

Final report

1.1 Project details

Project title	SunTube – et pilotprojekt
Project identification (program abbrev. and file)	EUDP-2013 Journalnr.: 64013-0521
Name of the programme which has funded the project	EUDP
Project managing company/institution (name and address)	SunTube ApS Venlighedsvej 6 2970 Hørsholm Projektleder: Peter Vesborg E-mail: peter.vesborg@suntube.dk Telefon: 61 68 83 14
Project partners	Danmarks Tekniske Universitet Eniig A/S (tidl. EnergiMidt A/S) Faktor 3 ApS (frem til 2017)
CVR (central business register)	35635483
Date for submission	

1.2 Short description of project objective and results

1.2.1 English version

The purpose of the project was to build a pilot installation using a new generation of ultra cost-effective solar modules – SunTubes. The pilot project would validate the technology towards later introduction in the market and also provide crucial input for further development of the product.

The central result of the project is the successful construction, deployment and operation for over one year of a 3 kW SunTube demonstration pilot plant. The pilot plant was installed side-by-side with a traditional glass panel solar power plant in order to benchmark performance.

The project has generated technical results which demonstrate that SunTube solar modules

- can be manufactured from inexpensive polymer materials,
- can be manufactured using well-known assembly processes and
- have on-par performance to glass panel modules over one-year operation.

These are key achievements which enables the further commercial development of SunTube.

1.2.2 Danish version

Projektets formål var at bygge et pilotanlæg baseret på en helt ny generation af ultra-omkostningseffektive solcellemoduler – SunTubes. Pilotprojektet skulle dels validere teknologien med henblik på senere markedsintroduktion og dels give konkret input til produktets videre udvikling.

1.3 Executive summary

Da vi startede vores EUDP projekt var SunTube teknologien på et meget tidligt stadie. Det var minimalt, hvad vi på forhånd havde lavet af hardware og alle tidligere tests var meget primitive. Gennem EUDP projektet har vi fået udviklet teknologien væsentligt og fundet svar på rigtig mange praktiske spørgsmål om både materialer, fremstilling og drift. Men måske vigtigst af alt har vi fået vished for, at SunTubes kan laves og virker i praksis, og at de kan holde til alle vejrforhold, som vi har i Danmark. Denne læring er fuldkommen afgørende for at vi kan videreudvikle teknologien og bringe den på markedet.

1.4 Project objectives

Organisatorisk har projektet været delt i 8 workpackages:

- WP1 – Project management and reporting
- WP2 – Materials and manufacturing
- WP3 – Mechanical design
- WP4 – Solar cell integration
- WP5 – Simulation
- WP6 – Monitoring and control
- WP7 – Production
- WP8 – Field test and demonstration

De forskellige WPs har været fordelt på projektets fire partnere efter kompetence og med tre konkrete mål:

- M1 – Design specifications, bill-of-materials and productions processes
- M2 – SunTube prototypes manufactured
- CM – Pilot plant

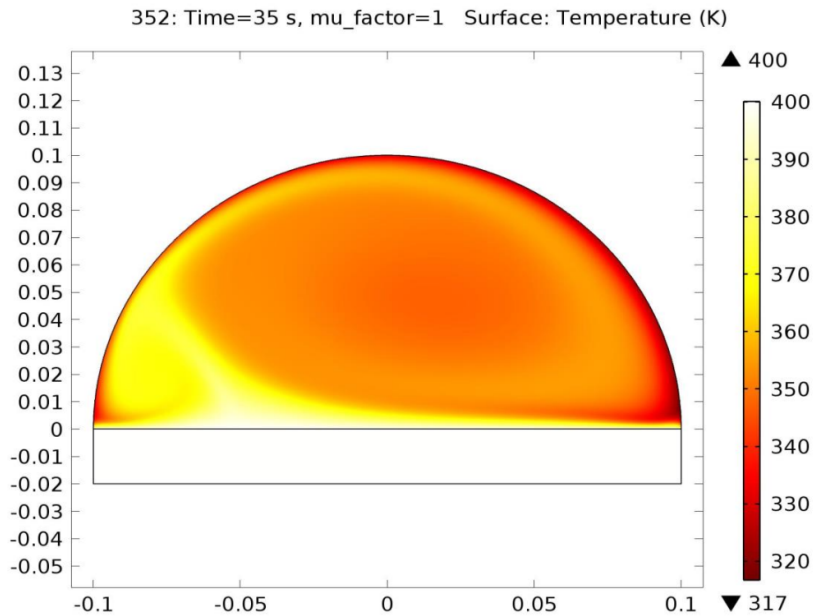
Kort gennemgang af forløbet:

Ved projektets start var der mange udestående spørgsmål, der skulle besvares før et pilotanlæg kunne komme på tale. Nogle udvalgte eksempler:

- Hvilket materiale skulle den gennemsigtige frontfolie laves af?
- Hvilken sammenføjningsproces skulle bruges til at permanent fæstne denne frontfolie til bagfolien (backsheets) og dermed danne en lufttæt indeslutning af solcellerne?
- Hvordan skulle de mekanisk svage solceller understøttes (støtteplader)?
- Hvordan skulle det elektriske sub-system (bypass circuit) udføres, der giver systemet god ydelse og samtidigt sikrer imod katastrofal overophedning af en solcelle i tilfælde af lokal skygge på en solcelle eller en knækket solcelle.
- Hvordan skulle sandsækken (ballastkammeret under den lufttætte overdel) udformes, og hvordan skulle ballast materialet fyldes i?
- Hvordan skulle luftsystemet laves?

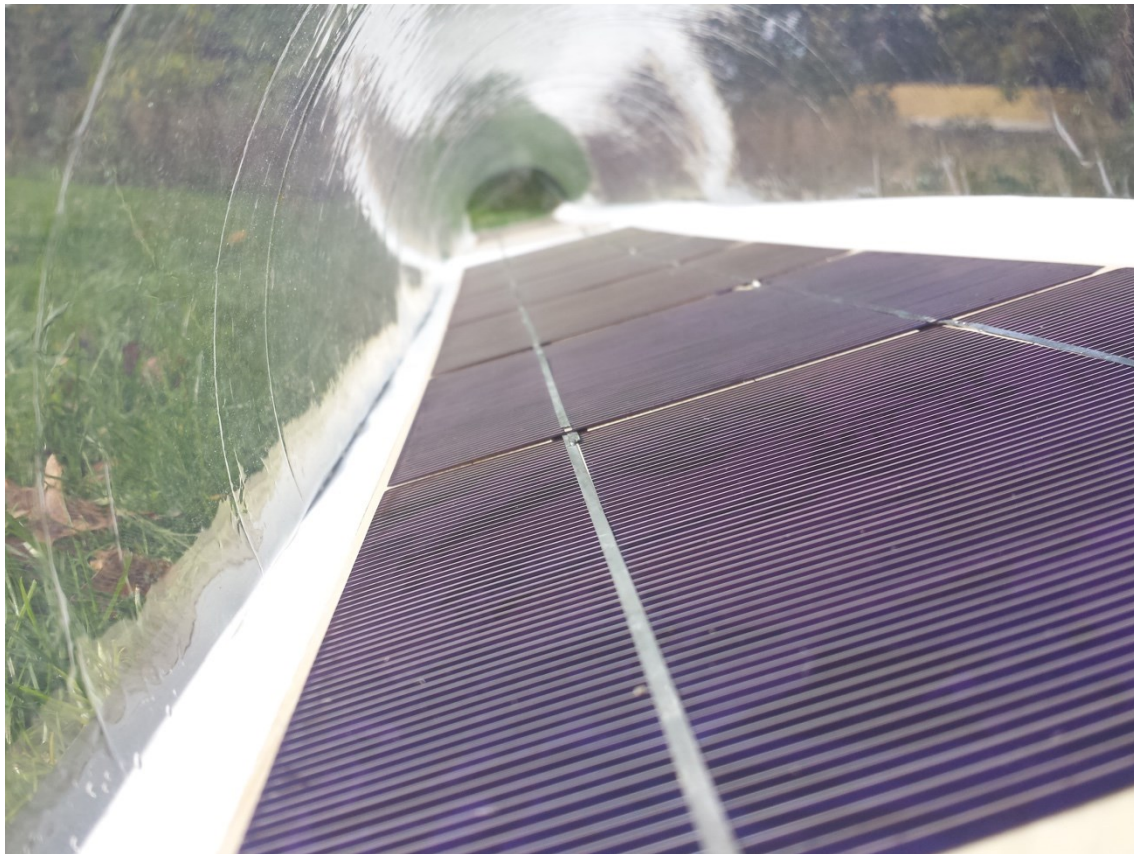
I løbet af projektets første måneder var det centrale mål således at fastlægge alle de centrale designbeslutninger for at prototype SunTubes kunne laves og testes inden et større antal SunTubes kunne laves til pilotanlægget.

I løbet af projektets første år fremstillede og testede projektet *fire* generationer af udendørs prototyper af SunTubes (de to første hver med ca. 3 meters længde, den tredje noget større med ca. 7 meter og den fjerde generation med en længde på 20 meter). Målet med disse tidlige prototyper var at afprøve materialer og sammenføjningsmetoder samt mekanisk understøttelse af solcellerne. Som et meget væsentligt resultat af dette arbejde blev den grundlæggende materialekombination fastlagt og ligeledes blev den helt afgørende sammenføjningsmetode fundet og afprøvet. Samtidig hermed skete et omfattende arbejde med simulering af airflow'et i modulet og simulering af varmetransport i modulet.



Figur 1. Finite element simulering af den interne temperaturprofil i en SunTube (uden luftcirkulation). Fra Paulo Trazzis Bachelor afhandling 2015.

På DTU blev i den sammenhæng afviklet to studenterprojekter, der med analytiske beregninger og finite-element simuleringer viste behovet for intern cirkulation af luften i SunTube'en og estimeret en passende flow hastighed. Flow hastigheden er et kompromis mellem effektiv konvektiv køling af solcellerne og minimalt energiforbrug til ventilatorer. Ydermere blev der fremstillet en 4 meter lang vindtunnelopstilling til eksperimentelt at efterprøve de termiske beregninger.



Figur 2. Første generation prototype. I dette "indvendige" kig ses tydeligt cellerne og den gennemsigtige frontfolie, oktober 2014.



Figur 3. Tredje generation prototype. Denne prototype var den første, med mere end to celleplader og dermed den første, hvor foldninger af begge typer (celle-mod-celle og ryg-mod-ryg) blev afprøvet ved sammenfoldning af SunTuben. Denne prototype var også den første, der blev pakket og transporteret, januar 2015.

Faktor-3 udviklede og leverede et simpelt datalogningssystem til testen af 20 meter prototypen. Således blev der arbejdet på WP1-6 og gjort gode fremskridt i det første år.

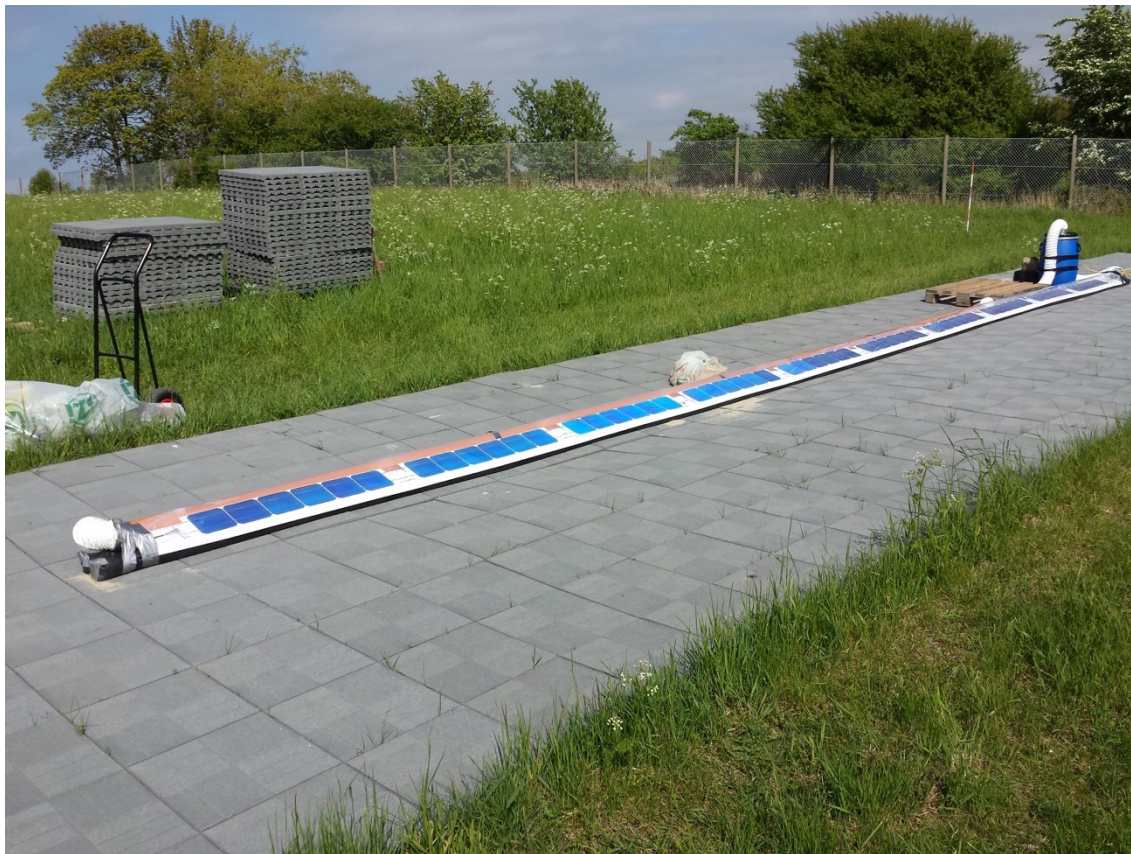
Der blev i denne periode heldigvis også fundet - og løst - mange problemer. Et eklatant eksempel var valget af materiale til cellepladerne, som mekanisk understøtter cellerne. Den første fjerde generations prototype (den første på 20 meters længde) var baseret på plastikplader som understøtning for solcellerne. Det skulle vise sig, at plastmaterialet deformerede voldsomt efter prototypens udlæggelse, og det medførte at samtlige celler knækkede inden for få dage. Alle senere designs var baseret på birkefiner som celleplader, der er et fremragende match til silicium mht. termisk udvidelseskoefficient.

Et andet eksempel på en vigtig læring fra denne periode i projektet var at fyldning af sand (ballast) ind i moduler med integrerede sandsække viste sig betydeligt mere besværligt end oprindelig antaget. Denne læring førte til en meget væsentlig ændring i designfilosofien således at de endelige moduler i pilotanlægget blev baseret på en separat underdel hvori ballasten kunne fyldes først ved en meget let og hurtig proces, hvorefter den lufttætte overdel med Solcellerne blev monteret på underdelen.

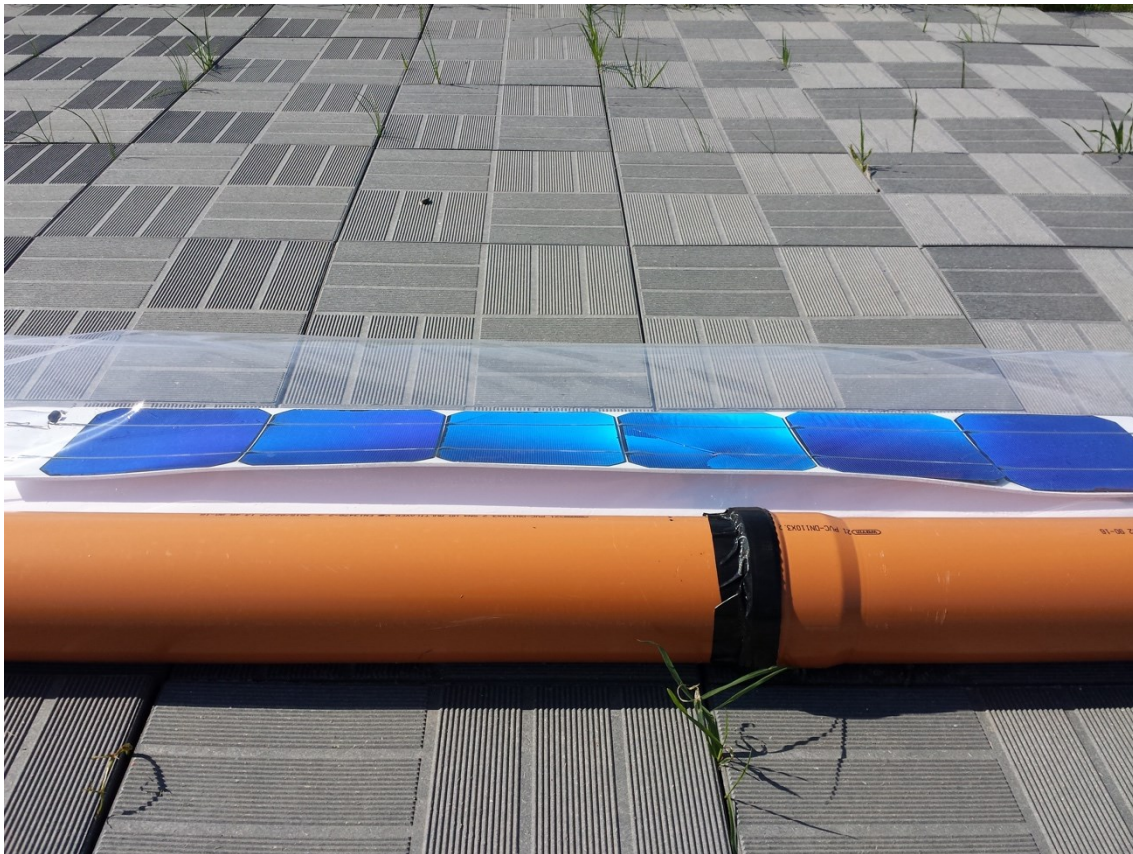
Projektets andet år var lige så travlt som det første. Det startede med, at vi nåede den første milepæl M1 "Design specifications, bill-of-materials and productions processes are developed and documented". Resultatet af M1 var været et brugbart design og tilhørende prototyper til udendørstest.

I perioden maj 2015 til marts 2016 gennemførtes en væsentlig validering af SunTube teknologien i en feltafprøvning af to 20 m prototyper på DTU-RISØ. En erfaring fra denne afprøvning var, at et SunTube modul var operationelt i mange måneder, og det fungerede elektrisk som forventet. Vi fik også afprøvet den mekaniske konstruktion under virkelige forhold og bemærkede ingen skader som følge af voldsomt uvejr - herunder et tykt lag

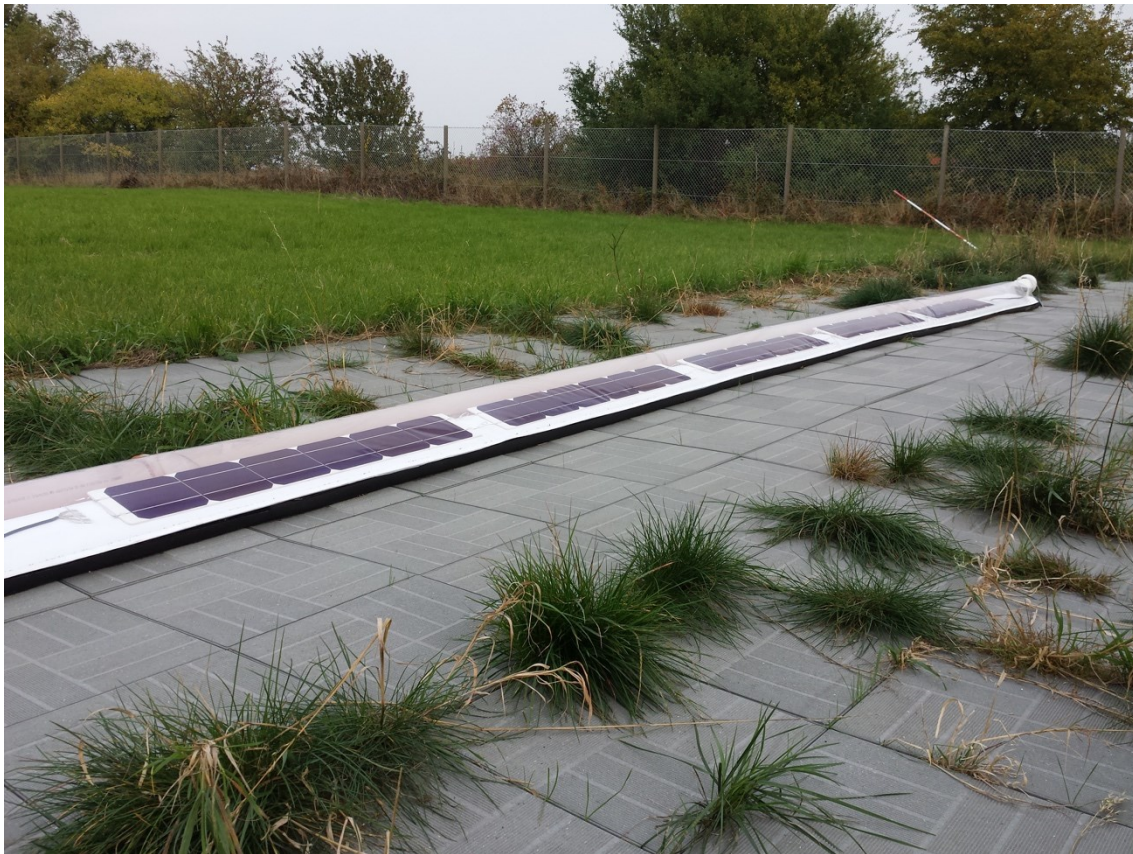
tung sne, som faldt ved Risø i vinteren 2015-16. Testen gav også praktisk viden om driften af SunTube modulet samt indstilling af driftsparametre herunder lufttryk, luftflow, drift temperatur og affugtning. En væsentlig konklusion var, at lufttrykket internt i SunTuben skulle være højere end oprindelig estimeret. Således blev det endelige demonstrationsanlæg dimensioneret til at kunne operere med et højere lufttryk end DTU-RISØ prototyperne. For alle tests på DTU-RISØ var affugtningsløsningen baseret på en passiv absorption over CaCl_2 .



Figur 4. Fjerde generation prototype under installation, maj 2015. Denne prototype var godt 20 meter lang og indeholdt 60 solceller fordelt på 10 celleplader. Denne prototype var den første med komplet elektrisk tilslutning af alle celler og bypass kredsløb og (desværre) den første med plastik celleplader.



Figur 5. Fjerde generation prototype, juni 2015. Denne test afslørede meget voldsom deformation af den understøttende plastikplade, som cellerne er fæstnet til. På billedet ses en sådan plade som slår sig mere end 5 cm. De deraf følgende knæk på solceller ses tydeligt. Det orange rør i forgrunden er til at returnere den cirkulerende luft.



Figur 6. Ny fjerde generationsprototype, hvor cellepladerne er ændret tilbage til det tidligere materiale (birkefiner), oktober 2015.

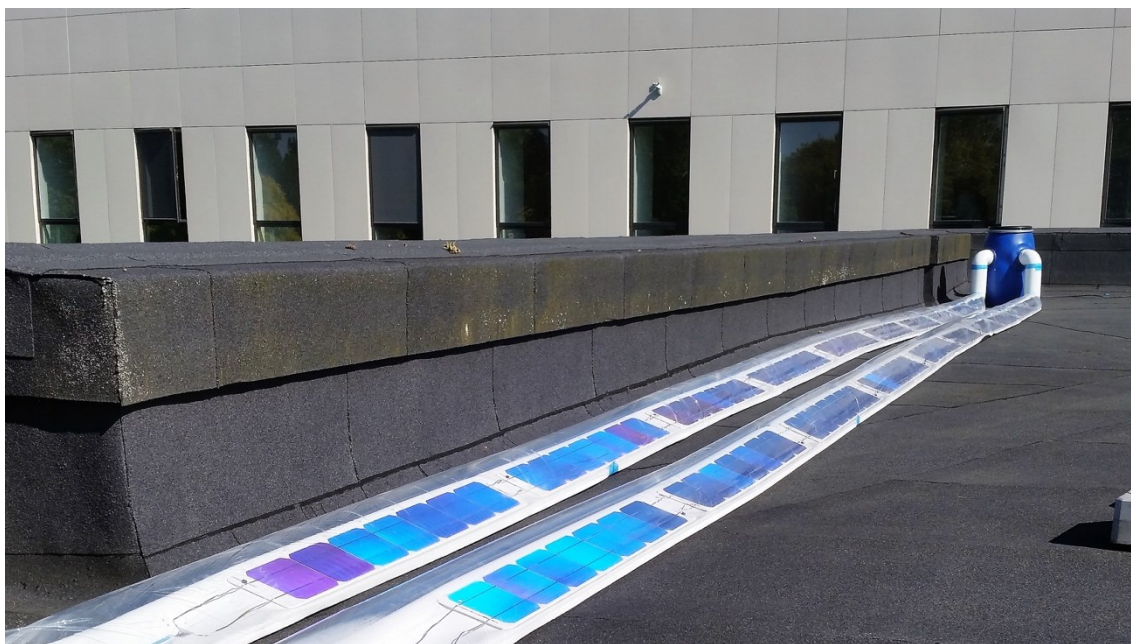
Med moduldesignet afprøvet på DTU-RISØ, var næste skridt milepæl 2 - selve fremstillingen af demonstrationsanlægget M2 "SunTube prototypes are manufactured". Vi indkøbte materialer og fremstillede de 12 moduler af 63 solceller per styk. DTUs bidrag i perioden var et nyt luftkontrolsystem (AirFlow Control Unit – AFCU) baseret bl.a. på aktiv affugtning, til anvendelse i det endelige demonstrationsanlæg. Den nye AFCU blev baseret på testresultaterne fra føromtalte udendørstest på DTU-RISØ, men denne skulle desværre senere vise sig at være plaget af problemer – blandt andet med upålidelige komponenter. I løbet af projektets 3. år endte AFCU'en med at koste betydelig mere tid og flere penge end først antaget – ikke mindst endte SunTube ApS med at bruge meget betragtelige ressourcer på dette, selvom det egentlig var en opgave, som DTU havde påtaget sig. Resultatet af dette arbejde var en brugbar løsning, men der er stadig masser af mulighed for at forbedre AFCU'en fremadrettet.

Da projektets startede sit tredje år havde vi netop nået M2, og havde således alle SunTubes klar til pilotanlægget, men vi manglede stadig at fremstille alle underdelene (til ballast) og øvrige hardware komponenter. Dette arbejde en del tid i efteråret og vi arbejdede hurtigt i forsøg på at få pilotanlægget etableret og sat i drift inden det blev for sent på året. Her blev projektet imidlertid ramt af det faktum, at Faktor3 så sig nødsaget til at forlade projektet, og således ikke kunne levere den lovede datalognings- og monitoreringsløsning til pilotanlægget. Det bevirkede, at denne vigtige opgave måtte overtages af SunTube ApS og Eniig A/S fællesskab og var den primære grund til, at det blev januar 2017 før dagen oprandt, hvor vi endelig kunne opsætte pilotanlægget hos Eniig i Skive. Selve opsætningen skete under yderst vanskelige forhold. Ikke alene var det vintermørkt og koldt, men på den aftalte dato var det endvidere heldagsregn og stormvejr fra morgen til aften. Ikke desto mindre kom pilotanlægget i drift og kørte et helt år frem til januar 2018, før det endelig blev nedtaget. I hele den mellemliggende periode stod Eniig for tilsyn og vedligehold af anlægget. Et referenceanlæg, baseret på kommercielle solcellemoduler blev af Eniig opsat

senere i 2017 umiddelbart ved siden af SunTube anlægget for at disse kunne køre under så ens forhold som overhovedet muligt.



Figur 7. Produktion af SunTube moduler til pilotanlægget, juni 2016.



Figur 8. Test af to af de endelige moduler til pilotanlægget (femte generation). Dette design er baseret på 63 solceller fordelt på 9 celleplader og med 9 bypass dioder samt 140 mm lufttilslutninger i begge ender, september 2016.

En af de vigtigste driftsmæssige erfaringer fra pilotanlægget var at anlægget viste en lovende robusthed for regn og rusk. Omvendt gjorde vi den vigtige erfaring, at de allervarmeste solskinsdage indebærer risiko for svækkelse af lamineringer, hvis ikke disse er ordentligt krydsbundet under modulets fremstilling. Risikoen for mekanisk svækkelse af lamineringerne er forbundet med varme driftsbetingelser hvilket er særligt vigtig at holde sig for øje, når SunTube teknologien skal bruges på tage, hvor den omgivende temperatur er højere end på jorden. Det er afgørende at dette problem løses pålideligt, men baseret på vores erfaringer fra dette EUDP projekt er problemet "kun" relateret til reproducerbarhed under fremstillingen af moduler, og det bør derfor kunne adresseres ved hjælp af almindelige principper og metoder for kvalitetsstyring.

På den positive side lærte vi også af dette problem med pilotanlægget, at on-site reparation heldigvis er forholdsvis let, men denne erfaring er naturligvis af største vigtighed for al fremtidig udvikling og produktion af SunTube moduler.



Figur 9. Pilotanlægget i drift i Skive hos Eniig. Anlægget bestod af i alt 12 SunTube moduler monteret på tilhørende underdele (ballast). Alle modulerne var forbundet i serie – både elektrisk og med hensyn til luftcirkulation.

1.5 Project results and dissemination of results

De væsentligste tekniske resultater af de tidlige prototyper er, at vi fik bestemt det bedste frontfolie materiale, at den bedste sammenføje teknik er laminering (med kvalitetsstyring), at det er afgørende at understøtte cellerne på et materiale som er matchet til silicium mht. termisk udvidelse og at der er en meget stor gevinst ved selv en lav cirkulationshastighed på den interne atmosfære i modulerne.

Hvad angår det forretningsmæssige, kvalificerede SunTube sig til at deltage i Danish Tech Challenge. Dette var et temmelig intenst forløb, hvor vi fik megen feedback på især vores forretningsplan og strategi, men også på mange tekniske aspekter af teknologien. Igennem Danish Tech Challenge afholdt SunTube et større antal præsentationer for interessenter i entreprenørmiljøet.



Figur 10. SunTube udmærkede sig ved at blive optaget i Danish Tech Challenge 2014. SunTube ses repræsenteret nederst til venstre.

SunTube medvirkede også i et større indlæg om SunTube og om vores EUDP projekt i fagbladet Ingeniøren, som alle medlemmer af ingeniørforeningen modtager – og som er tilgængeligt online¹. Artiklen om SunTube var faktisk hovedartiklen i den uges udgave af Ingeniøren – med en helsideartikel midt i avisen og en forkortet historie på bladets forside.

¹ <https://ing.dk/artikel/nyt-koncept-vil-presse-prisen-paa-solcelle-el-170604>.

Nyt koncept vil presse prisen på solcelle-el

Den danske start-up-virksomhed SunTube vil med en ny type solcellemoduler gøre grøn el fra solceller billigere end kulkraft.

SOLCELLER

Af Bjørn Godtøse bjg@ing.dk

Antallet af solcelleanlæg er i kraftig vækst i hele verden, for solceller er blevet markant billigere. Den samlede pris for en installeret Watt er dog ikke faldet tilsvarende, for montagen er stadig dyr.

Direktør for det nystartede selskab SunTube Aps Peter Vesborg forklarer:

»Tidligere var det selve solcellekomponenten, der udgjorde den største andel af de samlede omkostninger til et solcelleanlæg. I dag udgør solcellekomponenten kun 20 procent, så omkostningerne til et solcelleanlæg er primært bestemt af de øvrige omkostninger,« siger han.

De øvrige omkostninger omfatter blandt andet glas, der beskytter solcellerne, stål til at bygge de stativer, som solcellepanelerne skal monteres på, og arbejdstimer til selve montagen.

Nyt maskinelt koncept

SunTube har derfor udviklet et patentansøgt og helt nyt koncept for solcellemoduler, der gør det muligt at installere modulerne maskinelt direkte på jorden uden at skulle bruge en masse mandskabstimer eller dyre materialer.

Sammen med sine partnere, Rasmus Haahr og Jakob Lind Olsen, har han etableret SunTube Aps, og virksomheden skal nu med støtte fra det energiteknologiske forsknings- og udviklingsprogram EUDP bygge et 5 kW pilotanlæg sammen med partnerne Energi Midt, DTU og elektronikvirksomheden Faktor 3.

»Hvis solenergi skal gøre en forskel i verden, så skal der installeres flere terawatt og solcelleparkerne skal laves i mega- eller gigawatt-størrelser. Det er den eneste måde, det kan konkurrere med kul på,« siger Peter Vesborg. Han regner med, at prisen skal ned på én dollar per installeret Watt i et solcelleanlæg.

»Så grundideen er at lave nogle moduler, som kan lægges ud maskinelt. Solcellerne bliver holdt fast i den rigtige vinkel til solen via ballastkamre. På den måde slipper vi for stålstativerne. Samtidig slipper vi af med det dyre glas. I stedet bruger vi en tynd UV-beständig polymerfilm,« forklarer han.

Inden jul vil SunTube have det første lille modul klar til de indledende test, og når EUDP-projektet er færdigt, skulle der gerne stå et pilotanlæg klar. ■

DANISH TECH CHALLENGE

SunTube deltager i Danish Tech Challenge, hvor 20 virksomheder, der alle arbejder med fysiske produkter, konkurrerer om at blive Danmarks bedste start-up i et forløb på fire måneder.

Vinder forløbet tilbydes virksomhederne gratis kontorplads på Scion DTU, adgang til prototypeværksted, mentorer, rådgivere, finansieringsstrategi og ikke mindst muligheden for at vinde

hovedpræmien på 500.000 kr. til brug i deres virksomhed.

17 etablerede virksomheder og organisationer har meldt sig som rådgivere og vejledere til iværksætterne, blandt dem finder man IDA, Delta og Danvig Devnet. Bag Danish Tech Challenge står Industriens Fond.

Læs mere på bit.ly/ingtech



HURTIG OG BILLIG MONTAGE AF KILOMETRERVIS AF SOLCELLER

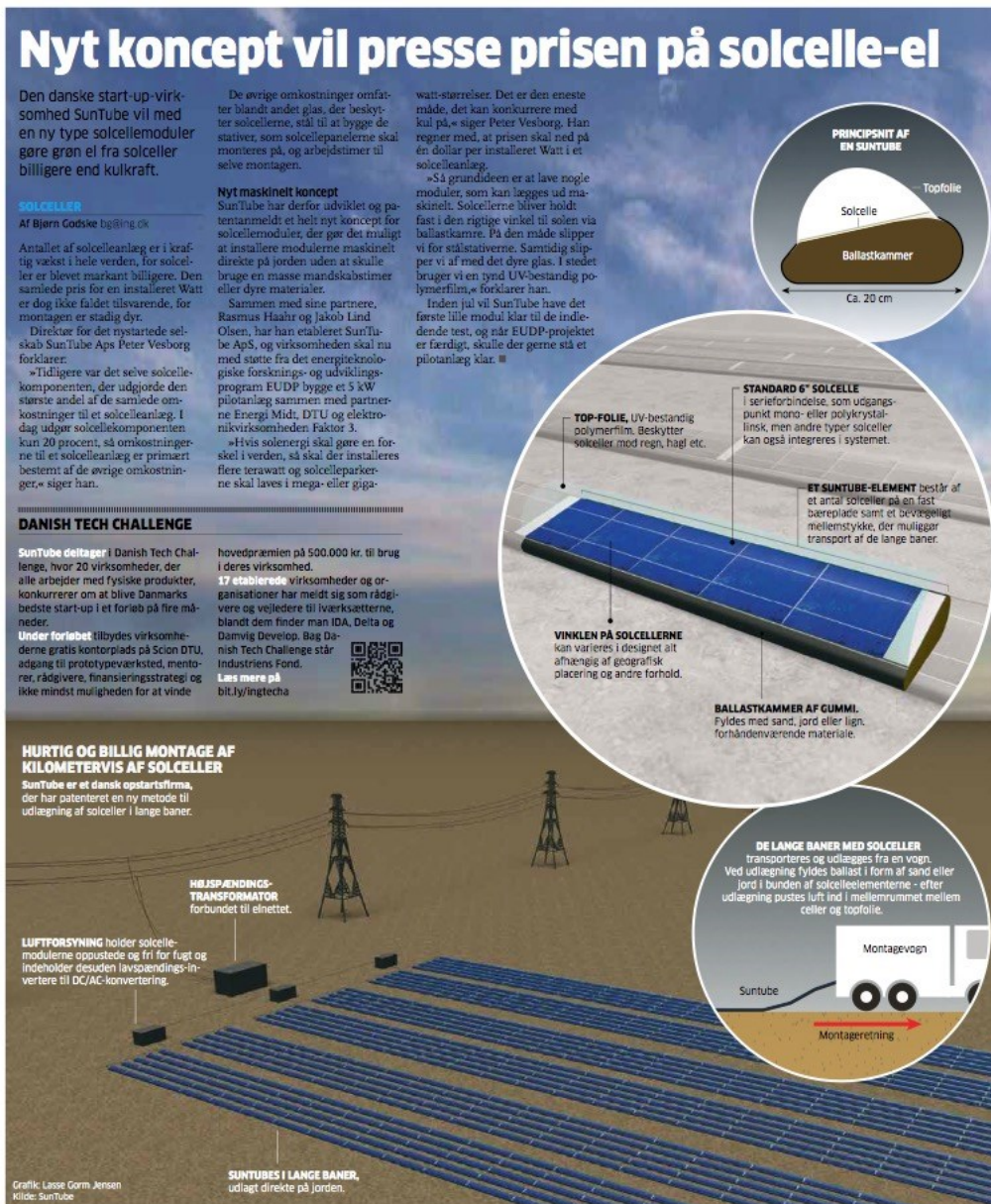
SunTube er et dansk opstarts firma, der har patenteret en ny metode til udlægning af solceller i lange baner.

LUFTFORSYNING holder solcellemodulerne opstøvede og fri for fugt og indeholder desuden livsoplydningsinvertere til DC/AC konvertering.

HJULSPÆNDINGS-TRANSFORMATOR forbundet til elnettet.

SUNTUBES I LANGE BANER, udlagt direkte på jorden.

Grafik: Lasse Gorm Jensen
Kilde: SunTube



Figur 11. SunTube i dagbladet Ingeniøren 5. september 2014.

Gennem det store netværk, som Danish Tech Challenge gav adgang til har vi talt med en et antal firmaer i branchen i Danmark samt et stort antal eksperter. Blandt andet herved har vi fundet vores nuværende partnere fra Icopal, European Energy og DTU-Fotonik. Som led i projektet har vi også deltaget ved konferencen Intersolar i München, hvor vi fandt vores leverandør af backsheet, og vi har været i Silicon Valley for at tale med venturekapitalister.

Samlet set er EUDP projektets vigtigste resultat uden tvivl, at vi nu har dokumentation for at SunTube moduler både fremstilles i praksis; og at et prototype anlæg, trods børnesygdomme, kan ligge ude i vind og vejr i mindst et år og producere strøm på linje med et konventionelt anlæg.

1.6 Utilization of project results

Det mest centrale læring af projektet – at SunTube modulkonceptet i praksis kan beskytte kommercielle c-Si solceller mod vind og vejr hele året rundt – er fuldkommen afgørende for

de videre planer. Det er på baggrund af denne eksperimentelle validering, at vi nu kan begynde en udvikling af et SunTube produkt til bygningsintegration.

Planen er, at vi skal sælge SunTube produkter til industritage i Danmark og andre europæiske lande, men først skal vi udvikle et egentligt produkt under hensyntagen til alle de praktiske forhold samt relevante normer og standarder. For at arbejde så målrettet som muligt med dette har vi etableret et partnerskab med Icopal, der er meget interesserede i SunTube teknologien og som bringer kæmpe erfaring med tagbelægninger, tagteknik samt branchekendskab til torvs. På den tekniske side har vi fået DTU-Fotonik med ombord som partner. DTU-Fotonik har mange års erfaring med specialdesignede solcelleløsninger – herunder bygningsintegrerede løsninger. Endvidere bidrager DTU-Fotonik også med produktionserfaring og udstyr til småskala fremstilling.

I dialog med vores rådgivere (såsom European Energy) og firmaer, som vi har truffet via Danish Tech Challenge (e.g. GreenGo Energy), har vi identificeret, hvad vi ser som en ideel niche, til at introducere SunTube teknologien på markedet: Flade industritage med begrænset bæreevne.

Dette marked er en niche, idet mange store tage har tilstrækkelig overskydende styrke til at kunne bære et konventionelt solcelleanlæg (baseret på forholdsvis tunge glasplademoduler), men omvendt findes der stadig mange bygninger som ikke bære et konventionelt anlæg, da de stadig skal kunne bære lovpligtigt snetryk mv. Eftersom et anlæg baseret på SunTubes kan veje en brøkdel af hvad et med konventionelle moduler vejer er der her en mulighed for at komme på markedet uden at skulle konkurrere fra dag 1 med billige, massefremstillede moduler fra asien. Denne niche findes i Danmark såvel som andre nordeuropæiske lande, så vi kan være på hjemmebane og med dette springbræt er det planen på mellemlangt sigt at skalere til at også at være konkurrencedygtig på pris. Efter at være nået bredt og internationalt ud i markedet for industrielle taganlæg er det i sidste ende planen at gå efter det kolossale marked for jordmonterede kæmpeanlæg, hvor maskinelt udlagte SunTubes, bør være den klart billigste form for solcelle-elektricitet (den ultimative vision for SunTube).

1.7 Project conclusion and perspective

Den helt centrale konklusion på vores EUDP projekt er at SunTube teknologien faktisk fungerer, og at den har alle forudsætninger for at kunne konkurrere med den nuværende markedsledende teknologi på mange markeder (store tage på industribygninger og på siden på jord-monterede kraftværker). Alle SunTubes fordele til trods, er det omvendt klart, at SunTubes som håndbygges i Danmark på småskala, umuligt kan konkurrere med masseproducerede moduler pga. den massive economy-of-scale, der er aktuell. For at illustrere skalaen kan man betragte det globale marked for solcellemoduler, som i 2016 var ca 77 GW², som blev solgt for en omtrentlig pris på 0.48 EUR/W, ergo omsatte solcellemodulindustrien for ca 275 mia. DKK i 2016. En typisk producent af sådanne moduler har kapacitet til at fremstille 5-10 GW om året og kan således omsætte for adskillige milliarder kr – hver måned.

På denne baggrund er vores planer for at komme på markedet med SunTube i en markeds-mæssig niche, hvor vores teknologi giver en unik fordel, den eneste realistiske vej frem.

Omvendt viser tallene også med al ønskelig tydelighed, at der er meget store muligheder i dette marked, hvis man kan begå sig i konkurrencen.

Der er lang vej igen for SunTube – men også meget højt til loftet!

Annex

² Estimer af markedet og priser fra Fraunhofer ISE i Tyskland. "Photovoltaics Report", 26 February 2018