

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Solbruksplaner för system- och resurseffektiv utbyggnad av solexproduktion	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Solar utilization plans for system and resource effective deployment of photovoltaic systems	
Universitet/högskola/företag Uppsala universitet	Avdelning/institution Institutionen för samhällsbyggnad och industriell teknik
Adress Box 169, 751 04 Uppsala	
Namn på projektledare Joakim Widén	
Namn på ev övriga projektdeltagare David Lingfors, Oskar Lindberg, Alfred Birging, Irene Almenar Molina, Anders Mannikoff	
Nyckelord: 5-7 st Solel, Planering, Resurseffektivitet, GIS, Elnät	

Förord

Det här projektet har huvudsakligen finansierats av Energimyndigheten inom forskningsprogrammet El från solen. Herrljunga Elektriska AB och Herrljunga kommun har bidragit med samfinansiering av sin medverkan i projektet.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Summary	2
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande	4
Resultat	5
Diskussion.....	15
Publikationslista.....	16
Referenser, källor.....	18
Bilagor	20

Sammanfattning

Många solcellssystem ansluts och kommer att fortsätta anslutas till lokala eldistributionsnät. En viktig fråga, speciellt när det gäller större anläggningar, t.ex. solparker, är var systemen bör placeras geografiskt och anslutas för maximal resurs- och systemeffektivitet. Om anläggningar enbart lokaliseras utifrån gynnsamma instrålningsförhållanden kan följden bli att nätet måste förstärkas eller att anläggningarna på sikt inte kan utnyttjas fullt ut på grund av kapacitetsbrist. Därför är det intressant att ta fram så kallade solbruksplaner som

identifierar de mest gynnsamma lägena för nya anläggningar utifrån olika parametrar.

I det här projektet har en metodik för att underlätta resurs- och systemeffektiv utbyggnad av solexproduktion tagits fram. Genom en fallstudie på Herrljunga kommun och det lokala elnätet visas hur solbruksplaner kan utformas i samverkan mellan kommun och elnätsbolag. Projektets slutmål har varit att utveckla och demonstrera en metodik för upprättande av solbruksplaner, där speciellt gynnsamma lägen för solexproduktion identifieras, inte bara utifrån potentiell elproduktion utan även från förutsättningar vad gäller markutnyttjande och elnät. Detta har gjorts genom samtidig geografisk kartering och analys av potentiell solexproduktion på tak- och markbaserade solcellssystem, elnätets utbredning och kapacitet, skyddsvärd mark och bebyggelse och intresseområden för tätortsutbyggnad.

Projektet har resulterat i en generell metodik för solbruksplaner där tillgängliga ytor för solcellssystem identifieras och länkas till lämpliga nätstationer i det lokala mellanspänningsnätet. Fallstudien för Herrljunga kommun visar att andelen ytor som är tillgängliga, tillräckligt stora och belägna tillräckligt nära en lämplig nätstation är förhållandevis liten, speciellt för större solparker, vilket visar nyttan med solbruksplaner. Projektet visar också att en välplanerad anslutning av solparker, där val av geografisk placering och anslutningspunkt sker med omsorg, kan göra att antalet anläggningar som kan anslutas utan behov av nätförstärkningar eller andra åtgärder i nätet är många gånger högre än vid oplanerad utbyggnad och anslutning.

Summary

Many photovoltaic systems are connected and will continue to be connected to local electricity distribution networks. An important issue, especially for larger systems such as solar parks, is where the systems should be located geographically and connected for maximum resource and system efficiency. If systems are only located on the basis of favorable irradiance conditions, the consequence may be that the network must be strengthened or that the systems may not be fully utilized in the long run due to lack of capacity. Therefore, it is interesting to develop so-called solar utilization plans, which identify the most favorable locations for new facilities based on a number of parameters.

In this project, a methodology to facilitate resource- and system-efficient expansion of solar power generation has been developed. A case study of Herrljunga municipality and the local electricity network shows how local solar utilization plans can be designed in collaboration between the municipality and distribution system operators. The final goal of the project has been to develop and demonstrate a methodology for establishing solar utilization plans, where particularly favorable locations for solar power plants are identified. This has been done through simultaneous geographical mapping of potential solar resource availability on rooftops and land areas, the extent and capacity of the electricity

grid, land and buildings worthy of protection and areas of interest for urban development.

The project has resulted in a general methodology for solar utilization plans where available areas for solar power generation are identified and linked to suitable substations in the local medium voltage network. The case study for Herrljunga municipality shows that the proportion of areas that are accessible, large enough and close enough to a suitable network substation is relatively small, especially for larger solar parks, which shows the benefit of solar utilization plans. The project also shows that a well-planned connection of solar parks, where the choice of geographical location and connection point is made with care, can mean that the number of facilities that can be connected without the need for network reinforcements or other measures in the network is many times higher than with unplanned expansion and connection.

Inledning/Bakgrund

En central forskningsfråga vad gäller storskalig utbyggnad av soletproduktion är hur kraftsystem med 100 % förnybara energikällor kan konstrueras och styras (Olauson m.fl., 2016; Kroposki m.fl., 2017). I de flesta scenarier för 100 % förnybara kraftsystem antas de flesta solcellssystem anslutas till eldistributionsnäten (Olauson m.fl., 2016). För att kunna integrera sådana solcellssystem resurseffektivt och systemriktigt måste det finnas tillförlitlig information om inte bara vilka lägen som ger högt energiutbyte utan också geografisk information om var det lokala elnätet har som högst kapacitet för att ta emot genererad effekt, för att undvika nätförstärkning (Quirós-Tortós m.fl., 2017; Martínez m.fl., 2011; Stetz m.fl., 2015), huruvida det finns naturområden och byggnader som är skyddade eller kulturhistoriskt värdefulla, vilka områden som är intresseområden för tätortsutbyggnad, m.m. Storskalig utbyggnad av solet skulle alltså underlättas om det upprättades solbruksplaner, på samma sätt som kommunala vindbruksplaner tas fram, där gynnsamma lägen för placering av tak- och markbaserade solcellsanläggningar identifieras utifrån ett flertal parametrar.

När det gäller eldistributionsnätets kapacitet har flera studier, liksom erfarenhet från t.ex. Tyskland, visat hur omfattande anslutning av solcellssystem i existerande eldistributionsnät (0.4 kV lågspänning och 10 kV mellanspänning) påverkar effektlödena i elnätet och kan leda till överbelastning och otillåtna överspänningar (Widén, 2010; Luthander, 2018). Man brukar uttrycka detta som att ett elnät har en viss acceptansgräns (eng. hosting capacity) för distribuerad soletproduktion, vilket motsvarar den installerade solcellseffekt för vilken ett visst kvalitetsindex (t.ex. spänning eller strömstyrka) överskrids (Bollen och Hassan, 2011). I vårt tidigare forskningsprojekt "Utvärdering av tekniska lösningar för att hantera omfattande anslutning av solcellssystem i eldistributionsnät" (Widén, 2017) var slutsatserna, baserade på en fallstudie för Herrljunga kommun, att om soletproduktion byggs ut enbart utifrån vilka tak som har goda instrålningsförhållanden kan 22 % solet på årsbasis hanteras i elnätet utan åtgärder. För att nå högre utbyggnadsgrader kan nätförstärkning eller olika alternativa åtgärder utnyttjas, men för att nå utbyggnadsgrader över 30 % på

årsbasis är begränsning av utmatad effekt från solcellssystem (eng. curtailment) det enda realistiska alternativet, på sikt möjligen kombinerad med batterilagring.

Eftersom förstärkning av elnätet och andra åtgärder för att hantera överproduktion av solel alltså kan vara dyra eller innebära förlust av solelproduktion skulle en mer planerad utbyggnad av solel som tar hänsyn till var elnätet i nuvarande utformning är som starkast vara kostnads- och resurseffektiv. En av studierna som vi gjorde på Herrljunga Elektriskas mellanspänningsnät visade att ”smart allokering”, dvs att successivt ansluta solcellssystem till de delar av elnätet som kan ta emot högst effekter, kan öka nätets acceptansgräns till 74 % solel på årsbasis (Lingfors m.fl., 2015). Från elnätets synpunkt skulle det alltså kunna vara bättre med större anläggningar anslutna till strategiskt valda punkter i nätet än helt distribuerade system. De senaste årens ökade utbyggnad av solparker i Sverige gör att det finns ett stort behov för kommuner och länsstyrelser att ta fram solbruksplaner; solparker ställer högre krav på planering då de både tar större ytor i anspråk och levererar högre effekter till enskilda punkter i nätet.

Det här projektets syfte har varit att underlätta resurs- och systemeffektiv utbyggnad av solelproduktion genom ökad kunskap om hur lokala solbruksplaner kan utformas i samverkan mellan kommun och elnätsbolag. Projektets slutmål har varit att utveckla och demonstrera en metodik för upprättande av solbruksplaner, där speciellt gynnsamma lägen för solelproduktion identifieras genom samtidig geografisk kartering av potentiell solelproduktion på tak- och markbaserade solcellssystem, elnätets utbredning och kapacitet, skyddsvärd mark och bebyggelse och intresseområden för tätortsutbyggnad.

Projektet har genomförts av Uppsala universitet i samarbete med Herrljunga Elektriska och Herrljunga kommun mellan juli 2018 och juni 2021 med huvudsaklig finansiering från Energimyndigheten inom forskningsprogrammet El från solen.

Eftersom projektets genomförande och resultat beskrivs mycket lättillgängligt i de bifogade publikationerna görs en kortare sammanfattning och översikt över projektet i den här slutrapporten.

Genomförande

Arbetet inom projektet utfördes i fyra arbetspaket:

- *Arbetspaket 1: Utveckling av solresurskartering.*

Inom det här arbetspaketet undersöktes vilken typ av solkartering som är lämplig att använda för solbruksplaner, både vad gäller byggnads- och markförlagda solcellssystem. Laserdata och fotogrammetriska data, båda från Lantmäteriet, jämfördes och förslag på solkarteringsmetodik utvecklades.

- *Arbetspaket 2: Metodik för solbruksplaner.*

En generell metodik för upprättande av solbruksplaner utvecklades i det här arbetspaketet, inklusive en kartläggning av vilka parametrar som är viktiga att

inkludera i analysen. Geografiska data för kartering av dessa parametrar identifierades och en GIS-baserad metod för att kombinera dessa utvecklades.

▪ *Arbetspaket 3: Fallstudie för Herrljunga kommun.*

I det här arbetspaketet genomfördes en omfattande fallstudie för Herrljunga kommun, där metodiken för solbruksplaner tillämpades. Framför allt gjordes lastflödessimuleringar av elnätet baserat på data från Herrljunga Elektriska och kombinerades med geografiska data från Herrljunga kommun och andra aktörer.

▪ *Arbetspaket 4: Resultatspridning.*

Flera olika aktiviteter för resultatspridning genomfördes i det här arbetspaketet för att nå ut med resultat och erfarenheter från projektet, bland annat vetenskapliga publikationer (se nedan), presentationer vid konferenser, flera workshops och seminarier samt spridning via kommuner och nyhetsmedia.

Arbetet har utförts i samarbete mellan forskare och examensarbetare vid Uppsala universitet (Joakim Widén, David Lingfors, Oskar Lindberg, Alfred Birging, Irene Almenar Molina) och projektdeltagare vid Herrljunga Elektriska (Anders Mannikoff och Thomas Erikson) och Herrljunga kommun (Maja Sallander).

Resultat

Solresurskartering

Solresurskartering, det vill säga geografiskt upplöst kvantifiering av instrålad solenergi på årsbasis eller på andra tidsskalor, kan vara relevant för framtagning av solbruksplaner på två sätt. Dels kan en sådan kartering ge information om vilka byggnads- eller markytor som har högst solenergitillgång och därför bör prioriteras, dels kan den ge indata till de elnätsberäkningar som är en del av metodiken.

När behövs solresurskartering?

Under arbetet med metodiken för solbruksplanerna och fallstudien för Herrljunga kommun gjordes bedömningen att en detaljerad solkartering i allmänhet inte är nödvändig för att upprätta en solbruksplan. När det gäller markförlagda system är det ofta tillräckligt att veta om en markyta är öppen (t.ex. fält eller åkermark snarare än skog) för att den ska kunna bedömas vara lämplig eller ej. Variationen i solinstrålning på grund av skuggning från terräng är ofta obetydlig och skuggningen från omgivande växtlighet eller bebyggelse påverkar ofta bara en mindre del av en öppen markyta. Eftersom elnätssimuleringarna i metodiken föreslås göras på mellanspanningsnivå är det inte heller nödvändigt med hög geografisk upplösning för byggnadsapplicerade system, som på mellanspanningsnivån påverkar elnätet i kraftigt aggregerad form.

På grund av detta utformades metodiken för solbruksplaner, och genomfördes fallstudien, utan någon detaljerad solresurskartering. Eftersom solresurskartering fortfarande ingick i projektet och kan ha betydelse i vissa fall (till exempel för

platser där det är stora höjdskillnader i terrängen eller med många mindre öppna markytor snarare än ett fåtal stora), gjordes ändå en del arbete kring solresurskartering, vilket redogörs för i korthet nedan.

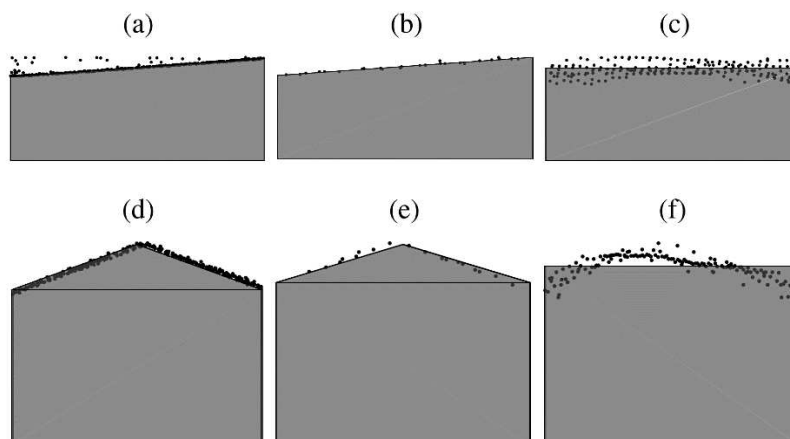
Solresurskartering på byggnader

För byggnader är målet med solresurskarteringen att kvantifiera hur mycket solenergi som är tillgänglig på olika existerande byggnadsytor, vilket kan ge underlag för en bedömning av vilka ytor som är bäst lämpade för byggnadsapplicerade solcellssystem, eller vilka som med störst sannolikhet kommer att utnyttjas för detta i framtiden. För beräkning av solinstrålning mot byggnadsytor finns sedan länge etablerade metoder; för en översikt, se till exempel Widén och Munkhammar (2019). Utmaningen ligger istället i att tillförlitligt identifiera existerande byggnadsytor, främst takytor, och deras orientering och lutning.

I projektet jämfördes olika data och metoder för att ta fram representativa 3D-modeller för byggnader, med fokus på korrekt identifiering av takytor. Datatyperna var höjddata i form av punktmoln i ett 3-dimensionellt koordinatsystem; dels laserdata (även kallade LiDAR-data), som samlas in genom att laserpulser reflekteras mot marken från ett flygplan, dels fotogrammetriska data, som tas fram via satellit- eller flygfoton tagna från olika vinklar. Båda datatyperna erhöles från Lantmäteriet. De metoder som jämfördes var dels en rasterbaserad metod, vilket innebär att punktdata konverteras via interpolation till ett rutnät (ett så kallat raster) och att lutning och orientering beräknas för varje sådan rastercell, dels en vektorbaserad metod, vilket i det här fallet avser anpassning av vektoriserade plan till de punktmoln som representerar byggnader.

Båda metoderna användes på båda typerna av data i jämförelsen, som baserades på data för Herrljunga kommun. Resultaten visade att taken oftare uppskattades korrekt med laserdata i jämförelse med fotogrammetriska data (78 % korrekt identifierade taktyper med laserdata mot 69 % korrekt identifierade taktyper med fotogrammetriska data). När det gäller de olika metoderna visade sig den vektorbaserade metoden vara mest tillförlitlig medan den rasterbaserade metoden generellt sett överskattade taklutningarna. Figur 1 visar exempel på laserdata och fotogrammetriska data för två byggnader och vektorbaserade takmodeller anpassade till dessa. Det syns tydligt hur fotogrammetriska data ger en mindre distinkt takprofil och därmed också sämre anpassade – här uppenbart felaktiga – modeller.

Sammanfattningsvis visar utvecklingen och analysen av solresurskartering inom projektet att en vektorbaserad metod applicerad på laserdata ger den mest tillförlitliga karteringen av solenergi på byggnader.



Figur 1. Två byggnader med olika taktyper (a-c respektive d-f) modellerade med den vektorbaserade metoden och anpassade till högupplösta laserdata (a,d), lågupplösta laserdata (b,e), samt fotogrammetriska data (c,f). Från Lingfors och Widén (2018).

Solresurskartering på mark

För markytor är målet med solkarteringen att kvantifiera solenergitillgången på markytor som bedöms vara tillgängliga för utbyggnad av markbaserade solcellssystem, så att lämpliga ytor kan väljas ut och prioriteras i solbruksplanen. Eftersom potentiellt användbara markytor är betydligt större än tillgängliga taktytor behövs en enkel men tillräckligt noggrann metod som effektivt kan avgöra hur stor del av en öppen markyta som har tillräckligt hög solinstrålning.

Metoden som togs fram i projektet – och som fortfarande är under implementering och testning – går ut på att uppskatta buffertzoner runt skuggande objekt som räknas bort från den totalt tillgängliga markytan. Den vanligaste situationen är att man har en skogskant som skuggar ett öppet fält, så att en del av fältet blir oanvändbar ur solenergisynpunkt. Hur långt in på fältet buffertzonen sträcker sig beror på parametrar som trädhöjd, skogsbrynets och fältets orientering i väderstreck, samt platsens latitud (vilket avgör hur högt solen når på himlen).

För att validera denna förenklade karteringsmetod skulle den kunna jämföras mot en mer detaljerad men också mer beräkningskrävande kartering som delar in ett fält i rasterpunkter (som i metoden för taktytor ovan) och beräknar solinstrålningen mot varje rasterpunkt med hänsyn till omgivande terräng och vegetation, baserat på laserdata.

Metodik för solbruksplaner

Forskningsläge

Huvudsyftet med en solbruksplan är att identifiera de mest lämpliga platserna för lokalisering av system för solelproduktion. Detta är en del av det större problem som i forskningslitteraturen kallas för *site selection* och som omfattar val av lokalisering av olika elproduktionsanläggningar, främst sol och vind men även anläggningar baserade på till exempel biomassa (Alami m.fl., 2016; Delivand m.fl., 2015; Hossein m.fl., 2018; Siheng m.fl., 2016). Eftersom många olika

parametrar kan behöva vägas in i en sådan analys – flera forskningsöversikter har listat och rankat parametrar av betydelse, se t.ex. Esra m.fl. (2019), Garni och Awasthi (2018) och Rediske m.fl. (2019) – kräver *site selection*-problemet någon typ av multikriterieanalys där kriterier för flera olika parametrar definieras och de platser som uppfyller kriterierna identifieras. För en sådan analys kan till exempel så kallad *boolesk överlagring* användas, där GIS-lager för de olika parametrarna kombineras och de områden som uppfyller alla kriterierna väljs ut (Hossein m.fl., 2018; Alami m.fl., 2016; Siheng m.fl., 2016). Ibland används en mer nyanserad analys, där en expertpanel ger olika kriterier olika vikt och varje plats får en total poäng utifrån vilken rankning sedan sker (Choi m.fl., 2019). Den senare metodiken blir dock mindre objektiv och genomskinlig.

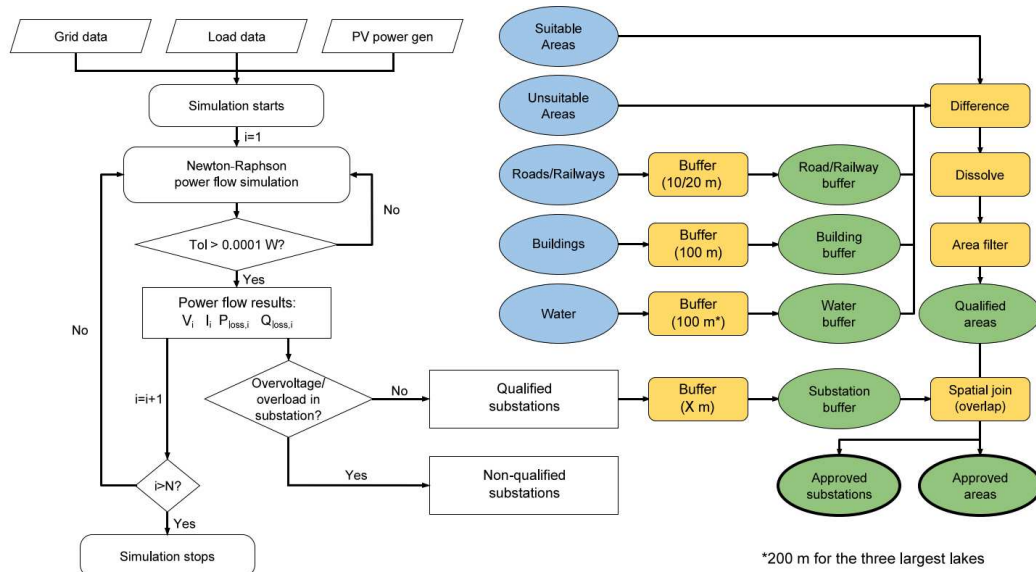
Tidigare studier av optimal placering av solcellsanläggningar har begränsats till analys av olika geografiska datalager (Hossein m.fl., 2018; Al Garni m.fl., 2018; Majumdar och Pasqualetti, 2019), medan en viktig parameter i sammanhanget är möjligheten till nätanslutning och, från nätägarens perspektiv, vilken belastning på elnätet anläggningarna skulle ge upphov till. I metodiken som utvecklades i det här projektet har vi därför kombinerat analys av GIS-lager baserad på boolesk överlagring för olika parametrar och kriterier med en lastflödesberäkning för det lokala elnätet. Lastflödesberäkningen visar vilken påverkan på elnätet en solcellsanläggning på en viss plats skulle ha och blir därför en viktig parameter i det slutliga valet av lämpliga platser.

Beräkningsmetoder

Figur 2 visar ett flödesschema över den utvecklade metodiken för att identifiera lämpliga platser för solcellsanläggningar. De ofärgade rutorna till vänster beskriver lastflödessimuleringen för elnätet, där elnätets konfiguration, liksom elanvändning och solelproduktion i varje nätstation, är indata till beräkningarna och där slutresultatet är, för varje nätstation i elnätet, huruvida överspänning eller överbelastning uppstår vid anslutning av solcellsanläggningar av en viss storlek.

De färgade rutorna till höger i figuren visar den geografiska analysen, där blå rutor är indata i form av GIS-lager, dels lager för olika ytor som bedöms vara tillgängliga respektive otillgängliga utifrån olika kriterier, dels lokalisering av olika hinder mot placering, såsom vägar, byggnader och vattendrag. Gula rutor är geografiska analysverktyg och gröna rutor är resultat från analyserna.

Slutresultaten från hela analysen är de två rutorna längst ned till höger; godkända nätstationer och godkända markytor. I det sista analyssteget kombineras dels de nätstationer som klarar av anslutning av solcellsanläggningarna, dels de markytor som är tillgängliga för lokalisering av solcellsanläggningar och som är belägna tillräckligt nära en nätstation. Fler detaljer kring de olika delarna av metodiken finns i de bilagda publikationerna från projektet (Lindberg och Birging, 2019; Lindberg m.fl., 2021).

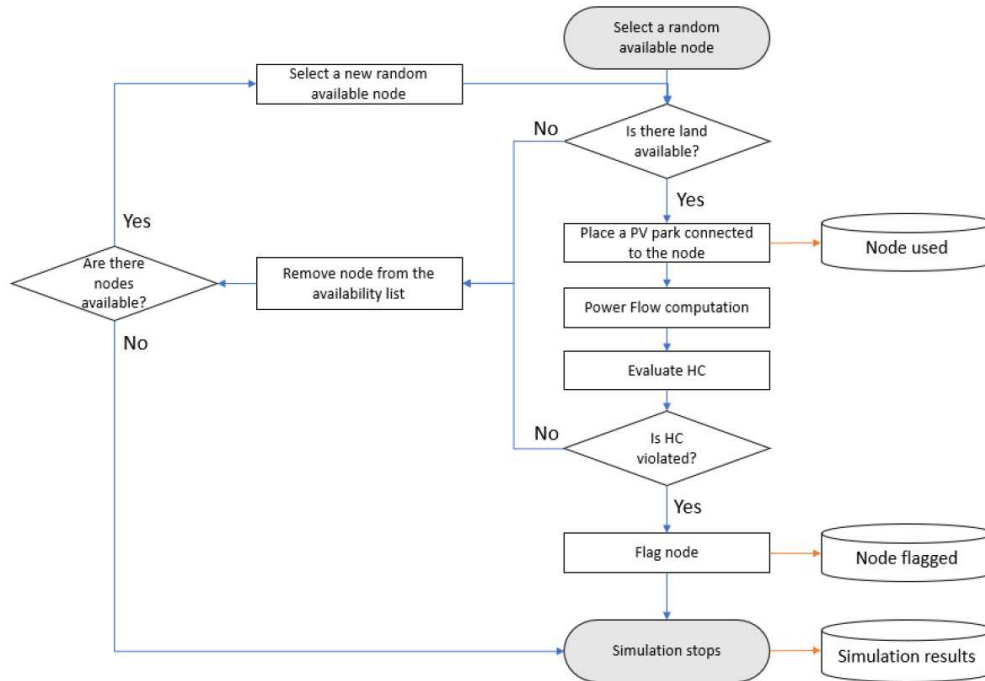


Figur 2. Flödesschema för den kombinerade geografiska analysen och elnätssimuleringen som utvecklades i projektet för att identifiera lämpliga platser för solcellssystem i solbruksplanen. Från Lindberg m.fl. (2021).

Eftersom metodiken ovan bygger på att solcellsanläggningar av en och samma storlek ansluts separat till var och en av nätstationerna – det vill säga att förutsättningarna för anslutning av nya solcellsanläggningar till flera nätstationer är oberoende av hur många nya anläggningar som ansluts och i vilken ordning – gjordes en utökad studie för att undersöka hur elnätet faktiskt påverkas av successiv anslutning av flera anläggningar (Molina, 2020). Figur 3 visar ett flödesschema för en av de Monte Carlo-baserade undersökningar som gjordes. Här väljs en nätstation i nätet slumpmässigt och en ny solcellsanläggning ansluts till den om det finns tillgänglig markyta. Därefter görs en simulering av elnätet och om den visar att nätets drift fortfarande är acceptabel väljs ytterligare en slumpmässig nätstation, och så vidare. Om elnätets driftförhållanden tills slut blir oacceptabla (för hög spänning eller för hög belastning av nätstationen) avslutas simuleringen. Genom att upprepa ett stort antal sådana successiva slumpmässiga utplaceringar av solcellsanläggningar i nätet kan man få en god uppfattning om vad som kan hända i nätet vid helt oplanerad utbyggnad av anläggningar.

Ytterligare två varianter av denna algoritm studerades i projektet. I den ena avslutas simuleringen inte om problem uppstår i nätet utan den senaste anläggningen ansluts i istället till en annan slumpmässigt vald nätstation och den nätstation där problem uppstod vid anslutning flaggas. När alla nätstationer antingen har testats för anslutning eller flaggats för problem avslutas simuleringen. Ett stort antal sådana simuleringar som testar ett stort antal möjliga kombinationer kommer att visa hur den tillgängliga kapaciteten utnyttjas maximalt. Den tredje algoritmen stannar inte alls om problem uppstår i nätet utan fortsätter placera ut ett fixt antal nya anläggningar; en sådan simulering visar hur

omfattande åtgärder som behöver vidtas i nätet för att uppnå ett visst utbyggnadsmål för solexproduktion.



Figur 3. Algoritm för Monte Carlo-simulering av successiv lokalisering och nätanslutning av solparker, i det här fallet oplanerad anslutning, där systemen placeras och ansluts helt slumpmässigt och utbyggnaden avslutas om problem uppstår i nätet. Från Molina (2020).

Fallstudie för Herrljunga kommun

Metodiken som beskrivits ovan tillämpades på Herrljunga kommun och på det lokala elnätsbolaget Herrljunga Elektriskas elnät. Resultaten presenteras i detalj i de bilagda arbetena, men de huvudsakliga resultaten och slutsatserna sammanfattas kort i det här avsnittet.

Data

Följande tre huvudsakliga typer av data behövs för att tillämpa metodiken för solbruksplaner och togs fram för Herrljunga kommun:

- *Solelproduktionsdata.* Solelproduktionsdata i någon form för de tänkta solcellsanläggningarna behövs som indata till elnätssimuleringarna. I fallstudien för Herrljunga användes en enkel modell för solcellssystem för att generera simulerade elproduktionsdata från solinstrålningsdata. Data för solinstrålning extraherades för Herrljunga från SMHI:s databas STRÅNG.
- *Elnätsdata.* Data för mellanspänningsnätet tillhandahölls av Herrljunga Elektriska och bestod av alla nätstationers geografiska placering, kopplingar

mellan nätstationer och andra kopplingspunkter, kabeltyper och längder, samt elanvändningsdata på timbasis aggregerade i varje nätstation. Tillsammans med solelproduktionsdata möjliggjorde detta en full lastflödessimulering av mellanspänningsnätet.

- *Geografiska data.* GIS-data från Lantmäteriet och från Herrljunga kommuns översiktsplan användes för att kunna identifiera tillgängliga och otillgängliga markytor för solcellsanläggningar.

De två senare typerna av data finns generellt sett i lokala elnätbolags respektive kommuners verksamhet och bör kunna utnyttjas för framtagning av solbruksplaner i alla svenska kommuner. Lämpliga solelproduktionsdata kan antingen komma från lokala anläggningar eller enkelt simuleras som här.

Resultat

Resultaten från fallstudien för Herrljunga består av en uppsättning av markytor som är möjliga för placering av solparker och en uppsättning av nätstationer i det lokala elnätet där solparker kan anslutas utan problem. Från dessa kan sedan lämplig placering och anslutning av solparker identifieras.

Tabell 1 visar resultaten från analysen av markyta i Herrljunga kommun. Dels visas den totala markytan, dels de ytor som är möjliga för placering och anslutning av solparker av olika storlek. Den markyta som är möjlig att placera solparker på beror dels på om den är tillgänglig att använda, dels om den är tillräckligt stor för att hysa en solpark. Det senare beror på solparkens totala effekt, där det har antagits att 1, 3, respektive 5 MW installerad effekt motsvarar 20 000, 60 000 respektive 100 000 m². Markytans avstånd till en befintlig nätstation avgör sedan om solparken anses möjlig vad gäller anslutning. För resultaten i tabell 1 antogs ett maximalt avstånd på 750 m.

Tabell 2 visar det totala antalet nätstationer i Herrljungas elnät och de nätstationer där anslutning inte leder till problematiska driftförhållanden i nätet. Som synes finns även här ett samband med solparkens storlek; ju högre installerad effekt, desto större risk för överbelastning av elnätet. Även här minskar antalet möjliga platser när man tar hänsyn till avståndet mellan nätstation och tillgänglig markyta. Till exempel finns det endast två nätstationer där det är möjligt att ansluta anläggningar på 5 MW och som ligger tillräckligt nära tillräckligt stora, tillgängliga markytor.

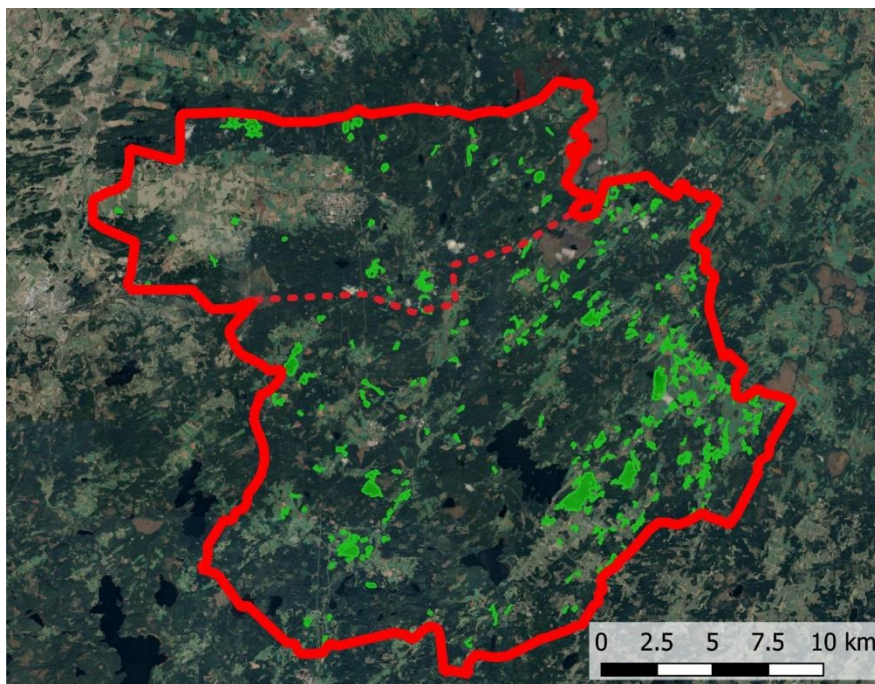
Tabell 1. Markyta (km²) i Herrljunga kommun totalt och som är möjlig att utnyttja för solparker respektive ligger tillräckligt nära en nätstation för anslutning. Från Lindberg m.fl. (2021).

	1 MW	3 MW	5 MW
Totalt	512	512	512
Möjlig för solpark	17	11	8
Möjlig för anslutning	4.6	1.2	0.6

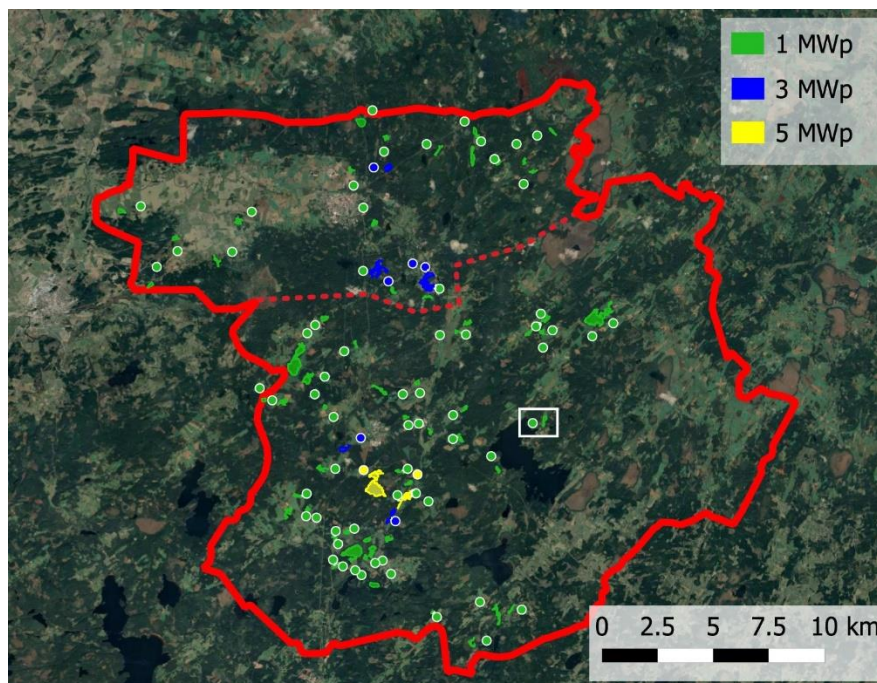
Tabell 2. Antal nätstationer i Herrljunga Elektriskas elnät totalt och som klarar respektive är tillräckligt nära för anslutning av solpark. Från Lindberg m.fl. (2021).

	1 MW	3 MW	5 MW
Totalt	337	337	337
Klarar solpark	309	119	73
Nära möjlig markyta	98	9	2

Resultaten kan också visualiseras geografiskt, vilket underlättar närmare analys och planering. Som exempel visar figur 4 de markytor som är möjliga att bebygga med solparker på 1 MW. Figur 5 visar möjliga kombinationer av nätstationer som klarar anslutning och markytor som är tillgängliga och tillräckligt stora för solparker om 1, 3 respektive 5 MW.



Figur 4. Markytor i Herrljunga kommun (markerade i ljusgrönt) som är möjliga att bebygga med solparker om 1 MW. Från Lindberg m.fl. (2021).



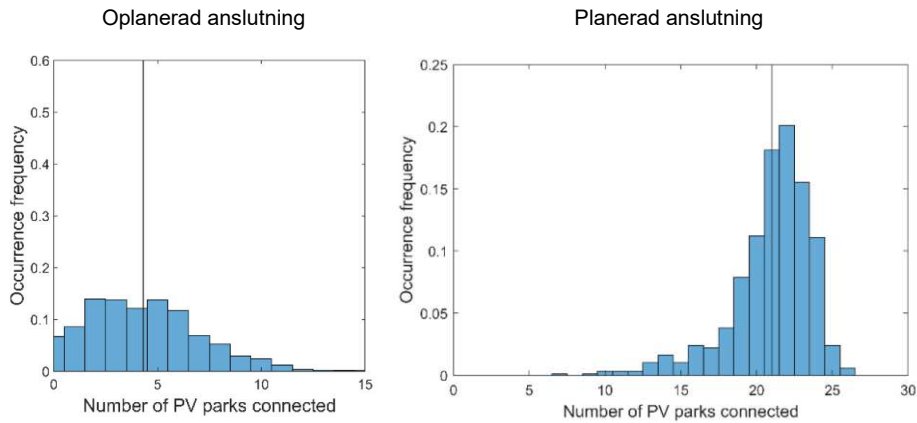
Figur 5. Par av nätstationer (cirklar) och markytor (polygoner) som är möjliga för placering och anslutning av solparker om 1, 3 respektive 5 MW i Herrljunga kommun. Från Lindberg m.fl. (2021).

Som resultaten sammantaget visar är det en förhållandevis liten andel av de totala markytorna i kommunen som är möjliga att utnyttja för solparker och en ännu mindre andel som är lämplig ur anslutningssynpunkt, speciellt för anläggningar större än 1 MW. Detta visar hur viktigt det kan vara för effektivt resursutnyttjande att upprätta en solbruksplan med hjälp av den här föreslagna metodiken.

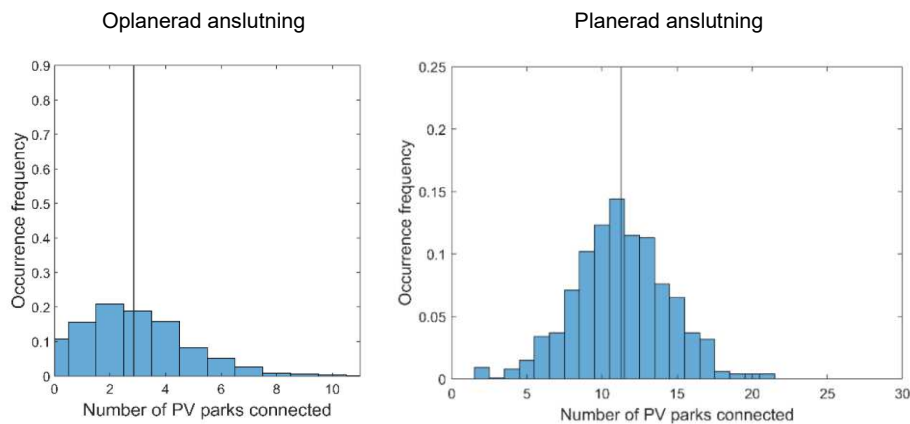
Som nämndes tidigare är analysen ovan inte dynamisk i meningen att den tar hänsyn till i vilken ordning nya anläggningar ansluts, eller vilken kombination av solparker som ger optimalt utnyttjande av befintlig nätkapacitet. Därför applicerades även den Monte Carlo-baserade metodik för successiv, slumpmässig anslutning av solcellsanläggningar som beskrevs ovan på Herrljungas elnät. Figur 6 sammanfattar några centrala resultat från den analysen. Dels visas vad som händer vid helt oplanerad anslutning, det vill säga vid användning av algoritmen i figur 3 ovan, dels vad som sker vid planerad anslutning, där nya alternativa nätstationer successivt testas om problem uppstår vid anslutning till en nätstation.

Figur 6 visar resultaten av 1000 simuleringar, där nya solparker om 1 MW successivt placerades ut på tillgängliga markytor och anslöts till närliggande nätstationer. Histogrammen visar fördelningen av antalet solparker som kunde

anslutas i respektive fall. Med oplanerad anslutning kan man i genomsnitt placera ut 7 solparker totalt i de två nätområdena, medan man med planerad anslutning kan ansluta 32 solparker. För planerad anslutning visar de högsta antalen, dvs värdena längst till höger i histogrammen, hur många solparker som kan anslutas med en verkligt optimal kombination av placeringar. Totalt i de båda områdena, med noga utvalda markytor och nätstationer, skulle teoretiskt sett 47 solparker om 1 MW kunna anslutas utan att driftförhållandena i det existerande mellanspänningsnätet äventyras.



(a) Herrljunga



(b) Ljung-Annalund

Figur 6. Histogram över antal solparker om 1 MW som kunde anslutas i de två nätområdena Herrljunga respektive Ljung-Annalund med oplanerad respektive planerad successiv anslutning. Totalt gjordes 1000 simuleringar i varje fall. De vertikala linjerna visar medelvärdena. Från Molina (2020).

Resultatspridning och kunskapsöverföring

Projektresultaten har presenterats i vetenskapliga tidskrifter, konferenser och rapporter (se nedan). Utöver detta har metodiken för solbruksplaner presenterats vid olika workshops/seminarier inom ramen för projektet, bland annat vid Herrljunga Elektriska, Jämtkraft, Herrljunga kommun och Region Örebro län. De två sistnämnda har även genererat följande digitala avtryck:

- [Solel – vad kan kommunen göra?](#) Framtidens solel, 2019.
- [Herrljunga kommun - först i landet med solbruksplan.](#) Herrljunga kommun, 25 januari 2021.

Se sent som den 10 november 2021 gjordes ytterligare en presentation av projektet för representanter från Skara Energi, Skaraborg kommun, Skövde Energi, Väner Energi, Kinnekulle Energi och Energikontor Väst.

Diskussion

Projektet visar sammantaget att det via samverkan mellan kommuner och lokala elnätsägare är möjligt att upprätta detaljerade solbruksplaner som ger viktig information inför utbyggnad och anslutning av nya solcellsanläggningar, speciellt för solparker. Båda parterna behövs för upprättande av solbruksplaner; kommunen behöver tillhandahålla geografisk information i form av data för översiktsplan och elnätsbolaget behöver tillhandahålla relevanta elnätsdata. Med denna information kan lämpliga (och olämpliga) platser för placering av nya solcellsanläggningar identifieras.

Fallstudien för Herrljunga kommun visar att det är förhållandevis få markytor som är tillgängliga, tillräckligt stora och belägna tillräckligt nära en nätstation där anslutning kan ske utan problem med överbelastning av elnätet. Speciellt för större anläggningar (större än 1 MW) är detta fallet, vilket visar nyttan med den föreslagna metodiken för solbruksplaner. Utan identifiering av lämpliga platser och anslutningspunkter skulle suboptimeringar lätt kunna ske, med onödiga nätförstärkningar och andra åtgärder som följd.

Fallstudien visar också att en välplanerad anslutning av solparker, där val av geografisk placering och anslutningspunkt sker med omsorg, skulle göra att antalet anläggningar som kan anslutas utan behov av nätförstärkningar eller andra åtgärder i nätet är många gånger högre än vid oplanerad utbyggnad och anslutning. I ett scenario med helt oplanerad anslutning av 1 MW-anläggningar skulle i genomsnitt 7 MW solel kunna anslutas i Herrljunga utan problem med överbelastning av nätet, medan en verkligt optimal geografisk allokering av produktionskapacitet skulle möjliggöra anslutning av 47 MW utan behov av nätförstärkning.

Sammanfattningsvis kan solbruksplaner vara ett användbart verktyg för kommuner och elnätsägare för lokal planering i syfte att möjliggöra effektivt utnyttjande av existerande infrastruktur vid utbyggnad av solelproduktion. Fortsatt forskning och utveckling inom området bör inriktas mot ytterligare fallstudier i

kommuner med varierande förutsättningar i form av bebyggelse, elnät och annan infrastruktur, geografi, m.m. Även studier av hur arbete med solbruksplaner kan integreras i kommunal och regional planering är intressant. Metodik för mer noggrann solenergiartering bör vidareutvecklas för att kunna tillämpas i de fall där det är relevant, t.ex. vid stora höjdskillnader i terrängen och där större sammanhängande markområden är mindre vanligt förekommande.

Publikationslista

Tidskriftsartiklar

- **P1:** Oskar Lindberg, Alfred Birging, Joakim Widén, David Lingfors, “PV park site selection for utility-scale solar guides combining GIS and power flow analysis: A case study on a Swedish municipality”, *Applied Energy* 282, Part A (2021) 116086.

Artikeln presenterar den metodik för solbruksplaner som utvecklades i projektet och tillämpar den på Herrljunga kommun. Här visas i detalj hur geografisk analys kombineras med lastflödessimuleringar av elnät för att sålla fram lämpliga placeringar av solparker, samt vilka data som behövs för båda typerna av analyser. Fallstudien för Herrljunga kommun visar att drygt 3 % av den totala markytan i kommunen skulle kunna utnyttjas för solcellsinstallationer om 1 MW, men endast 1 % kan användas om förstärkning av elnätet helt ska undvikas. För större anläggningar är den tillgängliga markytan ännu mer begränsad, 0.2 % för 3 MW och 0.1 % för 5 MW. Detta visar hur viktigt det är att ta hänsyn både till geografisk analys och analys av elnätet, och kombinera dessa, för att identifiera de mest lämpliga platserna för större solcellsinstallationer.

Konferensbidrag

- **P2:** David Lingfors, Joakim Widén, “Evaluation of datasets and methods to derive 3D building models and their influence on PV power integration studies”, *Proceedings of the 8th International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems*, Stockholm, Sweden, October 16-17, 2018.

Artikeln jämför fotogrammetriska data och LiDAR-data och s.k. datadriven och modelldriven identifiering av byggnadsytor för solcellssystem. Studien visade att för att göra tillförlitliga bedömningar av solinstrålning på byggnader, och i förlängningen solelproduktion och påverkan på elnät, bör LiDAR-data användas snarare än fotogrammetriska data, eftersom de senare ger en skev bild av just takformer. Dessutom bör en modelldriven, vektorbaserad metod för identifiering och modellering av byggnader användas, som visade sig vara överlägsen den studerade datadrivna, rasterbaserade metoden.

- **P3:** David Lingfors, “Solbruksplaner för regional planering”, presentation vid Solforum 2019, Göteborg, October 8-9, 2019.

Presentationen sammanfattade preliminära och förväntade resultat från projektet och planer framåt.

- **P4:** David Lingfors, "Determining the feasibility of solar power parks at northern latitudes through utility-scale solar guides", presentation vid Baltic University Programme (BUP) Symposium 2020 (online conference), August 25-26, 2020.

Presentationen sammanfattade resultaten dittills i projektet, vilket motsvarade i stort sett det första examensarbetet nedan och tidskriftsartikeln ovan, anpassat och generaliserat för att passa en publik från Östersjöområdet.

- **P5:** Irene Almenar Molina, David Lingfors, Joakim Widén, "Hosting capacity scenarios of PV park deployment in a Swedish rural distribution grid using Monte Carlo simulations", presentation vid International Sustainable Development Research Society (ISDRS) Conference (online conference), Mid Sweden University, July 13-15, 2021.

Konferensbidraget är huvudsakligen en sammanfattning av det andra examensarbetet som utfördes inom projektet (se nedan).

Examensarbeten

- **P6:** Oskar Lindberg, Alfred Birging, "Solbruksplan för effektiv utbyggnad av solcellsparker: Kartering genom elnätssimulering och geografisk analys", MSc thesis, Department of Engineering Sciences, Uppsala University, 2019.

Rapporten presenterar metodiken för solbruksplaner samt fallstudien för Herrljunga kommun. Innehållet är väsentligen detsamma som i tidskriftsartikeln från projektet (se ovan), men ger mer bakgrund och är mer utförlig vad gäller teori och metod. Rapporten är dessutom skriven på svenska och är tänkt att kunna fungera som en handbok för solbruksplaner i Sverige.

- **P7:** Irene Almenar Molina, Planning the future expansion of solar installations in a distribution power grid, MSc thesis, Department of Electrical Engineering, Uppsala University, 2020.

Som beskrivits ovan baseras den huvudsakliga metodiken för solbruksplaner i projektet på en statisk analys, det vill säga att en viss tänkt ytterligare produktionskapacitet adderas till det existerande elnätet. I verkligheten kommer dock varje ny installation av en produktionsenhet att påverka elnätets drift och ge nya förutsättningar för kommande installationer. Resultatet kan därför bli ett annat om man gör en dynamisk analys där förutsättningarna i nätet ändras efter anslutning av varje ny enhet. Det här examensarbetet presenterar en utökad metodik för successiv allokering av solcellssystem till flera olika platser i nätet, inklusive identifiering av en optimal allokering som maximerar installerad solcellskapacitet med ett minimum av nätförstärkningar. Även här görs en fallstudie på Herrljunga kommun som bland annat visar att en optimal allokering möjliggör solcellsinstallationer om 1 MW vardera i 47 punkter utan att elnätet behöver förstärkas.

Referenser

- M. A. Alami, M. Abdelhamid, M. Ahmed, PV sites suitability analysis in the eastern region of Morocco, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 18 (2016) 6-15. Tillgänglig online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2016.09.006> (2021-11-08).
- H. Z. Al Garni, A. Awasthi, Chapter 2 - Solar PV Power Plants Site Selection: A Review, in *Advances in Renewable Energies and Power Technologies Vol. 1: Solar and Wind Energies* (2018) 57-75. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2> (2021-11-08).
- M. Bollen, F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*, Wiley, 2011.
- I. Esra, C. Selcuk, K. Cengiz, A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making, *Energy Strategy Reviews* 25 (2019) 18–33. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.04.014> (2021-11-08).
- Y. Hossein, H. Hamed, Y. S. Amin, Spatial site selection for solar power plants using a GIS-based boolean-fuzzy logic model: A case study of Markazi province, Iran, *Energies* 11 (2018) 1648. Tillgänglig online: <http://dx.doi.org/10.3390/en11071648> (2021-11-08).
- M. K. Delivand, A. R. B. Cammerino, P. Garofalo, M. Monteleone, Optimal locations of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG (greenhouse gas) emissions: A case study on electricity productions in South Italy, *Journal of Cleaner Production* 99 (2015) 129–39. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.018> (2021-11-08).
- B. Kroposki, B. Johnson, Y. Zhang, V. Gevorgian, P. Denholm, B.M. Hodge, B. Hannegan, Achieving a 100% renewable grid, *IEEE Power & Energy Magazine* 15 (2017) 61-73. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1109/MPE.2016.2637122> (2021-11-13)
- O. Lindberg, A. Birging, Solbruksplan för effektiv utbyggnad av solcellsparker: Kartering genom elnätssimulering och geografisk analys, Examensarbete, Institutionen för teknikvetenskaper, Uppsala universitet, 2019. Tillgänglig online: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-401501> (2021-11-08).
- O. Lindberg, A. Birging, J. Widén, D. Lingfors, PV park site selection for utility-scale solar guides combining GIS and power flow analysis: A case study on a Swedish municipality, *Applied Energy* 282, Part A (2021) 116086. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116086> (2021-11-08).
- D. Lingfors, J. Marklund, J. Widén, Maximizing PV hosting capacity by smart allocation of PV: A case study on a Swedish distribution grid, *Proceedings of ASES Solar 2015*, Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA, July 28-30, 2015.
- D. Lingfors, J. Widén, Evaluation of datasets and methods to derive 3D building models and their influence on PV power integration studies, *Proceedings of the*

8th International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems, Stockholm, Sweden, October 16-17, 2018.

R. Luthander, Self-Consumption of Photovoltaic Electricity in Residential Buildings. Doktorsavhandling, Uppsala universitet, 2018. Tillgänglig online: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-362819> (2021-11-13).

D. Majumdar, M. J. Pasqualetti, Analysis of land availability for utility-scale power plants and assessment of solar photovoltaic development in the state of Arizona, USA, *Renewable Energy* 134 (2019) 1213–31. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.064> (2021-11-08).

J.A. Martinez, F. de León, A. Mehrizi-Sani, M.H. Nehrir, C. Wang, V. Dinavahi, Tools for Analysis and Design of Distributed Resources—Part II: Tools for Planning, Analysis and Design of Distribution Networks With Distributed Resources, *IEEE Transactions on Power Delivery* 26 (2011) 1653-1662. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2116046> (2021-11-13).

I. A. Molina, Planning the future expansion of solar installations in a distribution power grid, Examensarbete, Institutionen för elektroteknik, Uppsala universitet, 2020. Tillgänglig online: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-427190> (2021-11-08).

J. Olauson, M.N. Ayob, M. Bergkvist, N. Carpman, V. Castellucci, A. Goude, D. Lingfors, R. Waters, J. Widén, Net load variability in Nordic countries with a highly or fully renewable power system, *Nature Energy* 1 (2016) 16175. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.175> (2021-11-13).

J. Quirós-Tortós, G. Valverde, A. Argüello, L. Ochoa, Geo-information is power, *IEEE Power & Energy Magazine* 15 (2017) 48-56. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1109/MPE.2016.2637158> (2021-11-13).

G. Rediske, J. C. M. Siluk, N. G. Gastaldo, P. D. Rigo, C. B. Rosa, Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: A systematic review, *International Journal of Energy Research* 43 (2018) 1689-1701. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1002/er.4321> (2021-11-08).

W. Siheng, Z. Lifu, F. Dongjie, L. Xu, W. Taixia, T. Qingxi, Selecting photovoltaic generation sites in Tibet using remote sensing and geographic analysis, *Solar Energy* 133 (2016) 85-93. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.069> (2021-11-08).

T. Stetz, J. von Appen, F. Niedermeyer, G. Scheibner, R. Sikora, M. Braun, Twilight of the grids, *IEEE Power & Energy Magazine* 13 (2015) 50-61. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.1109/MPE.2014.2379971> (2021-11-13).

J. Widén, System studies and simulations of distributed photovoltaics in Sweden. Doktorsavhandling, Uppsala universitet, 2010. Tillgänglig online: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-132907> (2021-11-13).

J. Widén, Utvärdering av tekniska lösningar för att hantera omfattande anslutning av solcellssystem i eldistributionsnät, Slutrapport projekt 40864-1, Energimyndigheten, 2017.

J. Widén, J. Munkhammar, Solar Radiation Theory, Uppsala universitet, 2019. Tillgänglig online: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-381852> (2021-11-08).

Y. Choi, J. Suh, S. M. Kim, GIS-based solar radiation mapping, site evaluation, and potential assessment: A review, Applied Sciences 9 (2019) 1960. Tillgänglig online: <https://doi.org/10.3390/app9091960> (2021-11-08).

Bilagor

- Administrativ bilaga.
- De vetenskapliga publikationerna P1, P2, P6 och P7 (P3-P5 var enbart muntliga presentationer).