

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Högekvalitatitva solstrålningsdata för nordiska förhållanden	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska High quality solar radiation data for Nordic conditions	
Universitet/högskola/företag SMHI	Avdelning/institution Forskning och Utveckling
Adress 601 76 NORRKÖPING	
Namn på projektledare Tomas Landelius	
Namn på ev övriga projektdeltagare Sandra Andersson, Nina Håkansson	
Nyckelord: 5-7 st Modellering, Solstrålningsdata, Data fusion, Moln, Optisk tjocklek	

Förord

SMHI har genomfört projektet där Statens energimyndighet finansierat 100 procent av stödgrundande kostnader där 30 procent av SMHIs indirekta kostnader ingått. SMHI har bidragit med resterande 70 procent av de indirekta kostnaderna. Projektet genomfördes inom ramen för programmet El från solen.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	2
Summary.....	3
Inledning/Bakgrund.....	4
Genomförande.....	6
AP1: Molndjupsdata från NWC-SAF/CM-SAF och NWP (SA,NH,TL).....	6
AP2: Undersöka kvalitén på molndjupsdata från polära satelliter (TL).....	9
AP3: Skattning av molndjup med maskininläring (NH).....	10
AP4: Kombinera data från geostationära och polära satelliter (TL).....	10
AP5: Validering av metoderna (NH, TL).....	11
Resultat.....	12
Modellering av solstrålningen vid klart väder.....	12
Skattning av molndjup med maskininläring.....	13
Molndjupsdata från geostationär satellit.....	14
Molndjupsdata från polära satelliter.....	15
Molndjupsdata från numerisk väderprognosmodell.....	16
Kombination av COT från olika datakällor.....	17
Diskussion.....	19
Publikationslista.....	21
Referenser, källor.....	21
Bilagor.....	23

Sammanfattning

Genom att förbättra hur molnen hanteras i SMHIs rikstäckande strålningsmodell STRÅNG har RMS-felet för timvärden på globalstrålningen kunnat minskas med ca 30 % och direktstrålningen med ca 5 %. Kvaliteten för globalsolstrålningen ligger därmed i nivå med den hos data från databasen SARA-H vilken är state-of-the-art på området, men bara täcker området upp till 65 N. Direktstrålningen överskattas vilket behöver åtgärdas för att den ska nå samma nivå som i SARA-H.

Kunskap om solstrålningens fördelning i tid och rum utgör ett viktigt beslutsunderlag för planering, dimensionering och övervakning av solenergi-anläggningar. I dagsläget brister kvalitén på solstrålningsdata där geostationära satelliter har dålig täckning, norr om ca 60 N. SMHIs solstrålningsmodell STRÅNG togs fram i slutet av 1990-talet och använder data från polära satelliter för att täcka nordligare breddgrader. Studier har visat att STRÅNG inte längre håller måttet och att det är molniga situationer som är problemet.

I ett pilotprojekt som SMHI genomfört på uppdrag av Energimyndigheten togs en lovande metod fram för att förbättra hur molnen behandlas i STRÅNG. Resultatet baserades dock enbart på data från geostationära satelliter.

I detta projektet har metoden, som istället för molnmängd använder molnens optiska tjocklek för att beskriva molnens inverkan på solstrålningen, applicerats på data från såväl geostationära som polära satelliter. Maskininlärning har används för att ta fram en metod som gör att data om molnens optiska tjocklek även kan produceras vid låga solhöjder.

Information om molnens optiska tjocklek från de geostationära och polära satelliterna har sedan kombinerats för att STRÅNG-modellen ska kunna täcka hela Skandinavien med data av hög kvalité.

En fortsättning på projektet kan vara att köra om STRÅNG med den nya metodiken från år 2004 då satellitdata om molnens optiska tjocklek finns tillgängligt. Ett sådant dataset skulle kunna erbjudas som ett alternativ för Norden i den fritt tillgängliga webbaserade stödtjänsten PVGIS i EU Science Hub.

Summary

By improving how clouds are treated in SMHI's solar radiation model STRÅNG, the RMS error for hourly values of global radiation can be decreased by approximately 30 % and the direct radiation with about 5 %. This means that the quality of the global radiation is then in line with that of the state-of-the-art database SARA, which only covers latitudes below 65 N. For the direct radiation there is a systematic overestimation that needs to be addressed in order to achieve the same performance as in SARA.

Knowledge about the distribution of solar radiation in time and space is an important decision basis for planning, dimensioning and monitoring of solar energy plants. Today there is a lack of high quality solar radiation data where geostationary satellites have poor coverage, north of about 60 N. SMHI's solar radiation model STRÅNG was developed in the late 1990s and uses data from polar satellites to cover the northern latitudes. However, studies have shown that STRÅNG no longer holds the measure in cloudy situations.

A pilot project that SMHI carried out on behalf of the Swedish Energy Agency presented a promising method to improve how clouds are treated in STRÅNG. The results were however based solely on data from geostationary satellites.

This method, that uses information about the cloud optical thickness instead of the cloud amount, was applied to data from geostationary as well as polar orbiting satellites. Machine learning was employed to develop a method that allows the cloud optical thickness data to be produced even for low solar elevations.

The cloud optical depth estimates from geostationary and polar orbiting satellites were then combined to provide the STRÅNG model with improved cloud information that allows it to produce high quality data for the whole of Scandinavia.

A follow on project could be to rerun STRÅNG with the new method, using cloud optical thickness from data sets dating back to 2004. The produced solar radiation data could then be made publicly available as an option for the Nordic area in the web based solar radiation service PVGIS in the EU Science Hub.

Inledning/Bakgrund

Projektet har genomförts av SMHI under tiden 2020-01-01 – 2021-04-30 (förlängt från det ursprungliga slutdatumet 2020-12-31). Statens energimyndighet har finansierat 100 procent av stödgrundande kostnader där 30 procent av SMHIs indirekta kostnader ingått. SMHI har bidragit med resterande 70 procent av de indirekta kostnaderna.

I Svenska Kraftnäs långsiktiga marknadsanalys (SVK 2018/2260) väntas solkraften stå för ca en tredjedel av vad vindkraften eller hälften av vattenkraften producerar i referensscenariot för 2040. För att kunna integrera en sådan mängd solkraft i energisystemet krävs att det designas och styrs på ett flexibelt och robust sätt. Kunskap om solstrålningens fördelning i tid och rum utgör då ett viktigt beslutsunderlag när ett helt förnybart energisystem ska dimensioneras och övervakas på ett samhällsekonomiskt och resurseffektivt sätt.

I dagsläget finns metoder för att ta fram solstrålningsdata med god kvalitet och tidsupplösning baserat på information från geostationära satelliter. Sådana data saknas dock för stora delar av det nordiska elmarknadsområdet då de geostationära satelliterna, p.g.a sin placering ovanför ekvatorn, har dålig täckning norr om ca 60 N. SMHIs solstrålningsmodell STRÅNG (Landelius et al., 2001) använder även data från polära satelliter för att täcka in nordligare breddgrader. STRÅNG håller dock inte längre måttet när det gäller hanteringen av molniga situationer. Anledningen är att STRÅNG endast modifierar klarvädersstrålningen baserat på molnmängden och inte tar hänsyn till hur tjocka molnen är vilket moderna metoder gör.

Detta var även en av slutsatserna från ett tidigare projekt inom Solel-programmet där det konstateras att branschen efterfrågar tillförlitliga solstrålningsdata och att en utveckling av SMHIs modell STRÅNG krävs då den ger alltför stora avvikelser när data därifrån används för att beräkna årlig solel-produktion (Elforsk 2017:387). Tillgång till högkvalitativa historiska solstrålningsdata är också en viktig pusselbit för att ta sig an de tre utmaningarna i utlysningen.

Utmaning 1 - Inkluderande omställning. Att producera el med solceller är nu på väg att bli den billigaste tekniken för ren elproduktion (Fortune Magazine, June 2016). I samband med detta ökar behovet av att förstå hur solkraften fungerar och hur den ska integreras i elsystemet. För att få med så många potentiella solel-producenter som möjligt i omställningen behövs lättillgänglig information om förutsättningarna för solelinstallationer och möjlighet att övervaka produktionen. Många kommuner erbjuder numera solkartor men dessa behöver kompletteras med information om solstrålningens variabilitet, grundas på solstrålningsdata av hög kvalitet och byggs ut till att omfatta hela landet. Kommersiella system för uppföljning av produktionen bygger ofta på data från geostationär satellit men dessa har som sagt dålig kvalitet i stora delar av Norden. I Europa används en så kallad "performance-to-peers"-metod där anläggningens produktion jämförs med många närliggande för att upptäcka avvikelser. Detta bygger på att det finns ett stort antal solcellsanläggningar på samma plats vilket inte är fallet i Sverige. En

fritt tillgänglig databas med solstrålningsdata av god kvalité är avgörande komponenter för att alla potentiella investerare inom solenergi skall känna trygghet i tekniken och i sina investeringar.

Utmaning 2 - Ett resurseffektivt och konkurrenskraftigt elsystem. Förbrukningsflexibilitet och lagring kommer få större betydelse i framtiden när produktionen i större utsträckning blir väderberoende och elanvändningen ökar. Utan hänsyn till dessa faktorer är risken att det blir effektbrist och att investeringsbehovet blir onödigt stort. Detsamma gäller för överföringskapaciteten som kommer att behöva ökas då det blir mer icke planerbar och variabel produktion i elsystemet. För att kunna planera och dimensionera framtidens elsystem med stabiliserande systemtjänster, baserade på bl.a. elbilar, smarta nät och batterilager, på ett resurseffektivt sätt behövs kunskap om produktion och konsumtion. I nuläget finns inget krav på att mäta bruttoproducerad sol vilket leder till att det verkliga elbehovet döljs då endast nettoproduktion och nettokonsumtion registreras. I betänkandet från Nätkoncessionsutredningen (SOU 2019:30) sägs att mätning, beräkning och rapportering är avgörande för elmarknadens och elsystemets funktion samt möjligheten att utvärdera energipolitiken. Ett krav på bruttomätning anses dock i nuläget inte motiverat med tanke på de merkostnader det skulle leda till. Med bra solstrålningsdata skulle bruttoproduktionen kunna modelleras utan att elproducenterna drabbas av extra kostnader.

Utmaning 3 - Ett förnybart elsystem som säkrar elförsöjningsbehovet för klimatomställningen i alla samhällssektorer. Även om den årliga andelen av elproduktionen som utgörs av sol- och vind inte utgör en majoritet så kan den momentant bli avsevärd. På samma sätt kan den bli mycket låg i vissa situationer. I Svenska Kraftnäs referensscenario för 2040 så beräknas Sverige ha ett stort underskott på el under vinterns höglästtimmar men detta är tänkt att lösas med import. Manuel förbrukningsbortkoppling har ännu aldrig behövts göras i Sverige men marginalerna sjunker framöver. Med högkvalitativa väderdata kan samvariationen mellan sol- och vind-el analyseras och risken för effektbrist studeras i detalj. På så sätt kan resurseffektiva investeringsbeslut kring överföringskapacitet, åtgärder för ökad efterfrågeflexibilitet och handlingsplaner för förbrukningsbortkoppling tas fram. Även försäkringsbranschen kan vara intresserad av sådana data. Redan idag erbjuder försäkringsbolaget Lloyds produktionsgarantier för soleanläggningar och att teckna försäkringar mot effektbrist kan bli intressantare i framtiden.

Genom den vidareutveckling av SMHIs strålningsmodell STRÅNG som gjorts i projektet kan samhällets behov av högkvalitativa solstrålningsdata tillgodoses på ett bättre sätt. Kunskap om solstrålningens variation är viktig för att utarbeta ett resurseffektivt, flexibelt och robust energisystem helt baserat på förnybara källor.

Genomförande

För att nå projektets mål med förbättrad kvalitet på solstrålningsdata från STRÅNG-systemet användes molnens optiska tjocklek istället för molnmängd vid modelleringen av solinstrålningen.

Eftersom data från polära satelliter krävs för att få god täckning vid nordligare breddgrader kombinerades denna information med data från geostationär satellit samt väderprognosinformation där satellitdata saknades.

Metodiken utvärderades genom att modellerade och uppmätta värden på solstrålningen i Sverige jämfördes med varandra.

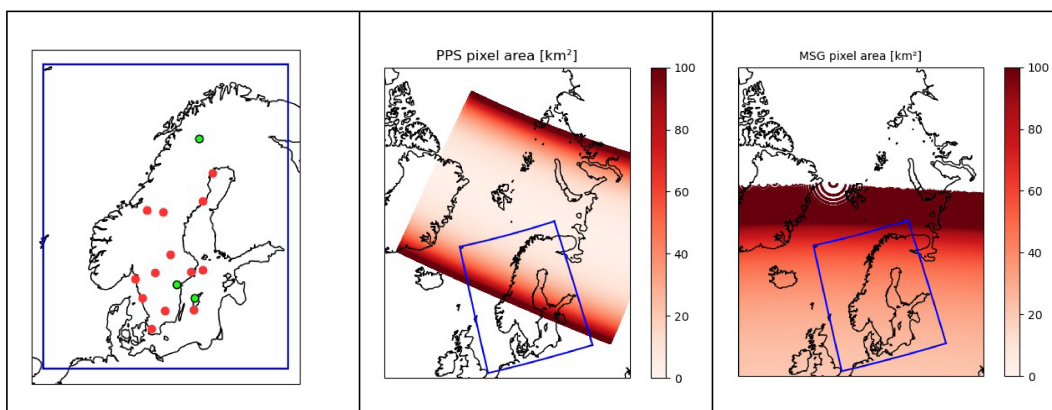
Arbetet fördelades på fem arbetspaket enligt nedan (namnen på de medverkande har förkortats med tvåbokstavskombinationer; SA: Sandra Andersson, NH: Nina Håkansson, TL: Tomas Landelius).

AP1: Molndjupsdata från NWC-SAF/CM-SAF och NWP (SA,NH,TL)

I den tidigare studien användes produkter med molndjup från geostationära satelliter för ett begränsat område under perioden april - september 2017. För det aktuella projektet användes geostationära molnfysik-data (molntjocklek samt molntyp) från CLAAS2 (Finkensieper et al., 2016) som producerats med data från den geostationära satelliten "Metosat Second Generation" (MSG) av "Satellite Application Facility on Climate Monitoring" (CM SAF) samt arkiverade molnfysik-data från polära satelliter vilka producerats vid SMHI med programvaran NWC/PPS v2014 (Karlsson et al., 2014). Båda dessa data hämtades för perioden april - september 2017.

Utöver detta kompletterades det polära datasetet med data från februari - april 2020. Anledningen var att det för denna period fanns lokalt arkiverat satellitdata på ett format som gjorde det möjligt att ta fram en metod för att skatta molnens optiska tjocklek med ett neuralt nätverk.

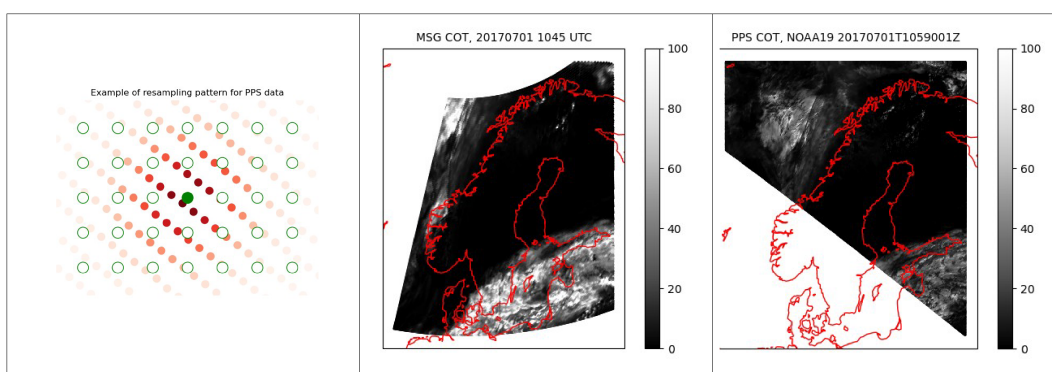
För arbetet med det neurala nätverket (AP3) behövdes också data från instrumentet CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Projection) på satelliten CALIPSO. Dessa data hämtades från The Atmospheric Science Data Center (ASDC), se Winker et al. (2016). Arkiverade data från väderprognosmodellen MEPS hämtades från MARS-arkivet vid "National Supercomputer Centre" (NSC) i Linköping.



Figur 1: I samtliga figurer visas STRÅNG-modellens område av den blå rutan. Vänster: SMHI:s stationer med strålnings-mätningar som använts för jämförelser (röda prickar: globalstrålning, gröna cirklar: global- och direktstrålning). Mitten: Pixel-area för data i ett svep från en polär satellit. Höger: Pixel-area för data från en geostationär satellit.

Området som täcks av strålningsmodellen STRÅNG ligger inom den blåmarkerade arean i figur 1. Den yta som satellitmätningarna avser beror på skannings-vinkeln hos instrumentet. För data från PPS så har de skannat från vänster till höger i den riktning som satelliten rört sig (mittenbilden i figur 1). För geostationära data från MSG beror skannings-vinkeln istället på vinkeln från den stationära position ovanför vilken satelliten befinner sig på (lat,lon = 0,0). Det senare fallet illustreras i den högra bilden i figur 1. Notera att ytan för mätningar gjorda med polära satelliter för det mesta avser en mindre yta än motsvarande mätning från en geostationär satellit.

Mängden data från NWC/PPS varierar beroende på vilka polära satelliter som passerat över området under den tidsperiod som är aktuell för modelleringen. I den högra bilden i figur 2 visas ett exempel då en polär satellit passerat och gjort mätningar som täcker en del av modellområdet.



Figur 2: Exempel på interpolation av satellitdata till STRÅNG-modellens rutnät. Vänster: Ett utsnitt från STRÅNG-rutnätet (gröna cirklar) med satellitdata (röda punkter) viktade enligt avståndet till den STRÅNG-ruta som interpolationen avser (fylld grön cirkel). Viktningen markeras med graden av transparens hos de röda punkterna. Mitten: Exempel med interpolerade data från polär satellit. Höger: Exempel med interpolerade data från geostationär satellit.

För att interpolera data från PPS och MSG (angivna i sina respektive satellitprojektioner) användes modulen "pyresample" i den öppna Python-programvaran "pytroll" (<http://pytroll.github.io/>). Varje scen från en polär eller geostationär satellit samplades om, var för sig, till STRÅNG-modellens rutnät. Ett exempel på hur detta går till ges i figur 2. I den vänstra bilden visas hur satellitdata i en omgivning till en punkt i STRÅNG-rutnätet viktas (vi använde en gaussisk viktning) när dessa data ska interpoleras till den aktuella punkten (markerad med en fylld grön cirkel). Den mittersta och högra bilden i figur 2 visar resultatet av interpoleringen av en geostationär respektive en polär scen. Anledningen till att data från PPS och MSG interpolerades var för sig var att det annars fanns en risk för så kallade "Moiré-mönster" (interferens-mönster) på grund av att data från PPS och MSG ligger på olika projektioner.

Förutom viktningen som beror på avståndet till den aktuella punkten användes även den kvalitetsinformation som finns angiven för produkten optisk tjocklek från PPS samt MSG. För data från PPS sattes vikten till 0 i de fall då kvalitetsinformationen angav att förutsättningarna för att skatta molntjockleken var dåliga (flaggan "cpp status" indikerade "bad optical conditions") och till 0.5 i de fall då det antingen flaggan "cpp conditions" pekade på att det rörde sig om solreflexer. Även i de fall då kvalitets-flaggan "cpp quality" visade på "no data" eller "questionable data" sattes vikten till 0.5. För data från MSG sattes vikten till 0.5 då flaggan "quality" indikerade något annat problem än "mask_ reset to clear by opt prop retrieval" vilket bara betyder att det rör sig om ett klart område.

Förutom vikterna associerade med rumsliga avstånd och kvalitet användes också en funktion för att vikta satellitdata som en funktion av tids-differensen mellan mätningen och den aktuella analys-tidpunkten. Funktionen har ett sigmoidliknande utseende och går mot noll snabbt efter ca 20 minuter (baserat på empirisk kunskap kring hur fort molnområden rör sig i genomsnitt). Detta innebär att det för en given analys-tidpunkt, t_0 , finns tre geostationära scener att tillgå (MSG/CLAAS-data finns för var 15:e minut). Dessa startar sina mätningar vid tidpunkterna t_0-30 min, t_0-15 och t_0 . Skanningen av data för den geostationära satelliten tar ca 15 minuter och börjar i den södra delen av området. Detta innebär att STRÅNG-området skannas strax innan t_0-15 , t_0 , respektive t_0+15 för de tre aktuella geostationära scenerna.

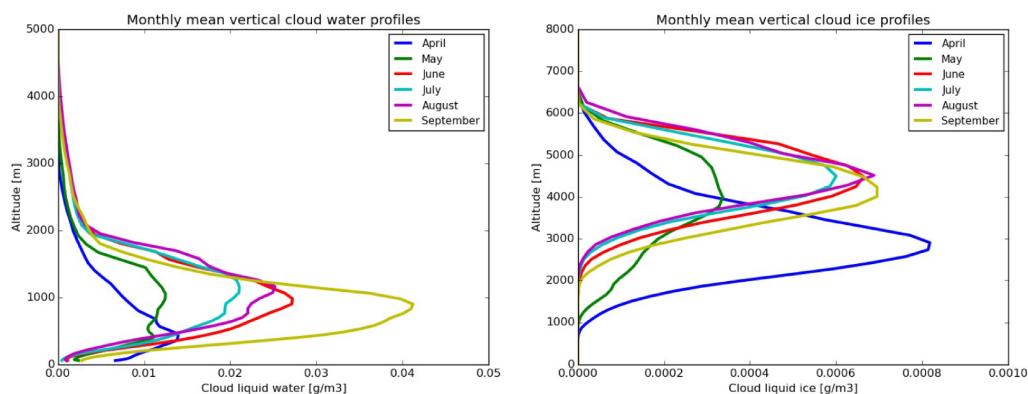
AP2: Undersöka kvalitén på molndjupsdata från polära satelliter (TL)

Resultatet från pilotprojektet visade att användandet av molndjupsdata från geostationär satellit ledde till att kvalitén på solstrålningsdata kunde förbättras jämfört med om enbart molnmängden användes vid modelleringen.

I det aktuella projektet undersöktes huruvida även användandet av motsvarande produkter från polära satelliter kan leda till förbättringar i modelleringen av solstrålning.

Metoden går ut på att molnens optiska tjocklek, fas (vattendroppar eller iskristaller i molnet) samt vatten/is-innehåll skattas från satellit och sedan används som indata i en strålningsmodell för att beräkna global- och direktstrålning vid

marken. De vertikala profiler med moln-vatten och -is som togs fram i det tidigare projektet användes även här. Exempel på medel-profiler för olika månader illustreras i figur 3.



Figur 3: Vertikala månatliga medel-profiler av molnvatten (vänster) och molnis (höger) från SMHIs operationella numeriska väderprognosmodell.

Som solstrålningsmodell har vi valt att använda libRadtran (Emde et al., 2016) som introducerades i den senaste uppgraderingen av STRÅNG år 2017. Tanken med att byta från den tidigare klarvädres-modellen SMARTS2 (Gueymard, 1995) var just att möjliggöra modellering även av molniga radianser. Modellen libRadtran - "library for radiative transfer" är en samling C- och Fortran-funktioner och program för att beräkna kort- och långvågsstrålning i atmosfären. Koden är öppet tillgänglig under "the GNU General Public License". Med undantag för hur molnen hanteras så har inställningarna för libRadtran varit identiska med dem som används i den nuvarande operationella STRÅNG-modellen. Även alla indata, med undantag av moln-informationen, var de samma som de som använts i produktionen av STRÅNG. Dessa hämtades från fil-arkivet vid SMHI.

För att beräkna strålning i närvaro av moln behöver libRadtran, den vertikala fördelningen av mängden moln-vatten/is, även information om molnens fas (vatten/is) och deras optiska tjocklek. Information om huruvida det rör sig om ett vatten- eller ismoln togs från CM-SAF-produkten molnfas och sedan skalades den vertikala profilen om enligt CM-SAF-produkten optisk tjocklek m.h.a. libRadtran-direktiven "wc_modify tau550 set X" eller "ic_modify tau550 set X" beroende på om fasen antas vara vatten eller is (X är värdet på det optiska djupet).

AP3: Skattning av molndjup med maskininlärning (NH)

Kvalitén på dagens satellitprodukter med optiskt djup riskerar att vara låg när solen står lågt. En alternativ metod baserad på maskininlärning utvecklades därför i projektet. Den bygger vidare på en existerande metod (Håkansson et al. 2018) som SMHI använder för att skatta molnhöjd för såväl tunna som tjocka moln utgående från satellitdata i det infraröda våglängdsområdet (3.7 μ m-12 μ m) som är mindre känsliga för solhöjden. Tre kanaler används (3.7 μ m, 11 μ m och 12 μ m).

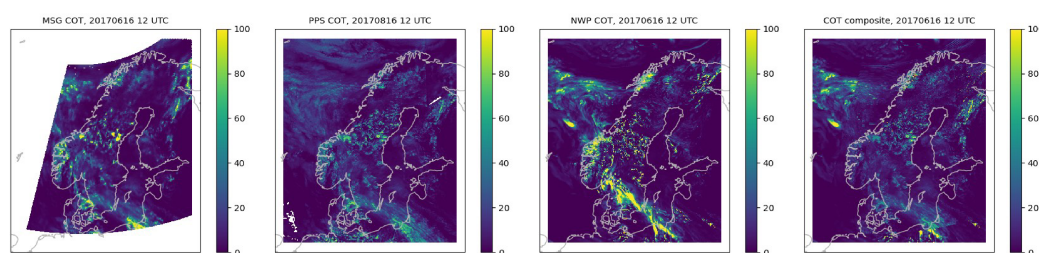
För vissa bildinstrument saknas kanalen vid $3.7\mu\text{m}$ under dagtid och då används bara två kanaler. Det neurala nätverket har tränats med data från bildinstrumentet MODIS mot optisk tjocklek data från instrumentet CALIOP som är en lidar och därmed ett noggrannare instrument. Data från 2010 har använts för träning. CALIOP lidarn mäter optisk tjocklek bra för tunna moln (optisk tjocklek ca 0-5) för tjockare moln blir lidarns signal mättad. Detta är inte ett problem för den här tillämpningen då solstrålningen ändå inte blockeras mycket mer för tjockare moln än så.

AP4: Kombinera data från geostationära och polära satelliter (TL)

För en given tid och plats (timma och ruta) kommer det att finnas en uppsättning av molndjupsdata från olika PPS- och MSG-scener. En metod togs fram för att kombineras ihop dessa till ett värde baserat på kvalitén hos informationen från de olika datakällorna.

Metoden ska ses som en första ansats till att göra sammanslagningen av data och går helt enkelt ut på att data viktas linjärt med avseende på den totala vikten som associerades med interpolationen av molndjupet i AP1. Förutom den viktade skattningen av molndjupet sparades även summan av vikterna under gauss-funktionen (som användes för att normalisera summan av produkten mellan molndjupsvärdena och deras kvalitetsberoende vikter) för varje ruta i STRÅNG-rutnätet. Till en sådan ruta finns alltså en uppsättning vikter och skattade molndjups-värden från MSG och PPS (antalet varierar beroende på hur många passager som finns tillgängliga vid det aktuella analystillfället).

I de fall då det saknades data från såväl MSG som PPS användes ett beräknat molndjupsvärde baserat på aktuella vertikala profiler med molnvatten och -is från den operationella väderprognosmodellen (NWP) MEPS.



Figur 4: Exempel på en kombinerad karta för molnens optiska tjocklek (COT) från olika datakällor. Vänster: COT från geostationära bilder kring 12 UTC. Näst längst till vänster: COT från polära satelliter kring 12 UTC. Näst längst till höger: COT från en väderprognos för 12 UTC. Höger: Sammanvägd COT baserad på dessa COT-data för 12 UTC den 16 juni 2017. Vita områden markerar saknade data.

Ett exempel på hur sammanslagningen kan se ut ges i figur 4. Interpolerade MSG-data visas i den vänstra figuren och motsvarande data från PPS samt MEPS i de två efterföljande kartorna. Resultatet från sammanslagningen av de tre dataseten

återfinns i den högra kartan i samma figur. Data från den numeriska väderprognosmodellen används endast i de områden där det saknas satellitdata (vita områden i kartorna). Notera att när metodiken sätts i drift så kommer MSG-data att täcka området upp till 70 N vilket innebär att det vita området i den vänstra figuren minskar betydligt.

AP5: Validering av metoderna (NH, TL)

Det alternativa sättet att beräkna optiskt djup med ett neuralt nätverk (NN) utvärderades mot oberoende mätningar från lidar-instrumentet CALIOP. Här användes lokalt mottagen satellitdata från 2020 (februari till april) och för dessa har vi tagit fram optisk tjocklek med både den vanliga metoden baserad på PPS-data och med den nya neurala-nätverksmetoden. För att utvärdera kvalitén på COT-data från NN och NWP modellerades globalstrålningen på samma sätt som för MSG och PPS i AP2.

Den modellerade strålningen (timvärden), baserad på COT från NN och PPS under perioden februari – april 2020 jämfördes med uppmätta timvärden från 16 platser i SMHIs stationsnät (se vänstra bilden i figur 1 samt listan i tabell 4) under motsvarande tidsperiod. Två stationer i SMHIs nätverk användes inte. I ena fallet (Tarfala) är data inte representativa för den ruta på 2.5x 2.5 km som modelleras i STRÅNG på grund av de mycket lokala förhållandena på mätplatsen belägen i alpin miljö. I det andra fallet (Karlskrona) mäts endast solskenstiden.

För strålningen som modellerats med COT från MSG, PPS och NWP under perioden april – september 2017 gjordes, vid sidan av jämförelsen med mätningar från SMHIs stationsnät, även en jämförelse med timvärden från datasetet SARAH 2.1 som producerats av CM-SAF (Pfeifroth, 2019). De senare ackumulerades genom att summera 30-minutersvärdena i databasen.

Den modellerade direktstrålningen jämfördes med uppmätta data samt data från SARAH-databasen gällande stationen i Norrköping. Direktstrålning mäts även i Kiruna och Visby men dessa stationer valdes bort då de kan betraktas som extremer med låg respektive hög strålning sett ur ett Svenskt perspektiv.

Resultat

Projektets resultat redovisas främst i termer av statistik (medelvärden och standardavvikelser) för differensen mellan modellerade och observerade timvärden av globalstrålning. Avsnittet är uppdelat med avseende på vilken datakälla som använts för att beräkna molnens optiska tjocklek.

Modellering av solstrålningen vid klart väder

Strålningsmodellen libRadtran använde som noterats ovan samma indata som STRÅNG under de aktuella perioderna. För att se hur modellen fungerar med olika COT-data började vi med att jämföra den i de situationer då molnmängden som används till STRÅNG indikerade klart väder (molnmängden <1 %).

Resultatet för timvärden på globalstrålningen under perioden april – september 2017 sammanslaget för samtliga 16 stationer visas i tabell 1.

Tabell 1: Bias och standardavvikelser för globalstrålning modellerad med olika datakällor för COT.

	Medelvärde modell-obs	Standardavvikelse
Klart väder, COT=0	8.7	28
SARAH	-19	33
MSG	4.8	21
PPS	6.8	25

Resultatet pekar på att libRadtran fungerar tillfredsställande i situationer med klart väder för de indata från STRÅNG som vi använt. Anledningen till att den överskattar strålningen är att skattningen av molnmängden som använts för att definiera klara tillfällen inte är perfekt. Det finns tillfällen då det i själva verket var molnigt vilket leder till att observationerna då visar på lägre värden. Det omvända gäller dock inte.

I fallet med COT från MSG och PPS finns möjligheten att COT stämmer bättre överens med verkligheten vilket skulle kunna ge bättre resultat vilket också verkar vara fallet.

För data från SARAH så visar de på en systematisk underskattning av strålningen vid klart väder. En förklaring skulle kunna vara att den branta betraktningssvinkeln för geostationära satelliter (SARAH bygger på data från MSG) kan leda till att fler moln detekteras längs den längre siktlinjen. Men i så fall borde det också gälla för COT från MSG vilket inte är fallet. Det kan också vara så att kompensationen för denna effekt (parallax) görs på olika sätt för SARAH respektive COT från MSG.

Skattning av molndjup med maskininlärning

Huvudsyftet med att utveckla en alternativ metod för att skatta COT med ett neuralt nätverk var att få data för COT även för låga solhöjder då PPS (sza>70) och MSG (sza>84) inte ger några resultat.

Under perioden februari – april 2020 gav PPS-data information om COT vid ca 20 % av fallen då solen stod över horisonten vid de 16 mätstationerna. För samma period presenterade metoden baserad på det neurala nätverket resultat för ca 48 % av fallen, dvs. för mer än dubbelt så många fall som PPS.

Frågan är då hur kvalitén på utdata från NN-metoden är. I tabell 2 redovisas bias och standardavvikelse för modellering av globalstrålningen baserat på COT från NN-metoden tillsammans med motsvarande statistik för modellering med COT skattat från PPS samt strålningsvärden för STRÅNG.

Tabell 2: Felstatistik i termer av bias och standardavvikelser för strålningsmodelleringen baserad på COT från PPS och ett neuralt nätverk jämfört med mätningar vid 16 av SMHIs stationer under perioden februari-april 2020. Enheten är Wh/m².

	Medelvärde modell-obs	Standardavvikelse
STRÅNG	-63	110
PPS	3.2	86
NN	-13	91

Jämförelsen visar att COT från NN-metoden resulterar i nästan lika bra modellering av globalsolstrålningen som COT från PPS. I båda fallen är resultatet betydligt bättre än för dagens STRÅNG-modell. RMS-felet för NN-metoden är ca 30 % lägre än för STRÅNG.

Det gjordes även en utvärdering av hur kvalitén på skattningen av COT i sig blev med NN-metoden jämfört med PPS. Resultatet redovisas i tabell 3. Man ska ha i åtanke att CALIOPs skattning av optisk tjocklek fungerar bäst för tunna moln (optisk tjocklek mellan 0 och 5). Det visade sig att NN metdoden har lite bättre resultat än PPS och är mycket bättre på att producera skattningar även för låga solhöjder.

Tabell 3: Jämförelse av optisk tjocklek med PPS och NN utvärderat mot CALIOP.

	Genom- snittligt absolutfel	Median	Medelfel	Andelen fel större än 1.0. Enhet (%)	Antal pixlar
Alla moln					
NN	1.7	0.2	0.3	54	2180286
NN där PPS har data	1.7	0.5	0.9	54	770955
PPS	2.9	1.3	1.9	69	770955
Tunna moln					
NN	1.8	0.9	1.3	55	1213421
NN där PPS har data	2.0	1.3	1.7	59	443712
PPS	3.3	2.0	2.9	67	443712

Molndjupsdata från geostationär satellit

Från geostationära satelliter (MSG i detta fall) genereras COT-data för solhöjder högre än 16 grader ($\text{sza} > 84$) och data från CLAAS-2 sträcker sig ända upp till 81.3 N så i teorin kan hela Sverige täckas in under dagtid. Som visades i figur 1 så leder dock den branta betraktningvinkeln till att pixel-storleken för MSG ökar

avsevärt mot nordligare breddgraden. COT-data från MSG fanns tillgängliga i ca 75 % av fallen då solen stod över horisonten.

Resultatet från strålningsmodelleringen med COT från MSG presenteras i tabell 4 tillsammans med statistiken för modelleringen med COT från PPS, samt strålningsdata från STRÅNG samt SARAH-databasen (som sträcker sig till 65 N).

Tabell 4: Felstatistik i termer av bias (modellerat minus uppmätt värde) och standardavvikelse för strålningsberäkningar med dagens STRÅNG-modell samt modellerad globalstrålning baserad på COT från PPS och MSG. I kolumnen längst till höger finns motsvarande data för globalstrålningsdata från SARAH 2.1. Stationerna är ordnade i latitud-ordning med den nordligaste först. Färgkodning av resultat för PPS och MSG; Röd: Sämre än STRÅNG. Gul: Sämre än SARAH, men bättre än STRÅNG. Grön: Bättre än STRÅNG, bättre eller lika med SARAH.

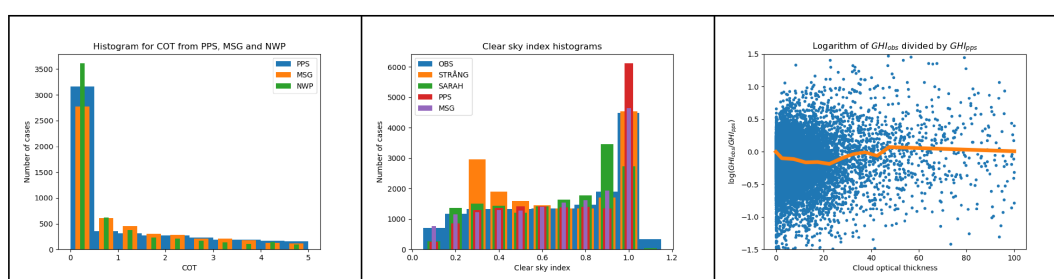
	STRÅNG		PPS		MSG		SARAH	
	bias	std	bias	std	bias	std	bias	std
Kiruna	-32	106	20	98	4.1	110	-	-
Luleå	8.8	94	1.1	68	8.6	81	-	-
Umeå	-3.2	98	19	88	33	92	8.9	75
Storlien	-64	130	4.2	140	-52	140	-40	140
Östersund	4.2	110	-0.76	98	1.6	83	-6.8	83
Borlänge	9.4	120	-12	97	-8.4	100	-5.6	83
Svenska Högarna	-44	120	-8.2	73	3.5	55	-15	55
Karlstad	11	110	-1.8	81	8.2	79	0.85	76
Stockholm	4.1	100	1.6	84	-4.5	83	-2.6	79
Nordkoster	-19	110	-3.6	70	-1.8	62	-21	61
Norrköping	-0.15	110	-1.7	82	-11	80	-8.8	80
Göteborg	4.6	115	3.0	86	1.6	76	-7.8	72
Visby	1.1	87	7.2	71	-1.4	68	-8.7	71
Växjö	54	130	5.6	87	5.8	74	5.0	73
Hoburg	36	110	10	83	7.7	72	16	74
Lund	-32	120	4.2	74	7.8	64	-14	62

För de allra nordligaste stationerna (Storlien och norrut med undantag för Umeå) resulterar COT data från MSG i sämre strålningsvärden än dagens STRÅNG. För övriga stationer presterar MSG-data i paritet med SARAH men oftast aningen sämre.

Det genomsnittliga RMS-felet för MSG (där data även finns från PPS och SARAH) ligger på ca 85 Wh/m² vilket är i samma härad som för SARAH (ca 80 Wh/m²) och ca 25 % lägre än dagens STRÅNG-modell.

Molndjupsdata från polära satelliter

Gränsen för när COT-data genereras från de polära satelliterna är något snävare än för de geostationära. Här är gränsen istället satt vid en solhöjd på 30 grader (16 för MSG). En fördel med data från polära satelliter är att betraktningssvinkeln inte beror på latituden. Den varierar dock med avståndet från satellitens nadir-punkt. Nackdelen är att det bara finns täckning för de områden som satelliten passerar för en given tidpunkt. COT-data från PPS fanns tillgängliga i ca 40 % av fallen då solen stod över horisonten.



Figur 5: Vänster: Histogram för COT från MSG, PPS samt NWP. Mitten: Klarvädres-index från olika modeller. Höger: Funktion för kompensering av systematiskt fel i COT från PPS. Den orangea linjen avser medelvärde för y-värdena inom ett intervall på 5 COT-enheter.

När COT från PPS användes för att modellera strålning visade det sig att det resulterade i att strålningen överskattades. En anledning till detta är att molndetekteringen i PPS-algoritmen är mer restriktiv än den för MSG. Detta leder till fler förekomster av låga COT-värden från PPS-algoritmen, se den vänstra bilden i figur 5. Samma effekt syns om man tittar på klarvädres-index (strålningen dividerad med den för klart väder), se mitten-bilden i figur 5 där det blir tydligt att andelen klara tillfällen är större i PPS-data.

Dessutom ser det ut som att överskattningen (i termer av ett multiplikativt fel) beror på COT-värdet i sig (högra bilden i figur 5). För att i någon mån kompensera för detta anpassades en korrektion som funktion av uppmätt COT från PPS. Korrektionen ges av den orangea linjen i figur 5. Denna korrektion har applicerats på samtliga PPS-baserade strålningsmodelleringar i rapporten utom för de PPS-data som användes för jämförelsen med data från det neurala nätverket.

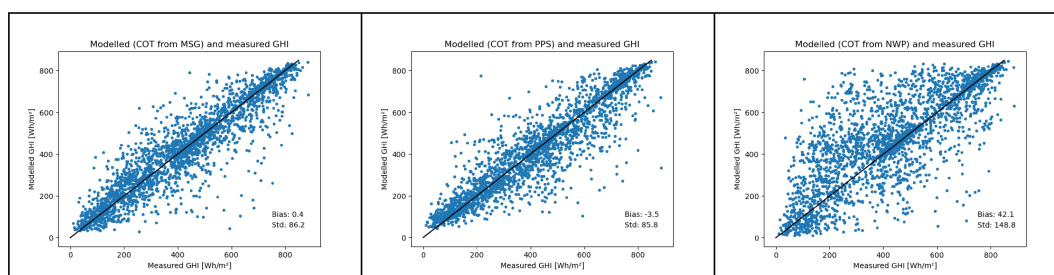
Resultatet från den korrigerade strålningsmodelleringen med COT från PPS presenteras återfinns i tabell 4. COT-data från PPS resulterar för det mesta i en bättre modellerad globalstrålning än den från STRÅNG, men den blir sällan lika bra som om den baseras på COT från MSG eller som strålningen från SARAH.

För PPS blir det genomsnittliga RMS-felet (igen för de tillfällen då data finns från såväl MSG, PPS som SARAH) ligger på ca 90 Wh/m² vilket är något sämre än för

SARAH (ca 80 Wh/m²) men fortfarande ca 25 % lägre än dagens STRÅNG-modell.

Molndjupsdata från numerisk väderprognosmodell

När solen står lågt eller det saknas COT-data från satellit av annan anledning tänkte vi beräkna COT från den operationella väderprognosmodellen MEPS baserat på vertikala profiler med koncentrationer av molnvatten och molnis. Beräkningarna gjordes för 6-timmarsprognoser avseende timmarna 6, 12 och 18 UTC, detta för att kunna få en uppfattning om hur COT från NWP presterar mitt på dagen respektive morgon och kväll.



Figur 6: Spridnings-plottar för globalstrålning modellerad baserat på COT från MSG (vänster), PPS (mitten) och NWP (höger).

Kvalitén på dessa data undersöktes på samma sätt som för COT-data från satellit, dvs de användes för att modellera strålningen och jämfördes med uppmätt strålning. Resultatet blev dock sämre än förväntat. I figur 6 visas spridnings-plottar med observerade värden längs x-axeln och modellerade värden längs y-axeln. I den vänstra figuren för globalstrålning baserad på COT från MSG och i mittenfiguren baserad på COT från PPS. Spridningen ökar markant när strålningen istället baseras på COT från NWP (högra figuren).

Arbetet med ta fram COT från NWP gjordes sent i projektet och vi har inte haft möjlighet att undersöka varför det resulterade i så stor spridning.

Kombination av COT från olika datakällor

Efter att molndjupsdata från MSG och PPS interpolerats till STRÅNG-rutnätet så finns en uppsättning vikter och skattade molndjups-värden från MSG och PPS. För att få yttäckande information kring molnens optiska tjocklek så kombinerades COT-data från MSG och PPS genom en linjär viktning i enlighet med vikten för respektive datakälla.

Tanken var att använda NWP-data för att fylla ut de områden som saknade data men eftersom dessa data inte hade bra kvalitet så nöjde vi oss med att jämföra uppmätt strålning med de tillfällen då det fanns data från antingen MSG, PPS eller båda. När data kombineras täcker de in ca 80 % av fallen då solen står över horisonten.

Resultatet redovisas i tabell 5. Notera att i denna tabell så täcker jämförelsen in tillfällen då solens zenitvinkel är lägre än 84 grader, vilket är gränsen för när det

finns data från MSG. Detta gör att data för STRÅNG och SARAH skiljer sig en del mot det som presenterades i tabell 4. Där var gränsen för solens zenitvinkel satt till 70 grader, då det är gränsen för när det finns data från PPS.

Tabell 5: Felstatistik i termer av bias (modellerat minus uppmätt värde) och standardavvikelse för strålningsberäkningar med dagens STRÅNG-modell samt modellerad globalstrålning baserad på en linjärt viktad COT från PPS och MSG. I kolumnen längst till höger finns motsvarande data för globalstrålningsdata från SARAH 2.1. Stationerna är ordnade i latitud-ordning med den nordligaste först. Färgkodning av resultat för MSG+PPS; Röd: Sämre än STRÅNG. Gul: Sämre än SARAH, men bättre än STRÅNG. Grön: Bättre än STRÅNG, bättre eller lika med SARAH.

	STRÅNG		MSG+PPS		SARAH	
	bias	std	bias	std	bias	std
Kiruna	-22	92	5.8	79	-	-
Luleå	11	79	6.6	59	-	-
Umeå	-0.47	88	23	72	1.9	71
Storlien	-49	110	-31	110	-37	120
Östersund	3.6	100	2.1	74	-11	77
Borlänge	9.7	101	-7.4	79	-7.8	73
Svenska Högarna	-34	105	1.2	51	-17	53
Karlstad	14	100	7.1	66	-1.9	69
Stockholm	8.4	91	0.91	66	-3.8	72
Nordkoster	-12	95	0.78	56	-20	60
Norrköping	4.0	97	-2.1	68	-8.4	75
Göteborg	8.2	103	5.5	67	-8.3	67
Visby	2.0	79	4.1	57	-10	65
Växjö	44	120	8.5	69	1.6	68
Hoburg	-25	110	6.3	58	-16	60
Lund	36	101	8.8	65	11	69

När COT-data från MSG och PPS kombineras resulterar för det mesta i en lika bra eller bättre modellerad globalstrålning än den från SARAH. Det genomsnittliga RMS-felet för kombinationen (igen för de tillfällen då data finns från såväl MSG+PPS som SARAH) ligger på ca 70 Wh/m² vilket är något bättre än för SARAH (ca 75 Wh/m²) och ca 30 % lägre än dagens STRÅNG-modell. I fallet med kombinationen gjordes ingen korrektion av det systematiska felet i beräknad solstrålning baserad på COT från PPS. Anledningen var att justeringen

gjordes på den beräknade strålningen. När COT först kombineras och sedan används i modellen går det inte längre att göra samma PPS-specifika korrektion.

För den direkta strålningen är resultaten inte lika bra. Här valde vi att endast jämföra med uppmätt strålning vid stationen i Norrköping då de två andra (Kiruna och Visby) representerar mer extrema platser (lite respektive mycket direktstrålning). Resultatet från jämförelsen mellan uppmätta timvärden för direktstrålningen (vinkelrätt infall) i Norrköping och modellerad strålning baserad på COT från MSG+PPS respektive data från SARAH återfinns i tabell 6. Jämförelsen är begränsad till de tillfällen då solens zenitvinkel är lägre än 84 grader för att det ska finnas möjlighet för MSG-algoritmen att producera COT.

Tabell 6: Felstatistik i termer av bias och standardavvikelser för modellerad direktstrålning i Norrköping (vinkelrätt infall) baserad på COT från MSG+PPS samt data från SARAH för perioden april-september 2017. Enheten är Wh/m².

	Medelvärde modell-obs	Standardavvikelse
STRÅNG	81	180
MSG+PPS	95	160
SARAH	-35	150

Direktstrålningen är mer känslig för moln än globalsolstrålningen. Tittar man på direktstrålningen baserad på COT från MSG och PPS var för sig (för zenitvinklar lägre än 70 grader då COT finns från PPS) så blir medelvärdet 73 respektive 160 Wh/m². Standardavvikelsena landar på 170 respektive 190 Wh/m². Den systematiska överskattningen för PPS är alltså det som ligger bakom det höga medelvärdet för differensen mellan modell och observation i tabell 6. Trots detta leder den nya metodiken till minskning av RMS-felet för direktstrålningen med drygt 5 %.

Diskussion

Resultaten från jämförelserna mellan uppmätt och modellerad strålning visar att den nya metodiken, där molnens inverkan på solstrålningen beskrivs med information om molnens optiska tjocklek, leder till en minskning av RMS-felet med ca 30 % för globalsolstrålningen och ca 5 % för direktstrålningen.

Teoretiskt sett är detta förväntat då optisk tjocklek är en fysikalisk storhet som beskriver hur strålningen påverkas av molnens egenskaper. Molnmängd är ingen direkt fysikalisk storhet utan definieras som den andel av himmelssfären som är täckt av moln. Att två situationer har samma molnmängd betyder inte heller att strålningen kommer att påverkas på samma sätt. I ena fallet kan det handla om tunna höga moln medan det i andra fallet rör sig om tjocka åskmoln.

Resultaten är lovande, och vi rekommenderar att metodiken driftsätts i den operationella STRÅNG modellen, efter det att de problem som identifierats åtgärdas:

- Skattningen av COT från PPS har för många fall där COT är mycket lågt.
- Direktstrålningen överskattas mer än i STRÅNG med den nya metodiken.
- Strålningsmodellering baserad på COT från NWP har låg kvalitet.

Tabell 7: Sammanblandningsmatrisier för molntyp (vänster, wtr: vattenmoln, ice: ismoln) och molnmängd (höger, clr: klart, cld: molntäckt).

	MSG wtr	MSG ice			MSG clr	MSG cld
PPS wtr	48 %	10 %		PPS clr	29 %	48 %
PPS ice	11 %	31 %		PPP cld	2 %	21 %

Orsakerna till det första problemet har belysts i figur 5. Att det faktiskt rör sig om att andelen klara tillfällen överskattas stöds också av siffrorna i tabell 7. I den vänstra tabellen visas hur MSG och PPS skattar huruvida molnen huvudsakligen består av vatten eller is. Inget tyder på att det skulle vara någon skillnad mellan MSG och PPS i det avseendet. Tittar man istället på den högra tabellen ser man dock att PPS ofta pekar ut ett tillfälle som klart medan MSG säger att det är mulet.

Till viss del gäller den systematiska underskattningen av COT (och förekomsten av moln) även för värden som är något större än noll. I dessa lägen kan skattningen korrigeras. För de fall då COT från MSG verkligen är noll fungerar inte en sådan ansats. Vi kan inte skapa moln på måfå utan någon ytterligare information. En väg framåt är att modifiera moln-detekteringen i PPS-algoritmen så att den blir mer känslig för moln. Eventuellt skulle en sådan modifierad version kunna köras specifikt för att skapa indata till STRÅNG.

Vid beräkningarna med libRadtran går direktstrålningen ned till noll vid en optisk tjocklek runt 10 och en solhöjd på ca 60 grader. Detta stämmer dock dåligt med empiriska samband mellan global- och direktstrålningen (t.ex. Skartveit et al., 1998). Vidare är det känt (t.ex. Mueller et al., 2009) att det finns ett samband mellan molnens optiska tjocklek och molnmängden. Data pekar på att antagandet om att det skulle vara helmulet även för låga värden på molnens optiska tjocklek inte stämmer. Istället måste det ofta röra sig om ett brutet molntäcke då satellitprodukten för den optiska tjockleken resulterar i låga värden.

Mueller et al. (2009) föreslår att hänsyn ska tas till detta genom att låta molnmängden bero på den optiska tjockleken enligt en linjär funktion. Denna ansats provades i pilotprojektet men ledde inte till lika bra resultat som den metod som används i STRÅNG. Inte heller en funktion baserad på molnmängden lyckades nå dit. Istället visade det sig att en anpassning av dagens metod resulterade i något bättre prestanda. Metoden bygger på att direktstrålningen för klart väder anpassas till effekten av molnmängd och optisk tjocklek baserat på en

empirisk relation mellan global- och direktstrålning (Skartveit et al., 1998). Vid klart väder resulterar detta i att direktstrålningen från libRadtran används som den är för att sedan gradvis övergå till att vara en empirisk funktion av den modellerade globalstrålningen.

Det tredje problemet, att kvalitén på COT från NWP verkar bli låg, har vi i nuläget ingen bra förklaring till. Vi har inte hunnit studera det i detalj och det skulle kunna vara så att det är något fel i beräkningarna som ligger bakom. Ett alternativ vore att inte beräkna COT från NWP utan att istället ersätta beräknad global- och direktstrålning med motsvarande värden från MEPS. Problemet med en sådan ansats är att STRÅNG även beräknar fotosyntetiskt aktiv strålning samt UV-strålning. Dessa beräknas inte i MEPS och går därför inte att ersätta rakt av.

I samband med workshopen ”Solstrålningsdata i Norden – dåtid, nutid, framtid”, som SMHI arrangerade tillsammans med Uppsala Universitet vid Solelmässan 2019, framfördes ett tydligt önskemål från användarna; tillgång till en rekommenderad och lättillgänglig solstrålningsdatabas som täcker hela Sverige med bra kvalitet. Givet att de kvarvarande problemen åtgärdas och metodiken sätts i drift skulle denna nya version av STRÅNG kunna användas för att ta fram en sådan databas. Den skulle kunna fungera som en bransch-standard, till exempel för beställare och leverantörer av solcellsanläggningar.

För att ytterligare etablera en sådan STRÅNG-databas som en standard skulle den kunna erbjudas som ett valbart alternativ för Norden i den webbaserade stödtjänsten PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). Projektet har varit i kontakt med utvecklarna av PVGIS vid det europeiska Joint Research Centre som är positiva till en sådan möjlighet givet att data är av god kvalitet. Först behöver dock resurser fås fram för att köra om STRÅNG med den nya metodiken för data tillbaks till 2004 då COT från både MSG och PPS finns tillgängligt via CLAAS-2 och CLARA-A2 från CM-SAF.

Publikationslista

I den ettåriga planen för projektet fanns inte några mål kring publicering med. Vi avser dock att publicera resultaten i något internationellt sammanhang så snart metodiken är driftsatt i form av en ny version av STRÅNG.

Referenser, källor

Brunge, Kristin, Jonas Alterbeck Erik Böhlmark Emilia Helander Erik Hellström Anders Nilsberth Mira Rosengren Keijser: LÅNGSIKTIG MARKNADSANALYS 2018 - Långsiktsscenarier för elsystemets utveckling fram till år 2040. ÄRENDENR: SVK 2018/2260 DATUM: 2019-01-31.

Emde, C., Robert Buras-Schnell, Arve Kylling, Bernhard Mayer, Josef Gasteiger, Ulrich Hamann, Jonas Kylling, Bettina Richter, Christian Pause, Timothy Dowling, and Luca Bugliaro (2016), The libRadtran software package for

radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geosci. Model Dev.*, 9, 1647-1672, 2016. DOI:10.5194/gmd-9-1647-2016.

Falemo, E. Moderna tillståndprocesser för elnät, SOU 2019:30. Betänkande av Nätkoncessionsutredningen Stockholm 2019.

Finkensieper, Stephan; Meirink, Jan-Fokke; van Zadelhoff, Gerd-Jan; Hanschmann, Timo; Benas, Nikolaos; Stengel, Martin; Fuchs, Petra; Hollmann, Rainer; Werscheck, Martin (2016): CLAAS-2: CM SAF CLOUD property dAtAset using SEVIRI - Edition 2, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V002, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/CLAAS/V002.

Gueymard, C., Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine, version 2 (SMARTS2): Algorithms description and performance assessment. Report FSEC-PF-270-95, Florida Solar Energy Center (1995); <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-PF-270-95.pdf>

Håkansson, N., Adok, C., Thoss, A., Scheirer, R., and Hörnquist, S.: Neural network cloud top pressure and height for MODIS, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 3

Karlsson, K.-G., Anttila, K., Trentmann, J., Stengel, M., Fokke Meirink, J., Devasthale, A., Hanschmann, T., Kothe, S., Jämskeläinen, E., Sedlar, J., Benas, N., van Zadelhoff, G.-J., Schlundt, C., Stein, D., Finkensieper, S., Håkansson, N., and Hollmann, R.: CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 5809–5828, <https://doi.org/10.5194/acp-17-5809-2017>, 2017.

Landelius, T., Josefsson, W. och Persson, T. 2001. Operational mesoscale radiation modelling, in *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 66-69.

Mueller, R.W., C. Matsoukas, A. Gratzki, H.D. Behr, R. Hollmann, The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance — A LUT based eigenvector hybrid approach, *Remote Sensing of Environment*, Volume 113, Issue 5, 2009, Pages 1012-1024, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.012>.

Pfelfroth, Uwe; Kothe, Steffen; Trentmann, Jörg; Hollmann, Rainer; Fuchs, Petra; Kaiser, Johannes; Werscheck, Martin (2019): Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 2.1, Satellite Application Facility on Climate Monitoring, DOI:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01, https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V002_01.

Skartveit, Arvid & Olseth, Jan & Elisabet Tuft, Marit. (1998). An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. *Solar Energy*. 63. 173-183. 10.1016/S0038-092X(98)00067-X.

Stridh, B., Campana, P., Landelius, T., Andersson, S., Holm, E., Lind, M.
Elproduktionsutvärdering från solcellsanläggningar Energiforskrappport 2017-387.

Winker, D. (2016). CALIPSO LID L2 1km Standard HDF File - Version 4.10
[Data set]. NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center
DAAC. [https://doi.org/10.5067/CALIOP/CALIPSO/LID_L2_05kmCLay-
Standard-V4-20](https://doi.org/10.5067/CALIOP/CALIPSO/LID_L2_05kmCLay-Standard-V4-20)

Bilagor

Administrativ bilaga.