on 1000 voltia, plus kaksi (2) kertaa paneelin enimmäisjännite. Jännitettä pidetään tällä tasolla yhden (1) minuutin ajan, jonka jälkeen se lasketaan noltaan ja paneelin jännite puretaan. Toimenpide suoritetaan vielä uudelleen, jolloin jännite nostetaan kahden (2) minuutin ajaksi enintään 1000 volttiin. (SFS-EN 61215-2:2017, s.12)

Paneelit läpäisevät testin, mikäli sen sähköä eristävissä osissa ei havaita vahinkoja, ja yli 0,1 m² kokoisilla paneeleilla eristysresistanssi on vähintään 40 M Ω , kun kerrotaan paneelin neliömäärä mitatulla eristysresistanssilla. (SFS-EN 61215-2:2017, s.12)

Sähköeristävyys kosteissa olosuhteissa (MQT 15)

Tällä testillä on nimensä mukaisesti tavoitteena arvioida paneelien toimintaa kosteissa olosuhteissa. Testillä pyritään varmistamaan, ettei sateen, sumun, sulaneen lumen, tai paneelin pintaan tiivistyneen kasteen aiheuttama kosteus pääse tunkeutumaan paneelien sähköä johtaviin osiin, missä se saattaisi aiheuttaa esimerkiksi korroosiota ja haitata paneelien toimintaa. (SFS-EN 61215-2:2017, s.35)

MQT 15 -testi suoritetaan osittain saman kaavan mukaan kuin sähköeristävyystesti MQT 03. Paneeli upotetaan jakorasiaa lukuun ottamatta sähköä johtavaan testiliukseen, oikosulussa oleva paneeli kytketään testilaitteen positiiviseen liitäntään, ja testiliuksessa oleva metallinen sähkönjohdin kytketään paneelin negatiiviseen liitäntään. Testijännitettä nostetaan maksimissaan 500 V/s vauhdilla, enintään 500 V, tai järjestelmän maksimijännitteeseen asti. Jännitettä pidetään tällä tasolla kahden minuutin ajan, jonka jälkeen voidaan päätellä paneelin eristysresistanssi. MQT 15 -testin läpäisyyn vaadittavat kriteerit eristysresistanssin suhteen ovat samat, kuin sähköeristävyystestissä (MQT 03). (SFS-EN 61215-2:2017, s.36)

Syklinen kostea/kuuma -olosuhdetestaus (MQT 13)

Aurinkopaneelien, kuten muidenkin sähkölaitteiden, tulee kestää kuumia ja kosteita olosuhteita ilman, että niiden toiminta häiriintyy. Niinpä SFS-EN 60068-2-78 -standardin mukainen olosuhdetesti sähkölaitteille on sisällytetty osaksi SFS-EN 61215-2:2017 -standardia. Testilämpötilaksi on määritelty 85 ± 2 °C ja suhteellinen kosteusprosentti testin aikana tulee olla 85 ± 2 %. Aurinkopaneelit tulee altistaa näille olosuhteille noin 1000 tunnin ajaksi. (SFS-EN 61215-2:2017, s.31)

Testaussyklin jälkeen paneelien annetaan palautua huoneenlämmössä ja alle 75 % ilmankosteudessa kahdesta neljään tuntia, jonka jälkeen niille suoritetaan visuaalinen tarkastus (MQT 01) ja sähköneristävyyden testaus kosteissa oloissa (MQT 15). Lämpäistykseen olosuhdetestauksen, paneeleissa ei saa olla standardin SFS-EN 61215-1:2016 määrittelemiä näkyviä virheitä ja testin MQT 15 testaustuloksien tulee täsmätä alkuperäisiin testituloksiin. (SFS-EN 61215-2:2017, s.31)

Raekuurotesti (MQT 17)

Raekuurotestillä varmistetaan, testin nimen mukaisesti, että aurinkopaneelit pysyvät toimintakykyisinä rajunkin raekuuron jälkeen. Testiä varten rakennetaan laite, joka jäädyttää vettä, muokkaa sen sopivan kokoiseksi palloiksi, ja ampuu rakeet määrättyllä nopeudella kohti aurinkopaneelia. Aurinkopaneelit kiinnitetään valmistajan määrittämällä kiinnitystavalla johonkin jäykkään rakenteeseen testausta varten. (SFS-EN 61215-2:2017, s.38)

Rakeiden eri kokoluokat ja niiden lähtönopeudet on määritelty SFS-EN 61215-2:2017 -standardissa. Koot vaihtelevat välillä 25 mm - 75 mm ja nopeudet välillä 23,0 m/s - 39,5 m/s. Standardissa on myös kirjattu ja visualisoitu optimaaliset osumakohdat parhaiden testitulosten aikaansaamiseksi. (SFS-EN 61215-2:2017, s.39-40)

Paneelit läpäisevät raekuurotestin, mikäli visuaalisessa tarkastuksessa ei havaita standardissa SFS-EN 61215-1:2016 lueteltuja virheitä ja testin MQT 15 tulokset täsmäyvät alkuperäisiin testituloksiin. (SFS-EN 61215-2:2017, s.40)

3.4.2 Staattisen mekaanisen kuorman kestävyys (MQT 16)

Standardin kohdassa 4.16 esitellään testi numero 16, eli staattisen mekaanisen kuorman kestävyys -testi. (SFS-EN 61215-2:2017, s.36)

Testin tarkoitus

Tämän testaustoimenpiteen tarkoituksena on arvioida kuinka hyvin aurinkosähköpaneeli kestää staattista, tasaisesti aurinkopaneelin pinnalle jakautuvaa kuormitusta, joko ylös tai alaspäin. Joillekin asennuksille tai ilmastolle saattaa olla lisävaatimuksia standardissa määriteltyjen toimenpiteiden ja arvojen lisäksi. (SFS-EN 61215-2:2017, s.36)

Aurinkopaneelien dynaamista mekaanisen kuorman kestävyyttä varten puolestaan on olemassa erikseen oma standardinsa, IEC TS 62782:2016. Sen tarkoituksena on testata paneelien kestävyyttä niiden elinkaaren eri vaiheissa syntyvissä mekaanisissa, esimerkiksi tuulen aiheuttamissa rasituksissa. Dynaaminen tai syklinen testaus antaa sikäli realistisemman kuvan paneelien kestävyydestä staattiseen testiin verrattuna, että voiman suunta vaihtuu useita kertoja lyhyessä ajassa. Tässä työssä kyseiseen standardiin ja sen testaustapaan ei kuitenkaan syvennyttä tämän enempää. (Hsu & Wu 2017, 96)

Staattisen testauksen tarkoituksena ei ole määritellä laskennallista kuormaa rikkovalla aineenkoetus -menetelmällä. Pienin vaadittu laskennallinen kuorma riippuu pitkälti sovellettavista standardeista, paneelien rakenteesta, niiden käyttöpaikasta sekä säätilasta, ja, tilanteesta riippuen, kuorman määrittämiseen saatetaan tarvita muita varmuuskertoimia (γ_m) tai useampia testauskertoja. (SFS-EN 61215-2:2017, s.36)

Testi 16 vahvistaa valmistajan määrittämän suunnittelukuorman. Testikuorma määritellään seuraavan kaavan 2 avulla

$$\text{Testikuorma} = \text{Varmuuskerroin } \gamma_m \times \text{Suunnittelukuorma}$$

Kaava 2. Testikuorman laskeminen. (SFS-EN 61215-2:2017, s.37)

, jossa varmuuskertoimen γ_m tulee olla vähintään $\geq 1,5$. Standardin mukaan pienin vaadittu suunnittelukuorma on 1600 Pascalia (Pa), jolloin minimi testikuorma on 2400 Pascalia (Pa). (SFS-EN 61215-2:2017, s.36-37)

Valmistaja voi halutessaan määrittää moduuleille suuremmat suunnittelukuormat sekä alas että ylöspäin kohdistuville voimille, ja myös suuremman varmuuskertoimen tietyissä käyttötarkoituksissa. Paneelivalmistajan täytyy eritellä suunnittelukuorma ja varmuuskertoimen jokaiselle eri asennustavalle. (SFS-EN 61215-2:2017, s.37)

Testausvälineet ja -olosuhteet

Staattisen mekaanisen kuorman testaukseen käytettäville välineille, sekä testausolosuhteille on standardissa määritelty joitain perusvaatimuksia:

- a) Jäykkä ja/tai kiinteä testausteline, johon aurinkopaneelit voidaan kiinnittää valmistajan määrittämällä normaalilla asennusmetodilla. Paneelit tulee voida asettaa telineeseen etupuoli sekä ylös-, että alaspäin ja telineen tulee sallia paneelin taipuminen testauksen aikana, kuten ne taipuisivat painon alla normaalissa asennuksessa.
- b) Laitteisto, jolla seurataan aurinkopaneelien sähkövirran jatkuvuutta testien aikana.
- c) Tarkoitukseen sopivat painot, tai muu keino, kuten paineilma, jolla voidaan asettaa tasaista painoa vähitellen koko aurinkopaneelin päälle. Kuvassa 8 on esitetty kaksi vaihtoehtoa kuormitustavalle.
- d) Testit tulee suorittaa tilassa, jossa vallitsee normaali huonelämpötila ($25 \pm 5^\circ\text{C}$). (SFS-EN 61215-2:2017, s.37)



Kuva 8. Mekaanisen kuorman kestävyyttä voidaan testata esimerkiksi paineilmatoimisella imukuppijärjestelmällä (vasemmalla), tai perinteisillä hiekkasäkeillä (oikealla). (iTechworld 2016; PSE AG 2018)

Toimenpide

- a) Varusta aurinkopaneeli paneelin sisäisen sähkövirran jatkuvuutta monitoroivalla laitteistolla testauksen ajaksi.
- b) Kiinnitä paneeli johonkin tukevaan rakenteeseen valmistajan määrittämällä tavalla. Paneeli on tarkoitus kiinnittää normaalia asennusmenetelmää noudattaen, käyttämällä kaikkia asiaankuuluvia kiinnikeitä ja tukikiskoja. Jos kiinnitystapoja on useita, kaikilla tavoilla täytyy suorittaa omat testinsä ja arvioida ne erikseen. Aurinkopaneelit tulee jokaista eri asennustapaa käyttäessä kiinnittää huonoimmalla mahdollisella tavalla, eli todennäköisimmin niin, että kiinnityspisteet ovat mahdollisimman kaukana toisistaan. Aurinkopaneelien tulee antaa tasapainottua vähintään kaksi (2) tuntia testin numero 13 jälkeen, ennen kuin sen päälle asetetaan painoa.
- c) Aurinkopaneelin pinnalle levitetään vähitellen ennalta laskettu testikuorma niin, että se jakautuu tasaisesti koko paneelin päälle. Painonjakauman tulee olla mahdollisimman tasainen, eroavaisuuksia saa olla korkeintaan $\pm 5\%$, suhteessa testauskuormaan. Kun haluttu kuormitus on saavutettu, sen annetaan olla paneelin päällä yhden tunnin ajan.
- d) Edellisessä kohdassa kuvattu paneelin kuormitus tehdään vielä aurinkopaneelin takapuolelle, paneelia kääntämällä, tai paneelin etupuolelle nostavana voimana.
- e) Vaiheet c) ja d) suoritetaan yhteensä kolme kertaa. (SFS-EN 61215-2:2017, s.37)

Loppumittaukset

Staattisen kuormankestävyyden testaamisen jälkeen paneeleille tulee vielä toistaa testit MQT 1 ja MQT 15. (SFS-EN 61215-2:2017, s.37)

Vaatimukset

- a) Testin aikana ei havaita virtapiirissä ajoittaista katkeamista.
- b) SFS-EN 61215-1:2016 -standardin määrittelemiä näkyviä vikoja ei havaita visuaalisessa tarkastuksessa (MQT 01).
- c) Viimeisessä MQT 15 -testissä paneelin läpi kulkeva virta täyttää samat vaatimukset, kuin sarjan alussa suoritettussa testissä. (SFS-EN 61215-2:2017, s.37)

3.5 Muita paneeleille suoritettavia testejä

SFS-EN 61215 – ja SFS-EN 61730 -standardisarjat määrittelevät suuren joukon testejä, joiden tarkoituksena on varmistaa aurinkosähköpaneelien täyttävän tietyt laatu- sekä turvallisuusvaatimukset. (SFS-EN 61215-2:2017; SFS-EN 61730-2:2018) Kyseisten standardisarjojen ulkopuolelle jää kuitenkin joukko testaustoimenpiteitä, jotka koettelevat aurinkopaneelien kestävyyttä esimerkiksi paikallisissa ympäristö- ja käyttöolosuhteissa. Alla olevassa taulukossa 2 on lueteltuna lisätestauksia, joita ainakin TÜV Rheinland suorittaa asiakkaidensa toiveiden mukaan. (TÜV Rheinland 2019a)

Taulukko 2. Joitakin SFS-EN 61215 -standardisarjan ulkopuolelle jääviä testaustoimenpiteitä.

Testin nimi	Selite
PID (Potential Induced Degradation)	Sähkövirran, aiheuttama rappeutuminen piikennoissa. (Köntges 2014)
LID (Light Induced Degradation)	Valon aiheuttama rappeutuminen piikennoissa. (Köntges 2014)
EL-kuvaus	Elektroluminesenssikuvaus, jota käytetään havaitsemaan piikennoissa olevia halkeamia ja alueita, jotka eivät tuota sähköä. (Jahn ym. 2018)
Infrapunakuvaus	Lämpökuvaus toiminnassa olevien paneelien vikakohtien paikallistamiseksi. (Jahn ym. 2018)
Korroosion kestävyys	Esimerkiksi suolaveden, ammoniakkin tai rikkihapon vaikutusten testausta paneeleilla. (TÜV Rheinland 2019b)
Pitkäaikainen ulkoilmaltistus	Paneelien sijoitus todelliseen ulkoilmaympäristöön määrättyksi ajanjaksoksi ja vaikutusten mittaus. (TÜV Rheinland 2019b)
Pitkäaikaiset yhdistelmätestit	Laboratorio-oloissa suoritettavat testaukset, jossa paneeleja koetellaan erilaisilla olosuhte- ja rasitustesteillä yli standardien vaatimusten. (TÜV Rheinland 2019b)
Hiekkapuhallus	Hiekan aiheuttaman hankausvaikutuksen testaus aurinkopaneeleilla. (Völker ym. 2014)
Lumikuorma	Epätasaisen lumikuorman vaikutusten testaaminen. (TÜV Rheinland 2019b)

4 TESTAUSLAITE JA SEN RAKENTAMINEN

Staattisen paineen ja nosteen testaus antaa tärkeää tietoa aurinkopaneelin lujuusominaisuuksista. Näitä testejä varten rakennettiin oma testilaitte, johon voidaan asettaa yksi aurinkopaneeli kerrallaan, joko yksinään tai asennustelineessä asetettuna johonkin tiettyyn kallistuskulmaan.

Staattisen mekaanisen kuorman kestävyyttä voidaan testata useammalla eri tavalla, kuten aiemman kappaleen kuvasta 8 nähdään. Paneeleita voidaan kuormittaa esimerkiksi hiekkasäkeillä tai imukupeilla varustetuilla sylintereillä, mutta myös paineilmatäytteisellä pussilla tai koko paneelin etuosan kattavalla ali- ja ylipainejärjestelmällä. Eri testaustavat tuottavat erilaisia tuloksia, esimerkiksi piikkennoissa ilmenevien mikrohalkeamien muodossa. Testitulosten eroavaisuudet johtuvat pääasiassa painon epätasaisesta jakautumisesta eri testausmenetelmillä. (Gabor ym. 2016)

4.1 Testausmetodin määrittäminen

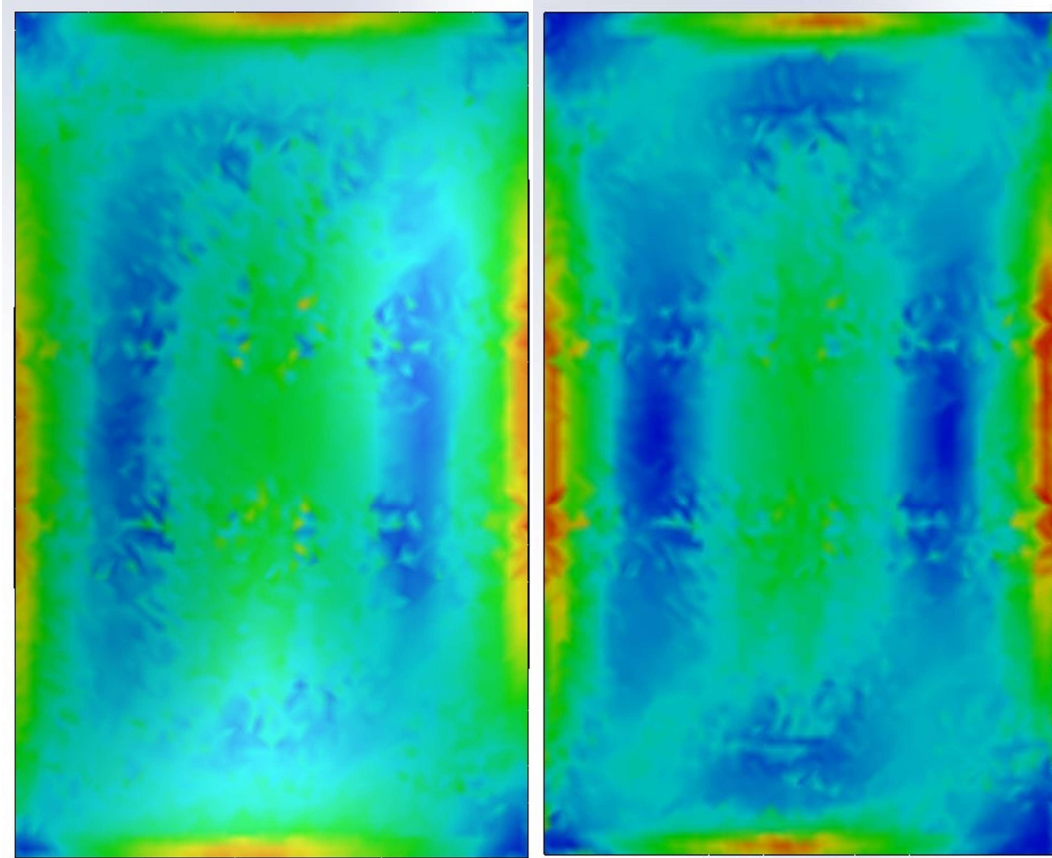
Jokaisella viime kappaleessa mainitulla testaustavalla on omat hyvät ja huonot puolensa. Hiekkasäkkimethodi on yksinkertainen ja kustannuksiltaan maltillinen, mutta täysin tasaista kuormitusta on vaikea toteuttaa. Testaaminen on lisäksi aikaa vievää, eikä dynaamista testausta ole mahdollista toteuttaa. Paineilmapussilla saadaan hyvä tasainen kuormitus paneelin päälle, mutta tälläkään metodilla dynaaminen testaus ei onnistu. Lisäksi kuorman jakautuminen paneelin takana olevan kytkentärasian ympäristössä ei ole välttämättä tasaista. Koko paneelin pinta-alan kattavan ali- ja ylipainejärjestelmä jakaa kuorman tasaisesti sen pinnalle. Ongelmaksi tulee kuitenkin paneelin reunojen tiivistäminen. Paneelin kehysten ja laitteen rungon pitää olla täysin kiinteästi ja tiiviisti yhdessä, jotta laite toimisi halutulla tavalla. Tällöin testaus ei enää ole todenmukainen, sillä ainoastaan lasi ja sen alla olevat komponentit taipuvat. Jotta luonnon olosuhteita kyettäisiin simuloimaan realistisesti, pitää koko paneelin, kehykset mukaan lukien, päästä taipumaan. (Gabor ym. 2016)

Viimeinen mainituista tavoista on paineilmatoimisilla sylintereillä ja imukupeilla testaaminen. Kyseistä testaustapaa käyttäviä laitteita löytyy eri testauslaitoksilta sekä laitevalmistajilta. Imukuppeihin perustuvan testausmenetelmän etu on sen monikäyttöisyys, sillä

imukupeilla varustetulla laitteella voidaan helposti toteuttaa sekä staattiset että dynaamiset testaukset. Kuormituksen tasaisuuden toteuttaminen on ainoa hankaluus tällä testaustavalla. Vaikka paineilmasylinterit saadaankin toimimaan täysin yhdenmukaisesti ja keskenään samalla voimalla, tulee paneelin pinnalle merkittäviä pistekuormia imukuppien kohdalle. Tutkimuksilla on osoitettu, että vähäisellä määrällä imukuppeja ja niiden huonolla sijoittelulla kuormitus paneelin pinnalla ei ole lähimainkaan tasainen, vaan pistekuormia pääsee syntymään. Imukoppien määrällä sekä järkevällä sijoittelulla voidaan kuitenkin pyrkiä mahdollisimman tasaiseen kuormituksen jakaumaan ja myös saavuttaa sellainen. (Baek 2014; Gabor ym. 2016)

Tätä työtä varten rakennetussa testilaitteessa päätettiin käyttää kuormitusmenetelmänä paineilmatoimisia, imukupeilla varustettuja sylintereitä, sillä se koettiin testaustapana monipuolisimmaksi. Tästä syystä myös isot tutkimuslaboratoriot hyödyntävät samaa menetelmää testeissään. Laitteella on tarkoitus pystyä testaamaan eri kokoisia paneeleja useilla eri paineilla ja suunnitelmissa oli myös laitteen toiminnan mahdollinen automatisointi tulevaisuudessa. Nämä seikat huomioon ottaen, valittiin imukuppimenetelmään perustuva testaus tämän työn kannalta sopivimmaksi.

Testaustavasta tehtiin aluksi simulaatio SolidWorks-ohjelmistolla, jotta voitiin arvioida, jakautuisiko kuorma riittävän tasaisesti kyseisellä testaustavalla. Kuvassa 9 näkyy, miten tasaisesti sijoitetuilla 12:lla sylinterillä tuotettu voima rasitti aurinkopaneelin pintaa, verrattuna täysin tasaisesti paneelin pinnalle kohdistettuun voimaan. Simulaatiossa paneelin kaikki reunat olivat kiinteästi kiinni. Vasemman puoleisessa kuvassa on tasaisen paineenjakauman tuottama rasitus ja oikealla kahdellatoista sylinterillä tuotettu sama kuormitus. Kuten kuvistakin havaitaan, kahden testaustavan vaikutuksien välillä on vain hyvin pieniä eroja eli sylinterien käyttäminen kuormittavana tekijänä ei teoriassa aiheuttanut merkittäviä, tasaisesta kuormituksesta eroavia pistekuormia.



Kuva 9. Paneelin pinnalle kohdistuva tasainen kuormitus vasemmalla ja sylintereillä tuotettu kuormitus oikealla.

Laitteen ulkomuodolle ja toimintaominaisuuksille haettiin mallia, esimerkiksi kuvassa 10 esitetystä, aurinkopaneelien testauslaitteistoja valmistavan saksalaisen PSE AG -yrityksen mekaanisen kuorman testilaitteesta. Kyseinen valmistaja käyttää testausmekanismia nimenomaan paineilmatoimista järjestelmästä ja on toimittanut mekaanisen kuorman testaukseen, sekä moniin muihin aurinkopaneelisiin liittyviin testauksiin tarkoitettuja laitteita, useille aurinkopaneelitoimijoille ympäri maailmaa. (PSE AG 2018a; PSE AG 2018b)



Kuva 10. Esimerkkikuva rakennettavasta paineilmatoimisesta testilaitteesta. (PSE AG 2018a)

4.2 Laitteen rungon suunnittelu ja rakentaminen

Tämän opinnäytetyön testilaitteen suunnittelu aloitettiin laitteen ulkoisista mitoista. Lopulliset mitat määräytyivät hyvin pitkälti testattavien kappaleiden, eli aurinkopaneelien, koon perusteella sekä kuvassa 10 esitetyn mallilaitteen mitoista. Laite mitoitettiin sen mukaan, että sillä olisi jatkossa mahdollista testata useampia eri kokoisia aurinkopaneelleja.

Testilaitteen kehikosta hahmoteltiin kuvassa 11 näkyvä luonnos, joka mallinnettiin lopulliseen muotoonsa Solidworks-ohjelmistolla. Kehikorakenteen 3D-mallista oli vaivatonta muokata laitteen mittoja, jotta lopullinen kehikko sopi aiottuun tarkoitukseen. Kehikon kokoamista varten piti suunnitella ja mallintaa itse sopivat, myös kuvassa 11 näkyvät, reikälevyt ja kulmaraudat. Näiden lisäksi suunnitteluvaiheessa oli huomioitava paineilmajärjestelmän kiinnittäminen kehikkoon. Paineilmasyntereitä ja -putkien jakotukkeja varten suunniteltiin omat kappaleensa.



Kuva 11. 3D-malli suunnitellusta kehkosta kiinnikkeineen.

Liitteeseen 1 on kerätty kaikkien kehkion kokoamista varten suunniteltujen osien piirustukset. Lisäksi liitteessä 2 on esitetty loput suunnitelluista, joko levy- tai alumiinintyöstöinä teetetyistä kappaleista, jotka liittyivät paineilma- ja alipainejärjestelmien osien kiinnitykseen.

4.3 Paineilmajärjestelmän suunnittelu

Paineilmajärjestelmä koostui lopulta paineilmasylintereistä, ilmansuodattimesta, paineenerottimesta, magneettiventtiilistä ja molemmille paineilmalinjoille asennetuista paineensäätöventtiileistä, painemittareista sekä painesensoreita. Paineilmalinjoihin asennettiin katkaisijat, jotka mahdollistivat yhtäaikaaisesti joko 3, 6, 9 tai 12 sylinterin toimintojen käytön.

4.3.1 Tarvittavien voimien laskenta

Kiteiseen pihhin perustuvia aurinkopaneeleja valmistavat yritykset yleensä itse määrittelevät, kuinka suuria mekaanisia kuormia paneelit kestävät. Paneeleille annetaan kaksi sallitun staattisen paineen arvoa p Pascaleina (Pa); sekä alaspäin että ylöspäin suuntautuvat arvot. Tämän opinnäytetyön testausosuutta varten valitun aurinkopaneelitoimitajan paneeleille suunnittelukuormiksi ilmoitettiin 5400 Pa alaspäin ja 2400 Pa ylöspäin suuntautuvaa staattista painetta.

Kuten kappaleessa 3. mainittiin, SFS-EN 61215-2:2017 -standardin mukaan, paneelien staattisen mekaanisen kuormituksen testissä valmistajan ilmoittama suunnittelukuorma tulee kertoa varmuuskertoimella, jotta saadaan standardin mukainen vähimmäistestauskuorma. Testikuormalle on määritelty vähimmäisvarmuuskertoimeksi 1,5. Paineilmajärjestelmän suunnittelu alkoi siis vähimmäistestikuormien määrittämisellä standardissa olevan kaavan 2 mukaisesti.

Testikuorma alaspäin painavalle voimalle on

$$p \downarrow = 1,5 \times 5400 \text{ Pa} = 8100 \text{ Pa}$$

ja ylöspäin vetävälle voimalle puolestaan

$$p \uparrow = 1,5 \times 2400 \text{ Pa} = 3600 \text{ Pa}$$

Seuraavaksi selvitettiin koko paneelin pinta-alalle kohdistuvan voiman suuruus. Koska Pascal on sama kuin Newton jaettuna neliometrillä, piti edellisissä laskuissa saadut testipaineet kertoa paneelin pinta-alalla voimien suuruuden määrittämiseksi. Testattavien paneelien mitat olivat 1,636 m (pituus l) ja 0,992 m (korkeus h), joten kokonaisen suorakaiteen muotoisen aurinkopaneelin pinta-ala saatiin:

$$A_{\text{paneeli}} = l * h = 1,636 \text{ m} * 0,992 \text{ m} = 1,622912 \text{ m}^2 \sim 1,623 \text{ m}^2$$

Koko paneelin pinta-alalle kohdistuvat, sekä alas-, että ylöspäin suuntautuvat voimat laskettiin kaavalla

$$F = A * p$$

, jossa paneelin pinta-ala A kerrotaan testauspaineella p . Tulokseksi saadaan koko paneelin alalle jaettava testausvoima F Newtonina. (Tekniikan kaavasto 2013, 99)

Tällöin alaspäin, koko aurinkopaneelin pinta-alalle vaikuttavan testauskuorman painoksi saatiin arvo

$$F \downarrow_{\text{paneeli}} = A_{\text{paneeli}} * p \downarrow = 1,623 \text{ m}^2 * 8100 \text{ Pa} = 13145,5872 \text{ N} \sim 13150 \text{ N}.$$

Ylöspäin vetäväksi, koko aurinkopaneelin pinta-alan testauskuormaksi saatiin arvo

$$F \uparrow_{\text{paneeli}} = A_{\text{paneeli}} * p \uparrow = 1,623 \text{ m}^2 * 3600 \text{ Pa} = 5842,4832 \text{ N} \sim 5842 \text{ N}.$$

Kilogrammoiksi muutettuna, voimat ovat suurin piirtein 1340 kg alaspäin kohdistuvaa painoa ja 596 kg ylös suuntautuvaa vetoa.

4.3.2 Sylinterien voimat ja mitoitus

Koko aurinkopaneelin alalle jakautuvien voimien määrittelyn jälkeen selvitettiin voima, jonka yhden paineilmasynterinin piti tuottaa paneelin pintaan standardin mukaisten, vähimmäiskuormituksilla suoritettavien testien aikaansaamiseksi. Järjestelmä päätettiin toteuttaa 12:lla sylinterillä, jotta paneelin kohdistuva voima saataisiin jaettua riittävän laajalle alueelle, eikä liian suuria pistekuormia pääsisi syntymään. Valintaan vaikutti myös aiemmin esitetystä kuvassa 10 saadut tulokset, kun paneelin kuormitussimulaatio oli suoritettu 12:lla kuormituspisteellä.

Alaspäin painavaksi voimaksi sylinteriä kohden määritettiin

$$F \downarrow_{\text{sylinteri}} = \frac{F \downarrow_{\text{paneeli}}}{\text{Sylinterien määrä}} = \frac{13150 \text{ N}}{12} = 1095 \text{ N}.$$

Ylöspäin vetäväksi voimaksi sylinteriä kohden määritettiin

$$F \uparrow_{\text{sylinteri}} = \frac{F \uparrow_{\text{paneeli}}}{\text{Sylinterien määrä}} = \frac{5842 \text{ N}}{12} = 487 \text{ N}.$$

Kun jokaisen sylinterin tuottama vähimmäistestivoima oli laskettu, selvitettiin kyseisten voimien tuottamiseen sopivimmat sylinterit. Valmistajien katalogien perusteella päädyttiin hankkimaan ja asentamaan järjestelmään sylinterit 63mm:n männän halkaisijalla. Kuten alla olevasta tuotekatalogin taulukosta 3 voidaan nähdä, 63 mm:n sylinteri tuottaa alaspäin painaessaan testissä tarvittavan 1095 N:n voiman 3 baarin ja 4 baarin paineen välillä. Ylöspäin vetävä 487 N:n voima saavutetaan jo 1:n ja 2 baarin välillä. Männän

varren halkaisijalla ei voimien kannalta ollut suurta merkitystä, mutta valitut sylinterit otettiin varmuuden vuoksi paksummalla, 20 mm:n varrella.

Taulukko 3. Eri kokoisten sylinterien voimat dekaNewtoneina määritellyissä paineissa. (Metal Work S.p.A. 2016, 23)

Cylinder bore D mm	Piston rod diameter d mm	Motion	Useful area cm ²	Thrust and traction force in daN depending on the operating pressure in bar									
				1 bar	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	8 bar	9 bar	10 bar
50	16	thrust	19.63	19.6	39.3	58.9	78.5	98.2	117.8	137.4	157.1	176.7	196.3
		traction	17.62	17.6	35.2	52.9	70.5	88.1	105.7	123.4	141.0	158.6	176.2
50	20	thrust	19.63	19.6	39.3	58.9	78.5	98.2	117.8	137.4	157.1	176.7	196.3
		traction	16.49	16.5	33.0	49.5	66.0	82.5	99.0	115.5	131.9	148.4	164.9
63	16	thrust	31.17	31.2	62.3	93.5	124.7	155.9	187.0	218.2	249.4	280.6	311.7
		traction	29.16	29.2	58.3	87.5	116.6	145.8	175.0	204.1	233.3	262.5	291.6
63	20	thrust	31.17	31.2	62.3	93.5	124.7	155.9	187.0	218.2	249.4	280.6	311.7
		traction	28.03	28.0	56.1	84.1	112.1	140.2	168.2	196.2	224.2	252.3	280.3
80	20	thrust	50.27	50.3	100.5	150.8	201.1	251.3	301.6	351.9	402.1	452.4	502.7
		traction	47.12	47.1	94.2	141.4	188.5	235.6	282.7	329.9	377.0	424.1	471.2
80	25	thrust	50.27	50.3	100.5	150.8	201.1	251.3	301.6	351.9	402.1	452.4	502.7
		traction	45.36	45.4	90.7	136.1	181.4	226.8	272.1	317.5	362.9	408.2	453.6

4.3.3 Järjestelmäpaineiden määrittäminen

Laitteessa tarvittavien voimien selvittämisen jälkeen laskettiin, millä järjestelmäpaineella tarkalleen sylinterit saatiin työntämään ja vetämään kyseisillä voimilla. Testilaitteiston vaatiman paineen p laskennassa hyödynnettiin jo aiemmin käytettyä kaavaa

$$F = A * p$$

, joka käännettiin muotoon

$$p = \frac{F}{A}$$

Kaavassa voima F jaetaan sylinterin männän pinta-alalla A .

Sylinterin valmistaja oli määritellyt tuotekatalogissaan yllä olevassa taulukossa 3 myös sylinterin männän ylä- ja alapuolen pinta-alan. Sylinterin männän pinta-ala saatiin laskennallisesti varmistettua ympyrän pinta-alan laskentakaavalla

$$A_{Sylinteri} = \frac{\pi \times D_{Sylinteri}^2}{4} = \frac{\pi \times 0,063 \text{ m}^2}{4} = 0,003117 \text{ m}^2 \sim 0,003 \text{ m}^2$$

, johon ympyrän halkaisijaksi D on sijoitettu valitun sylinterin männän halkaisija 63 mm, eli 0,063 m.

Männän pinta-alaksi saatiin siis sama arvo, joka katalogissa oli määritelty työntövoimalle. Alaspäin painettavan testikuorman tuottamiseen tarvittavan järjestelmäpaineen laskennassa käytettiin hyväksi yksittäiselle sylinterille laskettua voimantuottotarvetta, sekä sylinterin männän yläpuolen pinta-alaa neliömetreinä. Tällöin tulokseksi saatiin

$$p_{\downarrow \text{järjestelmä}} = \frac{F_{\downarrow \text{sylinteri}}}{A_{\text{sylinteri}}} = \frac{1095 \text{ N}}{0,003117 \text{ m}^2} = 351\,448 \text{ Pa} \sim 351,4 \text{ kPa}$$

, joka puolestaan on noin 3,51 baaria, sillä $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$. (Tekniikan kaavasto 2013, 158)

Sylinterin vetovoimalle oli ilmoitettu männän hyötypinta-alaksi pienempi ala taulukossa 3, mikä otettiin huomioon ylöspäin vetävän liikkeen testauspainetta määriteltäessä. Pienempi arvo johtui siitä, että männän varsi vie männän alapuolen pinta-alasta osan, jolloin ylöspäin suuntautuvaan vetoon vaadittiin suhteessa suurempi järjestelmäpaine pienentyneen alan kompensoimiseksi ja näin riittävien voimien aikaansaamiseksi.

Edellä mainittu huomioon ottaen, ylöspäin vetävää testikuormaa varten laskettiin järjestelmäpaine, jossa käytettiin aiemmin laskettua sylinterin voimaa, sekä sylinterivalmistajan katalogissa ilmoitettua männän alaosan pinta-alaa neliömetreiksi muunnettuna. Näin järjestelmäpaineeksi saatiin

$$p_{\uparrow \text{järjestelmä}} = \frac{F_{\uparrow \text{sylinteri}}}{A_{\text{sylinteri}}} = \frac{487 \text{ N}}{0,002803 \text{ m}^2} = 173\,697 \text{ Pa} \sim 173,7 \text{ kPa}$$

, joka taas baareiksi muunnettuna oli 1,74bar.

Järjestelmäpaineet tuli muuttaa Pascaleista (Pa) baareiksi (bar), sillä järjestelmän paineen mittaamista ja tarkkaa säätämistä varten käytetty laite ilmoitti tuloksen ainoastaan baareina.

4.4 Alipainejärjestelmän suunnittelu

Sylintereitä liikuttavan paineilmajärjestelmän lisäksi testilaitteeseen tarvittiin yksinkertainen alipainejärjestelmä, johon kuului tyhjiöpumppu, imukupit sekä ilmansuodattimet. Paineilamalla toimivat sylinterit tuottivat kuormitukseen tarvittavan voiman, mutta alipainejärjestelmä ja sen komponentit varmistivat, että voimat jakautuivat paneelin pinnalle tasaisesti ja sylinterit kykenivät tarttumaan pintaan vetoa varten.

$$F_{TH} = m \times (g + a) \times S$$

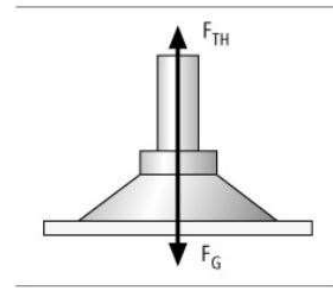
F_{TH} = theoretical holding force [N]

m = Weight [kg]

g = Gravity [9.81 m/s²]

a = Acceleration [m/s²] of the system

S = Safety factor



Kuva 12. Imukuppien mitoittamisessa käytetty laskentakaava. (J. Schmalz GmbH 2019)

Alipaineen merkitys korostui testattaessa ylöspäin suuntautuvaa vetoa. Oli äärimmäisen tärkeää, että imukupeissa oli riittävän voimakas alipaine, jotta paneeleja saatettiin vetää ylöspäin tarvittavilla voimilla. Imukuppien pitovoiman määrittämisessä käytettiin kuvassa 12 esitettyä laskentakaavaa 3.

$$F_{Teoreettinen\ pitovoima} = m * (g + a) * S$$

Kaava 3. Imukuppien teoreettisen pitovoiman laskeminen. (J. Schmalz GmbH 2019)

Teoreettisen pitovoiman laskentaan vaadittiin kappaleen massa m , Maan putoamiskiivetyvyys g , sylinterin kiihtyvyyden a , sekä varmuuskerroin S . Tässä tapauksessa kappaleen massan korvasi kunkin sylinterin vaadittu nostovoima 487 N muunnettuna kilogrammoiksi Maan putoamiskiivetyvyyden avulla. Massaksi tuli noin 50 kg ja varmuuskertoimeksi asetettiin 1,5, joka on minimiarvo teoreettisen pitovoiman laskemisessa tasaisille pinnoille. Sylinterin tarkkaa kiihtyvyyttä ei ollut tiedossa, mutta se säädettiin melko hitaaksi ja laskennassa käytettiin arvioitua arvoa 0,05 m/s². Putoamiskiivetyvyyden vakioarvo on 9,81 m/s². Kaikki arvot syötettiin kaavaan, jolloin tulokseksi saatiin

$$F_{Teoreettine\ pitovoima} = 50\ kg * \left(9,81\ \frac{m}{s^2} + 0,05\ \frac{m}{s^2} \right) * 1,5 = 740\ N$$

, mikä tarkoitti, että järjestelmään hankittavien imukuppien tuli saavuttaa vähintään 740 N:n pitovoima. (J. Schmalz GmbH 2019)

Laitteeseen valittiin lopulta halkaisijaltaan 150 mm:n, esimerkiksi lasin käsittelyyn tarkoitettuja nitrilikumi-imukupit. Imukuppien koko määriteltiin sen perusteella, miten sylinterin voimien arvioitiin jakautuvan paneelin pinnalle ilman, että syntyy liian suuria pistekuormia. 150 mm:n imukupit arvioitiin voimien jakautumisen kannalta riittävän suuriksi ja sen

nostovoimakin oli enemmän kuin riittävä sopivassa alipaineessa, kuten nähdään taulukosta 4.

Taulukko 4. Valittujen imukuppien nostovoimat tietyillä alipaineilla. (Piab AB 2019)

Performance — lifting forces, Outer lip

		
20 -kPa	520 N	281 N
60 -kPa	770 N	425 N
90 -kPa	1130 N	663 N

Performance — lifting forces, Inner lip

		
20 -kPa	330 N	281 N
60 -kPa	500 N	425 N
90 -kPa	780 N	663 N

Työssä käytetyn tyhjiöpumpun kapasiteetti riitti erinomaisesti täyttämään imukuppien vaatimukset nostovoimien suhteen, kuten kuvan 13 tyhjiöpumpun omasta alipainemittarista nähdään. Järjestelmän alipaineeksi saavutettiin lähes -100 kilopascalin (kPa), eli -1 baarin alipaine. Laitteella on siis jatkossa mahdollista testata suurempiakin nostovoimia aurinkopaneeleille, kuin mitä tämän opinnäytetyön testauksissa käytettiin.



Kuva 13. Tyhjiöpumpun mittari ja pumpulla saavutettu suurin alipaine.

4.5 Laitteen rakentaminen

Testilaitteen konkreettinen rakentaminen aloitettiin kehkosta. Alumiiniprofiilit mitattiin, sahattiin oikeisiin mittoihin ja profiilien päistä hiottiin terävimmät reunat pois. Kehikon kokoamista varten suunnitellut, kuvassa 14 esitetyt reikälevyt ja kulmaraudat, teetettiin levytyönä suunnitelmien mukaan. Kehikon valmistuttua siihen päätettiin vielä asentaa pyörät laitteen liikuttelun helpottamiseksi.



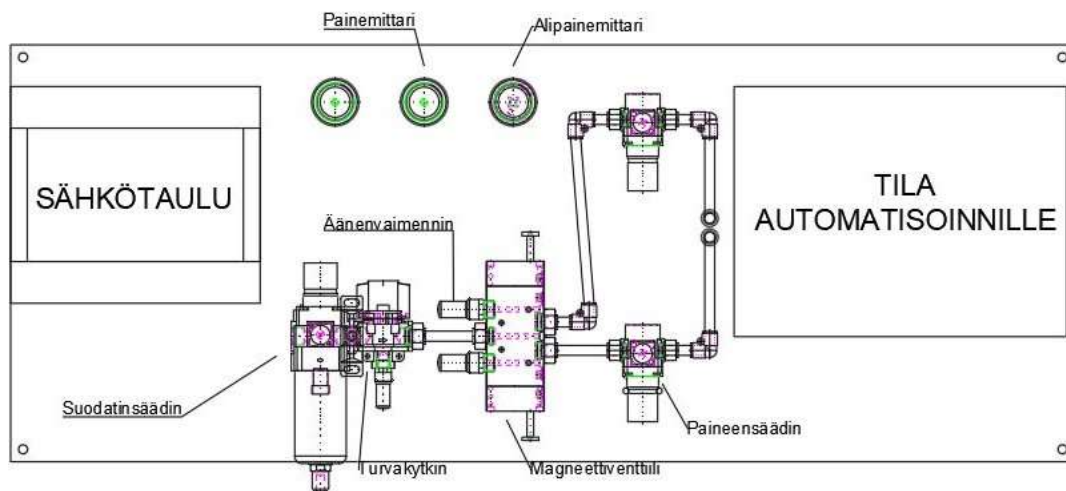
Kuva 14. Laitteeseen suunniteltuja kiinnikkeitä.

Paineilma- ja alipainejärjestelmien kokoaminen aloitettiin sylintereistä, joihin kiinnitettiin vastusvastaventtiilit, imukupit pallonivelineen sekä sylinterien nivelkiinnitysten alaosat. Nivelten yläosat kiinnitettiin kehkoon teetettyihin osiin, jotka ripustettiin tukipalkkeihin kuvassa 15 nähtävällä tavalla. Saranoiden ylä- ja alaosat eivät olleet täysin yhteensopivia, joten niitä piti hieman työstää muun muassa metallijyrsimellä.

Tämän lisäksi saranoita varten tehtiin nailonputkesta sopivat holkit liiallisen liikkumavaran poistamiseksi. Kuvassa 15 on esitetty sylinterien molemmissa päissä olevat, edellä mainitut jouston mahdollistavat saranat ja nivelet, joiden avulla paneeleja voitaisiin testata laitteessa myös pienissä kallistuskulmissa todellisten paneeliasennusten simuloimiseksi.



Kuva 15. Sylintereiden ripustuksen sarana vasemmalla ja imukupin pallonivel oikealla.



Kuva 16. Laitteen käyttötaulun etuosan suunnitelma ja toteutunut asettelu.

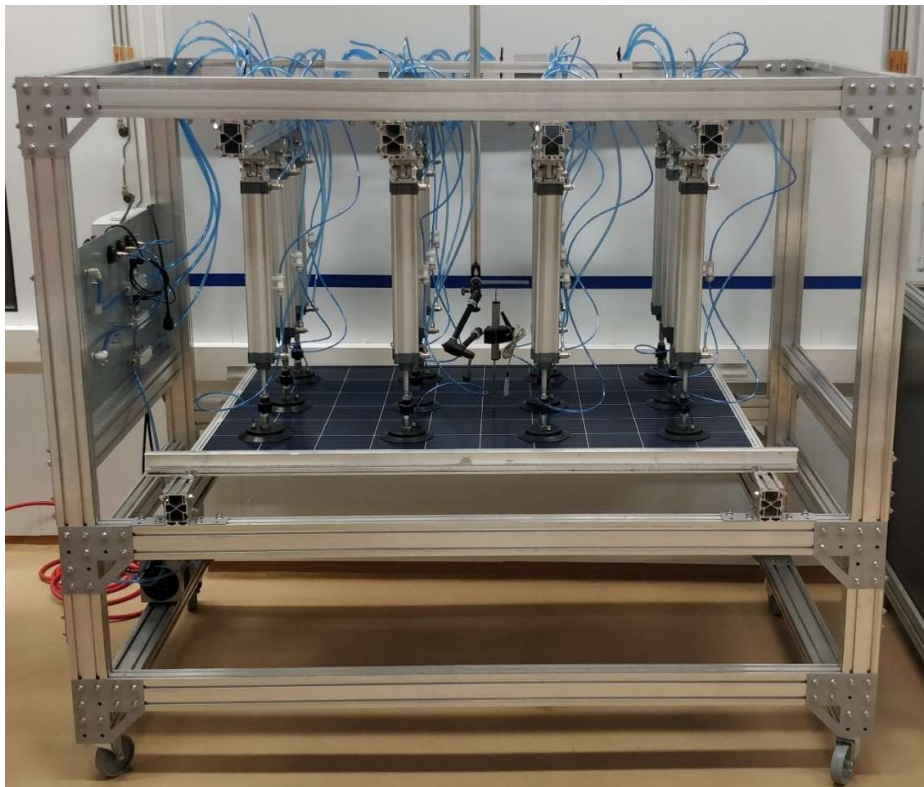
Pneumatiikka- ja alipainekomponentteihin laitettiin kiinni pikaliittimet, minkä jälkeen komponentit kiinnitettiin teetettyyn käyttötauluun kuvassa 16 nähtävän suunnitelman mukaisesti. Tauluun porattiin kiinnitystöiden edistyessä vielä lisää reikiä verrattuna alkuperäiseen, liitteen 2 sivulla 5 esitettyyn kuvaan, sillä kaikkien osien sijaintia taulussa ei oltu osattu arvioida suunnitteluvaiheessa. Kuvasta 16 huomataan myös, että käyttötauluun jätettiin myös riittävästi tyhjää tilaa mahdollisen automatisoinnin vaatimille lisäyksille.



Kuva 17. Paineilma- ja alipainelinjojen jakotukit sekä 3-tieventtiilit sylinterien tukipalkkien yläpuolella, kiinnitettynä suunniteltuun kappaleeseen.

Tukipalkkien yläpuolelle, sylinterien päälle laitettiin pneumatiikkaputkien jakotukit ja 3-tieventtiilit, erikseen teetetyn levykappaleen avulla, kuvan 17 mukaisesti. Lopuksi järjestelmään lisättiin itse putket, joilla yhdistettiin kaikki komponentit ja luotiin kolme erillistä linjaa; yksi alaspäin, toinen ylöspäin suunnattavalle liikkeelle sekä kolmas alipaineelle, joka kulki imukupeista ilmansuodattimien kautta tyhjiöpumpulle. Kuvassa 18 nähtävän valmiin laitteen paineilma- ja alipainelinjojen kaaviot löytyvät liitteestä 3.

Opinnäytetyön liitteen 4 piirustuksen mukaiset testilaitteen sähkötyöt suoritti Turun AMK:n projekti-insinööri. Sähkötyöissä otettiin huomioon mahdollisuus laitteen automatisointiin tulevaisuudessa.



Kuva 18. Testilaitte tämän työn puitteissa rakennetussa lopullisessa muodossaan.

4.6 Testien aikaiset mittaukset

Testilaitteen suunnittelussa erittäin oleellinen osa oli määrittellä, mitä asioita pitää testin aikana seurata ja miten seuranta toteutetaan. Esimerkiksi järjestelmän paineen tarkka, digitaalinen mittausta oli testin luotettavuuden kannalta erittäin tärkeää. Järjestelmän toimilaitteissa olleet, sekä niiden lisäksi hankitut analogiset mittarit näyttivät suuntaa-antavia lukemia järjestelmän paineista, mutta tarkkaa paineenmitoitusta niiden kanssa oli vaikeaa saavuttaa. Niinpä järjestelmän tietojen lukemista varten käytettiin kuvan 19 Ahlborn ALMEMO® 2690-8A dataloggeria, eli tallentavaa tarkkuusmittaria, erilaisista sensoreista saatavan tiedon lukemiseen.

Kyseisen dataloggerin virhemarginaaliksi on ilmoitettu mitatusta arvosta 0,02 %:a, ± 2 lukua. (Ahlborn 2018a)



Kuva 19. Mittauksissa käytetty ALMEMO®-tarkkuusmittari.

Testilaitteeseen hankittiin ja asennettiin molempiin paineilmapuolen linjoihin tarkkuusmittarin kanssa yhteensopivat, kuvan 20 vasemman reunan mukaiset painesensorit, jotka syöttivät tietoa dataloggeriin. Tarkan digitaalisen syötteen avulla voitiin manuaalisesti säätää järjestelmän paine mahdollisimman lähelle haluttuja arvoja. Sensoreiden antamille tuloksille valmistaja on alla olevan taulukon 5 mukaan määritellyt $\pm 0,5\%$ virhemarginaalin. Lisäksi dataloggerin mittausresoluutio paineelle on 0,01 baaria, vaikka näytössä lukemat olivatkin 0,001 baarin tarkkuudella. Testaukset suoritettiin normaali-ämpötilassa, joten taulukossa mainittua lämpötilan aiheuttamaa virhemarginaalia mitaustarkkuuteen ei syntynyt. (Ahlborn 2018a; Ahlborn 2018d)

Taulukko 5. Ahlborn FDA 602 L painesensorien mittatarkkuustiedot. (Ahlborn 2018d)

Technical Data:

Overload	Two times final value
Output signal	0.2 to 2.2 V
Accuracy class (linearity + hysteresis + reproducibility)	$\pm 0.5\%$ of final value
Total error range	
0 to +50 °C	$\pm 1.0\%$ of final value
-10 to +80 °C	$\pm 1.5\%$ of final value
(linearity + hysteresis + reproducibility + temperature coefficients + zero-point + range tolerance)	
Response time (0 to 99 %)	<5 ms
Nominal conditions	22°C ± 2 K, 10 to 90 % RH, non-condensing



Kuva 20. Testauksissa käytetyt sensorit. Vasemmalta oikealle, painesensori, siirtymäsensori, sekä jännitemittari.

Paineenmittauksen lisäksi toinen tärkeä seurattava asia oli paneelin sähkövirta. Standardi määrittelee, että testien aikana paneelin läpi tulee johtaa sähköä, eikä virtapiirissä saa ilmetä ajoittaista katkeamista tai heilahtelua. Seuranta toteutettiin siten, että tasa-sähkövirtalähde kytkettiin paneelin kaapeleihin ja tähän liitettiin rinnankytkennällä kuvan 20 oikean reunan jännitemittari, jonka tiedot saatiin luettua dataloggerilla. Mittaukseen käytetyllä ALMEMO® ZA9900AB4 -jännitemittarilla kyettiin mittamaan paneelin läpi kulkevaa jännitettä 0,1 V:n resoluutiolla ja 0,1 %:n, ± 2 luvun tarkkuudella. (Ahlborn 2018b)

Kolmas oleellinen testien aikana mitattava suure oli aurinkopaneelien taipuma, kun niitä painettiin ja vedettiin. Aurinkopaneelien taipuman mittaamista varten paneelin yläpuolelle viritettiin kuvassa 20 keskellä oleva siirtymäsensori, jolla saatiin mitattua paneelin taipuminen alas tai ylös. Sensorin mittausresoluutio on 0,01 mm. (Ahlborn 2018c) Taipuman mittaamisella ei varsinaisesti ole merkitystä esimerkiksi testausta käsittelevien standardien kannalta, mutta se antoi konkreettisen kuvan siitä, miten kestäviä ja joustavia aurinkopaneelit ja etenkin niissä käytettävä karkaistua lasi on.

5 PANEELITESTAUKSET

Tavoitteena oli mitata laitteen sensoreilla testien aikaiset paineet, paneelien läpi kulke-
neen jännitteen arvo sekä paneelien taipumat niiden keskikohdista. Testien vaikutusten
todentamiseksi kaikille paneeleille teetettiin lisätestit kuormitustestejä ennen, että niiden
jälkeen. Testit tehtiin QuickSun® 550CE -laitteella, jolla saatiin paneeleista muun mu-
assa elektroluminesenssikuvat sekä todellinen teho. Lisätestausten tarkoituksena oli
pystyä sekä visuaalisesti että sähkötehon arvojen avulla vertailemaan kuormitustestin
piikkennoille aiheuttamia vaurioita, sekä näiden mahdollisten kennoaurioiden vaikutuk-
sia paneelien sähköntuotantokapasiteettiin lyhyellä aikavälillä.

Testauksia varten hankittiin yhdeksän kappaletta aurinkopaneeleja, tehoiltaan noin 260-
270 Wp. Paneelien koko oli noin 1,6 m kertaa 1 m, ja kuten aiemmin mainittiin, valmis-
tajan ilmoittamat paneelien suunnittelukuormat olivat 5400 Pa alaspäin ja 2400 Pa ylös-
päin suuntautuvaa staattista painetta.

Testissä käytettäviä paineita voi verrata Suomen alueen lumikuormiin. Kattorakenteille
on Suomessa omat määräyksensä lumikuormien keston suhteen ja paneelienkin tulee
kestää niiden paino. Rakenteiden suunnittelussa käytetään aluekohtaisten peruslumi-
kuormien arvoja lujutta määritettäessä. Peruslumikuorma-arvot ovat hyvin harvoin
esiintyviä, maksimaalisia kuormituksia, joita suunnitteluvaiheessa vielä kasvatetaan eri-
laisilla varmuuskertoimilla. Varmuuskertoimien suuruuteen vaikuttaa rakennusten kor-
keus, kattojen muodot ja mahdolliset lumen kinostumista aiheuttavat esteet katoilla.
(Makkonen 2011; Ympäristöministeriö 2018)

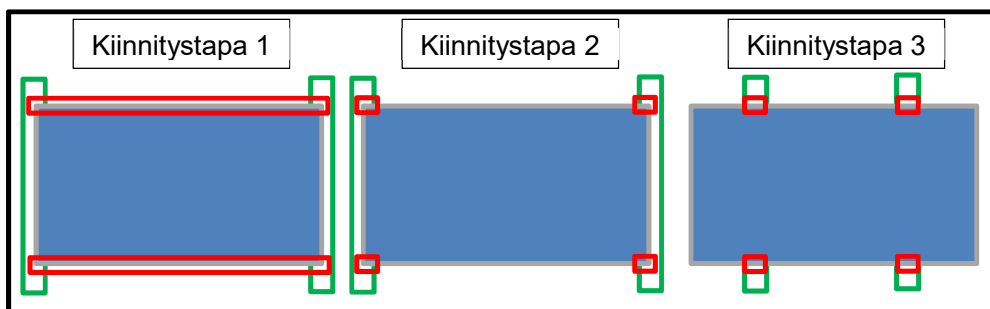
Peruslumikuorma vaihtelee Suomessa Länsirannikon 140 kg/m² ja Lapin jopa 260 kg/m²
kuorman välillä. Peruskuorman arvojen ja varmuuskertoimen avulla voidaan Suomessa
esiintyviä suurimpia lumikuormia arvioida seuraavasti:

$$\left(260 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \text{Varmuuskerroin } 2,5\right) * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 6376,5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \sim 6380 \text{ Pa}$$

Varmuuskerroin 2,5 ottaa huomioon jo hyvin suuret ja epätodennäköiset kinostumiset.
(Makkonen 2011; Ympäristöministeriö 2018)

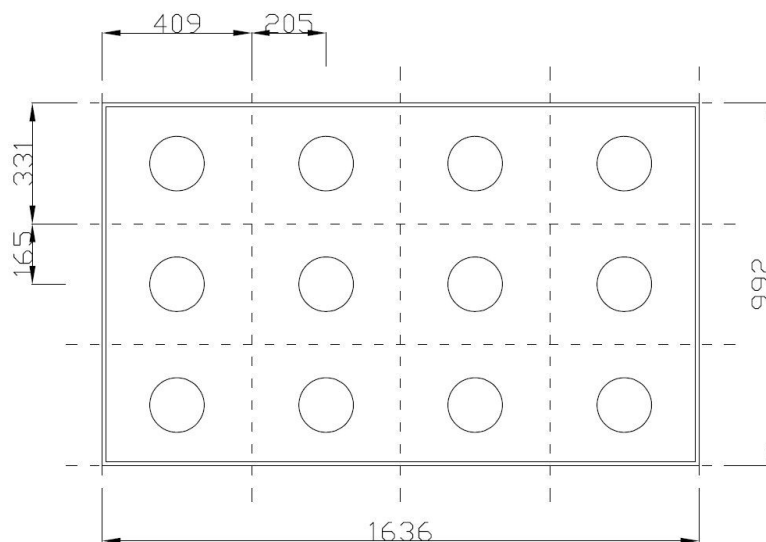
5.1 Testiasetus

Standardi määrittelee testaukset suoritettavaksi huonoimmalla mahdollisella kiinnitystavalla, jonka paneelivalmistaja on määritellyt sallituksi tavaksi kiinnittää aurinkopaneelinsa kiinnitystelineisiin. Tämän työn kannalta oli mielekkäämpää testata kuormitusta useammalla eri kiinnitystavalla erilaisten vertailutulosten saamiseksi. Alla olevassa kuvassa 21 on kuvattu testeissä käytetyt kolme kiinnitystapaa.



Kuva 21. Kolme eri kiinnitystapaa, joilla paneeleja testattiin. Kiinnityspisteet/-alueet punaisella, kehon tukipalkit vihreällä.

Sylinterien ja niiden päissä olevien imukuppien sijoittelu kaikille testattaville paneeleille on kuvattuna alla olevassa kuvassa 22. Mahdollisimman tasaisen kuormituksen aikaansaamiseksi imukupit sijoiteltiin paneelin pinnalle kuvassa olevien mittojen mukaisesti, mahdollisimman tasaisin välein.



Kuva 22. Imukuppien sijoittelu tasaisesti aurinkopaneelin pinnalle.

Jokaisella valitulla kolmella kiinnitystavalla oli tarkoitus testata kolme kappaletta aurinkopaneeleja, jotta saataisiin samoilla parametreilla suoritettujen testien tuloksia vertailtavaksi. Kaikki yhdeksän paneelia testattiin vertailun vuoksi samoilla, aiemmin lasketuilla järjestelmäpaineilla. Alla olevassa taulukossa 6 on esitetty työn testaussuunnitelma, jossa on lueteltuna paneelinumerot, niiden kiinnitystavat sekä testien järjestelmäpaineet.

Taulukko 6. Suoritettavien testien testaussuunnitelma.

Paneeli nro	Kiinnitystapa	Testauspaine alaspäin (bar)	Testauspaine ylöspäin (bar)
1	<i>Kiinnitystapa 1</i>	3,51	1,74
2	<i>Kiinnitystapa 1</i>	3,51	1,74
3	<i>Kiinnitystapa 1</i>	3,51	1,74
4	<i>Kiinnitystapa 2</i>	3,51	1,74
5	<i>Kiinnitystapa 2</i>	3,51	1,74
6	<i>Kiinnitystapa 2</i>	3,51	1,74
7	<i>Kiinnitystapa 3</i>	3,51	1,74
8	<i>Kiinnitystapa 3</i>	3,51	1,74
9	<i>Kiinnitystapa 3</i>	3,51	1,74

Standardin määritelmistä poikettiin myös yksittäisten paneelin testausten määrässä. SFS-EN 61215-2:2017 -standardin mukaan jokaiselle testattavalle paneelille tulee suorittaa kolme testaussykliä, joista jokaisessa paneelia painetaan kerran tunnin verran alaspäin sekä vedetään toisen tunnin ajan ylöspäin. Yhteensä yhden paneelin testaamiseen tulisi siis käyttää kuusi tuntia. Työn ylivoittamisen hillitsemiseksi kutakin yhdeksää paneelia testattiin ainoastaan yhden testikierroksen ajan.

Tavoitteena oli siis painaa jokaista paneelia ensin yhden tunnin ajan 3,51 baarin järjestelmäpaineella, minkä jälkeen välittömästi jokaiselle paneelille tuli tehdä yhden tunnin pituinen vetotesti 1,74 baarin järjestelmäpaineella. Paineiden tarkkaa säätämistä vaikeutti säädön manuaalisuus, mutta kaikissa testeissä testauspaine pyrittiin pitämään suurin piirtein määritellyissä luvuissa.

5.2 Testaukset ja niiden tulokset

Testaukset suoritettiin pääosin suunnitelman mukaisesti. Yhdellä kiinnitystavalla suunnitelmaa jouduttiin soveltamaan, koska aurinkopaneeli rikkoutui kiinnitystavan ensimmäisen testin aikana. Kyseistä paneelia lukuun ottamatta kaikki paneelit läpäisivät testien jälkeen suoritettua visuaalisen tarkastuksen, eli ehjänä pysyneille paneeleille ei koitunut paljaalla silmällä havaittavia merkittäviä vaurioita. Alla olevaan taulukkoon 7 on merkattu kaikille paneeleille suoritettujen testien toteutuneet järjestelmäpaineet, sekä rikkoutuneelle paneelille testin aikana mitattu suurin järjestelmäpaine. Lisäksi taulukkoon merkattiin ennen testejä ja niiden jälkeen tehdyn pikaisen visuaalisen tarkastuksen tulokset, paneelien maksimitaipumat sekä paneelien läpi johdetun virtapiirin tila kunkin testin ajalta. Tunnin pituiset mittausjaksot aloitettiin heti, kun haluttu järjestelmäpaine oli saavutettu ja säädetty tasaiseksi.

Taulukko 7. Suoritetut testit ja niiden onnistuminen.

Kiinnitystapa	Paneelinro	Vis. tarkastus ennen	Testauspaine ↓ (bar)	Testauspaine ↑ (bar)	Vis. tarkastus jälkeen	Max. taipuma (mm) ↓/↑	Virtapiiri
1	1	OK	3,51	1,74	OK	48,26 /39,09	OK
	2	OK	3,51	1,74	OK	48,84 /38,05	OK
	3	OK	3,51	1,74	OK	46,52 /40,48	OK
2	4	Ei OK	3,51 (1,72)	-	-	62,13 / -	OK
	5	-	-	1,74	OK	- /48,13	OK
	6	OK	1,56	-	-	53,65 / -	OK
3	7	OK	3,51	1,74	OK	53,78 /41,92	OK
	8	OK	3,51	1,74	OK	50,99 /46,66	OK
	9	OK	3,51	1,74	OK	52,37 /50,38	OK

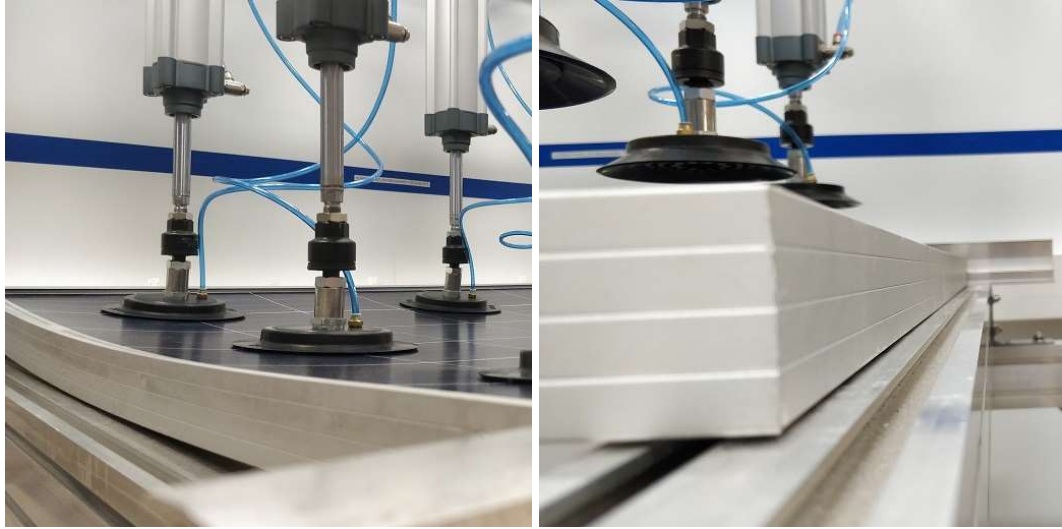
5.2.1 Kiinnitystapa 1

Ensimmäisenä testattiin aurinkopaneelien kiinnitystapaa, joka arvioitiin staattisen kuorman kestävyden kannalta parhaaksi. Kiinnitystavalla 1 aurinkopaneelin koko pidempi sivu oli tuettu asennustapaan kuuluvalla alumiiniprofililla, kuten kuvasta 23 näkyy.



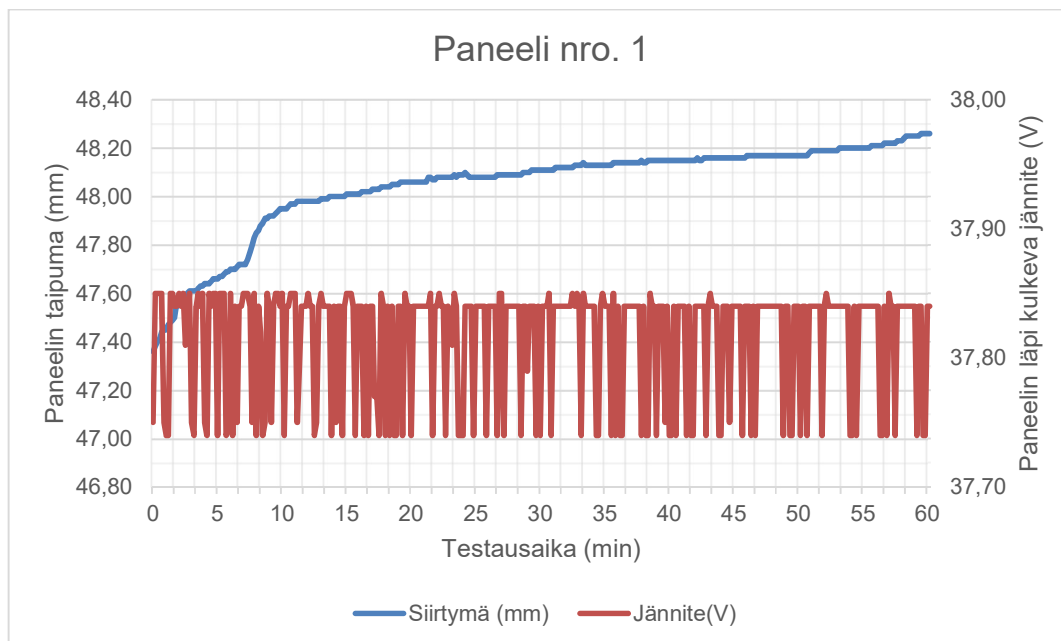
Kuva 23. Kiinnitystapa 1:llä kehikkoon kiinnitetty aurinkopaneeli, veto ylöspäin.

Vaikka asennusprofiilitkin taipuivat kuormituksen alla, kaikki kolme paneelia kestivät moitteettomasti niille aiheutuneen kuormituksen. Ainoa testien jälkeen havaittava vaikutus paneeleissa oli päätykehysten erittäin vähäinen taipuma, jonka voi juuri havaita alla olevasta kuvasta 24.



Kuva 24. Vasemmalla kehyksen taipuminen testin aikana, oikealla juuri ja juuri havaittavissa oleva kehyksen taipuma testin jälkeen (kulmat keskiosaa ylempänä).

Kiinnitystapa 1 oli lopullisten taipumamittausten perusteella, kuten alun perin ajateltiinkin, fyysisesti vahvin tapa asentaa aurinkopaneeli. Taulukon 7 taipumalukuja vertaillen huomataan, että tällä tavalla kiinnitetyt paneelit taipuivat huomattavasti vähemmän molempiin suuntiin, kuin muilla kiinnitystavoilla. Keskimäärin paneelit taipuvat enintään noin 48mm alaspäin keskivaiheiltaan. Alla oleva kuvio 3 esittää, miten esimerkiksi ensimmäisenä testatun paneelin pinta taipui alaspäin vähitellen tunnin kestäneen testin aikana. Taipumavauhti hidastui merkittävästi ensimmäisen 10 minuutin jälkeen, mutta ei lopullisesti tasaantunut koko testin aikana. Paneelin jännitteessä puolestaan havaittiin ajoittaista noin 0,1 V heilahtelua. Tämä ei testin kannalta ollut merkittävää, sillä se johtui todennäköisesti jännitelähteen ja mittalaitteen mittausvirheestä.



Kuvio 3. Paneelin nro. 1 taipuman kehitys ja jännitteen seuranta tasaisessa paineessa tunnin ajan.

5.2.2 Kiinnitystapa 2

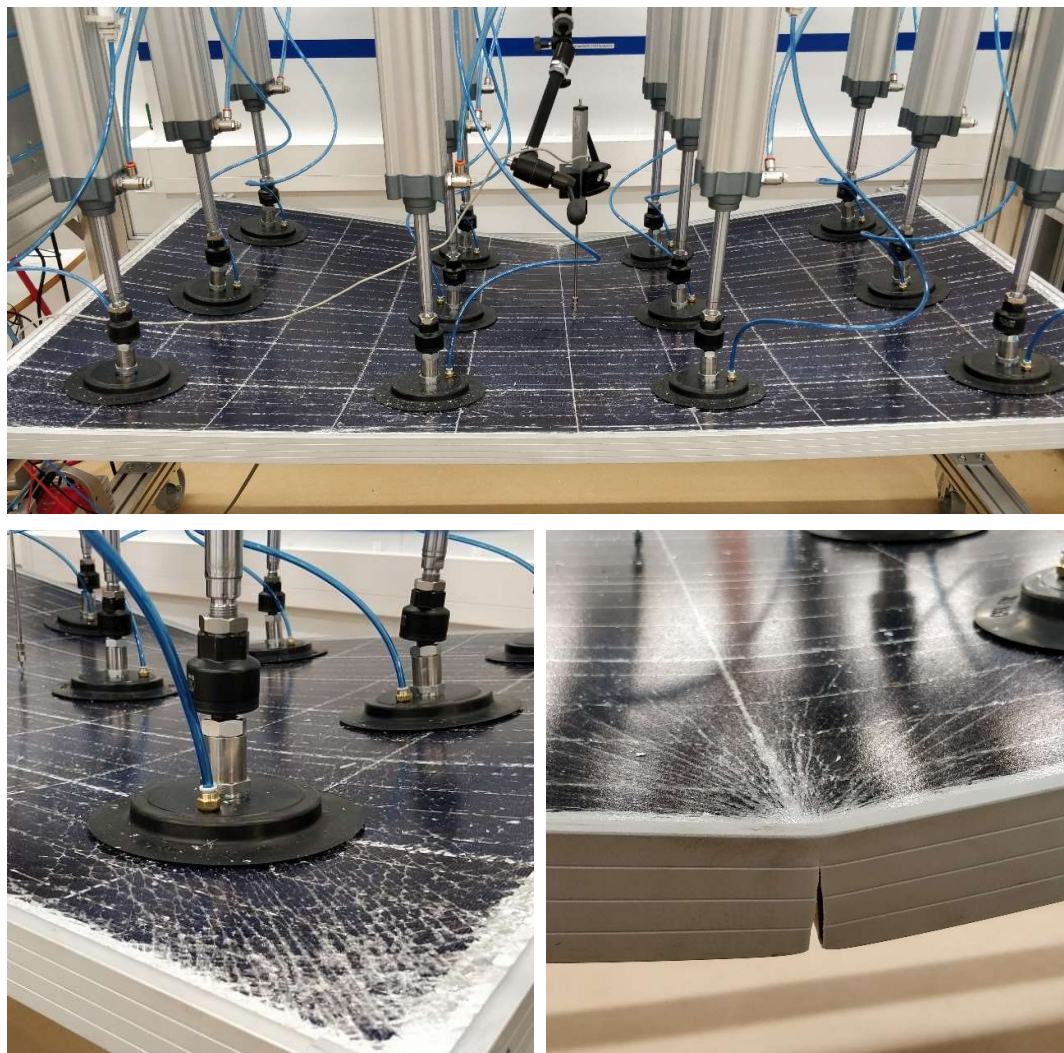
Kiinnitystapa 2 oli lähtökohtaisesti ajateltuna paneelien kannalta testausten huonoin asennustapa. Aurinkopaneeli kiinnitettiin tukipalkkeihin ainoastaan neljästä pisteestä, jotka olivat mahdollisimman kaukana toisistaan. Tällöin suurimman vastuun paneelin rakenteen tukemisesta otti kehysten pitkät sivut, sillä laitteen kehyksen poikittaispalkit tukivat kehyksen lyhyitä reunoja. Tuesta oli tosin hyötyä ainoastaan alaspäin suunnatussa kuormituksessa. Kuva 25 osoittaa, miten paneeli taipuu kuormituksen alla, kun pitkiä sivuja ei oltu millään tavalla tuettu.



Kuva 25. Kiinnitystapa 2:lla kehikkoon kiinnitetty aurinkopaneeli.

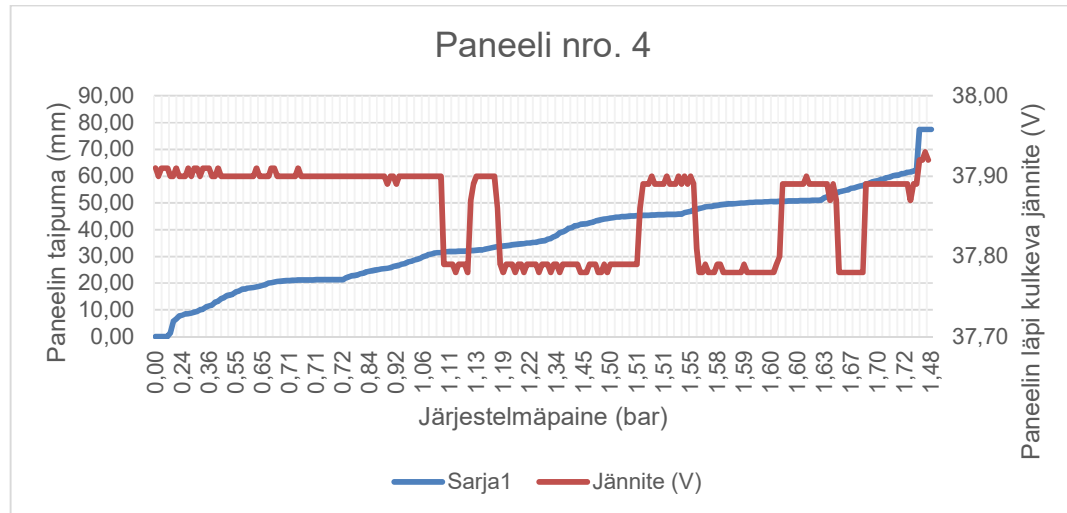
Heti ensimmäisen testauksen aikana kävi ilmi, ettei kyseinen kiinnitystapa soveltunut täyttämään ainakaan standardin tai testattujen paneelien valmistajan määrittelemää, eli korotettua 5400 Pascalin suunnittelukuormaa. Paneelin kehys antoi periksi noin 1,72 baarin järjestelmäpaineessa, katkesi lähes kokonaan paneelin pitkän sivun puolivälistä, mikä johti paneelin äkilliseen romahtamiseen ja lasin pirstaloitumiseen. Tällöin paneelin pinnalle oli jakautunut tasaisesti yhteensä noin 6440 Newtonin voima, joka vastasi noin 3970 Pascalin testauspainetta paneelin pinnalla. Standardin vähimmäisvarmuuskertoimella jakamalla saatiin katkeamishetken suunnittelupaineeksi noin 2645 Pascalia. Kyseiselle asennustavalle voisi siis todellisuudessa määrittää saman 2400 Pa:n suunnittelukuorman, kuin on määritelty paneelia ylöspäin vedettäessä. Tällöin kuormaan voisi vielä lisätä vähintään 1,5 varmuuskertoimen ilman, että paneeli hajoaisi eli hajoamis-paine 3970 Pascalia ei ylity.

Alla oleva kuva 26 havainnollistaa hyvin alumiinikehyksen katkeamisen, sekä sen vaikutukset lasille ja koko paneelille. Lasi hajosi karkaistulle lasille tyypilliseen tapaan, pirstaloituen koko paneelin alalta. Rikkoutuneen lasin, sekä katkenneen ja pahasti vääntyneen alumiinikehyksen takia paneelia numero 4 ei voitu enää jatkotestata. Paneelin voitiin pelkästään silmämääräisesti todeta olevan täysin käyttökelvoton.



Kuva 26. Rikkoutunut paneeli, jonka toisella pitkällä sivulla näkyy alumiinikehyksen mur-
tumisesta aiheutunut romahdus.

Kuvio 4 esittää rikkoutuneen testipaneelin taipumista kuormituksen lisääntyessä. Paneeli oli taipunut keskivaiheiltaan jo noin 62 mm alaspäin, kunnes sen rakenne petti. Jännitteen seurannassa oli kuormitusta nostettaessa nähtävissä noin 0,1 V:n heilahteluja, mutta varsinaista virtapiirin katkeamista ei missään kohtaa havaittu tapahtuvaksi. Tämä selittyy piikennostoa sitovien metallijohtimien taipumisesta katkeamisen sijaan, mikä ei ainakaan välittömästi vaikuttanut jännitemittaukseen.



Kuvio 4. Paneelin nro. 4 taipuman kehitys ja jännitteen seuranta järjestelmäpaineen noustessa, paneelin hajoamispisteeseen asti.

Lopuille kahdelle paneelille, jotka oli tarkoitus testata kyseisellä kiinnitystavalla, päätettiin suorittaa kevennetyt testit. Paneelilla numero 5 suoritettiin ainoastaan vetotesti ylöspäin ja kuudennelle paneelille painotesti alaspäin kevennetyllä 1,56 baarin järjestelmäpaineella, joka oli verrattavissa aiemmin mainittuun, mahdolliseen 2400 Pa:n suunnittelu-kuormaan. Molemmat paneelit säilyivät ulkoisesti ehjinä, joten niille oli mahdollista suorittaa aiotut jatkotestit.

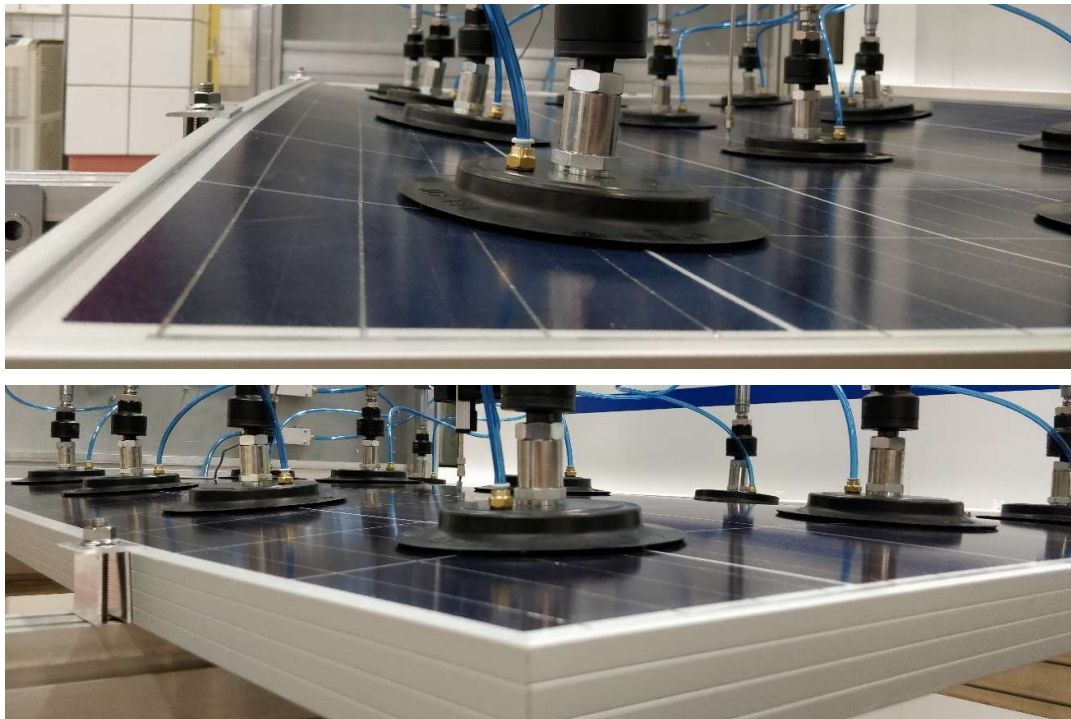
5.2.3 Kiinnitystapa 3

Kolmas kiinnitystapa on hyvin yleinen etenkin vinokatoille tehtävissä aurinkopaneeli-asennuksissa. Kiinnitystavan yleisyyden takia, oletuksena oli, että tällä kiinnitystavalla paneelien tulisi kestää niille asetetut kuormat ongelmitta. Kehikon tukipalkit asetettiin paneelien kehyksissä olevien sisempien kiinnitysreikien kohdille noin 39 cm:n päähän paneelin päädyistä, ja paneeli kiinnitettiin kuvan 27 mukaisesti neljällä kiinnikkeellä palkkeihin. Kuten ensimmäiselläkin kiinnitystavalla, kaikki kolme paneelia kestivät niille suoritettut testit ja pysyivät silmämääräisesti ehjinä.

Kuva 27 havainnollistaa hyvin, kuinka suuri merkitys tukipisteiden tuomisella keskemälle paneelia oli, verrattuna kulmista tehtyyn, kuvassa 25 näkyvään kiinnitykseen. Kun kehyksen jännevälit olivat lyhyemmät, se ei päässyt taipumaan samalla tavalla ja suurin jousto tapahtui paneelin lasissa, kuten kuva 28 osoittaa.

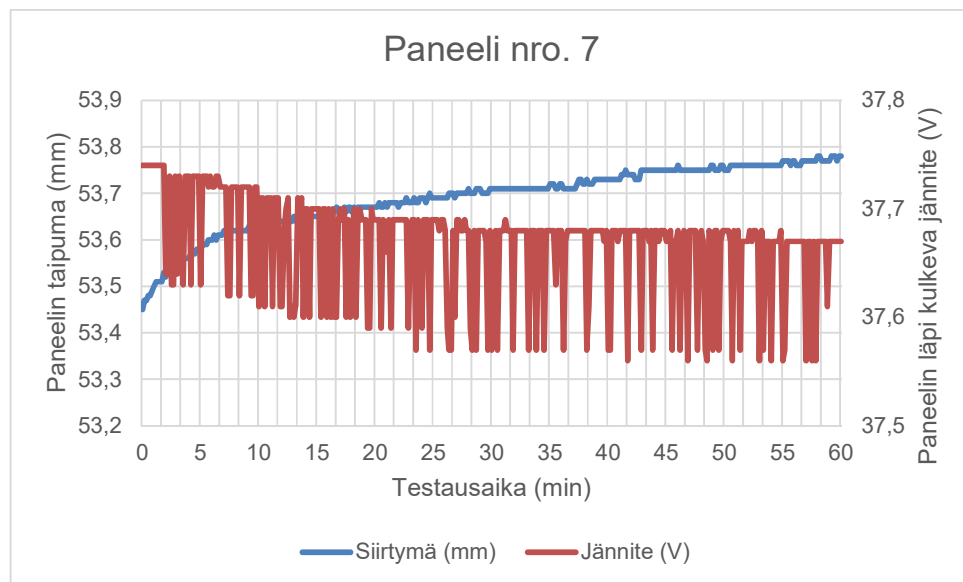


Kuva 27. Kiinnitystapa 3:lla kehikkoon kiinnitetty aurinkopaneeli.



Kuva 28. Kiinnitystapa 3:lla kehikkoon kiinnitetyn aurinkopaneelin lasin taipuminen molempiin suuntiin.

Kiinnitystavalla 3 kiinnitetyn seitsemannen testipaneelin taipuman ja jännitteen mittauksen tuloksista saatiin hieman saman näköinen kuvaaja kuvioon 5, kuin ensimmäisellä kiinnitystavalla kuviossa 3. Ensimmäisen kymmenen minuutin aikana taipumisvauhti tasaantui ja koko tunnin mittaisen testijakson aikana taipuma nousi vain joitain millimetrin kymmenesosia. Keskimääräinen taipuma alaspäin kolmannella kiinnitystavalla oli hieman alle 52,5 mm. Ero ensimmäiseen kiinnitystapaan oli merkittävä, sillä taipuma oli useita millimetrejä enemmän kiinnitystavalla 3. Jännitteen mittauksessa ei ollut havaittavissa merkkejä virtapiirin katkeamisesta tai muusta merkittävästä muutoksesta.



Kuvio 5. Paneelin nro. 7 taipuman kehitys ja jännitteen seuranta tasaisessa paineessa tunnin ajan.

5.3 Jatkotestit

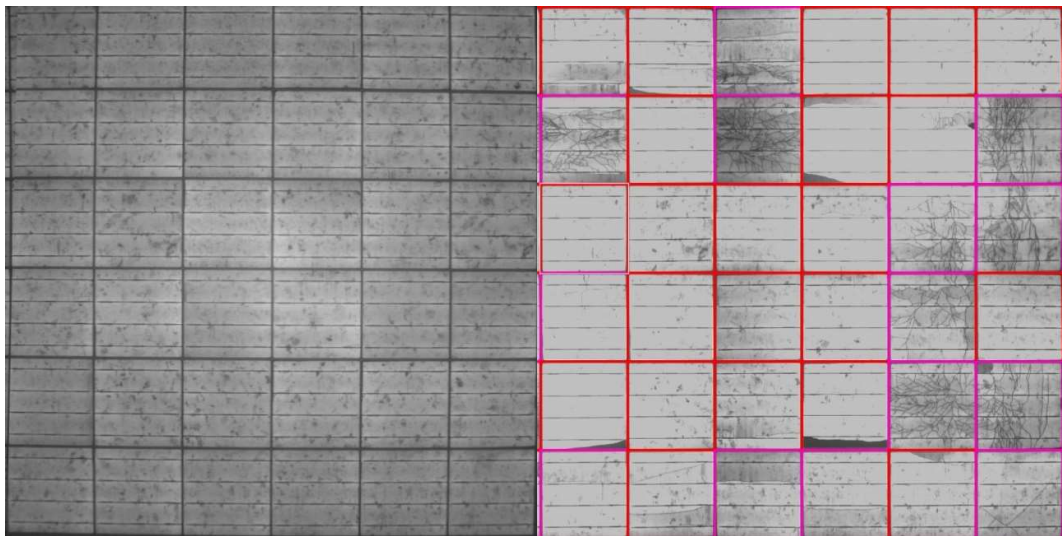
Aurinkopaneelien rasitustestien tulokset eivät aina ole näkyviä. Ellei kyseessä ole nimenomaan niin sanottu rikkova testi, jonka tarkoituksena on fyysisesti hajottaa paneeli, testien jälkeen paneelit saattavat visuaalisesti vaikuttaa olevan täysin kunnossa. Paneelien rakenteessa saattaa kuitenkin olla merkittäviäkin vikoja, joiden havaitsemiseksi täytyy suorittaa lisätestauksia.

Tässä tapauksessa poikettiin kappaleessa 3.4.1 esitetystä standardin SFS-EN 61215-1:2016 testausprosessin testisarjasta E ja paneelien jatkotestaus suoritettiin Endeaksen QuickSun® 550CE -laitteella, kuten jo aiemmin mainittiin. QuickSun®-laitteella otettiin

paneeleista elektroluminesenssikuvat piikkenojen kunnon tarkastamiseksi, mitattiin paneelin I - V -käyrä ja siihen liittyvät suureet niin kutsutulla "flash"-testillä sekä tarkastettiin paneelin sähköinen turvallisuus. Kaikki paneelit testattiin jo ennen rasiustestejä kyseisellä laitteella vertailutulosten saamiseksi. Laite asetettiin suorittamaan kaikki edellä mainitut mittaukset ja kuvaukset STC-, eli standarditestaolosuhteissa, mikä tarkoitti noin 1000 W/m^2 valosäteilyä, vakioilmanpainetta ja noin $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaa.

Käytännössä paneeleille suoritettiin siis muut SFS-EN 61215-1:2016 -standardin testausprosessin mukaiset jälkitestit upotustestiä (MQT15) lukuun ottamatta. Kyseistä sähköisen tiiveyden testaamista ei tämän työn puitteissa ollut mahdollista toteuttaa, sillä paneelien upotusta varten olisi pitänyt rakentaa oma erillinen allas.

5.3.1 EL-kuvaus

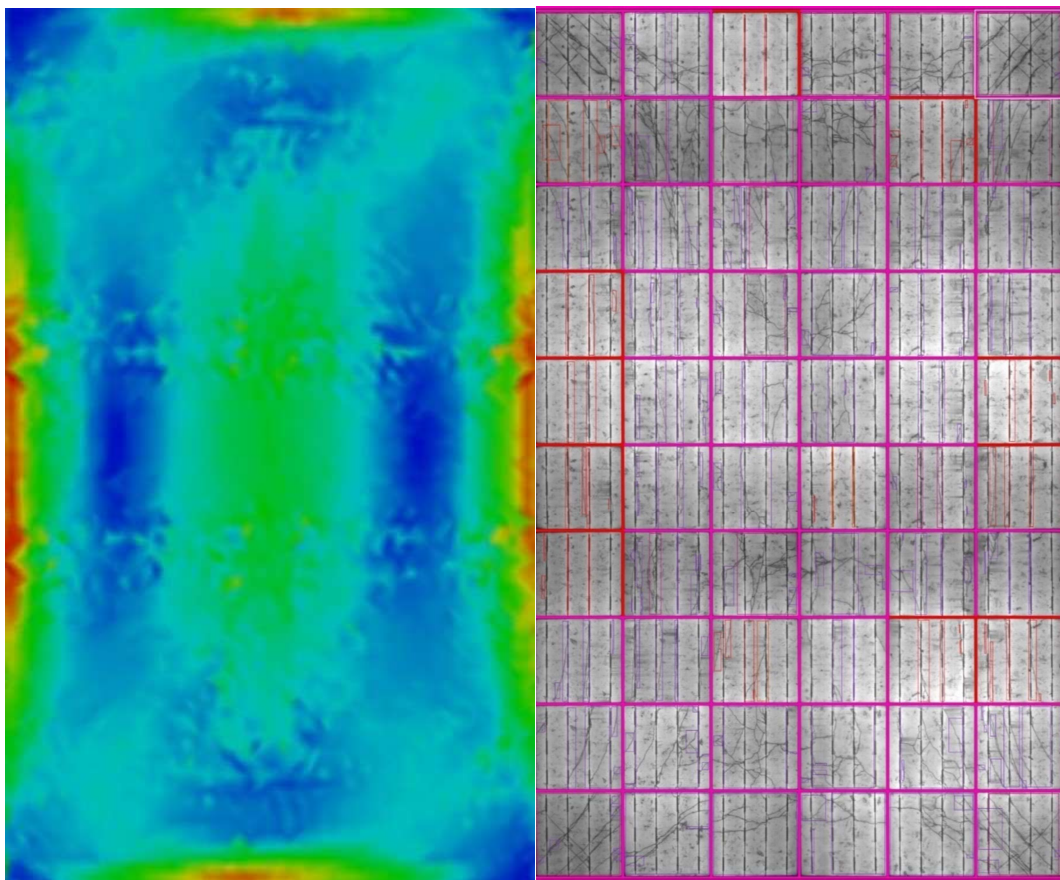


Kuva 29. Testipaneeli numero 1:n elektroluminesenssikuvien vertailua paneelin oikeasta reunasta. Vasemmalla alkuperäinen kuva ehjästä paneelista ja oikealla kuormitustestausten jälkeinen tilanne samoissa piikkennoissa.

Elektroluminesenssikuvien tulokset eivät olleet kovin yllättäviä, ottaen huomioon paneelien päälle asetetut voimat sekä paneelien taipumat testien aikana. Lähes kaikissa paneeleissa oli enemmän tai vähemmän murtuneita piikkenoja, kuten esimerkiksi kuvan 29 paneelissa nro. 1. Kuvassa vasemmalla on paneelin lähtötilanne, jossa se on täysin ehjä, ja oikeanpuoleinen osio näyttää paneelin testien jälkeen. Mitä tummempia kennon tai sen osat ovat, sitä huonompi on niiden sähköntuottokyky. Muutamasta kuvan kennosta on

murtunut pala irti, koska niissä on selkeästi muusta kennosta erottuvia mustia tai tummia alueita.

SFS-EN 61215:1-2016 -standardin haittaa aiheuttavien näkyvien vikojen listalla on mainittu myös haljenneet tai rikkiäiset piikennot, joiden aktiivisesta pinta-alasta yli 10 % on irronnut paneelin virtapiiristä. Tällä kriteerillä todennäköisesti useampi testatuista paneeleista ei olisi testien jälkeen täyttänyt visuaalisen tarkastuksen vaatimuksia. Testausjärjestyksen mukaan visuaalinen tarkastus suoritetaan kuitenkin ainoastaan prosessin alussa, kun taas paneelien testausten jälkeinen arviointi tehtiin sen mittausarvoissa tapahtuneiden muutosten perusteella.



Kuva 30. Testipaneeli numero 7:n elektroluminesenssikuvan vertailua painonjakauman tutkimista varten tehtyyn simulaatiokuvaan (vasen).

Huomion arvoista oli elektroluminesenssikuvista havaittavissa oleva, etenkin kolmannella kiinnitystavalla testatuilla paneeleilla kennojen murtumalinjojen aiheuttama kuvio.

Se muistutti hyvin paljon kappaleessa 4, kuvassa 9 näkyviä, aurinkopaneelin kuormituksesta tehtyjä simulaatiokuvia. Kuvassa 30 on vertailun vuoksi laitettu vierekkäin simulaatiokuva sekä paneelin numero 7 testausten jälkeinen elektroluminesenssikuva, josta samankaltaisuus oli parhaiten havaittavissa. Suurimmat paineet kohdistuivat alueille, jotka on simulaatiossa kuvattu punaisella, keltaisella ja vihreällä. Näillä alueilla murtumien määrä kennoissa näytti kuitenkin huomattavasti vähäisemmältä, kuin tumman- ja vaaleansinisille alueilla, joihin kohdistuivat suhteessa pienimmät paineet testien aikana. Ristiriita murtumien esiintymisessä suhteessa paineisiin selittyy paneelin taipumilla. Tämä oli hyvin havaittavissa etenkin paneelin reuna-alueilla, joissa esimerkiksi kuvan 28 perusteella suurimmat taivutukset kohdistuivat paneelin kulmiin, joissa paine oli kuitenkin alhainen.

Ainoastaan paneelissa nro. 5, jolla suoritettiin pelkästään vetotesti ylöspäin, ei ollut havaittavissa merkittäviä murtumia. Merkittävimpien vaurioiden voidaan siis olettaa tulleen kennoihin, kun paneeleja on painettu alaspäin suuremmilla voimilla.

5.3.2 Muut tulokset

Taulukossa 8 on listattuna paneelien testituloksia, joita vertailemalla pystyi arvioimaan rasiustestin vaikutusta paneeleihin. QuickSun®-laitteen jännitteen ja virran mittaustarkkuudeksi oli ilmoitettu 0,2 %:a, 512:ttä testausta kohden. (Endeas Oy 2018) Tehon mittausten toistettavuus vastaavissa testauksissa on tyypillisesti parempi kuin 0,5 %.

Taulukko 8. Testipaneelien arvoja I - V -käyrän mittauksesta ennen ja jälkeen niille suoritettuja kuormitustestauksia.

Pa- neeli nro.	Ennen / Jäl- keen	I_{SC}/I_{MP} [A]	V_{OC}/V_{MP} [V]	P_{MP} [W]	F.F. [%]	Kennojen hyöty- suhde [%]	Panee- lin hyö- tysuhde [%]	Säh- köinen tuvalli- suus
1	Ennen	9,047 /8,549	37,93 /31,27	267,4	77,91	18,31	16,49	OK
	Jälkeen	9,046 /8,349	37,82 /30,86	257,6	75,30	17,64	15,89	OK
2	Ennen	9,109 /8,598	38,06 /31,36	269,6	77,76	18,46	16,63	OK
	Jälkeen	9,127 /8,460	38,02 /31,06	262,7	75,72	17,99	16,21	OK
3	Ennen	9,126 /8,586	38,01 /31,29	268,7	77,46	18,40	16,57	OK
	Jälkeen	9,152 /8,470	37,97 /30,95	262,2	75,45	17,96	16,17	OK
5	Ennen	8,837 /8,433	37,78 /31,15	262,7	78,68	18,32	16,20	OK
	Jälkeen	9,036 /8,503	37,91 /31,16	265,0	77,37	18,48	16,34	OK
6	Ennen	9,027 /8,504	37,96 /31,24	265,7	77,54	18,20	16,39	OK
	Jälkeen	8,991 /8,393	37,95 /31,08	260,9	76,47	17,87	16,09	OK
7	Ennen	9,252 /8,738	38,33 /31,41	274,5	77,40	18,62	16,93	OK
	Jälkeen	9,179 /8,481	38,09 /30,93	262,4	75,05	17,80	16,18	OK
8	Ennen	8,908 /8,469	37,89 /30,85	261,2	77,39	18,22	16,11	OK
	Jälkeen	9,037 /8,414	37,80 /30,39	255,7	74,87	17,83	15,77	OK
9	Ennen	9,036 /8,559	37,94 /31,19	267,0	77,87	18,62	16,47	OK
	Jälkeen	9,014 /8,365	37,65 /30,55	255,5	75,28	17,82	15,76	OK

Taulukossa on lueteltu kaikki *I-V*-käyrän mittauksesta saadut lukemat sekä merkintä sähköisen turvallisuuden läpäisemisestä. Merkittävää tuloksissa oli, että kaikki paneelit läpäisivät laitteen suorittaman sähköisen turvallisuuden testin. Kaikesta huolimatta paneeleissa ei edes suurimpien rasiusten jälkeen olisi ollut sähköiskuvaaraa, mikäli ne olisi otettu käyttöön.

Kun piikennot murtuvat paneelien sisällä, paneelien teho vääjäämättä heikkenee. Kuten taulukosta 9 voidaan todeta, kaikissa paneeleissa nro. 5:ttä lukuun ottamatta maksimiteho oli rasiustestin jälkeen pienempi, kuin ennen testejä. Pienin tehon heikkenemä saatiin kevyemmän testauksen läpikäyneestä paneelistä nro 6, jonka teho oli tippunut 4,8 W alkuperäisestä 265,7 W:sta. Suurimmat tehohäviöt puolestaan olivat paneeleilla nro 7 ja 9, jotka testattiin kolmannella kiinnitystavalla. Niiden teholumemat alenivat noin 4,3 - 4,4 prosenttiyksikköä.

Taulukko 9. Kunkin testipaneelin tehon alenema watteina ja prosentteina.

Paneeli	1	2	3	5	6	7	8	9
Tehon alenema	-9,8 W	-6,9 W	-6,5 W	2,3 W	-4,8 W	-12,1W	-5,5 W	-11,5W
[W / %]	/	/	/	/	/	/	/	/
	-3,7%	-2,6%	-2,4%	0,9%	-1,8%	-4,4%	-2,1 %	-4,3%

Yllättäen paneelin nro. 5 teho oli testin tuloksena jopa kasvanut alkuperäisestä. Mahdollisina syinä tähän saattoi olla esimerkiksi jokin virhe alkuperäisissä mittauksissa tai lopuksi tehdyissä jatkotesteissä. Toisaalta, rasiustestin aikana mahdollisesti hieman löysässä olleet sähkönjohtavuuteen liittyvät juotokset tai liitokset olivat saattaneet asettua paremmin ja näin ollen saavutettiin marginaalinen tehon lisäys. Todellista syytä on hyvin vaikeaa määrittää ilman tarkempia testauksia.

Kaiken kaikkiaan testattujen paneelien voidaan todeta selvinneen rasiustestistä, sillä kuten standardi vaatii, yhdenkään paneelin teho ei heikentynyt yli 5 prosenttiyksikköä enempää alkuperäisestä ja sähköinen turvallisuus pysyi hyväksyttävällä tasolla. Yhteenvedona voidaan todeta testattujen paneelien olevan, oikein asennettuina, laadultaan riittäviä kestäämään standardien määrittelemiä rasiuksia.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli luoda laite perinteisten, piikkenoja pääkomponenttinaan hyödyntävien aurinkopaneelien staattisen mekaanisen kuormankestävyyden testaamiseksi. Lyhyen testausmenetelmiin perehtymisen jälkeen suunnittelutyön suunta löytyi. Paneelien testaamista varten rakennettiin paineilmalla toimiva laite, jossa pneumaattikasyliinterien avulla kuormitettaisiin paneelin pintaa tasaisella voimalla. Laitteen rakentamisen lisäksi sen toimivuus piti varmentaa suorittamalla kuormitustestaukset, jotka myös dokumentoitiin opinnäytetyöhön tuloksineen.

6.1 Työn tulos

Lopullisena tuloksena oli toimiva, aurinkopaneelien mekaaniseen kuormittamiseen soveltuva testilaitte, sekä laitteella tehtyjen ensimmäisten testien tutkimustulokset. Tutkimustuloksissa selvisi, millaisia kiinnitystapoja kannattaa suosia, jos paneelien on tarvetta kestää suuria kuormia. Jatkotestauksissa myös huomattiin, että visuaalinen tarkastelu ei kerro koko totuutta, sillä näennäisesti ehjinä pysyneissä paneeleissa oli huomattavia sisäisiä vaurioita, jotka ajan myötä tulevat todennäköisesti vain pahenemaan.

Kuten tässäkin työssä havaittiin, paneelien kuormittaminen suurilla mekaanisilla voimilla johti paneelien tehon hienoiseen heikkenemiseen. Kuormitustesti antaa kuitenkin vain viitteellistä tietoa siitä, kuinka suuret kuormitukset paneelien päällä oikeasti aiheuttavat vahinkoa. Vaikka testien jälkeisissä elektroluminesenssikuvissa havaittiin merkittäviäkin murtumia piikkennoissa, paneelien kokonaisteho heikentyi suhteellisen vähän. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että piikkenojen metallijohtimet taipuivat ja pysyivät murtuneisakin kennoissa suurimmalta osin ehjinä, ja näin ollen paneelin toimintakyky ei ainakaan välittömästi laskenut. Ajan myötä kennojen metallijohtimet alkavat kuitenkin murtumakohdissa heikentyä ja katketa, ympäristön tai testiolosuhteiden vaikutuksesta, mikä johtaa suurempaan tehohäviöön, kuin mitä välittömästi kuormitustestin jälkeisissä mittauksissa havaittiin. (Gabor 2016)

6.2 Kehitysehdotukset ja testien epävarmuustekijät

Kuten voi olettaa, näinkin laajassa työssä jää aina tilaa kehittämislle. Sekä itse laitteessa että sillä suoritettavissa testauksissa olisi ollut vielä paljon parannettavaa, mutta työn aikataulu ei antanut enää periksi. Laite jää Turun amk:n käyttöön ja mahdolliset kehityskohteet ovat tulevaisuudessa hyvää harjoitusta eri alojen opiskelijoille.

6.2.1 Testilaitteen kehityskohteita

Testilaitteen lopullinen muoto ajoi asiansa tämän opinnäytetyön suhteen, sillä laitteella oli mahdollista suorittaa haluttuja kuormitustestauksia. Itse laitteeseen jäi vielä useita kehittämiskohteita, joista mahdollisesti tärkein liittyy laitteen turvallisuuteen. Laitteen kaikki sivut jäivät avonaisiksi, mikä aiheuttaa selkeän turvallisuusriskin etenkin, jos testattava paneeli menee rikki. Yksinkertainen ratkaisu olisi sulkea laitteen kaikki sivut plekseillä ja sijoittaa molemmille tai toiselle pitkälle sivulle ovet, joiden kautta paneelit saa vaihdettua ja laitetta pystyisi huoltamaan. Toinen turvallisuuskysymys, joka jäi keskeneräiseksi, oli sähkötoimintojen hätäseis-kytkimen kiinnitys. Kytkin jätettiin tarkoituksella kiinnittämättä, sillä se ajateltiin sijoittaa laitteen etusivulle suojaileksi. Turvallisuuteen ja laitteen käyttöön liittyen tämän työn puitteissa jäi tekemättä vielä käyttöohjeet, jotka ovat tärkeä osa minkä tahansa teknisen laitteen dokumentointia.

Laitteen rakenteeseen voisi tehdä useampiakin muutoksia, kuten esimerkiksi tukevoittaa kehikkoa rakentamalla se teräksestä. Alkuperäiset alumiiniprofiilipalkit osoittivat pientä, silmin havaittavaa taipumista suurimpien raistusten aikana. Toisaalta, alumiiniprofiileihin on mahdollista kiinnittää helposti liikuteltavia osia. Sylinterien, niiden tukipalkkien sekä paneelin tukipalkkien liikuttelun tulisi sujua kohtuullisen vaivattomasti, sillä laitteella oli alunperin tarkoitus pystyä testamaan eri kokoisia paneeleja helposti ja erilaisilla kiinnitysmenetelmillä. Tämän työn testien aikana ainoastaan paneelien tukipalkkeja siirrettiin ja sekin oli nykyisellä kokoonpanolla työlästä.

Mittauspuolella laitteeseen voisi lisätä voiman mittauksen. Tässä työssä ainoastaan järjestelmässä oleva ilmanpaine oli mitattavissa ja sitä kautta oli mahdollista laskemalla selvittää paneelien pinnalle jakautuneiden voimien suuruus. Tätä olisi hyvä pystyä konkreettisesti mittaamaan paneelin alle sijoitettavilla voima-antureilla. Myös paneelin

taipumaa mittaavan etäisyysanturin kiinnitystä voisi parantaa, jotta senkin liikuttelu onnistuisi vaivattomasti.

Laitteen toimintaan merkittävästi vaikuttava muutos, joka olisi mahdollista toteuttaa, on laitteen automatisointi. Nykyisessä laitteessa kaikki säädöt on suoritettava manuaalisesti, mikä johtaa siihen, että testien aikana järjestelmäpaine ei pysynyt täysin tasaisena, vaan sitä piti välillä säätää käsin. Automatisoinnilla haluttu paine pystyttäisiin syöttämään laitteeseen niin, että laite itse valvoo paineen tasaisuutta koko testauksen ajan ja näin testituloksetkin olisivat vertailukelpoisempia keskenään. Lisäksi sylinterien liikkeen nopeutta ja tasaisuutta voitaisiin säätää halutusti. Automatisoinnin tärkeimmät hyödyt olisivat siis toistettavampi testaus ja sitä kautta paremmat vertailutulokset, sekä mahdollisuus dynaamiseen testaukseen ja valmiiden testiohjelmien ajamiseen.

6.2.2 Testausprosessin kehityskohteita

Aurinkopaneelin testausprosessia rakennetulla laitteella olisi mahdollista myös kehittää. Opinnäytetyön testausosio pidettiin tarkoituksella kohtuullisen suppeana, vaikka sillä nykyiselläänkin olisi mahdollista suorittaa laajempia testauksia. Esimerkiksi paneelien kiinnitystapoja olisi voinut tutkia lisää ja suorittaa testejä kaikilla mahdollisilla variaatioilla. Lisäksi paneeleja olisi voitu testata useammalla eri paineella ja suorittaa EL-testit sekä *I-V* -käyrän mittaukset jokaisessa välissä. Tämä olisi mahdollistanut paneelin kunnon heikkenemisen seuraamisen vaiheittain.

Testitulosten kannalta olisi ollut optimaalista, mikäli paneelit oltaisiin voitu kuvata ja mitata juuri ennen testejä ja heti testien jälkeen, ilman että niitä olisi tarvinnut siirtää jatkotestien suorittamista varten. Tällöin olisi minimoitu mahdolliset testien ulkopuoliset vauriot aurinkopaneeleille. Tämän työn puitteissa se ei valitettavasti ollut mahdollista, ja paneeleja piti kuljettaa autolla paikasta toiseen, mikä osaltaan heikensi testitulosten luotettavuutta. Standardien tarkempi noudattaminen prosessissa olisi ollut myös yksi suuri, selkeä parannuskohde.

6.3 Työn arviointi

Opinnäytetyön aihe teoriapuolella oli hyvin laaja, vaikka tarkemmaksi aiheeksi olikin rajattu nimenomaan aurinkopaneelien staattisen mekaanisen kuorman testaus. Tämä käytännössä viittaa suoraan SFS 61215-2:2017 -standardin laadunvarmistustestiin numero 16. Teoriaosioissa oli tarkoitus tuoda esiin aurinkopaneelien rakenteen näennäinen heikkous, millaisia olosuhteita paneelit joutuvat kestäämään, sekä avata relevanttien standardien sisältöä etenkin aiheeseen läheisesti liittyvistä kohdista. Tavoitteena oli saavuttaa parempi ymmärrys, miksi ja miten aurinkopaneeleja testataan.

Ajallisesti opinnäytetyöprosessi kesti kauan. Tämä johtui hyvin pitkälti testilaitteen rakentamiseen vaadituista teknisistä ja resurssinhallinnallisista aspekteista, sekä myös työn tekijän omasta aikataulutuksesta. Pitkällinen kilpailutusprosessi sekä laitteen osien tilaaminen useammalta toimittajalta myös venytti projektin aikataulua. Rakentamisen edetessä havaittiin jatkuvasti tarvetta uusille, laitteen kokoamisen kannalta tärkeille komponenteille. Niiden yksittäinen suunnittelu, teettäminen ja liikkeistä metsästäminen lisäsi työtunteja huomattavasti. Mikäli vastaavanlaisen laitteen tai projektin toteuttaisi uudelleen, pitäisi suunnitteluosuus kokonaisuudessaan, simulaatioineen ja 3D-malleineen, tehdä täydellisesti valmiiksi ennen itse käytännön toteutusta.

Osa testauslaitteen teknisistä ominaisuuksista oli liian haastavia yhden ihmisen opetella ja toteuttaa, joten niiden toteutuksessa hyödynnettiin aina kyseiseen alueeseen paremmin perehtyneitä henkilöitä. Esimerkiksi testilaitteen sähköistys ulkoistettiin kokonaan. Tämän lisäksi sekä pneumatiikka- että alipainelaitteiston suunnittelussa ja laitteen kokoonpanossa käytettiin jonkin verran ulkopuolista apua. Muutoin itse testilaitteen rungon suunnittelu ja rakennus sekä suoritettavat testaukset toteutettiin kokonaan opinnäytetyön tekijän toimesta. Opinnäytetyönä tämä oli erittäin vaativa, mutta myös opettavainen projekti, joka varmasti kantaa hedelmää vielä pitkään.

LÄHTEET

- Ahlborn 2018a. ALMEMO® Measuring Instruments. 06/2018. Viitattu 23.2.2018. <https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap01/eng/0allge.pdf>
- Ahlborn 2018b. ALMEMO® Measuring Modules for DC Voltage and DC Current ZA 9900 AB / ZA 9901 AB
- Ahlborn 2018c. Displacement Sensor, Potentiometric FWA 150 T. 06/2018. Viitattu 23.2.2018. <https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap10/eng/wege.pdf>
- Ahlborn 2018d. Pressure Sensor FDA 602 L Data Sheet. 06/2018. Viitattu 23.2.2018. <https://www.ahlborn.com/download/pdfs/kap10/eng/druck1e.pdf>
- Baek D. 2014. Mechanical Load Test Optimization. Presentations 2014 NREL Photovoltaic Module Reliability Workshop. Golden, CO, USA. Viitattu 4.9.2018. https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/2014_pvmrw_73_baek.pdf
- Beetz B. 2018. Global PV market to diversify, reach 200 GW a year by 2020. PV Magazine 25.6.2018. Viitattu 22.9.2018 <https://www.pv-magazine.com/2018/06/25/global-pv-market-to-diversify-reach-200-gw-a-year-by-2020/>
- Bellini E. 2018. Floating PV Goes Everywhere. PV Magazine 3.8.2018. Viitattu 6.10.2018 <https://www.pv-magazine.com/2018/10/03/floating-pv-goes-everywhere/>
- Bellini E. 2019. Global cumulative PV capacity may reach 1.3 TW in 2023, SolarPower Europe says. PV Magazine 14.5.2019. Viitattu 21.5.2019 <https://www.pv-magazine.com/2019/05/14/global-cumulative-pv-capacity-may-reach-1-3-tw-in-2023-solarpower-europe-says/>
- Chudnovsky B. 2017. Transmission, Distribution, and Renewable Energy Generation Power Equipment. Aging and Life Extension Techniques. Boca Raton, FL. Taylor & Francis Group, LLC. Saatavilla: <https://books.google.fi/books?id=nG9GDgAAQBAJ&pg=PA357&dq=Mechanical+load+solar+panels&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwjC0OuN29HTAhXKHi-wKHxZMAL8Q6AEILzAC#v=onepage&q=Mechanical%20load%20solar%20panels&f=false>
- Cunow E. 2017. The development of cell thickness reduction of crystalline solar cells in PV modules and its impacts on large PV power plants. Proceedings of 33rd EU PVSEC. Amsterdam. s. 1940-1944.
- de Rooij D. 2015. Can Solar Panel (PV) Certifications be Relied On? Sinovoltaics 29.5.2015. Viitattu 17.3.2019 <https://sinovoltaics.com/solar-certification/can-solar-panel-certifications-be-relied-on/>
- Dietrich S. ym. 2011. Introducing a Reliability Concept Based on Probabilistic Material Data of Glass for PV Modules. Proceedings of 26th EU PVSEC. Hamburg. s. 3314-3320.
- DuPont 2018. What Makes up a Solar Panel. Viitattu 29.9.2018 <http://www.dupont.com/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/what-makes-up-solar-panel.html>
- Endeas Oy 2018. QuickSun® 550CE Module testing station. Viitattu 28.3.2019 <https://www.endeas.fi/quicksun-550ce/>
- Fraunhofer ISE 2018. Photovoltaics Report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. Viitattu 29.9.2018 <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

- Fromm A. ym. 2014. Aging-effects of polymeric encapsulation on the mechanical characteristics of solar panels and embedded components. Proceedings of 29th EU PVSEC. Amsterdam. s. 3121-3125
- Förster M. ym. 2010. New Method for Improved Bypass Diode Junction Temperature Measurement in a Solar Junction Box. Proceedings of 25th EU PVSEC. Valencia. s. 4244-4247.
- Gabor A. ym. 2016. Mechanical Load Testing of Solar Panels – Beyond Certification Testing. 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Portland, OR USA. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/303989218_Mechanical_Load_Testing_of_Solar_Panels_-_Beyond_Certification_Testing
- Gambogi W. 2010. Comparative Performance of Backsheets for Photovoltaic Modules. Proceedings of 25th EU PVSEC. Valencia. s. 4079-4083.
- Green M. 2005. Silicon Photovoltaic Modules: A Brief History of the First 50 Years. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol 13. s. 447-455. John Wiley & Sons, Ltd.
- Hacke P. ym. 2016. Potential-Induced Degradation-Delamination Mode in Crystalline Silicon Modules. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Saatavilla: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/67256.pdf>
- Herfurth D. & Tost H. 2010. Test procedures on the test bench – model tests for loading tests on solar modules and solar collectors. Proceedings of 25th EU PVSEC. Valencia. s.3984-3988.
- Hsieh H. ym. 2017. EVA and Backsheet Inspection for Solar Module. Proceedings of 33rd EU PVSEC. Amsterdam. s.1770-1773.
- Hsu S. & Wu T. 2017. Simulated Wind Action on Photovoltaic Module by Non-uniform Dynamic Mechanical Load and Mean Extended Wind Load. SNEC 11th International Photovoltaic Power Generation Conference & Exhibition. SNEC 2017 Scientific Conference. 17-20.4.2017. Shanghai. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217344922>
- iTechworld 2016. Solar Cell Testing Lab. 18.2.2016. Viitattu 23.2.2019 <https://itechworld.com.au/blogs/news/93375302-american-solar-cell-testing-lab#>
- Jahn U. ym. 2018. Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications. IEA PVPS Task 13, Subtask 3.3. Report IEA-PVPS T13-10:2018. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.
- J. Schmalz GmbH 2019. Theoretical Holding Force of a Suction Cup. Viitattu 23.2.2018. <https://www.schmalz.com/en/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/system-design-calculation-example/theoretical-holding-force-of-a-suction-cup/>
- Kelly-Detwiler P. 2013. Since All Solar Panels Are Not the Same, It's Important to Test Them. Forbes 17.7.2013. Viitattu 23.9.2018 <https://www.forbes.com/sites/peterdetwiler/2013/07/17/since-all-solar-panels-are-not-the-same-its-important-to-test-them/#61b3002638fa>
- Köntges M. ym. 2011. Crack Statistics of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. Proceedings of 26th EU PVSEC. Hamburg. s. 3290-3294.
- Köntges M. ym. 2014. Performance and Reliability of Photovoltaic Systems. Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules. Report IEA-PVPS T13-01:2014. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.
- Lin C. 2018. Low demand driving consolidation. PV Magazine 13.9.2108, Viitattu 29.9.2018 <https://www.pv-magazine.com/2018/09/13/low-demand-driving-consolidation/>

Lugue A. & Hegedus S. 2011. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, Ltd.

Makkonen L. 2011. Suunnittelu. Lumen ja jään kertymiseen liittyvät kuormitukset. Rakentajain kalenteri 2011. Rakennustietosäätiö RTS, Rakennustieto Oy ja Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry. s. 87-92. Saatavilla: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK110303.pdf>

Metal Work S.p.A. 2016. General Catalogue. Viitattu 23.2.2019. <https://media.metal-work.it/browse/catalogue-eng#page/23>

Mickiewicz R. ym. 2011. Effect of Encapsulation Modulus on the Response of PV Modules to Mechanical Stress. Proceedings of 26th EU PVSEC. Hamburg. s. 3157-3161.

Mülhöfer G. ym. 2013. Influence of Mechanical Load at Low Temperatures on Cell Defects and Power Degradation at Full Scale PV Modules. Proceedings of 28th EU PVSEC. Paris. s. 2968-2971.

Pearsall N. 2017. The Performance of Photovoltaic (PV) Systems. Elsevier Ltd.

Piab AB 2019. XLF150 Extra Large Flat cup, G1/2" female. Specifications. Viitattu 23.2.2018. <https://www.piab.com/Products/suction-cups/shape/flat/xlf--extra-large-flat-150-300-mm/0127131/#specs>

Pothecary S. 2017. Solar on course to become the world's cheapest source of energy within the next 10 years. PV Magazine 3.1.2017. Viitattu 29.9.2018 <https://www.pv-magazine.com/2017/01/03/solar-on-course-to-become-the-worlds-cheapest-source-of-energy-within-the-next-10-years/>

PSE AG 2018a. Mechanical Load Tester MLT12. Viitattu 29.9.2018 <http://www.pse.de/test-equipment/thermal-collectors/mechanical-load-tester/mlt12/>

PSE AG 2018b. References. Viitattu 29.9.2018 <https://www.pse.de/test-equipment/references/>

SFS-EN 60904-3:2016. Photovoltaic devices. Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 61215-1:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 61215-1-1:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules Design qualification and type approval - Part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) Modules. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 61215-2:2017. Terrestrial photovoltaic (PV) modules Design qualification and type approval - Part 2: Test procedures. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 61730-1:2018. Photovoltaic (PV) module safety qualification. Part 1: Requirements for construction. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN 61730-2:2018. Photovoltaic (PV) module safety qualification. Part 2: Requirements for testing. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

Tekniikan kaavasto 2013. Tampere: Amk-Kustannus Tammertekniikka Oy

TÜV Rheinland 2019a. PV Module Testing and Certification. Viitattu 23.2.2019. <https://www.tuv.com/world/en/photovoltaic-modules.html>

TÜV Rheinland 2019b. Stress Tests. Industrial Services: Solar. Saatavilla: https://www.tuv.com/media/corporate/industrial_service/solar_pv/PV_Module_Stress_test_TUV_Rheinland.pdf

TÜV SÜD America 2019a. Product Certification. Certification Marks Assure Quality. Viitattu 17.2.2019. <https://www.tuv-sud-america.com/us-en/activity/product-certification>

TÜV SÜD America 2019b. TÜV SÜD Certification Marks for PV. Viitattu 23.2.2019. <https://www.tuv-sud-america.com/us-en/industry/power-energy/renewable-energy/photovoltaics-pv/tuev-sued-certification-marks-for-pv>

Vanek J. ym. 2017. Effect of the Frame Sealing on the Functionality of a Photovoltaic Module. Proceedings of 33rd EU PVSEC. Amsterdam. s.1799-1801.

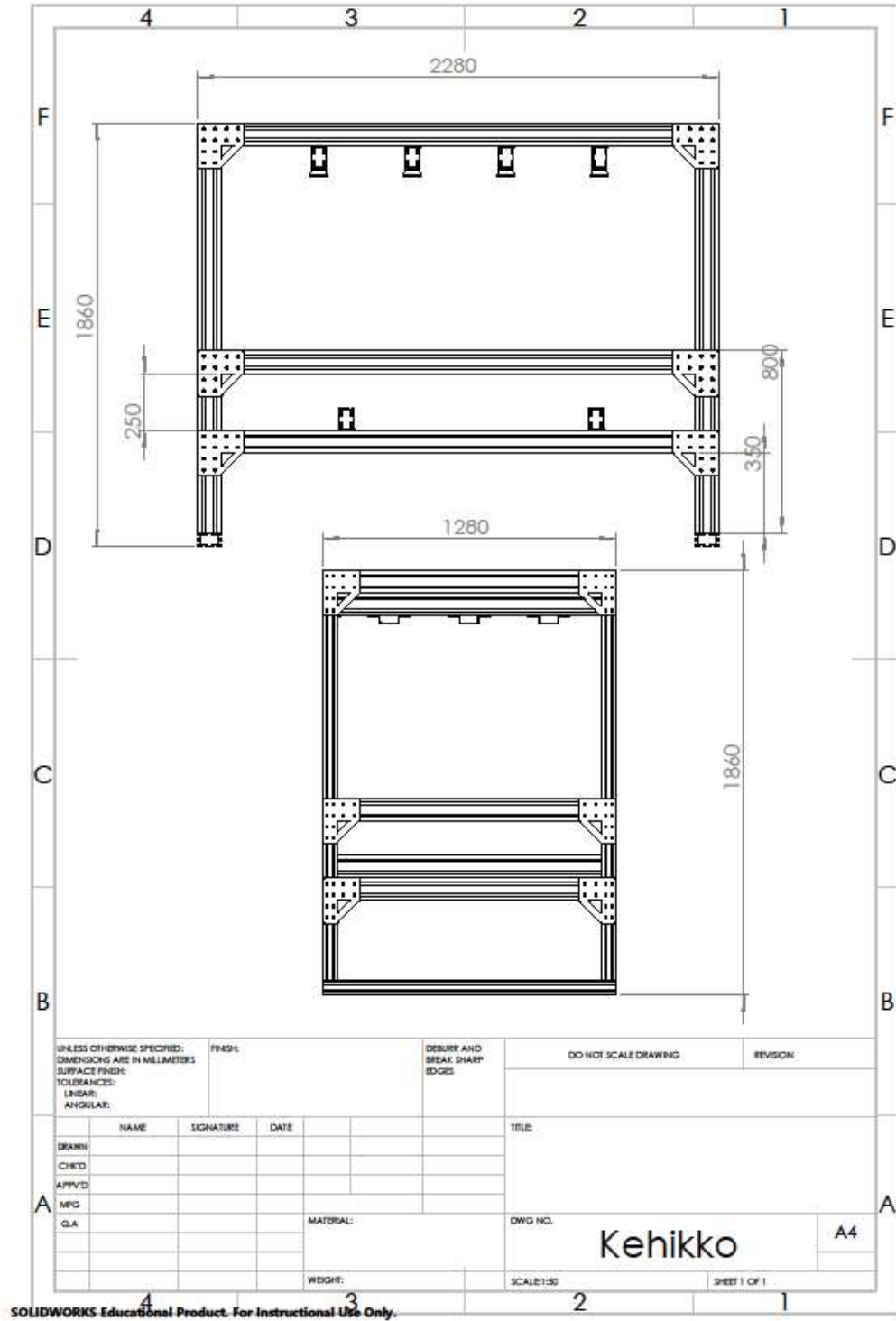
VDE 2016. VDE Certification Marks. Viitattu 23.2.2019. https://www2.vde.com/EN/INSTITUTE/PORTFOLIO/CERTIFICATION/Pages/VDE_Certification_Marks.aspx

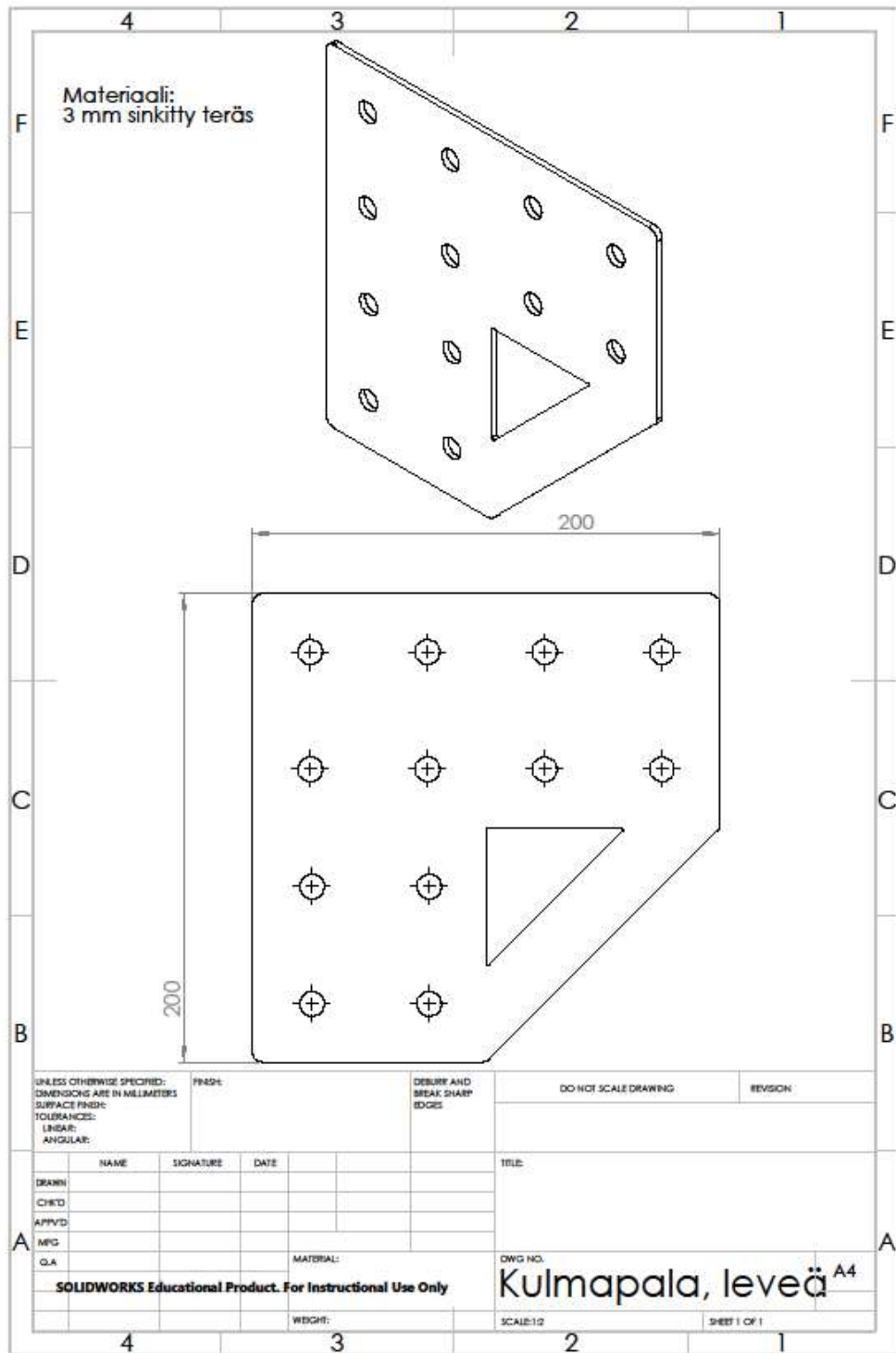
Völker C. ym. 2014. Development of a Test Method for the Investigation of the Abrasive Effect of Sand Particles on Components of Solar Energy Systems. Fraunhofer ISE.

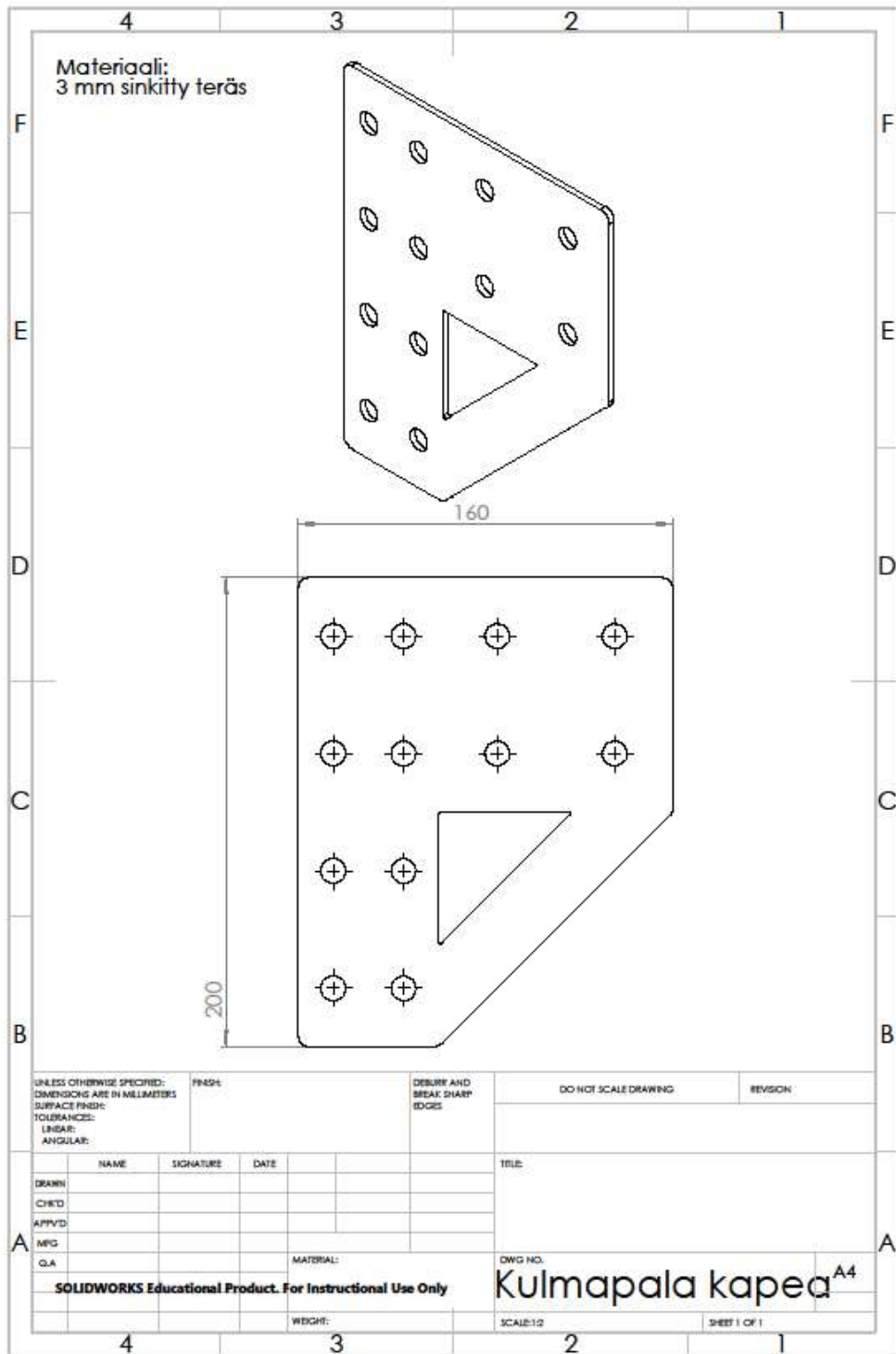
Woody T. 2013. Solar Industry Anxious Over Defective Panels. The New York Times 28.5.2013. Viitattu 23.9.2018 https://www.nytimes.com/2013/05/29/business/energy-environment/solar-powers-dark-side.html?pagewanted=all&_r=0

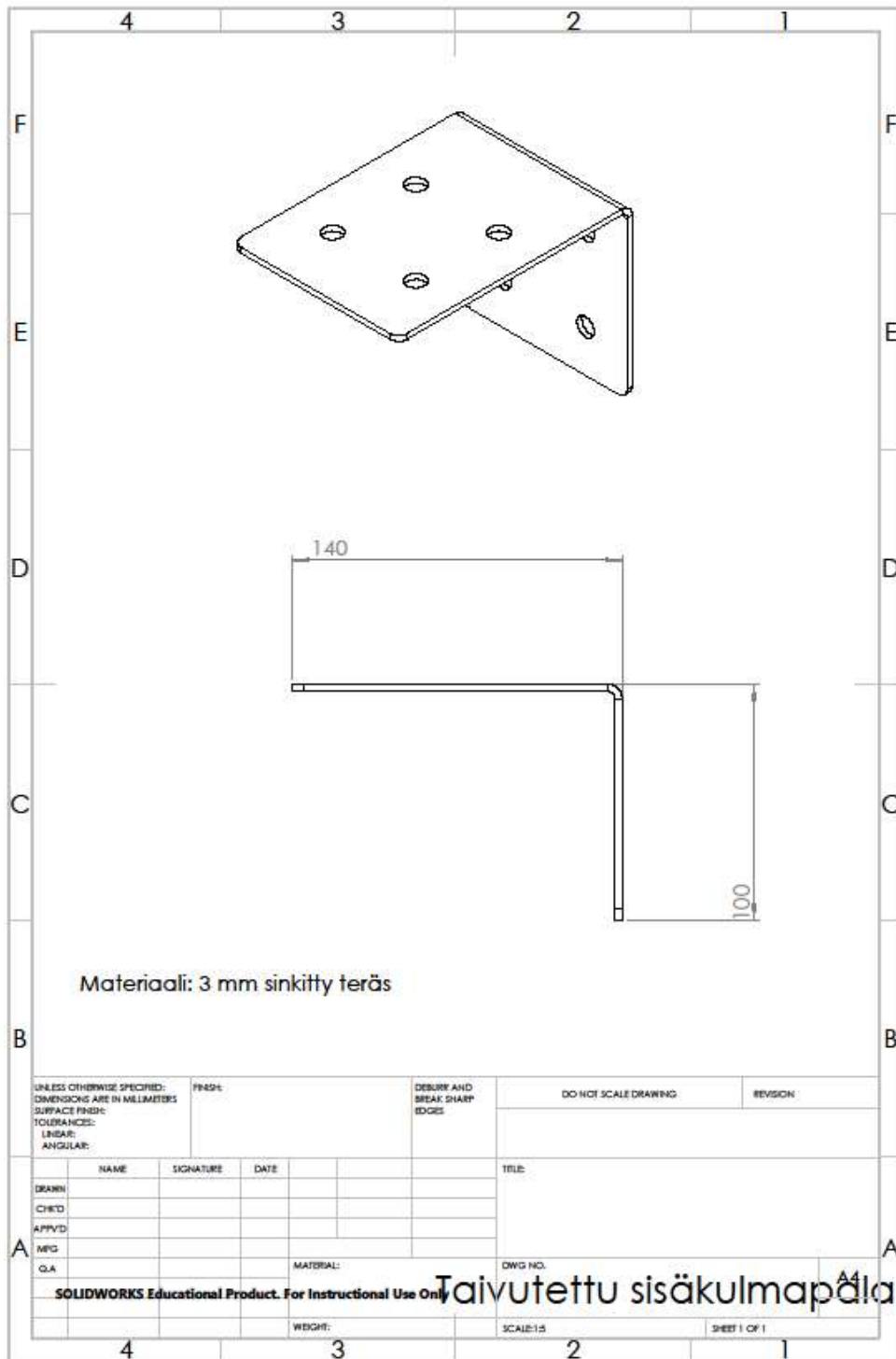
Ympäristöministeriö 2018. Faktaa rakennetusta ympäristöstä. Lumikuorma ja kattorakenteet. 3/2018.

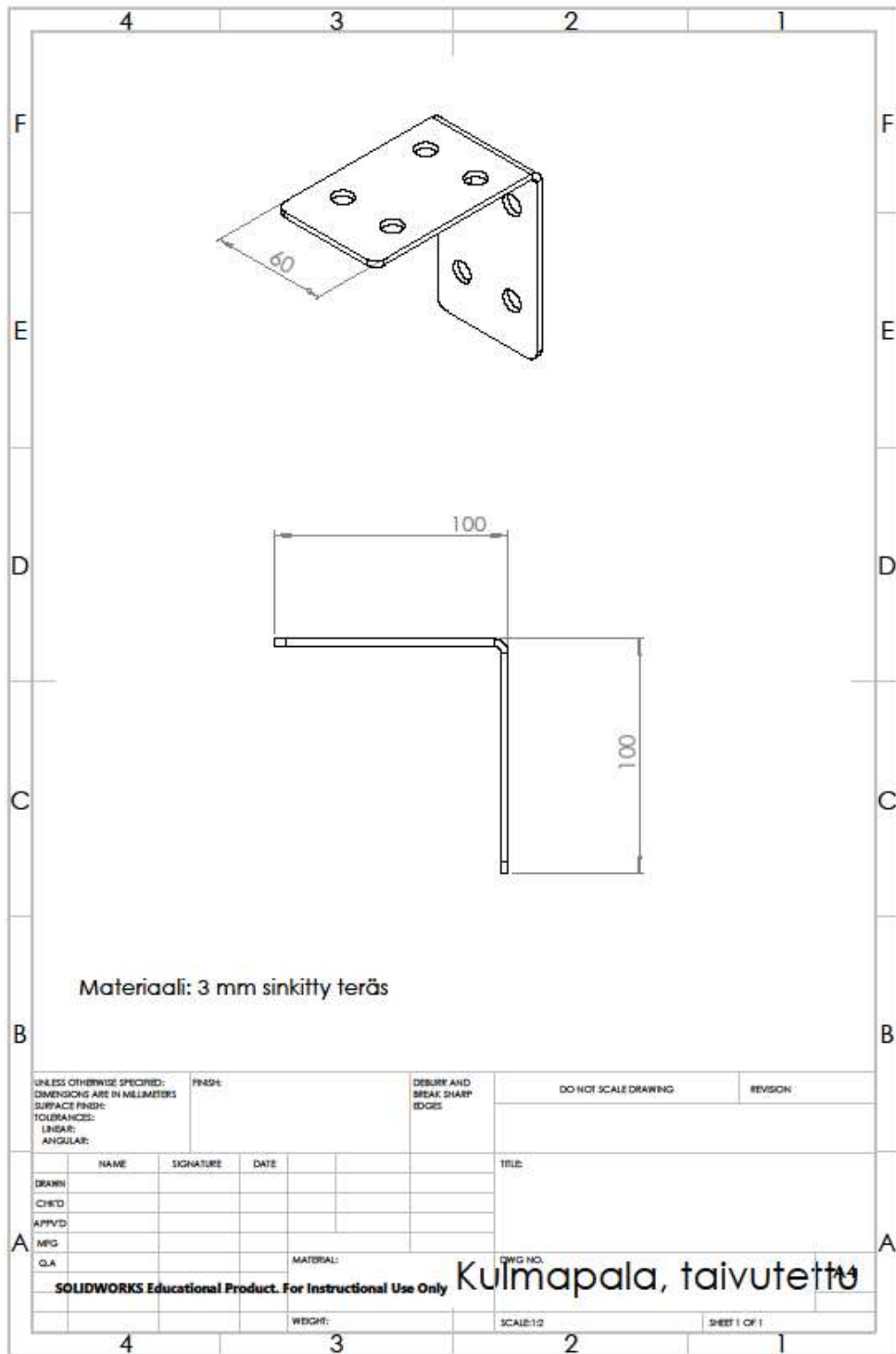
LIITE 1. Testauslaitteen kehikon ja sen liitoskappaleiden piirustukset



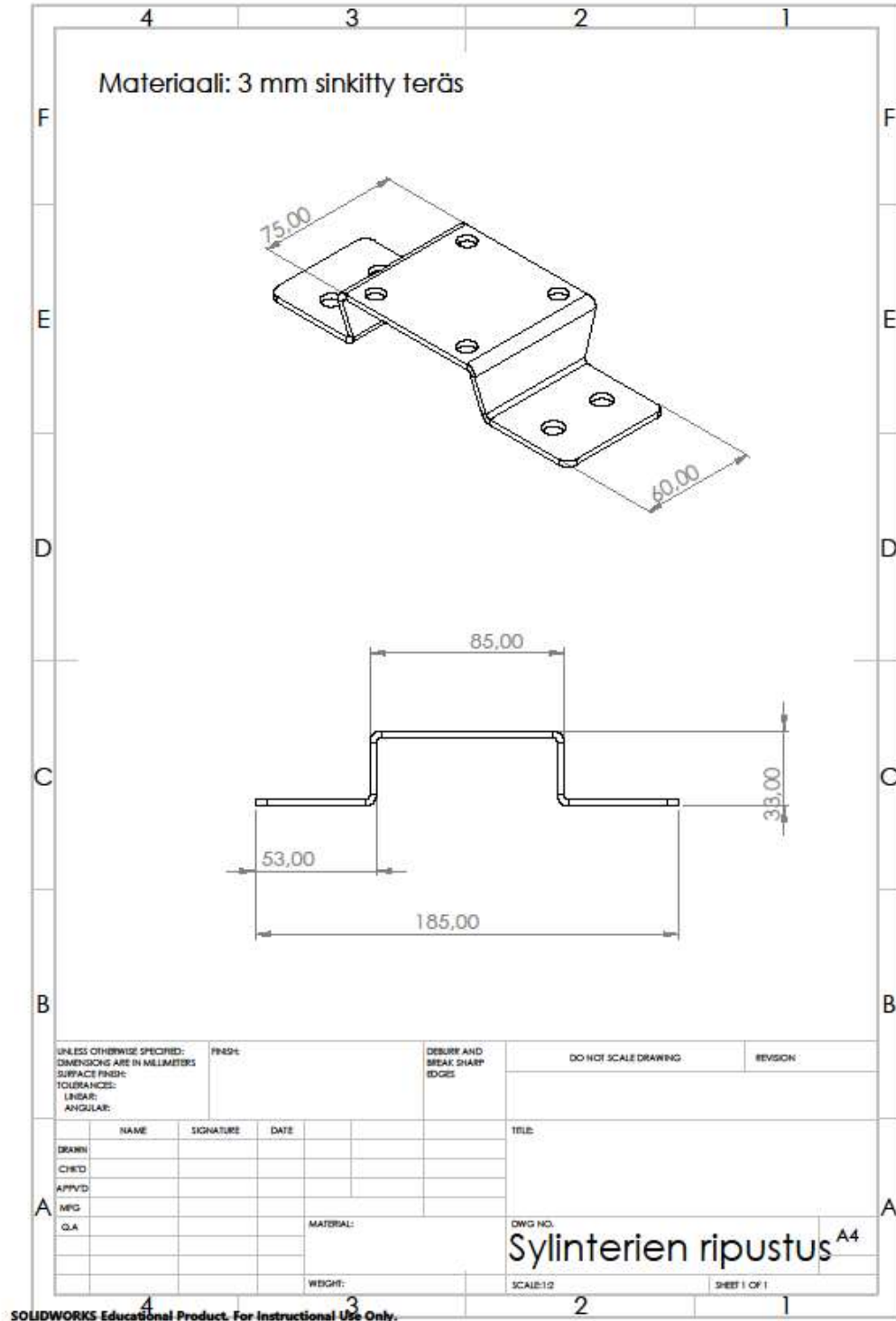


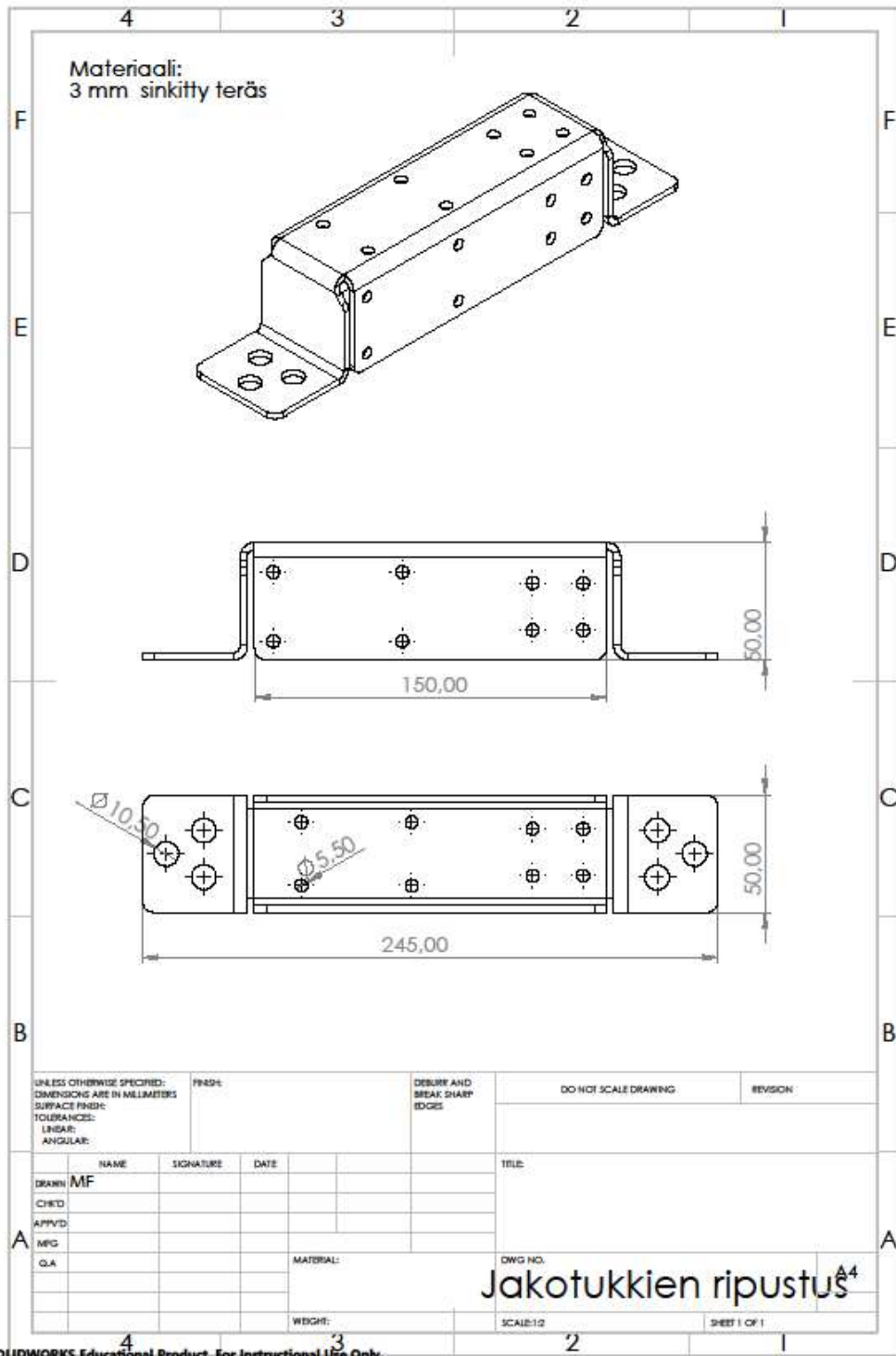


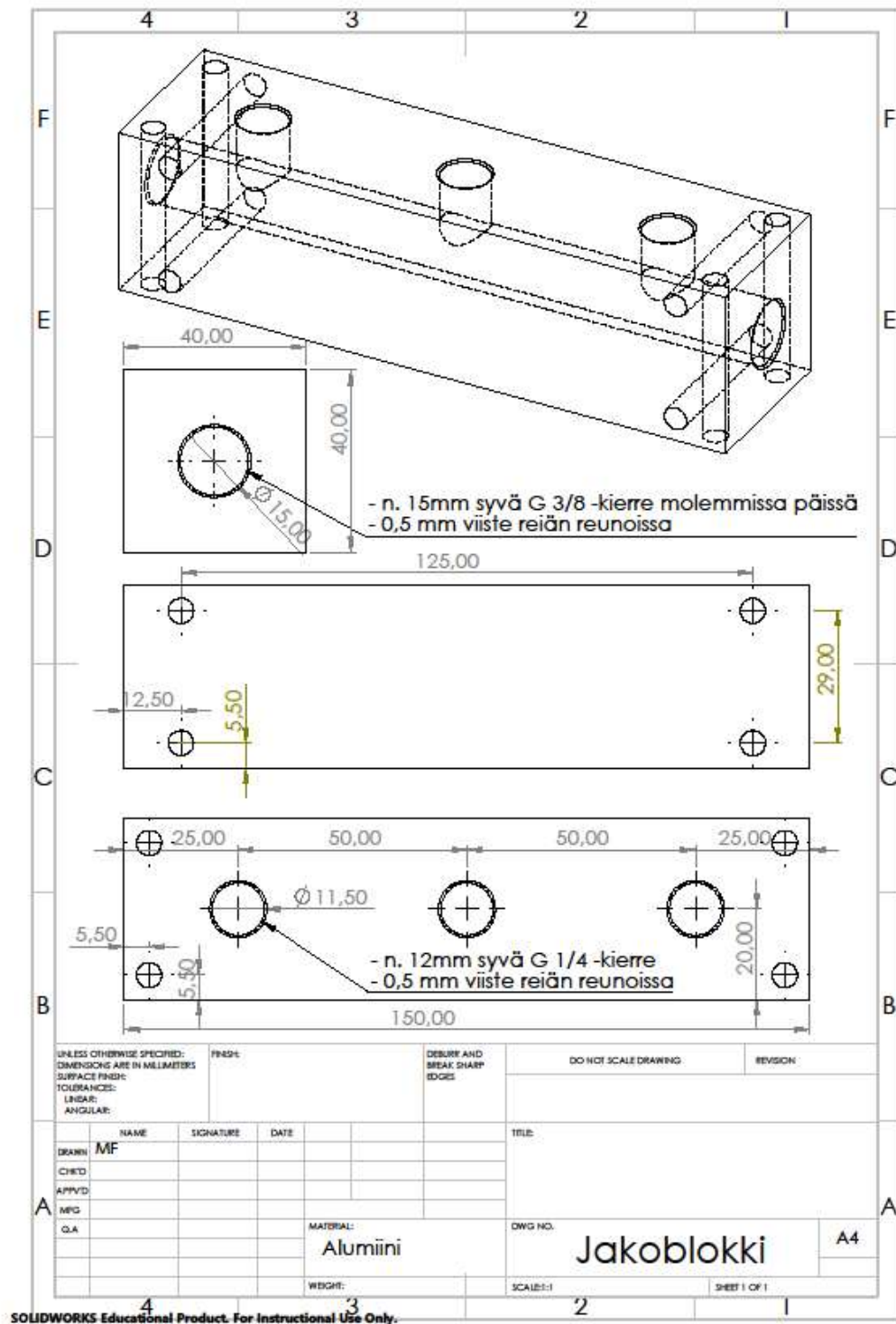


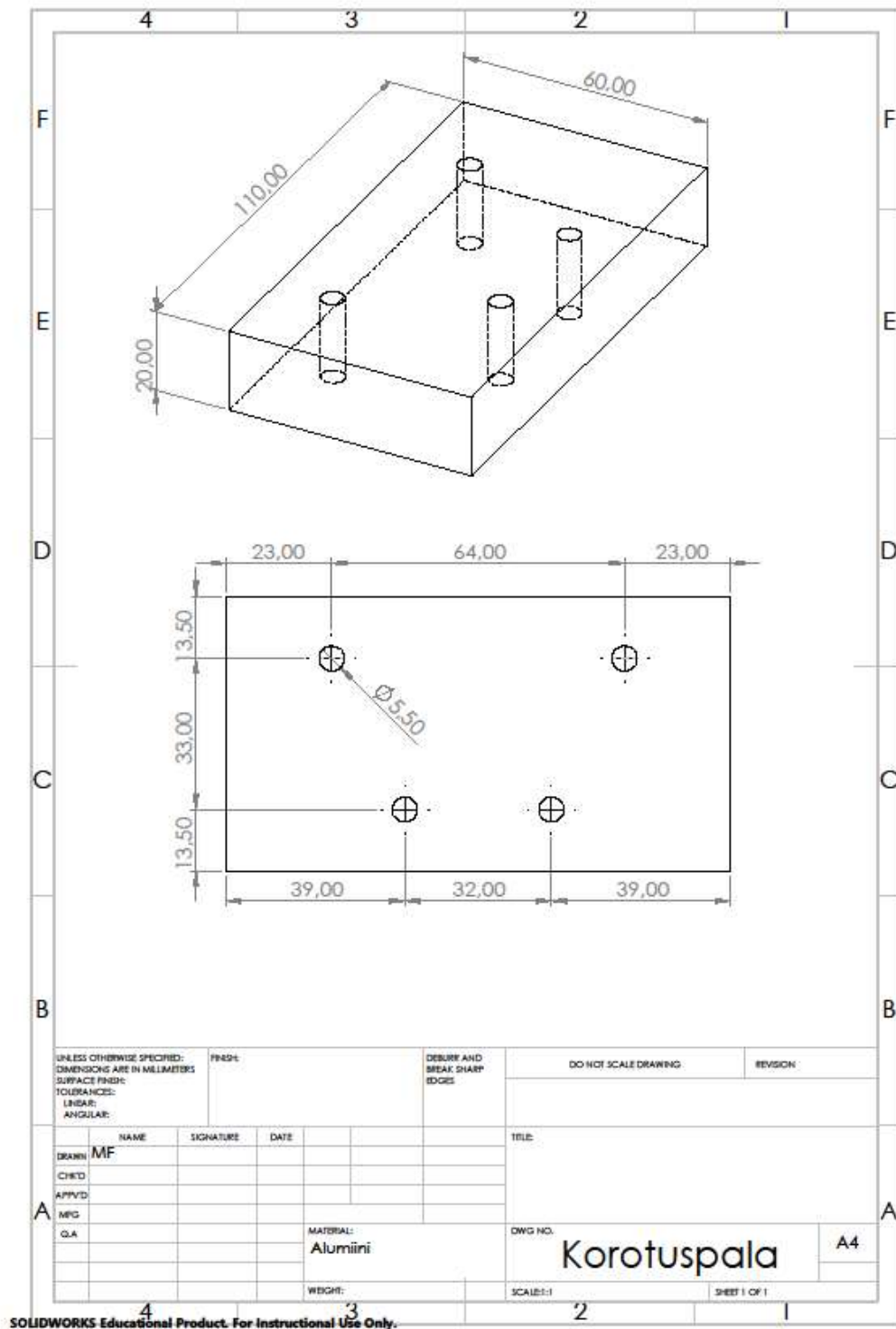


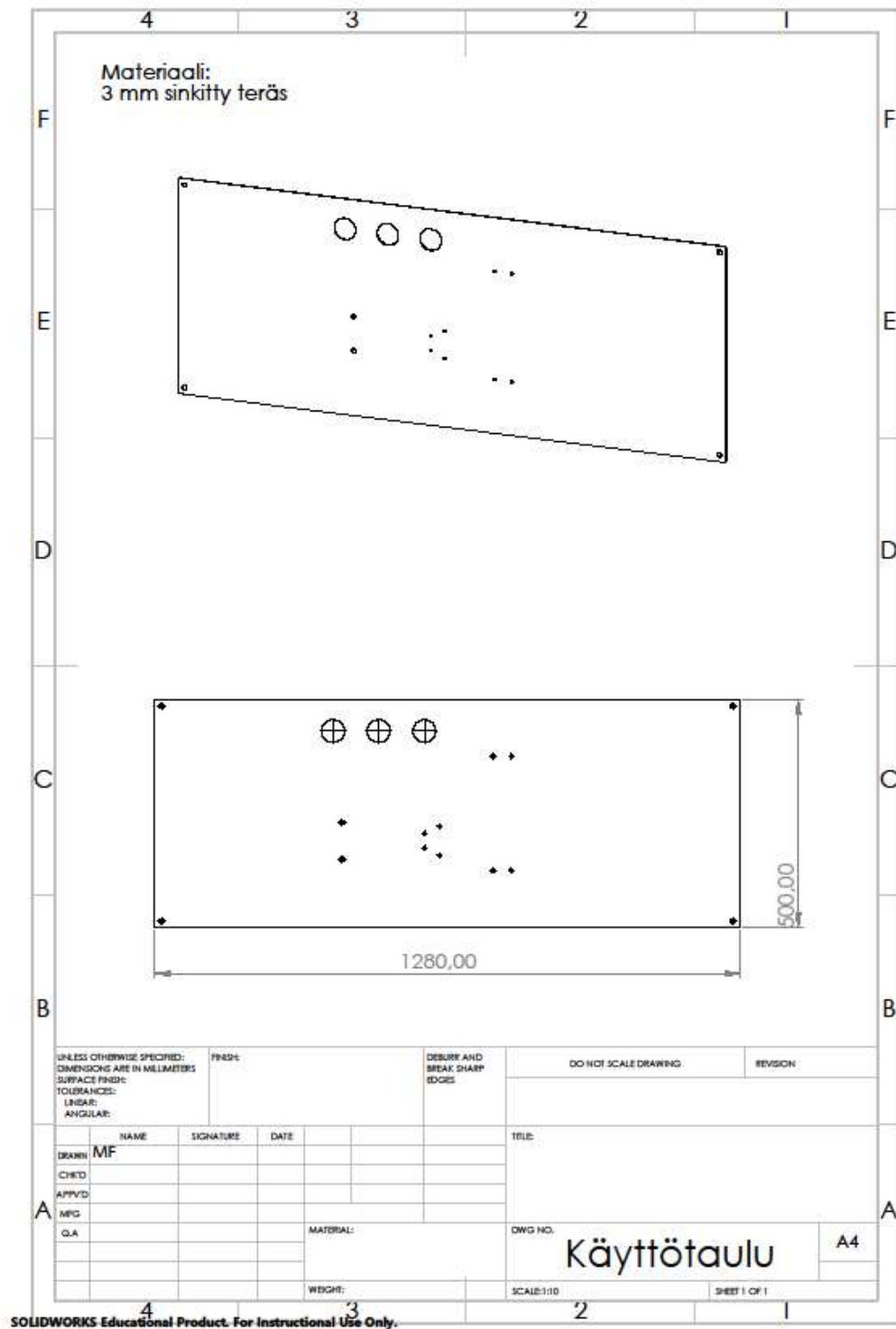
LIITE 2. Paineilmajärjestelmän kiinnikkeiden ja osien piirustukset



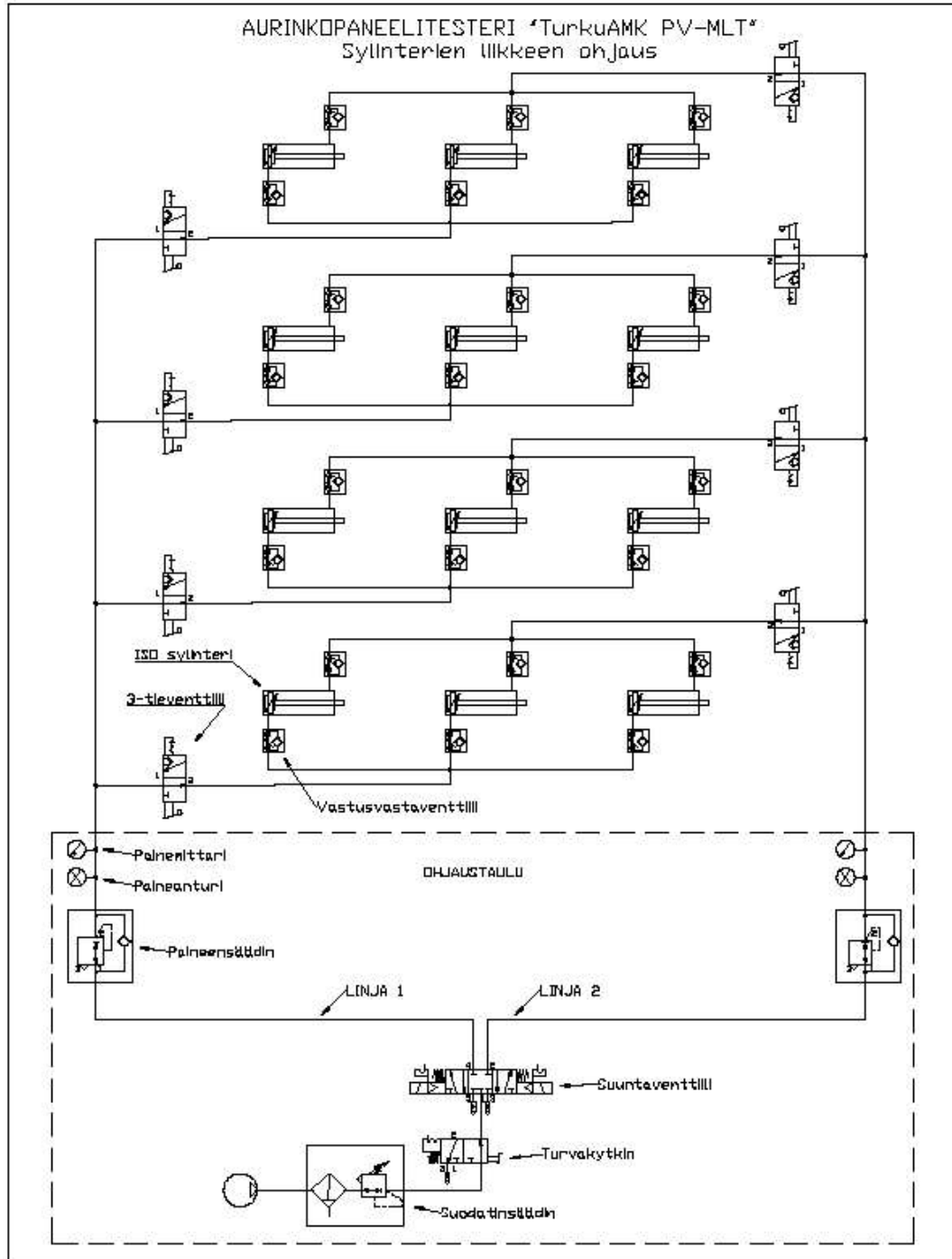


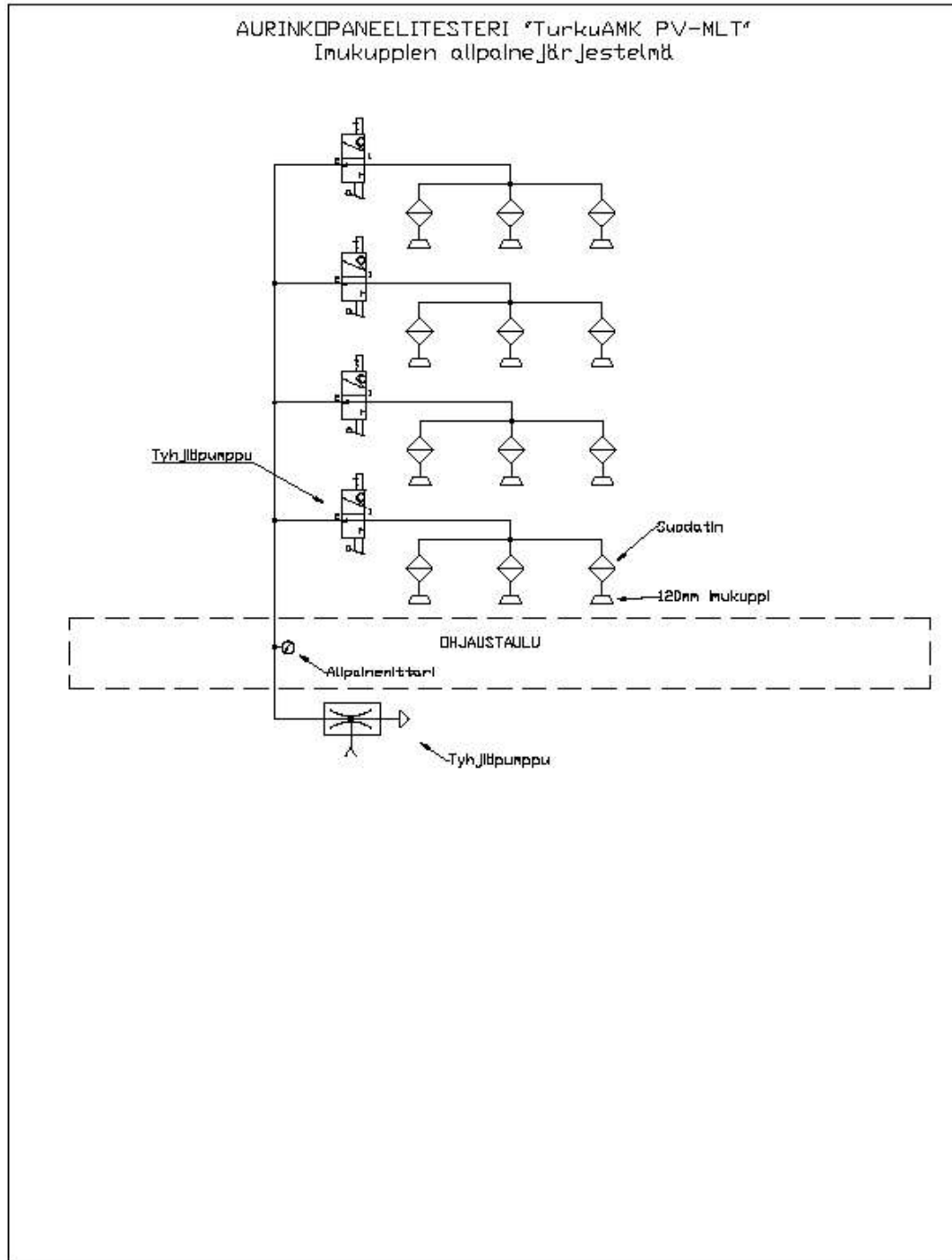




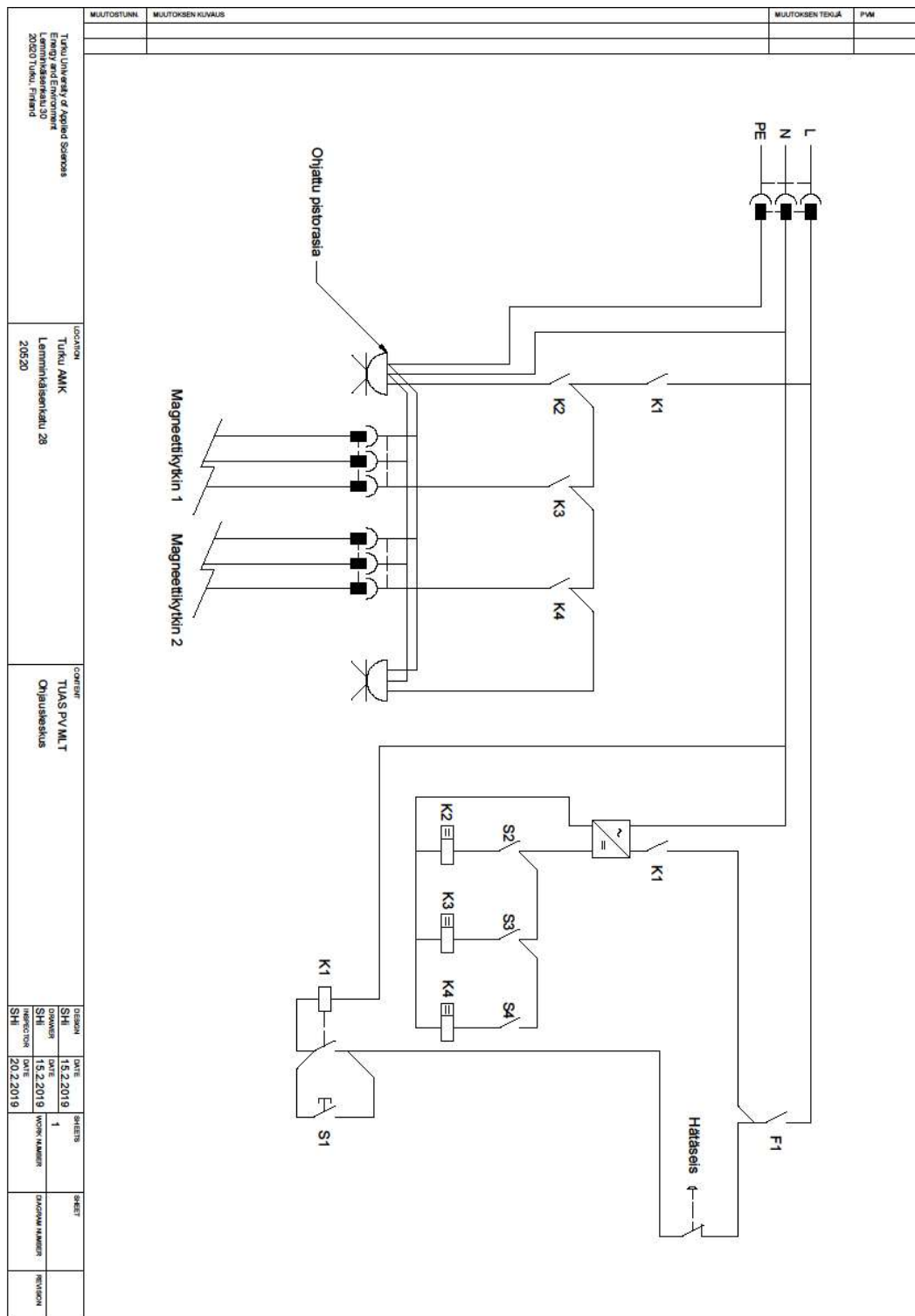


LIITE 3. Yli- ja alipainepuolen paineilmakaaviot





LIITE 4. Testilaitteen sähkökaavio



Turun University of Applied Sciences
 Lemminkäisenkatu 20
 20520 Turku, Finland

LOCATION
 Turku AMK
 Lemminkäisenkatu 28
 20520

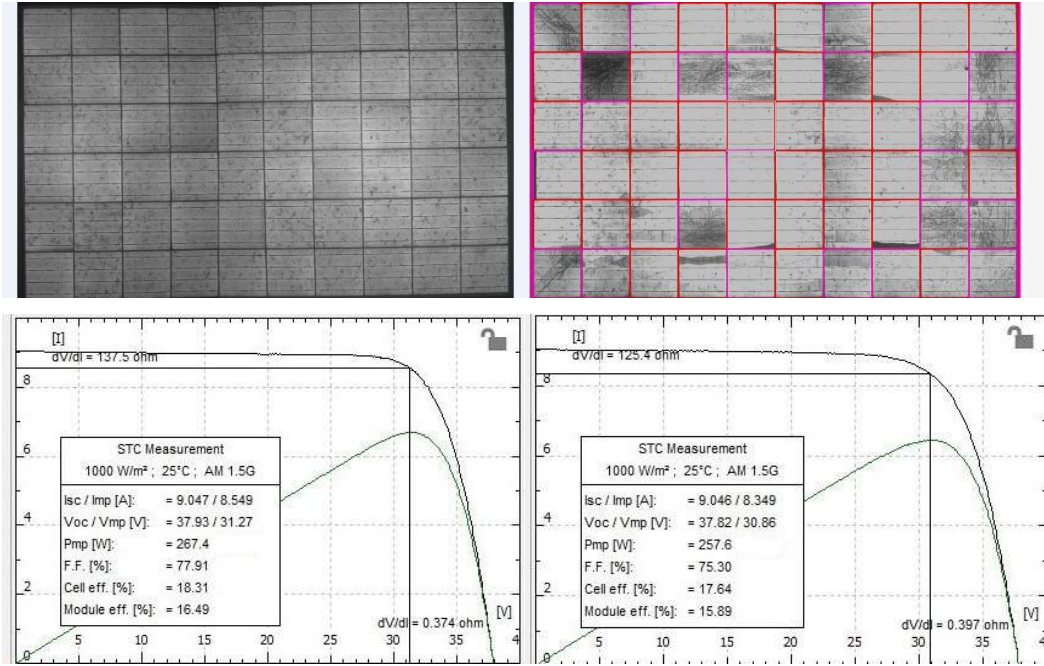
CONTENT
 TUAS PV ML T
 Ohjaukseskus

DESIGN	DATE	SHEET
SHI	19.2.2019	1
REVISION	DATE	WORK NUMBER
SHI	20.2.2019	

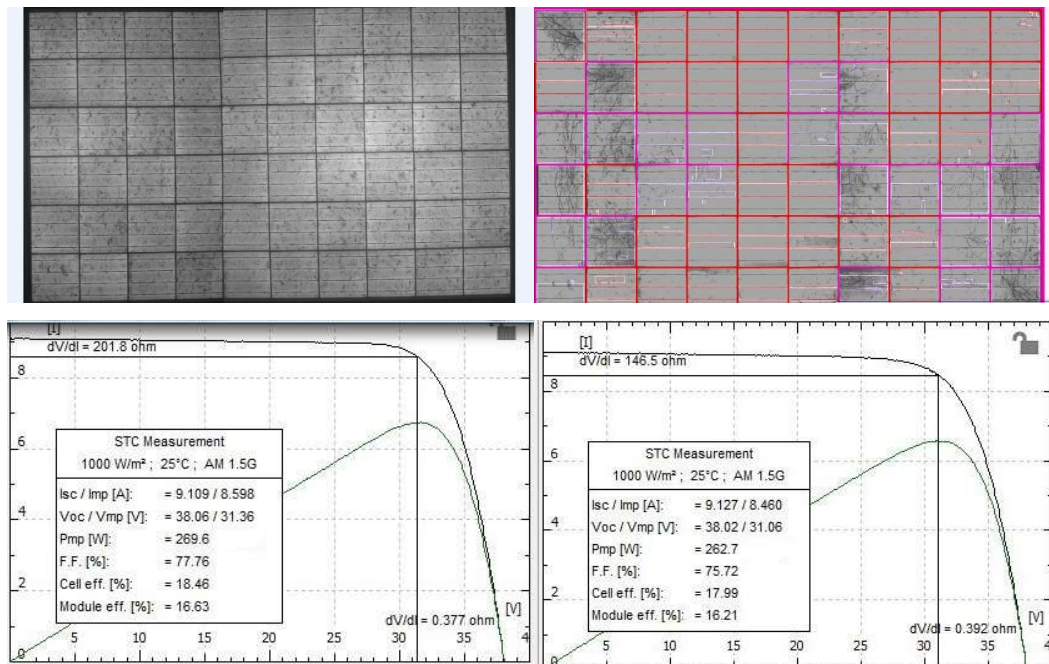
DESIGNER NAME	DRAWING NUMBER	REVISION

LIITE 5. Testitulokset

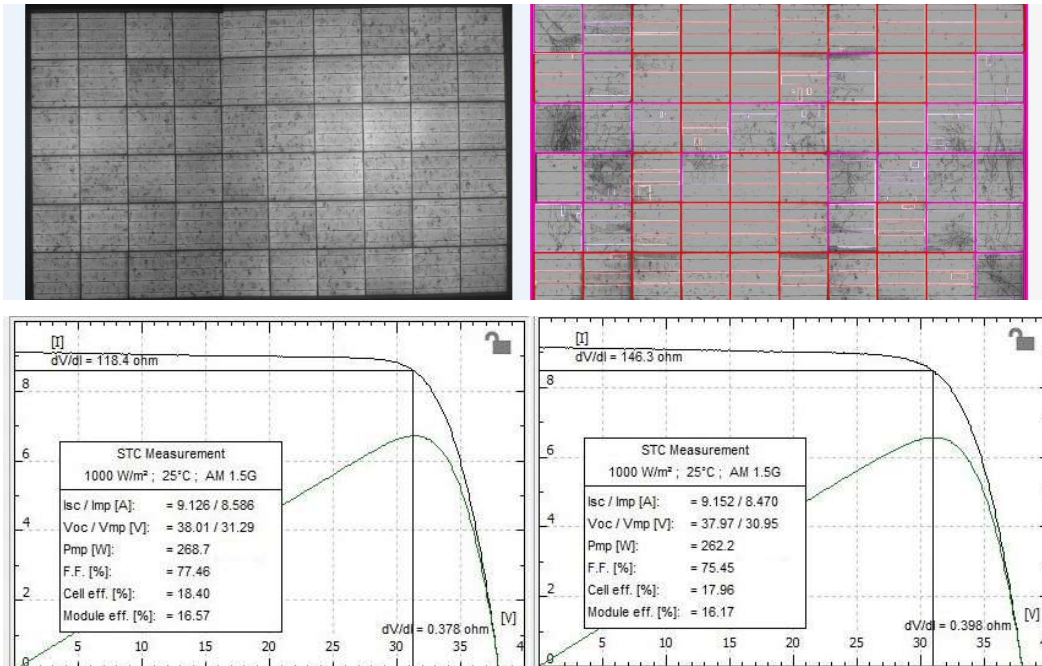
Paneeli 1. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).



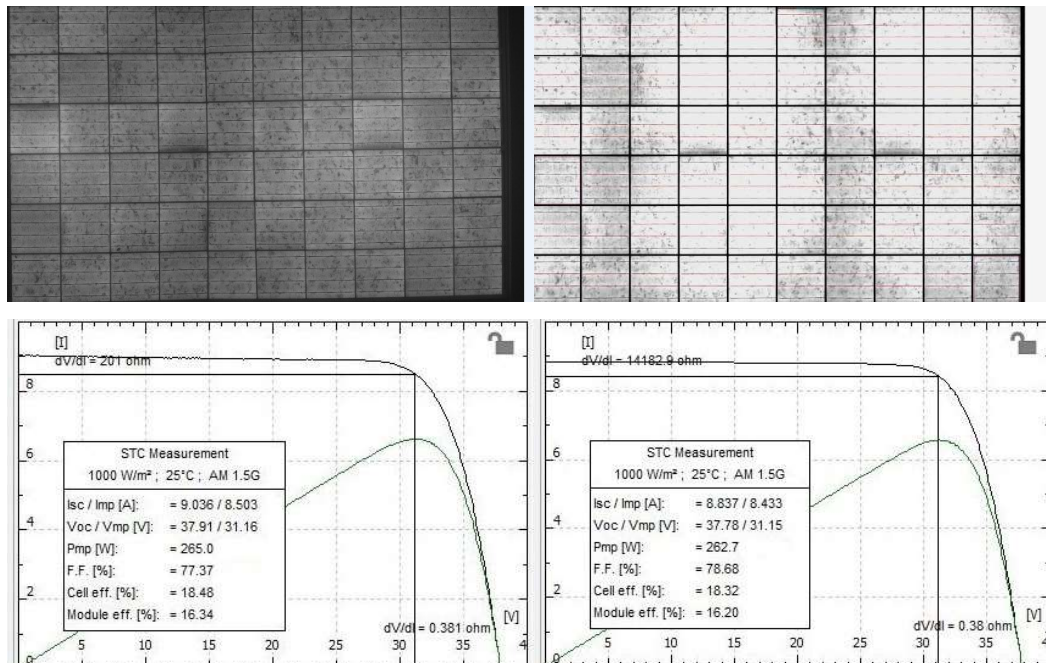
Paneeli 2. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).



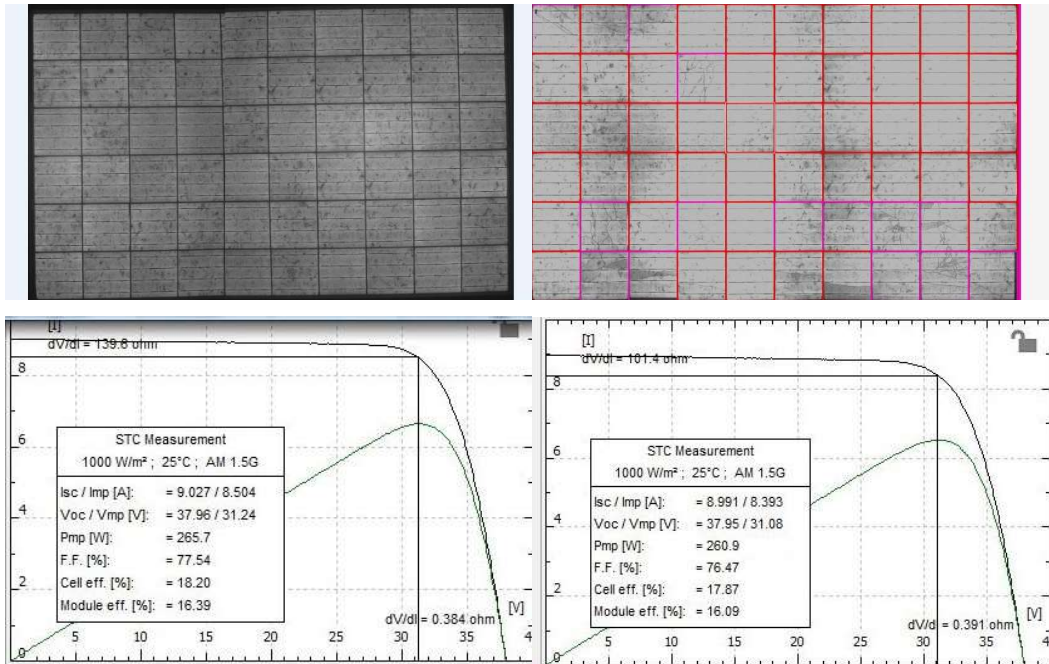
Paneeli 3. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).



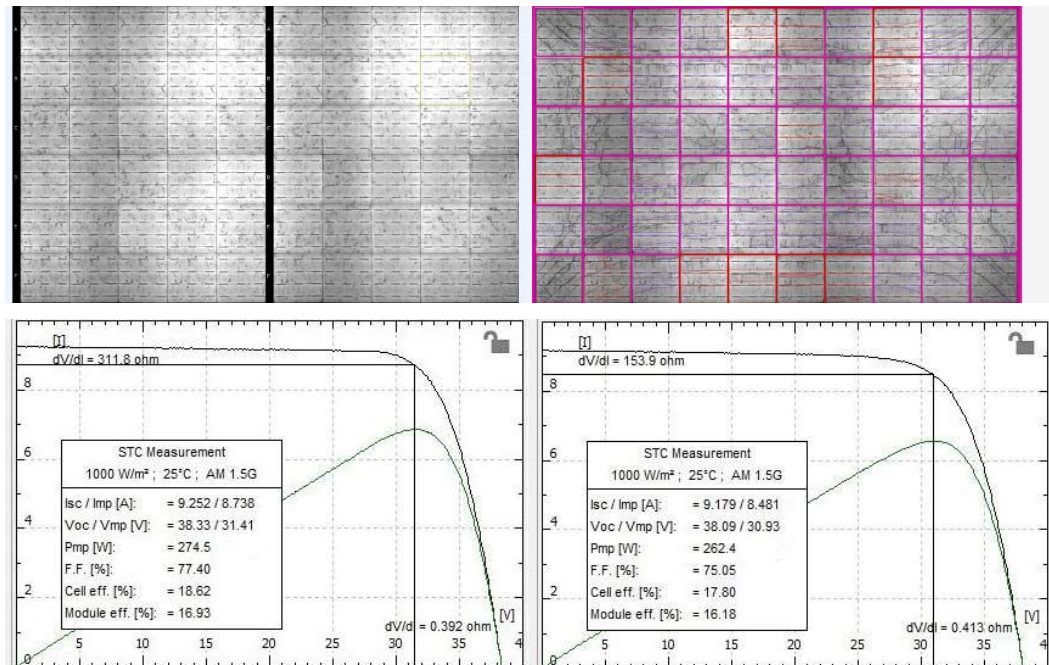
Paneeli 5. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).



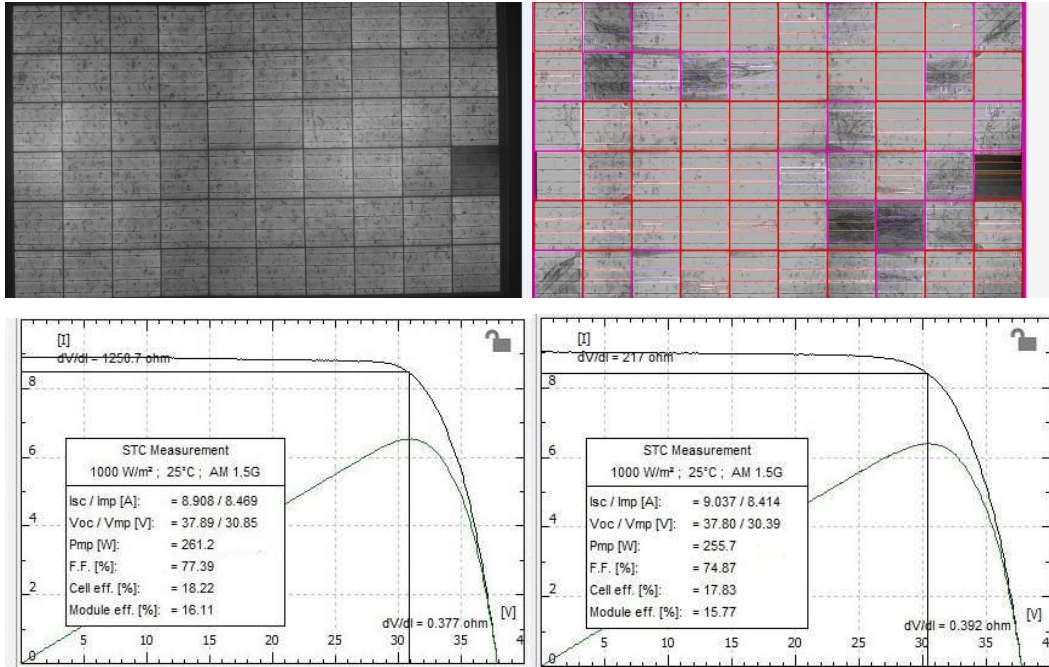
Paneeli 6. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).



Paneeli 7. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).



Paneeli 8. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).



Paneeli 9. ennen (vas.) ja jälkeen (oik.).

