



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Mikael Korpela

Ulkokäyttöisen aurinkosähköinvertterin hiekanerottimen testauksen suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

12.5.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Mikael Korpela Ulkokäyttöisen aurinkosähköinvertterin hiekanerotin testauksen suunnittelu ja toteutus 24 sivua + 2 liitettä 12.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	energiantuotantomenetelmät
Ohjaaja	lehtori Ismo Halonen
<p>Aurinkosähköinverttereitä käytetään maailmanlaajuisesti aurinkopaneelien ja -voimaloiden yhteydessä. Aurinkovoiman ollessa jatkuvassa kasvussa oleva uusiutuvan energian muoto täytyy myös sen mahdollistavien invertterien olla aina toimintakykyisiä. Osa inverttereistä asennetaan äärimmäisen haastaviin olosuhteisiin, minkä takia invertterivalmistajien on jatkuvasti kehitettävä uusia tapoja tehostaa tuotteidensa toimintaa. Yksi lukuisista haasteista on aavikko-olosuhteet, joissa suuri määrä ilmassa olevaa hiekkaa kulkeutuu jäähdytysilman mukana laitteen sisälle.</p> <p>Työn tavoite on suunnitella testauslaitteisto, jolla voidaan simuloida hiekkamyrskyn olosuhteet. Laitteistolla suoritetaan testejä kahteen olemassaolevaan hiekanerottimeen, sekä tavanomaisiin käyttöolosuhteisiin suunniteltuun sääsuojaan. Testituloksilla luodaan yhtenäinen päätelmä hiekanerotinien käytettävyydestä.</p> <p>Suunnittelu toteutetaan tuotekehityksenä käyttäen PTC Creo 3D CAD -ohjelmistoa. Laitteisto kokoonpannaan ja testit suoritetaan työn tilaajan laboratoriotiloissa.</p> <p>Hiekkatestit suoritettiin MIL-STD-810G Sand and Dust Method 510.5 standardin mukaisesti. Testien tulokset eivät tuottaneet yhdenmukaista tulosta, mutta loivat mahdollisuuden jatkotutkimuksille, joiden perusteella saisi tarkempia tutkimustuloksia.</p>	
Avainsanat	aurinkosähköinvertteri, hiekanerotin, suunnittelu, testaus, R&D

Author Title	Mikael Korpela Design and Application of an Outdoor Solar Inverter Sand Trap Tester
Number of Pages Date	24 pages + 2 appendices 12 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Professional Major	Energy Engineering
Instructor	Ismo Halonen, Senior Lecturer
<p>Solar inverters are used globally alongside solar panels and powerplants. As solar energy is a growing sector of renewable energy, the solar inverters making it possible always need to be fully functional. A large portion of solar inverters is installed in challenging conditions, which results in inverter manufacturers having to continuously push their limits to develop ways of making their products more efficient. One of the many challenges faced are desert conditions where the large concentration of sand particles in the air find their way into the inverters through air cooling systems.</p> <p>The aim of this thesis was to design a tester, which can be used to simulate the conditions during a sandstorm. The tester would be used to run tests for two available sand trap designs and an original weather hood. Data collected would then be used to conclude if the sand traps are a usable design over the original weather hood.</p> <p>The tester was designed as an R&D project using the PTC Creo 3D CAD software. The tester was assembled, and the tests were run in the employer's laboratory.</p> <p>The sand tests were performed in accordance to the MIL-STD-810G Sand and Dust Method 510.5 standard. The results of the tests were not uniform and led to a tentative conclusion but created an excellent opportunity for further research.</p>	
Keywords	solar inverter, sand trap, design, testing, R&D

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hiekan erotuksen tärkeys	2
2.1	Hiekanerotin	2
2.2	Hiekkamyrskyn olosuhteet	2
3	Laitteiston suunnittelu ja kokoonpano	3
3.1	Alustava suunnittelu	3
3.2	Testihiekka	4
3.3	Yleiskuvaus ratkaisusta	4
3.4	Laitteiston kokoonpano ja ongelmat	9
4	Testien ajo	12
4.1	Testisuunnitelma	12
4.1.1	Painetestit	13
4.1.2	Hiekkatestit	13
4.2	Filtterien uusiokäyttö	14
5	Tulosten tarkastelu	14
6	Johtopäätökset	22
6.1	Hiekanerottimien toiminta	22
6.2	Filtterien uusiokäyttö	23
6.3	Jatkotutkimus	23
	Lähteet	24

Liitteet

Liite 1. Kokoonpanon kuvat

Liite 2. Testien kuvat

Lyhenteet

AC	Alternating current. Vaihtosähkö.
CAD	Computer-aided design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
DC	Direct current. Tasasähkö.
R&D	Research and development. Tutkimus ja tuotekehitys.
µm	Mikroni tai mikrometri. Millimetrin tuhannesosa tai metrin miljoonasosa.

1 Johdanto

Aurinkovoima on jatkuvassa kasvussa oleva uusiutuvan energian muoto. Aurinkopaneeleista koostuvia aurinkovoimaloita rakennetaan yhä enemmän ympäri maailmaa, mutta aurinkovoimala ei voi tuottaa sähköä sähköverkkoon ilman aurinkosähköinvertteriä. Invertterivalmistajat kilpailevat jatkuvasti kehittäen omia ratkaisujaan erilaisiin haastaviin tilanteisiin ja asiakkaiden tarpeisiin. Yksi yleisimmistä tilanteista on tarve erottaa ilmasta hiekkaa, ettei sitä joudu invertterin sisälle jäähdytysilman mukana, mikä voi aiheuttaa vakavia ongelmia laitteen toiminnalle. Aurinkosähköinverttereitä asennetaan hyvin paljon aavikko-olosuhteisiin aurinkovoiman potentiaalin ollen huomattavan suuri siellä, minkä takia toimiva hiekan erotus takaa paremman toimivuuden sekä pidemmän eliniän invertterille.

Työ on toteutettu suomalaiselle teollisuusyritykselle ja sen tarkoituksena on kehittää toimiva testilaitteisto, kokoonpanna se ja suorittaa tarvittavat testit sillä. Testauskohteena on kaksi yrityksellä jo olemassa olevaa sand trap -hiekanerotinta ja niiden toimivuutta verrataan yrityksen aurinkosähköinvertterissä käytettävään sääsuojaan. Suunnittelu toteutetaan PTC Creo -nimisellä 3D CAD -ohjelmistolla. Kokoonpano ja testaus suoritetaan yrityksen laboratoriotiloissa.

Testilaitteiston on kyettävä simuloimaan hiekkamyrskyä vastaavat olosuhteet testikammion sisälle ja ylläpitämään niitä ennaltamääritetyn ajan ilman ylimää räisiä vuotoja. Testit dokumentoidaan huolellisesti ja tuloksista luodaan yhtenäinen johtopäätös hiekanerottimien toimivuudesta verrattuna tyypillisissä käyttöolosuhteissa käytettävään sääsuojaan. Laitteiston rakenteen ratkaisu perustuu tuulitunneliin, jossa testikammioon puhalletaan tasaisen ilmavirtauksen mukana hiekkaa. Testattaville hiekanerottimille sekä sääsuojalle simuloidaan samanlaiset olosuhteet, jonka perusteella voidaan verrata testikohteita keskenään.

2 Hiekan erotuksen tärkeys

2.1 Hiekanerotin

Aurinkosähköinverttereitä tarvitaan maailmanlaajuisesti siellä missä aurinkopaneeleita asennetaan. Invertterin päätehtävä on muuntaa aurinkopaneeleilla tuotettu DC-sähkö yleiseen sähköverkkoon soveltuvaksi AC-sähköksi [1]. Jatkuvan toiminnan ylläpitämiseksi invertterin sisälämpötila ei saisi kasvaa liian korkeaksi. Koska suuri osa inverttereistä sijoitetaan erittäin hiekkaisiin olosuhteisiin kuten Lähi-idän maihin, on olennaista kehittää ratkaisu estämään hiekan kulkeutumista laitteen sisääntulevan jäähdytysilman suodattimiin tai pahimmassa tapauksessa jopa laitteen sisälle. Filtterin tukkeutuminen hiekalla voi lopulta johtaa invertterin ylikuumenemiseen. Ratkaisuna ongelmalle on erottaa hiekka sisään tulevasta ilmasta ennen kuin se pääsee filtterille asti hiekanerottimella ilman, että sisään tulevaa ilmaa rajoitetaan.

Kaupallisia ratkaisuja hiekanerotukselle on olemassa useilla eri toimintaperiaatteilla [2]. Yritykset myös valmistavat omia ratkaisujaan hiekanerottimista. Eräänä aurinkoinvertterivalmistajana Ingeteam on onnistunut esimerkiksi kehittämään hiekanerotusratkaisun [3]. Ingeteamin ratkaisu poistaa sisäänmenevästä ilmasta hiekkaa äärimmäisissä hiekkamyrskyolosuhteissa kestäen jopa 100 g/m^3 hiekkakonsentraatiot ja 44 m/s tuulennopeudet [4].

2.2 Hiekkamyrskyn olosuhteet

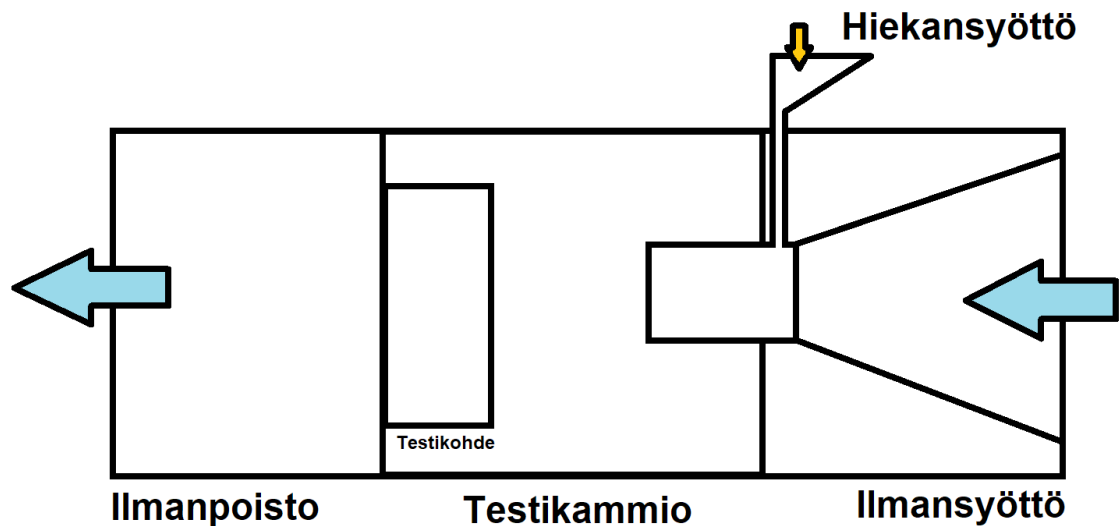
Aavikko-olosuhteissa hiekkamyrskyt ovat erittäin yleisiä. Myrskyn nostattama hiekka on koostumukseltaan pääosin kvartsia, oliviinia ja maasälpää [4]. Aavikkohiekan ollessa erittäin hienojakoista, se voidaan tilannekohtaisesti luokitella jopa pölyksi. Keskimäärin aavikkohiekan partikkelikoko voi olla mitä tahansa $0,08 \text{ mm:n}$ ja 1 mm:n väliltä. Minimi tuulennopeus hiekkamyrskylle on 10 m/s , ja sen levittämä hiekka voi kulkeutua jopa satojen kilometrien päähän [5].

3 Laitteiston suunnittelu ja kokoonpano

3.1 Alustava suunnittelu

Testilaitteiston suunnittelua varten täytyi määritellä alustavasti mahdollisimman tarkat lähtökohdat ja vaatimukset lopputulokselle. Laitteiston on tarkoitus simuloida jatkuva ja tasainen hiekan puhallus testattavaan kohteeseen ja pidettävä se testikammion sisällä. Materiaaliksi valittiin ohutlevyterästä sen helppokäyttöisyyden perusteella. Runkoon käytettiin 2 mm:n vahvuista levyä, ja muihin peltiosiin 1,5 mm:n vahvuista levyä. Laitteiston sivulle olisi myös hyvä suunnitella pleksistä ikkunamainen ratkaisu, jonka läpi voi tarkastella testejä. Laitteiston pituus ei tule ylittää 4 m:ä käytössä olevan tilan takia. Testikammion tulee olla tarpeeksi suuri, jotta suurimman hiekanerottimen saa sinne asennettua. Laitteistossa käytetään myös kaupallisesti ostettua ilmastointiputkea ilmanohjauksessa testikammioon. Filtterit ja puhaltimet ovat samoja kuin yrityksen aurinkoinvertterissä. Jokainen komponentti tulee tiivistää huolellisesti, ettei hiekkaa kulkeudu testin aikana laitteen ulkopuolelle.

Laitteiston suunnittelu perustuu tuulitunnelin toimintaan, jossa putkimaiseen tilaan syötetään yhdestä päästä ilmavirta, joka kulkee keskellä olevaan testattavaan kohteeseen ja poistuu toisesta päästä. Kuvan 1 mukaisesti testilaitteisto on jaettu kolmeen osaan: sisäänottoilma ja hiekansyöttö, testikammio, sekä poistoilma. Varsinainen testaus suunnitellaan MIL-STD-810 Method 510 -toteutusta vastaavaksi [6]. Suurin ilmavirta, joka laitteella pyritään tuottamaan, on 20 m/s ja tavoite hiekkakonsentraatiolle on 2–10 g/m³.



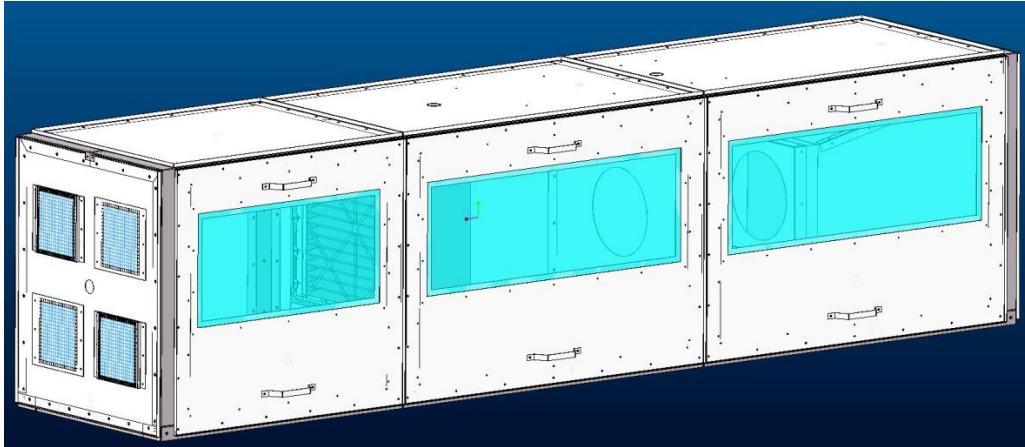
Kuva 1. Testilaitteiston toimintaperiaate

3.2 Testihiekka

Testaukseen valittiin käytettäväksi Particle Technology INC -yhtiön toimittamaa standardisoitua hiekkapölyä. Yleisellä Coarse Silica Test Dust -nimellä kulkeva testaushiekka on viralliselta myyntinimeltään MIL-STD-810D/E/F/G Sand ja koostumukseltaan vähintään 90-prosenttista SiO_2 , eli kvartsia pölymuodossa. Partikkelikoko hiekalla vaihtelee 149:n ja 1 000 mikronin välillä, jonka takia testihiekka on ollut yleisesti käytetty muissa vastaavanlaisissa hiekkatesteissä ja soveltuu hyvin myös hiekanerottimien testaukseen.

3.3 Yleiskuvaus ratkaisusta

Sand trap -testilaitteisto on suunniteltu mahdollisimman käytännöllisesti kokoonpantavaksi ylläpitäen samalla sille määritetyt tiiviysvaatimukset. Kuvassa 2 lopullinen 3D-malli testilaitteesta.



Kuva 2. 3D-malli valmiista testilaitteistosta

Runko on suunniteltu lähes kokonaan U-palkeista, jotka ovat kestäväytensä lisäksi myös helposti asennettavissa tiiviiksi toisiaan vasten. Runko on esitetty kuvassa 3.



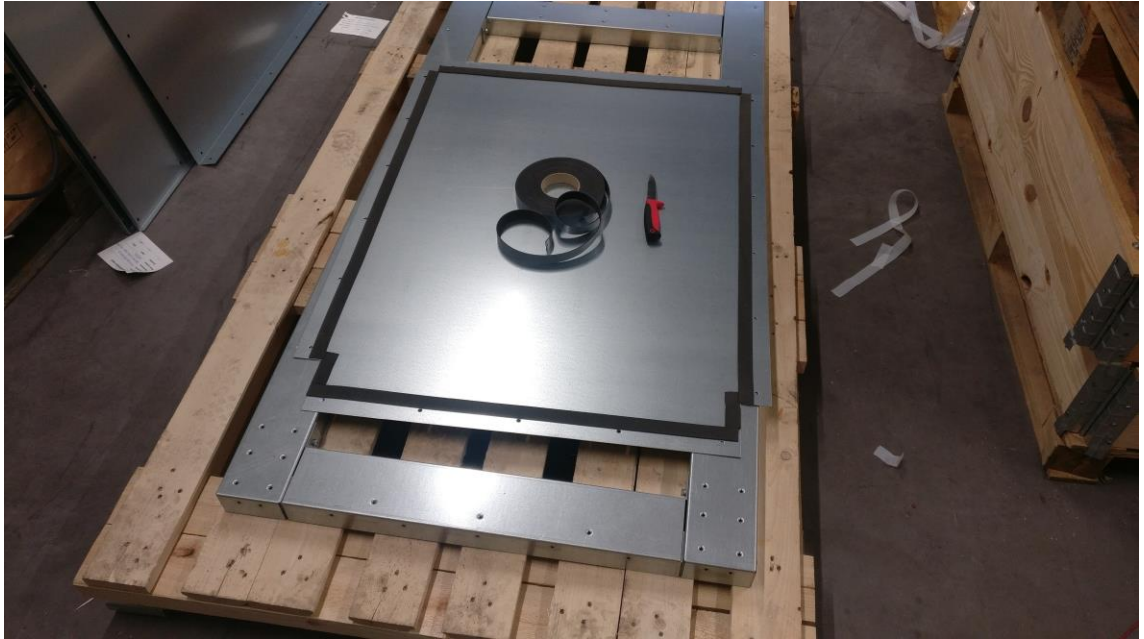
Kuva 3. Testilaitteiston runko valmistettu U-palkeista, sekä lattia tiiviisti asennettuna

Kuvassa 4 on esimerkki ratkaisusta, joka takaa tiiviin liitoksen rungon kahden pystypalkin välille.



Kuva 4. Rungon pystypalkkien kiinnike tiivisteiden kanssa

Testikammion tiiviyden säilyttämiseksi laitteistoon on suunniteltu väliseinät kammion sisäpuolelle hiekan läpipääsyn estämiseksi. Lattiapellit on suunniteltu ilman ylimääräisiä taitoksia, millä vältetään ylimääräisiä rakoja laitteiston pohjassa ja jokainen reuna on tiivistetty tiivisteteipillä kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5. Esimerkki lattiapellin tiivisteistä

Sivuseinät ja katto on vastaavasti suunniteltu ilman ylimääräisiä taitoksia kosketuspintaa vasten, mutta jokaista reunaa on taitettu ulospäin laitteesta, mikä lisää kyseisten osien jäykkyyttä. Kuvassa 6 esitetty laitteen kattopaneeli.



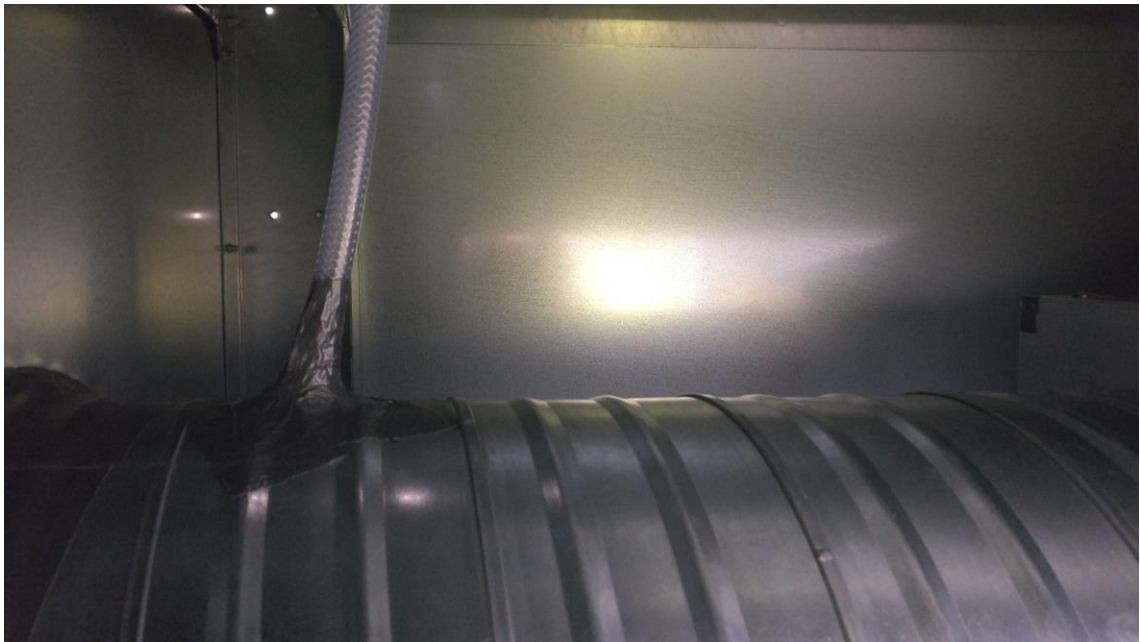
Kuva 6. Kattopaneeli, jonka reunat taitettu ulospäin

Testilaitteiston sisämekaniikka rakentuu sisääntuloilman ohjauksesta, filtterin ja testattavan kohteen kiinnityksestä, sekä poistoilman käsittelystä. Sisääntuloilma ohjataan kuudelta puhaltimelta suppiloa pitkin ilmastointiputkeen, joka kulkee yhden väliseinän läpi testikammion puolelle. Filtterin ja testattavan kohteen kiinnitysmekanismi on valmiiksi suunniteltu ja integroituu toiseen väliseinään. Poistoilma puhalletaan laitteistosta ulos filtterin jälkeisestä kammioista neljän ylimääräisen puhaltimen avustamana.



Kuva 7. Sisääntulopuolen puhaltimet

Hiekan syöttö tapahtuu letkua pitkin suoraan ilmastointiputkeen ennen testikammiota kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. Hiekan syöttöletku

3.4 Laitteiston kokoonpano ja ongelmat

Testilaitteiston kokoonpano ei sisältänyt lähtökohtaisesti yhtään suurta ongelmaa. Yhtä ruuvia ei pystynyt asentamaan toisen väliseinän alanurkkaan. Tämä epäkohta ei kuitenkaan tuottanut ongelmia laitteen tiiviyteen tai toimivuuteen, joten sen pystyi paikkaamaan alumiiniteipillä kokonaan. Ongelma on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Väliseinässä oleva reikä ei kohtaa rungon vetokierrettä.

Laitteen kaikki liitoskohdat tiivistettiin alumiiniteipillä. Toinen ongelma havaittiin sisämekaniikan kohdalla ilmastointiputkea asentaessa. Väliseinään suunniteltu läpivienti oli alun perin mitoitettu halkaisijaltaan 300 mm:ä olevalle ilmastointiputkelle, mutta lopullinen putken halkaisija oli 315 mm. Pellin ollessa 1,5 mm:n paksuista ei sen vääntäminen läpiviennin laajentamiseksi tuottanut suurempia ongelmia ja ylimääräiset kolot paikattiin ilmastointiputken asentamisen jälkeen.



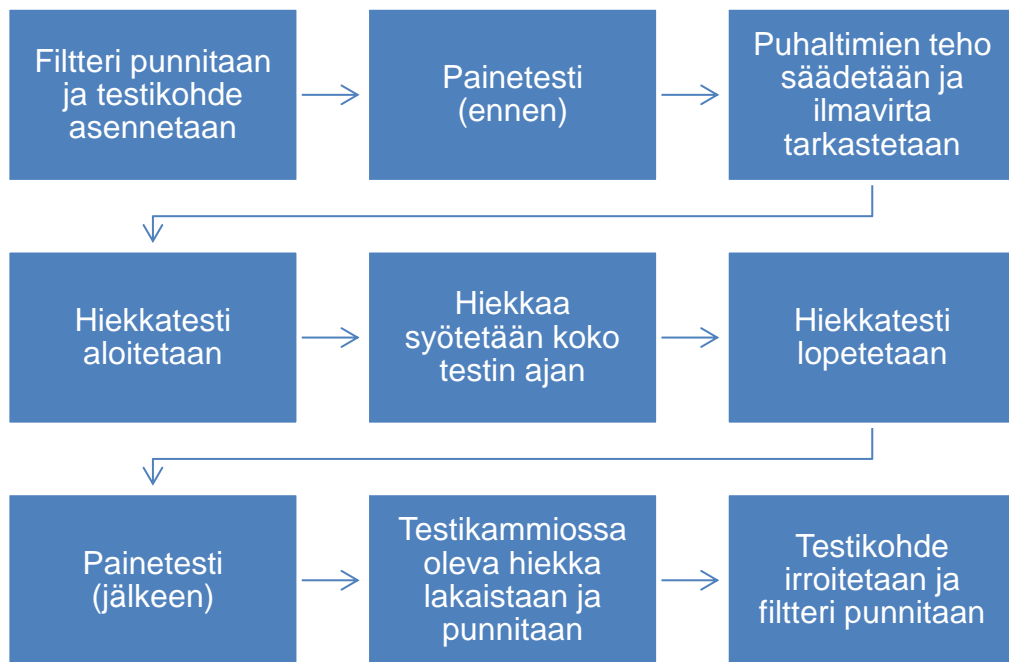
Kuva 10. Peltiä väännetty, jotta halkaisijaltaan 315 mm:n liitin mahtuu paikoilleen

Kokoonpanoprosessi on kuvattu vaiheittain liitteessä 1 ja vertailun vuoksi 3D-kuvat on lisätty CAD-mallista. Kokoonpanon valmistuttua havaittiin, että alkuperäiseen ilmavirran tavoitteeseen 20 m/s ei testilaitteisto kyennyt. Täydellä teholla puhaltimet kykenivät tuottamaan vain 14 m/s ilmavirran, jota käytettiin lopullisen testisuunnitelman laatimiseen.

4 Testien ajo

4.1 Testisuunnitelma

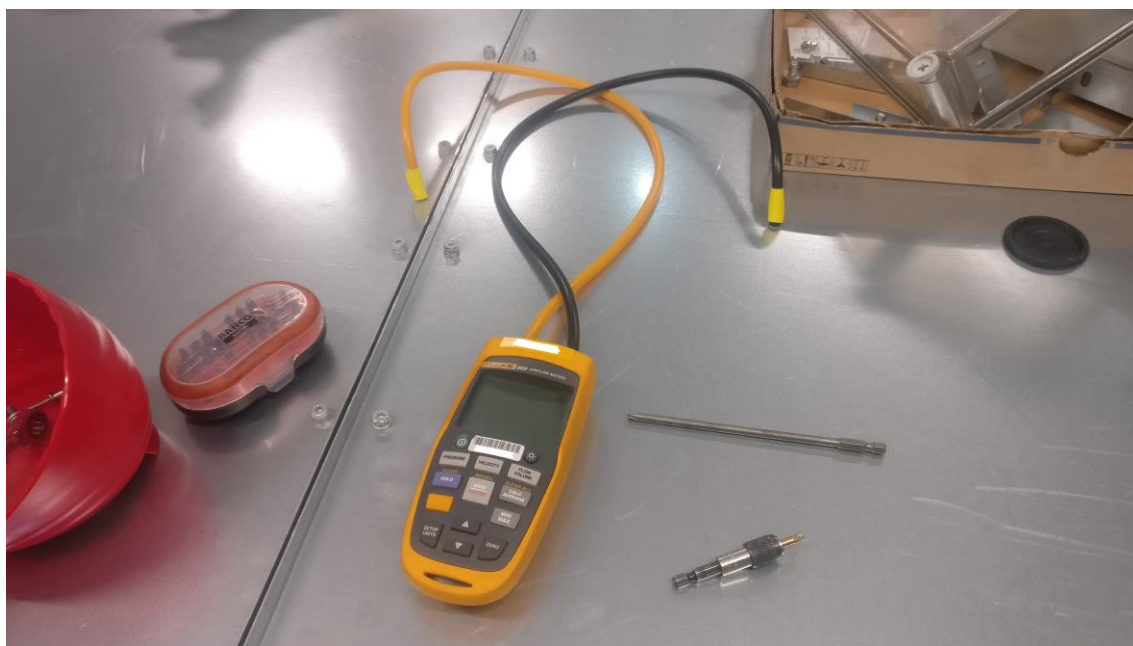
Sand trap -testilaitteiston kanssa suoritetaan kuusi hiekkatestiä, joiden yhteydessä suoritetaan paine-erotestit ennen ja jälkeen hiekkatestien painetestejä varten määritetyillä puhallinohjejännitteillä. Testit on jaettu kahteen osioon, joista ensimmäisessä testerin puhallus asetetaan maksimiarvoonsa, jolloin se tuottaa keskimäärin ilman nopeuden 14 m/s. Toisessa testiryhmässä ilmavirta säädetään keskimäärin 7 m/s suuruiseksi, jolloin tuloksiin on mahdollista saada variaatiota. Kaikki ilmavirtamittaukset suoritetaan kuumalanka-anemometrillä putken suulta ennen testien aloittamista.



Kuva 11. Hiekkatestin toteutus

4.1.1 Painetesti

Painetestin tarkoituksena on määritellä paine-ero filtteriosuuden yli. Painemittaus suoritetaan ennen ja jälkeen jokaista hiekkatestiä puhallinohjännitteillä 4 V, 5 V, 6 V, 7 V, 8 V, 9 V sekä 10 V. Mittauksen aikana käytetään vain filtlerin takapuolella olevia poistoilmapuhaltimia.



Kuva 12. Paine-eroteesteissä käytetty Fluke 922 -mittalaite

4.1.2 Hiekkatestit

Hiekkatesteihin varataan aikaa neljä tuntia jokaista suoritettavaa testiä kohden. Ennen testin aloittamista punnitaan filtteri, minkä jälkeen se asetetaan paikoilleen ja peitetään testattavalla kohteella. Testerin käynnistetään ja suoritetaan ensimmäinen paine-eromittaus. Paine-eromittauksen jälkeen aloitetaan hiekkatesti. Testissä käytetty hiekan määrä vakioidaan 6 000 g:aan ja sitä syötetään jatkuvalla tahdilla koko testin ajan. Ilmanpuhalluksen keskimääräinen hiekkakonsentraatio on laskennallisesti suuremmalle nopeudelle noin 0,8 g/m³ ja pienemmälle nopeudelle noin 0,4 g/m³.

Testin päätyttyä suoritetaan toinen paine-eromittaus, jonka jälkeen hiekkatilassa oleva ylimääräinen hiekka lakaistaan mahdollisimman huolellisesti ja punnitaan. Filtteri

irrotetaan ja myös punnitaan. Testi suoritetaan pienelle ja isolle sand trapille, sekä invertterin alkuperäiselle sääsuojalle molemmissa tuulennopeuksissa. Tulokset taulukoidaan ja niiden perusteella rakennetaan johtopäätökset. Testeissä kuvataan filtteri ennen ja jälkeen, sekä hiekkatila testin jälkeen. Kuvat testeistä on esitetty liitteessä 2.

4.2 Filtterien uusiokäyttö

Testien yhteydessä suoritetaan kokeilu, jolla selvitetään filttierien uusiokäytön potentiaali. Tämä toteutetaan ensimmäisessä testiryhmässä pienelle sand trapille ja alkuperäiselle sääsuojalle. Edellä mainittujen testien jälkeen filttiereistä ravistellaan mahdollisimman suuri määrä niihin kertynyttä hiekkaa pois ja niille suoritetaan uusi paine-eromittaus. Näin voidaan arvioida, onko filtteri vielä mahdollisesti käyttökelpoinen esimerkiksi hiekkamyrskyn jälkeen.

5 Tulosten tarkastelu

Taulukossa 1 on esitetty ensimmäisen testiryhmän syöttö- ja poistodata. Testeissä on vakioitu ilmavirta sekä syötetyn hiekan määrä. Kaikki tarpeelliset mittauskohteet on tarkasti punnittu.

Taulukko 1. Täyden puhallustehon hiekan syöttö- ja poistodata

Ilmavirta (14 m/s)			
	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja
Filtteri ennen (g)	2169	2194	2196
Filtteri jälkeen (g)	3554	3331	3070
Hiekka syöttö (g)	6000	6000	6000
Hiekka lakaistu (g)	4541	4846	5055
Ravisteltu hiekka (g)	1350	1092	844

Taulukossa 2 on esitetty grammoina se määrä hiekkaa, joka pääsi filttiin asti testin aikana. Lisäksi tuloksissa on otettu huomioon hiekkamäärän erotus dHiekka, jonka avulla voidaan muodostaa laskennallisesti virhearvio jokaiselle testille. Virhearviointi

perustuu testin aikana hävinneeseen hiekan prosenttiosuuteen laitteistoon syötetystä hiekan määrästä. Täyden puhallustehon testeissä pienen hiekanerottimen virhearvio on

$$(74 \text{ g} / 6000 \text{ g}) * 100 = 1,23 \text{ \%}.$$

Ison hiekanerottimen virhearvio on

$$(17 \text{ g} / 6000 \text{ g}) * 100 = 0,28 \text{ \%}.$$

Lisäksi alkuperäisen sääsuojan virhearvio on

$$(71 \text{ g} / 6000 \text{ g}) * 100 = 1,18 \text{ \%}.$$

Taulukko 2. Täyden puhallustehon hiekan tulos- ja virhedata

Tulokset Ilmavirta (14 m/s)			
	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja
Filtteri hiekka (g)	1385	1137	874
dHiekka (in - out) (g)	74	17	71

Taulukot 3 ja 4 esittävät toisen testiryhmän mittausdataa samoilla perusteilla kuin taulukot 1 ja 2. Huomioon otettava ilmavirran puolitus. Puolen puhallustehon testeissä pienen hiekanerottimen virhearvio on

$$(38 \text{ g} / 6000 \text{ g}) * 100 = 0,63 \text{ \%}.$$

Ison hiekanerottimen virhearvio on

$$(28 \text{ g} / 6000 \text{ g}) * 100 = 0,46 \text{ \%}.$$

Lisäksi alkuperäisen sääsuojan virhearvio on

$$(18 \text{ g} / 6000 \text{ g}) * 100 = 0,30 \text{ \%}.$$

Taulukko 3. Puolen puhallustehon hiekan syöttö- ja poisto data

Ilmavirta (7 m/s)			
	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja
Filtteri ennen (g)	2184	2232	2219
Filtteri jälkeen (g)	2656	2617	2975
Hiekka syöttö (g)	6000	6000	6000
Hiekka lakaistu (g)	5490	5587	5226
Ravisteltu hiekka (g)	461	372	738

Taulukko 4. Puolen puhallustehon hiekan tulos- ja virhedata

Tulokset Ilmavirta (7 m/s)			
	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja
Filtteri hiekka (g)	472	385	756
dHiekka (in - out) (g)	38	28	18

Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty paine-eromittauksien data ennen ja jälkeen jokaisen testin. Tuloksista voi havaita kuinka paljon paine-ero kasvaa, kun filttäreihin on päässyt hiekkaa eri tilanteiden mukaisesti.

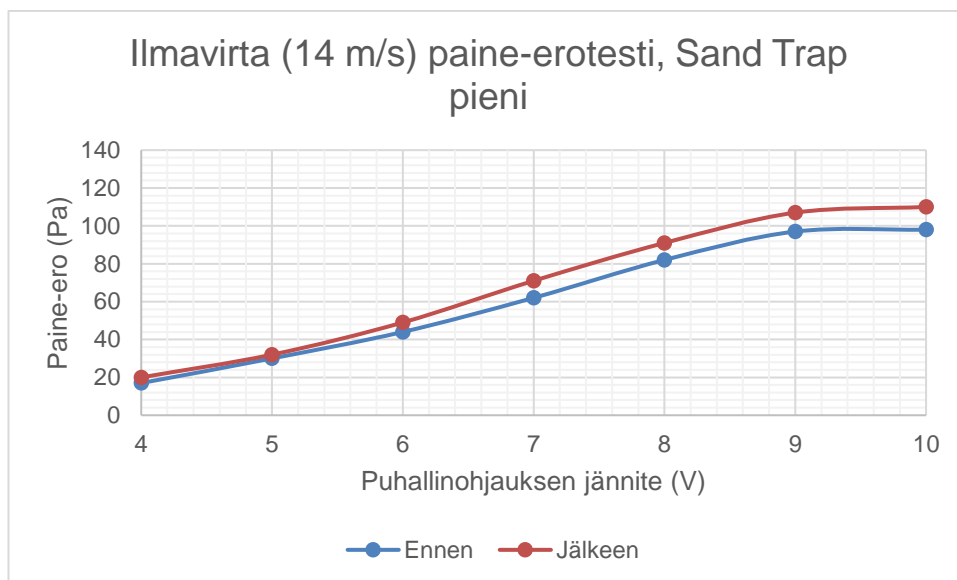
Taulukko 5. Täyden puhallustehon testien paine-eromittaukset

Ilmavirta (14 m/s) testien paine-ero mittaukset	Painetestit (ennen)		Paine-ero (Pa)		
	Jännite (V)	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja	
	4	17	19	20	
	5	30	32	34	
	6	44	46	55	
	7	62	65	76	
	8	82	85	102	
	9	97	99	123	
	10	98	100	125	
	Painetestit (jälkeen)		Paine-ero (Pa)		
	Jännite (V)	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja	
	4	20	19	21	
	5	32	32	37	
	6	49	48	58	
	7	71	68	80	
	8	91	89	106	
	9	107	105	131	
	10	110	106	132	

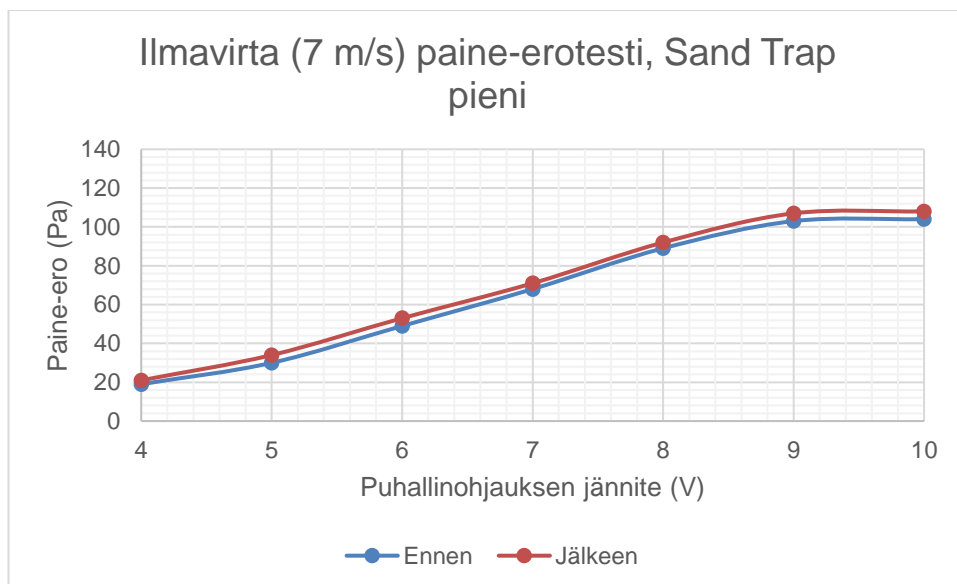
Taulukko 6. Puolen puhallustehon testien paine-eromittaukset

Ilmavirta (7 m/s) testien paine-ero mittaukset	Painetestit (ennen)		Paine-ero (Pa)		
	Jännite (V)	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja	
	4	19	19	20	
	5	30	32	36	
	6	49	46	56	
	7	68	67	77	
	8	89	85	100	
	9	103	101	122	
	10	104	103	123	
	Painetestit (jälkeen)		Paine-ero (Pa)		
	Jännite (V)	Sand Trap pieni	Sand Trap iso	Sääsuoja	
	4	21	19	22	
	5	34	33	38	
	6	53	47	59	
	7	71	70	84	
	8	92	88	105	
	9	107	105	129	
	10	108	106	130	

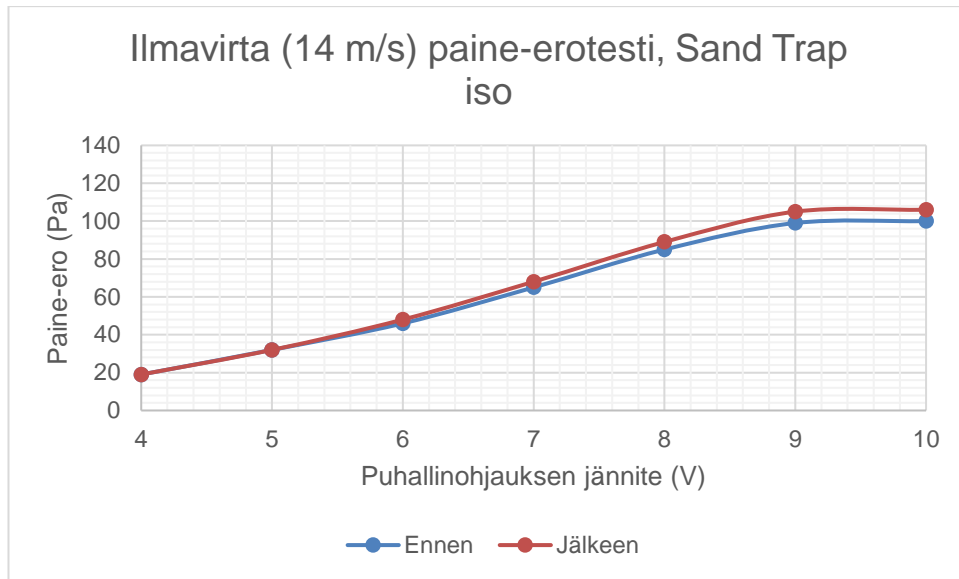
Kuvat 13–18 kuvastavat nousun paine-erossa filttien yli jokaisen testin jälkeen. Kasvu paine-erossa ei ole yleisesti kovin suuri varsinkaan pienemmillä puhallinohjeilla. Suurin ero havaitaan täyden puhallustehon testissä pienelle hiekanerottimelle (kuva 13), missä filttiin pääsi suurin määrä hiekkaa. Suurimmalla puhallinohjauksella mittaustulos tuotti 12,2 %:n nousun paine-erossa testin jälkeen.



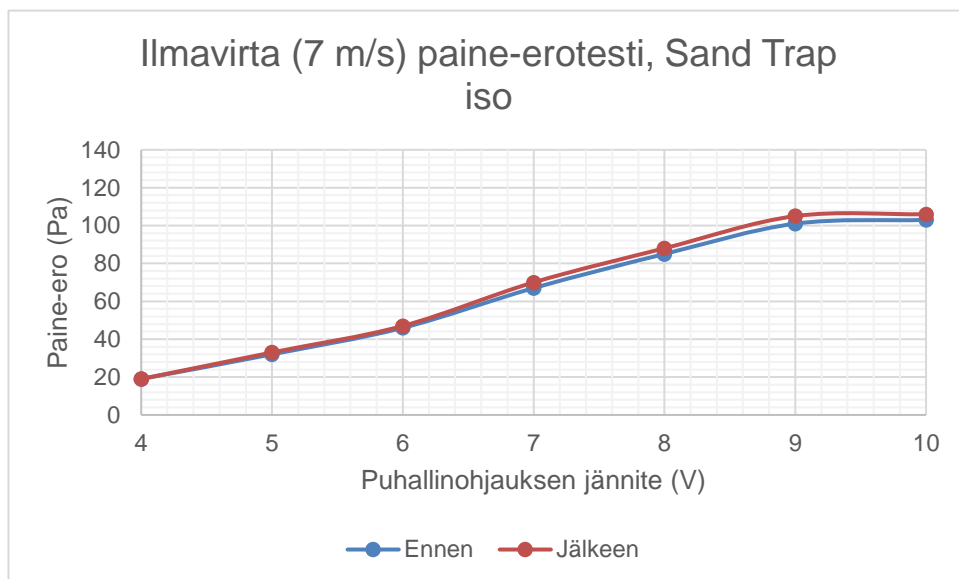
Kuva 13. Täyden puhallustehon paine-ero tulokset pienelle hiekaerottimelle



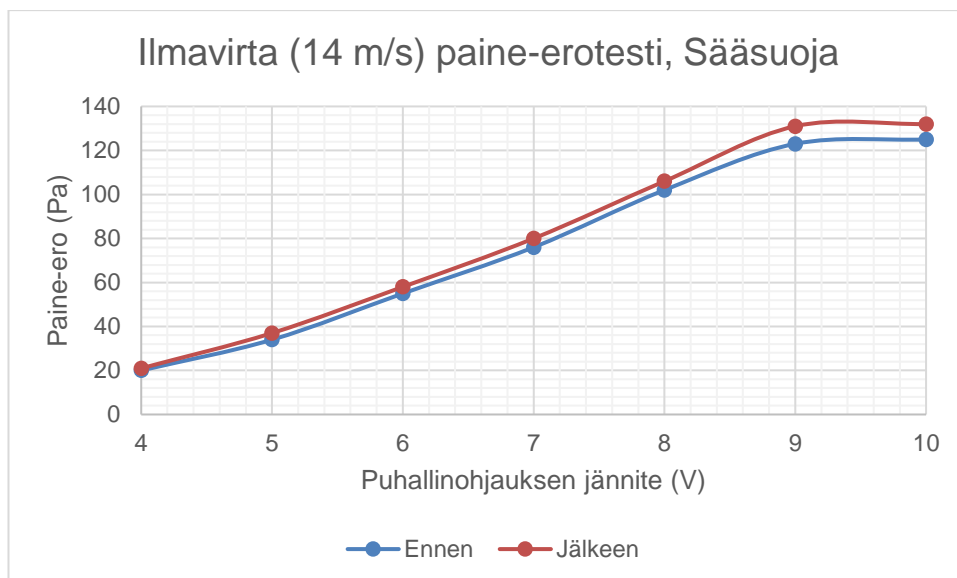
Kuva 14. Puolen puhallustehon paine-ero tulokset pienelle hiekaerottimelle



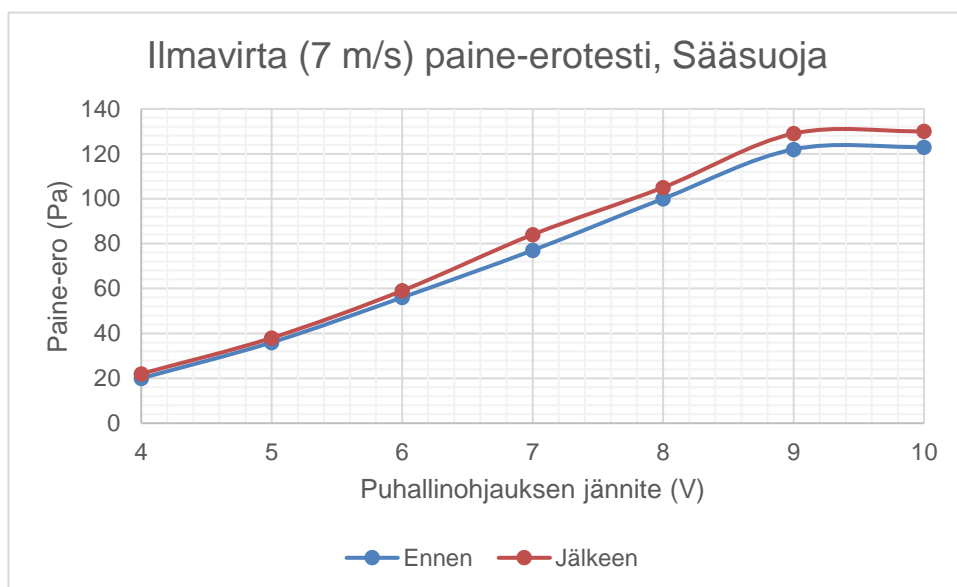
Kuva 15. Täyden puhallustehon paine-ero tulokset isolle hiekkaerottimelle



Kuva 16. Puolen puhallustehon paine-ero tulokset isolle hiekkaerottimelle



Kuva 17. Täyden puhallustehon paine-ero tulokset sääsuojalle



Kuva 18. Puolen puhallustehon paine-ero tulokset sääsuojalle

Taulukko 7 sisältää lisätestin tulokset filttierien potentiaalisen uusiokäytön suhteen. Kyseiset paine-eromittaukset on suoritettu samoilla filttiereillä kuin täyden puhallustehon testeissä hiekan poistamisen jälkeen. Testin tarkoitus on havainnollistaa, kuinka hyvin paine-ero palautuu alkuperäisiin lukemiin, jolloin voidaan arvioida, onko filttiereitä mahdollista käyttää esimerkiksi hiekkamyrskyn jälkeen.

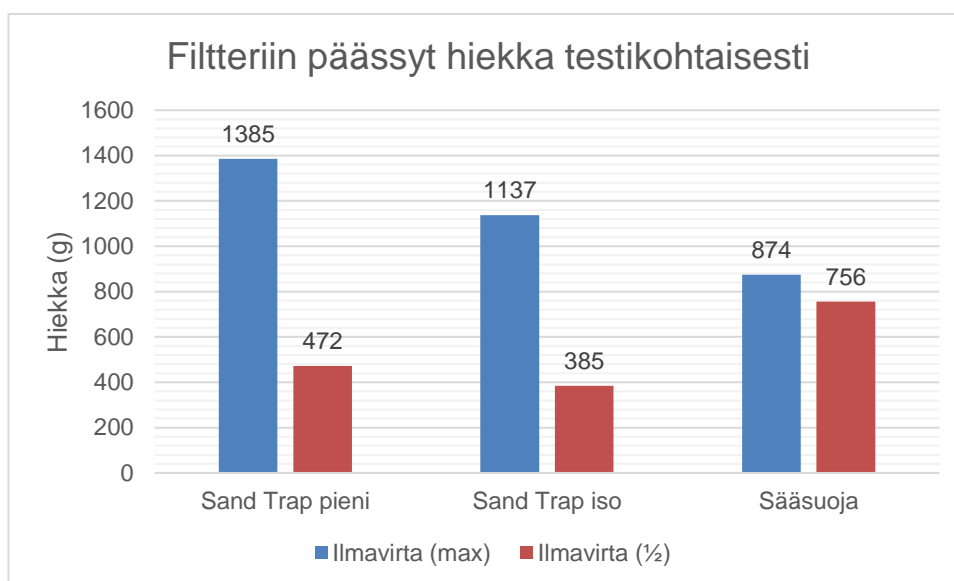
Taulukko 7. Filttierien uusiokäytön lisätesti

Filtterin mahdollinen uusiokäyttö	Painetestit (14 m/s)	Paine-ero (Pa)	
	Jännite (V)	Sand Trap pieni	Sääsuoja
	4	17	20
	5	32	35
	6	46	55
	7	65	78
	8	86	104
	9	100	126
	10	101	127

6 Johtopäätökset

6.1 Hiekanerottimien toiminta

Laitteistolla suoritettut testit tuottivat dataa, jonka perusteella voidaan luoda näkemys hiekanerottimien toiminnasta ja siitä, miten ilmansuodattimeen kerääntyvä hiekka vaikuttaa paine-eroon sen yli. Kuvassa 19 on esitetty grammoina hiekka, joka testien aikana kulkeutui erottimien ja sääsuojan läpi filtriin asti. Ensimmäisen testiryhmän (täysi puhallusteho) tulosten perusteella havaitaan selvästi, että tuuliolosuhteissa 14 m/s invertterin nykyinen sääsuoja osoittautui päästävän jopa 36,9 % vähemmän hiekkaa läpi kuin pienempi hiekanerotin ja 23,1 % vähemmän kuin isompi hiekanerotin. Toisen testiryhmän (puolen puhallustehon) tulokset osoittautuivat kuitenkin lähes päinvastaisiksi. Tuuliolosuhteissa 7 m/s nykyinen sääsuoja päästi jopa 60,2 % enemmän hiekkaa läpi kuin pienempi hiekanerotin ja 96,4 % enemmän kuin isompi hiekanerotin.



Kuva 19. Vertailu testeissä filtriin asti päässeestä hiekkamäärästä

Vaikka sääsuoja toimi huomattavasti eri tavalla molemmissa testiryhmissä, hiekanerottimien vertailussa nähdään kuitenkin selkeä toimintaero, nimittäin molemmissa testiryhmissä isompi hiekanerotin päästi keskimäärin 18 % vähemmän

hiekkaa läpi kuin pienempi hiekanerotin. Testeilla tuotetuilla tuloksilla ei voida antaa lopullista päätöstä hiekanerottimien toimivuudesta ja jatkotutkimuksille on tarvetta.

6.2 Filtterien uusiokäyttö

Ylimääräiset kaksi testiä, jotka suoritettiin pienen hiekanerottimen ja alkuperäisen sääsuojan täyden puhallustehon testien yhteydessä tuottivat positiivisen tuloksen filtterien potentiaalisesta uusiokäytöstä. Filttereistä poistui pelkällä ravistelulla keskimäärin 97 % sinne päässeestä hiekasta, ja paine-erotulokset palautuivat lähes alkuperäisiin arvoihinsa. Testin perusteella filttäreitä voisi uusiokäyttää useamman kerran, mutta vain rajallisesti ottaen huomioon, ettei palautuminen ollut täydellinen.

6.3 Jatkotutkimus

Hiekkatestit tuottivat suuren määrän kelvollista dataa, jonka perusteella voidaan kehittää useita jatkotoimenpiteitä. Tulosten perusteella olisi tarpeellista suorittaa lisää testejä useammalla eri ilmannopeudella, minkä perusteella olisi mahdollista havaita hiekanerottimien toimivuuden käännpiste. Hiekanerottimet toimivat huomattavasti alkuperäistä sääsuojaa paremmin ilmannopeudessa 7 m/s, mutta 14 m/s ilmannopeudessa huomattavasti heikommin. Testien olosuhteita voisi myös laajentaa merkittävästi pidentäen testiaikaa neljästä tunnista kahdeksaan, tällöin kasvattaen syötetyn hiekan määrää 6 000 g:sta 12 000 g:aan. Jatkotutkimus mahdollistaa laajemman määrän dataa, jonka perusteella voisi tehdä johtopäätöksen, onko kokonaan uuden hiekanerottimen suunnittelu kannattavaa.

Laitteiston jatkuvasti avattava sivupaneeli vaatii lisää mekaniikkasuunnittelua. Paneeli on suunniteltu kiinnitettäväksi ruuveilla rungossa oleviin vetokierteisiin, mutta kierteet kuluvat pitkällä aikavälillä ja lopulta pettävät. Kiinnitys vaatii toisenlaisen ratkaisun, jos laitteella suoritetaan useampia lisätestejä.

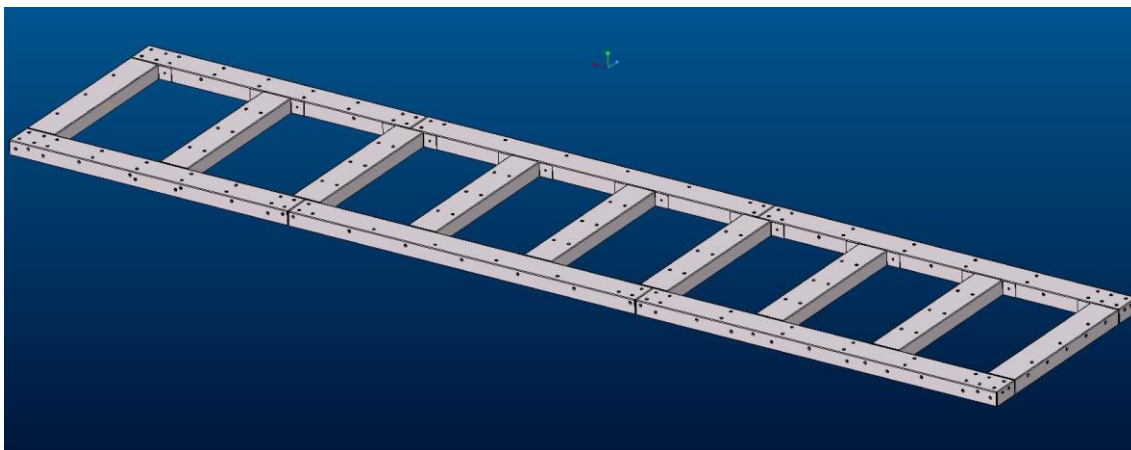
Lähteet

- 1 Invertteri. Verkkoaineisto. Aurinkovirta.
<<http://www.aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkovoimala/invertteri/>>. Luettu 4.3.2020.
- 2 Sand Trap Louvers. Verkkoaineisto. Air Master Emirates.
<<http://airmasteremirates.com/wp-content/uploads/2016/02/Sand-Trap-Louvers.pdf>>. Luettu 3.5.2020.
- 3 Inverter Station (1660-7200 kVA). Verkkoaineisto. Ingeteam. <https://www.ingetteam.com/in/en-us/sectors/photovoltaic-energy/p15_24_289/inverter-station.aspx>. Luettu 4.3.2020.
- 4 Ingeteam's PV inverters certified to withstand sandstorms. 2018. Verkkoaineisto.
<<https://www.solarpowerworldonline.com/2018/01/ingeteams-pv-inverters-certified-withstand-sandstorms/>>. Luettu 5.3.2020.
- 5 Natural Hazards Mitigation Plan Dust Storms Chapter. 2012. Verkkoaineisto. State of Oregon. <https://web.archive.org/web/20131021013222/http://csc.uoregon.edu/opdr/sites/csc.uoregon.edu/opdr/files/docs/ORNHMP/OR-SNHMP_%20dust-storms_chapter.pdf>. Luettu 3.5.2020.
- 6 MIL-STD-810G Part 12 (Sand and Dust) Method 510.5. 2015. Verkkoaineisto. CP Tech. <<https://cp-techusa.com/mil-std-810/mil-std-810g-part-12-sand-and-dust-method-510-5/>>. Luettu 3.5.2020.

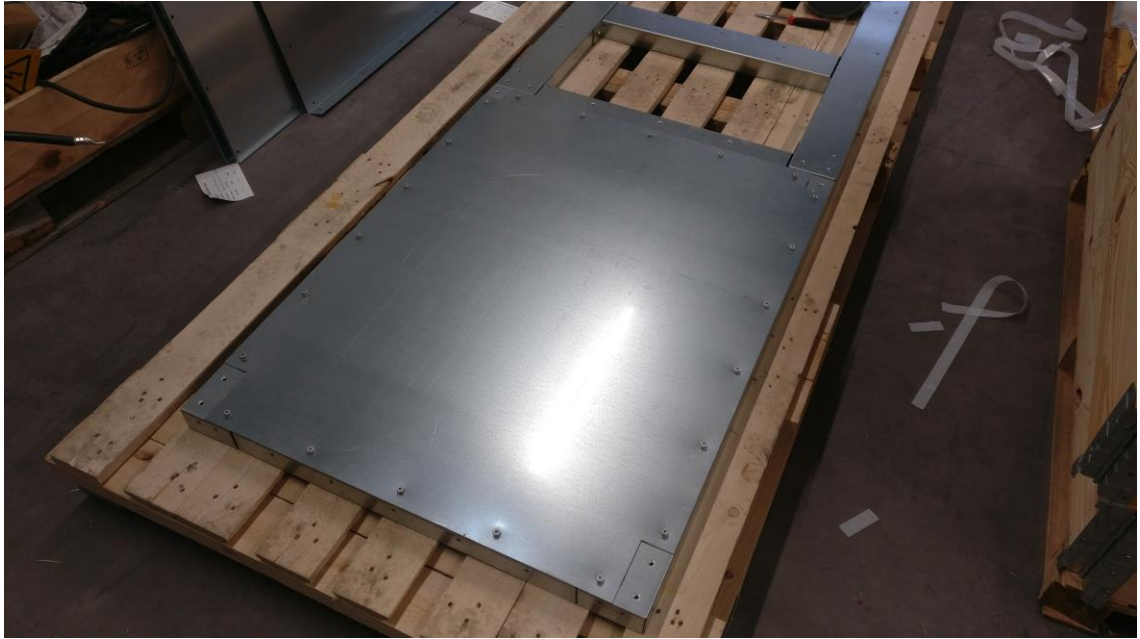
Liite 1. Kokoonpanon kuvat



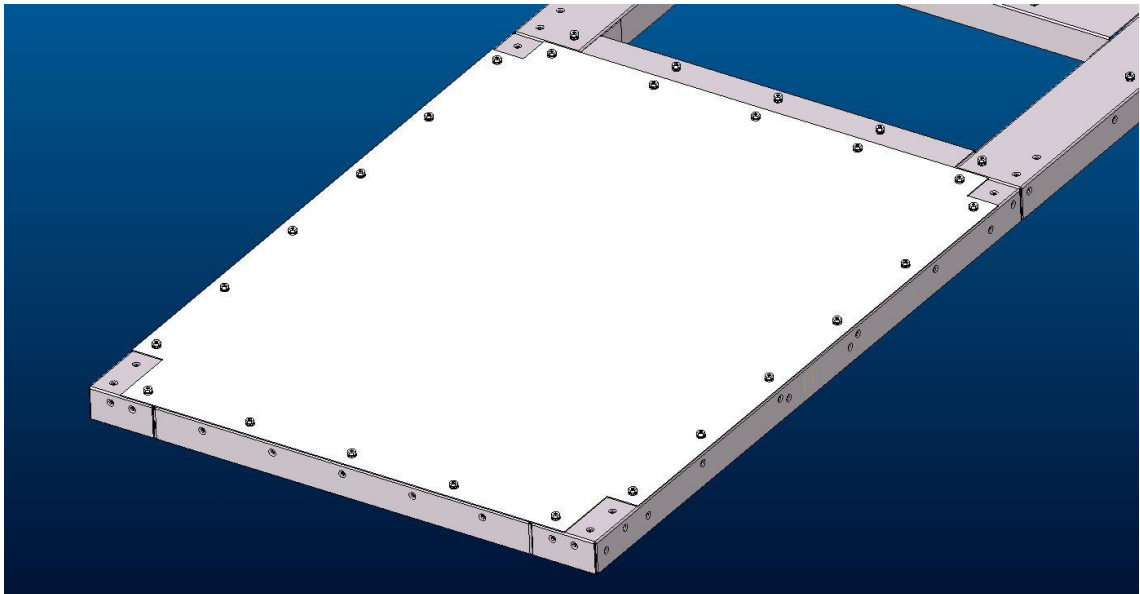
Kuva 1. Rungon pohjapalkit



Kuva 2. Rungon pohjapalkit – 3D



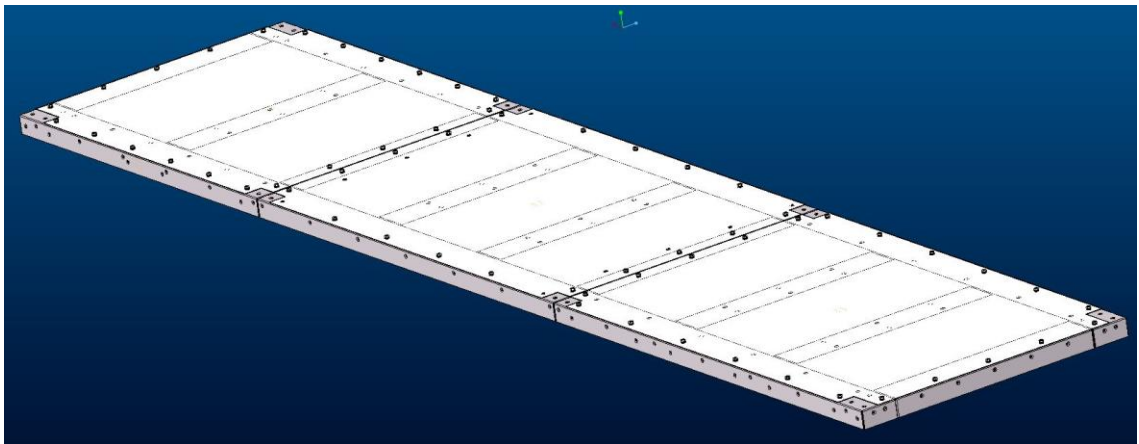
Kuva 3. Ensimmäinen lattiapelti



Kuva 4. Ensimmäinen lattiapelti – 3D



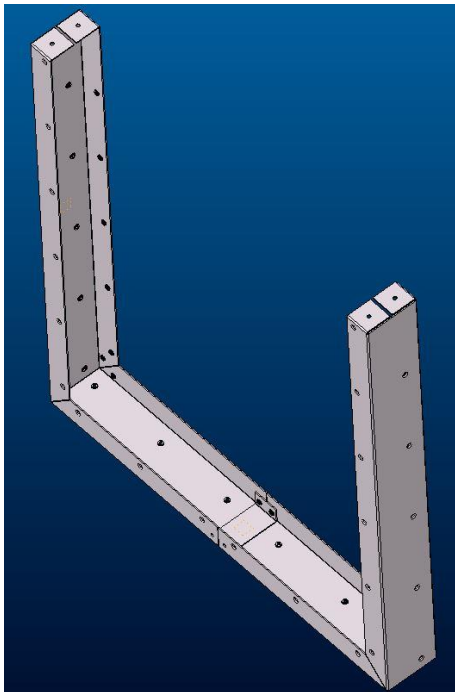
Kuva 5. Testerin lattiapellit asennettuna



Kuva 6. Testerin lattiapellit asennettuna – 3D



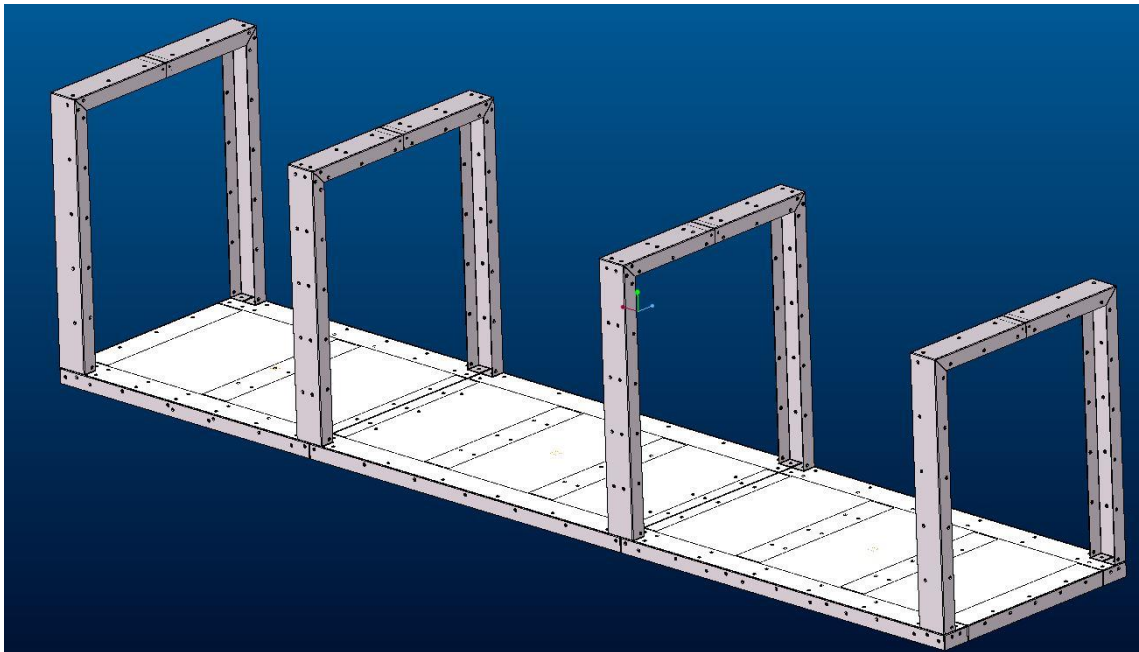
Kuva 7. Rungon pystypalkki kasattuna



Kuva 8. Rungon pystypalkki kasattuna – 3D



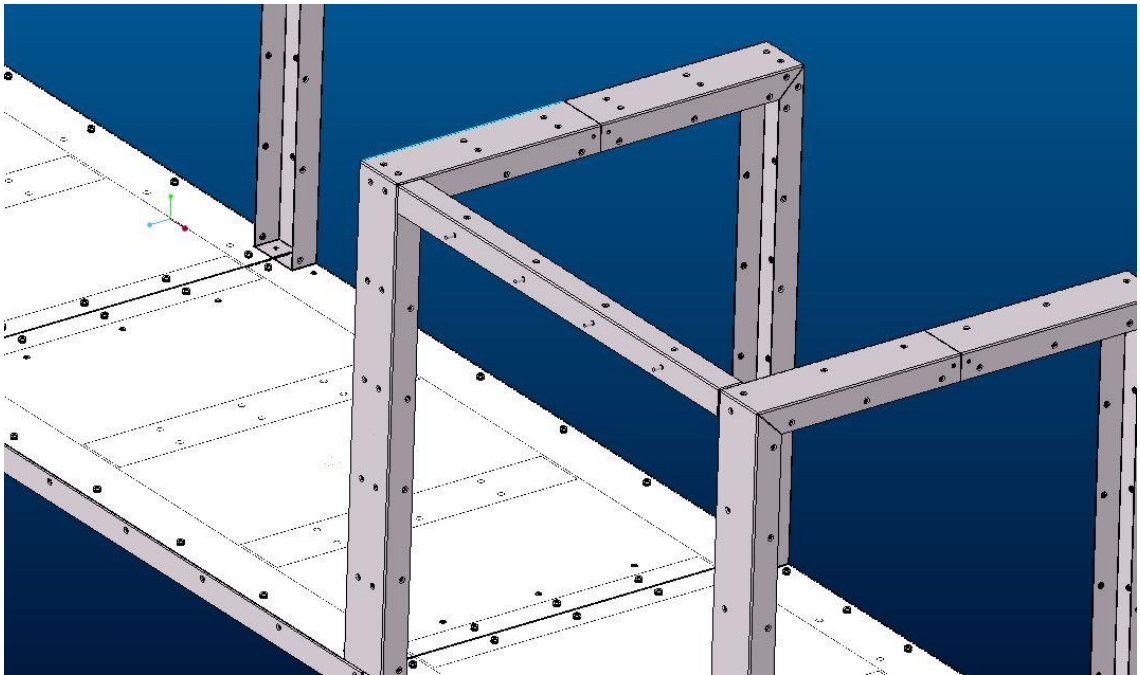
Kuva 9. Rungon pystypalkit asennettu testeriin



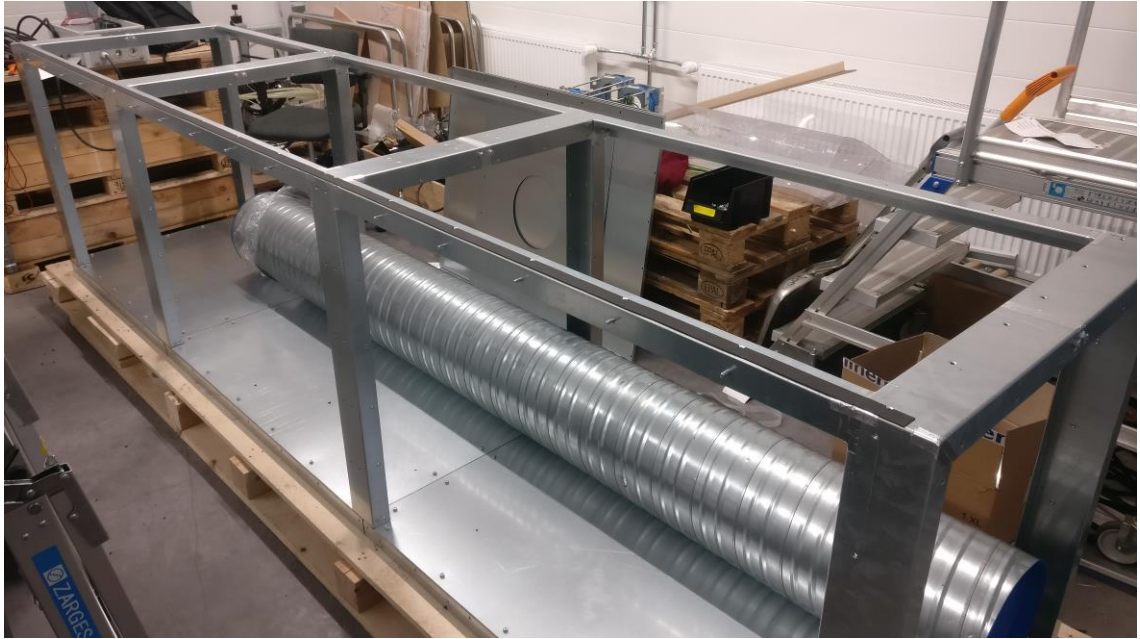
Kuva 10. Rungon pystypalkit asennettu testeriin – 3D



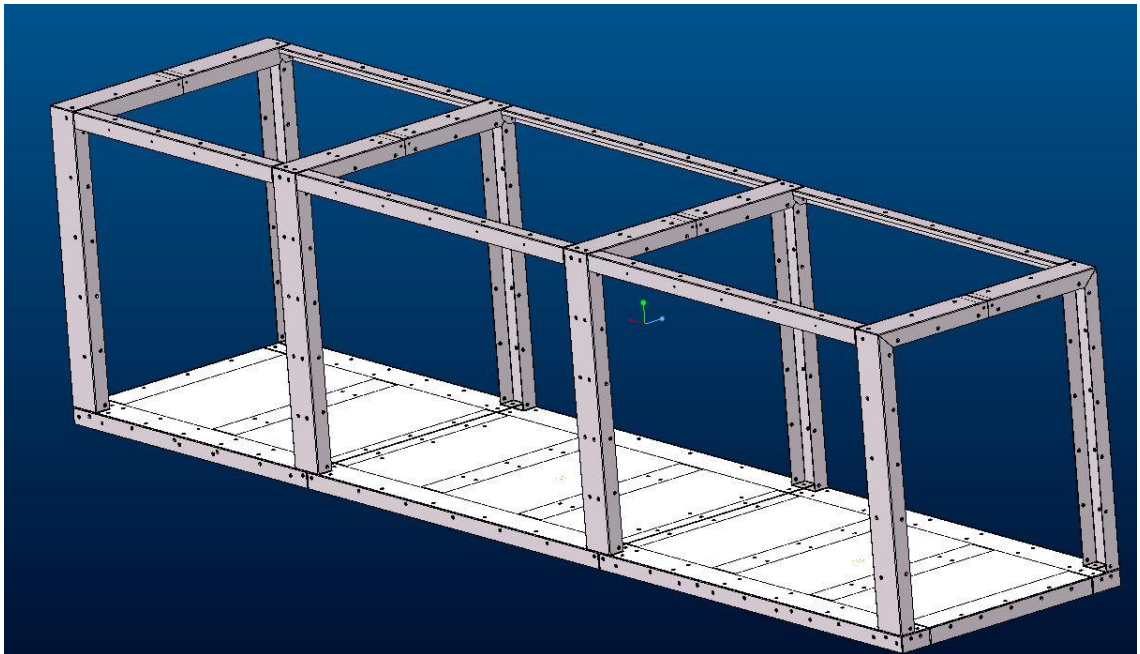
Kuva 11. Rungon yläpalkki asennettu



Kuva 12. Rungon yläpalkki asennettu – 3D



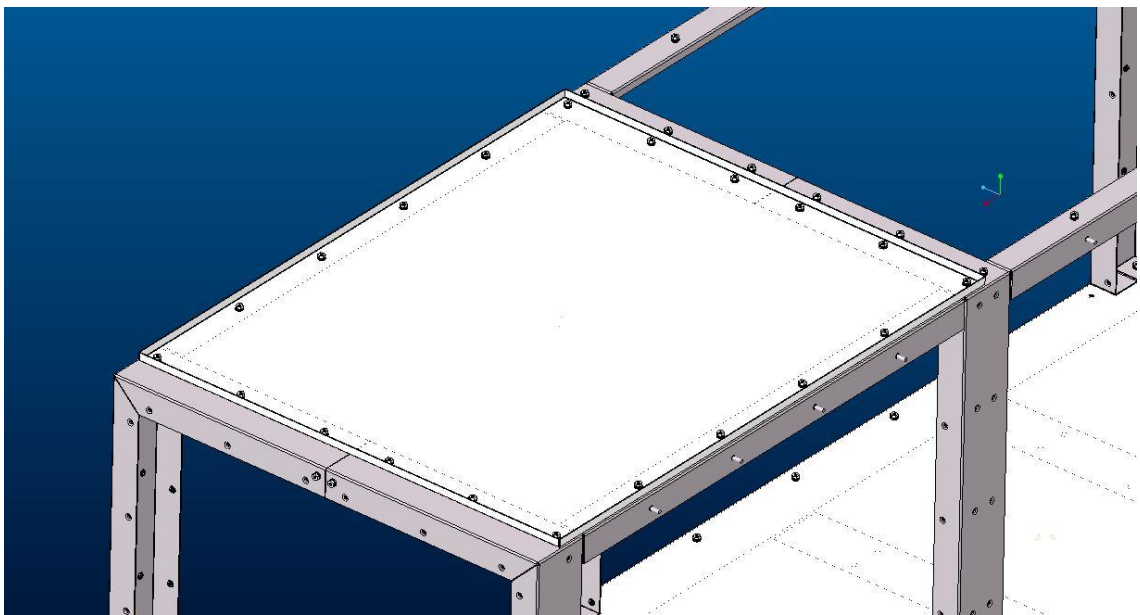
Kuva 13. Rungon yläpalkit asennettu testeriin



Kuva 14. Rungon yläpalkit asennettu testeriin – 3D



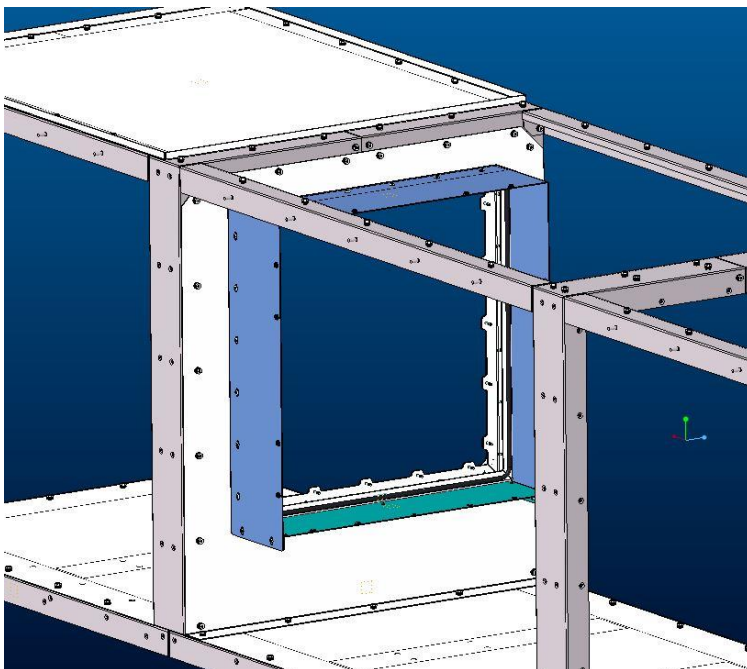
Kuva 15. Ensimmäinen kattopaneeli asennettu



Kuva 16. Ensimmäinen kattopaneeli asennettu – 3D



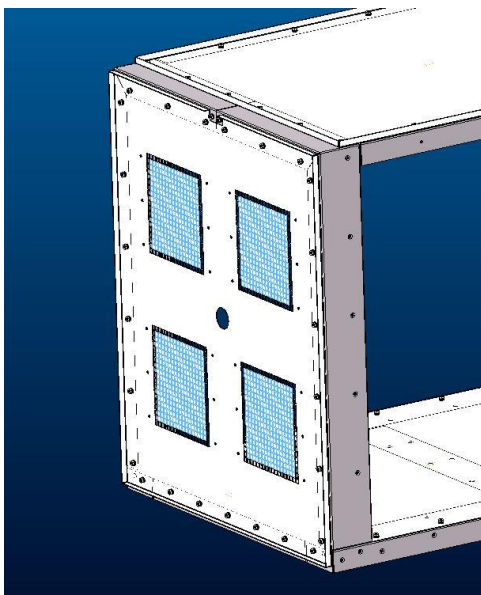
Kuva 17. Ensimmäinen väliseinä asennettu testeriin (filteriboksi)



Kuva 18. Ensimmäinen väliseinä asennettu testeriin (filteriboksi) – 3D



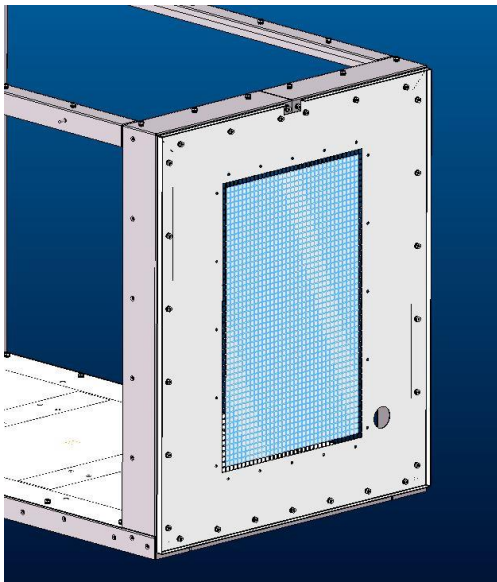
Kuva 19. Ulostulo päätypaneeli asennettu



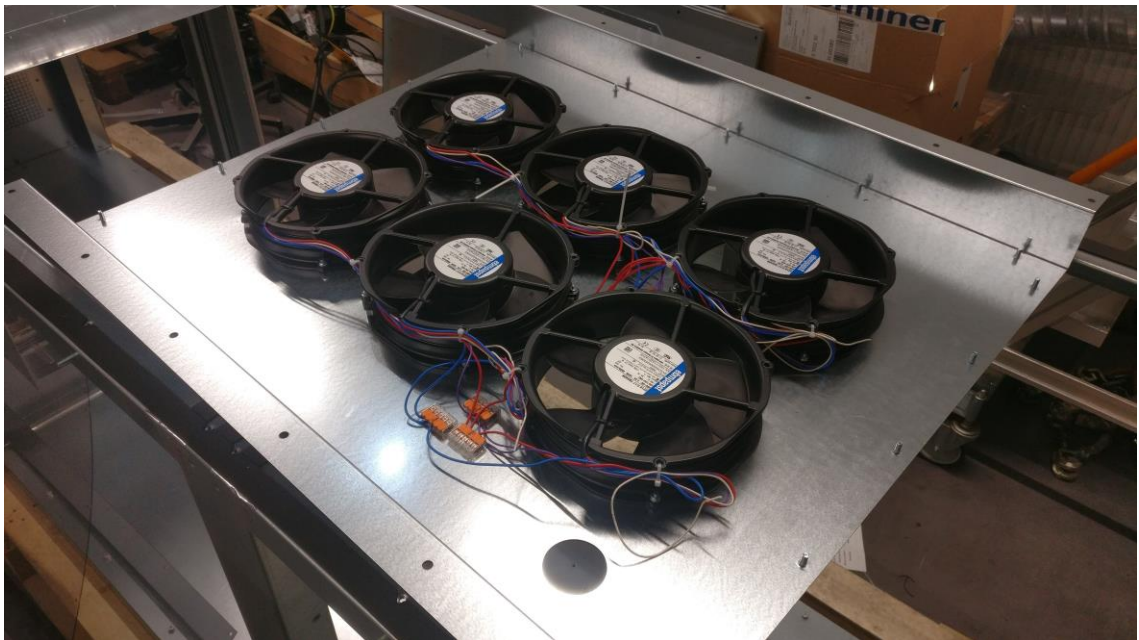
Kuva 20. Ulostulo päätypaneeli asennettu – 3D



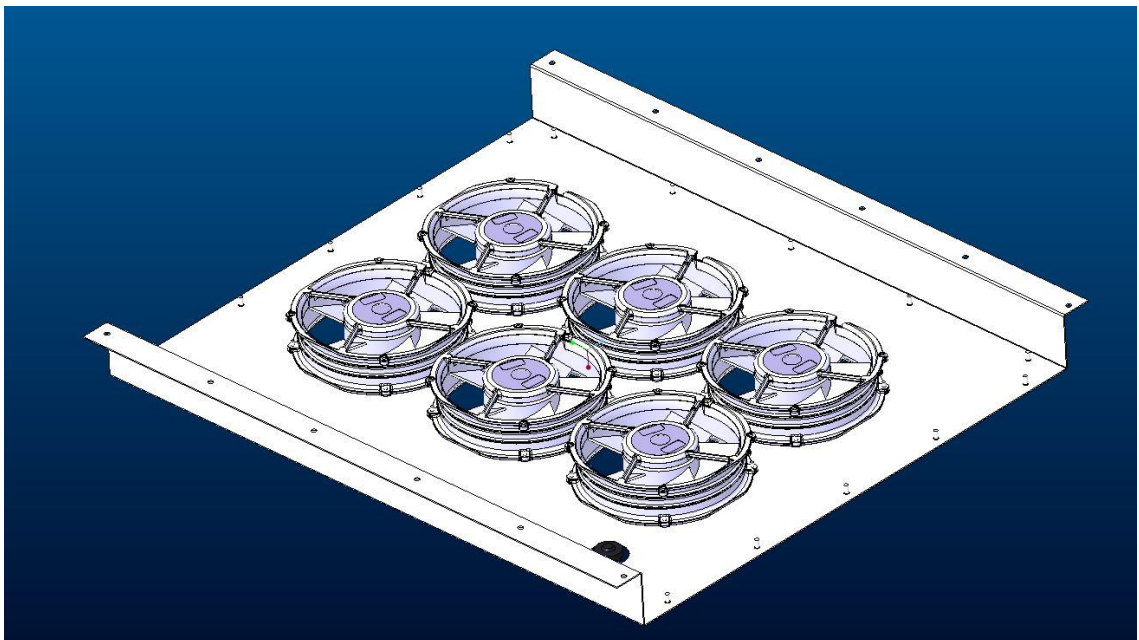
Kuva 21. Sisääntulo päätypaneeli asennettu



Kuva 22. Sisääntulo päätypaneeli asennettu – 3D



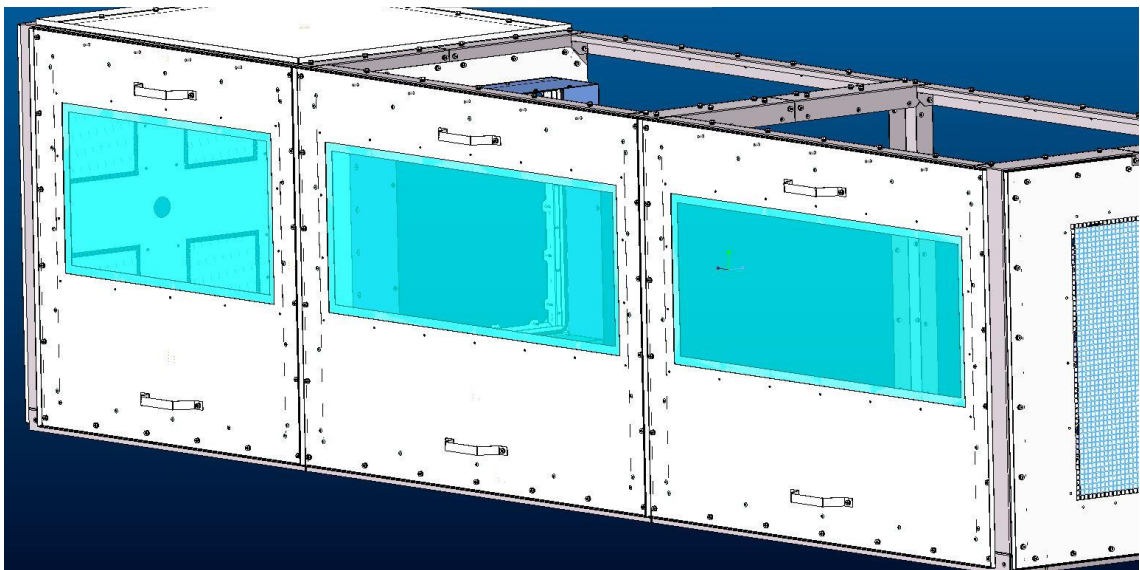
Kuva 23. Puhaltimet kiinnitetty puhallinpaneeliin



Kuva 24. Puhaltimet kiinnitetty puhallinpaneeliin – 3D



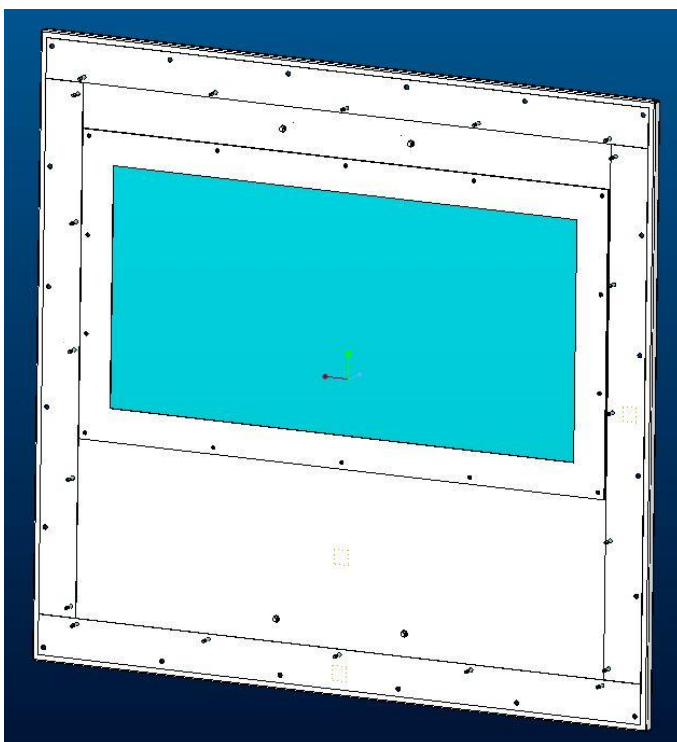
Kuva 25. Irroitettavat sivupaneelit kasattu



Kuva 26. Irroitettavat sivupaneelit kasattu – 3D



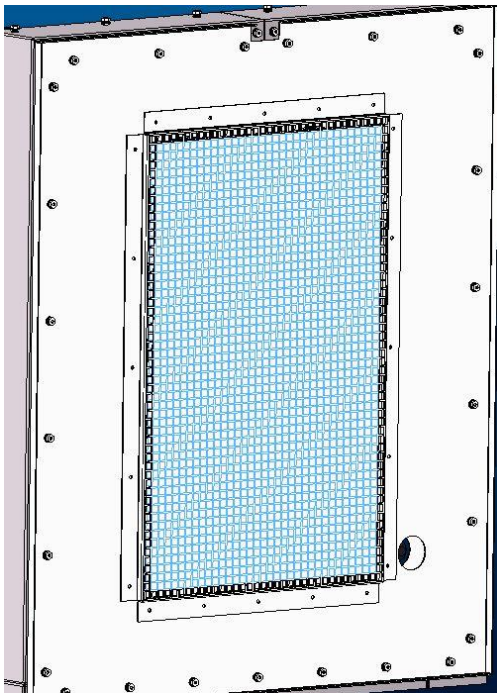
Kuva 27. Irroitettava sivupaneeli (sisäpuoli)



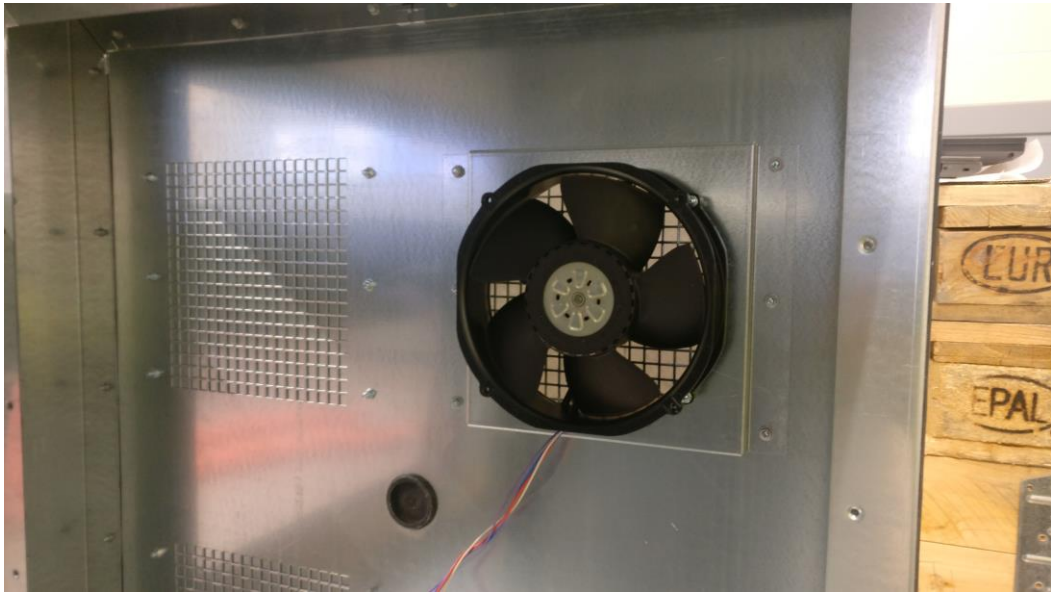
Kuva 28. Irroitettava sivupaneeli (sisäpuoli) – 3D



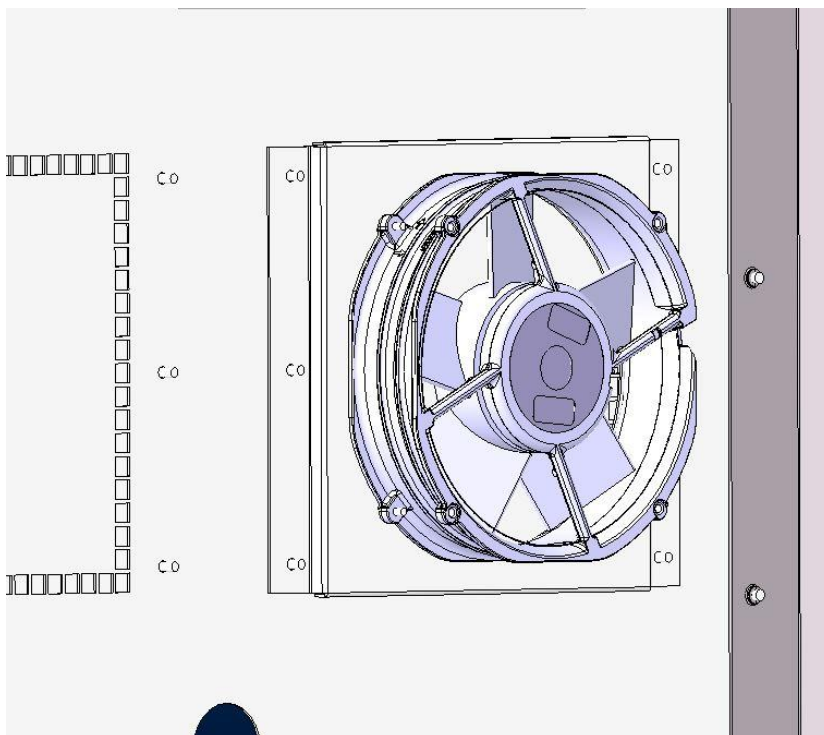
Kuva 29. Sisääntulo päätypaneelin huopafiltteri ja kehikko asennettu



Kuva 30. Sisääntulo päätypaneelin huopafiltteri ja kehikko asennettu – 3D



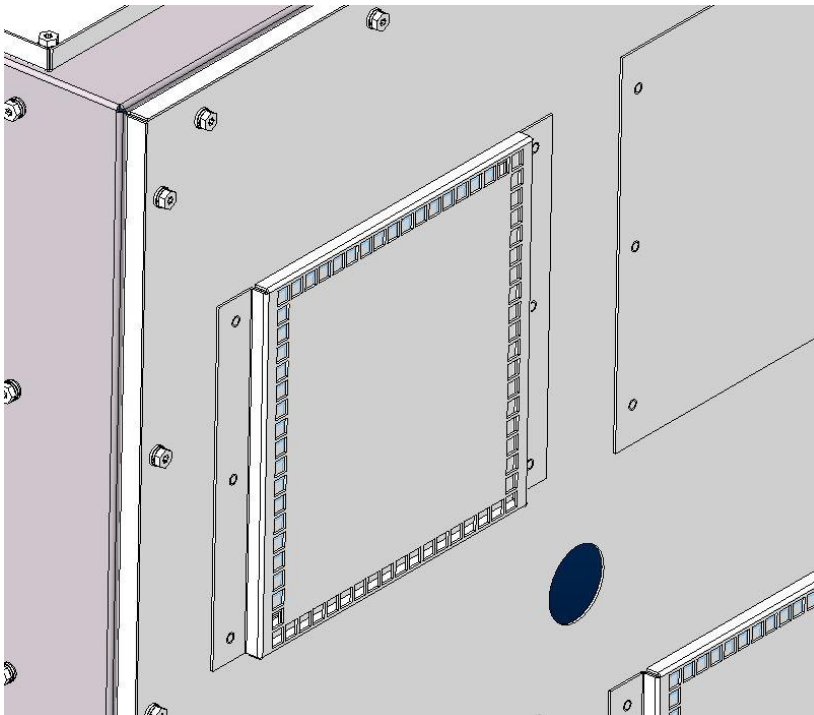
Kuva 31. Ulostulopuhallin asennettu



Kuva 32. Ulostulopuhallin asennettu – 3D



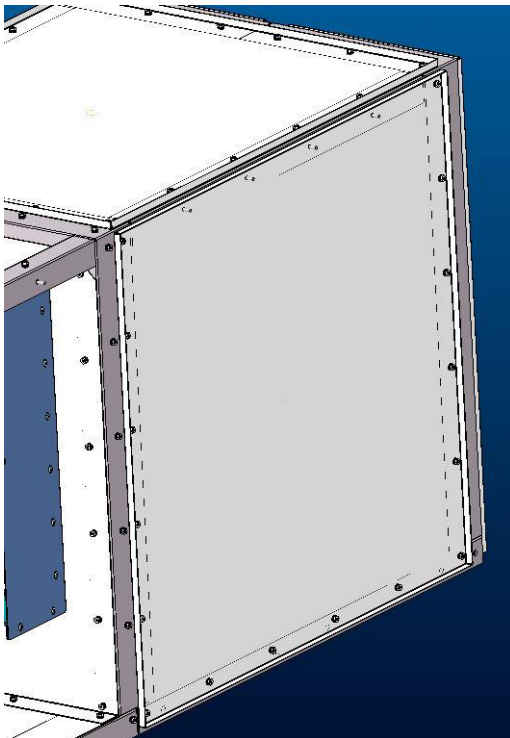
Kuva 33. Ulostulo päät-paneelin huopafiltteri ja kehikko asennettu



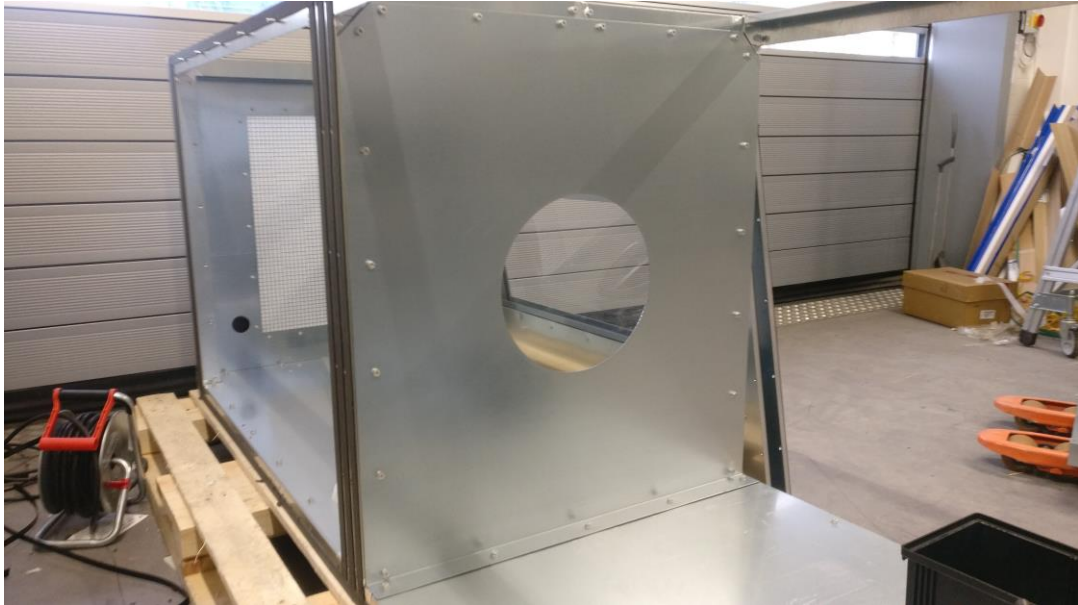
Kuva 34. Ulostulo päät-paneelin huopafiltteri ja kehikko asennettu – 3D



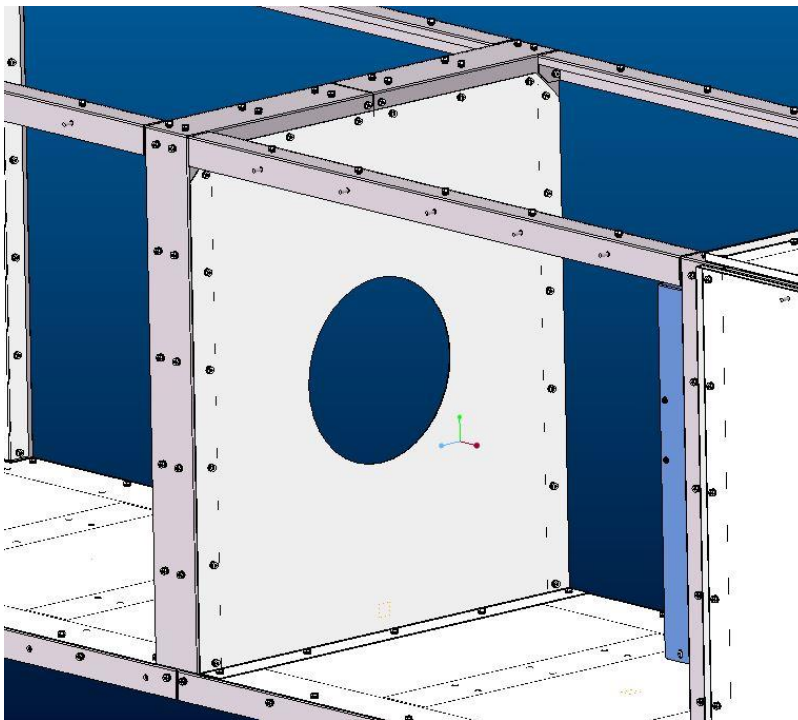
Kuva 35. Ensimmäinen takaseinäpaneeli asennettu



Kuva 36. Ensimmäinen takaseinäpaneeli asennettu – 3D



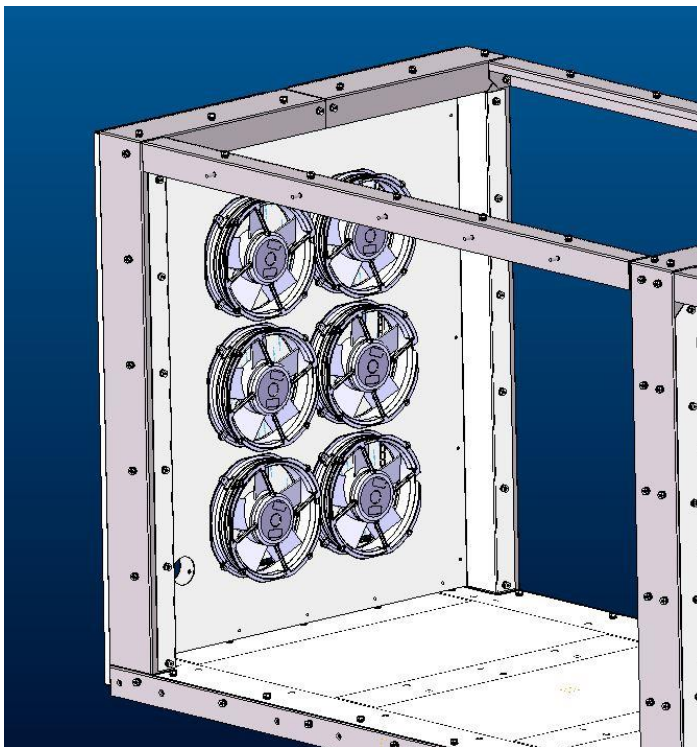
Kuva 37. Toinen väliseinä asennettu testeriin (ilmansyötön läpivienti)



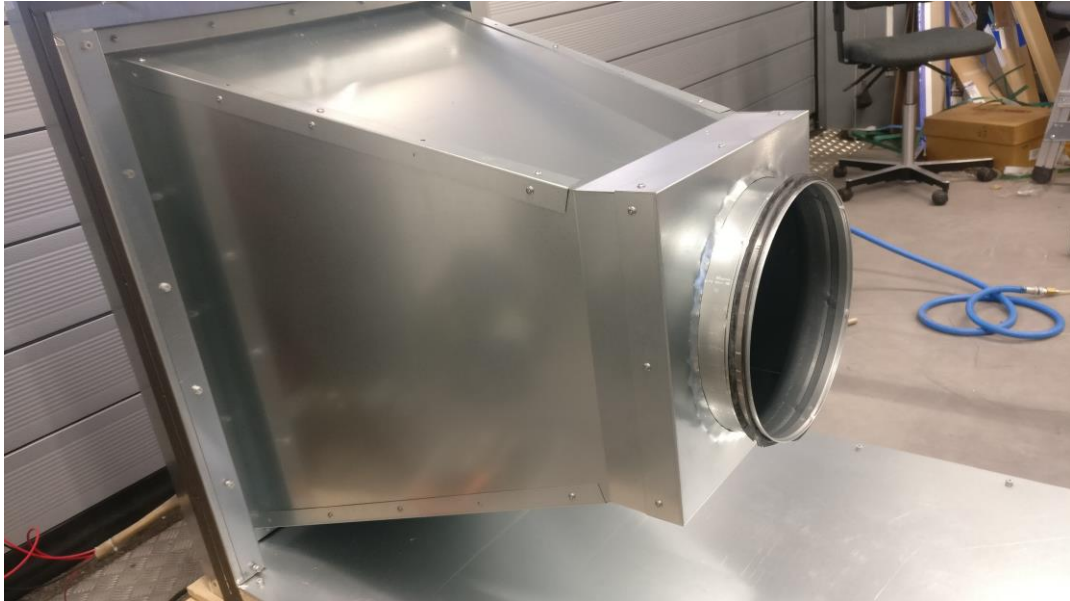
Kuva 38. Toinen väliseinä asennettu testeriin (ilmansyötön läpivienti) – 3D



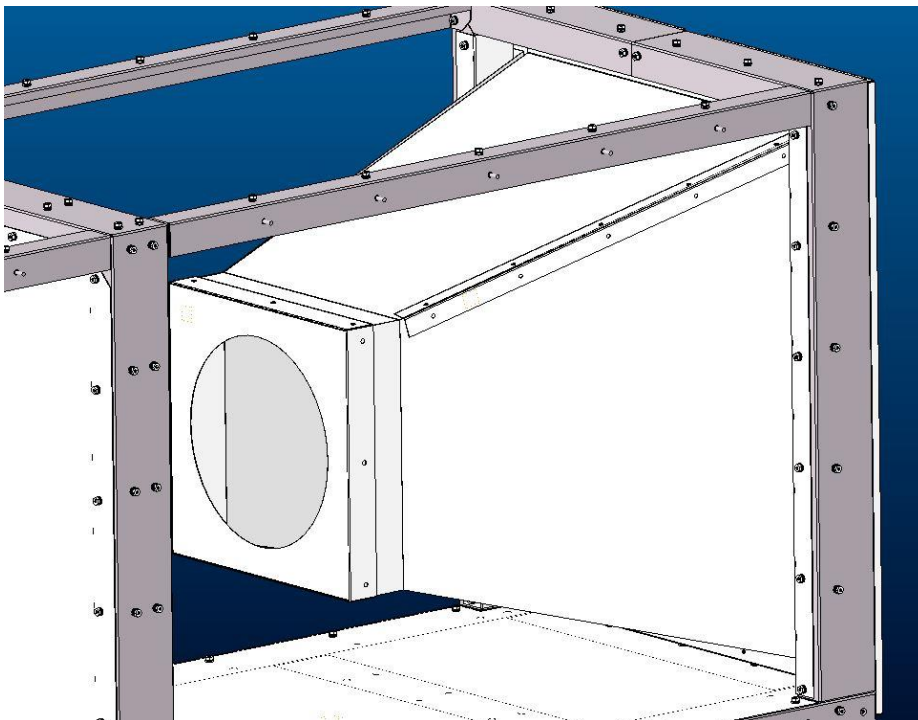
Kuva 39. Puhallinpaneeli asennettu testerin sisääntulopäähän



Kuva 40. Puhallinpaneeli asennettu testerin sisääntulopäähän – 3D



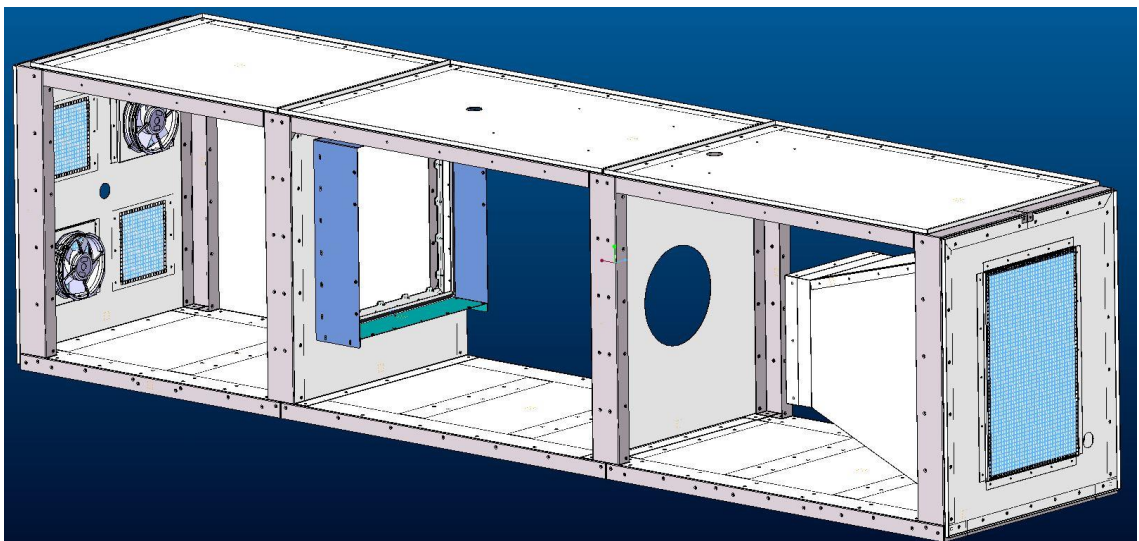
Kuva 41. Ilmansyötön suppilo asennettu puhallinpaneelin päälle



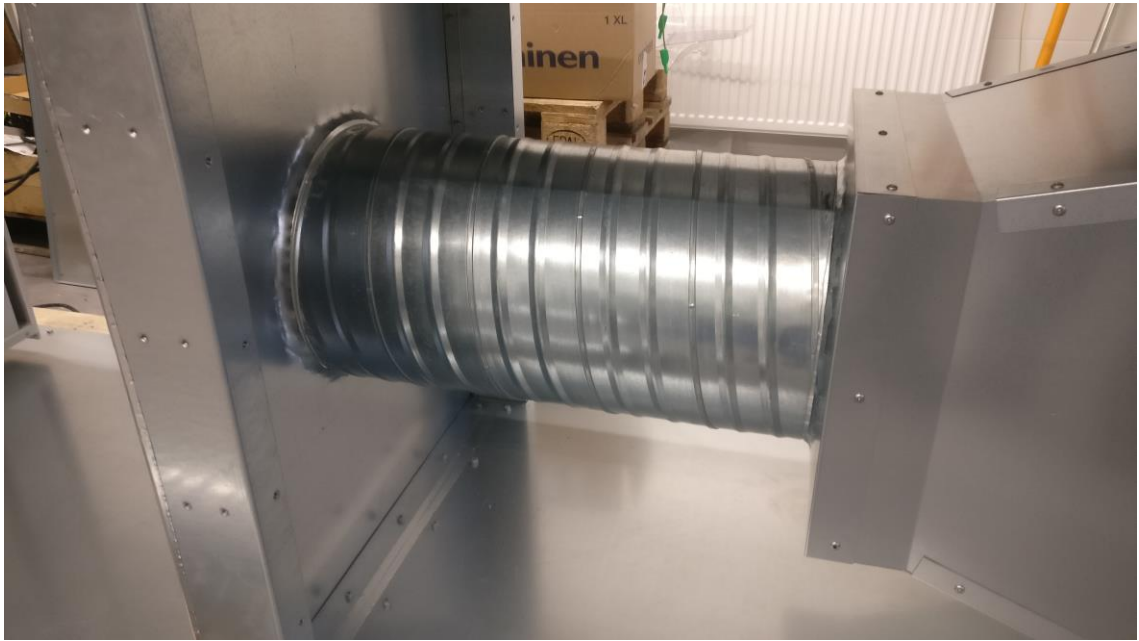
Kuva 42. Ilmansyötön suppilo asennettu puhallinpaneelin päälle – 3D



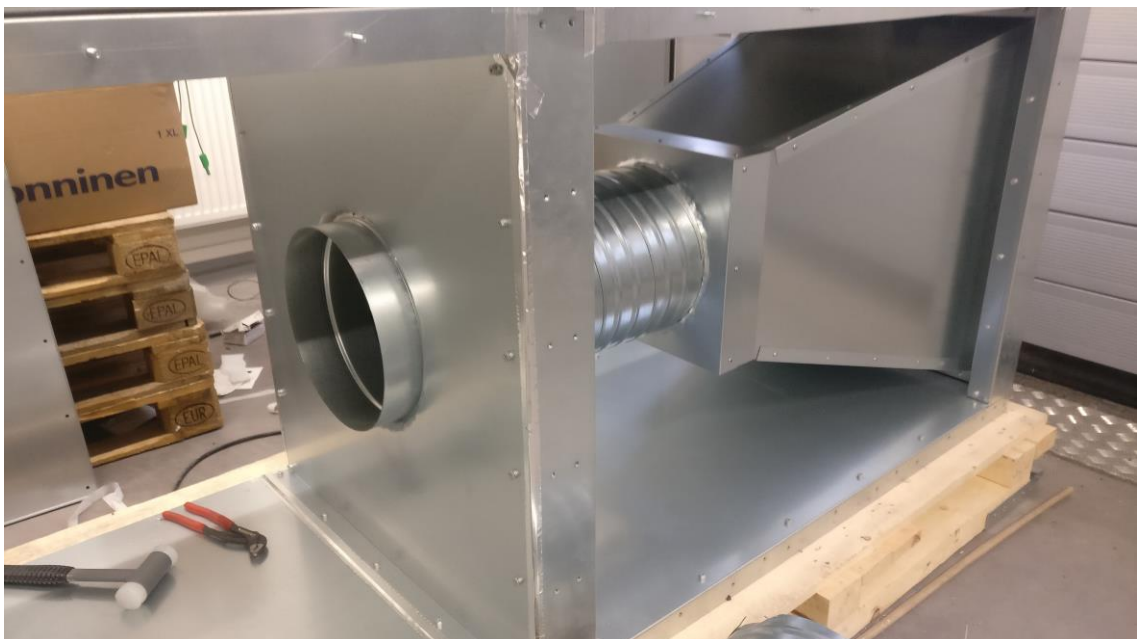
Kuva 43. Loput kattopaneelit asennettu testeriin



Kuva 44. Loput kattopaneelit asennettu testeriin – 3D



Kuva 45. Ilmastointiputki asennettu suppilon ja läpivientipaneelin väliin



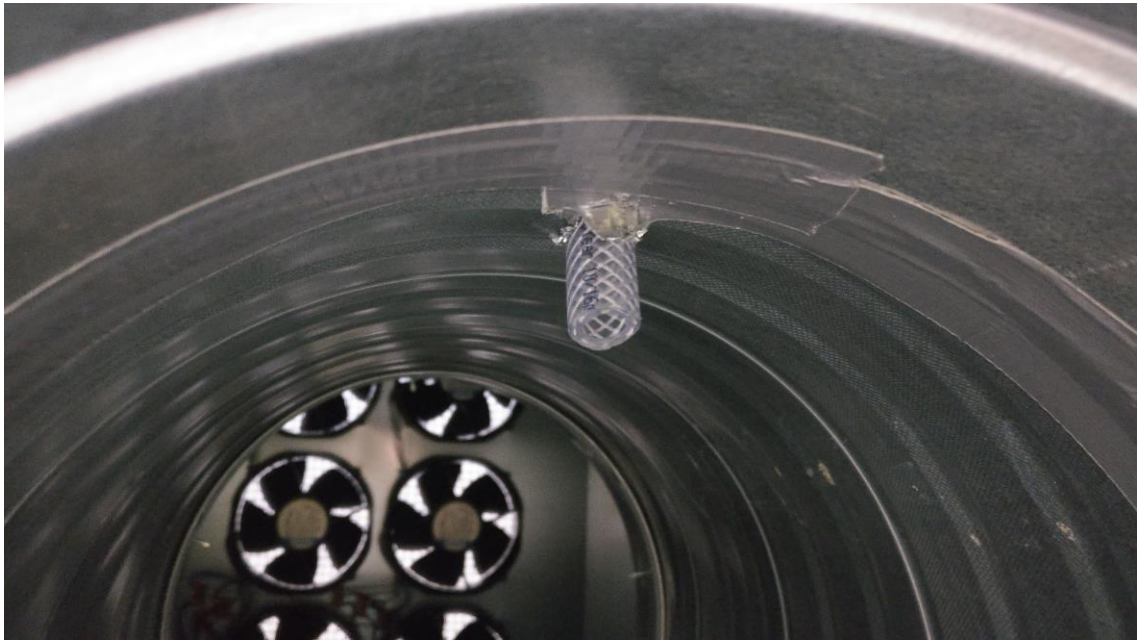
Kuva 46. Ilmastointiputken läpivienti



Kuva 47. Hiekan syötön putken läpivienti



Kuva 48. Hiekan syötön putki syötetty ilmastointiputkeen



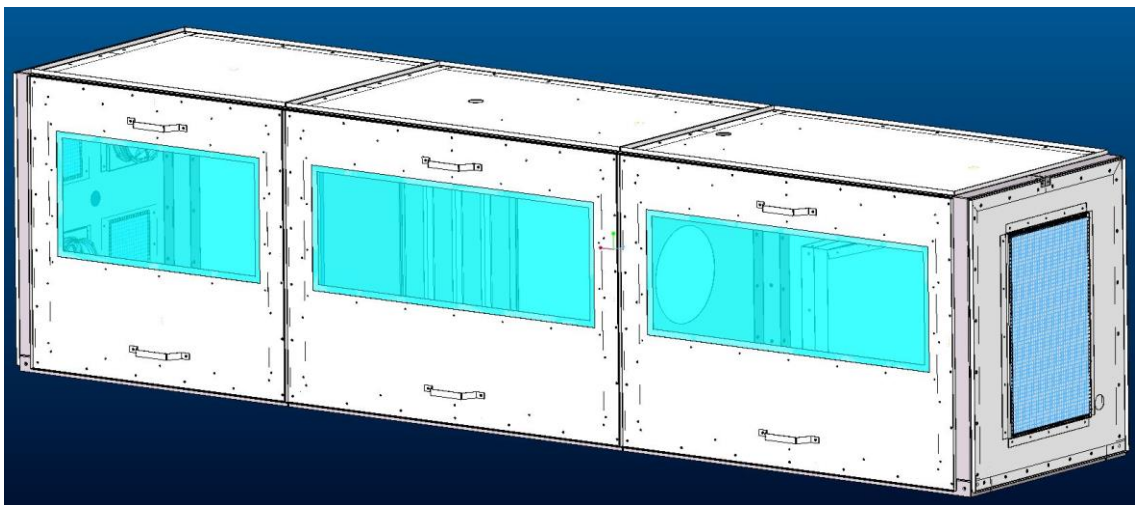
Kuva 49. Hiekan syötön putken pää ilmastointiputken sisällä



Kuva 50. Ilmastointiputkea jatkettu sopivalle etäisyydelle testattavaa erotinta



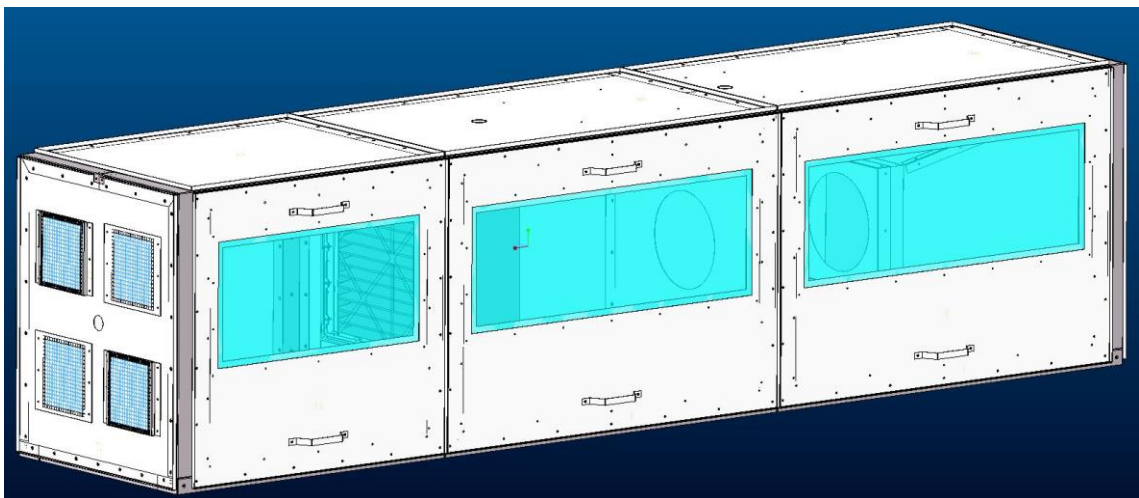
Kuva 51. Loput takaseinä- ja irroitettavat sivupaneelit asennettu testeriin



Kuva 52. Loput takaseinä- ja irroitettavat sivupaneelit asennettu testeriin – 3D

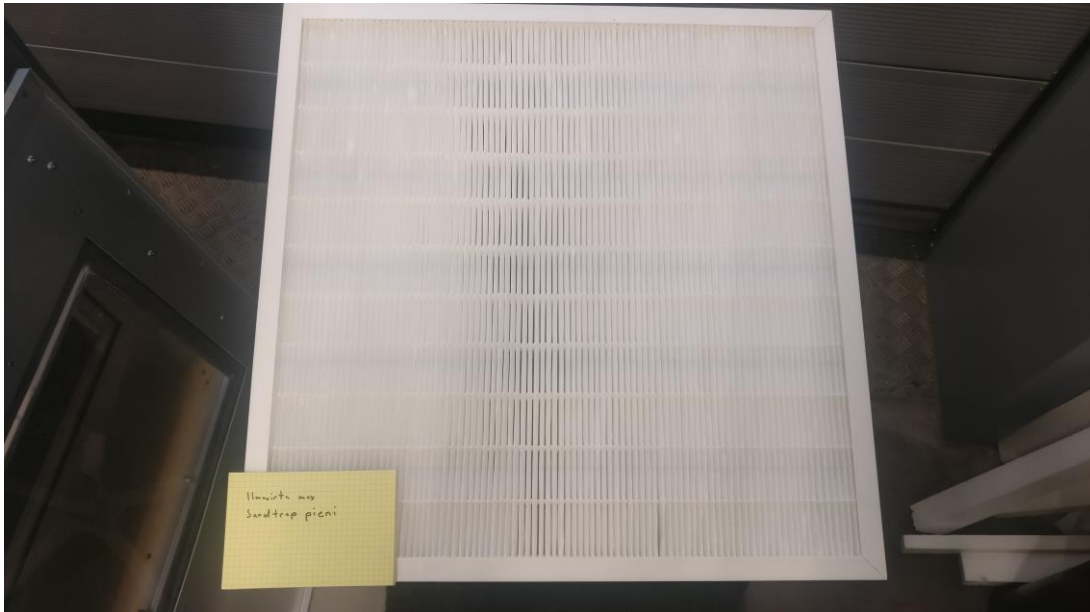


Kuva 53. Valmis testeri



Kuva 54. Valmis testeri – 3D

Liite 2. Testien kuvat



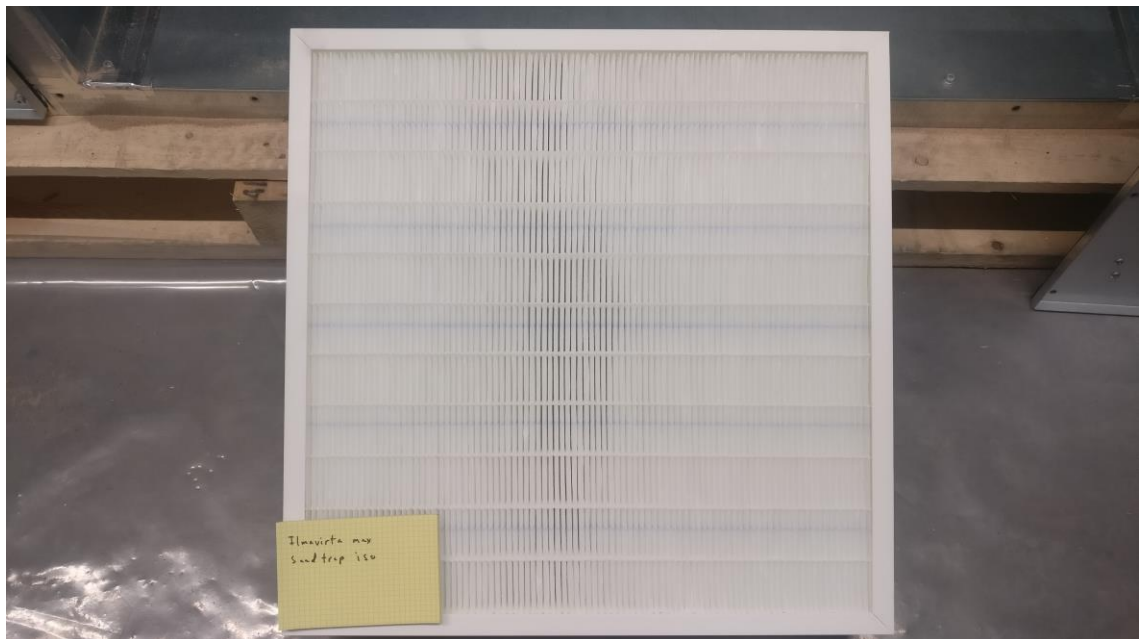
Kuva 1. Täyden puhallustehon filteri pienelle hiekanerottimelle (ennen)



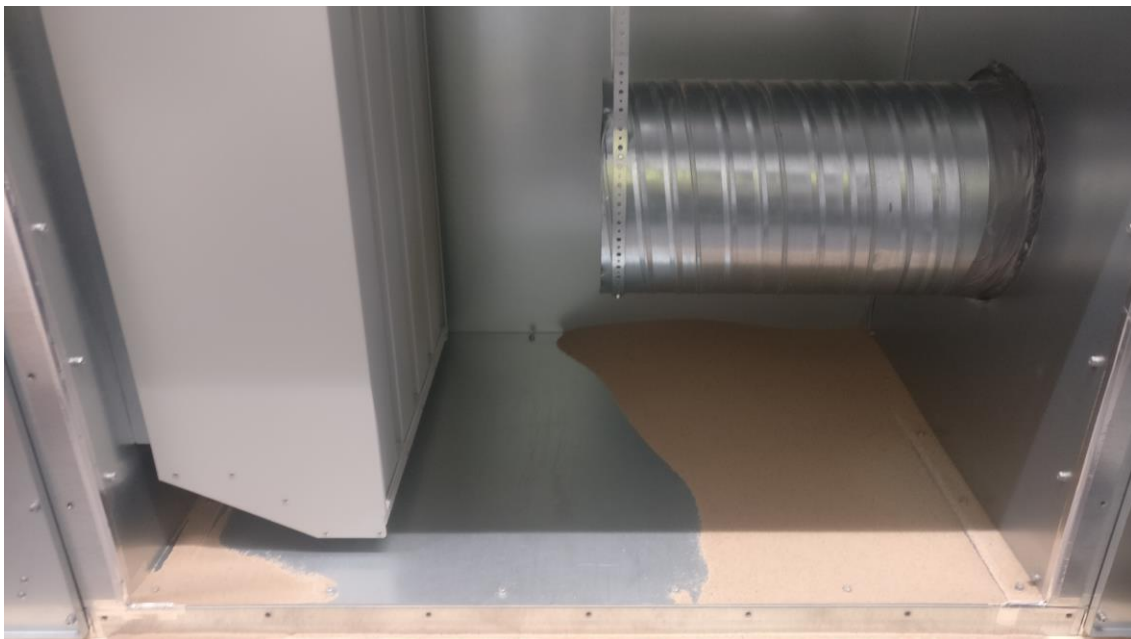
Kuva 2. Täyden puhallustehon hiekkajäänteet pienelle hiekanerottimelle



Kuva 3. Täyden puhallustehon filteri pienelle hiekanerottimelle (jälkeen)



Kuva 4. Täyden puhallustehon filteri isolle hiekanerottimelle (ennen)



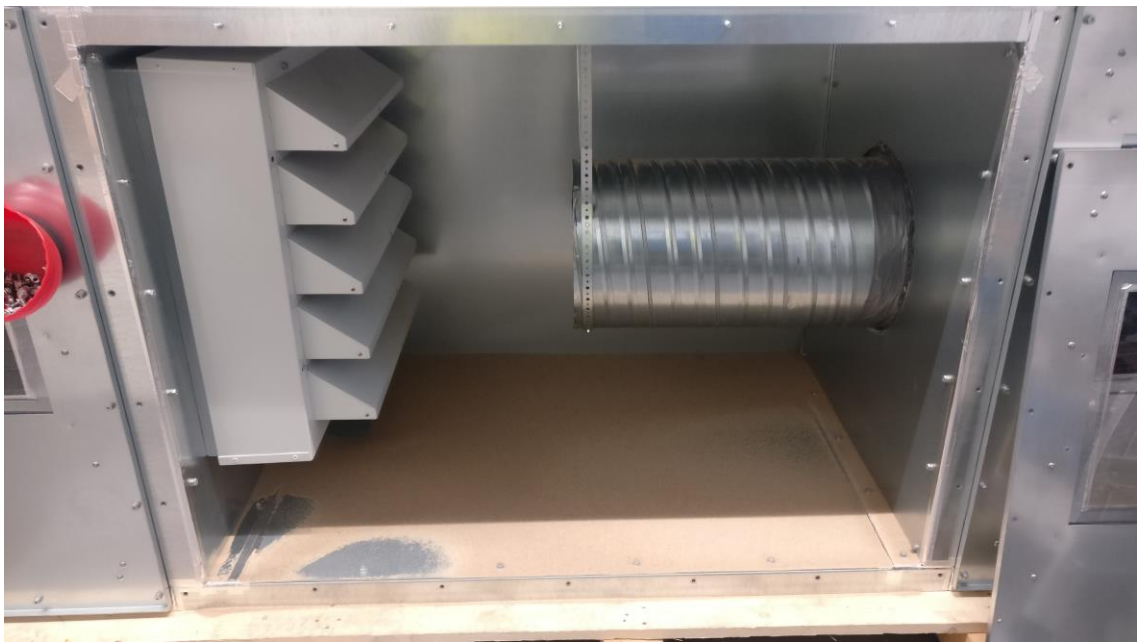
Kuva 5. Täyden puhallustehon hiekkajäänteet isolle hiekanerottimelle



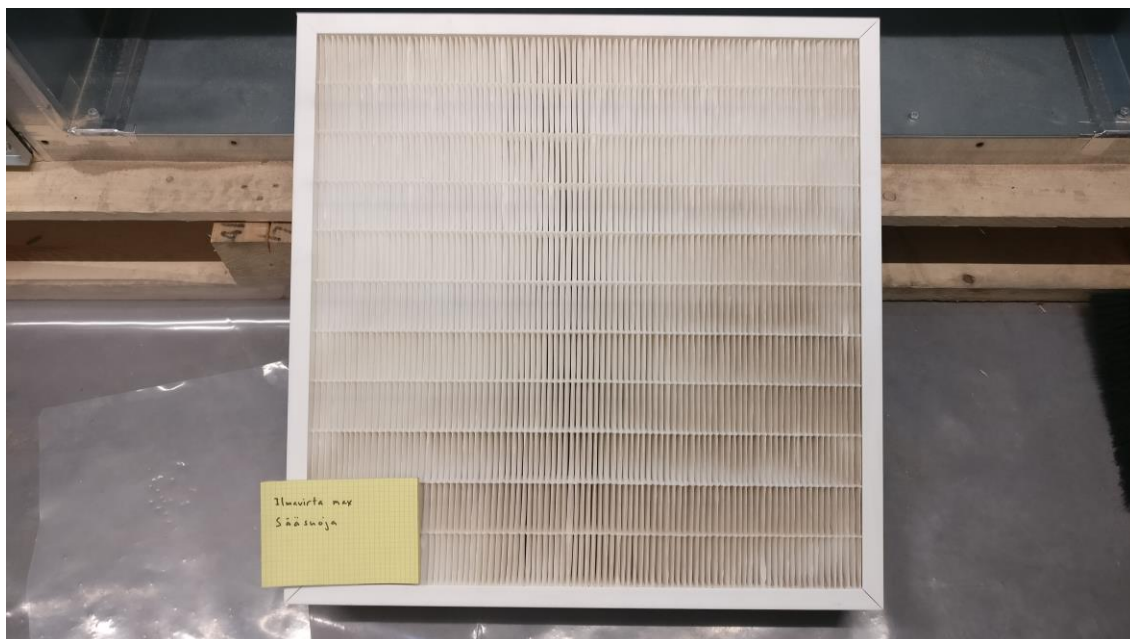
Kuva 6. Täyden puhallustehon filteri isolle hiekanerottimelle (jälkeen)



Kuva 7. Täyden puhallustehon filteri sääsuojalle (ennen)



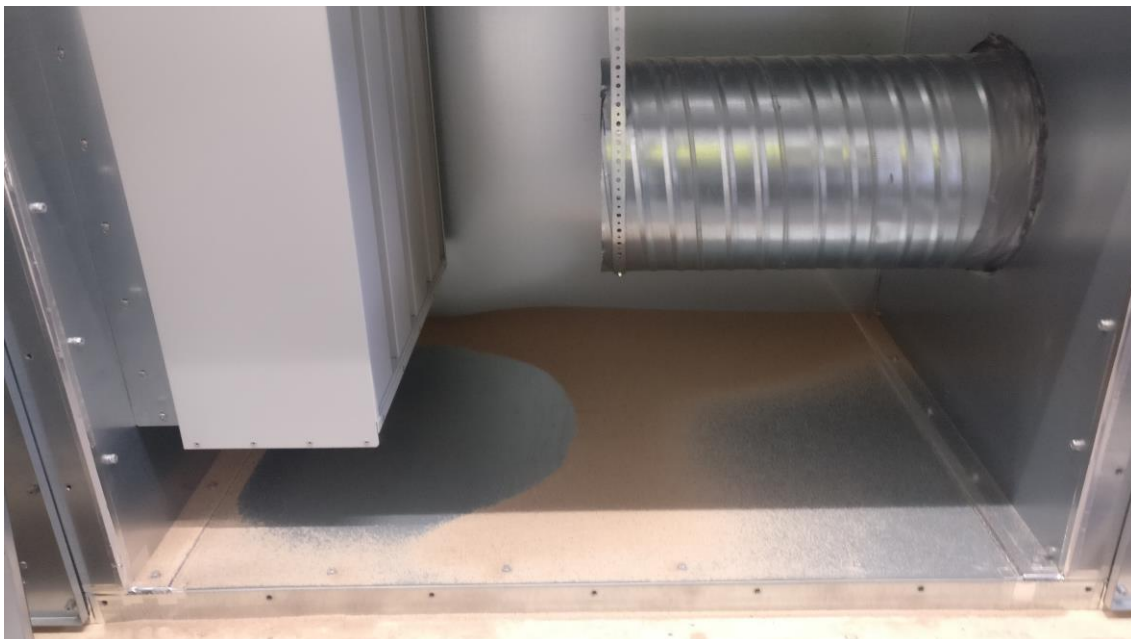
Kuva 8. Täyden puhallustehon hiekkajäänteet sääsuojalle



Kuva 9. Täyden puhallustehon filteri sääsuojalle (jälkeen)



Kuva 10. Puolen puhallustehon filteri pienelle hiekanerottimelle (ennen)



Kuva 11. Puolen puhallustehon hiekkajäänteet pienelle hiekanerottimelle



Kuva 12. Puolen puhallustehon filteri pienelle hiekanerottimelle (jälkeen)



Kuva 13. Puolen puhallustehon filtti isolle hiekanerottimelle (ennen)



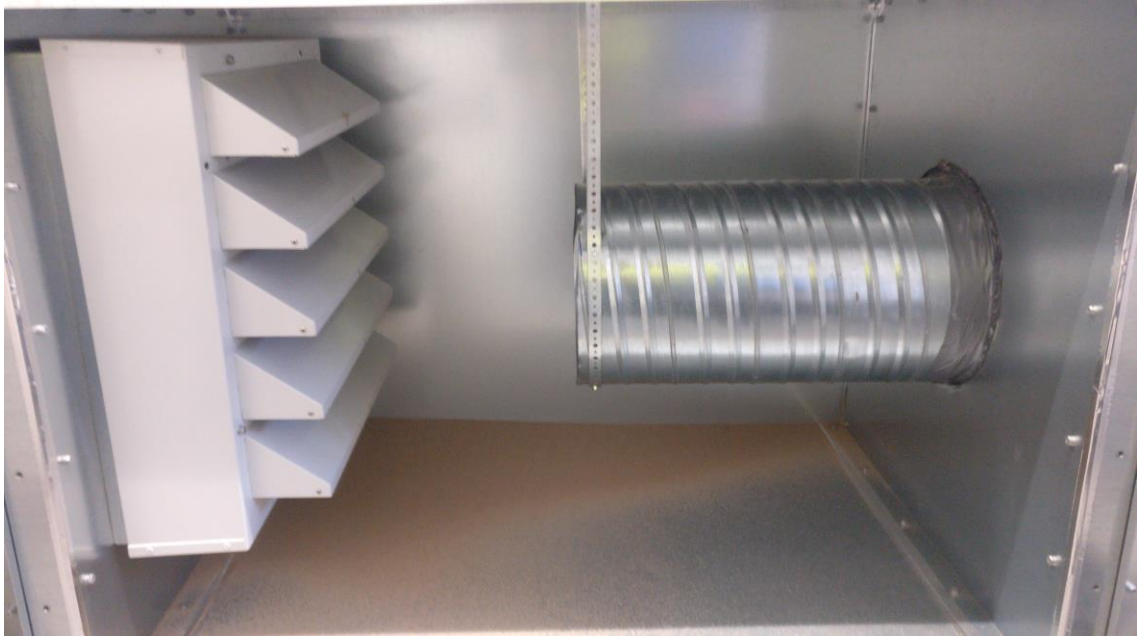
Kuva 14. Puolen puhallustehon hiekkajäänteet isolle hiekanerottimelle



Kuva 15. Puolen puhallustehon filtti isolle hiekanerottimelle (jälkeen, laitteistossa)



Kuva 16. Puolen puhallustehon filtti sääsuojalle (ennen)



Kuva 17. Puolen puhallustehon hiekkajäänteet sääsuojalle



Kuva 18. Puolen puhallustehon filteri sääsuojalle (jälkeen, laitteistossa)