

2018:00187 - Åpen

# Rapport

## Strålings-input fra geostasjonær satellitt

Rapport fra H1 og H3 i prosjektet Strålingsdata i tilsigsmodeller for kraftverksdrift

### Forfatter(e)

Sjur Anders Kolberg

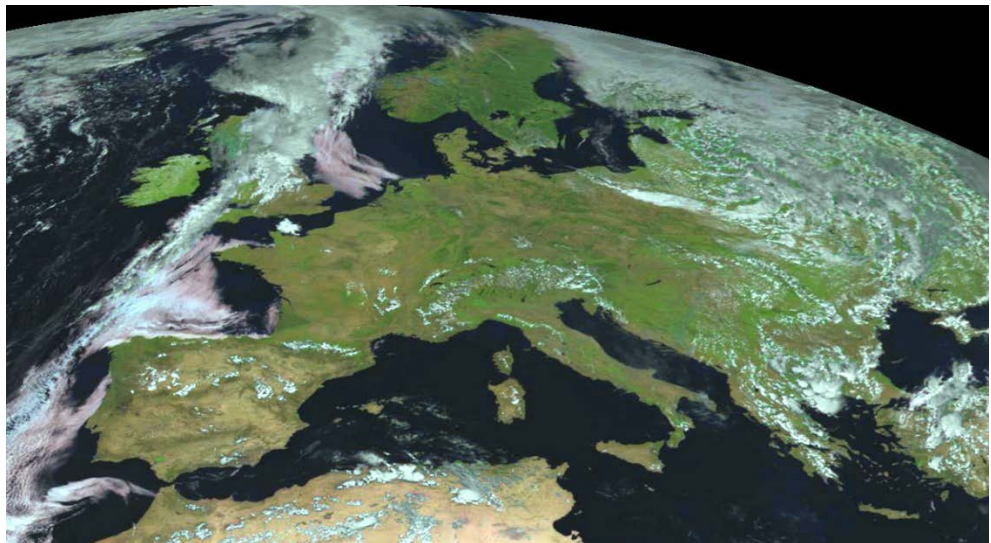


Foto: ESA



SINTEF Energi AS

Postadresse:  
Postboks 4761 Sluppen  
7465 TrondheimSentralbord: 73597200  
Telefaks: 73597250energy.research@sintef.no  
www.sintef.no/energi  
Foretaksregister:  
NO 939 350 675 MVA

# Rapport

## Strålings-input fra geostasjonær satellitt

Rapport fra H1 og H3 i prosjektet Strålingsdata i tilsigsmodeller for kraftverksdrift

EMNEORD:  
Tilsigsmodeller  
Stråling  
Snøsmelting  
Hydrologi  
Satellittdata**VERSJON**

1.0

**DATO**

2018-01-31

**FORFATTER(E)**

Sjur Anders Kolberg

**OPPDRAKSGIVER(E)**

Energi Norge

**OPPDRAKSGIVERS REF.**

Oppdragsgivers referanse

**PROSJEKTNR**

502001310

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

20 + vedlegg

**SAMMENDRAG****Overskrift sammendrag**

Rapporten evaluerer MDSSF-datasettet for globalstråling, produsert fra SEVIRI-sensoren i geostasjonær bane, med formål å ta det i bruk som inngangsdata i kraftbransjens tilsigsmodeller. Sammenligninger med bakkeobservasjoner fra mer enn 40 LMT-stasjoner i Sør-Norge har vist at det egner for dette formålet. De teknisk-operasjonelle fordelene er umiddelbare; dataene kommer med god tidsoppløsning og langt bedre romlig detaljeringsgrad enn det en kan oppnå med bakkemålinger.

Gjennomsnittlig stråling i stasjonsposisjonene er 98.1 W/m<sup>2</sup> for LMT-målerne og 96.7 W/m<sup>2</sup> for MDSSF. Lokale årsmiddelverdier har et samsvar i romlig variasjon på 71%. Det er generelt godt samsvar mellom de to datasettene hva angår døgn- og årssyklus. Korrelasjonen mellom timesobservasjoner fra LMT og MDSSF varierer mellom stasjonene, med en gjennomsnittsverdi på 0.94 (89% forklart varians) for globalstråling; 0.67 (45% forklart varians) for en klarværsindeks som er upåvirket av felles døgn- og årssyklus. Korrelasjonen er svakest om vinteren, da strålingsverdiene er små.

**UTARBEIDET AV**

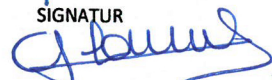
Sjur Kolberg

SIGNATUR

**KONTROLLERT AV**

Julie Charmasson

SIGNATUR

**GODKJENT AV**

Knut Samdal

SIGNATUR

**RAPPORTNR**  
2018:00187**ISBN**  
978-82-14-06676-0**GRADERING**  
Åpen**GRADERING DENNE SIDE**  
Åpen



**SINTEF Energi AS**

Postadresse:  
Postboks 4761 Sluppen  
7465 Trondheim

Sentralbord: 73597200  
Telefaks: 73597250

[energy.research@sintef.no](mailto:energy.research@sintef.no)

[www.sintef.no/energi](http://www.sintef.no/energi)

Foretaksregister:

NO 939 350 675 MVA



# Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1	2018-01-31	Originalversjon

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Punkt-evaluering av satellittbaserte globalstråling-verdier</b> .....	<b>5</b>
2.1	Prosjektplanens spesifisering av delprosjekt H1: Samanhengen skydekke – kortbølgsstråling; punkt-evaluering.....	5
2.2	Bakgrunn til delprosjekt H1 .....	5
2.3	Beskrivelse av MDSSF-informasjonsproduktet .....	6
2.3.1	Klarværsalgoritme .....	7
2.3.2	Skydekningsalgoritme.....	7
2.4	Datainnhenting og bearbeiding: .....	7
2.4.1	Fjernmålte strålingsdata.....	7
2.4.2	Referansedata.....	9
2.4.3	Solposisjon og klarværsindeks.....	9
2.5	Resultater.....	10
2.5.1	Hovedmomenter og statistikk for de to datasettene.....	10
2.5.2	Døgn- og årsprofiler.....	12
2.5.3	Sesongvariasjon i samsvar mellom MDSSF og LMT.....	13
<b>3</b>	<b>Evaluering av romlig variasjon og nødvendig måletetthet</b> .....	<b>14</b>
3.1	Prosjektplanens spesifisering av delprosjekt H3.....	14
3.2	Bakgrunn til delprosjekt H3 .....	14
3.3	Resultater.....	15
3.3.1	Årsmiddelstråling i MDSSF og interpolerte LMT-data – romlig variasjon .....	15
3.3.2	Døgnverdier i MDSSF og interpolerte LMT-data – temporær variasjon .....	16
3.3.3	Korrelasjon mellom MDSSF og interpolerte LMT-målinger, døgndata .....	17
3.3.4	Autokorrelasjonsfunksjon, LMT-timesverdier .....	18
3.3.5	Autokorrelasjonsfunksjon, MDSSF-timesverdier.....	19
<b>4</b>	<b>Konklusjoner og anbefalinger</b> .....	<b>20</b>

## 1 Innledning

Det følgende er en teknisk rapport fra prosjektet *Strålingsdata i tilsigsmodeller for kraftverksdrift*, som SINTEF Energi utfører for Energi Norge i tidsrommet 2016-2018. Prosjektet har gått i to år. Utførende institusjoner i prosjektet er SINTEF Energi, Meteorologisk Institutt og NTNU, i tillegg leies Enki Hydrologi AS inn som underleverandør til Sintef i 2018. Prosjektet er et IPN med støtte fra forskningsrådets ENERGIX-program og fra kraftprodusentene Norsk Hydro, E-CO, Lyse, TrønderEnergi og GLB, som sammen med Energi Norge utgjør styringsgruppen i prosjektet. Denne rapporten konkluderer arbeidspakkene H1 og H3.

## 2 Punkt-evaluering av satellittbaserte globalstråling-verdier

Dette kapitlet dekker delprosjekt H1 med milepæler M1, M3 og M4.

### 2.1 Prosjektplanens spesifisering av delprosjekt H1: Samanhengen skydekke – kortbølga stråling; punkt-evaluering

Ved hjelp av satellittbilder estimerast skydekkekart for eit antal situasjonar, samt for en sammenhengende smelte- og sommersesong (april-oktober). Frå desse interpoleres verdier på timebasis, som samanliknast med målte seriar for kortbølga stråling, både historiske og innsamla i dette prosjektet. Eksisterande modeller for samanhengen mellom skydekke og kortbølga stråling evaluerast for norske forhold.

**Leveranse: Evaluering av eksisterande metodar for rekning av innkomande kortbølga stråling og tilrådd metodikk for fordelte og ikkje fordelte modellar. Milepæler knyttet til H1 er:**

- M1: Tilgjengelige satellittbilder evaluert og utval av sesong og situasjoner gjort (H1-Q4)
- M3: Skykart klassifisert frå satellittbildene, og tids-interpolering ferdigstilt (H1-Q5))
- M4: Samanheng mellom skydekke og kortbølga stråling analysert og rapportert (H1-Q6)

### 2.2 Bakgrunn til delprosjekt H1

Prosjektet har valgt å fokusere innsatsen rundt bildeserier fra SEVIRI-sensoren som sitter i den geostasjonære MSG-satellitten, Datasettet for innkommende kortbølget stråling (globalstråling) er et standardprodukt fra EUMETSAT med betegnelse MDSSF (MSG Downward Surface Shortwave Flux) og produktkode LSA\_201. Det er beskrevet på <https://landsaf.ipma.pt/en/products/longwave-shortwave-radiation/>. Denne dataserien var ikke en del av planen da prosjektet ble initiert, men ble kjent for prosjektleder under EGU-konferansen i Wien i april 2017. Fram til da var planen å arbeide med data fra MODIS-sensoren som sitter i Terra- og Aqua-satellittene. Disse går i polar bane og passerer noen få ganger om dagen med ujevne mellomrom.

MDSSF har store fordeler framfor interpolering av bakkemålinger, primært mht bedre romlig detaljering og mindre avhengighet av lokal terrengskygge rundt hver enkelt bakkestasjon. Sammenlignet med satellitter i polar bane har geostasjonære satellitter en stor fordel i jevn og god tidsoppløsning (her 30 min) og fast geometri. Til gjengjeld er den romlige oppløsningen grovere. Basert på slike vurderinger gikk prosjektets styringskomiteemøte i juni 2017 inn for å bruke dette datasettet som primær informasjonskilde på bekostning av MODIS-sensoren. Som en følge av dette er arbeidet i M1 og M3 forenklet, og det har kunnet brukes mer tid på analysen i M4.

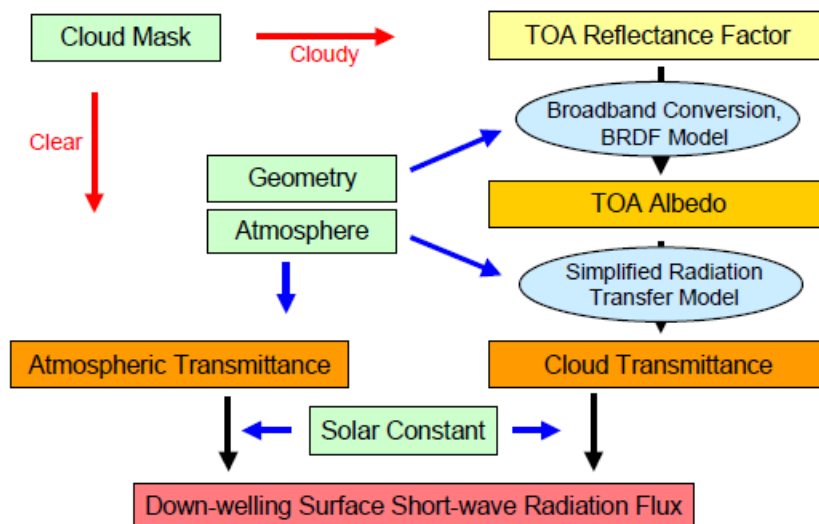
### 2.3 Beskrivelse av MDSSF-informasjonsproduktet

Instrumentet som ligger til grunn for MDSSF-dataene er SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). Satellitten det er montert i er EUMETSATs Meteosat Second Generation (MSG). Denne satellitten går i geostasjonær bane, lokalisert over ekvator omtrent på Greenwich-meridianen. Diktert av omløpstiden på ett døgn har satellitten en høyde på 36 000 km. Sensoren ser hele Europa, Afrika, Sør-Amerika og Midt-Østen til Iran. En beskrivelse av satellitten og det primære instrumentet SEVIRI finnes på <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Meteosat/MeteosatDesign/index.html>

Satellitten ser alltid det samme området, og SEVIRI fullfører et scan hvert kvarter. Strålings-datasettet produseres hver halvtime. Det er basert på tre kanaler som har en nadir-pikselstørrelse på ca 3 km, økende til rundt 4\*11 km for de nordligste breddegradene. Dataene er fritt tilgjengelige fra ett av EUMETSATs sentre for tilgjengeliggjøring av data; Land Surface Analysis Satellite Applications Facility i Portugal (<https://landsaf.ipma.pt/>). Der er gode nedlastingsfasiliteter for lange tidsserier, men datamengdene er svært store, så både bestilling og leveranse tar tid. Det er ikke undersøkt hvor fort data kan leveres operativt, eller om dette gjøres best fra LandSAF eller fra MET, som er det norske kontaktpunktet.

SEVIRI måler reflektans i 12 ulike spektralbånd. MDSSF er et operasjonelt informasjonsprodukt, beskrevet i Trigo et al. (2010). De spektralbåndene som inngår er to synlige bånd ved 0.6 og 0.8 mikrometer, samt et nær-infrarødt bånd ved 1.6 mikrometer. Atmosfærebeskrivelse fra ECMWF brukes som støtteinformasjon. Nøyaktigheten i produktet er oppgitt å være 10%, men 20W/m<sup>2</sup> for verdier under 200 W/m<sup>2</sup>. Det er skyegenskapene som måles, ikke globalstrålingen direkte. Strålingen simuleres med modeller for atmosfære-transmissivitet, og det er ulike modeller for skyet og klar situasjon

Algoritmen som brukes er basert på Brisson et al (1999), og skjematisk framstilt i figur 1. Hvert piksel klassifiseres som klart eller skyet, og videre estimering av klarværsindeks (ekvivalent med hhv atmosfærisk transmissivitet eller skytransmissivitet) følger ulike prosedyrer i disse to klassene.



Figur 1: Forenklet flytdiagram for MDSSF-algoritmen (fra Geiger et al., 2012).



### 2.3.1 Klarværsalgoritme

Beregningen av effektiv atmosfærisk transmissivitet  $T$ , som inkluderer effekten av gjentatt refleksjon, tar utgangspunkt i nominell atmosfærisk transmissivitet  $T_a$ . For piksler uten skydekke beregnes effektiv atmosfærisk transmissivitet  $T$  fra (Geiger et al., 2012, eq. 5):

$$T = T_a + \sum_{n=1}^{\infty} T_a (A_s A_a)^n = \frac{T_a}{1 - A_s A_a}$$

Her er  $T_a$  nominell atmosfærisk transmissivitet,  $A_s$  og  $A_a$  albedo for hhv jordoverflaten og atmosfæren (sett nedenfra), mens  $n$  symboliserer gjentatt refleksjon mellom bakke og skylag. Fordi  $A_s$  og  $A_a$  er mindre enn 1 konvergerer rekka, og gir det siste leddet. Estimering av nominell atmosfærisk transmissivitet  $T_a$  følger Frouin (1989) og baseres på informasjon fra ECMWF samt TOMS klimatologi. Strålingsestimaterne i klarvær avhenger av satellittdata bare gjennom overflatealbedoen  $A_s$ , som beskrives av et annet LSA-SAF-produkt. Det vises til Geiger et al. (2012) og referansene heri for en mer detaljert redegjørelse for algoritmen og valgte verdier for de konstanter som inngår.

### 2.3.2 Skydekningsalgoritme

Når pikselet er skydekket beregnes klarværsindeks eller effektiv transmissivitet fra en forenklet modell for strålingstransport i sky-atmosfære-bakke-systemet beskrevet av Gautier et al., (1980) og Brisson et al. (1999). Det antas at pikselet er dekket av et homogent skylag. Effektiv transmissivitet er nå gitt ved:

$$T = \frac{T_a T_c}{1 - A_s T_{bc} A_c}$$

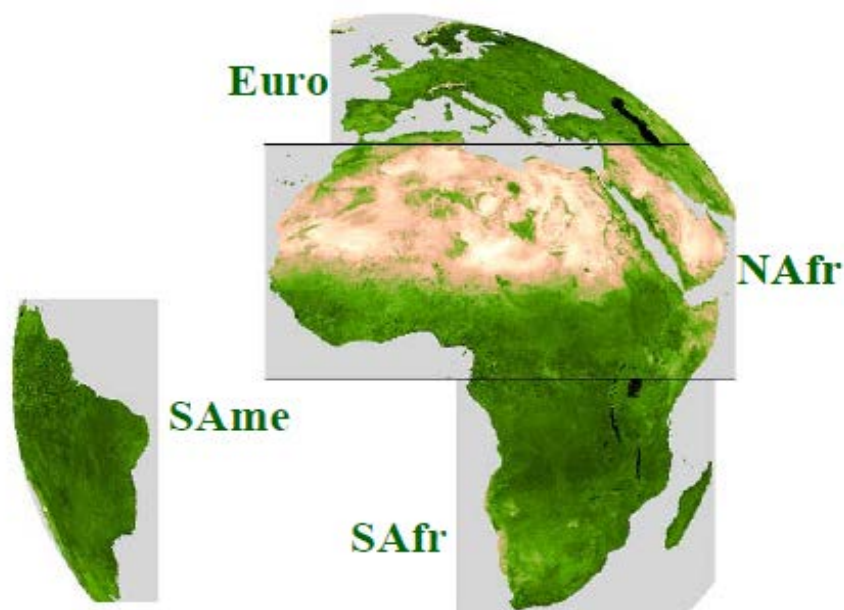
Sammenlignet med klarværligningen er nominell atmosfæretransmissivitet  $T_a$  nå multiplisert med en nominell skytransmissivitet  $T_c$ . Dette er den utslagsgivende størrelsen i ligningen, nevneren har nå mindre betydning.  $T_{bc}$  er nå nominell transmissivitet for den delen av atmosfæren som er mellom bakken og skylaget, mens  $A_c$  er skylagets albedo (sett nedenfra).

Den nominelle skytransmissiviteten  $T_c$  og skylagets albedo  $A_c$  er de størrelsene som estimeres basert på de målte reflektansene i satellittbildet.

## 2.4 Datainnhenting og bearbeiding:

### 2.4.1 Fjernmålte strålingsdata

Data ble lastet ned fra nettsiden <https://landsaf.ipma.pt/en/products/longwave-shortwave-radiation/>, som tilhører EUMETSATs *Satellite Application Facility on Land Surface Analysis* (LSA SAF) i Portugal. Produktet har en tidsoppløsning på 30 minutter, mens rådataene har 15 minutters oppløsning. Data fra 2009 og fram til høsten 2015 er tilgjengelige i flere regioner, hvorav Europa dekker de aktuelle områdene. Etter 2015 er bare komplett disk tilgjengelig, denne dekker fra Nordkapp til Cape Town, og fra Iran til Sør-Amerika (fig 1). Bestillingssystemet er greit å få oversikt over, men bestilling og nedlasting av lange tidsserier krever oppdeling i korte perioder og tar lang tid.



**Figur 2: Dekningsområde for SEVIRI-sensoren i MSG-satelliten; full jorddisk og delregioner (fra Geiger et al., 2012).**

Dataene skal først pakkes ut fra .tar-filer, deretter dekomprimeres fra .bz-format til HDF5-filer; en fil for hvert tidspunkt. I komprimert form er det 6GB årlig for Europa-utsnittet, 44 GB for full disk. Utpakket på HDF5-format fyller ett enkelt år med Europa-utsnitt 60 GB, fulldisk-data 700 GB. Import-skriptet ble derfor skrevet slik at HDF5-filene opprettes og slettes etter hvert som tidsserien prosesseres. Pikselstørrelsen i originalfilene er 3\*3 km ved Ekvator, ca 4\*9 km ved 60 grader Nord.

Importskriptet klipper ut et utsnitt som dekker Norge og størstedelen av Sverige; og reprojiserer til to ulike domener. Det ene av disse dekker NVEs SeNorge-grid i UTM-sone 33, det andre dekker en mindre region i Sør-Norge (UTM-sone 32) som skal brukes i simulering. For begge regioner aggregeres halvtimesobservasjonene til times- og døgndata. Timesdataene summeres fra halvtimesdata med 0.25 - 0.5 - 0.25 vektning, og bokføres under norsk standardtid på startpunktet i timesintervallet. Døgndata summeres dersom det finnes minst 20 bilder med fullgode data i løpet av døgnet. De resamplete datasettene er lagret i årlige NetCDF-filer for hver av de to regionene og hver av de to tidsoppløsningene. Til sammen utgjøre de fire filene i underkant av 500 MB pr år.

Hull i dataserien forekommer, men i begrenset omfang. Vanligvis er det hele HDF5-fila for det aktuelle tidspunktet som mangler, men det skjer også at deler av bildet har missing-kode. I piksler som er klassifisert som åpent vann beregnes det ikke verdier, og ikke alle pikslene har konsistent klassifisering gjennom perioden. Eksempelvis har pikselet som dekker LMT-stasjonen på Fureneset aldri noen verdi, mens tilsvarende piksler for Tingvoll- og Rygge-stasjonene har missing-koder i lange perioder. For de øvrige stasjonene mangler 0.4% av timesdataene, i all hovedsak de samme tidspunktene overalt.

Datakvaliteten oppgis til rundt 10% nøyaktighet når verdien er over 200 W/m<sup>2</sup>, ellers 20 W/m<sup>2</sup>.

## 2.4.2 Referansedata

Til å kontrollere de nedlastete MDSSF-dataene ble det brukt bakkemålt globalstråling fra Landbruks-meteorologisk Tjeneste (LMT) ved NIBIO. Nedlastete dataserier er timesgjennomsnitt fra knapt 50 stasjoner i Sør-Norge til og med Trøndelag; begrenset til de som hadde måleserier for hele den aktuelle perioden. Disse dataene er også åpent tilgjengelig, den versjonen som er brukt ble lastet ned fra <http://lmt.bioforsk.no/> 4 november 2017.

I løpet av prosjektet er det også samlet inn data fra strålingsmålere som prosjektdeltakerne har satt ut. På grunn av kort periode er disse ikke brukt i denne rapporten. Tilsvarende sammenligninger vil bli gjort for disse seriene mot slutten av prosjektet når seriene er noe lengre.

LMT-dataene er timesgjennomsnitt for målt globalstråling, målt med Kipp & Zonen CM3 eller CM11 pyranometre. Disse har nøyaktighet oppgitt bare for daglig gjennomsnittsverdi, på hhv 10% og 3%. Det er sannsynlig at den relative feilen er større for lave verdier og for kortere integreringstid.

## 2.4.3 Solposisjon og klarværsindeks

Til grunn for strålingsinformasjonen i MDSSF-datasettet ligger forholdet mellom teoretisk innkommende kortbølget stråling utenfor atmosfæren (top-of-atmosphere, TOA) og den strålingen som kan måles ved bakken, begge mot lokalt horisontal flate. Dette forholdet kalles klarværsindeks eller Clearness Index (CI). TOA-strålingen er gitt ved solarkonstanten multiplisert med sinus til solhøyden (vinkel over horisonten). Lokal solhøyde er en funksjon av tid på året, tid på døgnet, lengde- og breddegrad, og blir i dette prosjektet beregnet for hver enkelt stasjons posisjon basert på ligninger funnet i Iqbal (1983).

Disse ligningene finnes det flere varianter av, noen mer presise enn andre. Spesielt når en beregner klarværsindeks, som er et forhold der nevneren kan ligge nær 0 morgen og kveld, er det nødvendig å være presis mht det tidspunktet en beregner solhøyden for. Dette innbefatter en korrigering for at jordens bane rundt sola ikke er helt sirkulær, og at sola derfor ikke står rett i syd ved det samme klokkeslettet hver dag. Korrigeringen er kjent som 'equation of time' og forskyver tidspunktet med opp mot 15 minutter i begge retninger, varierende gjennom året. Av samme grunn må en sikre seg at det tidspunktet en beregner solhøyden for, er sentrert i det tidsintervallet strålingsmålingen angir gjennomsnittsverdien for. For timesdataene i denne undersøkelsen er solhøyden derfor beregnet for 30 minutter over hver time. Samvektingen av MDSSF-observasjoner er sentrert rundt de samme tidspunktene med vektning 0.25 - 0.5 - 0.25 på hel-halv-heltimesobservasjonene. Timesverdiene i LMT-dataseriene er aggregert fra et større antall øyeblikksmålinger, og fremkommer ved enkelt gjennomsnitt over timesintervallet.

Fra bakkemålinger beregner en altså klarværsindeksen CI fra teoretisk TOA-stråling og målt globalstråling. I fremstillingen av MDSSF-data har en gått fra TOA-stråling til globalstråling med en klarværsindeks estimert fra reflektansverdier i satellittbildet. Skydekningen er viktigste størrelse ekstrahert fra disse reflektansverdiene, men også optisk atmosfæredybde ved klarvær er hensyntatt. I denne analysen er fjernmålte verdier for klarværsindeks regenerert fra globalstrålingsverdiene i MDSSF på samme måte som for bakkemålinger.

Fordelen ved å normalisere til klarværsindeksen CI når en skal sammenligne to ulike datasett for stråling, er at kvalitetsmål da ikke blir kunstig optimistiske av at begge datasettene trivielt avspeiler de samme års- og døgnsyklusene. En ulempe er imidlertid at CI gjerne har store støyledd når solhøyden er lav, fordi det divideres på sinus til solhøyden. Denne støyen i CI-verdier opptrer imidlertid sammen med lav

strålingsintensitet, og har derfor liten betydning i energibalanse-sammenheng. I denne undersøkelsen er sammenligninger mellom bakke- og fjernmålingsdata gjort både for globalstråling og for CI.

## 2.5 Resultater

### 2.5.1 Hovedmomenter og statistikk for de to datasettene

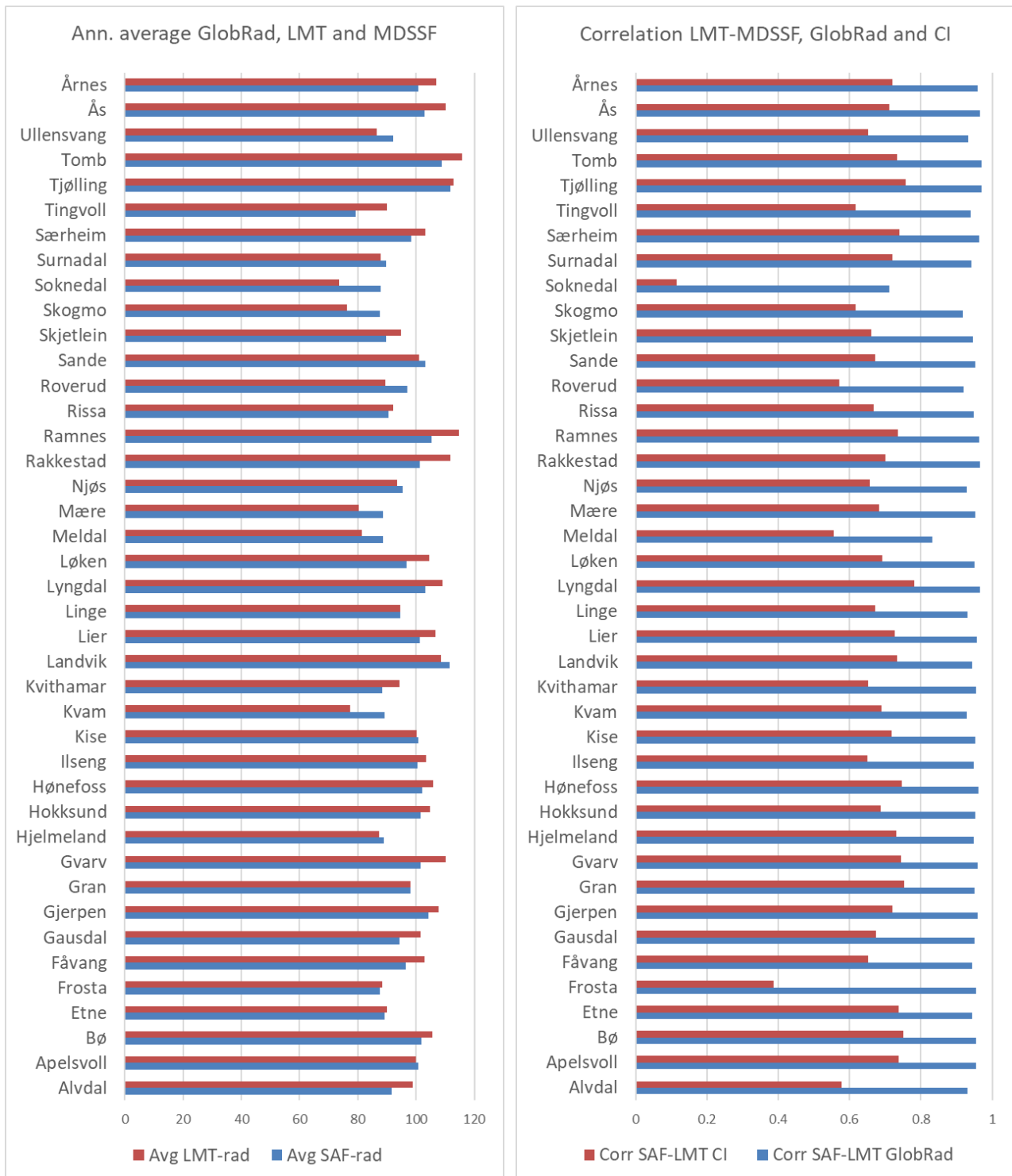
Fra NetCDF-filene med timesverdier ble tidsseriene for enkelt piksler eksportert ved alle LMT-stasjonenes posisjoner, slik at en hadde to parallelle datasett med timesverdier fra juli 2009 til og med oktober 2017. De to datasettene har en viss ulikhet i det at LMT-stasjonene gir romlige punktverdier, mens MDSSF-pikslene integrerer over et område på rundt 35 km<sup>2</sup>. Omvendt er MDSSF midlet fra tre øyeblikksobservasjoner, mens LMT integrerer 60 minuttverdier til hver timesverdi. Disse ulikhetene demper hverandres effekt, og trolig er den største kilden til systematiske feil de topografiske forholdene rundt hver enkelt stasjon, både ved direkte slagskygge og ved orografiske effekter på lokal sky- og tåkedannelse.

Figur 3 viser gjennomsnittlig globalstråling ved hver stasjon for de to datakildene, samt korrelasjonen mellom dem for hhv globalstråling og klarværsindeks. LMT og MDSSF har nesten samme gjennomsnitt for hele stasjonsmengden; 98.1 +/- 11 W/m<sup>2</sup> for LMT-målerne og 96.7 +/- 7 W/m<sup>2</sup> for MDSSF. Disse gjennomsnittsverdiene inkluderer 0-observasjonene nattetid. Årsmiddelverdi for de to globalstråling-datasettene har et samsvar i romlig variasjon på 71%

Gjennomsnittlig klarværsindeks er også noenlunde lik for de to; 0.362 +/- 0.04 for LMT-observasjonene, og 0.343 +/- 0.019 for MDSSF. Her er nattetidspunktene ikke med i middelverdien. Samsvaret mellom romlig variasjon i årsmiddel LMT-CI og MDSSF-CI er 43%.

Den romlige variansen (kvadrert standardavvik) i årsmiddelstråling er mer enn dobbelt så høy for LMT-dataene som for MDSSF. Årsmiddelstrålingen avtar nordover, og Y-koordinaten forklarer 48% av variansen i LMT-årsmiddelstråling, 60% av variansen i MDSSF-årsmiddelstråling. Overraskende nok forklarer Y-koordinaten også hhv 18 og 39 prosent av variansen i årsmiddel klarværsindeks; denne kunne en ha ventet var normalisert bort av lokal solhøyde. Stasjonshøyden har ingen forklaringskraft med hensyn til romlig variasjon i årsmiddelstråling eller midlere klarværsindeks.

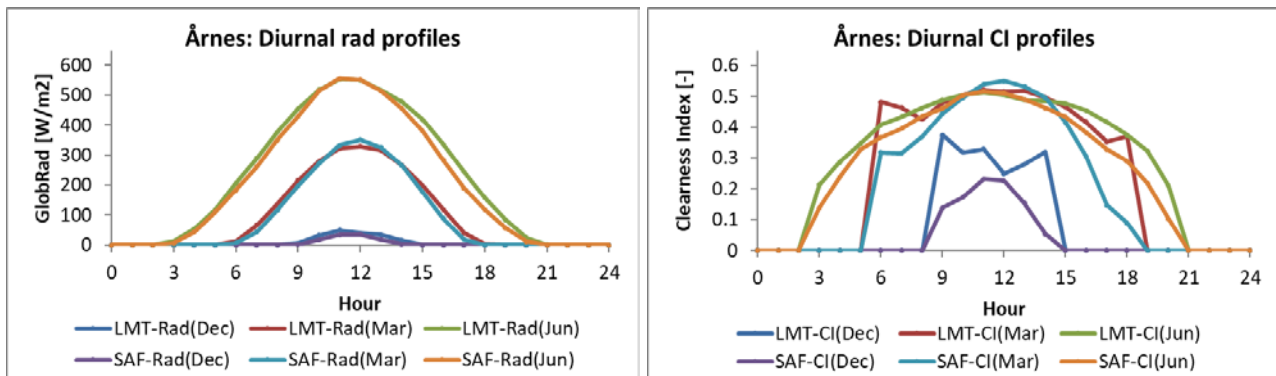
Korrelasjonen mellom timesobservasjoner fra LMT og MDSSF varierer mellom stasjonene, med en gjennomsnittsverdi på 0.94 (89% forklart varians) for globalstråling; 0.67 (45% forklart varians) for klarværsindeks. Denne forskjellen er ventet, fordi begge strålingsverdiene er påvirket av samme døgn- og årssyklus, mens klarværsindeksen har normalisert bort disse periodiske egenskapene. Med andre ord ville en syntetisk strålingsserie uten annen informasjon enn tid/rom også ha positiv korrelasjon med observert stråling.



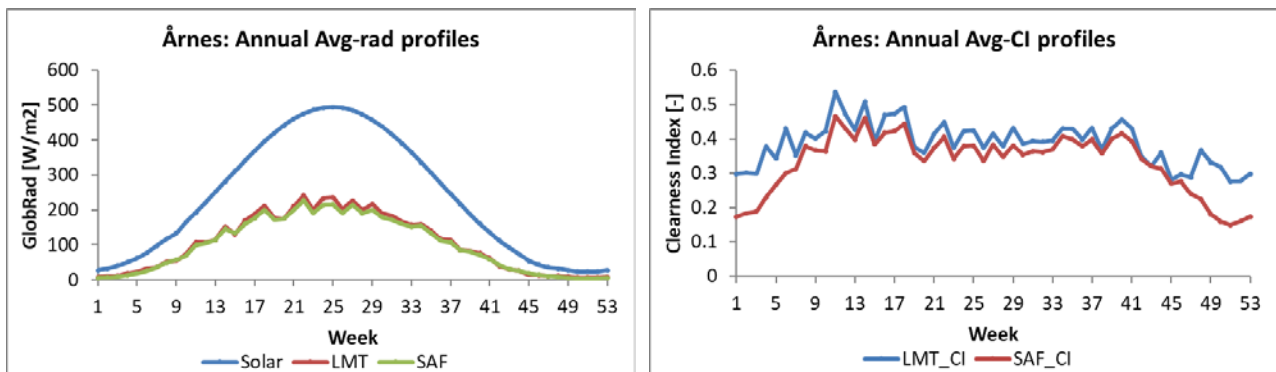
**Figur 3: Årsmiddel stråling [W/m<sup>2</sup>] og korrelasjonskoeffisient mellom LMT og MDSSF (SAF) for globalstråling og klarværsindeks. Feles døgn- og årssyklus gjør at korrelasjonen i globalstråling er langt høyere enn i klarværsindeks.**

## 2.5.2 Døgn- og årsprofiler

Figur 4 viser gjennomsnittlig døgnsyklus for stråling og klarværsindeks for månedene desember, mars og juni. Stasjonen vist er Årnes, men øvrige stasjoner viser noenlunde det samme. Det er generelt godt samsvar mellom de to datasettene hva angår døgnsyklus; også i klarværsindeks. Mars- og juni-profilene antar noenlunde samme verdier og viser liten variasjon gjennom dagen, men forskjellen i daglengde kommer tydelig fram. Desember-profilen for klarværsindeks ligger lavere enn mars- og juni-profilene, og har mer støy fordi sola står lavt og forholdet i klarværsindeksen får et lite tall i nevneren. Slagskygge morgen og kveld kan gi sterk effekt på klarværsindeksen vinterstid; ikke så utpreget for Årnes.



**Figur 4: Døgnprofil for globalstråling (tv) og klarværsindeks (th) ved Årnes-stasjonen; gjennomsnitt over desember, mars og juni. Gjennomsnittsprofilene er glattere enn for en typisk enkeltdag.**



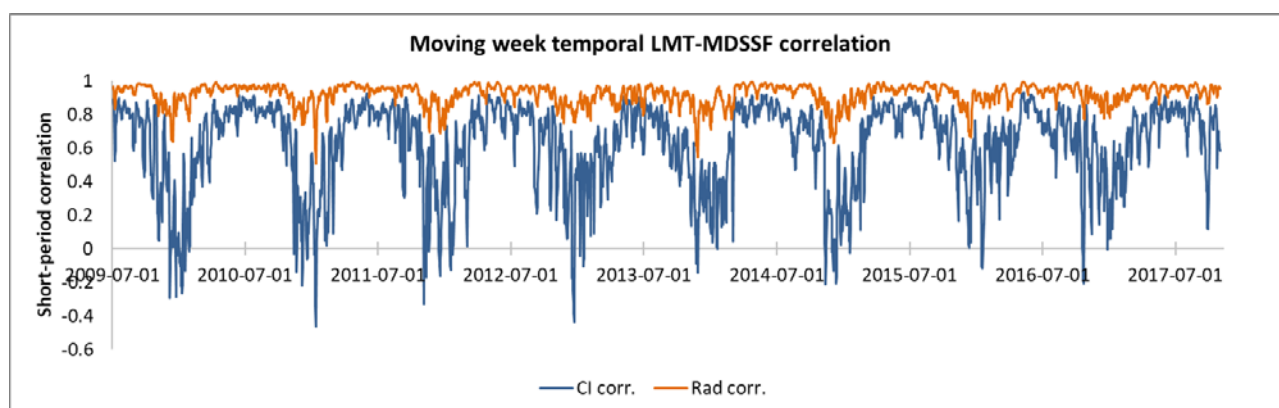
**Figur 5: Årsprofil for globalstråling og teoretisk TOA-stråling (tv) og klarværsindeks (th) ved Årnes-stasjonen; gjennomsnitt over hver uke. Store deler av året har noenlunde samme gjennomsnittlige klarværsindeks, men de mørkeste vinterukene skiller seg ut, mest for MDSSF. Dette gjelder de fleste av stasjonene.**

Figur 5 viser årssyklus for globalstråling og klarværsindeks, samt for teoretisk stråling utenfor atmosfæren. Det er godt samsvar mellom de to datakildene for begge variable, også i småvariasjoner som stammer fra enkeltår. Sammenlignet med den sterke årssyklusen i globalstråling er det stort sett små årstidsvariasjoner i klarværsindeks, selv om de mørkeste vinterukene gir lavere indeks, tydeligst for MDSSF-datasettet. Dette er typisk for de fleste stasjonene.

### 2.5.3 Sesongvariasjon i samsvar mellom MDSSF og LMT

Figur 6 viser hvordan korrelasjonen mellom LMT-målingene og MDSSF-verdiene varierer med sesongen. Serien er fremkommet ved å beregne korrelasjoner over 168 timesverdier i et glidende ukersvindu, og plottet en verdi pr dag. Stasjonen Årnes er vist, men de viktigste trekkene deles av alle stasjonene.

Samsvaret mellom klarværsindeksene fra de to datasettene faller dramatisk i en periode hver vinter, med negative korrelasjonsverdier forekommende hvert år. Korrelasjonen resten av året ligger oppunder 0.8. Variasjonen fra dag til dag er også stor om vinteren, selv om disse daglige ukersverdiene har sterk overlapping. En ser også en viss vinter-reduksjon i samsvar for globalstråling, men mye mindre dramatisk. Fordi hver korrelasjonsverdi spenner over bare en uke, bidrar ikke årsvariasjonene til godt samsvar i globalstråling, slik de gjør når alle dataene ses under ett.



**Figur 6: Tidskorrelasjon over glidende ukeperioder mellom LMT- og MDSSF-observasjoner, Årnes.**

Selv om ukers-korrelasjonene spenner over 168 timesverdier, er datamengden større om sommeren enn om vinteren når hver dag bare har 4-6 timer med positiv solhøyde. I tillegg ligger strålingsverdiene ofte under 50 W/m<sup>2</sup> selv midt på dagen, mens oppgitt feilmargin for MDSSF er 20 W/m<sup>2</sup>.

### 3 Evaluering av romlig variasjon og nødvendig måletetthet

Dette kapitlet dekker delprosjekt H3 med milepæler M2 og M7.

#### 3.1 Prosjektplanens spesifisering av delprosjekt H3

Analysere tilgjengelige data for kortbølga stråling mhp samvariasjon mellom nærliggande stasjoner, og vurdere nødvendig tetthet for eit nettverk av strålingsmålarar. Deretter interpolere måleverdier til gridda kart, og sammenlikne med modellerte strålingskart basert på skykartene frå H1. Avviket mellom de romlige mønstrene i disse er så utgangspunkt for å utrede behovet for en terreng-avhengig korreksjonsmodell

**Leveranse: Metodikk for interpolasjon av stråling og tilråding for observasjon av stråling til bruk i tilsigsmodellar. Milepæler knyttet til H3 er:**

- M2: Analyse av romlig kovarians og stasjonstetthet for kortbølget stråling (H3-Q4)
- M7: Sammenligning av modellert og interpolert kortb. stråling (H3-Q8)

#### 3.2 Bakgrunn til delprosjekt H3

Nyere hydrologiske modeller anvender strålingsdata til estimering av snøsmelting og fordampning, med klart størst følsomhet i snøsmeltesimuleringene. De nyere modellen er også romlig fordelte, gjerne med en rutestørrelse på 1\*1 km.

Ingen av de to datasettene behandlet i denne rapporten tilbyr strålingsdata med en slik romlig detaljeringsgrad. LMT-datasettet, med mellom 40 og 60 stasjoner i Sør-Norge avhengig av ønsket tidsperiode, gir rundt 3000-5000 km<sup>2</sup> pr stasjon, eller typisk 50-70 km mellom stasjonene. Plasseringene til disse stasjonene er imidlertid konsentrert i lav høyde; slik at typisk stasjonsavstand i de fjellregionene som er viktige for kraftverksdrift er større. Strålingsmålerne utplassert i dette prosjektet bidrar til å jevne ut denne skjevheten fra 2017 og framover. I sammenligning dekker et MDSSF-piksel 35-40 km<sup>2</sup>, og representerer middelverdien over dette arealet, ikke en punktverdi.

Interpolering av stråling kan skje enten direkte i de målte verdiene, eller en kan interpolere klarværsindeks og simulere globalstråling lokalt fra denne med varierende bruk av ekstra informasjon til nedskalering. Alle alminnelige interpolasjonsteknikker er anvendbare når det romlige domenet er moderat i størrelse, slik at solhøyde og -retning er noenlunde homogene. For store regioner er det hensiktsmessig å bruke lokal solgeometri, og interpolere klarværsindeks snarere enn globalstråling.

Globalstråling er i utgangspunktet målt mot horisontal flate, og ved interpolering fra gode målinger i åpent terreng er det ingen trend som skal fjernes fra måleverdiene, slik det er ved for eksempel temperaturinterpolering. Høydeavhengigheten Dersom målinger er gjort på uheldige lokaliteter med for eksempel slagskygge eller sterkt redusert himmeldom, bør en vurdere å korrigere observasjonene før interpolering. Dette krever kartlegging av forholdene rundt hver enkelt stasjon, og er ikke vurdert i denne rapporten.

Etter interpolering av globalstråling kan det være hensiktsmessig å nedskalere strålingsverdiene etter terrenghelning for å ta hensyn til ulike innfallsvinkler lokalt. Effekten av dette avtar imidlertid sterkt med størrelsen av gridrutene og er for mange terrengtyper liten allerede ved ruter på 1\*1 km. Enkleste metode innebærer en alminnelig cosinus-korreksjon av direkte stråling ved de lokalitetene det interpoleres til. Det er også mulig å analysere en terrengmodell med tanke på å estimere skyggeforholdene ved hver lokalitet det skal interpoleres til.



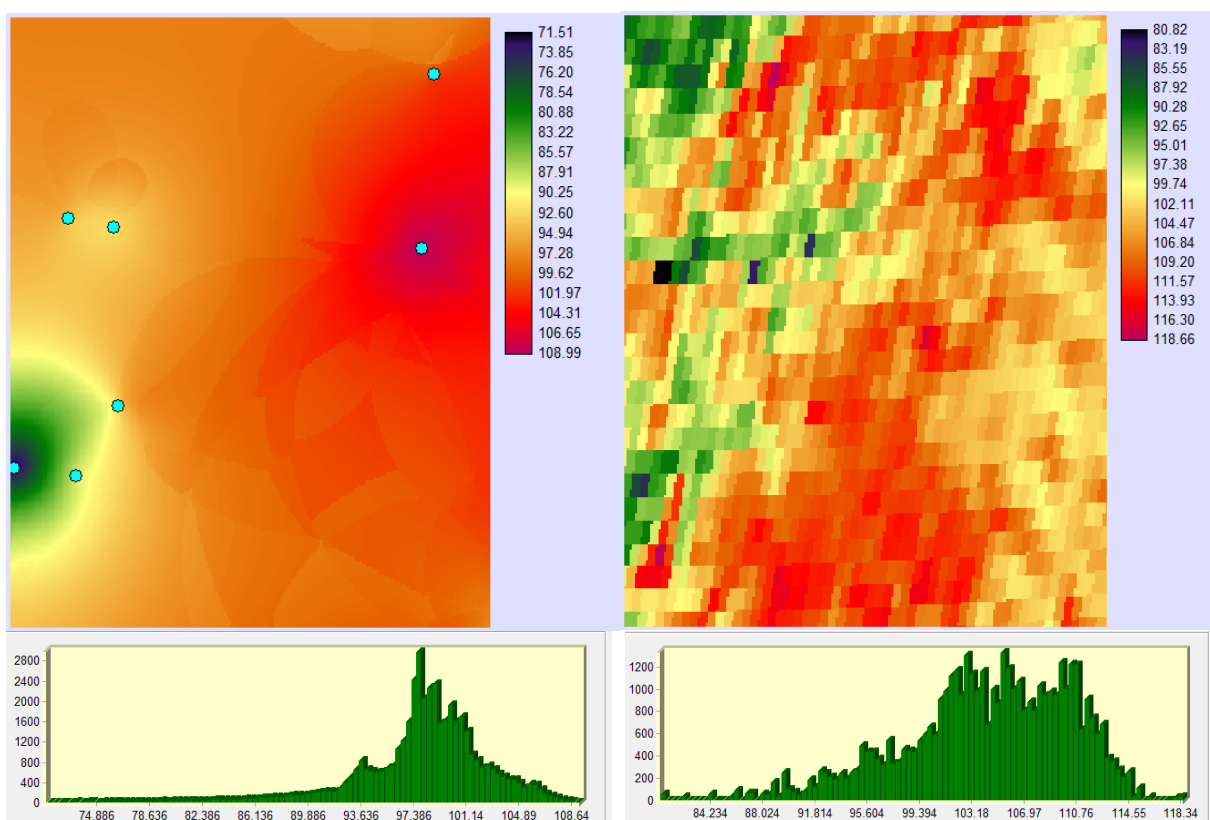
Terrengbasert nedskalering forutsetter at strålingen dekomponeres i direkte og diffus stråling, hvorav en normalt bare korrigerer direkte-andelen i henhold til terrenghelning. Skartveit og Olseth (1987) og Skartveit et al. (1998) angir en modell for slik dekomponering. En prototyp av denne modellen er implementert i det pågående prosjektet, men ikke anvendt for analysene i denne rapporten.

### 3.3 Resultater

Etter signal fra styringskomiteen har prosjektet i 2017 nedprioritert interpolering av bakke-data, fordi bruk av MDSSF-data fremstår som en vesentlig bedre løsning. Vi tar imidlertid med en del tidlige resultater som ikke er rapportert.

#### 3.3.1 Årsmiddelstråling i MDSSF og interpolerte LMT-data – romlig variasjon

Figur 7 sammenligner stråling interpolert fra LMT-stasjonsnettet med observerte MDSSF-data. Området er en 185\*235 km stor region i Sør-Norge, LMT-strålingsdatene er interpolert ved kriging. Dette er gjennomsnittsverdier over ett år, en operasjon som forventningsmessig skulle gi en glatt flate uansett grunnlag. Likevel er forskjellen i detaljeringsgraden svært stor. Det fjernmålte MDSSF-datasettet har altså klare fordeler framfor interpolering av bakkemålinger mht romlig detaljering. De fjernmålte verdiene er også ufølsomme for lokal terrengskygge rundt hver enkelt bakkestasjon.

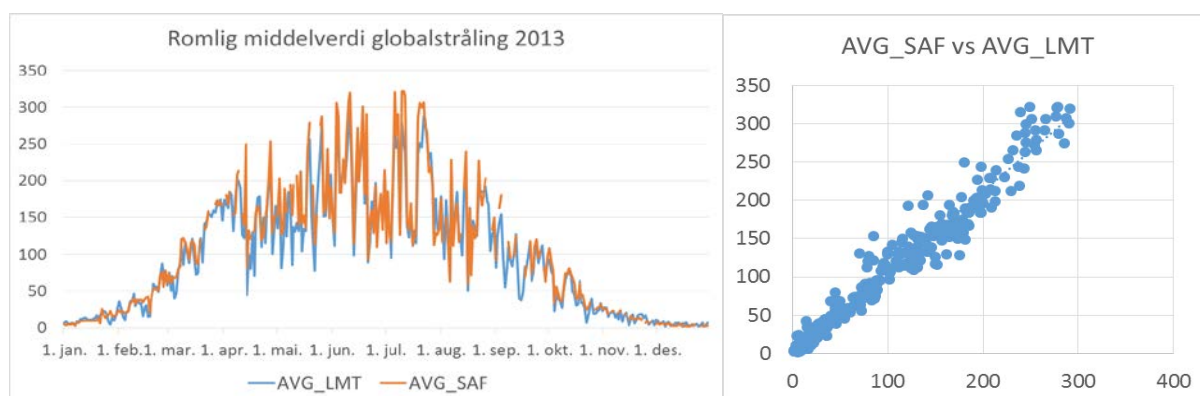


**Figur 7: Årlig gjennomsstråling; LMT-interpolert (tv) og MDSSF (th). MDSSF-dataene har større varians og vesentlig mer romlige detaljer, selv i årsgjennomsnitt. LMT-stasjonene er markert i**

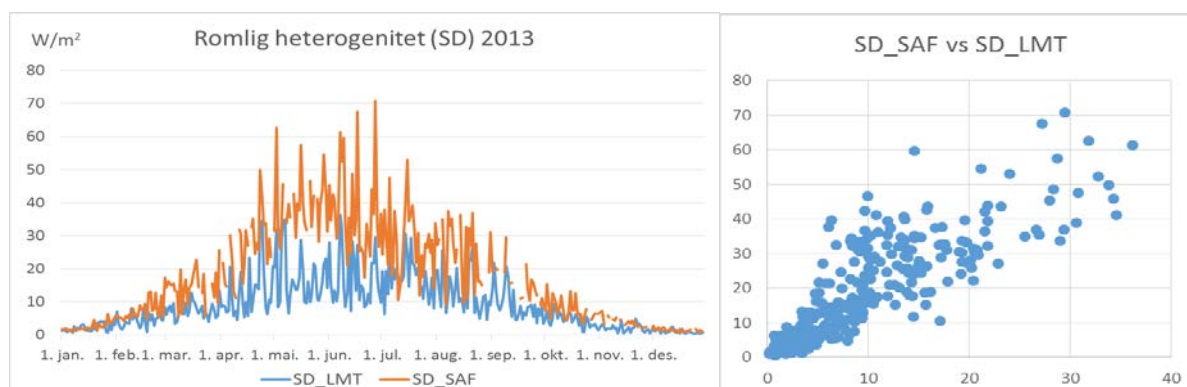
lyseblått; ikke alle hadde målinger i 2013. MDSSF er reprojisert ved nærmeste nabo-resampling, dermed trer originalpikslene i størrelse ca 4\*9 km tydelig frem også når det er resamplet til 1\*1 km.

### 3.3.2 Døgnverdier i MDSSF og interpolerte LMT-data – temporær variasjon

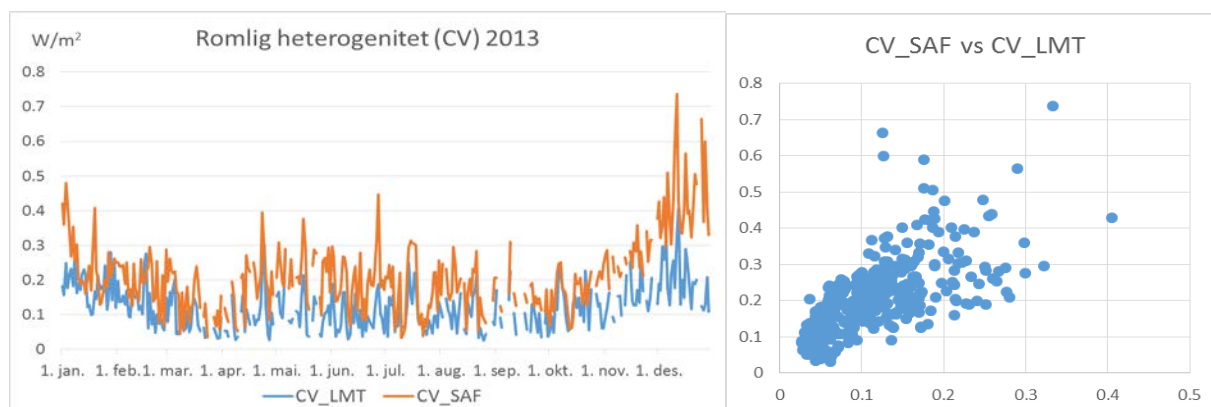
Figur 8-10 viser hvordan romlig middelverdi og heterogenitet (SD og CV) estimeres av de to data-kildene, stadig over den mindre regionen og for 2013. For de aktuelle stasjonene dette året har MDSSF noe høyere middelverdi enn LMT-datasettet (104 vs 98 W/m<sup>2</sup>). Samsvaret er godt, igjen fordi årssyklusen er felles.



**Figur 8: Romlig middel globalstråling i 2013 som tidsserier og XY-plott mellom interpolerte LMT-målinger og MDSSF-data (SAF). Kvadrert korrelasjonskoeffisient i XY er 0.96.**



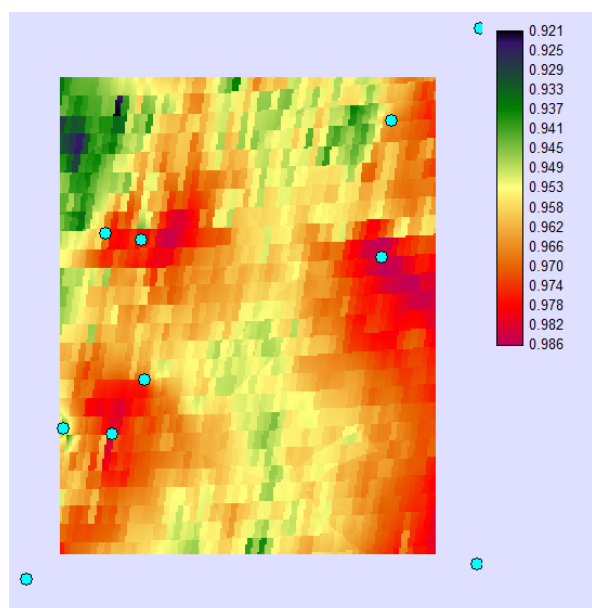
**Figur 9: Romlig heterogenitet (Std.Dev) i globalstråling 2013 som tidsserier og XY-plott mellom interpolerte LMT-målinger og MDSSF-data (SAF). Kvadrert korrelasjonskoeffisient er 0.73**



**Figur 10: Romlig heterogenitet (CV) i globalstråling 2013 som tidsserier og XY-plott mellom interpolerte LMT-målinger og MDSSF-data (SAF). Kvadrert korrelasjonskoeffisient er 0.42. For CV bidrar ikke felles årssyklus til god samvariasjon.**

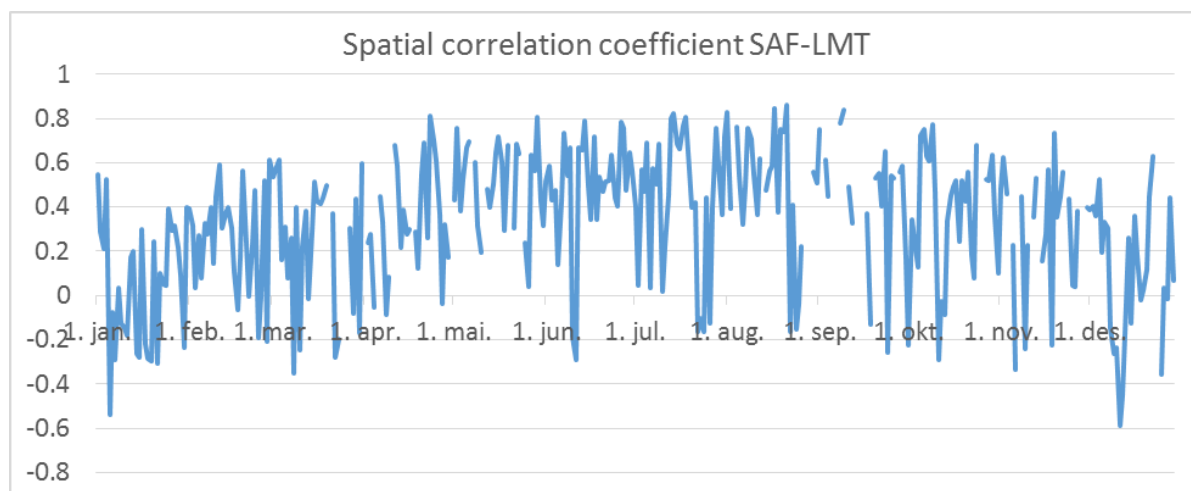
### 3.3.3 Korrelasjon mellom MDSSF og interpolerte LMT-målinger, døgndata

Figur 11 viser korrelasjonen mellom lokale tidsserier i de to datasettene, gjengitt som kart. Igjen må de gode verdiene (0.92 til 0.98) ses på bakgrunn av felles årssyklus, men det er verdt å merke seg hvor tydelig korrelasjonen avhenger av avstanden til målestasjonene. Der de interpolerte verdiene påvirkes av mange stasjoner har de trolig for liten tidsvariasjon til å holde følge med de observerte dataene.



**Figur 11: Temporær korrelasjon mellom SEVIRI (SAF)- og LMT-tidsseriene for hver lokalitet.**

Figur 12 viser tidsserien av romlig korrelasjon mellom de to kartene for hver dag. Denne korrelasjonsserien er ikke preget av felles årssyklus, og representerer et godt bilde på samsvaret mellom de to datasettene. For dager med liten romlig varians (midtinters og på helt klare dager) vil selv små forskjeller i målt verdi gi svært dårlige korrelasjonsmål. Bare på de beste dagene strekker korrelasjonen seg opp i 0.8, dvs 64% forklart varians.

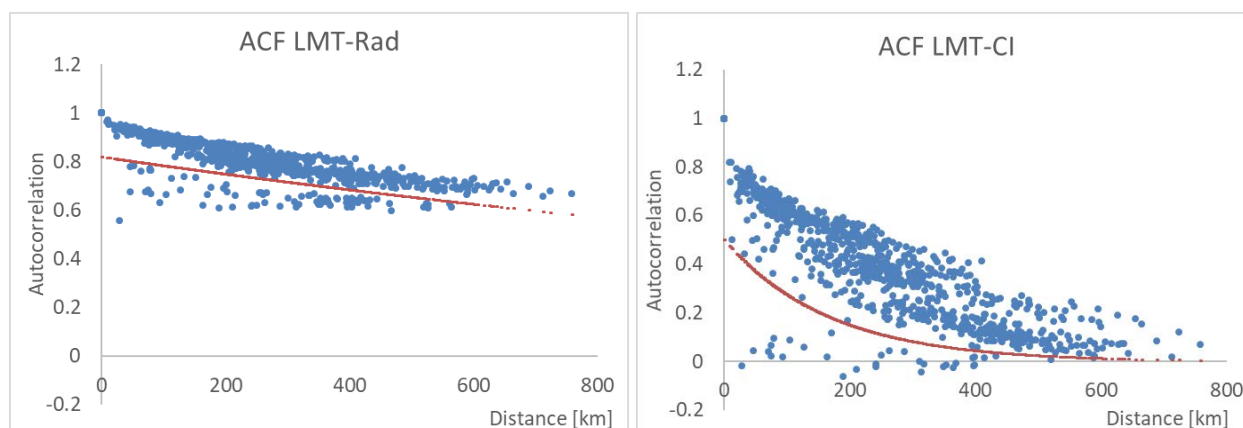


**Figur 12: Romlig korrelasjon mellom de to datasettene for hver dag gjennom 2013.**

### 3.3.4 Autokorrelasjonsfunksjon, LMT-timesverdier

I de følgende avsnittene fokuseres det kun på de lokalitetene som er målt, det inngår ingen interpolerte data. I disse analysene er det brukt timesverdier både for globalstråling og klarværsindeks.

Når informasjon skal flyttes i rom, som for eksempel ved interpolering, er de romlig-statistiske egenskapene viktige for hvor fort samsvaret faller med avstanden. En enkel måte å karakterisere dette på for tidsserier er å plote korrelasjonen i tid mellom to stasjoner mot avstanden mellom dem. Dette er gjort i det følgende avsnittet for hhv globalstråling og klarværsindeks, både for LMT- og MDSSF-datasettene.



**Figur 13: Korrelasjon langs tidsaksen for par av stasjoner, versus avstanden mellom stasjonene for LMT-datasettet; globalstråling til venstre og klarværsindeks til høyre. Alle markører nedenfor den røde linja stammer fra de samme to stasjonene for stråling (én for klarværsindeks), disse ignorerer.**

Figur 13 viser autokorrelasjonsfunksjonene for bakkemålinger, både stråling og klarværsindeks. Alle markører under de røde linjene tilhører en enkelt stasjon for klarværsindeks, to stasjoner for stråling. Disse stasjonene ses det bort fra. For de øvrige er det flere elementer å merke seg.

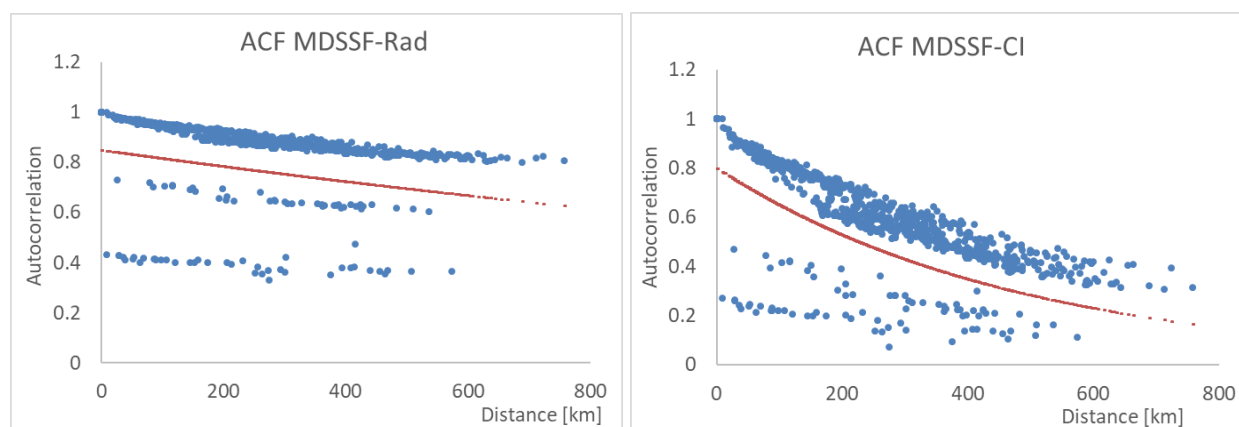
For det første er autokorrelasjonen for klarværsindeks mye lavere enn for globalstråling. Årsaken til dette er at klarværsindeksen er lite influert av døgn- og årssyklus, som er noenlunde felles for alle stasjonene og dermed trekker korrelasjonen opp for strålingsdataene.

For det andre holder autokorrelasjonen for globalstråling seg over 0.65 i alle avstander, i stedet for å synke mot 0 utenfor en influensdistanse. Dette er samsvart som felles døgn- og årssyklus står for. For klarværsindeksen går autokorrelasjonen mot 0 når avstanden nærmer seg 800 km, her spiller døgn- og årssyklus liten rolle.

For det tredje øker ikke funksjonen jevnt mot 1 når avstanden går mot 0. Dette er tydeligst for klarværsindeks, og viser at dataene har en variasjonskomponent som selv de minste stasjonsavstandene ikke fanger opp. Vi vet ikke om dette er ren støy eller naturlig mikroskalavariasjon som har en kovariansstruktur. I det første tilfelle vil to stasjoner montert på samme rigg ikke gi så godt som samme verdi. Dette er den effekten som i geostatistikk gir opphav til nugget-parameteren.

Figur 13 viser altså at korrelasjonskoeffisienten mellom to CI-tidsserier knapt kommer over 0.8, selv om de to målestasjonene ligger svært nær hverandre. Dette tilsvarer at 64% av variansen ved den ene stasjonen forklares av den andre. Ved 50-70 km avstand er forventet korrelasjonskoeffisient rundt den samme som oppnås av MDSSF-datasettet. Imidlertid er dette et gjennomsnitt over alle stasjonspar, der mengden av par med kort avstand er dominert av lavlandsstasjoner. Det er grunn til å tro at korrelasjonen taper seg fortere med avstand i høyfjellsområder, samtidig med at stasjonstettheten der er lavere.

### 3.3.5 Autokorrelasjonsfunksjon, MDSSF-timesverdier



**Figur 14: Korrelasjon langs tidsaksen for par av SEVIRI-pikslar, versus avstanden mellom disse; globalstråling til venstre og klarværsindeks til høyre. Også her ignorerer markører under den røde linja, som alle skriver seg fra de samme to lokalitetene.**

Figur 14 viser tilsvarende autokorrelasjonsfunksjonene for de MDSSF-pikslene som inneholder en LMT-stasjon, stråling til høyre og klarværsindeks til venstre. Også her ignorerer markører under de røde linjene.

Igjen er autokorrelasjonen for klarværsindeks (CI) lavere enn for globalstråling, av samme årsak som for LMT-dataene (felles døgn- og årssyklus). Og på samme måte som for LMT-dataene holder autokorrelasjonen for MDSSF-globalstråling seg høyt for alle avstander, i stedet for å synke mot 0, mens den for klarværsindeksen ser ut til å gå mot 0, men for en vesentlig større avstand enn analysedomenet tilbyr.

I motsetning til bakke-dataene viser MDSSF-dataene intet tegn til diskontinuitet i 0 (nugget). Med unntak for de to suspekke stasjonene er det altså lite eller ingen ukorrelert støy i MDSSF-dataene. Dette må ses i sammenheng med at disse verdiene i seg selv er arealverdier, der eventuelle variasjonskomponenter under piksel-skala er aggregert vekk. MDSSF-dataene kan altså ikke vise at slik mikroskala-variasjon ikke finnes, men vi kan fastslå at støyen i MDSSF-pikselverdiene er svært liten.

## 4 Konklusjoner og anbefalinger

Sammenligninger med Landbruksmeteorologisk Tjenestes (LMT) nettverk av globalstrålingsmålere har vist at MDSSF-datasettet fra SEVIRI-sensoren i den geostasjonære MSG-satellitten egner seg for å gi strålingsinput til hydrologiske modeller. De teknisk-operasjonelle fordelene er umiddelbare; dataene kommer med god tidsoppløsning og langt bedre romlig detaljeringsgrad enn det en kan oppnå med dagens målnettverk eller en moderat utvidelse av dette. En kan få enda bedre romlig detaljeringsgrad fra sensorer i polarbane-satellitter, eksempelvis MODIS og AVHRR, men disse passerer sjeldnere, med ujevne tidsintervaller, og med ulik geometri for ulike bilder.

LMT og MDSSF har nesten samme gjennomsnitt for hele stasjonsmengden; 98.1 +/- 11 W/m<sup>2</sup> for LMT-målerne og 96.7 +/- 7 W/m<sup>2</sup> for MDSSF evaluert i stasjonsposisjonene. Årsmiddelverdi for de to globalstråling-datasettene har et samsvar i romlig variasjon på 71%. Gjennomsnittlig klarværsindeks er også noenlunde lik for de to; 0.362 +/- 0.04 for LMT-observasjonene, og 0.343 +/- 0.019 for MDSSF. Samsvaret mellom romlig variasjon i årsmiddel LMT-CI og MDSSF-CI er 43%. Disse resultatene viser at MDSSF fremstår som godt kalibrert mht systematiske feil.

Den romlige variansen (kvadrert standardavvik) i årsmiddelstråling er mer enn dobbelt så høy for LMT-dataene som for MDSSF. Årsmiddelstrålingen avtar nordover, og Y-koordinaten forklarer 48% av variansen i LMT-årsmiddelstråling, 60% av variansen i MDSSF-årsmiddelstråling. Systematiske avvik i LMT-sensorene er trolig årsak til noe av restfeilen (som på ingen måte er dramatisk).

Korrelasjonen mellom timesobservasjoner fra LMT og MDSSF varierer mellom stasjonene, med en gjennomsnittsverdi på 0.94 (89% forklart varians) for globalstråling; 0.67 (45% forklart varians) for klarværsindeks. Det er de siste resultatene som best karakteriserer hvor godt de to målesystemene samsvarer; høye korrelasjonsverdier for globalstråling oppnås enkelt ved samsvar i døgn- og årssyklus.

Det er generelt godt samsvar mellom de to datasettene hva angår døgnsyklus; også i klarværsindeks. Mars- og juni-profilene antar noenlunde samme verdier og viser liten variasjon gjennom dagen, men forskjellen i daglengde kommer tydelig fram. Desember-profilen for klarværsindeks ligger lavere enn mars- og juni-profilene, og har mer støy fordi sola står lavt og forholdet i klarværsindeksen får et lite tall i nevneren. Slagskygge morgen og kveld kan gi sterk effekt på klarværsindeksen vinterstid. Årssykluser for de to datakildene sammenfaller godt for begge variable, også i småvariasjoner som stammer fra enkeltår.

Samsvaret mellom klarværsindeksene fra MDSSF og LMT reduseres sterkt om vinteren, når strålingen er lav. Resten av året ligger ukeverdiene for korrelasjon oppunder 0.8. Variasjonen i uke-samsvar er også stor om vinteren. En ser også en viss vinter-reduksjon i samsvar for globalstråling, men mye mindre dramatisk.

Autokorrelasjonsfunksjoner for de to datasettene viser at det er en betydelig småskalakomponent i LMT-dataene som ikke er der i MDSSF-dataene. Vi vet ikke om dette er ren støy eller naturlig mikroskala-variasjon. En årsak til lokale effekter kan være terrengavhengighet, både slagskygge, reduksjon av himmelhalvkula, og orografiske effekter. Noe av dette vil det være mulig å simulere, og dermed korrigere for.

## Referanser

Brisson, A., P. Le Borgne, and A. Marsouin (1999): Development of algorithms for surface solar irradiance retrieval at =&SI SAF low and mid latitude. Meteo-France/CMS, Lannion.

Geiger, B., C. Meurey, D. Lajas, L. Franchistéguy, D. Carrer, J-L. Roujean and O. Hautecoeur (2012): Down-welling Surface Shortwave Flux (DSSF) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Report reference number: SAF/LAND/MF/ATBD\_DSSF/1.0, Meteo-France, November 2012.

Iqbal, M (1983): An introduction to solar radiation. Academic Press, Toronto.

Skartveit A, Olseth JA. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. Solar Energy 1987;38:271–4.

Skartveit, A., Olseth J. A., Tuft M.E. An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. Solar Energy 63, 1998



Teknologi for et bedre samfunn

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)