

Avdelningen för Byggnadsfysik

Examensarbete TVBH-5070

Lund 2013

Solelpotentialbedömning

- framställning av solelpotentialkarta
för Lund och utvärdering av laserdata

Pontus Hedén



LUND
UNIVERSITY

Solelpotentialbedömning

- framställning av solelpotentialkarta
för Lund och utvärdering av laserdata

Pontus Hedén

© Pontus Hedén

ISRN LUTVDG/TVBH-13/5070--SE(66)

Avdelningen för Byggnadsfysik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
22100 LUND

Sammanfattning

Projektet med solelpotentialbedömning för Lund är ett samarbete mellan Lunds Tekniska Högskola, Lunds Kommun, Lunds Energikoncernen AB (publ) och Solar Region Skåne med stöd från Region Skånes Miljövårdsfond. Syftet med detta examensarbete är att skapa en solelpotentialkarta för Lund för att främja förnybar energi. Till det beskrivs tillvägagångssättet för att underlätta för andra kommuner att göra liknande projekt.

Projektet ledde till en karta som täcker 500 km² yta med 50 000 tak och finns på www.solkartan.se. Till detta användes laserdata från en helikopterskanning med hög upplösning samt flygplansskanning med lägre upplösning. Laserdata med olika upplösning ger olika bra resultat vad avser framställda höjdmodeller och solberäkningar med ArcGIS. I rapporten jämförs de nämnda dataseten samt laserdata från Lantmäteriets nya nationella höjdmodell (NNH).

Skillnader i framställda höjdmodellerna kan tydligt ses på takens ytterkanter där höjdskillnader är stora från tak till mark. Ju större och mer kvadratiska tak som beräknades, desto mindre blev den relativa längden runt taket i förhållande till arean. Detta ledde till att felaktigt beräknad instrålning generellt minskade med ökad takarea.

Att göra en solelpotentialkarta med laserdata som utgångspunkt kan automatiseras till stor del men kräver även manuell redigering.

Nyckelord: solelpotentialbedömning, solkarta, LiDAR, GIS, Solar Radiation.

Abstract

The project of photovoltaic potential map for Lund is an act of collaboration between The Faculty of Engineering LTH at Lund University, the municipality of Lund, Lunds Energikoncernen AB (publ) and Solar Region Skåne with financial support from Region Skånes fund of environmental care. The purpose with this master's thesis is to create a photovoltaic potential map for the city of Lund in order to promote renewable energy and present the mode of procedure. This report will act as a guide for other municipalities in making their own photovoltaic potential maps.

The project lead to a map covering an area of 500 km² with 50 000 roofs and is available on www.solkartan.se. For this, high resolution laser data from a helicopter scan and lower resolution data from an airplane scan were used. Laser data with different resolutions result in varied outcomes regarding extracted elevation models and solar calculations using ArcGIS. In the report, previously mentioned datasets are compared along with laser data from the new elevation model (NNH), developed by the Swedish Land Survey.

Differences within the extracted elevation models in this project are clearly identified, looking at the outlines of the roofs where the difference in elevation is distinct. Bigger and squared roofs have big areas in relation to the perimeter, which generally leads to higher accuracy in solar radiation.

With laser data as base, making a photovoltaic potential map may be automated in great extent but also includes manual editing.

Keyword: photovoltaic potential, solar cadastre, LiDAR, GIS, Solar Radiation.

Förord

Denna studie är ett examensarbete på civilingenjörsprogrammet Ekosystemteknik med inriktningen Energisystem på Lunds Universitet - Lunds Tekniska Högskola (LTH), på avdelningen Byggnadsfysik. Examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng och har utförts på Lunds Energikoncernen AB (publ) där Fredrik Andrén Sandberg har varit handledare. På LTH har Elisabeth Kjellsson varit handledare och Jonas Andréasson har varit biträdande handledare på Stadsbyggnadskontoret, Lunds kommun.

Ett stort tack riktas till samtliga handledare för starkt stöd och vägledning. Tack även till Mats Elfström på Ystad kommun och Karin Larsson på GIS-centrum i Lund för GIS-tekniskt stöd. Slutligen tackas alla inblandade i projektet för ett strålande samarbete med solkartan.

Lund i juni 2013

Pontus Hedén

Innehåll

1	Inledning.....	1
1.1	Projektbeskrivning	1
1.2	Syfte	1
1.3	Metod	1
1.4	Avgränsningar	1
2	Bakgrund.....	3
2.1	Solpotentialbedömning	3
2.2	Solinstrålning	3
2.3	Solceller	5
2.3.1	Orientering	6
2.4	Skuggning	6
3	Laserskanning och GIS	9
3.1	LiDAR och laserskanning	9
3.2	Geografiska InformationsSystem (GIS)	9
3.3	ArcGIS	10
3.3.1	Solar Radiation Tool	10
3.3.2	Beräknad direkt solinstrålning	11
3.3.3	Beräknad diffus solinstrålning	12
4	Solelpotentialbedömning av Lunds kommun.....	14
4.1	Data	14
4.1.1	Låghöjdsflygning	14
4.1.2	Höghöjdsflygning	16
4.1.3	NNH (Ny Nationell Höjdmodell)	16
4.2	Genomförande	17
4.2.1	Skapa LAS Dataset	17
4.2.2	Omklassificering	17
4.2.3	Avvikande punkter	19
4.3	Konvertering till raster	19
4.3.1	Binning	20
4.3.2	Cellstorlek	20
4.4	Uppdelning av raster	21
4.5	Kalibrering Solar Radiation Tool	21
4.5.1	Meteonorm	21
4.6	Solberäkning (Solar Radiation)	22
4.7	Sammanfogning av raster	23
4.8	Klippa ut tak	23
4.9	Kategorisering och areaberäkning	23
4.10	Totalinstrålning	25
4.11	Presentation på hemsida	25
4.12	Resultat	28
5	Jämförelse och analys av dataset.....	30
5.1	Höjdmodell	30
5.2	Solanalyser	35
5.2.1	Totalinstrålning	37
5.2.2	Kategorisering och areaberäkning	43
6	Diskussion.....	46
6.1	Solpotentialkartan Lund	46
6.2	Lasermoln eller 3D-modell	46

6.3	Kvalitet på laserdata	46
6.4	Solar Radiation	47
6.5	Tillförlitlighet	48
6.6	Eventuella förbättringar	48
6.7	Rekommendationer	49
6.8	Felkällor	49
7	Slutsatser	50
7.1	Solelpotentialbedömning av Lunds kommun	50
7.2	Data och jämförelse	50
8	Litteraturförteckning	51
	Bilaga. Metoder i ArcGIS 10.1	53

1 Inledning

1.1 Projektbeskrivning

Efter möte mellan Lunds Tekniska Högskola, Lunds Kommun, Lunds Energikoncernen AB (publ) och Solar Region Skåne kom man fram till att samtliga parter önskade en solelpotentialkarta. Gruppen sökte och beviljades bidrag från Region Skånes Miljövårdsfond. Projektet ska främja utbyggnaden för solelproduktion och göras tillgänglig för allmänheten. Data som fanns vid beslutet var tredimensionellt orienterade punkter (LiDAR) i olika upplösning och utsträckning. Det bestämdes då att kartan skulle utgå från dessa data och ingen ny datainsamling skulle göras.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att göra beräkningar och lägga grunden för en solelpotentialkarta för Lund i den mån det finns data. Utöver detta skall tre typer av dataset från laserskanning jämföras och utvärderas. Detta för att klargöra vilka krav på data som bör ställas för att göra liknande solelpotentialkartor i andra kommuner och städer.

Årligen varierande väder och den relativa tillförlitligheten i laserdata och ekvationerna för solberäkning gör att solpotentialkartan endast kan ge riktvärden för solinstrålning. Syftet med kartan är därför snarare att väcka intresse kring solenergi än att ge exakta värden för solinstrålning och solelproduktion.

1.3 Metod

Metoden för arbetet följer nedanstående ordning:

1. Genomföra litteraturstudie för tidigare genomförda solpotentialbedömningar.
2. Kontakt med personer med erfarenhet av GIS och ArcGIS.
3. Kalibrering av verktyget för solberäkning i ArcGIS 10.1 mot meteorologiska väderdata, omvandlat för vinklar och riktningar i Meteonorm.
4. Skapa höjdmodell och genomföra solberäkning för hela Lunds kommun.
5. Skapa höjdmodeller och genomföra solberäkning för tre dataset.
6. Jämföra dataset med hjälp av Microsoft Excel.

1.4 Avgränsningar

Solelpotentialkartan ska täcka Lunds kommuns byggnader i den mån det finns data. Beräkningar kan göras hur tunga som helst och innebär inte nödvändigtvis att resultatet blir mer tillförlitligt kontra tiden det tar. Ju mindre område simuleringen är avsedd för, desto mer noggrant kan beräkningen göras. I detta examensarbete har

fokus legat på att göra solberäkning för hela kommunen, vilket innebär att resultatet snarare ger **riktvärden** för enskilda tak än exakt instrålning. Rapporten presenterar ett av många möjliga tillvägagångssätt och resultat för arbetet bakom solelpotentialkartan i Lund. Resultatet i sig analyseras kort och istället läggs fokus vid analys och jämförande kring de tre dataseten. Teknik för publicering på Internet innefattas inte i examensarbetet, däremot presenteras resultatet visuellt. Rapporten tar inte hänsyn till ekonomiska aspekter.

2 Bakgrund

2.1 Solpotentialbedömning

Solpotentialbedömning är relativt nytt men har gjorts över flera städer i såväl Europa som i USA. I Sverige var Göteborg först ut i mars 2012 med en officiell solpotentialbedömning som täckte 36 km², vilken gjordes av Göteborgs Universitet och WSP [1]. Därefter gjorde Tyréns till maj 2013 en större solpotentialkarta, 170 km² som täckte Stockholm stad [2] [3].

Att göra manuella mätningar på ett större antal tak och beräkna solinstrålning är tidskrävande, varför det är intressant att göra en automatiserad solpotentialbedömning. En förutsättning för att kunna automatisera beräkningar är att det finns data för takens riktning och lutning. Detta kan finnas som laserdata eller tredimensionella polygoner och innehas vanligen av en lokal myndighet, till exempel stadsbyggnadskontor eller motsvarande. Om dessa data inte finns måste de införskaffas från en professionell aktör som arbetar med tredimensionell kartografering, vilket kan betyda ansemliga kostnader. Om en laserskanning skall göras beror priset på vilken upplösning och utsträckning som önskas, ju högre upplösning desto högre pris.

Solpotential kan visas på olika sätt men gemensamt för många städers kartor är en tvådimensionell kartprojicering. För att visualisera solinstrålningen kan husen exempelvis kategoriseras enligt färgkoder. Ett annat sätt kan vara att visa solinstrålningen med glidande färgskalor, vilket ger mer information. Andra variationer i presentation är huruvida vegetationen är inkluderad i beräkningarna eller ej och information för specifika hus. Exempel på husspecifik information är instrålning, kategorisering, potentiellt uttag av solel och solvärme, återbetalningstid, koldioxidreducering och takarea.

Städer som använt laserdata med olika upplösning är bland andra Lissabon, Bristol och Osnabrück. Punkttätheten som använts för städerna var 1, 2 respektive 1-4 punkter per kvadratmeter [4], [5], [6]. För mer information om punkttäthet, se kapitel 3.1 och punkttäthet för Lund i kapitel 4.1.

2.2 Solinstrålning

Solens strålar som når en tänkt vinkelrät yta på utsidan av jordens atmosfär, med energin 1367 W/m² i genomsnitt. I verkligheten varierar det mellan ungefär 1320 till 1410 W/m² beroende när på året man mäter. Medelvärdet 1367 W/m² kallas solarkonstanten och är utgångspunkt för att mäta solinstrålningen på jorden. [7]

När den utomatmosfäriska, eller extraterrestriska, strålningen träffar atmosfären, både absorberas och sprids fotonerna av olika partiklar. De spridda fotonerna som

fortsätter mot jorden i andra riktningar kallas diffus solinstrålning (Dif). De fotoner som fortsätter mot jorden i samma riktning som de mötte atmosfären, kallas direkt solinstrålning (Dir). För horisontella ytor, blir den totala, även kallat globala solinstrålningen:

$$Glob = Dif + Dir \quad (1)$$

För lutade ytor tillkommer effekten från markreflekterad solinstrålning (Ref):

$$Glob = Dif + Dir + Ref \quad (2)$$

När direktstrålning avviker från zenit minskar dess koncentration mot en horisontell yta. Direktstrålningens infallsvinkel mot en horisontell yta är densamma som avvikelsern från zenit (z), vilket är relaterat till solhöjden (h) enligt:

$$Glob = Dir * \cos(z) + Dif = Dir * \sin(h) + Dif \quad (3)$$

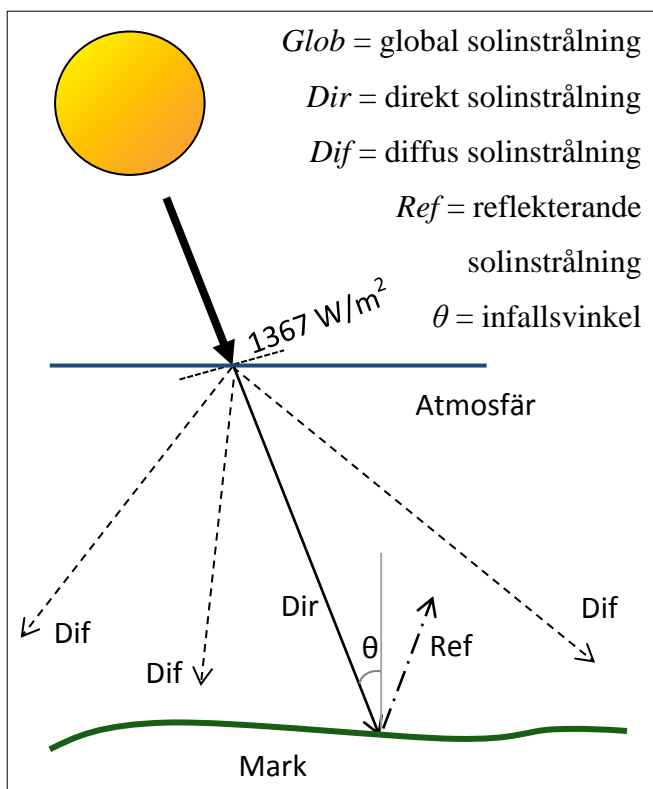
För en icke vinkelrät yta beror direktinstrålningen på infallsvinkeln (θ) mot ytan, hur mycket av den diffusa strålningen som träffar (R) och den reflekterande strålningen:

$$Glob = Dir * \cos(\theta) + R * Dif + Ref \quad (4)$$

R är en konverteringsfaktor som motsvarar siktfältet¹ och anisotropisk, det vill säga riktningens beroende, spridning. [8]

För mer ingående beräkningar av solinstrålning, se kapitel 3.3.

¹ Siktfältet inkluderar de riktningar där solinstrålningen fritt kan nå ett objekt.



Figur 1. Schematisk bild för solinstrålning

Solinstrålning är långt ifrån konstant, även sett över längre tidsintervall. Skillnaden mellan ett solrikt och ett solfattigt år är ungefär 110 respektive 90 % av normalåret [9].

På grund av jordens lutning varierar soluppgång och solnedgång över året för alla platser som avviker från ekvatorn. Ju mer avvikelse från ekvatorn desto större blir variationerna mellan potentiella soltimmar mellan sommar och vinter.

2.3 Solceller

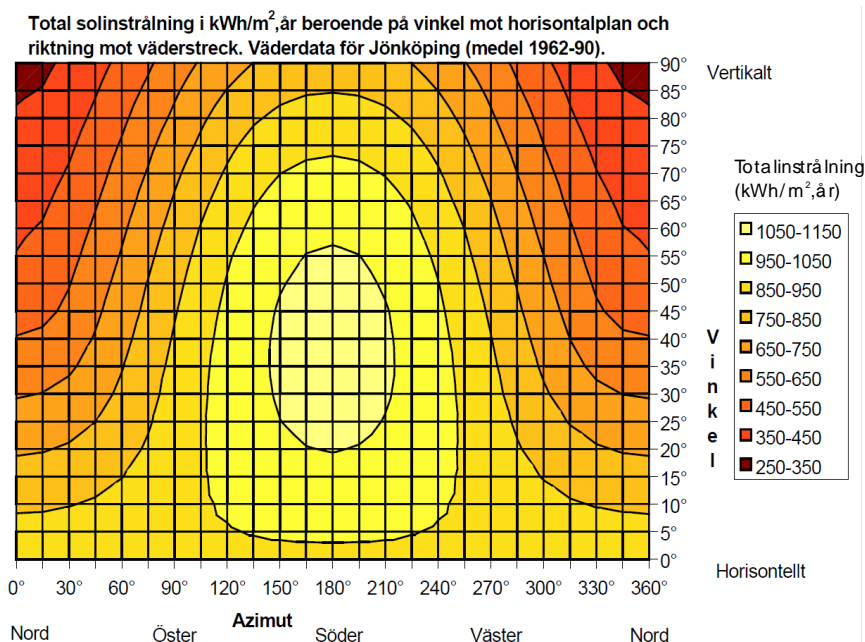
En solcell omvandlar en del av den solenergi som träffar solcellen till elektrisk energi. Effekten från en solcell är direkt proportionell mot mängden sol som träffar ytan [10]. Den spänning som uppstår i en solcell är relativt låg och för att öka spänningen seriekopplas flera celler till en modul, vilken i sin tur kan seriekopplas med fler moduler [11]. Seriekoppling görs exempelvis till dess att strömmen uppgår till 12 eller 24 volts likström. För att kunna koppla solcellerna till elnätet och 230 volt krävs en växelriktare som omvandlar likström från solcellen till växelström.

Det finns olika typer av solceller med olika egenskaper. Exempel på typer är kristallina solceller, tunnfilmssolceller, färgsensibiliserade (Grätzel-) solceller,

nanotrådsolceller och organiska solceller. Utav dessa är de kristallina solcellerna vanligast, följda av tunnfilmssolcellerna [12]. Verkningsgraden skiljer sig typerna emellan och varierar från 7 till 18 % för kommersiella solceller. Vid laborietester har man uppnått verkningsgrader så höga som över 40 %. [11]

2.3.1 Orientering

En solcellspanel får olika mycket instrålning beroende på hur den är riktad. Riktningen för en solcellspanel kan ändras i två dimensioner, azimut (horisontell) och vertikal. Eftersom de vanligen monteras i en fixerad riktning är det viktigt att välja orientering noga. Maximal årlig instrålning erhålls oftast för en södervänd yta där lutningen är densamma som latituden för platsen minus 20° [13]. Maximal instrålning erhålls inom ett visst spann av variation i vinkel och lutning, vilket ses nedan i Figur 2 där ljusare områden indikerar högre solinstrålning.



Figur 2. Total solinstrålning i kWh/m²,år beroende på vinkel och väderstreck. Väderdata för Jönköping (medel 1962-90). Grafik efter NET Ltd/Gutschner. [14]

2.4 Skuggning

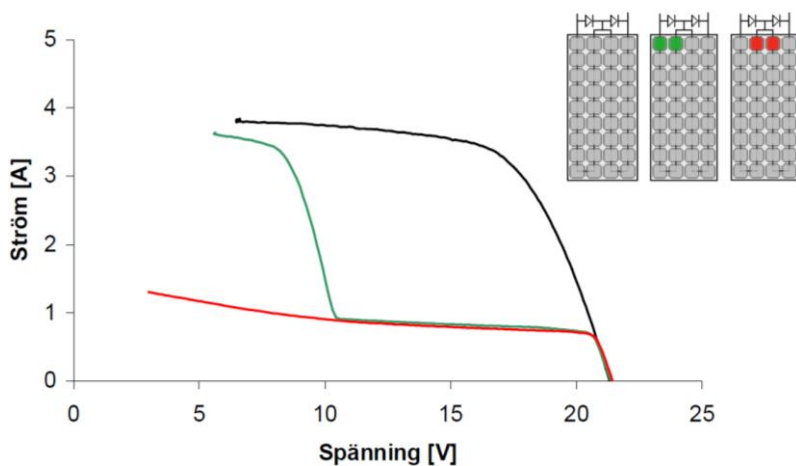
Olika typer av solceller är olika känsliga för skuggning. Detta avsnitt behandlar främst kristallina celler och tunnfilmceller.

Seriekoppling av flera solceller får den positiva följden att spänningen ökar men även en sårbarhet i total verkningsgrad. Genom att seriekoppla flera celler måste strömmen gå genom respektive cell och kan inte leverera starkare ström än den

svagaste länken. I en seriekoppling med tio kristallina solceller kan en totalt skuggad eller trasig solcell alltså nollställa effekten för samtliga celler. För att undgå detta installeras så kallade shuntdioder som kopplar bort oproduktiva delar av modulen. [10]

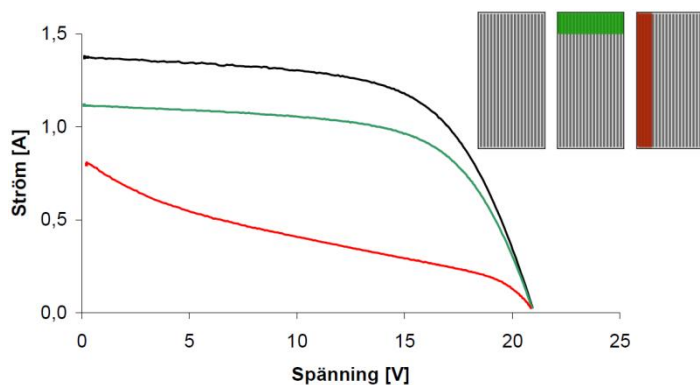
En fördel med tunnfilmssolceller är att cellerna är långa och smala. På så sätt minskar risken för att en hel cell skuggas och de är därför mindre känsliga för partiell skuggning än kristallina celler. Skuggningseffekter kan redovisas i ett ström-spänningsdiagram och så kallade IV-kurvor. Där åskådliggörs hur stor ström som kan levereras vid en given spänning. I rapporten "Skugginverkan på PV-moduler" gjordes en jämförelse mellan en kristallin och en tunnfilmsmodul där skuggan motsvarade 25 % ljusgenomsläpplighet för att representera diffus solinstrålning. [10]

Figur 3 visar att placeringen av shuntdioderna spelar stor roll. När endast den första delkretsen påverkas av skugga har det ingen nämnvärd betydelse vid låg spänning, till skillnad från det andra skuggningsfallet. Detta är fallet trots att lika stor area är skuggad. Även för tunnfilmsceller beror elproduktionen på var skuggningen hamnar men utfallet blir annorlunda mot för de kristallina cellerna. [10]



Figur 3. Skuggmätning på kristallin modul och shuntdioders inverkan. De tre fallen är färgkodade. [10]

Figur 4 visar med grön kurva hur en skugga vinkelrät mot cellernas riktning gör att förlusten blir proportionell mot den skuggade arean. Den röda kurvan liknar situationen när en kristallin delkrets skuggas helt, se Figur 3. Tunnfilmmoduler behöver således inte shuntdioder på samma sätt som kristallina moduler. Slutsatsen är att solceller är mer eller mindre känsliga för skugga men att även partiell skuggning kan få stor negativ inverkan på elproduktion.



Figur 4. Skuggmätning på tunnfilmmodul. De tre fallen är färgkodade. [10]

3 Laserskanning och GIS

3.1 LiDAR och laserskanning

Vid framställning av höjdmodeller och 3D-modeller av byggnader kan man använda en metod som kallas LiDAR (Light Detection And Ranging). Flygplan eller helikoptrar flyger bestämda rutter och skickar ut laserimpulser mot marken. Genom att mäta tiden det tar för laserimpulserna från att de sänds iväg till dess att de reflekteras mot en yta och sedan registreras, erhålls avståndet mellan sensorn och reflektionsytan. Vid upprepade mätningar av impulser kan en bild successivt byggas av ytan, beroende på tid mellan impulser och registreringar. Utveckling inom tekniken har möjliggjort att högre ljusfrekvens och följaktligen tätare pulser lett till mer exakta mätningar. Varje enskild impuls kan ge flera ekon eftersom olika delar av impulsen kan träffa olika ytor. För att detta ska vara möjligt krävs information om sensorns exakta läge och orientering vilket registreras med navigationssatelliter, gyron och accelerometrar. [15]

Laserskanning registrerar i första hand den faktiska ytan sett ovanifrån, vilket inkluderar vegetation, byggnader, broar och annat som avviker från marknivån. För att göra en höjdmodell av marken filtreras detta bort genom statistiska metoder. Resultatet blir ett moln av laserpunkter, även kallat punktmoln eller lasermoln. [15]

3.2 Geografiska InformationsSystem (GIS)

GIS är ett system som digitalt hanterar geografisk information och data i olika lager. Geografisk information är i sin tur data som kan knytas till en geografisk plats med hjälp koordinater, oftast i x- och y- men även z-led. [16]

I geografiska informationssystem hanteras geometriska objekt, varav det finns tre olika typer: punkter, linjer och polygoner. Objekten tilldelas koordinater för att placeras i x-, y- och ibland även i z-led. Punkter, linjer och polygoner kallas *vektordata*. Till vektorerna kan det kopplas ännu mer information, så kallade attribut. En punkt som symboliserar en stad kan således innehålla attribut såsom namn, invånarantal, vilket land den tillhör, statsskick och så vidare. [16]

Ett annat sätt att presentera data är med *rasterdata*. Raster är rutnät med identiskt stora kvadrater där respektive cell representerar ett numeriskt värde. Raster används ofta för att presentera kontinuerlig information, till exempel solinstrålning eller nederbörd. [16]

3.3 ArcGIS

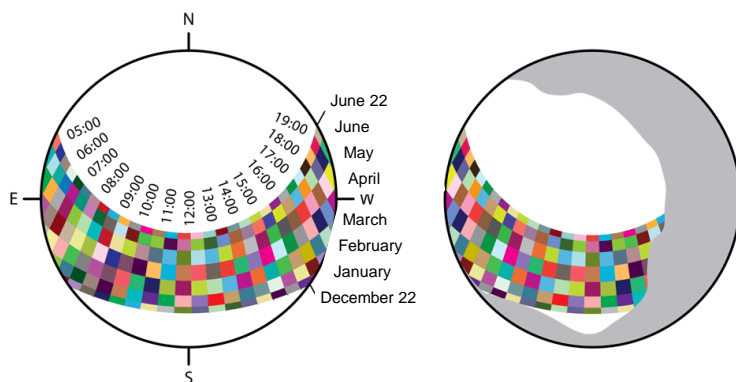
ArcGIS är en mjukvara för geografiska informationssystem och utvecklades av ESRI Inc. I detta examensarbete provades ArcGIS 10.0 och ArcGIS 10.1. Eftersom den senare versionen har en utvecklad hantering av laserdata användes denna. I editeringsprogrammet ArcMap finns olika verktygslådor, toolboxes, som kan utföra olika operationer och beräkningar. Exempel på sådana verktygslådor är *3D Analyst Tools* och *Spatial Analyst Tools*. För att kunna nyttja solberäkningsverktyget *Solar Radiation Tool* krävs den sistnämnda verktygslådan *Spatial Analyst Tools*.

3.3.1 Solar Radiation Tool

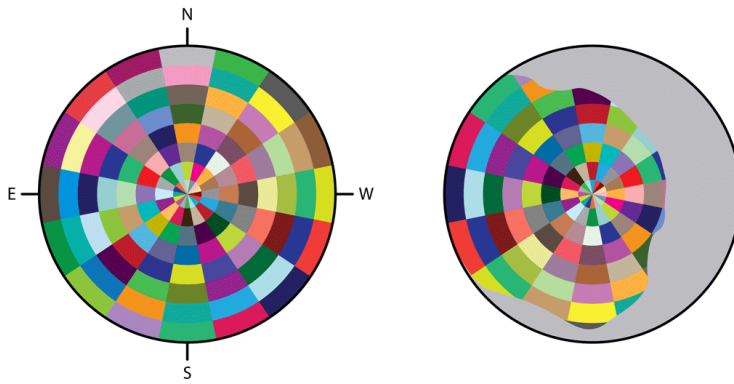
I ArcGIS 9.2 fanns den första modellen för att beräkna solinstrålning och kallades då *Solar Analyst*. Metoden för att beräkna solinstrålningen baseras på en algoritm för att bygga en hemisfäriskt visuell horisont. Denna utvecklades av Rich et al. i två omgångar, 1990 och 1994, för att sedan vidareutvecklas av Fu och Rich 2002 och 2004. I senare upplagor av ArcGIS heter verktyget *Solar Radiation* men skillnaderna är små, endast några buggar är åtgärdade till de senare versionerna. [17]

Beräkningarna kan sammanfattas i följande steg:

1. Skapa ett uppåtriktat hemisfäriskt siktfält beroende på plats och omgivande topografi (inklusive byggnader och vegetation).
2. Skapa en solkarta beroende på latitud och tidsintervall.
3. Skapa en himmelkarta beroende på önskat antal riktningar.
4. Överlappa solkartan och himmelkartan med siktfältet för att beräkna direkt, respektive diffus solinstrålning.
5. Upprepa för samtliga pixlar eller punkter. [18]



Figur 5. Vänster bild: Solkarta för en punkt 45 grader nord, räknat från 22 december till 22 juni, indelad i sektorer beroende på antal beräkningar. Höger bild: Solkartan med ett beräknat, begränsat siktfält för att illustrera direkt solinstrålning.



Figur 6. Vänster bild: Himmelkarta indelad i sektorer både i horisontellt och vertikalt, sektorerna visar var diffus solinstrålning kommer ifrån. Höger bild: Himmelkartan med ett beräknat siktfält för att illustrera diffus solinstrålning. Färgerna har inga specifika värden utan visar endast segmentuppdelningen. [18]

Den globala solinstrålningen beräknas för en area eller specifika punkter som summan av direkt och diffus solinstrålning

$$Glob_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot} \quad (5)$$

3.3.2 Beräknad direkt solinstrålning

Direkt solinstrålning är summan av direkt solinstrålning för samtliga sektorer från solkartan:

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta,\alpha} \quad (6)$$

Den direkta solinstrålningen i varje sektor från solkartan ($Dir_{\theta,\alpha}$) utgår från en centroid med zenitvinkeln (θ) och azimutvinkeln (α)

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{const} * \beta^{m(\theta)} * SunDur_{\theta,\alpha} * SunGap_{\theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (7)$$

- S_{const} - Solarkonstanten 1367 W/m^2 är den solstrålning som når atmosfären vid ett medelavstånd från jorden till solen.
- β - Atmosfärens transmissivitet motsvarar genomsläpligheten för solinstrålning.
- $m(\theta)$ - Den relativa optiska vägsträckan mäts som andel i förhållande till den zenitala vägsträckan. Se ekvation (8)
- $SunDur_{\theta,\alpha}$ - Tidsintervallet för respektive himmelsektor.
- $SunGap_{\theta,\alpha}$ - Andel ohindrad area mot solen i varje sektor i solkartan.
- $AngIn_{\theta,\alpha}$ - Infallsvinkeln mellan himmelsektorns centroid och normalaxeln mot ytan. Se ekvation (9).

Relativ optisk längd, $m(\theta)$, bestäms av solens zenitvinkel och höjden över havsnivå. För zenitvinklar under 80° , kan följande ekvation tillämpas:

$$m(\theta) = \frac{(e^{-0.000118 * Elev - 1.638 * 10^{-9} * Elev^2})}{\cos(\theta)} \quad (8)$$

- θ - Solens zenitvinkel.
- Elev - Höjden över havsnivå (m).

Effekten som beror på ytans orientering tas hänsyn till genom att multiplicera cosinus för infallsvinkeln. Infallsvinkeln ($AngInSky_{\theta,\alpha}$) beräknas enligt:

$$AngIn_{\theta,\alpha} = \arccos(\cos(\theta) * \cos(G_z) + \sin(\theta) * \sin(G_z) * \cos(\alpha - G_a)) \quad (9)$$

- G_z - Zenitvinkeln mot ytan. För zenitvinklar större än 80° blir spridning viktigt.
- G_a - Azimutvinkeln för ytan.

3.3.3 Beräknad diffus solinstrålning

För varje himmelsektor beräknas den diffusa solinstrålningen mot dess centroid (Dif). Detta integreras över det valda tidsintervallet och korrigeras med andelen ohindrad area ($SunGap_{\theta,\alpha}$) och infallsvinkeln enligt följande:

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SunGap_{\theta,\alpha} * Weight_{\theta,\alpha} * \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad (10)$$

- R_{glb} - Global normalinstrålning, se ekvation (11).
- P_{dif} - Andelen diffus global normalsolstrålning. Normala värden är 0,2 för en väldigt klar himmel och 0,7 vid höga molnförhållanden.
- Dur - Tidsintervallet för analysen.
- $SunGap_{\theta,\alpha}$ - Andelen synlig himmel för respektive himmelsektor.
- $Weight_{\theta,\alpha}$ - Andelen diffus solinstrålning som kommer från en given himmelsektor relativt mot alla sektorer. Se ekvation (12) och (13).
- $AngIn_{\theta,\alpha}$ - Infallsvinkeln mellan himmelsektorns centroid och normalaxeln mot ytan.

Den globala normalinstrålningen (R_{glb}) beräknas genom att summera den direkta solinstrålningen från alla sektorer oberoende infallsvinkel. Därefter korrigeras andelen direkt solinstrålning enligt $1-P_{dif}$

$$R_{glb} = \frac{(S_{const} \Sigma(\beta^{m(\theta)}))}{1-P_{dif}} \quad (11)$$

ArcGIS tillåter två typer av himmel, *uniform sky* och *standard overcast sky*. Den förstnämnda antar att diffus strålning är samma från alla riktningar. I den sistnämnda typen varierar den diffusa strålningen med zenitvinkeln.

För den uniforma himmelmodellen beräknas $Weight_{\theta,\alpha}$ enligt följande:

$$\text{Weight}_{\theta,\alpha} = \frac{(\cos(\theta_2) - \cos(\theta_1))}{\text{Div}_{\text{azi}}} \quad (12)$$

- θ_1, θ_2 — De gränsande zenitvinklarna för himmelsektorn.
- Div_{azi} — Antal azimutala indelningar i himmelkartan.

Modellen med varierande diffus strålning beräknas $\text{Weight}_{\theta,\alpha}$ enligt:

$$\text{Weight}_{\theta,\alpha} = \frac{(2\cos(\theta_2) + \cos(2\theta_2) - 2\cos(\theta_1) - \cos(2\theta_1))}{(4 * \text{Div}_{\text{azi}})} \quad (13)$$

Total diffus solinstrålning för positionen beräknas som summan av den diffusa solinstrålningen från samtliga sektorer från himmelkartan:

$$\text{Dif}_{\text{tot}} = \sum \text{Dif}_{\theta,\alpha} \quad (14)$$

[19]

4 Solelpotentialbedömning av Lunds kommun

4.1 Data

2009 lät Lunds Kommun göra två flygningar med laserskanning, varav en låghöjdsflygning med helikopter över centrala Lund och en höghöjdsflygning med flygplan över kommunen. Utöver detta köptes höjddata från Lantmäteriets nya nationella höjdmodell där flygningen gjordes år 2010. För att kunna lokalisera byggnader efter att solberäkningarna är gjorda behövs ett byggnadslager. Detta uppdaterades våren 2013.

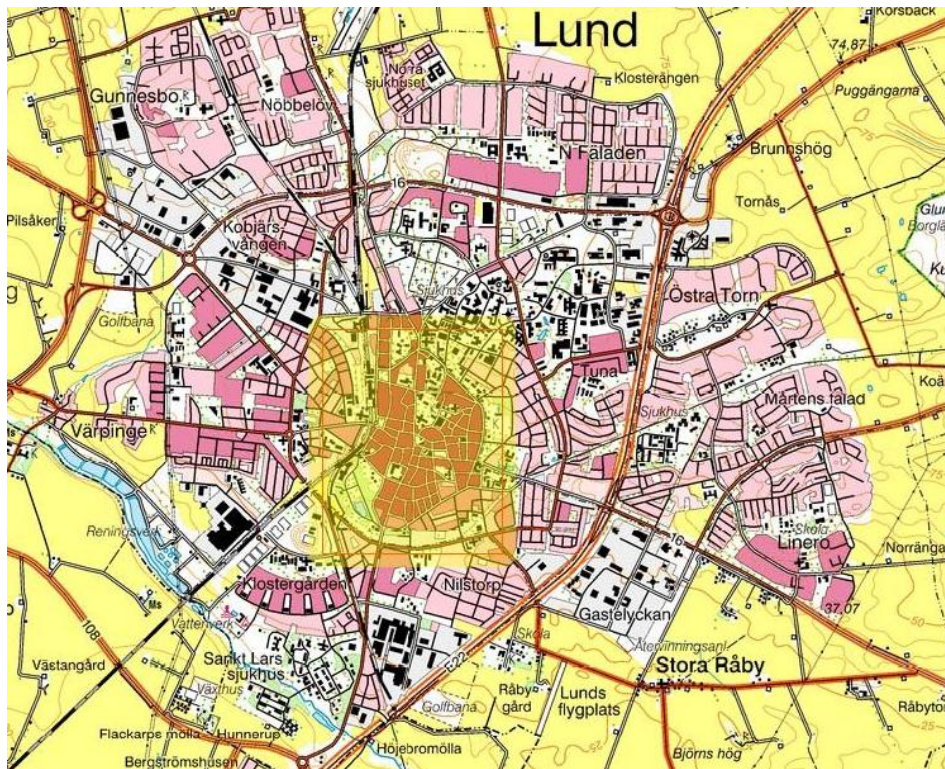
4.1.1 Låghöjdsflygning

Blom Sverige gjorde 2009 en laserskanning med helikopter över centrala Lund. Flyghöjden var 300 meter, punkttätheten 15/m² och punkterna täckte en area på 2,5 km². Området visas i Figur 7. Data som kom från Blom levererades i så kallat cenzi-format, vilket står för Class, Easting, Northing, Z och Intensity. De två klasserna är mark samt icke mark. X och Y är koordinater enligt referenssystemet Sweref 99 13.30, Z är koordinat i RH 2000 (Rikets höjdsystem). I är intensitet och ett relativt mått på hur mycket av ljuset som returneras. Intensiteten varierar ungefär mellan 2-7 i steg om 0,1.

Tabell 1. Informationsutdrag från cenzi-fil.

Klass (C)	X (Easting)	Y (Northing)	Z (Z)	Intensitet (I)
2	149422.980	6155998.010	72.490	4.1
1	149422.810	6155997.690	72.550	4.0
2	149422.620	6155997.350	72.510	4.0
1	149422.470	6155997.070	72.590	3.6

För att kunna läsa in informationen från cenzi-filerna i ArcMap var filerna tvungna att konverteras till filformatet LAS. Detta gällde för både låghöjds- och höghöjdsflygningen.



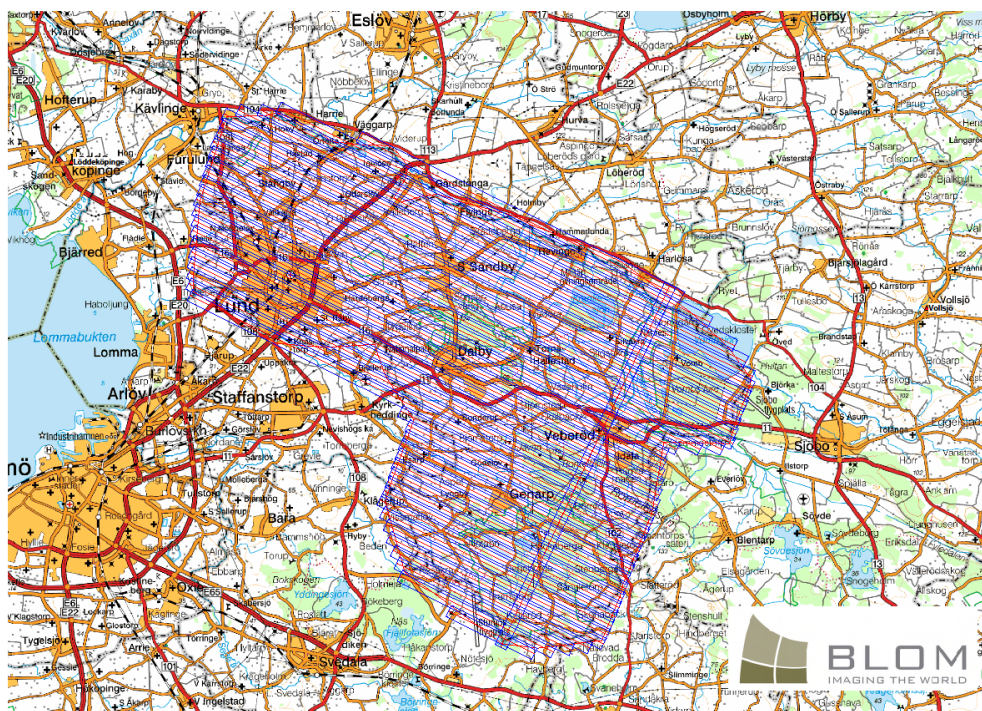
Figur 7. Område för låghöjdsflygning, markerat med transparent gult i centrum av bilden.



Figur 8. LAS-filernas utbredning för låghöjdsflygning där en ruta motsvarar en fil.

4.1.2 Höghöjdsflygning

I samband med helikopterflygningen gjordes även en mer omfattande skanning med flygplan. Denna gjordes från 1000 meters höjd och täckte hela kommunen med en punkttäthet på $1,6/m^2$, se Figur 9. Den totala arean för skanningen är cirka 500 km^2 . Filformatet var även här cenzi med skillnaden att intensiteten varierade mellan 100-350 i steg om 10. Anledningen till att det skiljer sig mellan de två flygningarna är att reflektionen generellt sett minskar med kvadraten av avståndet [20]. Ett tre gånger längre avstånd medför en niondel av reflektionen.



Figur 9. Flygstråk för höghöjdsflygning över Lunds kommun.

4.1.3 NNH (Ny Nationell Höjdmmodell)

Regeringen har beslutat att en ny nationell höjdmmodell krävs för att kunna ge noggrann information inom arbete med klimatanpassningar och vid miljö- samt infrastrukturarbete. Därför har regeringen gett Lantmäteriet i uppdrag att mellan 2009-2015 ta fram en ny nationell höjdmmodell. [21]

Målet med höjdmodellen är att göra en rikstäckande modell i samma kvalitet där medelfelet i höjd är mindre än 0,5 meter för ett två meters rutnät. Insamlingen av data sker genom flygburen laserskanning och påbörjades i juli 2009 med ambition att vara klar 2013. Allteftersom data samlas in, efterbehandlas den och den nya nationella höjdmodellen planeras vara helt klar 2015. När ett område är skannat tar det cirka sex månader innan data kan köpas in av intressenter. [22]

Insamlingen sker på 1700-2300 meters höjd med en punkttäthet på 0,5-1 punkt per kvadratmeter. Noggrannheten mot en horisontell och hård yta är ofta bättre än 0,1 meter i höjd och kring 0,3 meter i plan. Däremot blir noggrannheten i höjd sämre i områden med kraftig sluttning. [23]

4.2 Genomförande

Om de befintliga klassificeringarna av laserdata ska användas för solberäkningar är det viktigt att klassificeringarna är noggranna. De laserdata som fanns att tillgå i detta projekt hade inte tillräckligt exakta klassificeringar för att detta skulle nyttjas.

De laserdata som användes till solpotentialkartan i Lund var från låghöjdsflygningen så långt den sträckte sig och därefter kompletterat av höghöjdsflygningen. Med punktmolnen som utgångspunkt kan processen kort illustreras på följande sätt:

1. En fiktiv duk läggs över alla punkter för att skapa en kontinuerlig höjdmodell.
2. Höjdmodellen delas in i ett rutnät.
3. Beräkningar för solinstrålning görs på respektive ruta.
4. Tak klipps ut för att på vilka sedan kunna beräkna totalinstrålning och dela upp instrålningen i olika kategorier.

Nedan följer processen mer utförligt. För ännu mer specifik information, se bilaga.

4.2.1 Skapa LAS Dataset

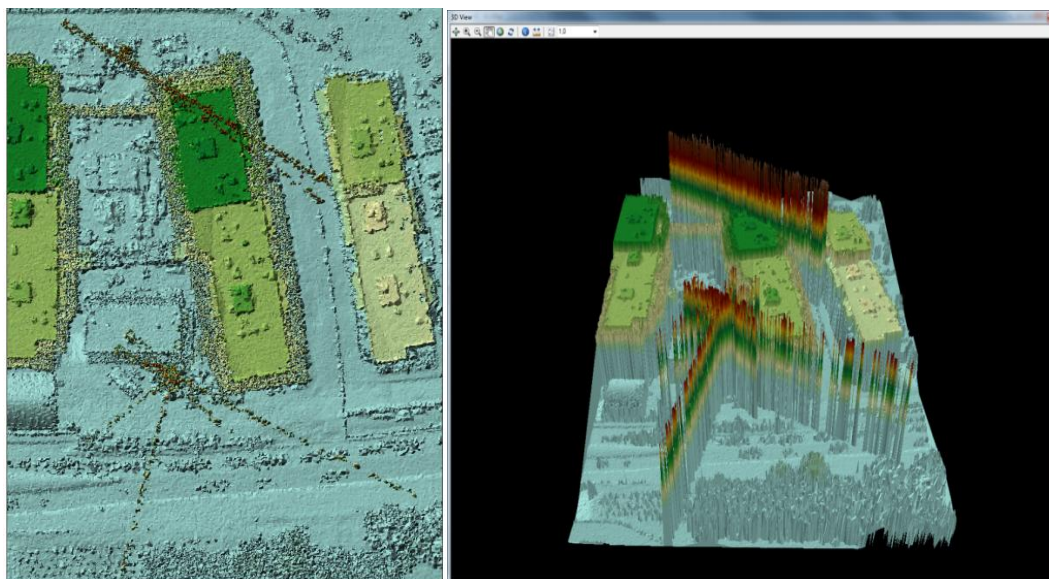
Första steget i skapandet av solpotentialkarta är att importera laserdata till ArcMap, vilka måste vara i filformatet LAS.

4.2.2 Omklassificering

Med hjälp av klassificering kan data delas upp i olika grupper beroende på vad datasetet gestaltar. De data som fanns att tillgå hade inga specifika klasser för kraftledningar eller lyftkranar och för att hitta dessa gjordes en manuell visuell genomgång.

Ett problem med rasterhantering är att cellerna endast innehåller ett höjdvärde inom en cell. En cell i ett höjdraster kan således inte säga vad som finns under den. En fågel på 200 meters höjd framstår i rasterformat som om den satt på en lika hög pelare, format som en fågel sett ovanifrån. Ett annat problem är lyftkranar som kan registreras vid laserskanning. Dessa medför två problem. Det första problemet är att de normalt förflyttas efter flygningen och inte orsakar skuggning därefter. Det andra

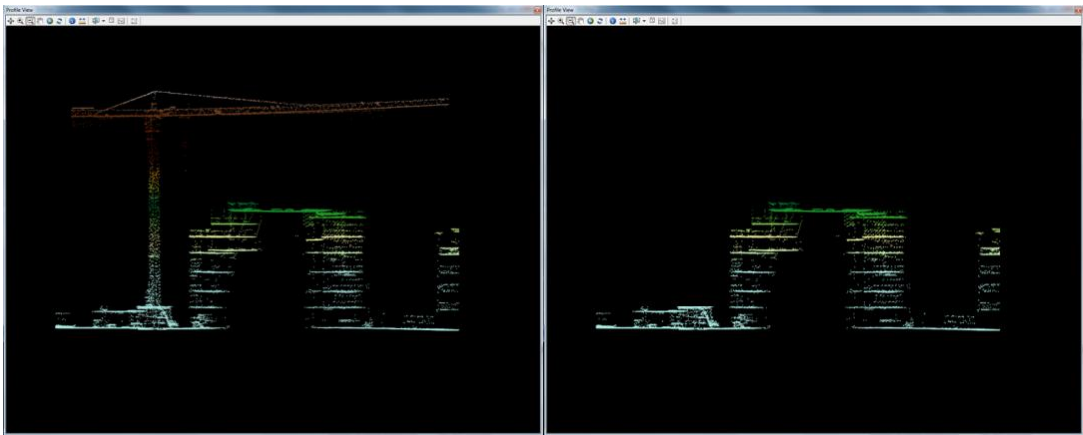
problemet är att skugginverkan inte motsvarar den faktiska. Nedan syns det hur en lyftkran ser ut i rasterformat och vilken skuggeffekt den får vid en solsimulering.



Figur 10. Till vänster: Lyftkranar detekterade vid manuell genomgång, sett ovanifrån..Till höger: Potentiellt resultat av rastering av samma lyftkranar. Färgskalorna symboliserar höjd.

Som synes i figurerna ovan har lyftkranen flera armar, något som kan uppstå för rörliga objekt vid laserskanning. Med funktionen 3D View visas till höger i Figur 10 hur punktmolnet kan uppfattas när det konverterats till raster. Då funktionen tillåter tredimensionell panorering kan skuggeffekterna föreställas, hur fallet blir om punkterna inte klassas om.

Med funktionen Profile View kan punktmolnet visas från sidan och det blir tydligt att det representerar en lyftkran. För att ta bort denna från punktmolnet klassas samtliga punkter om till klasskod 7 som för programmet betyder störning. Därefter finns informationen om punkterna kvar men de tas ingen hänsyn till vid beräkningar och konverteringar.



Figur 11. Till vänster: Tydlig lyftkran detekterad. Till höger: Lyftkran omklassad till störning. Färgskalan symboliserar höjd.

Kraftledningar får samma typ av skuggeffekt och måste klassas om även de där de kan störa.

4.2.3 Avvikande punkter

Laserdata kan innehålla felaktiga punkter som kan registreras 100-tals meter både över och under marknivå. Därför är det viktigt att klassificera om dessa punkter för att de inte ska leda till oriktiga höjdmodeller.

I verktygslådan 3D Analyst Tools finns ett verktyg, *Locate Outliers*, som kan lokalisera avvikande punkter utanför ett visst intervall. Det är då intressant att definiera det intervall från där marken börjar till högsta byggnadspunkten. Fåglar som flyger högre än högsta hustak upptäcks därmed enkelt och hamnar i intervallet med avvikande punkter. Genom att experimentera fram till vilka höjder marken börjar och byggnaderna slutar, kunde en del avvikande punkter lokaliseras för olika områden och klassas om till störningspunkter.

4.3 Konvertering till raster

Eftersom Solar Radiation endast kan utföra beräkningar på raster, måste LAS-filerna konverteras. Det finns ett färdigt konverteringsverktyg som konverterar LAS-filer till raster enligt olika metoder, *LAS Dataset to Raster*. Den använder sig antingen av *binning* eller *triangulering*, vilka båda har flera specifika undermetoder. Båda metoderna provades i projektet och jämfördes med ortofoto² och ledde fram till att binning med hänsyn till högsta värdet gav bästa resultat.

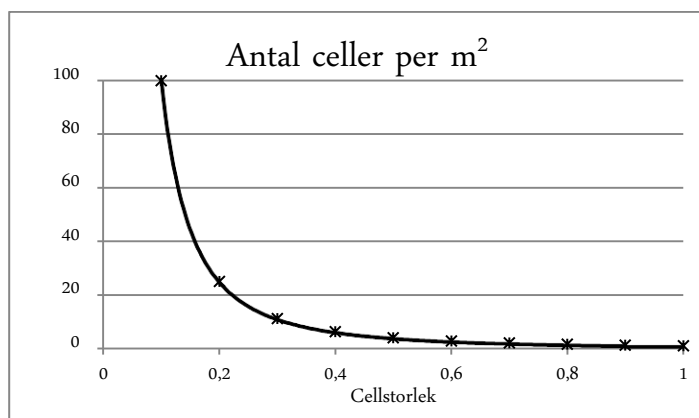
² Ortofoto är ett omprojicerat fotografi där hela ytan har samma skala.

4.3.1 Binning

Vid binning ges cellen det värde av punkterna som hamnar inom cellen enligt någon av följande tekniker: *medelvärde*, *minimum*, *maximum*, *inverterad avståndsviktning* eller *närmaste punkt*. Här valdes det maximala värdet, vilket gör att varje cell får värdet för den högsta punkten. För celler som inte innehåller några punkter finns följande fyllnadsmetoder: *ingen*, *enkel* (ger medelvärdet för kringliggande celler), *linjär* eller *närmaste granne*. Här valdes interpoleringstekniken närmaste granne. Denna teknik ger varje cellen samma värde som närmast belägna kända punkt.

4.3.2 Cellstorlek

För att hanteringen av data inte ska bli onödigt tidskrävande, är det viktigt att inte arbeta med högre upplösning än vad det finns intresse eller data för. När punkter omvandlas till celler kan valet av en för stor cellstorlek resultera i dålig upplösning och en för liten cellstorlek göra hanteringen omotiverat tung. Därför bör cellstorleken väljas så att den matchar punkttätheten för att ge en informationsrik bild utan att bli för påfrestande för hanteringen. Eftersom en minskad cellstorlek medför exponentiell ökning celler per kvadratmeter är det extra viktigt att inte använda för liten cellstorlek.



Figur 12. Inverkan på antal celler beroende på hur cellstorleken väljs.

Låghöjdsflygningen hade 15 punkter per kvadratmeter, vilket motsvarar en cellstorlek på $0,26 \times 0,26$ meters cellstorlek om punkterna är perfekt spridda.

Höghöjdsflygningen hade 1,6 punkter per kvadratmeter och motsvarar enligt samma resonemang $0,79 \times 0,79$ meters cellstorlek. För att underlätta en blandad användning av båda dataseten valdes cellstorlekarna till $0,3 \times 0,3$ och $0,6 \times 0,6$ meter för låghöjds- respektive höghöjdsflygningen. Ett val av $0,3 \times 0,3$ meters cellstorlek för båda var inte möjligt eftersom höghöjdsflygningen täckte ett så pass stort område att solberäkningen skulle bli tidsmässigt ohållbar.

4.4 Uppdelning av raster

Genom att dela upp raster i mindre områden, minskar konsekvenser vid eventuellt avbrott i program eller process. Varje punktberäkning i solanalysen tar hänsyn till omkringliggande topografi. Med en begränsad distans minskar även tidsåtgång för dessa beräkningar. Om ytorna delas upp utan att överlappa varandra riskerar detta att ge felaktig solinstrålning på en del tak. Risken finns då att höga objekt som hamnar precis i en intilliggande ruta inte ger den skuggande effekt som den egentligen har. En överlappning av angränsanden raster gör att denna effekt kan undvikas. Vid överlappningen ges samma geografiska punkter minst två värden, av vilka det minsta värdet ska väljas. En solberäkning gjordes för ett område innehållande ett vattentorn på cirka 35 meter, varpå skuggeffekten kunde mätas norr om tornet. Mätningen visade att skuggningen upphörde cirka 35-40 meter bakom tornet, varpå 50 meters överlappning valdes till uppdelningen. Anledningen till att vattentornet valdes var dess höga höjd och smala utformning, vilket gav en tydlig skuggeffekt runt omkring.

4.5 Kalibrering Solar Radiation Tool

Solar Radiation ger ett resultat som beror på de tre parametrarna latitud, andel diffus solinstrålning och transmissivitet. För att säkerställa riktigheten i resultatet från simuleringarna kalibrerades verktyget mot den verkliga solinstrålningen som i sin tur hämtades från en meteorologisk databas, Meteororm.

4.5.1 Meteororm

Till kalibreringen användes datorprogrammet Meteororm som innehåller lagrad klimatdata och solinstrålning för Lund. Programmet räknar därefter om instrålningen till ytor med vald lutning och vinkel.

För en södervänd yta lutad 40 grader samt en horisontell yta blev solinstrålningen 1170, respektive 980 kWh/m²,år enligt åren 1981-2000. Eftersom det endast finns två aktuella parametrar att ändra i solsimuleringen för Lund, gjordes en manuell kalibrering av dessa. Genom att köra Solar Radiation för ett horisontellt plan och en yta med 40 graders lutning upprepade gånger med varierade parametrar erhöles följande resultat:

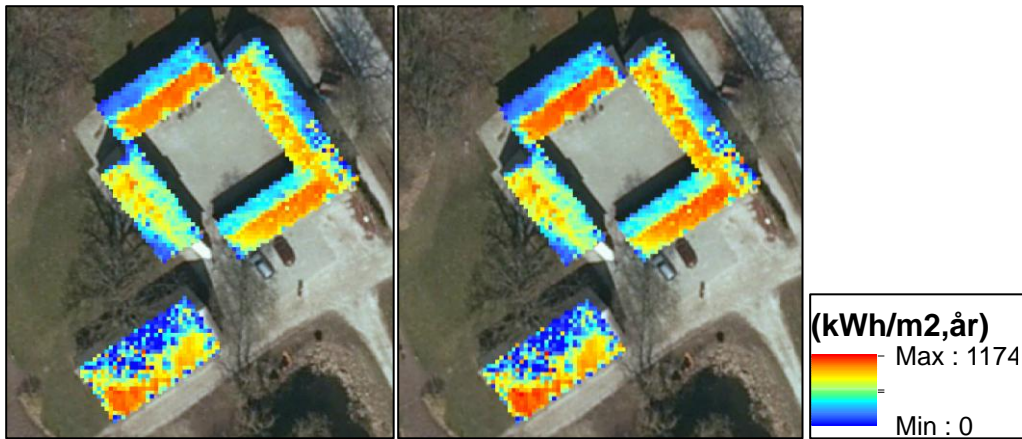
Tabell 2. Kalibrering av Solar Radiation gentemot Meteororm.

Parametrar		Solar Radiation		Jämförelse mot Meteororm	
Diffus andel (0-1)	Transmissivitet (0-1)	Solinstrålning 40 graders lutning (kWh/m ² ,år)	Solinstrålning horisontell yta (kWh/m ² ,år)	Förhållande, lutande plan	Förhållande, horisontellt plan
Default 0,3	Default 0,5	940	800	80,3%	81,6%
0,4	0,5	1040	920	88,9%	93,9%
0,45	0,5	1100	1000	94,0%	102,0%
0,5	0,45	980	900	83,8%	91,8%
0,55	0,45	1060	965	90,6%	98,5%
0,6	0,43	1066	1025	91,1%	104,6%
0,33	0,55	1150	990	98,3%	101,0%
0,34	0,55	1160	1000	99,1%	102,0%
0,35	0,55	1175	1015	100,4%	103,6%

Denna kalibrering gav bäst resultat med diffus andel 0,33 och transmissivitet 0,55. För att kontrollera att kalibreringen inte gäller för endast horisontella ytor och 40 graders lutning gjordes en verifiering mot en södervänd yta med 30 graders lutning. Enligt Meteororm motsvarar det en instrålning på 1160 kWh/m²,år, vilket även erhöles från simuleringen med Solar Radiation. Vidare testades även en 55 grader lutande yta mot sydväst, vilket gav 1080 samt 1090 kWh/m²,år från Solar Radiation respektive Meteororm. Därmed ansågs modellen tillräcklig kalibrerad.

4.6 Solberäkning (Solar Radiation)

Att göra solberäkningar på stora områden kräver mycket tid och datorkraft. I Solar Radiation finns två möjligheter till att göra solberäkningar, punktmässigt eller över en area. Ytberäkningen behandlar alla punkter inom ett område och tar således längre tid än att beräkna solinstrålning för specifikt utvalda punkter. Punktberäkning kräver å andra sidan fler delsteg både före och efter beräkningen. Båda alternativen testades varpå solberäkningarna för solpotentialkartan i Lund genomfördes på ytor då behandlingen var enklare att automatisera och uppvägs tidsåtgången. Resultat för solinstrålning illustreras i figuren nedan och skillnaden är knappt märkbar.



Figur 13. Solberäkning för area till vänster och punkter till höger. Färgerna motsvarar instrålning enligt skalan med blått för låg och rött för hög instrålning.

Hur lång tid solberäkningen tar beror på datorns prestanda. En dator med hög prestanda klarar av flera simultana beräkningar utan att det tar längre tid. För att optimera datorkraften i detta fall kördes två simultana solberäkningar åt gången, vilket tog cirka 10 timmar för varje 2,5*2,5 km ruta med 0,6*0,6 m cellstorlek. För att göra upprepade solberäkningar användes sekvensverktyget Model Builder.

4.7 Sammanfogning av raster

Resultaten från solberäkningarna var ett antal kvadratiska raster med årliga instrålningsvärden för alla celler. Genom att använda ett verktyg, *Mosaic To New Raster*, kunde samtliga raster sammanfogas. I de överlappade områdena valdes det lägsta instrålningsvärdet i respektive cell. På så sätt inkluderades eventuella skuggor som skulle falla bort utan överlappning.

4.8 Klippa ut tak

Eftersom solberäkningen gjordes på hela området klipptes värdena för solinstrålning på respektive tak ut från solrastret med hjälp av byggnadspolygoner och resulterade i, här kallat, soltak.

4.9 Kategorisering och areaberäkning

För att en användare av solkartan inte ska behöva vara tekniskt insatt i solceller och energi, gjordes en kategorisering av solinstrålningen. Att skilja på vad som är bra och dålig solinstrålning kan vara subjektivt och det är svårt att dra absoluta gränser. Installation av solceller i Sverige kan vara lönsamt, trots att förutsättningarna inte är desamma på breddgrader närmare ekvatorn. Gränsen för vad som är bra och dålig solinstrålning kan därför ses relativ till den maximala. Jouri Kanters, doktorand på

Energi och Byggnadsdesign, LTH har gjort en sammanställning av 19 olika solpotentialkartor och kom fram till medelvärden för gränser till kategorierna:

Tabell 3. Medelvärde för kategorigränser bland 19 solpotentialkartor. Gränserna är relaterade till maximal solinstrålning på respektive plats.

Kategori	Undre gräns (procent av maximal solinstrålning) [24]
<i>Reasonable</i>	65,2 %
<i>Good</i>	76,8 %
<i>Very good</i>	89,2 %

Alla kartor hade inte samma antal kategorier, vilket gör att gränserna får betraktas som ungefärliga.

I Lund är den maximala solinstrålningen årligen nästan 1170 kWh/m² [25]. I projektet bestämdes kategoriseringen till:

Tabell 4. Bestämda kategorigränser för Lunds solpotentialkarta.

Kategori	Undre gräns (procent av maximal solinstrålning)	Instrålning (kWh/m ² ,år)	Exempel
<i>Ej lämplig</i>	0 %	< 800	nordriktade tak
<i>Mindre god</i>	68 %	800 – 900	nordriktade tak med vinkel < 20 grader och fasader SO – SV
<i>God</i>	77 %	900,1 – 1020	horisontella tak och tak mellan O – V med vinkel < 40 grader
<i>Mycket god</i>	87 %	1020,1 <	tak mellan SO – SV och vinkel > 10 grader

Först kategoriserades instrålningen enligt de fyra kategorierna. För att beräkna area för respektive kategori gjordes rasterkategorierna om till polygoner och lades i en geodatabas. Där beräknas arean automatiskt fram och finns som temporärt attribut. Genom att kopiera de temporära areaattributen till fasta attribut, bevarades informationen för vidare hantering. Därefter konverterades polygonerna till punkter för att slutligen summeras inom varje byggnadspolygon.

Ett problem med den automatiska areaberäkningen i geodatabasen är att den endast räknar area enligt x- och y-koordinater för huskroppen och inte tar hänsyn till höjden. Därför anges areor i geodatabasen endast för vad som betraktas horisontella ytor, oavsett vilken lutning taket har. För att omvandla horisontell area till takarea,

uppskattades en genomsnittlig lutning på tak till 30 grader. Enligt trigonometriska lagar innebär det att tak med 30 graders lutning är 15 % större än horisontell area:

$$\cos(30) = \frac{1}{X} \rightarrow X = 1,15 \quad (15)$$

Taket fick därför den schablonmässiga arean av 1,15 gånger den horisontella.

4.10 Totalinstrålning

Instrålningen är tidigare beräknad för alla individuella celler på samtliga tak. Därefter summerades dessa värden inom varje tak. Då instrålningen från solberäkningen mäts per kvadratmeter, måste instrålningen räknas om i förhållande till cellstorlekarna.

$$totalinstrålning_{tak} = instrålning_{sum}/m^2 * cellstorlek(m)^2 \quad (16)$$

Den totala instrålningen för ett hus där 0,3*0,3 meters cellstorlek använts blev alltså 0,09 gånger det summerade värdet.

4.11 Presentation på hemsida

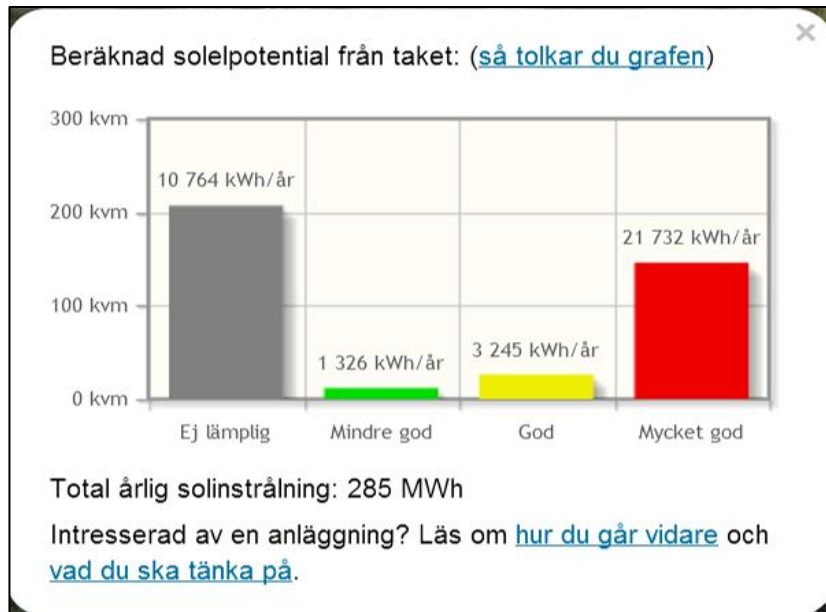
Efter ovanstående beräkningar blev resultatet en databas innehållande två polygonlager med byggnader. Dessa byggnadslager innehöll attribut för area i respektive kategori samt totalinstrålning. Ena lagret innehöll byggnadspolygoner med beräkningar från låghöjdsflygningen och en motsvarande för höghöjdsflygningen. Därefter presenterades dessa i en internetapplikation.

Till applikationen gjordes valet att visa solinstrålningen med glidande färgskala eller enligt de bestämda absoluta gränserna för kategorierna Ej lämplig, Mindre god, God och Mycket god enligt kapitel 4.9. På detta sätt kan användaren välja ett mer eller mindre avancerat visningsläge. Dessutom ges valet att visa solinstrålningen mot taken med bakgrunden antingen i ortofoto eller som karta. Anledningen till detta är att kunna visa eventuell vegetation som kan störa solinstrålningen.



Figur 14. Fyra sätt att se solpotentialen via internetapplikationen: Uppe till vänster, en utzoomad bild över hela området med karta som bakgrundsbild. Uppe till höger, en inzoomad bild över ett område som visar kategoriserad instrålning. Nere till vänster, ett område med glidande färgskala. Nere till höger, ett område med glidande färgskala och ortofoto som bakgrund.

När användaren klickar på ett tak, dyker en informationsruta upp. Där visas en graf över area för de olika kategoriserade ytorna och potentiell solesproduktion därifrån samt total årsinstrålning mot taket, se Figur 15. Den beräknade solcellsproduktionen antas omvandla instrålningen till el med verkningsgrad 0,13. Detta antas rimligt då kommersiella verkningsgrader uppgår till 18 % [12], vilket innebär att förluster, som högre temperaturer medför, kan innefattas i 13 %.



Figur 15. Informationsruta vid klickande på tak i solkartan.

Syftet med en solpotentialkarta är att nå ut till många personer. Därför är det viktigt att kartan är tydlig för användaren. Det finns dock en anledning att visa instrålningen både enkelt i kategorier och mer avancerat med en flytande skala. Solberäkningen tar hänsyn till det högst belägna inom varje byggnads fotavtryck. Det innebär till exempel att ett träd, beroende på form, som växer in över ett nordsluttande tak kan indikera högre instrålning än vad taket faktiskt får. Detta åskådliggörs däremot med hjälp av den flytande färgskalan för solinstrålning, vilket gör att instrålningen ser ojämn och fläckig ut. Den glidande skalan ökar möjligheten för användaren att själv tolka in huruvida det är faktisk solinstrålning mot taket eller inte. Ett exempel visas i Figur 16, där ett träd hänger över taket uppe i vänstra hörnet och ger upphov till bättre solinstrålning än vad taket faktiskt får.



Figur 16. Ett fall där summering av solinstrålning ger taket högre instrålning än vad som faktiskt skulle nå taket, på grund av trädet.

För mer information, se www.solkartan.se.

4.12 Resultat

Resultatet blev en solpotentialkarta för hela Lunds kommun. Kartan täcker en area av 500 km² och 50 000 tak. Resultatet är presenterat på www.solkartan.se där användare kan söka på ett hus via adress eller undersöka kartan på egen hand. Som nämnt får användaren information om solinstrålningen när denne klickar på en byggnad.

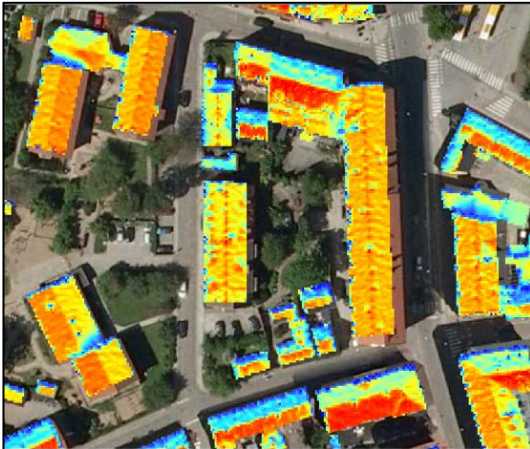
Förutom kvalitet på indata, skiljer sig hanteringen av hög- och låghöjdsflygningen endast vid val av cellstorlek, all övrig process var identisk. Nedan visas ett exempelområde med ortofoto, solberäkning för låghöjdsflygning med liten cellstorlek och höghöjdsflygning med större cellstorlek.

Ortofoto

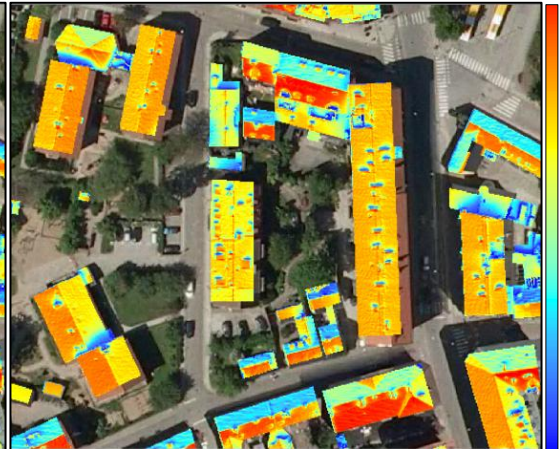


Figur 17. Ortofoto över exempelarea.

Låghöjdsflygning, cellstorlek 0,3*0,3 m



Höghöjdsflygning, cellstorlek 0,6*0,6 m



Figur 18. Till vänster: beräknad solinstrålning från låghöjdsflygningen på tak i exempelarea. Till höger: beräknad solinstrålning från höghöjdsflygningen på samma tak och område. Färgskalan längst till höger visar instrålningen från 0 – 1170 kWh/m²,år där rött är högst.

Här syns skillnader i kvalitet men det är svårt att säga om det beror på indata eller val av cellstorlek. Därför görs en analys nedan i kapitel 5.

5 Jämförelse och analys av dataset

De tre dataseten som ska jämföras är laserdata från låghöjdsflygningen, höghöjdsflygningen och NNH-flygningen, för mer beskrivning se kapitel 4.1.

För att jämföra avvikelser mellan de tre olika dataseten skapades tre raster med cellstorlek $0,3 \times 0,3$ m för samma område. Dataseten för höghöjdsflygning och NNH-flygning har egentligen för låg upplösning för att cellstorlek $0,3 \times 0,3$ m ska användas men gavs detta för att jämförelsen skulle bli så rättvis som möjligt.

5.1 Höjdmodell

Eftersom solberäkningarna utgår från höjdmodeller presenteras först höjdmodeller för samma area, genererade från de tre dataseten.

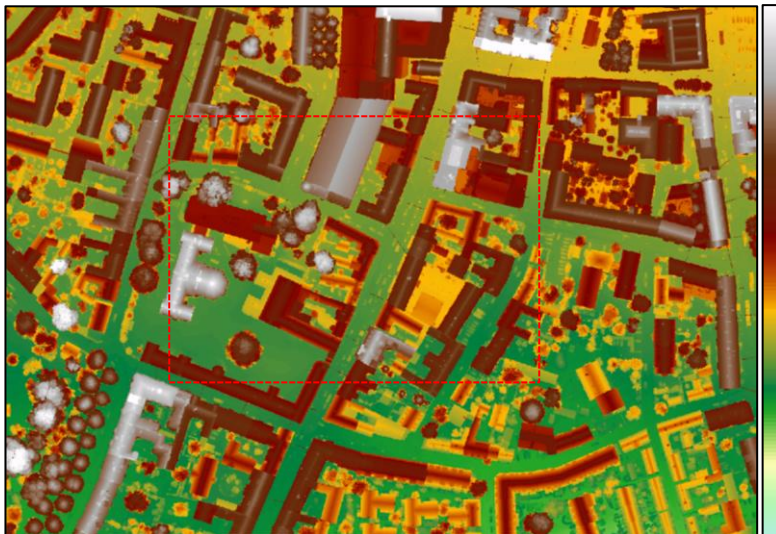
Ortofoto



Figur 19. Ortofoto över testarea. Området med röd ram zoomas in i Figur 23.

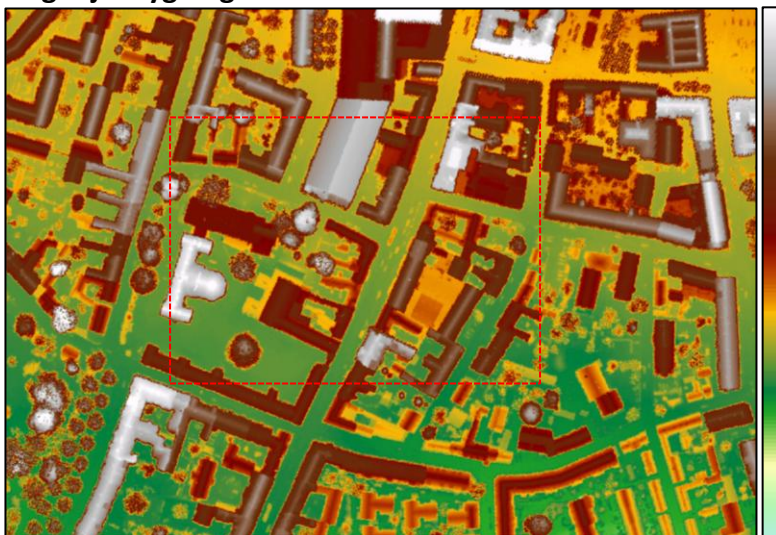
Som synes nedan i Figur 20, Figur 21 och Figur 22 skiljer sig noggrannheten och byggnadernas skärpa, dataseten emellan. Detta beror på deras olika punkttäthet och flyghöjd. Genom att zooma in ytterligare kan detaljerna lättare urskiljas.

Låghöjdsflygning



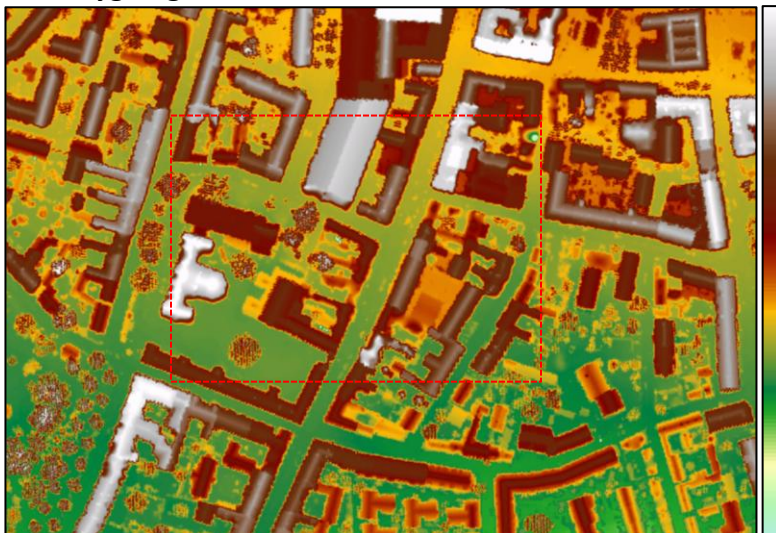
Figur 20. Höjdraster för låghöjdsflygningen och cellstorlek 0,3*0,3 m över testarea. Området med röd ram zoomas in i Figur 24. Färgskalan till höger anger höjd där ljusblå är lägst och grå är högst.

Höghöjdsflygning



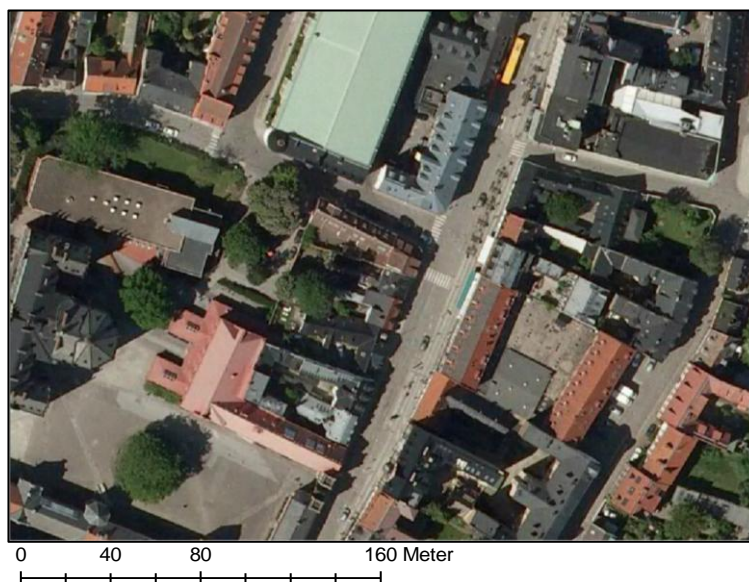
Figur 21. Höjdraster för höghöjdsflygningen och cellstorlek 0,3*0,3 m över testarea. Området med röd ram zoomas in i Figur 25. Färgskalan till höger anger höjd där ljusblå är lägst och grå är högst.

NNH-flygning



Figur 22. Höjdraster för NNH-flygningen och cellstorlek 0,3*0,3 m över testarea. Området med röd ram zoomas in i Figur 26. Färgskalan till höger anger höjd där ljusblå är lägst och grå är högst.

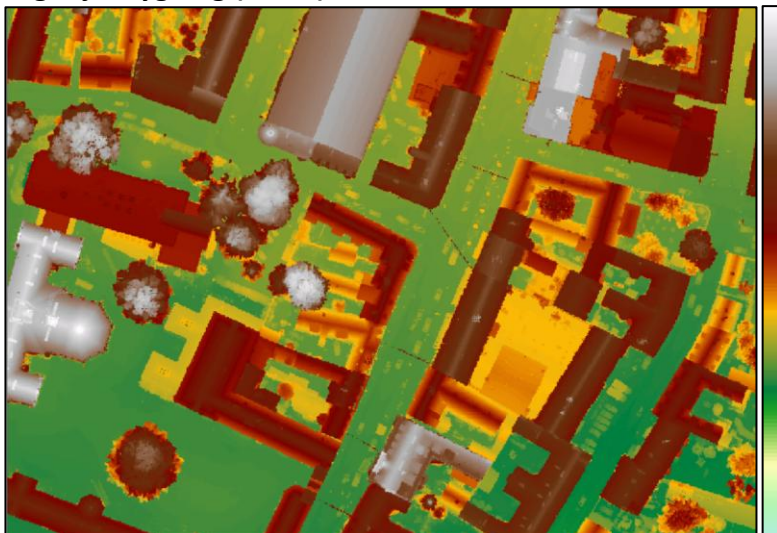
Ortofoto



Figur 23. Inzoomat ortofoto över testarea.

I Figur 24 nedan syns streck över gatan i mitten. Dessa är upphängningar av gatubelysning, vilket tyder på en hög noggrannhet. Byggnadskupor och större skorstenar går att urskilja. Även bilar ses relativt tydligt på gatorna.

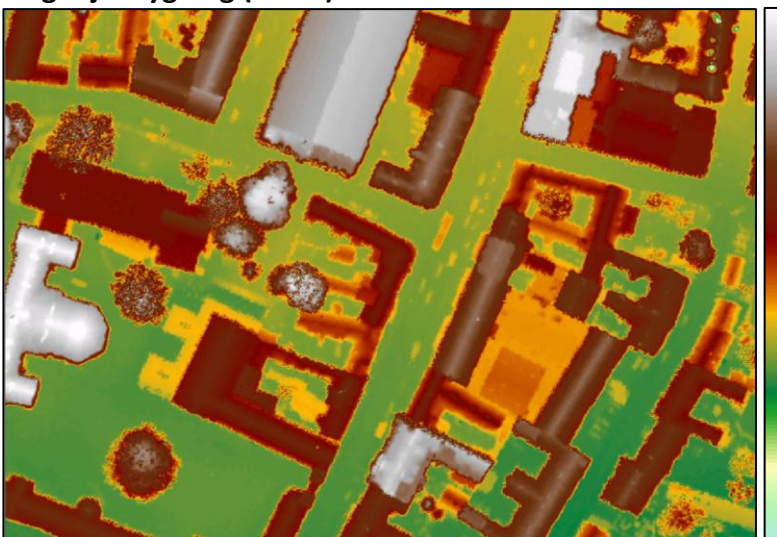
Låghöjdsflygning (zoom)



Figur 24. Inzoomat höjdraster för låghöjdsflygningen och cellstorlek 0,3*0,3 m över testarea. Färgskalan till höger anger höjd där ljusblå är lägst och grå är högst.

I Figur 25 nedan är detaljerna fortfarande någorlunda tydliga men kanterna är mindre skarpa och bilarna blir svårare att urskilja.

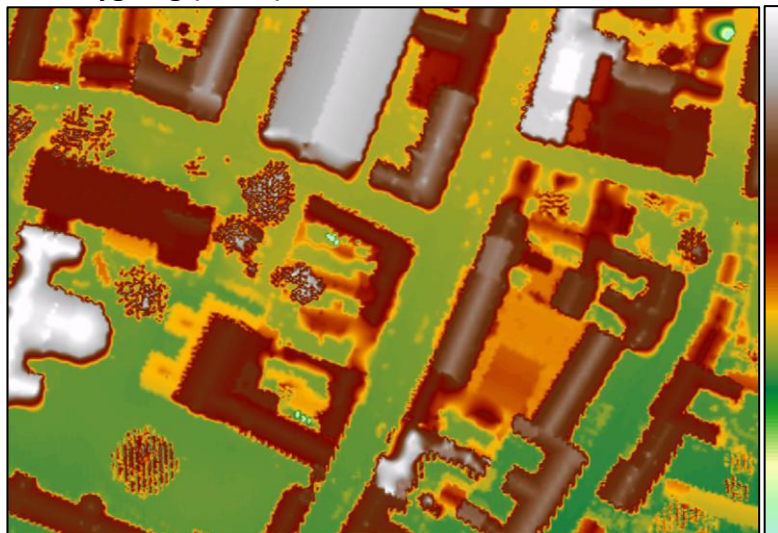
Höghöjdsflygning (zoom)



Figur 25. Inzoomat höjdraster för höghöjdsflygningen och cellstorlek 0,3*0,3 m över testarea. Färgskalan till höger anger höjd där ljusblå är lägst och grå är högst.

I Figur 26 nedan är det lätt att urskilja vad som är byggnader och inte. Däremot blir kanterna vågiga och väldigt oskarpa där det är stora höjdskillnader. Kontinuerliga ytor ser dock korrekta ut. Det går att lokalisera vad som är bilar endast om man vet att de finns.

NNH-flygning (zoom)

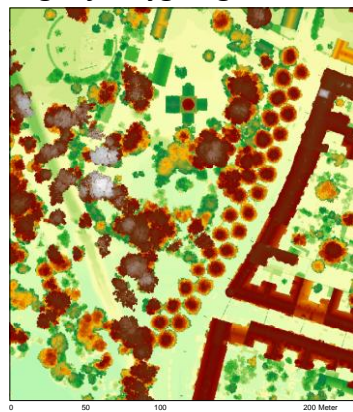


Figur 26. Inzoomat höjdraster för NNH-flygningen och cellstorlek 0,3 *0,3 m över testarea. Färgskalan till höger anger höjd där ljusblå är lägst och grå är högst.

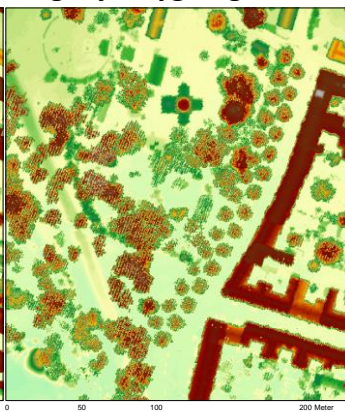
Från de inzoomade bilderna ovan syns det hur noggranna höjdm modeller dataseten ger upphov till. Ju lägre punkttäthet och högre flyghöjd, desto suddigare blir resultatet. Att kanterna blir vågiga ger en indikation hur hög punkttätheten är. Det kan också noteras hur olika vegetation registrerats.

I Figur 27 nedan visas en jämförelse som framförallt skildrar variationerna i vegetation. Med hjälp figuren kan man föreställa sig att trädens skugginverkan blir olika för tak i deras närhet, beroende på vilket dataset som används.

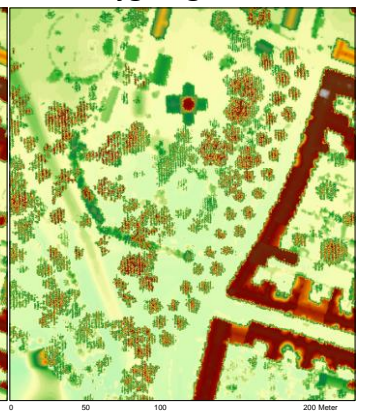
Låghöjdsflygning



Höghöjdsflygning



NNH-flygning



Figur 27. Höjdraster för de tre dataseten. Till vänster i respektive dataset syns hur väl träden registrerats. Färgskalan till höger anger höjd där ljusblå är lägst och grå är högst.

5.2 Solanalyser

För att jämföra beräknad totalinstrålning och areaberäkningar mellan de tre dataseten valdes den testarea som syns i röd ram i Figur 28. Den totala instrålningen jämfördes genom att utföra beräkningarna med samma metod och analysera resultatet. Metoden beskrivs närmare i bilagan.

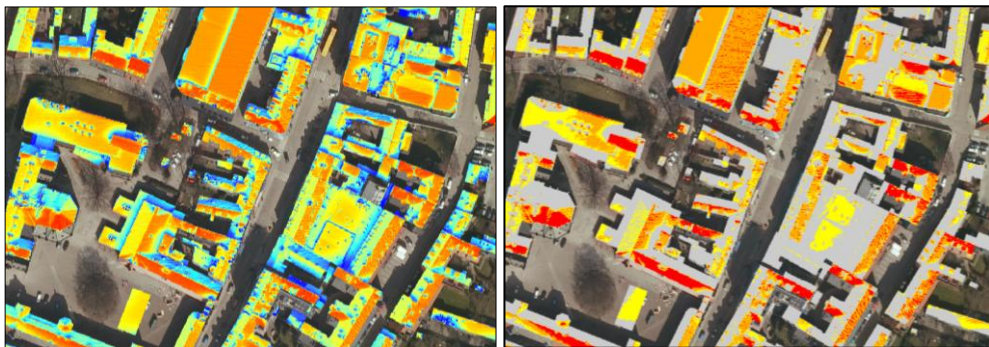
Gula områden symboliserar tak av varierande storlek. Området är 1000*500 meter stort och innehåller totalt 1231 tak med areor mellan 1-2672 m². I brist på ett verkligt facit för solinstrålning användes låghöjdsflygningen som referens vid jämförelserna, då denna antas vara mest korrekt tack vare sin höga punkttäthet och låga flyghöjd.



Figur 28. Område som användes vid jämförelse av totalinstrålning. Gula ramar visar gränser för byggnader.

För att kunna relatera till skillnaderna visuellt presenteras först bilder för solberäkning och kategoriindelning för de tre olika dataseten. Därefter analyseras resultaten i respektive underkapitel.

Låghöjdsflygning



Höghöjdsflygning



NNH-flygning



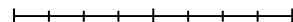
(kWh/m²,år)



Max : 1174

Min : 0

0 25 50 100 Meter



Mycket god

God

Mindre god

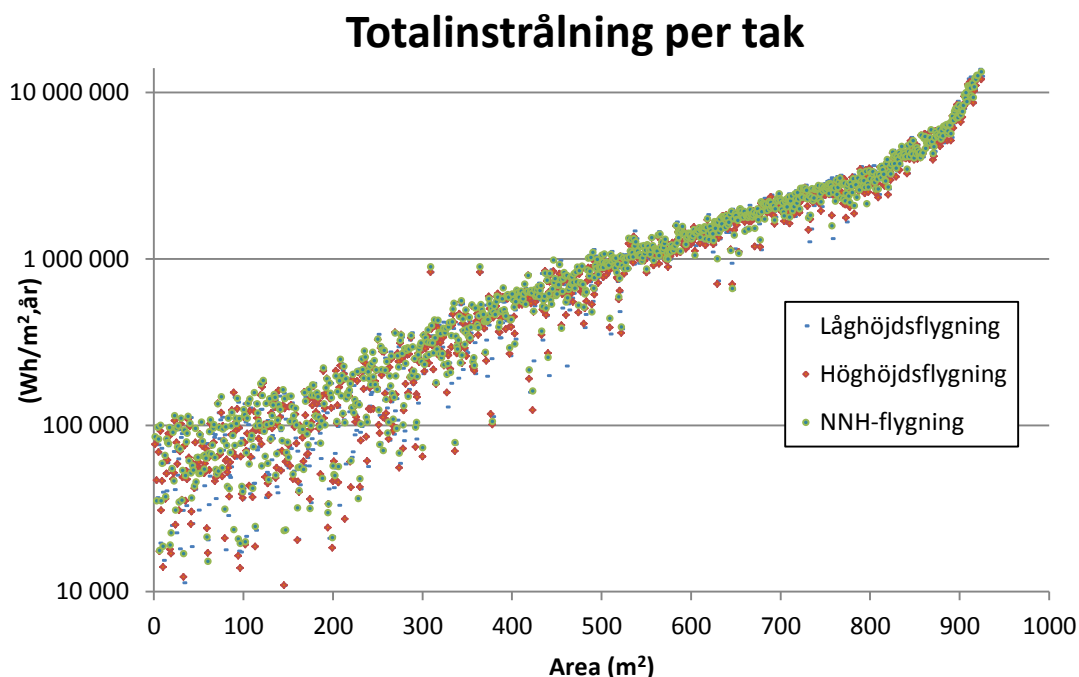
Ej lämplig

Figur 29. Till vänster: Beräknad solinstrålning för de tre dataseten, visualiserat enligt kontinuerlig färgskala nedan till vänster.

Till höger: Samma beräkning som till vänster men visualiserat enligt kategorierna nedan till höger.

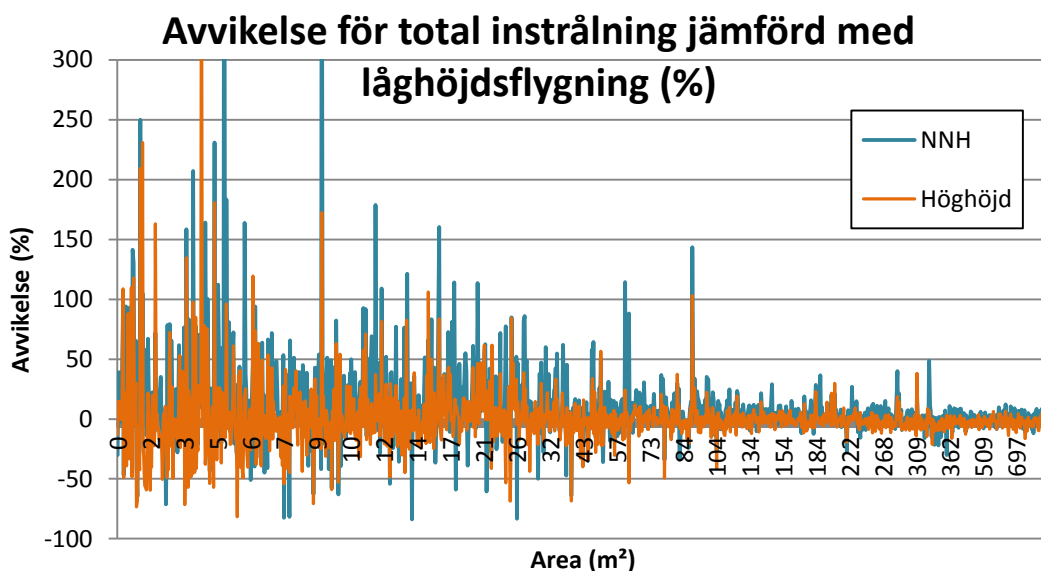
5.2.1 Totalinstrålning

Vid en logaritmisk plottning av resultaten för totalinstrålningarna för respektive takarea syns det att variationerna dataseten emellan verkar vara större ju mindre taken är, se Figur 30 nedan.



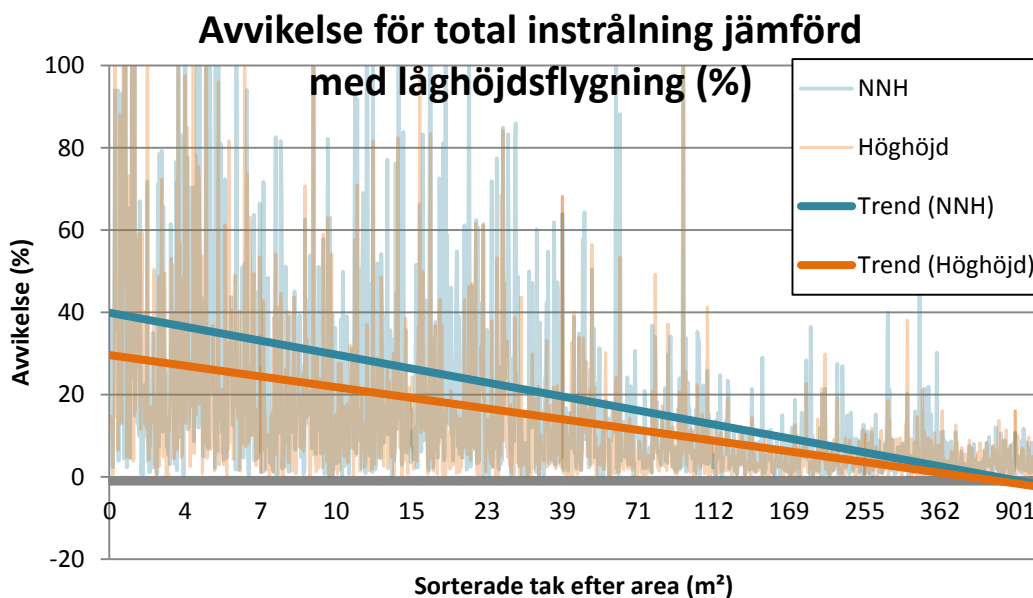
Figur 30. Logaritmisk skala för totalinstrålning på respektive tak i de tre dataseten.

Genom att istället plotta avvikelserna för höghöjds- och NNH-flygningen från de mer exakta beräkningarna i låghöjdsflygningen erhålls grafen i Figur 31. Som figuren visar varierar resultatet för de olika dataseten, trots att beräkningarna är gjorda på samma tak. Härmed stärks tesen om att avvikelsen blir mindre med ökad takarea.



Figur 31. Procentuell avvikelse för beräknad totalinstrålning på höghöjdsflygningen och NNH-flygningen gentemot den beräknade totalinstrålningen på låghöjdsflygningen.

Beräkningarna för total solinstrålning gav olika resultat beroende på vilket dataset som användes, vilket ses i Figur 31. Variationerna sträcker sig från 0 till 600 % och avtar med ökad area, vilket åskådliggörs med hjälp av trendlinjer nedan i Figur 32.



Figur 32. Absolutbelopp för procentuell avvikelse för beräknad totalinstrålning på höghöjdsflygningen och NNH-flygningen gentemot den beräknade totalinstrålningen på låghöjdsflygningen. Totalt 1231 tak är inkluderade.

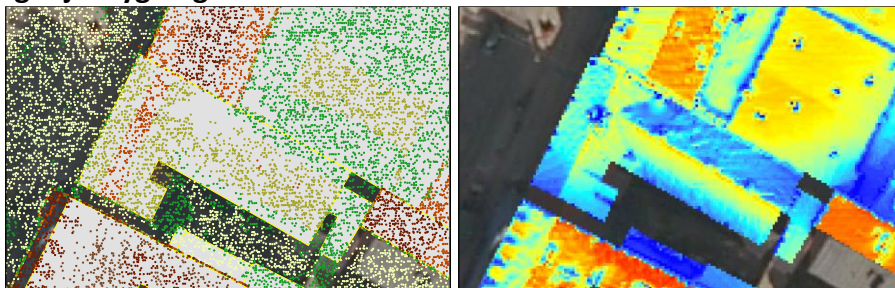
I Figur 32 ovan syns tydliga trender som pekar på att avvikelserna minskar med ökad area. Däremot fanns ett flertal tak som skilde sig mellan beräkningarna för de olika dataseten, trots stora areor. För att bestämma vad detta kunde bero på undersöktes ett antal av de dessa tak närmare och analyserades i ArcMap. Dessa är presenterade i Tabell 5.

Tabell 5. Avvikelse tabell med förklaringar.

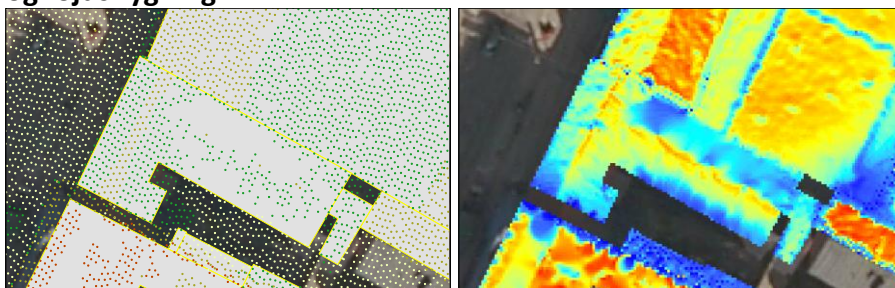
Fall	Area (m ²)	Avvikelse för höghöjds-/NNH-flygning (procent)	Anledning
1	330	5/50	Låg punkttäthet i laserskanning på grund av minskad reflektion.
2	310	40/20	Låg punkttäthet i laserskanning på grund av minskad reflektion.
3	285	20/40	Tak under och nära träd.
4	105	-40/-25	Endast 2 meter brett tak.
5	90	100/145	Endast 1-1,5 meter brett tak.
6	75	-50/-35	Tak under och nära träd.
7	60	-55/90	Tak under och nära träd.
8	60	25/115	Tak under och nära träd.
9	50	55/50	Obefintlig byggnad, tidigare parkering som laserskannades olika.
10	45	10/65	Tak nära träd.
11	40	-70/-65	Tak under och nära träd.

I fall 1 i Tabell 5 var avvikelsen för NNH-data hög trots att arean var 330 m². Genom att titta på reflektionspunkterna i ArcMap kunde det konstateras att just det taket hade färre punkter än övriga områden. Anledningen till detta är med högsta sannolikhet att det mörka taket absorberade många ljusimpulser och gav därmed ett lägre antal reflektioner. Skillnaderna i punkttäthet och resulterande solberäkning illustreras i Figur 33.

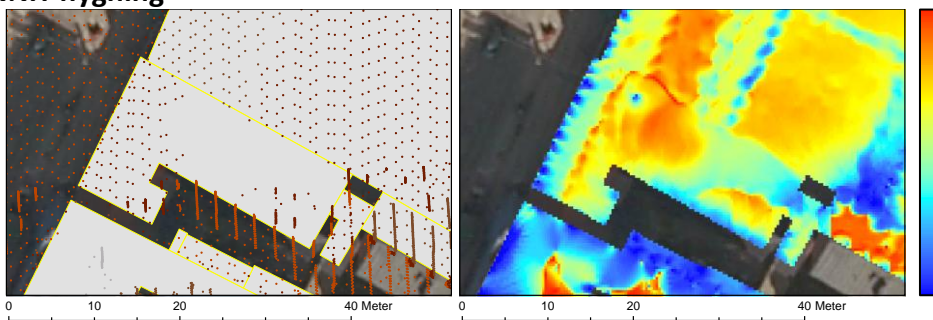
Låghöjdsflygning



Höghöjdsflygning

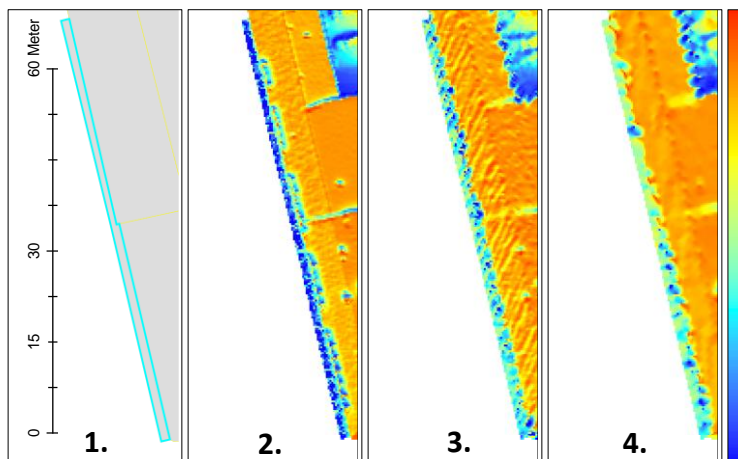


NNH-flygning



Figur 33. Reflektioner från laserskanning till vänster och beräknad instrålning till höger på respektive dataset. NNH-flygningen har betydligt färre reflektionspunkter och har därför en hög avvikelse i totalt beräknad instrålning trots en stor area. Färgerna på punkterna till vänster indikerar höjd och färgerna till höger följer färgskalan från blå (låg) till röd (hög).

En annan avvikelse rörde ett 90 m² stort område med avvikelse på 100 respektive 145 %, fall 4. Vid närmare granskning visade det sig att taket var långsmalt, vilket innebär att omkretsen är stor i förhållande till arean. Solinstrålningen illustreras nedan i Figur 34.



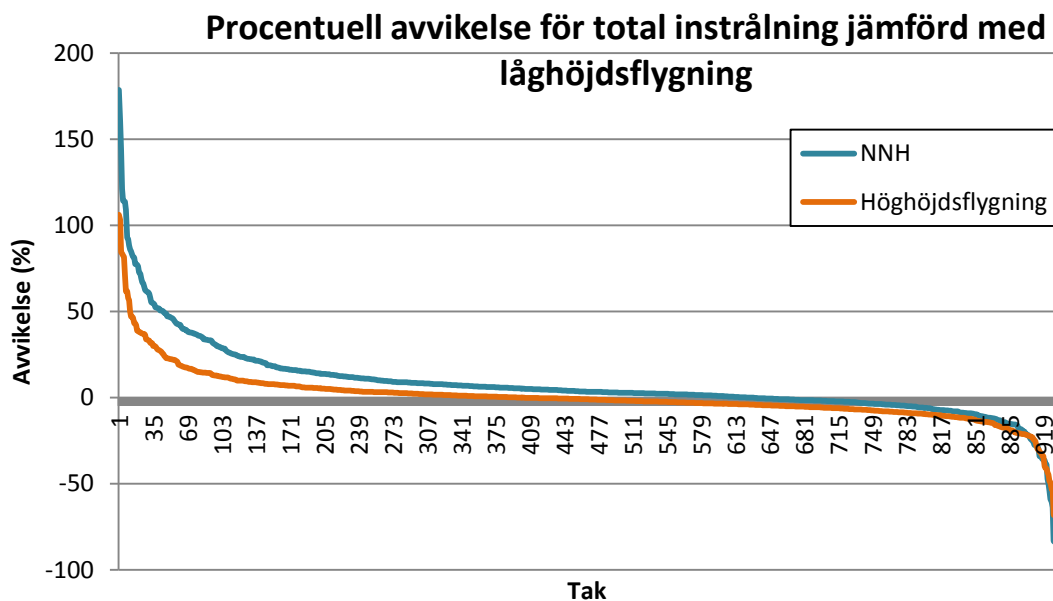
Figur 34. Beräknad solinstrålning för de tre dataseten. Taket i turkost till vänster är 91 m² stort, 1-1,5 m brett och har stor avvikelse dataseten emellan. Instrålningen följer färgskalan till höger från blå (låg) till röd (hög).

1. Byggnadspolygon med turkost, långsmalt tak till vänster och gul avdelare för övriga tre grå tak, 2. Låghöjdsflygning, 3. Höghöjdsflygning och 4. NNH-flygning.

Ett smalt tak ökar risken för att ett högt procentuellt antal punkter som hamnar just utanför. Ett extremt exempel är där taket är så pass smalt att punkterna hamnar just utanför på båda sidorna och inte ens registrerar taket. Denna risk minskar ju bredare ett tak blir och den procentuella effekten av att punkter hamnar just utanför taket minskar på samma sätt.

Fall 9 beror på att byggnadslagret som används för att klippa ut taken är uppdaterat våren 2013 medan flygningarna gjordes flera år tidigare. Vad som här är beräknat som solinstrålning mot ett tak är snarare vad som fanns innan huset ens byggdes.

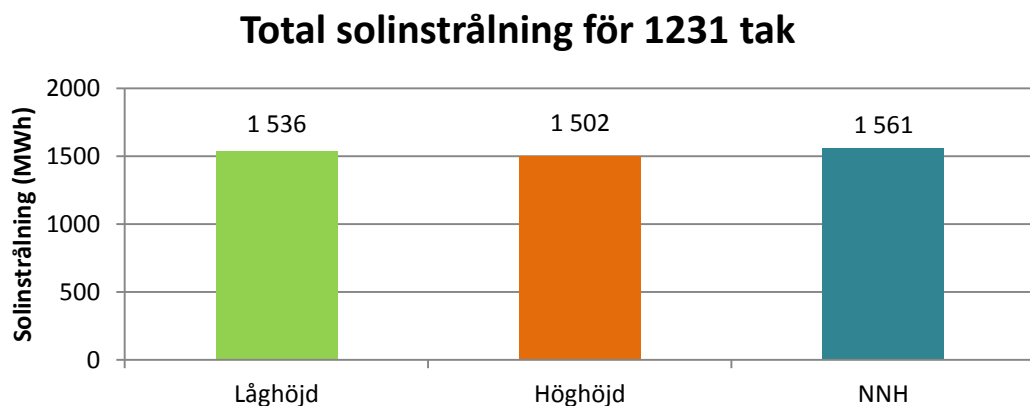
Eftersom avvikelsen generellt var större vid små takareor togs alla tak under 10 m² bort från jämförelsen för att bli av med de extrema avvikelserna på 200-600%. Antalet tak sjönk då från 1231 till 930, av vilka det i 61 % av fallen gav bättre resultat med höghöjdsflygningen än NNH-flygningen. Sorterade avvikelser från största positiva till största negativa kan ses nedan i Figur 35.



Figur 35. Procentuell avvikelse för beräknad totalinstrålning på höghöjdsflygningen och NNH-flygningen gentemot den beräknade totalinstrålningen på låghöjdsflygningen. Tak mindre än 10 m² är exkluderade. Taken är på x-axeln sorterade från störst positiv till störst negativ avvikelse, totalt 930 tak.

Avvikelseerna för höghöjdsflygningen för tak större än 10 m² varierade från -69 till 106 % och för NNH-flygningen var siffrorna -84 till 179 %.

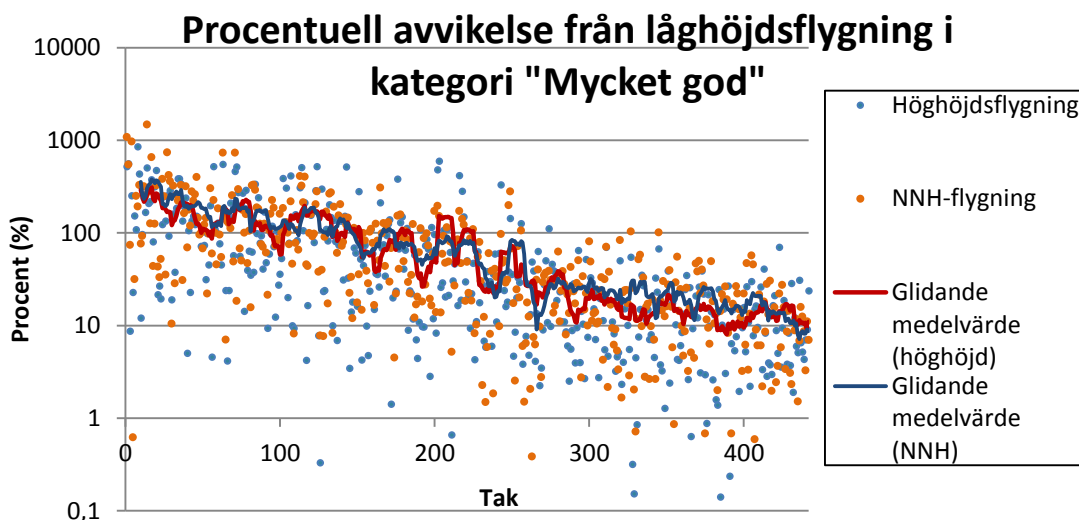
Trots att avvikelseerna varierade en del blev den totala instrålningen för samtliga 1231 tak väldigt likartad, oavsett vilket dataset som användes. Detta illustreras nedan i Figur 36.



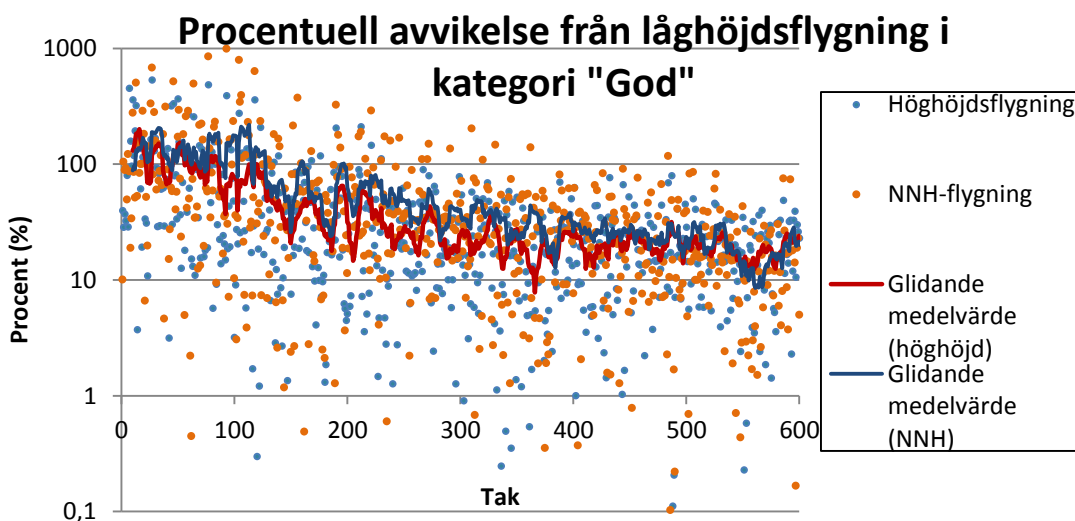
Figur 36. Total solinstrålning för 1231 tak från respektive dataset.

5.2.2 Kategorisering och areaberäkning

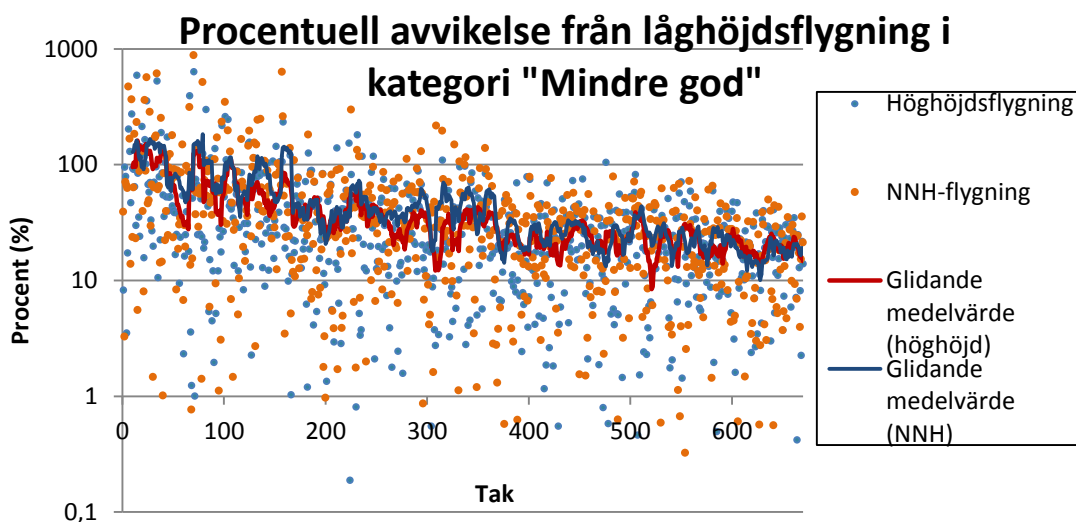
Takarean delades in i fyra kategorier, beroende på mängd instrålad energi, se kapitel 4.9. För att kunna jämföra resultaten mellan de tre dataseten beräknades de procentuella avvikelserna för höghöjds- och NNH-flygningen gentemot låghöjdsflygningen. Detta presenteras nedan i fyra punktgrafer med glidande medelvärde i set om tio värden, vilket betyder att medelvärdet räknas ut för tio värden åt gången.



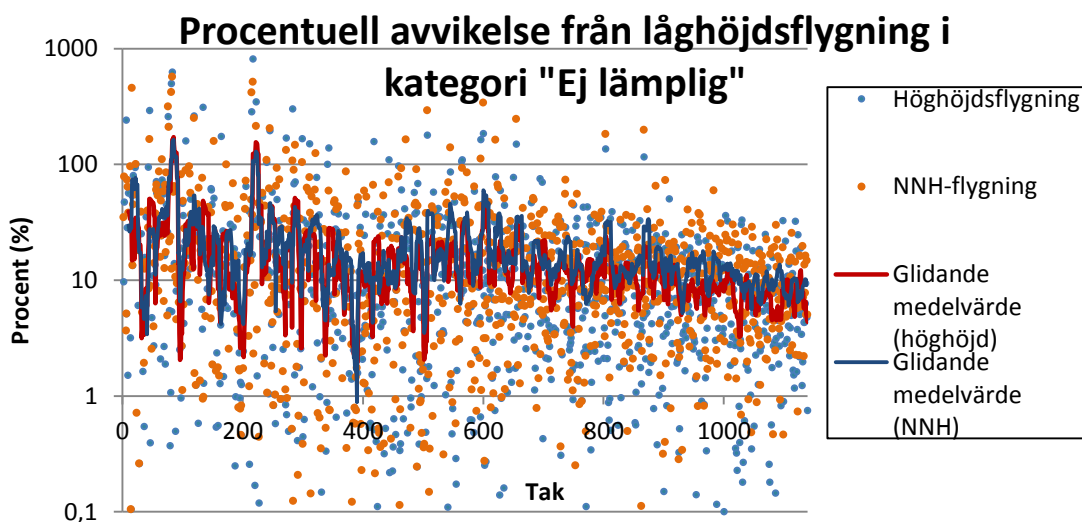
Figur 37. Procentuell avvikelse för uträknade areor i kategorin "Mycket god" för höghöjds- och NNH-flygningen gentemot låghöjdsflygningen. Grafen visar endast de tak som vid låghöjdsflygningen hade minst två kvadratmeter "Mycket god" instrålning. Totalt representeras 442 tak från respektive dataset och presenteras i stigande area.



Figur 38. Procentuell avvikelse för uträknade areor i kategorin "God" för höghöjds- och NNH-flygningen gentemot låghöjdsflygningen. Grafen visar endast de tak som vid låghöjdsflygningen hade minst två kvadratmeter "God" instrålning. Totalt representeras 601 tak från respektive dataset och presenteras i stigande area



Figur 39. Procentuell avvikelse för uträknade areor i kategorin "Mindre god" för höghöjds- och NNH-flygningen gentemot låghöjdsflygningen. Grafen visar endast de tak som vid låghöjdsflygningen hade minst två kvadratmeter "Mindre god" instrålning. Totalt representeras 670 tak från respektive dataset och presenteras i stigande area.



Figur 40. Procentuell avvikelse för uträknade areor i kategorin "Ej lämplig" för höghöjds- och NNH-flygningen gentemot låghöjdsflygningen. Grafen visar endast de tak som vid låghöjdsflygningen hade minst två kvadratmeter "Ej lämplig" instrålning. Totalt representeras 1139 tak från respektive dataset och presenteras i stigande area.

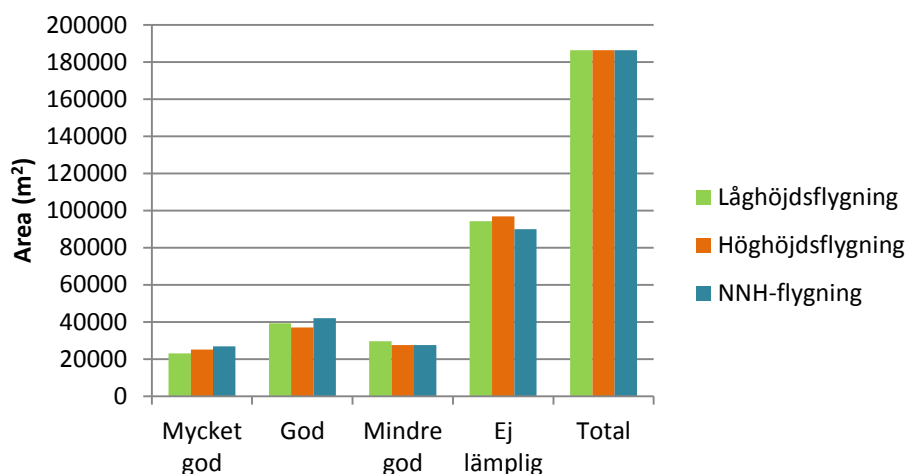
Genom att studera Figur 37-Figur 40 kan det konstateras att de beräknade takareorna för de olika kategorierna varierade mellan dataseten, framförallt ju mindre area som jämfördes. Avvikelsena kategorierna emellan var snarlika och för att summera upp dessa beräknades medelvärde och median för de procentuella avvikelsena från låghöjdsflygningen nedan i Tabell 6. Här syns det att de kategoriserade areorna från NNH-flygningen avvek mer än från höghöjdsflygningen i förhållande till låghöjdsflygningen i samtliga fall.

Tabell 6. Medelvärde och median för beräknade areor inom respektive kategori. Höghöjdsflygning och NNH-flygning jämförs med beräkningar på låghöjdsflygning där areorna är större än 2 m².

Medelvärde (procentuell avvikelse från låghöjdsflygning)	Höghöjdsflygning	NNH-flygning
<i>Mycket god</i>	76	85
<i>God</i>	40	56
<i>Mindre god</i>	39	47
<i>Ej lämplig</i>	17	20
Median (procentuell avvikelse från låghöjdsflygning)		
<i>Mycket god</i>	26	35
<i>God</i>	21	28
<i>Mindre god</i>	24	28
<i>Ej lämplig</i>	6	8

Trots avvikande areor blev den fördelningen relativt jämn för de tre dataseten inom de olika kategorierna, vilket illustreras nedan i Figur 41.

Total area per kategori och dataset



Figur 41. Sammanlagd beräknad area per kategori och dataset.

6 Diskussion

6.1 Solpotentialkartan Lund

Med de förutsättningar som fanns, blev solkartan för Lund ett lyckat projekt med acceptabelt resultat. De laserdata som fanns var från 2009, vilket kan ses som något inaktuellt. På solkartan kan man se flera fall där byggnader har tillkommit och byggts om. På solkartans hemsida informeras därför användaren om detta och uppmanar till aktsamhet innan förhastade slutsatser dras. Solkartan ger inte exakta värden och skall därför endast ses som en intresseväckare. Om en mer exakt karta önskas måste området minskas betydligt för att bli hanterbart.

6.2 Lasermoln eller 3D-modell

Solpotentialkartor kan göras utifrån lasermoln eller 3D-modeller av hus. Fördelen med lasermoln är att vegetationens inverkan inkluderas. Om en intressent behöver laserdata skulle den teoretiskt sett kunna köpa redan befintliga dataset från Lantmäteriet, motsvarande upplösningen för NNH-flygningen som analyserats ovan. Därmed skulle intressenten kunna skapa en solpotentialkarta väldigt snart om upplösningen skulle accepteras.

Nackdelen med laserdata är att det finns risk att störningar skett i skanningen som leder till felaktiga punkter som i sin tur kan få negativ inverkan i solberäkningar. Därför krävs det en manuell genomgång för att sortera bort detta brus. På samma sätt krävs det manuellt arbete för att lokalisera andra störande objekt såsom lyftkranar och liknande. Om lasermoln används är det viktigt att veta var det kan ha funnits lyftkranar och annat störande vid flygningen samt var kraftledningar går. Då kan dessa enkelt klassas om och exkluderas från solberäkning. Det hade varit till stor fördel om klassificeringarna i dataseten delade upp kraftledningar för sig. I så fall hade en stor del av den manuella omklassificeringen kunnat undvikas. Istället användes endast information om punkternas höjd och placering.

Laserdata kan användas inom andra områden än solpotentialbedömning, till exempel för att modellera vattenavrinning, inventera skog, skapa nya kartor etcetera.

6.3 Kvalitet på laserdata

Det är önskvärt att ha högsta möjliga upplösning på laserdata för att få ett grafiskt snyggt och ett analytiskt säkert resultat. Här spelar dock priset in, vilket generellt blir högre ju bättre upplösning som önskas. Till det kommer också aspekten att hanteringen blir tyngre och det tar betydligt längre tid att köra solberäkningarna i Solar Radiation. En annan fördel med finare upplösning kan vara att det blir enklare att identifiera lyftkranar och andra störningar. Ju mindre område solberäkningarna

ska göras för, desto finare upplösning kan hanteras utan att tidsåtgången blir ohållbar.

Om det finns möjlighet att påverka när på året laserskanningen görs är det en fördel om den kan göras när träden är fullt utslagna. Även om de inte är fullt utslagna året runt, vilket en solberäkning skulle ta med i beräkningarna, är det trots allt på sommaren det är mest solinstrålning.

Det är troligtvis inte rimligt att få ett dataset från laserskanning som är helt perfekt och kan ge exakta höjdmodeller, utan att bli oproportionerligt dyrt. Ingen av de tre dataseten som undersöktes ger heller de exakta höjdmodeller och ger därmed inte heller perfekta förutsättningar för att göra solberäkningar. Därför är det svårt att dra en gräns för vad som är tillräckligt bra indata för att göra solpotentialkarta eftersom det också beror på vad solpotentialkartan ska informera om.

Variationerna i avvikelser för totalinstrålning var väldigt höga, både för höghöjdsflygningen och ännu mer för NNH-flygningen. Däremot kan sägas att den sammanlagda totalinstrålning för samtliga tak från NNH-data är väldigt lik de övriga dataseten. Därför skulle detta eventuellt kunna anses som tillräckligt bra data för att göra en enklare solpotentialkarta så länge de mindre taken exkluderades. Åtminstone tak mindre än 10 m² bör exkluderas, eventuellt även ännu större tak.

Kravet på laserdata i Lunds solkarta hade inte nödvändigtvis behövt vara högre än 15 punkter/m² och från 300 meters höjd eftersom solberäkningen inte gjordes mer noggrann. Även om alla små stolpar och stänger registrerades skulle solberäkningen inte kunna ta tillräcklig hänsyn för att deras faktiska skuggning skulle inkluderas. Alternativet hade varit att minska intervallen i solberäkningarna betydligt, vilket hade blivit tidsmässigt ohållbart för den stora area det rörde sig om.

Vid jämförelse av de tre dataseten användes låghöjdsflygningen som referens då den hade högst upplösning. Det kan dock ifrågasättas om detta dataset hade tillräckligt bra upplösning för att agera referens. En säkrare metod hade varit att göra manuella mätningar och beräkningar på några enskilda, oskuggade tak och använda dessa som referens.

Lägre upplösning gav inte totalt sett sämre resultat för instrålning. Det kan bero på att lägre upplösning delvis leder till sämre instrålning i kanterna på taket men att det vägs upp med högre instrålning på grund av mindre skuggning från träd.

6.4 Solar Radiation

Solberäkningarna gjordes för Lund som är en relativt platt kommun utan några höga berg eller kullar. I områden med mer varierande marknivå kan det krävas att solberäkningen görs för ett större område som inkluderar dessa höjder, vilket ökar

tidsåtgången. I ett sådant fall är det definitivt bättre att använda punktberäkning eftersom alla överflödiga beräkningar blir kostsamma i tid. Samma sak gäller då upplösningen på laserdata är hög och/eller cellstorleken är mindre, vilket gynnar punktberäkning.

6.5 Tillförlitlighet

Oavsett hur bra laserdata som fanns och hur noggrann solberäkning som än gjordes finns det inga garantier för hur väl framräknade värden kommer passa i framtiden. Årligen varierande väder och eventuella förändringar på grund av växthuseffekten är svåra, om inte omöjliga, att förutspå. Därför är det viktigt att se solpotentialkartor som möjliga utfall.

En solcellsmodul kan inte nödvändigtvis tillgodogöra sig 10-15% av en beräknad solinstrålning, även om instrålningen skulle vara korrekt beräknad. Det finns till exempel en risk att en nära stående flaggstång skuggar delar av en modul och sänker verkningsgraden ännu mer än 10-15%. Därför är det viktigt att alltid göra en besiktning på plats innan solceller installeras.

6.6 Eventuella förbättringar

- Radera inaktuella tak
Då det användas byggnadslagret var mer uppdaterat än laserskanningen hade det varit en idé att radera de tak som inte fanns vid skanningen. Då hade parkeringar och dylikt inte visats som tak. Anledningen till att detta inte gjordes var tidsbrist.
- Jämnare ytor
När solberäkningar görs mot ett raster som kommer från lasermoln finns det en risk att en yta framstår som ojämn. Om ytorna kunde korrigeras i höjd och därmed jämnas till, skulle resultatet från solberäkningarna blir jämnare. Här spelar interpoleringarna stor roll. Resultatet skulle bli extra tydligt när instrålningen kategoriseras och gränserna blir absoluta.
- Utnyttjande av byggnadspolygoner
Vid konverteringen från laserdata till höjdraster skulle byggnadspolygonerna eventuellt kunna nyttjas bättre. Genom att interpolera byggnaderna för sig skulle det kanske göra att gränserna blir tydligare. Detta skulle antagligen få positiva effekter och leda till en mer korrekt höjdmodell.

6.7 Rekommendationer

För att minimera tidsåtgången för beräkningarna rekommenderas det att göra solberäkningarna i punkter snarare än över hela ytor.

6.8 Felkällor

Laserdata är inhämtat från 2009 och 2010, vilket kan ses som något inaktuellt för somliga delar av kommunen. Byggnader har både tillkommit, förändrats och rivits. På samma sätt har även vegetationen förändrats. Vad som idag är hus kan därför enligt solberäkningarna få en årlig instrålning värd en parkeringsplats eller några träd. Om en besökare av solkartan på Internet inte är observant på hur solinstrålningen visas innebär det att besökaren kan få en fullkomligt felaktig uppfattning av instrålningen.

Areaberäkningen tar inte hänsyn till den faktiska lutningen. Ett platt tak framstår därför som 15 % större. På samma sätt framstår tak med större lutning än 30 grader som mindre än de faktiskt är. På ett platt tak finns dessutom möjligheten att montera solcellspaneler i valda vinklar och riktningar. Även om taken ibland framställdes som knöliga blir solinstrålningen på en slät solcellsmodul jämnare. Därför är det viktigt att vara medveten om att det är solinstrålningen mot taket som är beräknat och inte mot en eventuell solcellspanel.

Kalibreringen för Solar Radiation gjordes i ett antal vinklar, vilka skulle kunna utökas till fler för att öka tillförlitligheten i modellen. Trots att Meteororm bygger på uppmätt solinstrålning gör även det programmet interpoleringar mellan olika vinklar och riktningar. Därför skulle den beräknade instrålningen i Solar Radiation kunna jämföras mot fler källor än Meteororm.

7 Slutsatser

7.1 Solelpotentialbedömning av Lunds kommun

Laserdata kräver manuell rensning och omklassificering av punkter för att undvika att en felaktig höjdmmodell skapas. Därför är det bra att känna till när laserskanningen gjordes för att då lättare hitta lyftkranar och andra störande objekt.

7.2 Data och jämförelse

Låghöjdsflygningen gav bättre resultat än höghöjds- och NNH-flygningen. Låghöjdsflygningen är däremot inte felfri eftersom mörka taktytor kan absorbera laserimpulserna från skanningen och försämra punkttätheten, vilket leder till mindre korrekt solberäkning. Skillnader i de framställda höjdmmodellerna kan tydligt ses på takens ytterkanter där höjdskillnader är stora från tak till mark. Ju större och mer kvadratiska tak som beräknades, desto mindre blev den relativa längden runt taket kontra arean. Detta ledde till att avvikelserna generellt minskade med ökad takarea.

Vid solberäkning är det viktigt att inte ha för liten cellstorlek, eftersom det kan bli tidsmässigt ohållbart.

Solberäkning på både höghöjds- och NNH-flygningen gav oftast högre instrålning än låghöjdsflygningen, men få större tak vägde upp till en jämlik totalinstrålning. Instrålningen på tak för höghöjds- och NNH-flygningen jämfört med låghöjdsflygningen avvek mindre ju större takyta det rörde sig om.

8 Litteraturförteckning

- [1] Göteborgs Energi, ”Solkartan,” Göteborg Energi, [Online].
http://www.goteborgenergi.se/Privat/Projekt_och_etableringar/Fornyelsebar_energi/Solceller/Solkartan. [Använd 16 04 2013].
- [2] Länsstyrelsen Stockholm, ”Karta över samtliga hustak i Stockholm - här fungerar solenergi,” 07 05 2013. [Online]. Available:
<http://www.lansstyrelsen.se/stockholm/Sv/nyheter/2013/Pages/solkartan-Stockholm-har-fungerar-solenergi.aspx>. [Använd 30 05 2013].
- [3] A. Haraldsson, energicentrum@stockholm.se (e-post). *Area?*. 04 06 2013.
- [4] M. Brito, N. Gomes, T. Santos och J. Tenedório, ”Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data,” *ScienceDirect*, 2011.
- [5] K. Highman, ”Bristol Sunshine: An Analysis of Solar Rooftop Mapping Techniques & Outputs,” Bristol City Council, Bristol, 2011.
- [6] D. Ludwig, S. Lanig och M. Klärle, ”Location analysis for solar panels by LiDAR-Data with Geoprocessing - SUN-AREA,” Shaker Verlag, Berlin, 2009.
- [7] J. A. Duffie och W. A. Beckman, *Solar energy thermal processes, 2:a red.*, New York: Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [8] V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Bukarest: Springer, 2007, pp. 4-5.
- [9] ”Solstrålning,” SMHI, 13 07 2009. [Online].
<http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/solstralning-1.4186>. [Använd 15 05 2013].
- [10] S. Jansson, ”Skugginverkan på PV-moduler,” Vattenfall Utveckling AB, 2001.
- [11] D. Sigurd och L. Stolt, ”Solcell,” *Nationalencyklopedin*, [Online].
<http://www.ne.se/lang/solcell>. [Använd 08 05 2013].
- [12] S. K. Sara Bargi, ”Solceller,” 09 01 2013. [Online].
<http://energimyndigheten.se/sv/Forskning/Kraftforskning/Solkraft/Solceller/>. [Använd 07 03 2013].
- [13] Thomas, Randall et al., *Photovoltaics and architecture*, Taylor & Francis Group, 2012.
- [14] E. Kjellsson, ”Potentialstudie för byggnadsintegrerade solceller i Sverige,” Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2000.
- [15] L. Harrie, ”Insamling av geografiska data,” i *Geografisk informationsbehandling: teori, metoder och tillämpningar*, Forskningsrådet Formas, 2008, pp. 106-107.
- [16] Bowden, Burke, Groessl, Napoleon och Ormsby, *Getting to know ArcGIS Desktop, Andra upplagan red.*, Californien: Esri Press, 2004, pp. 3-6.

- [17] P. Fu, pfu@esri.com (e-post). *Solar radiation/solar analyst*. 22 13 2013.
- [18] P. F. Shengli Huang, "Modeling Small Areas Is a Big Challenge Using the solar radiation analysis tools in ArcGIS Spatial Analyst," *ArcUser*, 2009. [Online]. <http://www.esri.com/news/arcuser/0309/files/solar.pdf>. [Använd 24 05 2013].
- [19] Esri, "How solar radiation is calculated," 11 08 2012. [Online]. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z000000tm000000>. [Använd 21 03 2013].
- [20] H. Rost, helen.rost@blomasa.com (e-post), *Två frågor*. 27 03 2013.
- [21] Socialdepartementet, "Mål och prioriteringar för lantmäteriverksamheten," Regeringen, 30 01 2013. [Online]. <http://www.regeringen.se/sb/d/16404/a/169090>. [Använd 07 03 2013].
- [22] Lantmäteriet, "Ny nationell höjddata," Lantmäteriet, [Online]. <http://www.lantmateriet.se/Kartor-och-geografisk-information/Hojddata/Ny-nationell-hojddata/>. [Använd 07 03 2013].
- [23] Lantmäteriet, "Produktbeskrivning: Laserdata," Lantmäteriet, 2013.
- [24] J. Kanters, jouri.kanters@ebd.lth.se (e-post). *Gränser*. 13 05 2013
- [25] METEONORM Version 6, "Calculations," Lund.
- [26] Fordham, Max; & Partners, *Photovoltaics in buildings: a design guide*, ETSU, 1999.
- [27] P. M. Rich, "Characterizing plant canopies with hemispherical photographs," *Remote Sensing Reviews*, vol. 5, nr 1, pp. 5:13-29, 1990.
- [28] R. D. W. H. S. S. P.M. Rich, "Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology," *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, pp. 524-529, 1994.
- [29] ESRI, "History Up Close," [Online]. <http://www.esri.com/about-esri/history/history-more>. [Använd 24 05 2013].

Bilaga. Metoder i ArcGIS 10.1

Nedan presenteras metoder för kapitel 4.2. Default-värden används där inget annat anges. För att utföra följande metodsteg krävs ArcGIS 10.1 med ArcMap 10.1 innehållandes verktygen 3D Analyst Tools och Spatial Analyst Tools. Till detta behövs också ett tvådimensionellt polygonlager med gränser för tak, nedan kallat byggnadslager eller byggnadspolygon.

A. Skapa LAS Dataset

- 1) Skapa LAS Dataset i ArcCatalog
- 2) Georeferera till aktuellt koordinatsystem

2.1) Properties

2.1.1) XY Coordinate System: SWEREF99 13 30 (enligt leveransspecifikation)

2.1.2) Z Coordinate System: RH2000 (enligt leveransspecifikation)

2.1.3) LAS Files: add files

- 3) Lägg in filen i ArcMap

B. Omklassificering

Klassificera bort oönskade punkter:

- 1) Under fliken Customize, Toolbars, välj LAS Dataset.
- 2) I LAS Dataset, välj verktyget LAS Dataset Profile View.

2.1) Markera önskat område laserpunkter.

2.2) Markera önskade punkter.

3.1.1) Ikonen Edit: Class Code: 7 (Noise)

C. Avvikande punkter

Lokaliserar upp till 100 000 avvikande punkter som befinner sig under 30 och över 70 meters höjd.

- 1) 3D Analyst Tools – Triangulated Surface – Locate Outliers

1.1) Input Surface: LAS-fil

1.2) Output Feature Class: outliers

1.3) Apply Hard Limit: kryssa i

- 1.4) Absolute Z minimum: 30
 - 1.5) Absolute Z maximum: 70
 - 1.6) Apply Comparison Filter: okryssad
 - 1.7) Outlier Cap: 100000
- 2) När punkterna är lokaliserade kan de undersökas och klassificeras om likt beskrivet i metoden Omklassificering ovan.

D. Konvertera LAS Dataset till Raster

Konverterar LAS Dataset till Raster med 0,3*0,3 m cellstorlek:

- 1) Conversion Tools – To Raster: LAS Dataset To Raster
 - 1.1) Value Field: ELEVATION
 - 1.2) Interpolation Type: Binning
 - 1.3) Cell Assignment Type: Maximum
 - 1.4) Void Fill Method: Natural Neighbor
 - 1.5) Sampling Type: CELLSIZE
 - 1.6) Sampling Value: 0,3

E. Uppdelning av raster

Här delas raster upp i 2500*2500 m rutor med 50 m överlappning, cellstorlek 0,3*0,3 m.

- 1) Data Management Tools – Raster – Raster Processing – Split Raster
 - 1.1) Output Base Name: split
 - 1.2) Split Method: SIZE_OF_TILE
 - 1.3) Output Format: GRID
 - 1.4) Resampling Technique: NEAREST
 - 1.5) Size of Output Rasters
 - 1.5.1) X Coordinate: 2500
 - 1.5.2) Y Coordinate: 2500
 - 1.6) Other Options
 - 1.6.1) Overlap: 50

1.6.2) Units for Output Raster Size and Overlap: METERS

1.6.3) Cellsize X Coordinate: 0,3

1.6.4) Cellsize Y Coordinate: 0,3

F. Area Solar Radiation

Beräkning av solinstrålning över en area, representerat av ett raster.

1) Spatial Analyst Tools – Solar Radiation – Area Solar Radiation

1.1) Latitude: (ställer in sig själv om georefererat)

1.2) Start day: 1

1.3) End day: 365

1.4) Radiation parameters

1.4.1) Diffuse proportion: 0,33 (gäller för Lund)

1.5) Radiation parameters

1.5.1) Transmissivity: 0,55 (gäller för Lund)

G. Sammanfogning av raster

1) Data Management Tools – Raster – Raster Dataset – Mosaic To New Raster

1.1) Input Rasters: välj samtliga raster

1.1.1) Number of Bands: 1

1.1.2) Mosaic Operator: Minimum

H. Klippa ut tak

1) Spatial Analyst Tools – Extraction – Extract by Mask:

1.1) Input raster: raster

1.2) Input raster or feature mask data: byggnadspolygon

1.3) Output raster: soltak

I. Kategorisering och areaberäkning

Med utgångspunkt soltak, dela in solinstrålningen i fyra kategorier och beräkna areor för dessa:

- 1) Skapa fyra attribut i önskat byggnadslager för kategoriserade areor och total instrålning, exempelvis *area_1*, *area_2*, *area_3* och *area_4*.

Följande kategorisering sparas i geodatabas med solinstrålningen indelad i fyra kategorier enligt:

- Kategori 4 ($< 800 \text{ kWh/m}^2, \text{år}$)
- Kategori 3 (800 - 900)
- Kategori 2 (900 - 1020)
- Kategori 1 ($1020 <$)

- 2) Spatial Analyst Tools – Reclass - Reclassify

2.1) Old values: 0 – 800000

2.2) New Values: 4

2.3) Change missing values to NoData: kryssa i

Upprepa steg 2 för resterande kategorier.

Konvertera raster till polygoner:

- 3) Conversion Tools – From Raster – Raster to Polygon

3.1) Bocka av rutan ”Simplify polygons”

Klipp bort eventuella ytor utanför byggnadspolygonerna:

- 4) Fliken Geoprocessing – Intersect

4.1) Välj byggnadslagret i polygonformat.

4.2) Välj Kategori 4 i polygonformat.

Upprepa steg 4 för resterande kategorier.

Kopiera area inom respektive lager från steg 4:

- 5) För polygon 4, öppna Attribute table.

5.1) Field Calculator: $\text{Area}_4 = \text{Shape_Area}$

Upprepa steg 5 för resterande kategorier.

Smält samman de fyra lagren:

- 6) Data Management Tools – General – Merge

6.1) Input Datasets: samtliga lager från steg 5.

Konvertera polygoner till punkter:

7) Data Management Tools – Features – Features To Point

7.1) Input Features: lager från steg 6

7.2) Inside: klicka i.

Föreana byggnadslagret med lagret från föregående steg.

8) Högerklicka på byggnadslagret – Joins and Relates – Join...

8.1) Join data from another layer based on spatial location

8.1.1) 1. Choose the layer to join to this layer, or load spatial data from disk:

punktlager

8.1.2) 2. Each polygon will be given a summary...

8.1.3) How do you want the attributes to be summarized: Sum

Omvandla husgrundsarea till schablonmässig takarea (30 graders lutning).

9) För byggnadspolygon, öppna Attribute table.

9.1) Field Calculator: Area = Area*1.15

J. Totalinstrålning

Med utgångspunkt soltak, beräkna totalinstrålningen över ett år för respektive tak:

1) Skapa ett attribut i önskat byggnadslager för total instrålning, exempelvis

instr_tot.

2) Spatial Analyst Tools – Zonal – Zonal Statistics

2.1) Input raster of feature zone data: byggnadslager

2.2) Zone field: FID

2.3) Input raster value: soltak

2.4) Output raster: solt_sum

2.5) Statistics type: SUM

Räkna om till kWh:

3) Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Raster Calculator

3.1) %solt_sum%/1000

3.2) Output raster: solt_sum_kwh

Omvandla rastervärden till heltal.

4) 3D Analyst Tools – Raster Math – Int

4.1) Input raster or constant value: solt_sum_kwh

4.2) Output raster: sum_kwh_i

Konvertera till polygon:

5) Conversion Tools – From Raster – Raster to Polygon

5.1) Input raster: sum_kwh_i

5.2) Field: Value

5.3) Output: sum_kwh

Konvertera till punkter:

6) Data Management Tools – Features – Features To Point

6.1) Input Features: lager från steg 6

6.2) Inside: klicka i.

Föreina byggnadslagret med den totala solinstrålningen:

7) Högerklicka på byggnadslagret – Joins and Relates – Join...

7.1) Join data from another layer based on spatial location

7.1.1) 1. Choose the layer to join to this layer, or load spatial data from disk:

punktlager

7.1.2) 2. Each polygon will be given a summary...

7.1.3) How do you want the attributes to be summarized: Average