



## Final report

### 1.1 Project details

<b>Project title</b>	Observations of Indirect Solar Irradiance – A Pilot Project <i>(Dansk titel: Måling af indirekte solstråling – pilotprojekt)</i>
<b>Project identification (program abbrev. and file)</b>	EUDP 64013 - 0153
<b>Name of the programme which has funded the project</b>	EUDP (85%); DMI (15%)
<b>Project managing company/institution (name and address)</b>	Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) Lyngbyvej 100, 2100 Kbh. Ø
<b>Project partners</b>	(Only DMI)
<b>CVR</b> (central business register)	18159104
<b>Date for submission</b>	2015-12-22

### 1.2 Short description of project objective and results

DMI monitors the total solar irradiance in Denmark together with other essential climate variables. In this project the quality and usefulness of monitoring also the indirect solar irradiance has been tested. It is recommended that the compact pyranometer SPN1 (Delta-T Devices, Cambridge, CB25 0EJ UK) is adequate for this purpose.

#### 1.2.1 Kort beskrivelse af projektets formål og resultater (på dansk)

DMI måler kontinuerligt globalstråling i hele Danmark sammen med andre essentielle klimavariabler. I dette projekt er kvaliteten og prospektet af også at måle den indirekte solstråling blevet testet. Det anbefales, at DMI installerer det kompakte pyranometer SPN1 (Delta-T Devices, Cambridge, CB25 0EJ UK) ved dets danske stationer.

### 1.3 Executive summary

Measurements performed over several years at DTU Civil Engineering of the total and scattered solar irradiance show that the fraction of the solar irradiance that is scattered is highly variable over time, and,



that a simple correlation between the total solar irradiance and the scattered solar irradiance does not exist (EUDP 64011-0085001; Dragsted og Furbo 2012, DTU Civil Engineering Report R-275).

Solar irradiance is scattered when this is refracted or diffracted from cloud droplets, cloud ice particles, microscopic aerosols or Rayleigh scattered from atmospheric molecules, and when this is reflected from the surface. The fraction of the scattered solar irradiance and scattered solar illuminance as compared with the total solar irradiance is of great importance to building engineers, architects, and for optimal utilization of solar heating and photovoltaic systems. In the greater scheme of things, increased knowledge about the distribution of solar irradiance is important for the optimal management of power plants in the Danish smart grid.

Thus, there is a need for nationwide monitoring of scattered solar irradiance and including these into the meteorological measurement network of the Danish Meteorological Institute (DMI). Currently, DMI measures only the total solar irradiance. This is done at 28 stations across Denmark.

In this pilot study instruments for measuring the scattered irradiance have been tested over a period more than one year. The study has been coordinated with the IEA SHC Task 46 expert group. Two instruments have been tested: The RSR2 from Irradiance Inc. (Lincoln, Massachusetts 01773 USA) and the SPN1 from Delta-T Devices (Cambridge, CB25 0EJ UK). It is important that the instruments chosen are: 1) Sufficiently accurate compared to state-of-the-art instruments; 2) Solid and capable of being operated continuously over many years without frequent maintenance. It is recommended that DMI installs SPN1 pyranometers at its current radiation stations.

### **1.3.1 Executive summary (på dansk)**

*Gennem en årrække er detaljerede målinger af de primære sol-irradians-komponenter blevet foretaget ved DTU Byg. Disse målinger har vist at andelen af indirekte solstråling fra spredte irradianser er meget variabel over tid og, at en simpel sammenhæng i forhold til globalstrålingen ikke findes for målinger med tidsopløsning på minutter (EUDP 64011-0085001; Dragsted og Furbo 2012, DTU Civil Engineering Report R-275).*

*Indirekte solstråling kommer fra refraction og diffraktion fra sky-dråber, sky-iskrystaller, aerosoler eller Rayleigh-spredning fra luft-molekyler og fra solstråling reflekteret fra overfladen. Andelen af indirekte solstråling og indirekte illuminans er meget vigtig for bygnings-ingeniører, arkitekter og for den optimale udnyttelse af solvarme og solceller. I den større sammenhæng er øget viden om fordelingen og variabiliteten af de solare ressourcer vigtig for optimalt at kunne styre det danske energinet.*

*Dermed er det vigtigt, at indirekte solstråling måles og overvåges sammen med de andre essentielle klima-variable, der måles og overvåges af Danmarks Meteorologiske Institut (DMI). I dag måler DMI kun globalstrålingen. Dette gøres ved 28 stationer fordelt over hele landet.*

*I dette pilot-projekt er instrumenter, der kan måle indirekte solstråling, blevet testet i en periode på godt et år. Studier er udført parallelt med tilsvarende studier i IEA SHC Task 46 ekspert gruppen. Det er pri-*



*mært to instrumenter, der er blevet afprøvet: RSR2 fra Irradiance Inc. (Lincoln, Massachusetts 01773 USA) og SPN1 pyranometret fra Delta-T Devices (Cambridge, CB25 0EJ UK). Der er blevet lagt vægt på, at instrumentet skal være: 1) Tilstrækkeligt præcist sammenlignet med state-of-the-art instrumenter; 2) Pålidelige og solide nok til at kunne være i drift i mange år med et minimum af vedligehold og udskiftning. Det anbefales, at DMI installerer SPN1 pyranometre ved sine globalstrålings-stationer!*

#### **1.4 Project objectives**

The first milestone in the project was to buy and set up two times two instruments for measurement scattered and total solar irradiance at two DMI weather stations. This was achieved by the spring of 2014.

The second project milestone was to make a recommendation for how to monitor scattered irradiances in Denmark in the future. This was achieved after a full year of measurements had been gathered. In this recommendation two options for types of instruments are given and two options for the number of instruments to be put up. The primary recommendation is that DMI installs SPN1 pyranometers at its current radiation stations in addition to the already existing global radiation pyranometers (Nielsen 2015, DMI Technical Report).

Some minor problems occurred during the project. All of these were practical issues with the measurements. The instruments were tested at two WMO meteorological stations: "Københavns Toldbod" (WMO station No. 6187) and "Sjælsmark" (WMO station No. 6188). At the first of these stations, which is on the roof of "Københavns Toldbod", a flagpole was found to significantly bias the measurements. It is therefore recommended that the quantitative measurements of solar irradiance in Copenhagen are moved from station 6187 to station 6184 – more specifically the roof of DMI. A second problem was with an unstable positioning of the tested instruments on the 2-meter boom at a meteorological station. At station 6188 it was thus found that the SPN1 would tilt slightly over time when placed on the boom. This is unfortunate as the accuracy of the measurements depend on the sensors being level in the horizontal plane. In order to avoid this, radiation measuring devices should be placed on pillars by themselves. This will be similar to the setup chosen by the German weather service (DWD).

#### **1.5 Project results and dissemination of results**

The project succeeded in realising its objectives. The SPN1 pyranometer is sufficiently accurate, with an uncertainty of 5%, for monitoring the irradiance components. This accuracy is slightly better than a First Class Pyranometer as defined in the ISO 9060 standard.

The measurements of the tested instruments can be seen at the project website:

<http://irradiance.dmi.dk/solar-irradiance-components/solar-irradiance-components/global-horizontal-irradiance/> and <http://irradiance.dmi.dk/solar-irradiance-components/solar-irradiance-components/scattered-horizontal-irradiance/>. Here measurements of global irradiances are compared with measurements from the currently used DMI Star Pyranometers (Schenk, Wiener Neustadt, A-1210). It can be that the global irradiances measured with the SPN1, RSR2 and Star instruments agree well in



cloudy conditions, while only the measurements from the SPN1 and Star instruments agree reasonably in clear sky conditions. In clear sky conditions the RSR2 global irradiance measurements are consistently (up to 4%) lower than those of the reference Star Pyranometer. This is likely to be due to the limited spectral responsivity of the RSR2 photodiode sensor. From the measurement of scattered irradiances, good agreement is found between the SPN1 and the RSR2 instruments ( $< \pm 10\%$ ).

This project had a total salary budget of 1/7<sup>th</sup> work year. Since the strategy of DMI is decided by the government, it is difficult to estimate how the project will affect the turnover and employment at DMI in the future. It is expected that measurements of scattered irradiances in Denmark will benefit private companies and research institutes working with solar technologies and planning the integration of test in the Danish energy grid.

### **1.6 Utilization of project results**

The expansion of the DMI global radiation stations with measurements of scattered irradiances will enable DMI to develop new products and services – in particular when combined with the satellite cloud data.

### **1.7 Project conclusion and perspective**

It is recommended that DMI installs SPN1 pyranometers at its current radiation stations. This will improve the Danish monitoring of essential climate variables in general and the solar resources in particular.

### **Annex**

Relevant links:

- Measurements of scattered horizontal irradiances during the project:  
<http://irradiance.dmi.dk/solar-irradiance-components/solar-irradiance-components/scattered-horizontal-irradiance/>
- Daily measurements from the latest 50 days: <http://irradiance.dmi.dk/solar-irradiance-components/solar-irradiance-components/daily-components/>
- Below the concrete recommendation, in the form of a technical DMI report, can be found. Notice that this is written in Danish.



**Dmi**  
Klima- og Energiministeriet



## Måling af solstrålingens komponenter

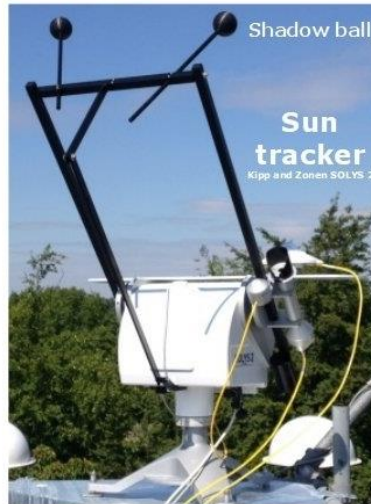
- Den totale energiflux fra Solen også kaldet globalstrålingen kan deles op i direkte irradians fra solskiven og diffus irradians fra alle andre retninger.
- Måling af solstrålingens komponenter muliggør forståelse af skyernes strålingsforcering på skalaer, der ikke er opløst i satellitbilleder eller i vejr- og klima-modeller.
- Her præsenteres forskellige løsninger og priserne på disse.

Kristian Pagh Nielsen



**Dmi**  
Klima- og Energiministeriet

View angle: 5°



## 2. 1. Hvorfor måle solstrålingens komponenter?

Der er to primære årsager til at måle solstrålingens komponenter:

1. Sol-ressource vurdering
2. Kvalitetskontrol af vejr- og klima-modeller

Fremtidens vedvarende energi-forsyning afgøres af vejret. Energien, der kommer til os fra Solen, giver energi til solvarme-anlæg, solcelle-anlæg og passiv solenergi til bygninger. Desuden giver Solen gratis belysning i dagtid. Danmark har i dag flere af verdens største solvarme-anlæg og indenfor dansk arkitektur er der stort fokus på udnyttelse af passiv solenergi og dagslys. I alle disse tilfælde er det nødvendigt at vide, hvor meget energi, der kommer på en given skrå flade med solvarme eller solceller eller på vinduer i forskellige retninger i en bygning. Ud fra DMI's nuværende målinger af globalstråling – den totale sol-flux på en horisontal flade – kan solstrålingens komponenter kun udledes tilnærmelsesvis og kun i form af time-værdier (DMI teknisk rapport 12-17). For solceller er det vigtigt, at kende sol-ressourcens variation på skrå flader i 1-minuts opløsning.

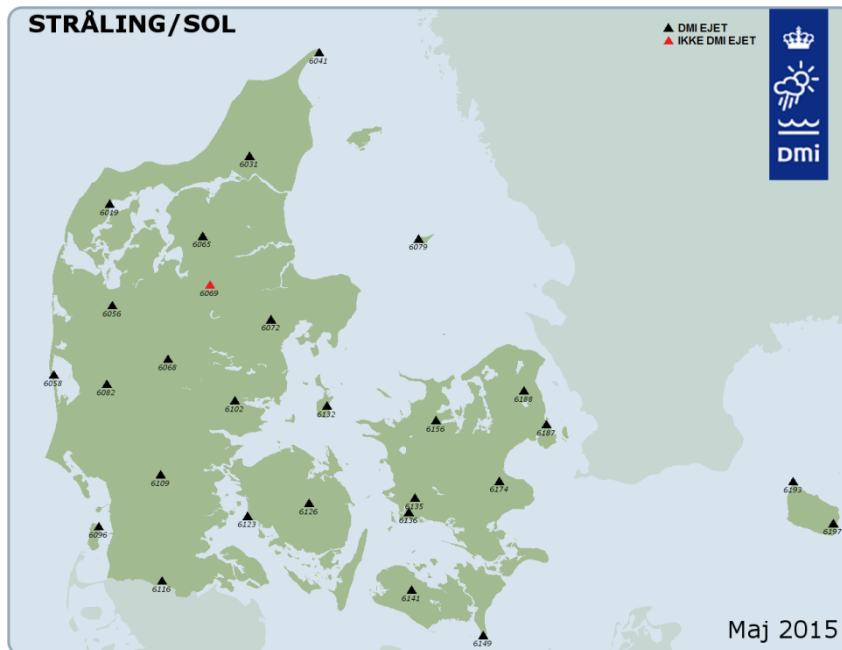
Den største svaghed i vejr-modeller i dag er deres vejrudsigter af sky-forholdene. Dette er ikke uafhængigt af, at modellernes kvalitet primært vurderes på andet end sky-vejrudsigterne. Således har lufttryk, temperatur, vind og nedbør i mange år været primære kvalitetsmål. Målinger af skydække er usikre og giver kun delvis information af skyerne. Satellit-produkter kan bruges for skyer, der ikke har variationer på skalaer, der er mindre end satellit-billedernes opløsning. For Meteosat Second Generation (MSG) satellitterne er denne opløsning 6-7 km over Danmark. Derfor er det nødvendigt at have *in situ* målinger. Målinger af solstrålingens komponenter giver direkte kvantitativ information om skyerne. Derfor er verifikation af disse den bedste måde at kvalitets-kontrollere sky-vejrudsiger på (Haiden et al. 2015, ECMWF Newsletter 143; Gleeson et al., 2015 ALADIN-HIRLAM Newsletter 4).

Som en sidebemærkning, kan det nævnes, at solskinstimer ikke giver nogen kvantitativ information om skyer eller solen. Mange danske interessenter, som jeg har talt med de sidste par år, trækker på smilebåndet, når DMI's opgørelser af solskinstimer nævnes. Det er uheldigt, at vi ikke også laver rutinemæssige opgørelser af globalstråling i  $W/m^2$ , som vi faktisk måler. Det giver et indtryk af, at DMI ikke følger med udviklingen.

***Der er ikke andre end DMI, der kan foretage rutine-mæssige kvalitets-kontrollerede målinger af solstrålingens komponenter på nationalt plan. Private firmaer har kun interesse i at måle på udvalgte steder, og universiteter måler kun i begrænsede projekt-perioder og vil typisk have udfald i ferier, hvor ingen ivaretager målingerne. Dermed bør DMI stå for at kortlægge sol-ressourcerne i Danmark.***

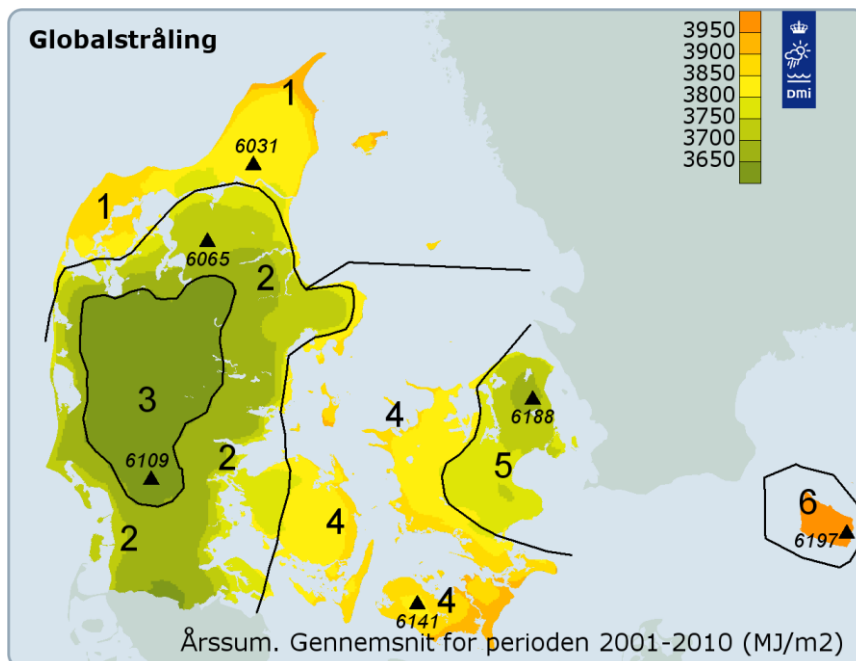
### 3. 2. Løsningsforslag for hvordan solstrålingens komponenter kan måles i Danmark

I dag måles globalstråling ved de 28 stationer, der er markeret i figur 1. Målingerne lagres i form af 10-minutters og 1-times gennemsnit. Kalibreringspraksis og rutinerne for vedligehold er beskrevet af Nordstrøm et al. (2005, DMI Intern rapport 05-12).



Figur 1: Globalstrålingsstationer i Danmark

I forbindelse med udarbejdelsen af et nyt design reference-år (DRY) baseret på meteorologiske data fra perioden 2001-2010 blev der brugt globalstrålingsdata fra de 6 stationer, der er vist i figur 2.



Figur 2: De seks DRY-stationer og den gennemsnitlige solenergi pr. kvadratmeter i perioden 2001-2010 (Wang et al. 2012 & 2013, DMI Teknisk rapport 12-17 & DMI Teknisk rapport 13-19).

Det anbefales, at alle 28 globalstrålingsstationer opdateres, så solstrålingens komponenter også måles ved disse. Hvis dette ikke er gennemførbart, kan de 6 DRY-stationer opdateres i stedet.



Et 1. klasses anlæg til måling af direkte og diffus stråling – solstrålingens komponenter – er vist på forsiden af dette dokument. Et pyrhiometer måler den direkte stråling indenfor et numerisk apertur på 2,5 grader fra solskivens retning, og et pyranometer, der altid er skygget med en skyggebold med det samme numerisk apertur, måler den diffuse stråling. Både pyrhiometret og skyggebolden er styret af en tracker med en solorsensor, så disse automatisk følger Solens gang over himlen. Parallelt med målingerne af direkte og diffus stråling, måles globalstrålingen med et ikke skygget pyranometer. Siden denne måling bør give samme resultat som summen af de to andre målinger, er det let at kvalitetssikre dataene. Da strålingsmålere kan drive i følsomhed over tid, er denne kvalitetssikring vigtig.

DTU Byg har købt et anlæg som dette for ca. DKK 150 000,-. Dette har kørt automatisk i over et år uden nogen problemer og noget vedligehold ud over at rense glasdomerne på pyranometrene (Kilde: Elsa Andersen og Bengt Perers, DTU Byg, 2015). På sigt kan det dog antages, at en kompliceret opstilling som denne vil kræve mere vedligehold end en simple opstilling.

Ved DMI er to alternative instrumenter blevet afprøvet siden foråret 2014. Begge er vist i figur 3. Den ene instrument (RSR2, Irradiance Inc., Lincoln, MA 01773, USA) er udstyret med et kvartcirkel-formet skyggebånd, der roterer, så det ved hver rotation skygger for Solen kortvarigt. Bredden på skyggebåndet svarer til et numerisk apertur på 2,5 grader. Dermed måler RSR2 både globalstrålingen og den diffuse irradians. Det andet instrument (SPN1, Delta-T Devices Ltd., Burwell, CB25 0EJ, UK) måler også globalstråling og diffus irradians men gør det vha. en skyggemaske, der dækker 7 sensorer forskelligt, så mindst én af disse er i skygge og mindst én ser Solen uhindret på alle tidspunkter, hvor Solen er oppe. Skyggemasken er symmetrisk og lavet, så alle 7 sensorer ser 50% af himlen og dermed 50% af den diffuse stråling.



Figur 3: Fra venstre til højre ses RSR2, DMI's standard Star pyranometer og SPN1 sat op ved DMI's station 6188 i Sjælsmark.

Prisen på de to alternative instrumenter er henholdsvis ca. DKK 100 000,- for RSR2 og ca. DKK 50 000,- for SPN1. Da SPN1 har givet bedre målinger end RSR2, kun er halvt så dyrt og i tillæg er bedre designet end RSR2, anbefales RSR2 instrumentet ikke. SPN1 instrumentet er klassificeret som et "godt pyranometer" efter WMO's klassificering. Individuelle målinger er specificeret til at have fejl på +/- 8% og time-gennemsnit er specificeret til at have fejl på

+/- 5%. DMI's nuværende Star pyranometre er også klassificerede som "gode pyranometre" (Nordstrøm et al. 2005).

For at kunne bruge SPN1 instrumenterne, anbefales det, at de sættes op ved siden af de nuværende Star pyranometre. På denne måde sikres kvaliteten med dobbelte målinger af globalstrålingen.

#### **4. 3. Konklusion**

Fire løsningsforslag til, hvordan DMI fremover kan måle solstrålingens komponenter er her foreslået. Alle fire løsninger er tilføjelser til de nuværende målinger og skal ikke ses som erstatning af disse:

1. Opsætning af pyrliometre og målinger af diffuse pyranometre med tracking udstyr ved alle 28 DMI globalstrålingsstationer. Pris: DKK 4 200 000,- plus arbejdstimer og drift.
2. Opsætning af pyrliometre og målinger af diffuse pyranometre med tracking udstyr ved de 6 DRY-stationer. Pris: DKK 900 000,- plus arbejdstimer og drift.
3. Opsætning af SPN1 sunshine pyranometre ved alle 28 DMI globalstrålingsstationer. Pris: DKK 1 400 000,- plus arbejdstimer og drift.
4. Opsætning af SPN1 sunshine pyranometre ved de 6 DRY-stationer. Pris: DKK 300 000,- plus arbejdstimer og drift.

Her anbefales løsning 3, da alle stationer dækkes, og da SPN1-målerne vil koste mindst i drift og vedligehold.

***Testmålingerne af SPN1 og RSR2 er støttet af Energistyrelsen via EUDP-projekt 64013-0153 (projekt 2013-154 i Cumulus). Hvis vi vælger, at udvide vores målestationer, som anbefalet her, bør vi gøre Energistyrelsen /v Jens Windeleff opmærksom på dette.***