



Elkraft från solceller driver komfortkyla i Staben

Electricity from solar cells powers the comfort cooling in Staben

Christoffer Aalhuizen, Anna Franzén, Olle Levin, Sara Magnusson,
Emilie Nordlander, Joakim Stålnacke och Anna Tikhonova

Kandidatuppsats i teknik

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

Examensarbete 2015:11
ISSN 1654-9392
Uppsala 2015

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Christoffer Aalhuizen, Anna Franzén, Olle Levin, Sara Magnusson, Emilie Nordlander, Joakim Stålnacke och Anna Tikhonova

Elkraft från solceller driver komfortkyla i Staben
Electricity from solar cells powers the comfort cooling in Staben

Handledare: Alfredo de Toro, institutionen för energi och teknik, SLU
Biträdande handledare: Jonas Fransson, Uppsala universitet
Examinator: Sven Smårs, institutionen för energi och teknik, SLU

EX0759 Självständigt arbete i energisystem, Grundnivå, G2E, teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Serienamn: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
ISSN 1654-9392
2015:11

Uppsala 2015

Nyckelord: elkraft, solcell, kylsystem, komfortkyla, hållbar, Uppsala Science Park, Staben, Vasakronan

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Omslag: Staben, foto Christoffer Aalhuizen 2015

Sammanfattning

Uppsala Science Park ägs och förvaltas av fastighetsbolaget Vasakronan. 2013 renoverades kontorslokalen Staben och har sedan dess komfortkyla. Kylsystemet drivs idag med elkraft från elnätet, men i denna studie har möjligheten att driva systemet med solceller utretts eftersom detta ger Staben ett egenförsörjande och ett miljövänligt kylsystem. Även kostnad och återbetalningstid undersöktes för att ge en bild av hur rimligt det vore att driva komfortkylan med en solcellsanläggning.

För att undersöka hur stor märkeffekt som behövs för att täcka driftbehovet hos kylsystemet utfördes simuleringar. Simuleringarna baserades på utomhustemperatur, solinstrålning och Stabens elkraftförbrukning. Vidare undersöktes data för solinstrålning och utomhustemperatur för att kvantifiera ett samband dessa förmodades ha. Simuleringens resultat validerades med hjälp av beräkningar och PVGIS, ett program som räknar ut energiproduktionen från solcellsanläggningar.

Enligt simuleringarna behövde solcellsanläggningen ha en installerad effekt på 3 kW för att täcka kylsystemets elförbrukning på årsbasis. Eftersom kylsystemet även är i drift nattetid och solcellerna endast producerade elkraft dagtid fanns inga ekonomiskt lämpliga möjligheter att täcka kylsystemets effektbehov med enbart elkraft från solceller. Valideringsberäkningen baserad på PVGIS gav att den installerade effekten blev 3,8 kW.

Grundinvesteringen för solcellsanläggningen beräknades till 70 000 SEK för en 3 kW-anläggning. Med en sådan storlek på anläggningen uppstod inget överskott av elkraft, vilket innebär att all elkraft förbrukas i Staben. Återbetalningstiden blev mellan 10 och 15 år beroende på huruvida bidrag för solceller erhöles samt hur elpriset utvecklas i framtiden.

Abstract

Staben is a building in Uppsala Science Park owned by Vasakronan. During 2013, Staben was renovated and a new air conditioning system was installed. The main components of the air conditioning system are three circulation pumps which require electricity. It is desired by Vasakronan to supply this electric power in a way that is environmentally friendly. Therefore, the possibilities of operating the cooling system of Staben using solar power have been examined in this study.

To determine an appropriate size of the solar-cell facility, simulations and calculations were performed. The simulations were based on factors such as outside temperature, insolation and the electric power consumption of Staben. In addition to the simulation, an analysis of insolation and outside temperature was performed to validate the correlation between those two factors. The results of the simulations were validated through calculations and use of PVGIS, a computer program specialized in calculating electric production of solar cells.

According to the simulations an appropriate size of the solar-cell facility to operate the cooling system would be 3 kW rated power. This way, no electric power is sold to the grid. The investment of a 3 kW solar-cell facility will cost approximately 70 000 SEK, which results in a pay-back time between 10 and 15 years.

Förord

Denna rapport är en avhandling av ett kandidarbete för kursen självständigt arbete inom energisystem, där möjligheterna att driva en lokals kylsystem med hjälp av solceller har undersökts. Tack till Vasakronan, Ulf Näslund och Per Fagerman för hjälp med alla frågor berörande fastigheten Staben och dess kylsystem, samt tack till Meteorologiska institutionen för data på solinstrålning och utomhustemperatur i Uppsala. Slutligen ett stort tack till Jonas Fransson, Alfredo de Toro och David Börjesson för handledning, synpunkter och råd för att förbättra vårt arbete ytterligare.

Innehållsförteckning

1 Inledning	5
1.1 Solceller	6
1.2 Växelriktare	6
1.3 Ekonomiska aspekter för solcellsanläggningar	6
2 Metod	7
2.1 Antaganden	7
2.2 System	8
2.3 Data	8
2.4 Simulering och validering	9
2.5 Analys av utomhustemperatur och solinstrålning	10
2.6 Ekonomi	10
3 Resultat	10
3.1 Anläggningens storlek	10
3.2 Samband mellan utomhustemperatur och solinstrålning	13
3.3 Kostnader och återbetalningstid	14
4 Diskussion	15
4.1 Solelproduktion mot pumparnas kylbehov	15
4.2 Husets effektbehov	15
4.3 Samband mellan utomhustemperatur och solinstrålning	16
4.4 Jämförelse av märkeffekt från validering och simulering	16
4.5 Investering och återbetalningstid	16
5 Slutsats	17
Referenser	18

Bilagor

Bilaga A Bakgrundsteori	21
Bilaga B Simuleringsmodell	31
Bilaga C Validering	43
Bilaga D Analys av sambandet mellan utomhustemperatur och strålningsintensitet	51
Bilaga E Ekonomiska aspekter på solcellsanläggningar	59
Bilaga F MATLAB-kod simuleringsmodell	71
Bilaga G MATLAB-kod	75
Bilaga H MATLAB-kod för analysen av solinstrålningen och utomhustemperaturen	79

1 Inledning

På området Uppsala Science Park, beläget längs Dag Hammarskölds väg i Uppsala, finns kontorsfastigheten Staben. Byggnaden är ett trevåningshus som ägs av Vasakronan, där 800 m² används för kontor och 170 m² är biytor (Vasakronan, 2015b).

Under 2013 utfördes en renovering av Staben, som bland annat resulterade i installationen av ett nytt kylsystem. Kylsystemet använder bergkyla och kan förenklat beskrivas som tre cirkulationspumpar. För att arbeta för hållbarhet ville Vasakronan undersöka möjligheten att driva kylsystemet med hjälp av solceller. Intresset för solceller har ökat på senare år då priserna har sjunkit (se bilaga E). Miljömedvetenheten hos allmänheten, likväl som hos företag, är också större idag.

Projektets mål är att skapa ett underlag för hur kylsystemet kan drivas med elkraft från solceller. Lösningen ska vara tekniskt tillämplar, tillåta att kylsystemet kan köras med samma prestanda och pålitlighet som i dagsläget och inte påverka Uppsala Science Parks estetik negativt. Dessutom skall även en uppskattning av kostnader och återbetalningstider beräknas och redovisas.

Enligt Ulf Näslund, teknik- och servicechef på Vasakronan, skulle denna solcellsanläggning troligen placeras på ett platt garagetak i närheten av Staben. En bild av bl.a. garaget ses i figur 1. Takets yta är ungefär 80 m² och om solcellsanläggningen blir större än takytan kan en utbyggnad ske på delar av Stabens parkering.



Figur 1. Bilden visar Staben (till höger), dess parkering och garaget (nere till vänster) (Foto: C. Aalhuizen).

1.1 Solceller

Solceller finns i olika typer som alla har olika egenskaper. De solceller som dominerar marknaden idag är tre typer av kiselbaserade solceller; polykristallina, monokristallina och tunnfilmsolceller. De olika typerna skiljer sig från varandra på olika sätt. De skillnader som var mest relevanta för projektet var de olika verkningsgraderna samt skillnader i pris. Monokristallina solceller har normalt en verkningsgrad kring 15-20% (Solkungen, 2015), polykristallina solceller har en något lägre verkningsgrad, runt 13-16% (Skaffasolcell, 2015). Skillnaden i verkningsgrad ökar vid höga celltemperaturer och dåliga ljusförhållanden. Tunnfilmsolceller har i regel den lägsta verkningsgraden, som ligger kring 10%, och även en kortare livslängd än de övriga typerna. Polykristallina solceller är den billigaste typen av solceller (Electrotecenergy, 2015).

Eftersom solinstrålning och temperatur varierar finns en internationell standard vid bestämmande av solcellers verkningsgrad kallad Standard Test Conditions (STC), som innebär att solcellerna belyses med solinstrålning på 1 kW/m^2 vinkelrätt mot cellen och har en temperatur på $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Zimmermann, 2015).

Som ett mer realistiskt alternativ till STC används Normal Operating Cell Temperatur (NOCT). Under dessa förhållanden är solinstrålningen 800 W/m^2 , omgivande temperatur 20°C och vindhastigheten 1 m/s (se bilaga A).

Eftersom solens höjd på himlen varierar under dygnet och året, måste solceller vinklas för bästa avkastning. Den optimala vinkeln är olika för varje breddgrad på jorden. I Uppsala bör lutningen vara nära 40° för optimal effekt (se bilaga A).

Solceller i Sverige har normalt en årlig elkraftsproduktion på 800-1100 kWh per kW märkeffekt (Stridh, 2013)

1.2 Växelriktare

Eftersom solceller genererar likström och elnätet leder växelström krävs en växelriktare, som omvandlar likström till växelström, för att ansluta solceller till elnätet. Växelriktare ser även till att elkraft producerad av solceller inte förs ut på elnätet vid eventuella strömavbrott (Solelsprogrammet, 2015). Verkningsgraden hos växelriktare varierar med omgivningstemperaturen, och sjunker med ungefär 1 procentenhet per $12 \text{ }^\circ\text{C}$ ökad temperatur (Vignola m.fl., 2008).

1.3 Ekonomiska aspekter för solcellsanläggningar

Priset på solcellssystem har sjunkit markant under de senaste åren. Mellan 2009 och 2013 sjönk kostnaden för kommersiella system på runt 20 kW från 100 SEK per W till 19 SEK per W (Rydell, 2015). Privata solcellsanläggningar med en installerad märkeffekt på mindre än 15 kW kostar mellan 18 och 28 SEK per W (Stridh, 2014). Generellt sett sjunker kostnaden per W med ökad installerad märkeffekt.

Företag som investerar i solcellsanläggningar för egen konsumtion har möjlighet att ansöka om ett statligt bidrag motsvarande 30 % av samtliga installations- och materialkostnader, eller som mest 1 200 000 SEK. Stödet kan endast ges till solcellsprojekt som påbörjats tidigast 1 juli 2009 och beräknas vara avslutade 31 december 2016 (Gustafsson, 2015). För åren 2013 till 2016 har 280 000 000 SEK avsatts för stöd till solcellsanläggningar. Av redan behandlade ansökningar har 40 % beviljats bidrag, och i nuläget kommer nya ansökningar förmodligen inte få del av avsatta medel (Stridh, 2015).

När produktionen från solcellerna överstiger fastighetens elkraftsbehov produceras ett överskott av elkraft som kan säljas på elnätet. Dock erhålles mindre ersättning per såld kWh jämfört med priset per inköpt kWh (Rydell, 2015). Förtjänsten per kWh blir därför större vid egen användning än vid försäljning av egenproducerad elkraft. I priset per såld kWh ingår Nord Pools spotpris (Vattenfalls solcellsavdelning, 2015), sålda elcertifikat (E.ON, 2015), skattereduktion (Skatteverket, 2015b) och moms (Skatteverket, 2015a). Fördelningen kan ses i tabell 1.

Försäljningspriset på 89 öre per kWh egenproducerad el kan jämföras med det nuvarande inköpspriset på elkraft för Staben på Uppsala Science Park som ligger på 136 öre per kWh. Det framtida spotpriset beräknas öka med mellan 1,0 och 3,9 % fram till 2030 (Unger, u.å.).

Tabell 1. Tabellen visar en sammanfattning av de delar som ingår i försäljningspriset vid försäljning av elkraft till elnätet.

Del av försäljningspriset	öre/ kWh
Spotpris	36*
Moms	-25
Skattereduktion	60
Elcertifikat	18**
Summa	89

*Genomsnittligt spotpris 2014

**Genomsnittligt pris för elcertifikat under 2014

Ett alternativ till lagring av överskott av elkraft på elnätet är lagring i batteribankar. Då batteribankar är dyra, och knappt förekommer i Sverige, bedömdes en sådan lösning vara olämplig för Staben. (Andersson, 2015).

2 Metod

En simuleringsmodell skapades baserad på data på solinstrålning, utomhustemperatur och Stabens elförbrukning. Solcellernas dimensioner beräknades också utifrån teoretiska samband och med hjälp av programvaran PVGIS för att jämföra det med simuleringens resultat. Dessutom analyserades samband mellan indata mängder. Kostnader och återbetalning av solcellsanläggningen beräknades.

2.1 Antaganden

För att skapa ett förenklat system gjordes vissa antaganden. Exempelvis förekommer i verkligheten förluster i elkablar och smuts på solcellerna, dock ignorerades dessa eftersom de antogs ha liten påverkan på slutresultaten.

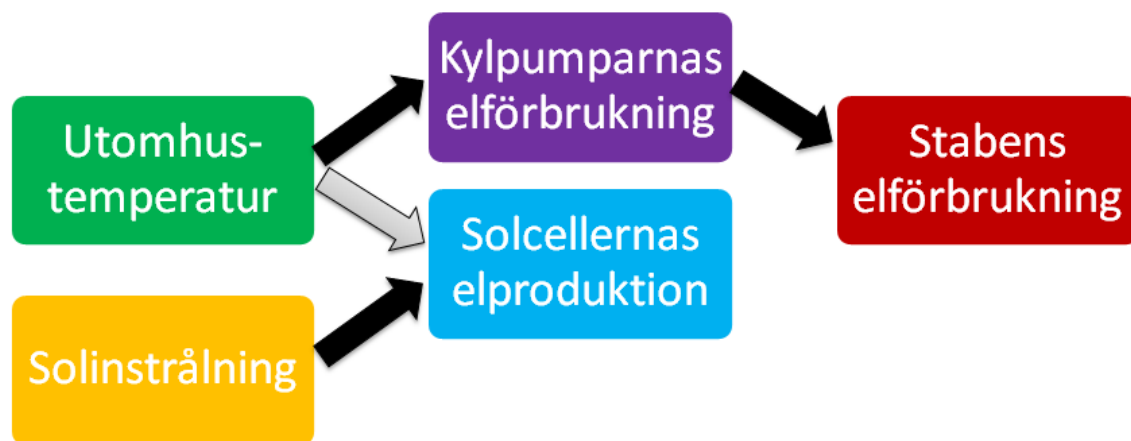
Då solcellerna kommer att placeras på en oskuggad plats behövde inte hänsyn tas till skuggning i dessa simuleringar och beräkningar.

Växelriktarens verkningsgrad antogs bero på omgivande temperatur, där ökad temperatur minskade verkningsgraden. Dessutom kan verkningsgraden bero på växelriktarens belastning, dock är dessa förluster små och kan försummas (Vignola et.al., 2008).

Kylsystemet antogs vara aktivt under sommarhalvåret från 1 maj till 30 september. Under den perioden antogs två av de tre pumparna konstant drivas för full effekt, medan den tredje pumpen, som hade lägst märkeffekt, antogs arbeta vid utomhustemperaturer från 20 °C och högre. I simuleringen ökades dess effektuttag linjärt med utomhustemperaturer mellan 20 °C och 30 °C, från 0 % till 100 % av märkeffekten. I de teoretiska beräkningarna arbetade den istället för full effekt vid 20 °C och över.

2.2 System

Blockschemat i figur 2 ger en förenklad bild av hur olika komponenter i systemet påverkar varandra och utgjorde grunden för den simuleringsmodell som skulle byggas och de beräkningar som skulle utföras på systemet.



Figur 2. Blockschemat visar översiktligt hur systemet uppför sig. Pilarna visar hur olika delar i systemet påverkar andra. En svart pil mellan två block visar att en ökning i det första blocket ger en ökning i det andra. En vit pil innebär att en ökning i det första blocket innebär en minskning i det andra.

2.3 Data

Vid simuleringar och beräkningar användes indata för solinstrålning (W/m^2), utomhustemperatur ($^{\circ}\text{C}$) och Stabens elkraftsförbrukning (kWh). Indatan i modellen på solinstrålning och utomhustemperatur var på tiominutersintervall och samlades in mellan åren 1998 och 2014.

Mätningarna gjordes på GeoCentrum i Uppsala, beläget ungefär 1 km nordväst om Staben, av institutionen för meteorologi vid Uppsala universitet (Institutionen för meteorologi, 2015). Data för Stabens elkraftsförbrukning på timbasis fanns för år 2014 (Vasakronan, 2015a). Märkeffekterna för de tre pumpar som utgjorde kylsystemet redovisas i tabell 2.

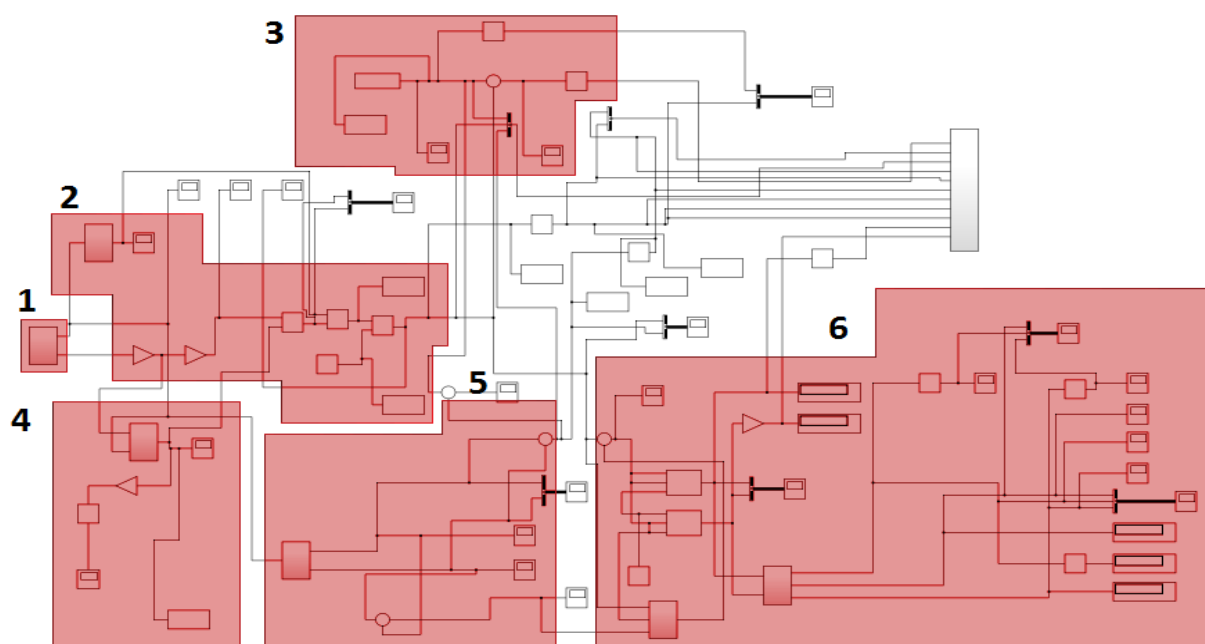
Tabell 2. De tre cirkulationspumparna som utgör Stabens kylsystem och dess märkeffekter.

Pump	Märkeffekt [kW]
Pump 1	0,55
Pump 2	0,37
Pump 3	0,25

2.4 Simulering och validering

En simuleringsmodell skapades för att bestämma storleken på den solcellsanläggning som krävdes för att täcka kylsystemets effektbehov, samt för att beräkna de mängder elkraft som såldes till respektive köptes från nätet, och hur den principiellt skulle fungera ihop med en batteribank.

Simuleringsmodellen kan grovt delas upp i sex delområden, som illustreras i figur 3 som numrerade områden. Dessa områden motsvarade olika komponenter i modellen eller indata. Omarkerade områden är komponenter som registrerade, lagrade och i vissa fall visualiserade relevant data (se bilaga B). I område 1 syns ett undersystem i vilket indata för solinstrålning och utomhustemperatur hämtades till modellen. I område 2 modellerades solcellernas verkningsgrad som funktion av deras temperatur. Verkningsgraden modellerades sedan tillsammans med solinstrålningen ihop till solcellsanläggningen i område 3. I område 4 modellerades pumparna, i område 6 en tillhörande batteribank (se bilaga A). I område 5 infördes data för Stabens elproduktion som sedan modellerades ihop med resten av systemet.



Figur 3. Simulinkmodellen med de olika komponenterna markerade i röda områden och numrerade från 1 till 6. En förklaring av varje område läses i stycket ovan.

För att bekräfta resultatet från simuleringar utfördes beräkningar med teoretiska formler samt programvaran PVGIS (PVGis, 2015). Pumparna arbetade enligt antaganden, se avsnitt 2.1. Därefter användes PVGIS för att beräkna den installerade märkeffekten som krävdes för att täcka kylpumparnas årliga energiåtgång (se bilaga C).

2.5 Analys av utomhustemperatur och solinstrålning

För att undersöka om solcellsproducerad elkraft är lämpligt för Stabens kylsystem kvantifierades sambandet mellan den lokala solinstrålningen och utomhustemperaturen. Korrelationen mellan variablerna beräknades och en graf skapades i MATLAB som utgjordes av konfidensintervall. Därefter kunde dessa konfidensintervall analyseras för att ge skäl till varför en solcellsanläggning bör användas till Stabens kylsystem (Elfverson, Hellman & Larsson, 2015)(se bilaga D).

2.6 Ekonomi

Återbetalningstiden beräknades utifrån olika scenarier där anläggningens storlek och den framtida ökningen av elmarknadens spotpris per kWh varierades. Även om det troliga scenariot är att Staben inte kommer att få solcellsbidrag beräknades återbetalningstiden med och utan bidrag för att jämföra skillnaden, detta eftersom Vasakronan baserar sina investeringsbeslut på återbetalningstider. (Näslund, 2015) (se bilaga E).

3 Resultat

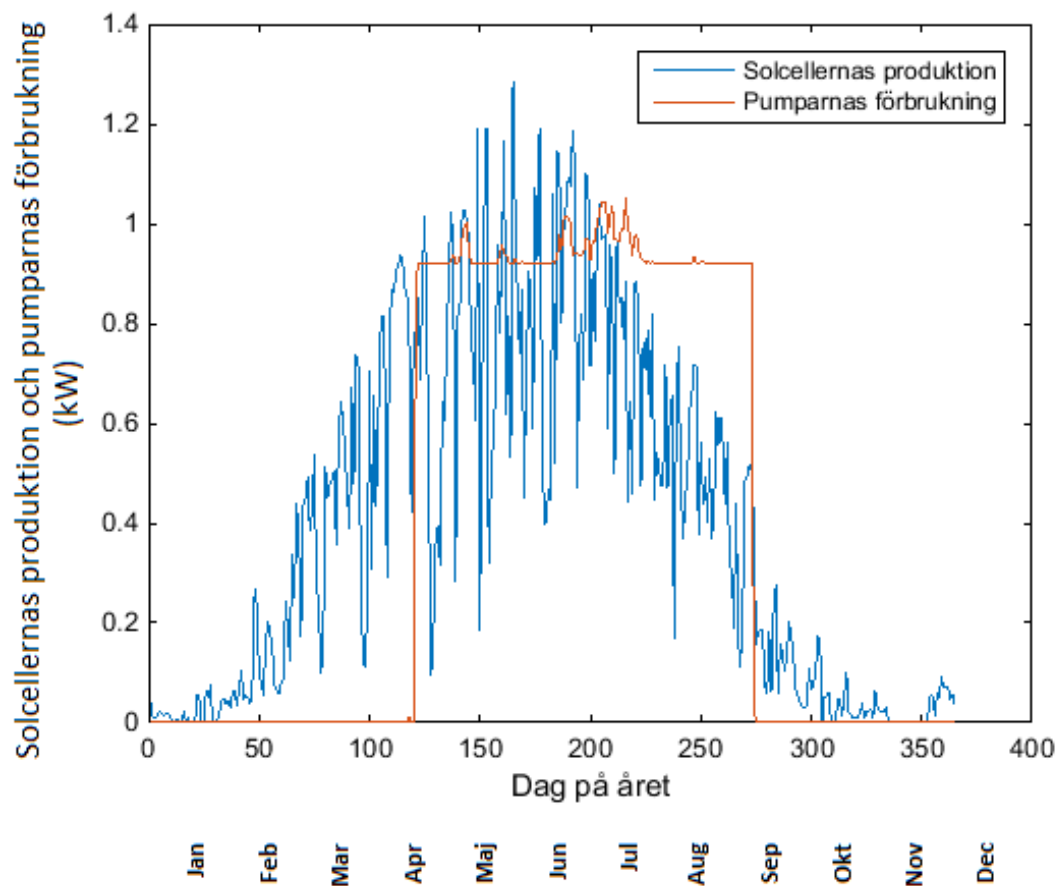
3.1 Anläggningens storlek

Simuleringsmodellen gav att kylpumparnas årliga förbrukning av elkraft skulle vara 3440 kWh, och för att producera den mängden elkraft per år behövdes en anläggning på 20 m² eller en märkeffekt på 3 kW. Enligt valideringens teoretiska beräkningar behövdes en solcellsanläggning med märkeffekt på 3,8 kW för att täcka pumparnas elkraftförbrukning på 3500 kWh. I tabell 3 syns fler resultat av valideringsberäkningarna.

Tabell 3. Resultat från valideringsberäkningarna. Den uppskattade årliga elkraftsförbrukningen för varje pump, den uppskattade årliga elkraftsproduktionen från solcellsanläggningen samt den installerade effekten för solcellsanläggningen och de tre pumparna.

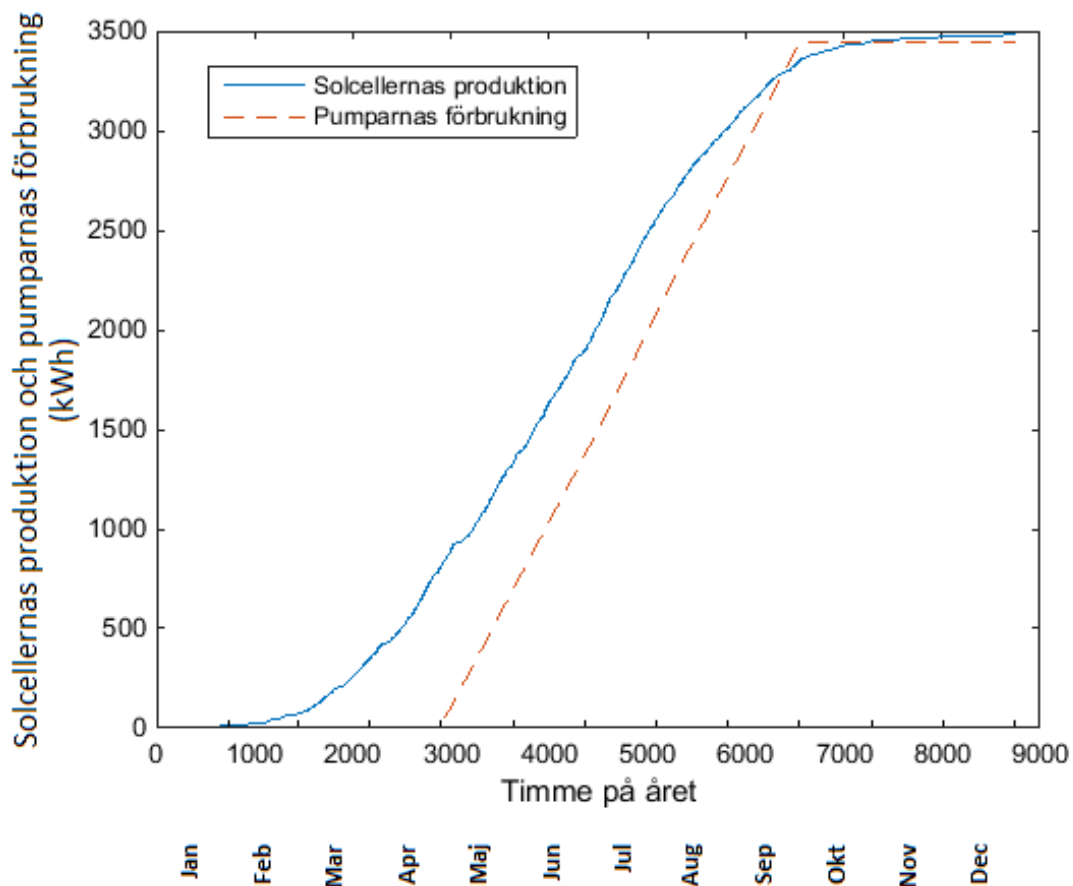
Årsbasis	Elkraftförbrukning [kWh]	Elkraftproduktion [kWh]	Installerad effekt [kW]
Pump 1	2020	0	0,55
Pump 2	1359	0	0,37
Pump 3	138	0	0,25
Solceller	0	3600	3,8
Summa	3517	3600	

I figur 4 visas de uppskattade värdena för pumparnas förbrukning och solcellernas produktion av elkraft under år 2014. Där framgår vilka tider under året solcellerna försörjer pumparna med elkraft.



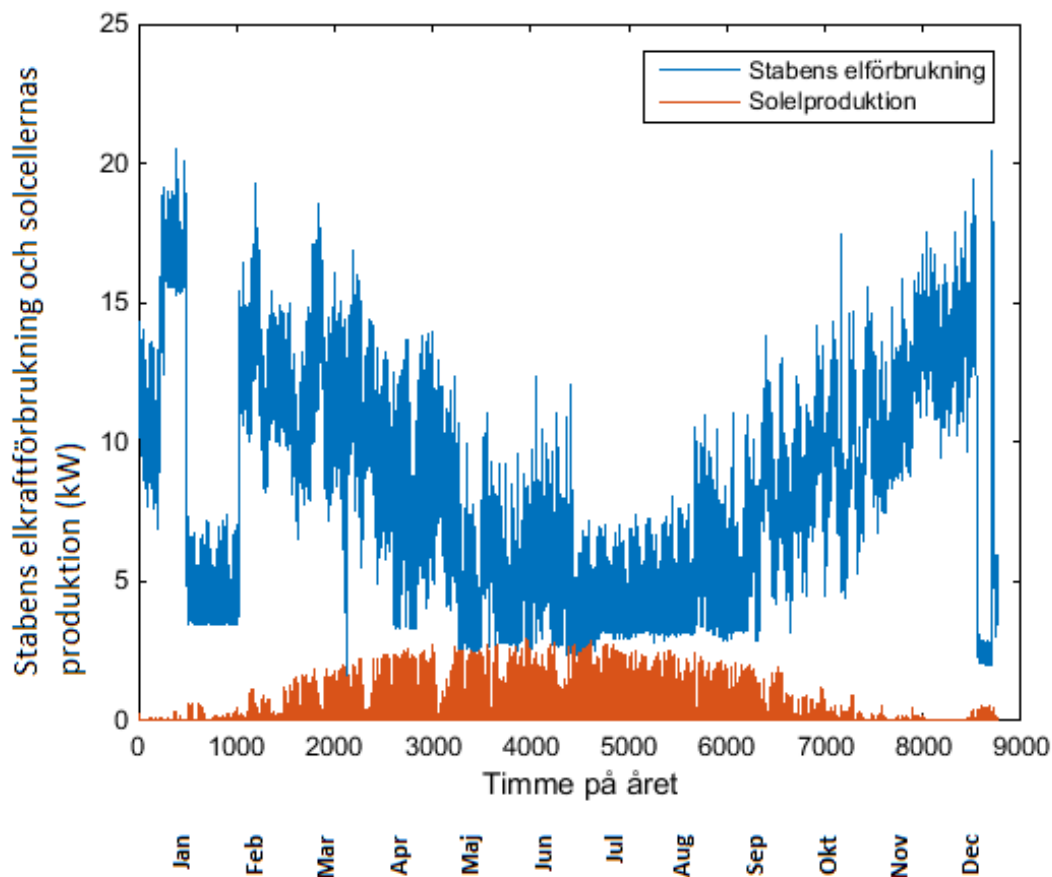
Figur 4. Solcellernas produktion och kylpumparnas förbrukning av elkraft genomsnittligt under varje dag 2014. Värdena erhöles från en simuleringsmodell med en solcellsanläggning motsvarande 3 kW märkeffekt.

Figur 5 visar de ackumulerade värdena på solcellernas produktion och pumparnas förbrukning av elkraft över ett år. Solcellerna i en 3 kW anläggning producerar på årsbasis i princip lika mycket el som kylpumparna förbrukar.



Figur 5. De uppskattade värdena på solcellernas produktion och kylpumparnas förbrukning av elkraft ackumulerade över ett år. Simuleringen utfördes med en anläggning motsvarande 3 kW märkeffekt.

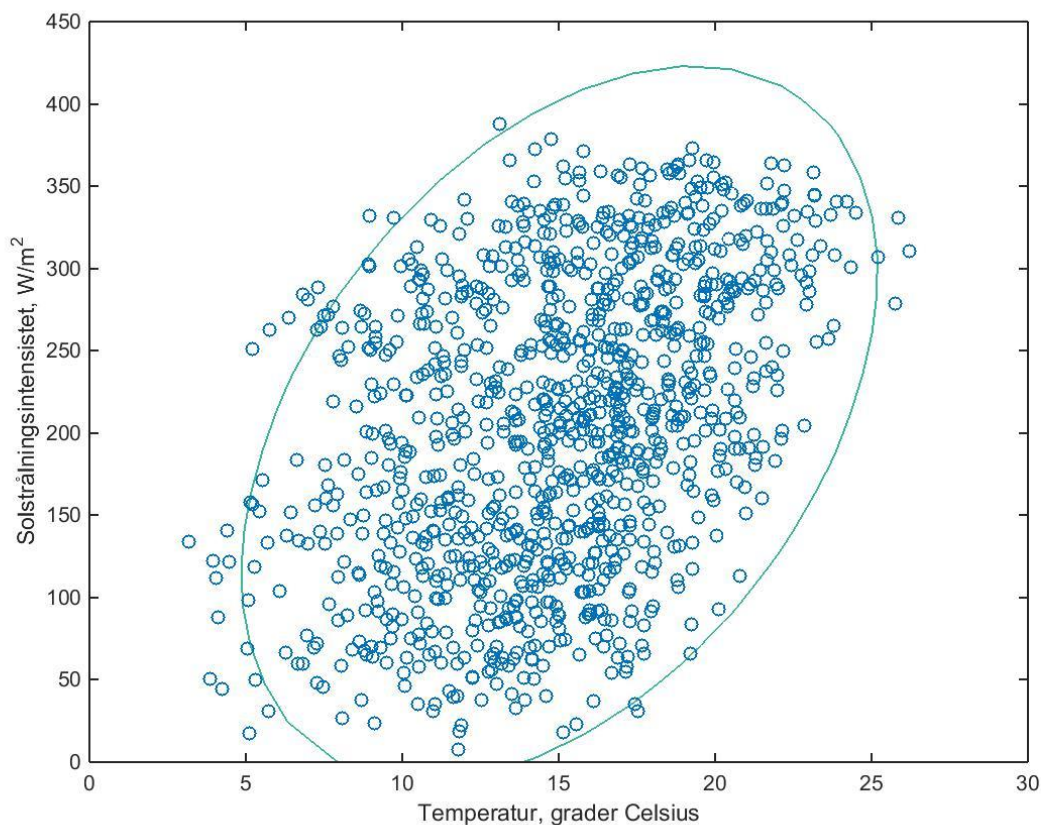
I figur 6 syns Stabens förbrukning och solcellernas (3 kW märkeffekt) simulerade produktion av el under år 2014. Produktionen av elkraft är större än förbrukningen i korta perioder under sommaren. I elförbrukningen syns två tydliga avvikelser från trenden, en i början av året och en i slutet av året. Avvikelseerna beror på att byggnadens värmeförsörjning slutade fungera vid dessa tidpunkter (Fagerman, 2015).



Figur 6. Produktionen av elkraft från en solcellsanläggning på 3 kW märkeffekt och Stabens effektförbrukning per timme år 2014.

3.2 Samband mellan utomhustemperatur och solinstrålning

Sambandet mellan utomhustemperatur och solinstrålning visas i figur 7. Grafen visar en ellips som motsvarar att punkterna inom ellipsen innesluts med 95 % säkerhet, med andra ord konfidensintervall för solinstrålning på y-led och för utomhustemperatur på x-led. Exempelvis kan ett konfidensintervall för solinstrålningen vid temperaturen 20 °C ses som sträckan inom ellipsens rand, parallell y-axeln. Ellipsen ger således information om bland annat den minsta möjliga uttagna effekten från solcellerna vid denna temperatur. Korrelationen beräknades till 0.42, en positiv korrelation som inte var hög. En perfekt positiv korrelation har värdet 1 (se bilaga D).



Figur 7. Punkterna inneslutna av ellipsens kontur motsvarar konfidensintervall för intensitet respektive temperatur då sannolikheten att väderdatan inträffar är 95 %.

3.3 Kostnader och återbetalningstid

Beräkningen av grundinvesteringarna för olika solcellsanläggningar och för respektive märkeffekt visas i tabell 4.

Tabell 4. *Kostnader för olika solcellsanläggningar baserat på märkeffekten, inklusive installation och moms.*

Märkeffekt (kW)	Grundinvestering (kr)
3	70 000
5	110 000
10	185 000

Återbetalningstiden beräknades med en årlig höjning av spotpriset på 1,0 %, samt med eller utan solcellsbidrag, och resultatet av beräkningarna kan ses i tabell 5.

Tabell 5. Beräkning av återbetalningstiden med en årlig ökning av spotpriset på 1,0 %, med och utan solcellsbidrag.

Märkeffekt (kW)	Såld el (kWh)	Producerad el (kWh)	Återbetalningstid (år)	Återbetalningstid med bidrag* (år)
3	0	3487	14,4	10,1
5	50	5929	13,4	9,4
10	1182	11683	11,6	8,1

*Solcellsbidraget är 30 procent av grundinvesteringen

Återbetalningstiden beräknades även med en årlig höjning av spotpriset på 3,9 %, se tabell 6.

Tabell 6. Beräkning av återbetalningstiden med en årlig ökning av spotpriset på 3,9 %, med och utan solcellsbidrag.

Märkeffekt (kW)	Såld el (kWh)	Producerad el (kWh)	Återbetalningstid (år)	Återbetalningstid med bidrag* (år)
3	0	3487	13,4	9,4
5	50	5929	12,4	8,7
10	1182	11683	10,8	7,5

*Solcellsbidraget är 30 procent av grundinvesteringen

4 Diskussion

4.1 Solelproduktion mot pumparnas kylbehov

Att driva ett kylsystem med solkraft är rimligt eftersom behovet av komfortkyla är som störst under sommarhalvåret då även solinstrålningen är som starkast. I figur 4 visas att solcellernas genomsnittliga uppskattade uteffekt för ett dygn varierar mellan 0 kW och drygt 1,2 kW under året, medan kylsystemets effektbehov är nästan helt konstant, under en begränsad period på året. Alltså kan inte solcellerna täcka kylsystemets effektbehov momentant, och därför måste målsättningen vara att solcellerna täcker det behovet på årsbasis. I figur 5 ses att solcellsanläggningen producerar effekt redan tidigt på året, medan pumparna börjar konsumera effekt senare. Den ackumulerade konsumtionen når den ackumulerade produktionens nivå mot slutet av året, och de slutar på samma värde. Alltså är målet om att täcka kylsystemets effektbehov med solkraft på årsbasis uppnått.

4.2 Husets effektbehov

Solkraftsproduktionen från en anläggning med 3 kW märkeffekt är nästan alltid mindre än Stabens totala effektförbrukning, som syns i figur 6. Detta medför att i princip ingen elkraft alls säljs till elnätet, vilket skulle vara positivt då förtjänsten är större för att undvika att köpa effekt än för att sälja producerad effekt. Med större anläggningar ökar andelen såld effekt, vilket innebär att större anläggningar ger en något mindre vinst per producerad kWh. Större anläggningar har dock en kortare återbetalningstid, då investeringskostnaden per installerad kW är lägre.

4.3 Samband mellan utomhustemperatur och solinstrålning

Korrelationen 0,42 visar att det finns ett positivt samband mellan utomhustemperaturen och solinstrålningen. Detta innebär att variablerna ofta följer varandra, ökar och minskar tillsammans, men inte på ett helt förutsägbart sätt. Resultatet indikerar att då utomhustemperaturen tillika kylbehovet är höga, finns också solinstrålning som kan omvandlas till elkraft.

Inom intervallet för 95 % sannolikhet finns det inte kraftigt avvikande värden, vilket kan ses i figur 7. Detta visar på att temperatur och solinstrålning betar sig mer eller mindre förutsägbart.

4.4 Jämförelse av märkeffekt från validering och simulering

Märkeffekten som beräknades i valideringen var c:a 27 % större än den som simuleringsresultaten gav, vilket är en anmärkningsvärd skillnad. En årlig elkraftsproduktion på 950 kWh per kW märkeffekt skulle innebära att det krävs en märkeffekt på 3,7 kW för att ge 3,5 MWh på ett år. Det värdet är mycket närmare resultatet från valideringen än det från simuleringen. PVGIS, programmet som användes vid valideringsberäkningarna, tar hänsyn till ett antal faktorer som inte inkluderades i simuleringen, t.ex. förluster i kablar, smuts på solceller och försämring av verkningsgrad vid låg solinstrålning. Dessa faktorer borde dock inte realistiskt sett kunna ha bidragit så mycket till skillnaden mellan resultaten från simulering och de från validering. Det kan tänkas ha varit viktigare att solcellernas lutning implementerades i simuleringsmodellen på ett förenklat sätt eller att solcellernas STC-verkningsgrad möjligen fick ett för stort värde. Om en mer realistisk STC-verkningsgrad infördes och vinkeln mellan solinstrålning och solceller modellerades på ett annat sätt skulle resultatet bli en mer realistisk elkraftproduktion. Om den då fortfarande var överkligt stor skulle skillnaden eventuellt ändå vara liten nog för att kunna förklaras med de små förlusterna nämnda ovan.

4.5 Investering och återbetalningstid

En anläggning motsvarande 3 kW har en investeringskostnad på ungefär 70 000 SEK samt en återbetalningstid mellan 13 och 14 år baserat på uppskattningar om framtida elprisutveckling. Vid installation av större anläggningar än 3 kW är investeringskostnaden högre, dock ges kortare återbetalningstid. Detta beror på att grundkostnaden per installerad kW minskar med ökad storlek på anläggningen. Den mest avgörande faktorn för både investeringskostnaden och återbetalningstiden är solcellsbidraget, detta eftersom 30 % av investeringskostnaderna försvinner. Ett solcellsbidrag från den nuvarande potten kan antagligen inte tillfalla den tilltänkta anläggningen på Vasakronans byggnad, men det kan inte uteslutas att framtida politiska beslut resulterar i ett återinfört bidrag, då hållbar elkraftproduktion lär vara ett politiskt mål även för framtida regeringar.

5 Slutsats

Simuleringens resultat blev att en solcellsanläggning på 3 kW märkeffekt producerar tillräcklig elkraft för kylsystemet på årsbasis, och detta till stor del samtidigt som kylsystemet är aktivt.

Valideringsberäkningens resultat på 3,8 kW märkeffekt är mer realistiskt, då det stämmer bättre överens med vanliga värden på årlig elkraftsproduktion per installerad kW i Sverige.

Trots att kylpumparna är aktiva under samma årstid som solcellerna producerar mest effekt visar studien att systemet av solceller och kylpumpar kräver ett utbyte med elnätet eller någon annan elsänka eller -källa. Solcellernas uteffekt varierar mycket eftersom att den följer solinstrålningen, medan kylpumparnas effektbehov är konstant. Dessutom inträffar solcellernas största elkraftsproduktion på året tidigt under kylperioden, och produktionen hinner sjunka under kylpumparnas effektbehov mot slutet av perioden. Solcellerna producerar dock elkraft under flera månader innan kylperioden startar. Utan att använda solcellernas effekt i andra delar av Staben, och utan att sälja eller köpa elkraft till och från elnätet vid behov, skulle systemet aldrig fungera. Om man räknar på årsbasis kommer dock den simulerade solcellsanläggningen att täcka kylpumparnas behov av elkraft.

Optimal vinkling för solcellspaneler är söderläge och 41° från horisontalplanet i Uppsala (bilaga A). När en STC-verkningsgrad på 15 % antogs gav simuleringen en genomsnittlig verkningsgrad för hela året på c:a 15,8 % (bilaga B).

Då inget överskott av elkraft produceras av en anläggning på 3 kW sker ingen försäljning till elnätet från en sådan anläggning. Den skulle kosta runt 70 000 SEK inklusive installation och moms. Återbetalningstiden skulle vara mellan 13 och 14 år beroende på hur mycket elspotpriset höjs i framtiden. Om en ansökan om solcellsbidrag beviljades skulle återbetalningstiden förkortas med cirka 4 år.

En större anläggning skulle kosta mindre att installera per kW märkeffekt. Den skulle också oftare producera mer effekt än Staben behöver. Försäljningspriset för elkraft på elnätet är lägre än inköpspriset, och förtjänsten per producerad installerad kW toppoeffekt solceller skulle därför vara mindre med en större anläggning, eftersom att en större andel av den producerade elkraften skulle säljas. Återbetalningstiden är dock kortare för en stor anläggning, och ur ett ekonomiskt perspektiv vore därför en stor anläggning ett bättre alternativ för Staben på Science Park. Tekniskt är det dock intressant att bara täcka pumparnas elkraftsbehov, vilket enligt simuleringen kan göras med en anläggning på 3 kW.

Korrelationen mellan den lokalt uppmätta solinstrålningen och utomhustemperaturen uppskattades till 0,42. Detta innebär ett positivt samband, vilket indikerar att elkraftproduktion från solceller ofta sammanfaller med behov av kylning i lokaler.

Referenser

- Andersson, M. (2015). Om batteribankar. (Personlig intervju) [2015-04-17]
- E.ON (2015). *Ersättning och avgifter*. <https://www.eon.se/privatkund/Produkter-och-priser/Elnat/Producera-din-egen-el/Ersattning--avgifter/> [2015-05-20]
- Electrotecenergy (2015). *Olika typer av solceller*.
<http://electrotecenergy.se/typer-av-solceller/> [2015-05-25]
- Fagerman, P. (2015). Besök på Staben. (Personlig intervju) [2015-05-12]
- Gustafsson, A. (2015). *Stöd till solceller*. <https://www.energimyndigheten.se/Hushall/Aktuella-bidrag-och-stod-du-kan-soka/Stod-till-solceller/> [2015-05-21]
- Institutionen för meteorologi, Uppsala Universitet. Solinstrålning och temperatur. *Mätdata*. Uppsala. [2015-04-09]
- Näslund, U. (2015). Möte med Vasakronan. Uppsala. [2015-04-16]
- PVgis (2015). *Photovoltaic software*.
<http://photovoltaic-software.com/pvgis.php> [2015-04-20]
- Rydell, A. (2015). *Solceller på Uppsalahems fastigheter*. Uppsala: Uppsala Universitet.
- Skaffasolcell (2015). *Olika typer av solceller*.
<http://skaffasolcell.se/index.php/olika-typer-av-solceller/> [2015-04-15]
- Skatteverket (2015a). *25, 12 eller 6 procents moms?*
<http://www.skatteverket.se/foretagorganisationer/moms/vadarmoms/2512eller6procentsooms.4.7459477810df5bccdd480005156.html> [2015-05-20]
- Skatteverket (2015b). *Skattereduktion för mikroproduktion av förnyelsebar el*.
<http://www.skatteverket.se/privat/fastigheterbostad/mikroproduktionavfornybarel/skattereduktionformikroproduktionavfornybarel.4.12815e4f14a62bc048f4220.html> [2015-05-21]
- Solelsprogrammet (2015). *Växelriktare*.
<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/ElektriskDesign/#Växelriktaren> [2015-05-21]
- Solkungen (2015). *Solceller*.
<http://www.solkungen.nu/produkter/solceller-20968868> [2015-05-03]
- Stridh, B. (2013). *Solceller – svar på vanliga frågor*.
<http://bengtsvillablogg.info/2013/02/10/solceller-svar-pa-vanliga-fragor/> [2015-08-20]
- Stridh, B. (2014). *Vad kostar solceller*.
<http://bengtsvillablogg.info/2014/11/06/vad-kostar-solceller-uppdatering-20141106/> [2015-08-04]
- Stridh, B. (2015). *50 miljoner till investeringsstöd för solceller under 2015*.
<http://bengtsvillablogg.info/2015/01/07/50-miljoner-till-investeringsstod-for-solceller-under-2015/> [2015-08-04]
- Unger, T. (u.å.). *Analys av långsiktig elprisutveckling för långsiktig planering och investering*. Göteborg (Mölnadal).

Vasakronan (2015a). Stabens elförbrukning. *Mätdata*. Uppsala: Vasakronan.

Vasakronan (2015b). *Uppsala Science Park*.

<http://uppsalasciencepark.vasakronan.se/> [2015-08-04]

Vattenfalls solcellsavdelning (2015). Sälja överskottsel på nätet. (Personlig intervju)
[2015-04-24]

Vignola, F., Krumsick, J. & Mavromatakis, F. (2008). *Perfomance of PV inverters*.

<http://solardat.uoregon.edu/download/Papers/PerformanceofPVInverters.pdf> [2015-08-04]

Zimmermann, U. (2015). Solcellers verkningsgrad. (Personlig intervju) [2015-04-21]

Bilaga A Bakgrundsteori

Att solinstrålningen innehåller stora mängder energi är ingen nyhet. Ett lämpligt sätt att använda denna energi är att sätta upp solcellsanläggningar som omvandlar solinstrålningen till el som i sin tur kan användas till ett flertal ändamål. Med en uppskattad solcellsvinkel på 42° i sydlig riktning och med solinstrålningsdata som tar hänsyn till solcellernas lutning kan verkliga instrålningsvärden uppskattas. Uppskattningen kan förbättras om hänsyn tas till de faktorer som påverkar en solcellsanläggning så som skuggning och förändringar i verkningsgrader i såväl solceller och växelriktare.

A1 Inledning

För att kunna sätta upp en solcellsanläggning på Science Park gäller det att ha bakgrundskunskaper om allt från energin i solinstrålningen till hur solcellernas verkningsgrad varierar vid olika temperaturer. Syftet med denna bilaga är att kunna identifiera de faktorer som påverkar en solcellsanläggnings produktion av solel.

A2 Teori

En sammanställning av hur olika faktorer ändrar förutsättningarna för hur solcellsanläggningar utformas.

A2.1 Solinstrålning

Solinstrålningen till jorden på avståndet 150 miljoner km motsvarar ett flöde på $1365\text{W}/\text{m}^2$.

Den globala solinstrålningen på jorden består av direkt solljus som har gått igenom atmosfären, diffust solljus som sprids i atmosfären och reflekterat solljus från marken, vegetationen osv. Mängden energi i den diffusa och direkta solinstrålningen på helårsbasis är densamma (Solelprogrammet, 2015b).

Instrålningen varierar med årstiden och plats på jorden, och det lokala klimatet begränsar den faktiska instrålningen. Solinstrålningen är lägre ju längre avståndet från ekvatorn är. Solinstrålningen i Sverige under sommarhalvåret är betydligt högre än under vinterhalvåret vilket beror på att solstrålningen måste färdas en längre väg genom atmosfären, mer luftmassa, eftersom solen står lägre under vintern jämfört med sommaren. Dessutom innebär solens lägre höjd på himlen att solstrålarna får en mindre vinkel mot horisontalplanet, vilket ger en mindre vertikalkomponent av solljuset. Eftersom att det ofta är vertikalkomponenten man mäter så sänker det den uppmätta strålningen mycket (Solelprogrammet, 2015b).

För att på bästa sätt ta tillvara på solenergin monteras solcellsanläggningarna i olika orienteringar och lutningsvinklar för optimal elproduktion. Bilden nedan visar hur olika lutningsvinklar och läget påverkar elproduktionen för solcellsmoduler på Ångströmlaboratoriets tak i Uppsala, Sverige.

Lutning	Öst				Syd					Väst			
	90°	110°	130°	150°	160°	170°	180°	190°	200°	210°	230°	250°	270°
0°	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %	82 %
10°	82 %	84 %	87 %	88 %	89 %	89 %	90 %	90 %	89 %	89 %	87 %	85 %	82 %
20°	80 %	85 %	90 %	93 %	94 %	95 %	95 %	95 %	94 %	93 %	90 %	86 %	81 %
30°	78 %	85 %	91 %	96 %	97 %	98 %	98 %	98 %	98 %	96 %	92 %	86 %	79 %
40°	76 %	84 %	92 %	97 %	98 %	100 %	100 %	100 %	99 %	97 %	93 %	85 %	77 %
50°	73 %	83 %	90 %	96 %	98 %	99 %	99 %	99 %	98 %	97 %	91 %	84 %	75 %
60°	70 %	80 %	88 %	93 %	95 %	96 %	97 %	96 %	96 %	94 %	88 %	81 %	71 %
70°	66 %	75 %	83 %	89 %	90 %	92 %	92 %	92 %	91 %	89 %	84 %	77 %	67 %
80°	62 %	70 %	78 %	83 %	84 %	85 %	85 %	85 %	85 %	83 %	78 %	71 %	63 %
90°	57 %	64 %	71 %	75 %	76 %	77 %	77 %	77 %	77 %	75 %	71 %	65 %	57 %

Figur 1. Den relativa fördelningen av den årliga solinstrålningen (Bäckbro, 2011)

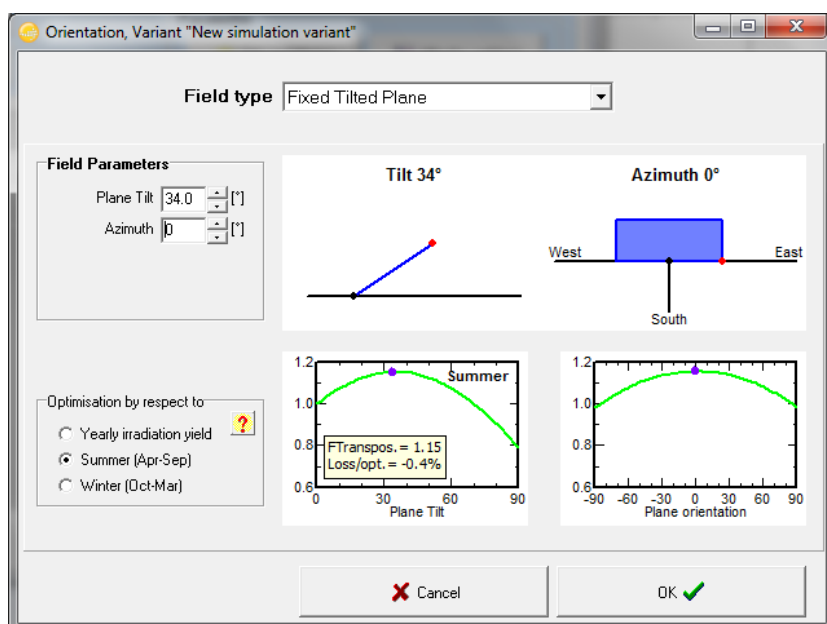
Figur 1 visar att vid en lutning på 41° och sydläge tillvaras hundra procent av solinstrålningen utan att ta hänsyn till diverse förluster så som solcellernas verkningsgrad osv.

Parkeringshuset utanför Staben i Science Park har latitud 59,842 och longitud 17,634. Dessa koordinater sattes in i PVGIS, ett beräkningsprogram som användes för att beräkna effekt från olika typer av solcellstekniker. Den uppskattade lutningen för projektets geografiska plats är 41° i söderläge för maximalt utbyte (PVgis, 2015).

Erhållen mätdata för solinstrålningen i Uppsala var angiven i W/m^2 mot en horisontell yta. För att få ut det maximala utbytet på årsbasis ställdes därför den uppskattade lutningen på 41° och solinstrålningsdata optimerades i Simulink. Då multiplicerades data med en faktor $1/0,82=1,2195$ och gjorde så att solinstrålningen blev högre än mätdata angav. Detta gällde den uppskattade lutningen på årsbasis.

För att uppskatta en vinkel efter solinstrålningen för sommar- och vinterhalvåret användes programmet PVsyst som är utformad för att användas av ingenjörer, forskare och arkitekter. Programmet kan importera meteorologiskt data från många olika källor och är ett verktyg som noggrant analyserar olika konfigurationer för att granska resultaten och ta fram den bästa lösningen (Pvsyst, 2015).

Koordinaterna för Staben, ställdes in i programmet och meteorologiskt data togs fram för att sedan få fram nedanstående anpassning av lutningsvinkeln. I figur 2 visas att den uppskattade vinkel för solinstrålningen under sommarhalvåret från april till och med september är 34° och detta medför en optimeringsförlust på -0,4 % i riktning mot söder. För vinterhalvåret som sträcker sig från oktober till mars gäller en lutning på 66° för att ta tillvara på solenergin på bästa sätt. I PVsyst uppskattades även en vinkel på den maximala solelsproduktionen på årsbasis vilket låg mellan 41°- 45°, lik PVGIS.



Figur 2. PVsyst: optimering för lutningsvinkeln under sommarhalvåret (Pvsyst, 2015).

A2.2 Skuggning

När man pratar om solceller är moln, byggnader och grönska osv., viktiga och svåra faktorer att ha med i beräkning av den totala elproduktionen. Den främsta anledningen till detta i sin tur är att de enskilda modulerna har en låg spänning vilket gör att de seriekopplas inom och mellan modulerna. Den cell som har lägst ström hämmar hela kedjan av seriekopplade moduler. En lösning på detta sker via by-pass-dioder som placeras över varje modul och i de flesta fall installeras en diod över 18 celler. Då en del av anläggningen skuggas leder dioden strömmen förbi det skuggade området. Strömslingan och funktionen i anläggningen upprätthålls men en del av de oskuggade cellerna kan komma att kopplas bort och spänningsfall uppstår. Vid by-pass metoder blir förlusterna, vid skuggning, det skuggade området förutsatt att det finns en diod över modulen. Förlusterna utan tillämpade dioder hänger samman med modulernas uppförande vid backspänning (Solelsprogrammet, 2015d).

Då planering av en solcellsanläggning äger rum tittas extra noga på läget av anläggningen. Detta gör att i ett tidigt skede förutsägs förekomsten av skuggning. Då partiell skuggning påverkar elproduktionen på dagsbasis och mer än en modul beräknas bli bortkopplad tas hänsyn till detta och en växelriktare välj så att den ska matcha anläggningen. Modulernas arbetsspänning bör inte sjunka ner till undre spänningsgränsen på växelriktaren och därmed ligga på växelriktarens övre spänningsområde (Solelsprogrammet, 2015d).

A2.3 Solceller

En solcell är en anordning som producerar ström vid belysning med solljus. Strömmen produceras med hjälp av någon typ av halvledare, ofta kisel. Solceller finns i många olika utföranden men det finns tre typer som är vanliga på marknaden. Dessa tre är polykristallina solceller, monokristallina solceller och tunnfilmsolceller (Zimmermann, 2015)

A2.3.1 Polykristallina solceller

Polykristallina solceller är uppbyggda av block med flera kiselkristaller, vilket ger dem en spräcklig blå färg. De är de vanligaste solcellerna på marknaden och de har blivit allt vanligare på senare år. Deras verkningsgrad ligger mellan 13% och 16%. Polykristallina solceller har en relativt enkel tillverkningsprocess som orsakar mindre svinn på silikon än motsvarande process för monokristallina

solceller. Detta innebär att polykristallina solceller är relativt billiga, vilket bidrar till deras popularitet (Skaffasolcell, 2015).

A2.3.2 Monokristallina celler

Monokristallina solceller har en högre kiselrenhet än polykristallina solceller. Detta innebär att de har en högre verkningsgrad men även att de har en högre produktionskostnad, vilket i vissa fall gör dem mindre attraktiva för kommersiellt bruk än polykristallina solceller. Verkningsgraden för monokristallina solceller ligger vanligtvis runt 15-20%. Den högre effekten gör att dessa solceller kan ta upp mindre yta vid en given produktion, i jämförelse med de andra typerna. Skillnaden i verkningsgrad mellan de olika typerna ökar vid diffust ljus och höga temperaturer. Monokristallina solceller har dessutom ett mindre effekttapp över tid samt längre livslängd än polykristallina solceller. Monokristallina solceller är vanliga i större anläggningar (Solkungen, 2015).

A2.3.3 Tunnfilmsolceller

Tunnfilmsolceller, som är en typ av, består av ett tunt kiselskikt som lagts på något annat material, alternativt flera tunna kiselskikt på varandra. Tunnfilmsolceller har fördelen att de kan tillverkas flexibla och därför kan de läggas på formade ytor, exempelvis båtar. Nackdelarna med dessa solceller är att de har lägre verkningsgrad (maximalt kring 10 %) än de andra typerna, och att de slits snabbare (Electrotecenergy, 2015).

A2.4 Växelriktare

För att kunna använda elen från solceller i ett nätanslutet hus behövs en eller flera växelriktare som omvandlar solcellernas likspänning till växelspanning av rätt amplitud och frekvens, och skickar ut den i fas med nätet. Växelriktarens konverterar DC-spänningen med en frekvens som styrs från nätet. För att minimera övertoner filtreras strömmen innan den matas vidare in i systemet. Effekt och ackumulerad energi visas vanligtvis i en display, som växelriktaren har, och kontinuerlig avläsning av effekten ger svar om anläggningens produktion är tillfredställande. Uteffekten maximeras automatiskt då växelriktarna har en funktion som rättar sig efter solcellernas momentana effekt. Om ödrift uppstår ska växelriktaren se till att ingen solcell matas ut på nätet om det blir strömavbrott på nätet. Om man vill kunna förse sig själv med el under strömavbrott behövs ytterligare utrustning för det (Solelprogrammet, 2015c).

Vanliga centrala växelriktare har ofta märkeffekter mellan 1 och 10 kW, och arbetar oftast vid en likspänning in från solcellerna som är runt 50 % högre än toppväxelspanningen ut. Lokala växelriktare, som sitter på varje panel, har sen de introducerades på marknaden sänkt priset för att köpa en solcellsanläggning. För större anläggningar kan dock centrala växelriktare bli billigare, då det krävs färre växelriktare per panel (Lee & Raichle, 2011).

Att belasta en växelriktare med mer än dess märkeffekt påverkar inte nämnvärt dess prestanda (Vignola, et al., 2008). Märkeffekten kan överstigas med mellan 15 och 30 % (Solelprogrammet, 2015a). En för liten effekt in gör däremot att växelriktaren arbetar vid en lägre verkningsgrad än den skulle kunna göra, och att den utnyttjas dåligt. Därför är det viktigt att anpassa solcellssträngens och växelriktarens storlek till varandra, för att så ofta som möjligt arbeta vid högsta möjliga verkningsgrad (Vignola, et al., 2008).

Den nedre gränsen för antalet paneler i en sträng bestäms av växelriktarens minimum-inspänning, och då bör hänsyn tas till solcellernas sänkta spänning vid höga temperaturer. Man bör sikta på att en strängs maximala spänning ska ligga nära växelriktarens högsta inspänning (Solelprogrammet, 2015a).

Växelriktares verkningsgrad sjunker vid högre temperaturer, vilket ger bättre verkningsgrad (om än inte nödvändigtvis högre effekt) på morgonen och i januari, jämfört med eftermiddagen och i juli, om växelriktaren är utomhus. När samma intervall för solinstrålning – 650-700 W/m² – jämfördes mellan morgon och eftermiddag, fanns verkningsgraden har sjunkit med c:a 1 procentenhet per 12°C. För växelriktare som är installerade inomhus märks ingen sån skillnad (Vignola, et al., 2008).

A2.5 Nätanslutning av solceller

När man bygger en solcellsanläggning till ett hus som redan är anslutet till nätet kopplar man också in anläggningen till nätet. Solelen matas in till husets elsystem på husets sida elmätaren, och minskar behovet av el från nätet. När solcellerna producerar mer effekt än huset konsumerar matas elen istället ut på nätet. För att kunna få betalt för den el som matas ut på nätet behövs en separat elmätare som mäter just den elen. En elmätare som mäter all solen man producerar, efter växelriktarna, är också nödvändig för att man ska bli berättigad till statligt bidrag för sina solceller (Solcellsforum, 2014).

Solceller kan inte stängas av, utan det uppstår en spänning mellan plus- och minuspol så fort det faller ljus på dem. Detta innebär problem när de ska installeras, eftersom att det finns risk för elskador om man hanterar kablar och ledningar oförsiktigt. En sträng kan ge en spänning på 600 V och en ström på 10 A. Solcellsutrustning med ledande höljen så som ramar och monteringsställningar ska jordas, men inte de strömbärande likströmskablar (Länsstyrelsen Dalarna, 2015).

A2.6 Solcellernas och växelriktarens verkningsgrader

Solcellers verkningsgrad påverkas av deras temperatur, vilken beror på omgivningens temperatur och på solinstrålningen som träffar dem och värmer upp dem direkt. Eftersom effekten därför kommer att variera anges prestandan under internationella standardförhållanden (STC). STC är 25 grader Celsius och solljuset efter absorption motsvarande 1,5 atmosfärer. Både verkningsgraden, η , och solinstrålningen, $P_{instrålning}$, varierar. Verkningsgraden är främst temperaturberoende (Zimmermann, 2015).

$$T_c = T_a + \left(\frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \quad \text{Ekvation 1}$$

$$\eta_c = \eta_{STC} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{STC})] \quad \text{Ekvation 2}$$

Med hjälp av ovanstående ekvationer där T_c är solcellens temperatur, T_a är den omgivande luftens temperatur, G_T är solinstrålningen mot solcellen, G_{NOCT} är solinstrålningen vid Normal Operating Cell Temperature (NOCT) 800 W/m², T_{NOCT} är solcellens temperatur vid NOCT, vilken som en första uppskattning sattes till 45°C, $T_{a,NOCT}$ är omgivningstemperaturen vid NOCT, 20°C, η_c är cellens verkningsgrad, η_{STC} är cellens verkningsgrad under STC, Standard Testing Conditions, vilken satts till 15% som en uppskattning. β_{ref} är en temperaturkoefficient, som sattes till 0,004 och T_{STC} är solcellens temperatur vid STC, 25°C. När solcellstemperaturen är känd kan även verkningsgraden beräknas (Skoplaki, 2008).

Även växelriktarens verkningsgrad påverkas av omgivningstemperaturen. Om en växelriktare är monterad utomhus och utsatt för vädret kommer dess verkningsgrad att variera.

En växelriktarens verkningsgrad varierar även med spänningen in i den från solpanelerna och med effekten ut eller in. För implementera detta undersöktes möjligheterna att hitta någon matematisk formel att bygga in i Simulinkmodellen. Den förlorade effekten i en växelriktare beskrivas med

$$p_{loss} = (b_{0,0} + b_{0,1}(v_{in} - 1)) + (b_{1,0} + b_{1,1}(v_{in} - 1)) \cdot p_{in} + (b_{0,0} + b_{0,1}(v_{in} - 1)) \cdot p_{in}^2 \quad \text{Ekvation 3}$$

där alla koefficienter $b_{n,m}$ är unika för varje växelriktare. Då ingen bestämd växelriktare ska simuleras kan dessa koefficienter inte anges, och därför övergavs försöket att simulera denna egenskap hos växelriktaren (Driesse, et al., 2008).

A2.7 Batteribanker till solcellsanläggningar

Solcellsanläggningar som inte är uppkopplade på elnätet, så kallade off-gridsystem, behöver en buffert i form av en batteribank för att lagra den producerade elen från solcellerna och att leverera el till lasten under den tid solcellen inte producerar någon el. Off-gridsystem är vanligast där det inte finns möjlighet eller är ekonomiskt försvarbart att ansluta till elnätet, som exempelvis sommarstugor, fritidsbåtar och upplysta busshållplatser.

Solceller har vanligtvis en livslängd på 25 år eller mer vilket gör batterierna med livslängd på runt tio år till den begränsade faktorn i ett off-gridsystem. Batterier tappar även lite av sin kapacitet med tiden och om man använder mer än 65 till 75 procent av kapaciteten i batteriet förkortas livslängden (Solpaneler,dimensionering, 2012). Överladdning och djupurladdning, d.v.s. att batteriet töms helt, har en negativ effekt på livslängden.

I ett off-gridsystem ingår tre komponenter; solceller, regulator och batteribank. Regulatorns främsta uppgift är att se till att batteriet inte överladdas eller djupurladdas (Solarlab-Kunskapsbasen, 2013). I regel transformerar inte regulatorerna spänningen från solcellerna så både batteriet och solcellen måste då vara av samma nominella spänning (vanligtvis 12 eller 24V). Vissa regulatorer klarar dock av att transformera spänningen och kan man använda solceller som producerar el upp till 100V (Solarlab, u.d.).

Vid laddning av batterier sker det en förlust på cirka 10 procent, vilket innebär att man måste ladda batterierna med 10 procent mer än vad man använder (Solpaneler,dimensionering, 2012). För att mäta laddningsnivån i batteriet mäter regulatorn av spänningen och tolkar därefter laddningen i batteriet. Dock påverkas spänningen i batteriet när det laddas eller töms, vid laddning blir spänningen högre samt vid tömning blir spänningen lägre. Den faktiska spänningsnivån, och därmed laddningsnivån, kan därför endast med viss säkerhet mätas med regulatorn först efter att batteriet har vilat ett par timmar. Spänningen i batteriet är även beroende av temperaturen, ju högre temperatur desto lägre spänning. Batteri och regulator måste ha samma temperatur (helst vara i samma lokal) för att regulatorn ska kunna mäta spänningen och därmed laddningsnivån rätt. (Solarlab-Kunskapsbasen, 2013)

Spänningen i batterier brukar vara 12 eller 48V. Energin man kan få ut från batteriet beror på temperatur och belastning på batteriet. Storleken på batterier anges i Amperetimmar (Ah) (Solpaneler,dimensionering, 2012). Amperetimmar multiplicerat med batteriets spänning ger ett teoretiskt värde på hur många Wh som kan lagras i batteriet t.ex. så motsvarar ett vanligt blybatteri på 12V och 90 Ah cirka 1 kWh:

Man mäter kapaciteten i batterier genom att tömma batteriet under antingen 10 eller 20 timmar, vilket benämns med C10 och C20 (Solarlab-Kunskapsbasen, 2013). Exempelvis kan ett batteri ha 108 Ah vid C20, man har då fått ut 108 Ah vid en urladdning på 20 timmar. Ju långsammare urladdning desto högre blir kapaciteten.

Till solcellsanläggningar passar cykliska batterier bäst då de har lång livslängd. AGM (Absorbed Glass Mat) är ett torrt batteri där elektrolyten är absorberad av en väv av glasfiber

vilket innebär att det inte läcker eller fryser, även i ett urladdat tillstånd. AGM-batterier passar bäst till system där den större delen av kapaciteten används dagligen (Solarlab, u.d.).

A3 Resultat

Det mest aktuella för projektets syfte är polykristallina solceller. Tunnsolceller är inte intressanta eftersom att de har lägre verkningsgrad och det inte finns behov av att kunna lägga solcellerna på en ojämn yta i detta fall. Att de polykristallina solcellerna har aningen lägre verkningsgrad vägs upp av det billigare priset och därför kommer polykristallina solceller att användas. Vilken storlek anläggningen på Staben kommer ha räknas ut i en simuleringsmodell.

Parkeringshuset utanför Staben på Science Park ligger utanför skuggningsområdet vilket gör att projektet solcellsanläggning inte behöver ta hänsyn till effektminskningarna som uppstår vid skuggning.

En växelriktares verkningsgrad har funnits sjunka med c:a 1 procentenhet per 12°C förhöjd temperatur. Är den istället inomhus märks inte samma variationer. För att implementera detta ansattes att växelriktarens verkningsgrad var som bäst (98 %) vid 0°C och kallare. Vid högre temperaturer än 0°C ansattes att verkningsgraden sjönk enligt ovan. Verkningsgraden varierade därigenom mellan 98% och 95,3%, för data för år 2014.

Solcellsekvationer byggdes in i Simulinkmodellen för att ersätta den tidigare konstanta verkningsgraden för solcellerna, som var satt till 15 %. Med dessa ekvationer inbyggda i modellen, och de mätdata för temperatur och solinstrålning för år 2014 som används, varierade istället solcellernas verkningsgrad mellan ~13 % och ~17 %. Ändringen av strålningen till den uppskattade lutningen på 41° i sydläge implementerades även i Simulinkmodellen, vilket påverkade verkningsgraden som var ansatt som beroende av celltemperaturen, vilken i sin tur berodde på bland annat solinstrålningen. När STC-verkningsgraden var satt till 15% var den genomsnittliga verkningsgraden över året 15,8% utan den extra solinstrålningen, och 15,75% med den. Verkningsgraden sjönk alltså mycket litet, bara c:a 0,3%.

En ökning av solinstrålningen mot panelerna på 21,95% innebär en nästan lika stor ökning av den årliga avkastningen. Detta betyder i sin tur en årlig avkastning på 12200 kWh för 70 m² solceller, eller 174 kWh/m²år, vilket är väldigt högt för att vara i Sverige (Stridh, 2015). Där anges att avkastningen i Sverige ligger på 112-154 kWh/m²år solceller, vid 14 % verkningsgrad. Med 14 % STC-verkningsgrad i modellen sjönk avkastningen till c:a 164 kWh/m²år, vilket fortfarande är högre än man borde kunna få i Sverige.

A4 Diskussion

Att anpassa solinstrålningen mot panelerna i modellen till den vinkel de förmodligen skulle ha när de installerats var ett försök att göra modellen mer verklighetstrogen. Dock är metoden vi använde förmodligen inte så bra, eftersom att vi ökade den momentana instrålningen med den andel som skilde mellan årsgenomsnittet för olika lutningar. Årsgenomsnittet för den faktiska elproduktionen borde dock med den metoden inte skilja sig alltför mycket från verkligheten, men momentana värden är antagligen inte rättvisa. Troligen finns många faktorer förutom verkningsgrad och temperaturer som påverkar solcellers elproduktion, och som inte så enkelt kan implementeras i modellen. För att ge en mer realistisk avkastning kanske man bara borde sänka modellens STC(standard test conditions)-verkningsgrad.

Referenser

Bäckbro, H., Eklöf, M., Henke, P., Korsgren, T. N. & Sjöström, L. (2011). *Implementering av solceller i funbo*, Uppsala: Uppsala Universitet.

Driesse, A., Jain, P. & Harrison, S. (2008). *Beyond the curves: Modeling the efficiency of photovoltaic inverters*, u.o.: u.n.

Electrotecenergy (2015). *Olika typer av solceller*.
<http://electrotecenergy.se/typer-av-solceller/> [15-04-25]

Energimyndigheten (2015). *Installationsguide - Nätanslutna solcellsanläggningar*.
http://www.solelprogrammet.se/global/installationsguide_solceller.pdf?epslanguage=sv [15-05-13]

Energyinformative (2015). *Teknisk info om poly vs mono*.
<http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>
[15-05-10]

Lee, M. & Raichle, B. (2011). *A side-by-side comparison of micro and central inverters in shaded and unshaded conditions*, Katherine Harper Hall: Appalachian State University.

Länsstyrelsen Dalarna (2015). *Nätanslutning av småskalig elproduktion*.
<http://www.lansstyrelsen.se/dalarna/SiteCollectionDocuments/Sv/naringsliv-och-foreningar/naringslivsutveckling/scandinavian-heartland-natanslutning.pdf> [15-05-09]

PVgis (2015). *Photovoltaic software*.
<http://photovoltaic-software.com/pvgis.php> [15-04-20]

Pvsyst (2015). <http://www.pvsyst.com/en/software> [15-04-20]

Skaffasolcell (2015). *Olika typer av solceller*.
<http://skaffasolcell.se/index.php/olika-typer-av-solceller/> [15-04-15]

Skoplaki, E. (2008). *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations*, u.o.: u.n.

Solarlab-Kunskapsbasen (2013). *Knowledge base*.
<http://solarlab.se/solpanel/knowledgebase> [15-04-15]

Solarlab (u.å.) *Anslutningsschema för solpanel, laddningsregulator och batteri*.
<http://solarlab.se/solpanel/datablad/anslutningsschema-solpanel-regulator-batteri.pdf> [15-04-16]

Solcellsforum (2014). *Tekniken*.
<http://www.solcellforum.se/tekniken.html> [15-05-13]

Solelprogrammet (2015a). *Elektrisk design*.
<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/ElektriskDesign/> [15-04-15]

Solelprogrammet (2015b). *Allmänt om energiberäkningar*.
<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/Energiberakningar/> [15-05-20]

Solelprogrammet (2015c). *Växelriktare*.
<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/ElektriskDesign/#Växelriktaren> [15-05-21]

Solelprogrammet (2015d). *Skuggning*.

<http://www.solelprogrammet.se/Projekteringsverktyg/Energiberakningar/#Skuggning> [15-04-20]

Solkungen (2015). *Solceller*.

<http://www.solkungen.nu/produkter/solceller-20968868> [15-05-03]

Solpaneler dimensionering (2012). *Dimensionering*. <http://www.solpaneler.nu/?q=node/4> [15-04-16].

Stridh, B. (2015). *Fakta solceller*. <http://bengtsvillablogg.info/fakta-solceller/> [15-05-04]

Vignola, F., Mavromatakis, F. & Krumsick, J. (2008). *Performance of PV inverters*, u.o.: u.n.

Zimmermann, U. (2015). *Solcellers verkningsgrad* (Personlig intervju) [15-04-21]

Bilaga B Simuleringsmodell

För att kunna dimensionera solcellsanläggningen som behövs för att driva kylpumparna i Staben byggdes en modell i simuleringsprogrammet Simulink. Innan modellen byggdes ställdes en översiktlig bild av modellen upp, som sedan utgjorde grunden för modellbygget i Simulink. Modellen innehöll delar som representerade solcellerna, kylpumparna, yttre faktorer såsom temperaturpåverkan samt Stabens resterande elförbrukning.

När simuleringar gjordes i modellen sparades utdata för att kunna analyseras, och visualiserades i grafer. Från datan kunde slutsatser om anläggningen dras. Då kylpumparna är aktiva under sommarhalvåret är det passande att använda solceller som energikälla eftersom att solinstrålningen är hög då. När solcellsanläggningen dimensionerades för att så exakt som möjligt täcka kylpumparnas elbehov på årsbasis fick den en storlek på 3 kW. Pumparnas elkraftsbehov täcks på årsbasis, men solcellerna ger nästan konstant över- eller underskott av elkraft, relativt pumparnas förbrukning.

B1 Syfte

Syftet med simuleringsmodellen var att på ett rimligt detaljerat sätt simulera de faktorer som kan påverka en solcellsanläggnings produktion vid Staben, och därmed kunna beräkna hur stor anläggningen skulle behöva vara för att kunna förse byggnadens komfortkyla med elektricitet. Modellen skulle även kunna användas för att ta fram optimerade värden på olika parametrar, exempelvis för att ge maximal lönsamhet, för att minimera momentana överskott i elproduktion eller för att så exakt som möjligt täcka komfortkylans totala elbehov på årsbasis. Modellen skulle bidra med data för olika uppbyggnad av systemet, som exempelvis system med eller utan en batteribank inkopplad.

B2 Bakgrund och antaganden

Solceller omvandlar inte all solenergi som träffar deras yta till elektricitet. Verkningsgraden för solceller på marknaden ligger vanligtvis kring 15% (SolarLab, 2013) och dit tillkommer förluster i växelriktare och vissa fluktuationer i verkningsgrad på grund av cellernas temperatur (Vignola m.fl., 2008). Solcellernas produktion under sommaren dämpas något på grund av att solcellernas verkningsgrad då hämmas av temperaturen i cellerna, som beror på både utetemperaturen och solinstrålningen.

Eftersom att syftet med solcellsanläggningen var att täcka Stabens komfortkylas elbehov jämfördes den producerade solelen med kylpumparnas elförbrukning. Det antogs efter överläggning med drifttekniker i Staben (Fagerman, 2015) att en av kylpumparna gick på olika effekt vid olika temperaturer. De andra två pumparna antogs gå med full effekt under perioden maj-september.

Då solcellers elproduktion beror momentant på solinstrålningen, medan kylpumparnas elbehov antogs vara nästan konstant, kunde den simulerade elproduktionen inte följa kylpumparnas simulerade elförbrukning. Det betydde att det ibland producerades mer el än vad pumparna förbrukade per timme, och andra tider (t.ex. nattetid) mindre. När mer el producerades än pumparna förbrukade skulle den helst konsumeras i huset, då det är mer lönsamt än att sälja den (Rydell, 2015).

Då försäljningspriset för elkraft till elnätet är lägre än inköpspriset för elkraft från elnätet (Rydell, 2015) söktes en lösning för att undvika att sälja överskott av elkraft från solcellsanläggningen till elnätet. Därför undersöktes möjligheten att använda en batteribank i systemet. Batterierna skulle kunna

Bilaga B

lagra elkraft som producerats i solcellerna men som inte behövdes i byggnaden. Energin skulle sedan kunna användas när byggnaden behövde elkraft som solcellerna inte kunde producera.

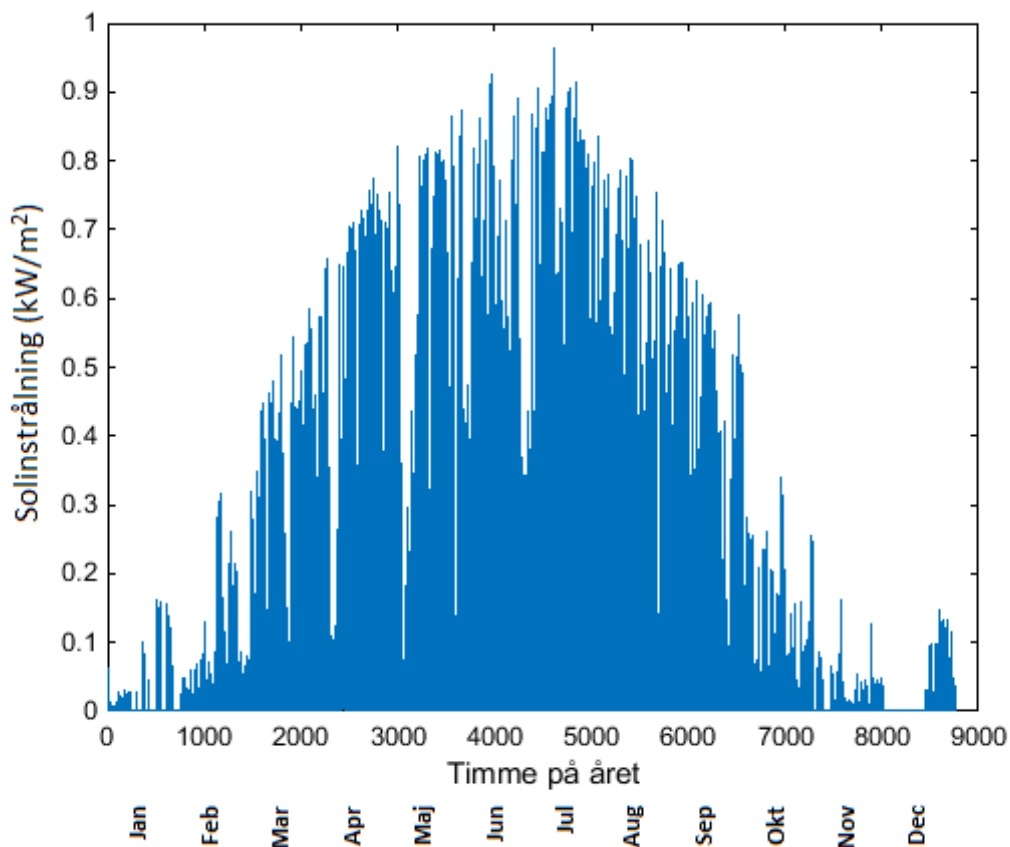
I verkligheten finns en verkningsgrad för både uppladdning och urladdning av batterier, på c:a 90 % för uppladdning och 90-95 % för urladdning, (Solpaneler, 2012) vilket inte implementerades i modellen. Istället byggdes en modelldel för att illustrera principen av hur el laddas i en batteribank eller säljs när det finns överskott, eller tas från batteriet eller köps från nätet, när det finns underskott.

Data för solinstrålning och utomhustemperatur, som använts i modellen, erhöles från Metrologiinstitutionen vid Uppsala universitet. (Institutionen för meteorologi, Uppsala Universitet, 2015) Data för Stabens elförbrukning erhöles från Vasakronan (Vasakronan, 2015).

Då data för elförbrukning bara fanns för ett år (2014) – och i syfte att ha en kort simuleringsperiod – kördes simuleringen med data för det enda året, medan den byggdes upp och byggdes ut. Data för solinstrålning och utomhustemperatur fanns för åren 1998-2014.

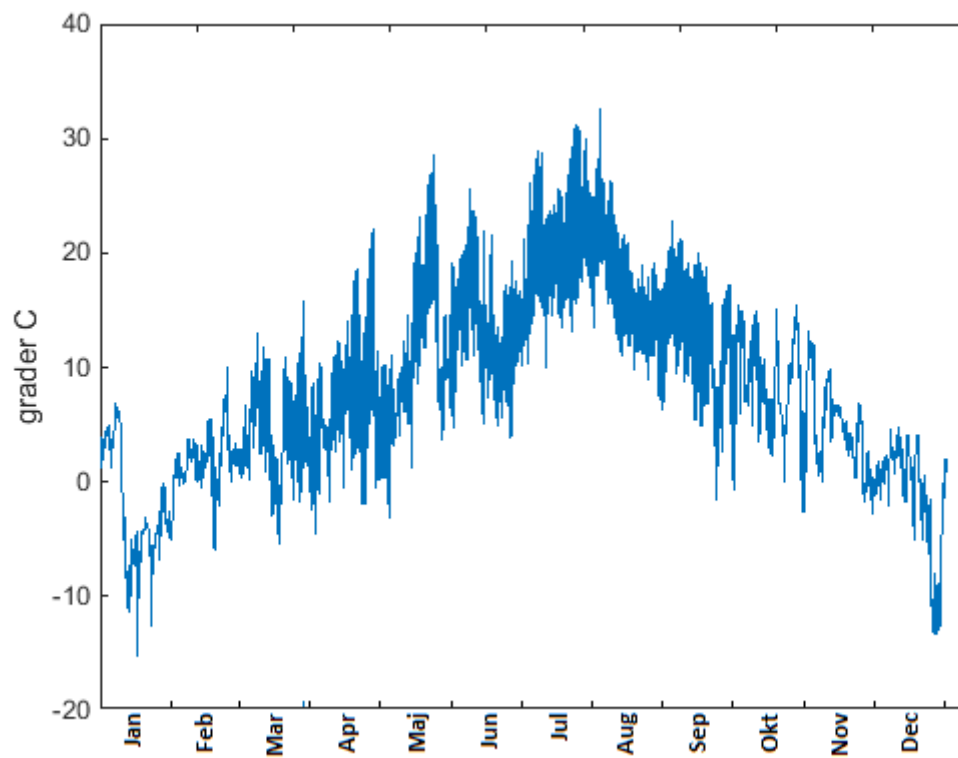
Indatan som användes visas i grafer nedan.

I Figur 1 visas att solinstrålningen är som starkast under sommarhalvåret. Under vintern är solljuset i regel svagare. Instrålningen varierar mellan 0 kW/m² som minst och runt 1 kW/m² som mest.



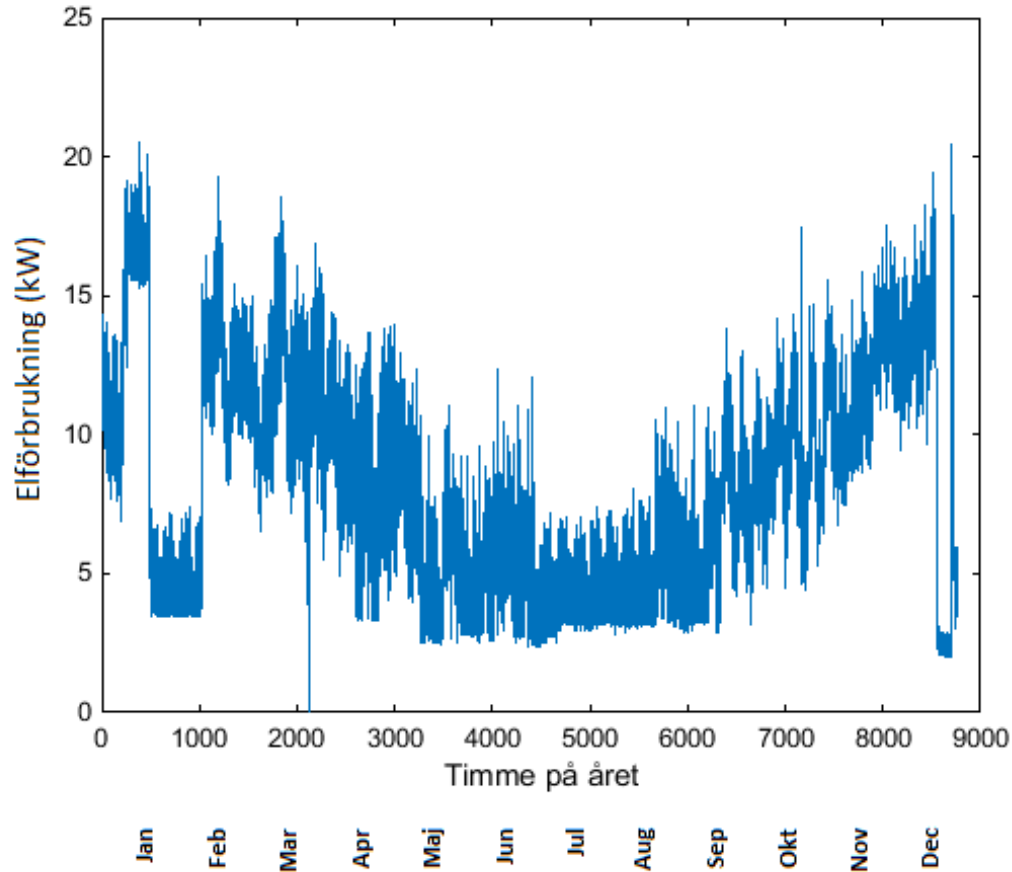
Figur 1. Genomsnittlig solinstrålning per timme i Uppsala år 2014 (kW/m²). Data från Institutionen för meteorologi, Uppsala universitet 2015.

Figur 2 visar utomhustemperaturen i Uppsala under år 2014. Som kallast hade Uppsala -15.2°C och som varmast 32.6°C under det året.



Figur 2. Utomhustemperatur ($^{\circ}\text{C}$) per timme i Uppsala, data från 2014. Data från Institutionen för meteorologi, Uppsala universitet 2015.

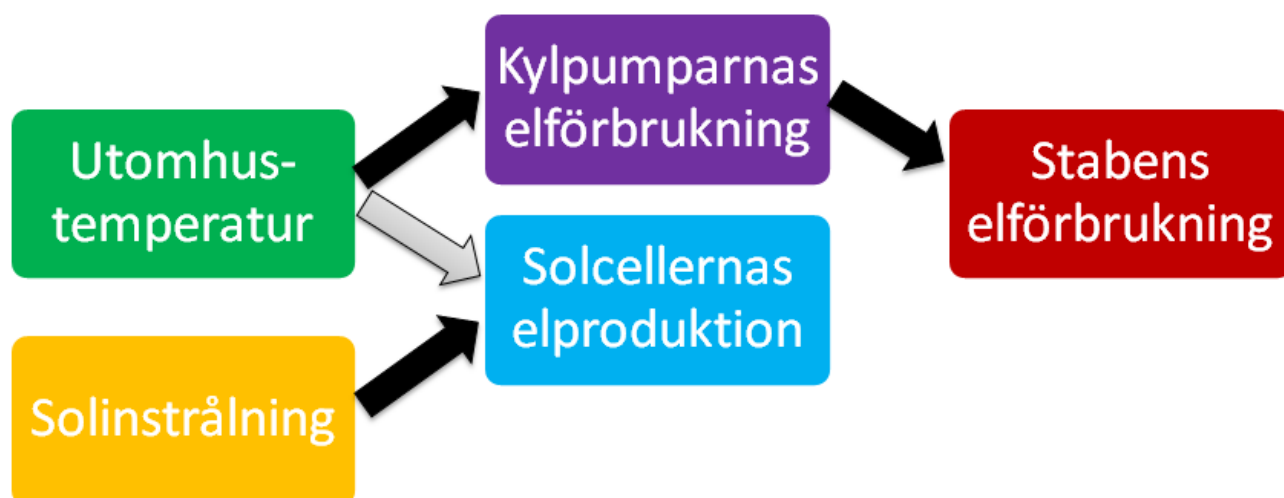
I Figur 3 visas värden för Stabens elförbrukning. Under vintern är elförbrukningen högre än under sommaren. Tre distinkta avvikelser uppstår, en i slutet av januari och början på februari, en i slutet av mars samt en i slutet av december. En tydlig lägstanivå i elförbrukning framträder i grafen och ligger kring 3 kW. Som mest förbrukas drygt 20 kW el i Staben.



Figur 3. Elkraftsförbrukning per timme i Staben år 2014 (kW). Data från Vasakronan 2015.

B3 Modellen

Simuleringsmodellen byggdes i modelleringsverktyget Simulink (MathWorks, b, 2015) och beräkningsprogrammet Matlab (MathWorks, 2015a). Innan programmen användes ställdes ett blockschema för modellen upp, se Figur 4. I blockschemat var de olika blocken inte definierade komponenter från simulinkbiblioteket utan symboliserade faktorer som på något sätt kunde påverka systemet. Syftet med blockschemat var att få ett underlag för byggandet av modellen i Simulink, då det gav en förenklad översiktlig bild av hur systemet skulle uppföra sig.



Figur 4. Översiktligt blockschema över systemet. Svart pil antyder en (matematiskt) positiv påverkan och vit pil antyder en (matematiskt) negativ påverkan.

En av delarna i modellen simulerade solcellernas elproduktion vid olika värden på solinstrålning. Indata för solinstrålning under ett år lagrades i Matlab, varifrån modellen sedan kunde hämta värdena. Värdena räknades om för att ge en bild av hur mycket solinstrålning som kan omvandlas till elektricitet i solceller. Hänsyn togs till solcellernas STC-verkningsgrad, hur solcellernas verkningsgrad påverkas av deras temperatur, och växelriktarens verkningsgrad (Bilaga A). Även ett block där anläggningens storlek i m² kunde varieras infördes. Anläggningens yta räknades sedan om till märkeffekt med antaganden om solcellernas effekt per m².

Eftersom att solcellers verkningsgrad påverkas av deras temperatur modellerades temperaturen och dess påverkan på verkningsgraden. Både utomhustemperaturen och solinstrålningen användes som indata, då båda påverkar solcellernas temperatur. Solcellstemperaturen beräknades genom en implementering i modellen av följande ekvation 4.

$$T_c = T_a + \left(\frac{G_T}{G_{NOCT}} \right) (T_{NOCT} - T_{a.NOCT}) \quad \text{Ekvation 4}$$

Verkningsgraden beräknades sedan enligt ekvation 5 som implementerades i modellen

$$\eta_c = \eta_{STC} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{STC})] \quad \text{Ekvation 5}$$

För mer information och förklaring se bilaga A.

En växelriktarens verkningsgrad beror på vilken andel av dess märkeffekt den arbetar vid. Det beroendet är för svårt att modellera för att det skulle göras inom ramen för detta projekt.

Verkningsgraden påverkas också av den omgivande temperaturen, vilket genom ett enkelt samband modellerades. Verkningsgraden ansattes vara maximal (98 %) vid 0°C och lägre temperaturer, för att sjunka med en procentenhet per 12°C över 0°C.

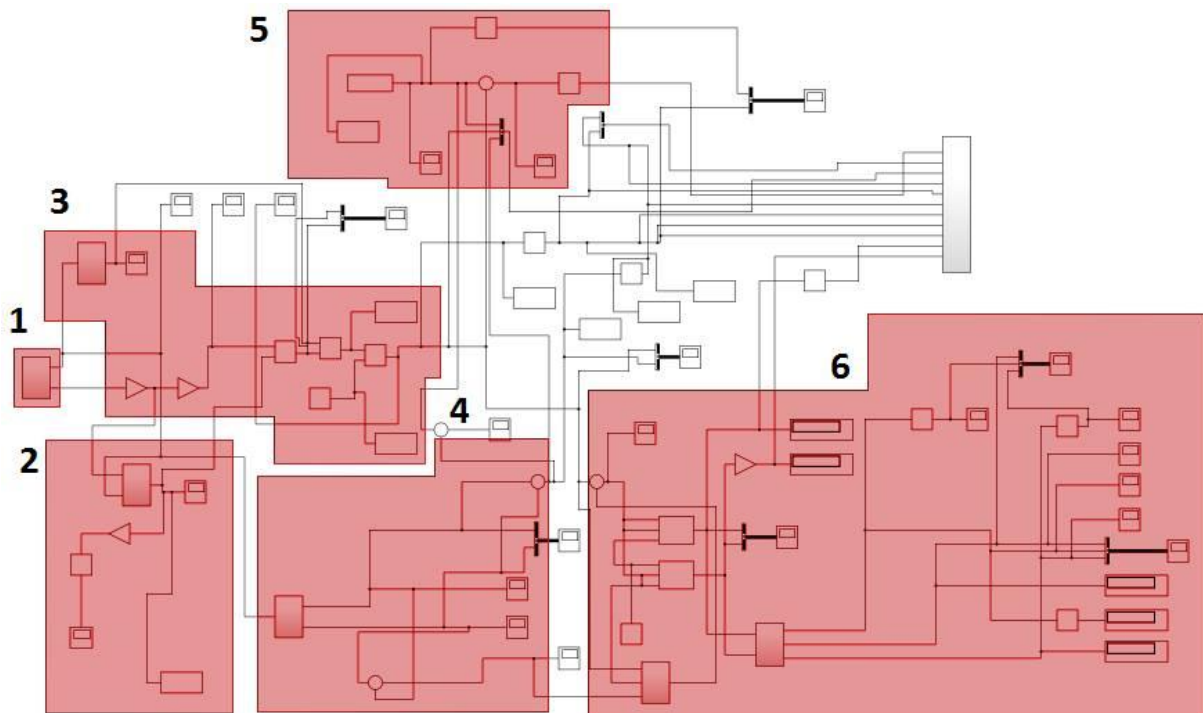
För att mäta upp hur stor del av hela byggnadens elbehov som täcktes av solel infördes indata för stabens elförbrukning för ett år. Elförbrukningen jämfördes med solcellernas produktion för att kunna avgöra hur stor del av husets elförbrukning solcellerna täckte, och se ifall det uppstod momentana överskott. Ett syfte med detta steg var att se huruvida det skulle fungera att använda el från solcellerna

i resten av byggnaden när det producerades mer än kylsystemet förbrukade, utan att behöva sälja en stor del av elen som producerades.

Ett annat syfte med att mäta under- och överskott var att kunna införa en modell av en batteribank. Beroende på huruvida över- eller underskott rådde lagrades elektriciteten i batteriet, drogs från batteriet, köptes från elnätet eller såldes på elnätet. Elektricitet köptes från nätet bara ifall batteriet var tomt och såldes till nätet bara ifall batteriet var fullt.

Nästa del av modellen representerade de olika pumparnas uppförande för olika värdena på utetemperatur. Det antogs efter mötet med Per Fagerman (Fagerman, 2015) att två av pumparna gick med konstant effekt, 0.55 kW respektive 0.37 kW. En av pumparna, med märkeffekt 0.25 kW, gick igång vid en utomhustemperatur på över 20°C. Dess effekt ökades sedan gradvis upp till 100 % vid 30°C. Pumparna som går på konstant effekt antogs vara aktiva mellan första maj och sista september. Precis som för solinstrålningen hämtades indata för utomhustemperaturen från Matlab. Därefter gick värdena för temperaturen in som referenssignal till ett subsystem, som släppte igenom olika signaler beroende på referenssignalens värde. Därmed kunde systemet regleras så att en pumps effekt slogs på vid tillräckligt höga temperaturer och stängdes av vid lägre. Pumparnas elförbrukning jämfördes sedan med solcellernas elproduktion för att kunna visa hur stor del av deras elbehov som kan täckas av solcellerna.

På utvalda ställen i modellen placerades datalagringsblock (scopes), som skapade en graf av inkommande data. På så sätt kunde systemets uppförande visualiseras och tolkas. I Figur 5 syns en översiktlig bild av den färdiga modellen.



Figur 5: Översiktlig bild av den färdiga modellen. De olika färgade områdena representerar olika delar av systemet. För mer information, se texten nedan.

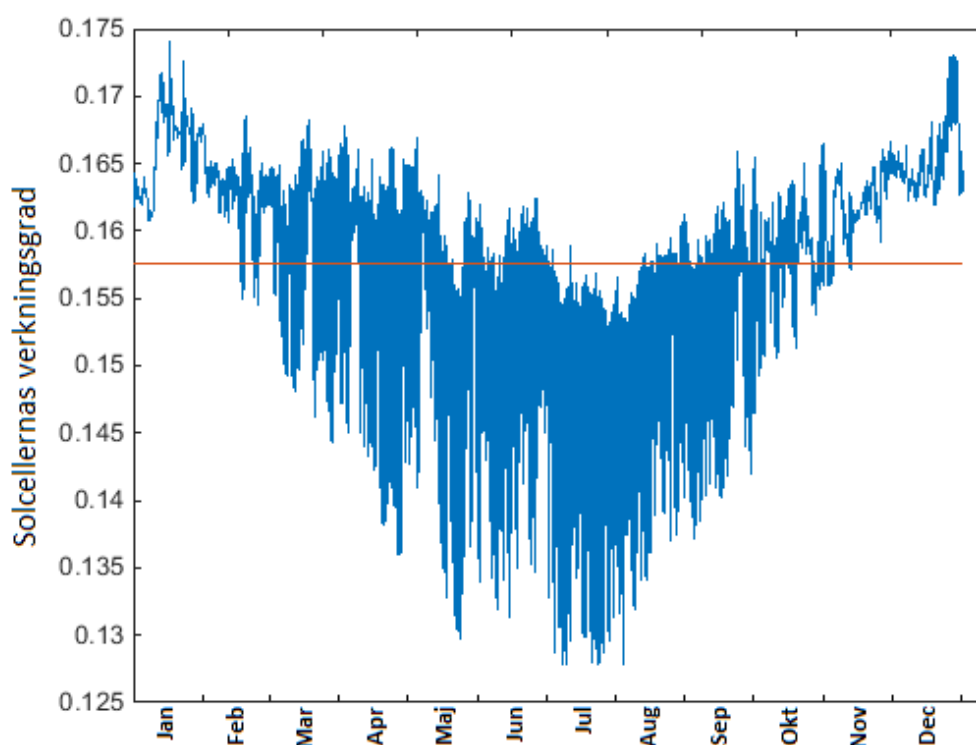
De olika färgade områdena i Figur 5 representerar olika delar av systemet. I område 1 syns ett undersystem i vilket indata för solinstrålning och utomhustemperatur hämtades till modellen. I område 2 modellerades solcellernas verkningsgrad som funktion av deras temperatur. Verkningsgraden modellerades sedan tillsammans med solinstrålningen ihop till solcellsanläggningen i område 3. I

område 4 modellerades pumparna, i område 6 en tillhörande batteribank. För mer information om batterier i solcellssystem, se bilaga A. I område 5 infördes data för Stabens elproduktion som sedan modellerades ihop med resten av systemet. Komponenter utanför områdena är diverse datainsamlingsblock som inte direkt påverkar systemets dynamik.

B4 Resultat

När en solcellsanläggning med märkeffekt 3 kW simulerades, erhöles en årlig avkastning på 3488 kWh, vilket är nära pumparnas förbrukning 3443 kWh.

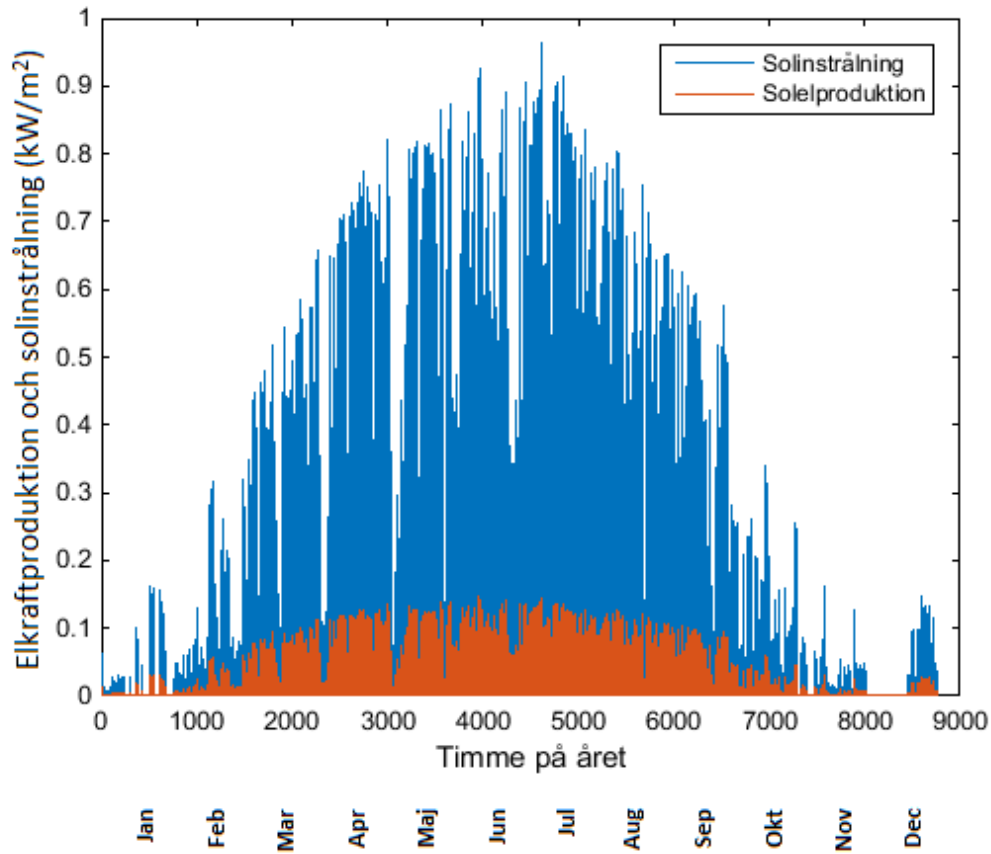
I Figur 6 visas hur solcellernas beräknade verkningsgrad varierar över året på grund av värmeförändringar i cellerna. I Figur 7 visas den totala solinstrålningen och den producerade solelen för att ge en bild av hur effektiva solcellerna är på att omvandla solljus till elektricitet.



Figur 6. Fluktuationer i solcellernas verkningsgrad över ett år. Den horisontella linjen anger genomsnittlig verkningsgrad över året. Verkningsgraden är simulerad utifrån data för solinstrålning och utomhustemperatur från Institutionen för meteorologi, Uppsala universitet.

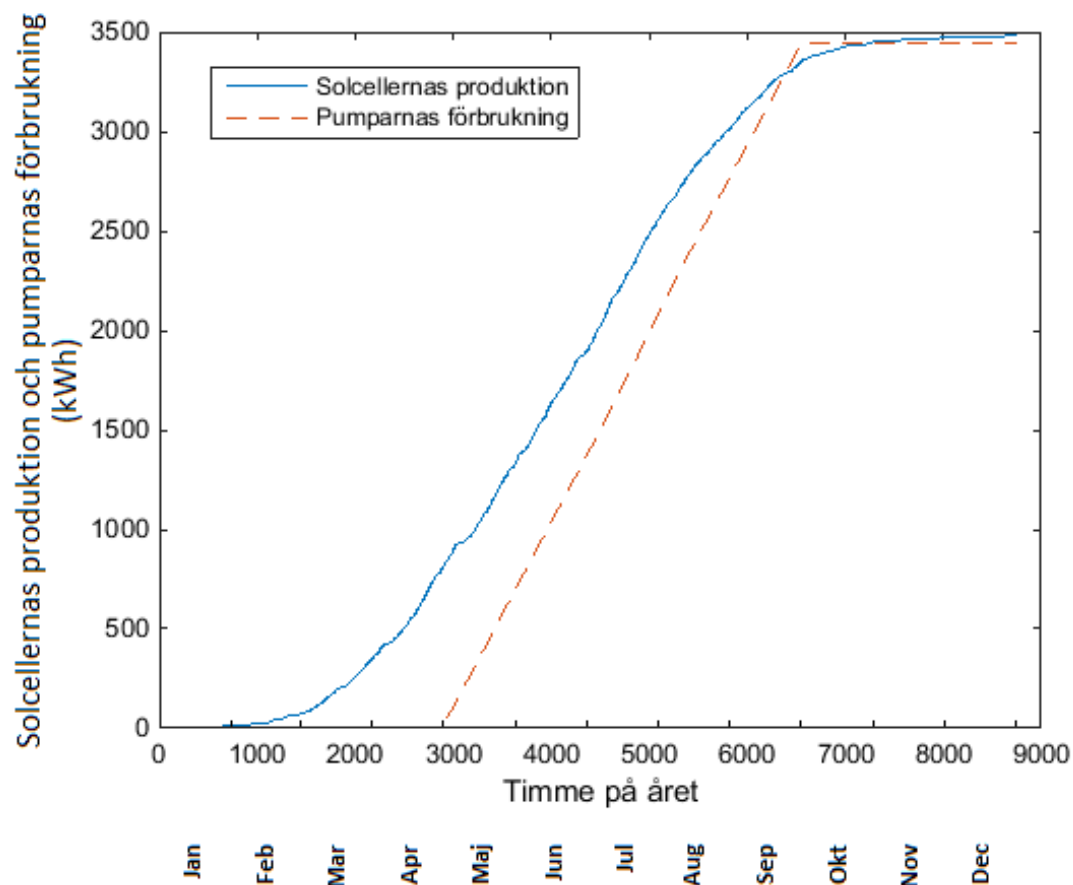
Verkningsgraden under året varierar mellan värden över 17 % och värden under 13 %, i figur 6. En STC-verkningsgrad (standard testing conditions) på 15 % användes i simuleringen.

Figur 7 visar hur stor del av det instrålade solljuset som omvandlas till elektricitet. På grund av att solcellernas verkningsgrad minskar vid högre temperaturer är elproduktionens ökning under sommaren mindre påtaglig än solinstrålningens ökning.



Figur 7. Solinstrålning i Uppsala (se Figur 1) och solcellernas uppskattade elproduktion vid 15 % STC-verkningsgrad, plottade mot tiden (kW/m²) för år 2014. Solelproduktionen är simulerad utifrån data för solinstrålning och utomhustemperatur från Institutionen för meteorologi, Uppsala universitet.

I Figur 8 jämförs de simulerade värdena för pumparnas ackumulerade elkraftsförbrukning och solcellernas ackumulerade elkraftsproduktion för en solcellsanläggning med storleken 3 kW.

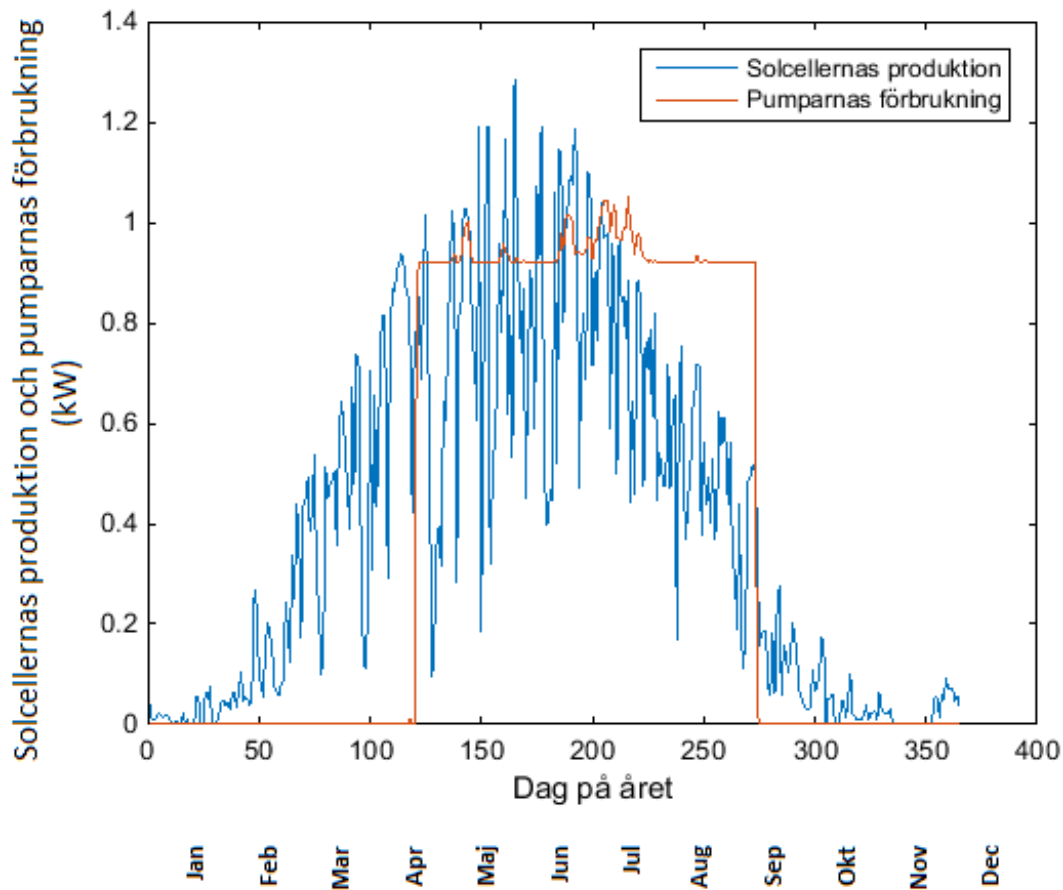


Figur 8. De simulerade värdena för den ackumulerade elkraftsförbrukningen för kylpumparna och den ackumulerade elkraftsproduktionen från solcellerna, för år 2014, plottade mot tiden. Värdena är simulerade med data för solinstrålning och utomhustemperatur från Institutionen för meteorologi, Uppsala universitet 2015.

I Figur 8 syns att en anläggning på 3 kW producerar nog mycket elektricitet för att täcka pumparnas elbehov på årsbasis. I Figur 9 visas pumparnas förbrukning och solcellernas beräknade produktion momentant över året.

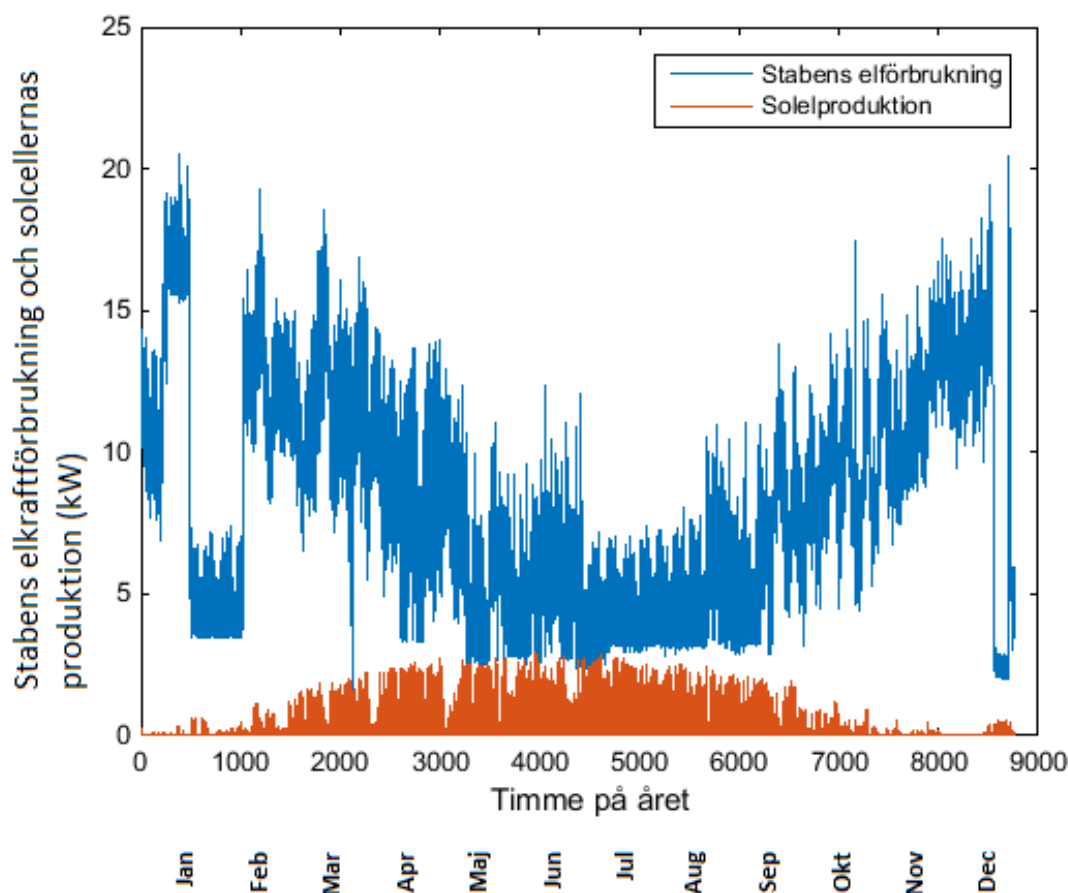
Bilaga B

I Figur 9 visas hur mycket elektricitet pumparna och solcellerna förbrukar respektive producerar momentant över ett år. För att göra bilden lättare att avläsa valdes att plotta graferna med dagsintervall istället för timintervall som i figurerna ovan. Data för varje dag består av genomsnittet av värdena för alla dygnets timmar. Det syns tydligt i grafen att det finns perioder under året, i synnerhet under sensommaren, då solcellernas elproduktion inte täcker pumparnas elbehov. Under våren finns det istället ett överskott av el från solcellerna. Detta innebär att solcellerna inte kan täcka pumparnas elbehov momentant hela året. Istället får man se till att produktionen täcker behovet på årsbasis.



Figur 9. De beräknade värdena för den dygnsvisa elförbrukningen för kylpumparna och den dygnsvisa elproduktionen från solcellerna för år 2014, plottade mot tiden. Datan är simulerad utifrån data för solinstrålning och utomhustemperatur från Institutionen för meteorologi, Uppsala universitet.

I Figur 10 syns Stabens elförbrukning plottad mot elproduktionen i solcellerna.



Figur 10. Solcellernas timsvisa simulerade elproduktion och Stabens timsvisa elförbrukning, för 2014, plottade mot tiden. Elproduktionen är simulerad utifrån data för solinstrålning och utomhustemperatur från Institutionen för meteorologi, Uppsala universitet. Elförbrukningsdata från Vasakronan, 2015.

Figur 10 visar att solcellerna i princip aldrig producerar mer elektricitet än vad byggnaden förbrukar, men att produktionen och förbrukningen nästan tangerar varandra under delar av sommaren. Under ett fåtal tillfällen produceras mer el av solcellerna än huset förbrukar. Det maximala värdet på detta överskott är 0.32 kW.

B5 Diskussion

All indata som använts i modellsimuleringarna tycks ha rimliga värden, vilket är en grundförutsättning för att modellen ska fungera som avsett. Däremot är simuleringarna ovan gjorda för data över endast ett år. Detta är en liten mängd data när målet är att solcellerna ska producera lika mycket som kylpumparna förbrukar på årsbasis. För att kunna dra mer exakta slutsatser behöver simuleringar göras för data över flera år. Simuleringarna ovan ger dock en god ungefärlig inblick i hur systemet kommer att uppföra sig då trenderna i indata bör vara liknande, och en del slutsatser kan dras från dess resultat.

Att använda solel för att driva komfortkyla är passande då komfortkylans elförbrukning sammanfaller ungefärligt med den tid på året då solcellerna producerar som mest elektricitet, vilket illustreras i Figur 9. Samtidigt som kylpumparnas elbehov ökar under sommaren minskar Stabens totala elbehov. Det

Bilaga B

beror troligen på att byggnaden behöver värmas under vinterhalvåret, och att den processen är mer energikrävande än kylningen under sommaren. En annan möjlig förklaring är att Staben minskar sin elförbrukning under sommaren då elektroniken i byggnaden används mindre på grund av att många anställda är på semester. I Figur 5 syns att elförbrukningen i Staben har en lägstanivå kring 3 kW. Detta styrks av att det under vintrarna 2014 förekom två avvikelser i elförbrukning, som även de lade sig på denna grundnivå. Enligt drifttekniker Per Fagerman berodde dessa avvikelser på att värmeförsörjningen i byggnaden slutade fungera under dessa perioder. Att elförbrukningen gick ända ner till lägstanivån i detta fall berodde troligen på att de anställda inte kunde arbeta i byggnaden när värmeförsörjningen inte fungerade och därför inte var på plats och använde annan utrustning. I slutet av mars 2014 syns i Figur 3 en avvikelse i elförbrukning som gick ända ner till 0 kW. Att förbrukningen gick nedanför lägstanivån i detta fall berodde troligen på fel i mätutrustning snarare än att all el i byggnaden stängdes av.

Att solcellernas totala elproduktion över ett år motsvarar kylpumparnas totala elförbrukning betyder inte att solcellerna täcker pumparnas behov momentant. Detta beror dels på att solenergi är en opålitlig energikälla, dess effekt varierar kraftigt över tid, och att pumparnas förbrukning till viss del också kan variera fort. Att det under året förekommer en viss förskjutning mellan solinstrålning och temperatur innebär också en förskjutning mellan pumparnas behov och solcellernas produktion. Detta innebär att ett utbyte med en annan elkälla och -sänka kommer vara nödvändig trots att förbrukningen och produktionen är lika stora på årsbasis.

Referenser

- Fagerman, P. Besök på Staben. (Personlig intervju) [2015-05-12]
- Institutionen för meteorologi, Uppsala Universitet. Solinstrålning och temperatur. *Mätdata*. Uppsala. [2015-09-04]
- MathWorks (2015a). *Matlab: The Language of Technical Computing*. <http://se.mathworks.com/products/matlab/> [2015-05-27]
- MathWorks (2015b). *Simulink: Simulation and Model-Based Design*. <http://se.mathworks.com/products/simulink/> [2015-05-27]
- Rydell, A. (2015). *Solceller på Uppsalahems fastigheter*. Uppsala: Uppsala Universitet.
- SolarLab (2013). <http://www.solarlab.se/solpanel/solcell-fakta> [2015-08-30]
- Solpaneler (2012). <http://www.solpaneler.nu/?q=node/4> [2015-05-26]
- Vasakronan (2015). Stabens elförbrukning. *Mätdata*. Uppsala.
- Vignola, F., Krumsick, J. & Mavromatakis, F. (2008). *Performance of PV inverters*. <http://solardat.uoregon.edu/download/Papers/PerformanceofPVIinverters.pdf> [2015-08-04]

Bilaga C Validering

Ett solcellssystem ska installeras för att täcka energibehovet för kylning av kontorslokalen Staben på Science Park. En oberoende validering av storleken på solcellsanläggningen har gjorts. Detta då dimensionen på solcellsanläggningen beräknades då årsförbrukningarna för kylanläggningen skulle täckas, men även hur stor den behövde vara om det momentana effektbehovet skulle täckas. Två fall sattes upp, som båda var representativa för hur effekt och energibehovet för kylanläggningen ser ut. Detta då augusti har ett stort kylbehov och relativt låg solstrålning.

För att undersöka hur stor del av året kylpumparna används undersöktes utomhustemperaturen under sju år i Uppsala. Beräkningsprogrammet Photovoltaic Geographical Information System, PVGIS, användes för att beräkna hur mycket energi som solcellerna producerade. Genom att göra upprepade försök hittades storleken på solcellerna som matchade förbrukningen av kylpumparna.

Storleken på solcellsanläggningen om den årliga förbrukningen ska komma från solet är 3 800 W installerad topeffekt. Då kylanläggningens förbrukning ska täckas under augusti blev resultatet en installerad topeffekt på 7 000 W.

C1 Inledning och Syfte

Ett solcellssystem ska installeras för att täcka energibehovet för kylning av kontorslokalen Staben på Science Park. För att rätt kunna dimensionera anläggningen har en modellering gjorts. Då modellen som ligger till grund för simuleringarna kan innehålla felaktigheter görs också en validering av storleken på anläggningen. Skulle resultaten skilja sig åt tyder det på att fler undersökningar bör göras. Om däremot resultatet från valideringen och simuleringen skulle sammanfalla är det ett tecken på att vårt resultat är rimligt.

C2 Bakgrund

Staben är en del av Uppsala Science Park som ägs av Vasakronan. Det är en innovationsmiljö där ca 140 företag inom olika vetenskapsområden håller till. Uppsala Science Park verkar för affärsutveckling och på området finns ett stort nätverk där flera aktörer kan samverka (Vasakronan, 2015). Staben har i dagsläget tre pumpar som driver kylning i lokalerna. Hur stor en solcellsanläggning behöver vara för att täcka dess behov av kylning har därför utretts.

C2.1 Uppställning av fall

Syftet var att validera storleken på solcellsanläggningen som skulle täcka kylbehovet på Staben. För att göra detta sattes två fall upp som på var sitt sätt representerade förutsättningarna för en solcellsanläggning som driver en kylanläggning.

Fall 1 beskriver hur validering gjordes där kylanläggningens energibehov skulle täckas under ett år. Fall 2 beskriver hur validering gjordes då kylanläggningens behov momentant skulle täckas. Då lagring krävs för att kunna täcka kylanläggningens behov momentant undersöktes istället en månad då kylbehovet är stort och solstrålningen relativt låg (Zimmermann, 2015b).

C2.1.1 Fall 1. Årlig energiproduktion

Datan bestod av mätningar från 1998-2014, där temperaturen uppmättes som ett medelvärde under tiominutersintervall. För att kunna dra någon slutsats av detta togs ett medelvärde av temperaturen för de undersökta åren i varje mätpunkt. Därefter undersöktes den årliga energiåtgången för kylpumparna.

Pump 1 och pump 2 antogs gå för fullt och pumpa upp kyla ur marken och runt i lokalerna dygnet runt mellan maj och september. Detta eftersom de antogs användas för kylning under dessa månader.

Pump 3 antogs gå på full effekt då utomhustemperaturen är 20 grader eller över.

När energiåtgången för pumparna var beräknade användes PVGIS för att se hur stor installerad solcellseffekt som krävdes för att täcka behovet. För detta projekt är solceller av polykristallint kisel valt. PVGIS kan anpassas för dessa samt vald adress.

C2.1.2 Fall 2. Täcka pumparnas effektbehov

I detta fall undersöktes datan på samma sätt som i Fall 1. dvs. ett medelvärde för de undersökta årens togs i varje mätpunkt, dock användes endast datan från augusti. Då det inte fanns momentan data på pumparnas effekt kunde beräkningar på detta inte ske. Därför gjordes vissa antaganden. Kylbehovet antogs sammanfalla med kontorstid, men vara förskjutet så att kylbehovet släpar efter. Solstrålningen antogs därför till viss del sammanfalla med kylbehovet i lokalerna (Nilsson, 2013). Pump 3 antogs, i likhet med fall 1, gå för fullt då temperaturen är 20 grader eller över.

Pump 1 och pump 2 har antagits gå dygnet runt, vilket gör att solcellerna inte kan täcka upp dessa pumpars behov momentant. Därför undersöktes hur stor anläggningen behövdes vara om behovet skulle täckas under en månad. Detta innebär i förlängningen ett överskott av solel dagtid och ett underskott nattetid. Då Staben har andra elförbrukande maskiner i sina lokaler kommer elen antagligen inte behöva säljas vidare på nätet, utan förbrukas.

I detta fall valdes augusti månad att undersökas. Detta då kylbehovet bedöms vara stort samtidigt som solstrålningen minskar. Samma beräkningar görs som i Fall 1.

C3 Metod

Först beräknades hur mycket energi pumparna förbrukar under ett år respektive under augusti månad. Detta gjordes genom en beräkning av hur stor andel av tiden som utomhustemperaturen är 20 grader eller mer. Beräkningarna utfördes i MATLAB, ett beräknings och simuleringsprogram från MathWorks (Mathworks, 2015). Storleken på solcellsanläggningen beräknas med hjälp av beräkningsprogrammet PVGIS.

C3.1 Data och temperaturanalys

Staben ligger på latitud 59,842 och longitud 17,643 (Europeiska kommissionen, 2015). För att kunna beräkna pumparnas energibehov undersöks utomhustemperaturen i området.

Data som användes i undersökningen är temperaturdata från 1998-2014 med tio minuters intervall.

En noggrann undersökning gjordes av två fall. Först undersöktes temperaturen under ett helt år, därefter undersöktes augusti månad. Just dessa fall undersöktes för att de på var sitt sätt ansågs representera hur kylpumparnas energi och effektbehov kan variera.

C3.1.1 Hantering och simulering av data

Mängden mätpunkter var väldigt stor och krävde bearbetning för att samband skulle kunna hittas. Därför användes beräkningsprogrammet MATLAB för att lättare strukturera data och utföra beräkningar. Temperaturen angavs som en lång dataserie, där olika år och månader inte kunde användas separat. Därför delades dataserien upp i olika år. Här upptäcktes det att under vissa år var dataserierna kortare eller längre än ett normalt år. Detta antogs bero på skottår samt bortfall i mätningar.

Då några år hade avvikande antal mätpunkter togs dessa år bort ur beräkningarna. Kvar var då de sju åren 2001-2003, 2005, 2007, 2010 samt 2013. Ett medelvärde beräknades för dessa år. För att beräkna hur stor andel som var under respektive över 20 grader undersöktes alla mätpunkter och kategoriserades. Därefter kunde en procentsats över andelen mätpunkter som var 20 grader eller mer beräknas, enligt ekvation 1.

$$\% = \frac{T_{\text{över}}}{T_{\text{total}}}$$

Ekvation 1

I bilaga G finns programmet som utfört beräkningarna.

C3.2 Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

Beräkningsprogrammet PVGIS är en produkt från den Europeiska kommissionen. Den användes för att beräkna energin ut från polykristallina solceller baserat på vilken effekt de är märkta för. Vid användning av programmet angavs exakt position så att rätt väderdata användes. Väderdata kommer från mätningar på marken samt beräkningar från satellitdata (Europeiska kommissionen, 2010). Den diffusa strålningen beräknas med hjälp av statistiska metoder utifrån satellitbilder om mätningar inte finns att tillgå (Liu & Jordan, 1960). Därefter angavs vilken solcellsteknologi som skulle användas. Detta då olika teknologier försämras mer eller mindre vid temperaturökning och minskad solstrålning. Därefter angavs hur stor den installerade toppeffekten var, vilken vanligen anges i specifikationerna för den solcell man är intresserad av att undersöka. Toppeffekt är den effekt som solcellerna producerar vid 1000 w/m² och en solcellstemperatur på 25 grader Celsius (Zimmermann, 2015a). Även de uppskattade systemförlusterna angavs. Det kan vara förluster i kablar, snö, smuts, växelriktare m.m. Detta är förinställt på 14 %. Temperaturen på solcellerna kommer att vara olika beroende på om solcellerna är integrerade i byggnaden eller om de är fastmonterade på en ställning. Detta eftersom ventilationen i det fristående fallet antas vara bättre. Eftersom verkningsgraden försämras då temperaturen ökar är även detta en valbar parameter i programmet. Även lutning och väderstreck solcellerna kan väljas (Europeiska kommissionen, 2015).

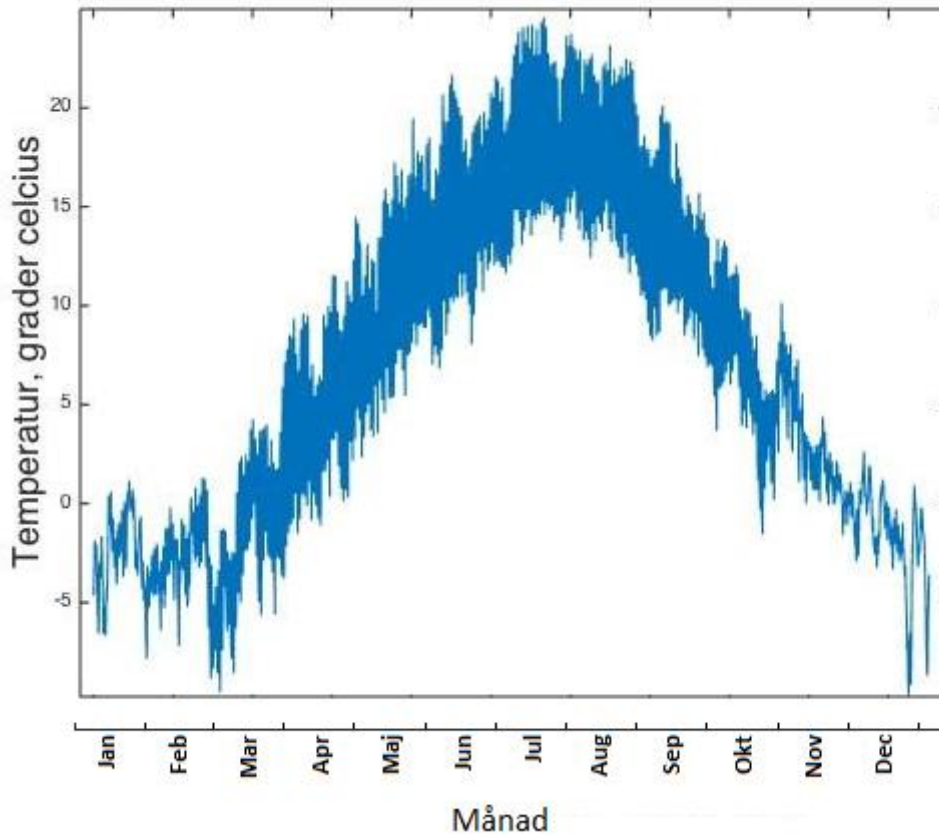
C3.2.1 Implementering av PVGIS

Lutningen på solcellerna avgör hur mycket av solstrålningen som kommer solcellerna till godo. Därför valdes i detta fall 40 graders lutning. Denna lutning ger högst årlig energiproduktion för våra breddgrader, Uppsala och Mälardalen (Stridh, 2015). Även söderläge valdes, då detta ger det allra högsta utbytet. I övrigt har de förinställda parametrarna använts.

Känt var pumparnas märkeffekter och hur pumparna kunde antas användas (Fagerman, 2015). Energibehovet dessa krävde kunde då matchas mot den energi som solcellerna producerar enligt PVGIS. För att hitta hur stor installerad effekt som behövdes för att täcka den energi som kylanläggningen förbrukade gjordes upprepade försök till dess att den producerade energin sammanföll med den som förbrukades.

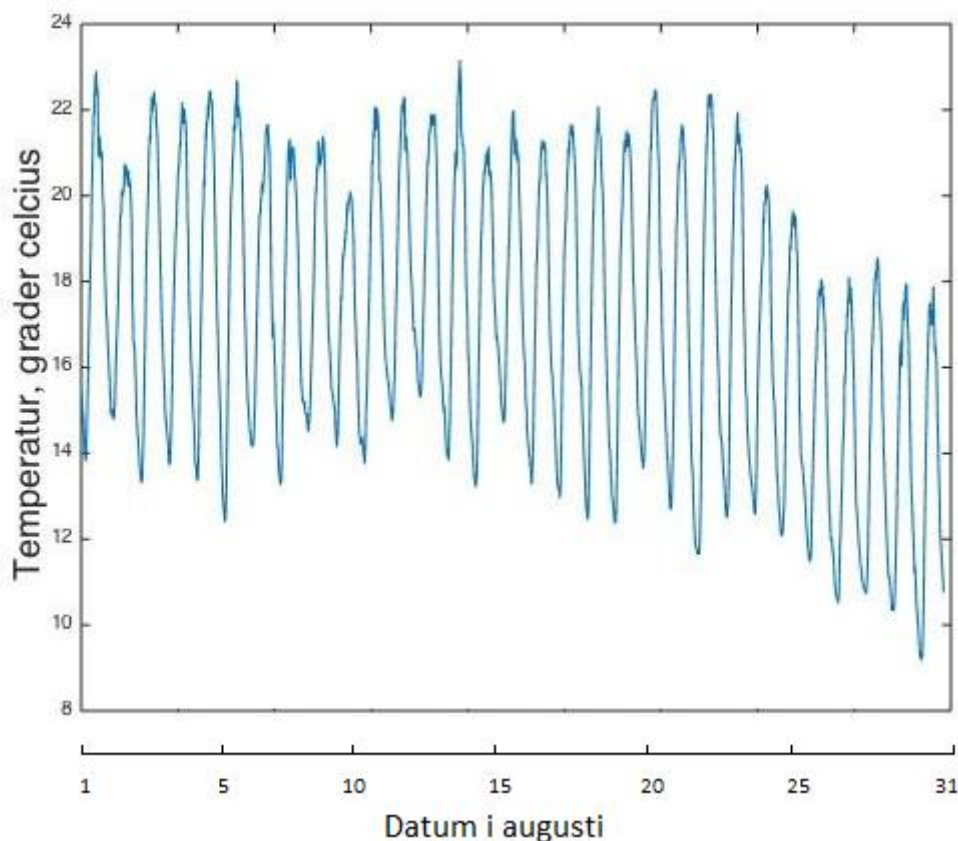
C3.3 Resultat av simulering

Nedan visas Figur 1 med temperaturen för de undersökta åren i medeltal. Temperaturen beräknades vara över 20 grader Celsius ca 6 % av året. Undersöks Figur 1 så ser man också att endast en liten del av temperaturdata är 20 grader eller över under ett år.



Figur 3. Medelvärde av temperaturen från åren 2001-2003, 2005, 2007, 2010 samt 2013. Varje mätpunkt motsvarar den genomsnittliga temperaturen under tiominutersintervall mellan 1 januari till 31 december.

Nedan visas Figur 2 med temperaturen i augusti för de undersökta åren i medeltal. Temperaturen beräknades vara över 20 grader Celsius ca 25 % av augusti. Undersöks Figur 2 så ser man att till en början är medeltemperaturen ca 18 grader, men sjunker sedan. Därför är ett värde på 25 % rimligt.



Figur 4. Medelvärde av temperaturen för augusti månad från åren 2001-2003, 2005, 2007, 2010 samt 2013. Varje mätpunkt motsvarar den genomsnittliga temperaturen under tiominutersintervall mellan 1 augusti och 31 augusti.

C3.4 Beräkningar

Energiförbrukningen hos kylpumparna beräknades utifrån antaganden och kända samband.

Märkeffekterna för pumparna var kända, 0,55, 0,37 och 0,25 kW

C3.4.1 Fall 1. Årlig energiproduktion

De större pumparna antogs gå på full effekt dygnet runt från maj till september, vilket är 3 672 timmar. Energin per år beräknades för de stora pumparna med ekvation 2 (Nilsson, 2015).

$$E_{tot} = W_{pump}T \quad \text{Ekvation 2}$$

Där E_{tot} är den totala energin i kWh, W_{pump} är pumpens märlreffekt och T antalet timmar. För att beräkna energin från den lilla pumpen användes resultatet från simuleringen. Då pumpen antogs gå på full effekt när den används multiplicerades märlreffekten med hur stor andel av året som temperaturen är 20 grader och över. Vilket resulterade i ett nytt värde på W_{pump} . Därefter användes ekvation 2. De tre E_{tot} summerades och detta gav ett slutgiltigt värde på hur mycket energi som pumparna under ett år förbrukar.

3.4.2 Fall 2. Momentant täcka effektbehov

De större pumparna antogs gå på full effekt dygnet runt hela augusti, vilket är 744 timmar. För att få ut energin för de stora pumparna används ekvation 2 även i detta fall.

För att beräkna energin från den lilla pumpen användes resultatet från simuleringen. Då pumpen antas gå på full effekt när den används multiplicerades märkeffekten med hur stor andel av månaden augusti som temperaturen är 20 grader och över, vilket resulterade i ett nytt värde på W_{pump} . Därefter användes ekvation 2. De tre E_{tot} summerades och detta ger ett slutgiltigt värde på hur mycket energi som pumparna under ett år förbrukar.

C4 Resultat

C4.1 Fall 1. Årlig energiproduktion

För polykristallina solceller krävdes en installerad topp effekt på 3 800 W för att producera ungefär vad kylpumparna förbrukar på ett år. Resultatet från beräkningarna för fall 1 visas i tabell 1.

Tabell 1. Den installerade effekten som krävs för att solcellerna skulle producera lika mycket som kylpumparna förbrukar under ett år. Solceller [Wp] anger den installerade effekten.

Årligt medel	Tot. energi [kWh]	Solceller [kWh]	Solceller [Wp]
Pump 1	2019,60		
Pump 2	1358,64		
Pump 3	138,41		
Summa	3516,65	3600	3800

C4.2 Fall 2. Täcka pumparnas effektbehov

Samma solceller krävde en installerad topp effekt på 7 000 W för att producera ungefär vad kylpumparna förbrukar under augusti månad. Resultatet från beräkningarna för fall 2 visas i tabell 2.

Tabell 2. Den installerade effekten som krävs för att solcellerna skulle producera lika mycket som kylpumparna förbrukar under augusti månad. Solceller [Wp] anger den installerade effekten.

Årligt medel	Tot. energi [kWh]	Solceller [kWh]	Solceller [Wp]
Pump 1	409,20		
Pump 2	275,28		
Pump 3	48,62		
Summa	733,10	747,00	7000

C5 Diskussion

C5.1 Uppställning av fall

I Fall 2 har flera antaganden gjorts. Bland annat antas kylbehovet till stor del sammanfalla med kontorstid, när solstrålningen är som störst. Detta antagande baserades på tidigare studier av kylning med hjälp av solel för kontorslokal.

C5.2 Data

För temperaturen fanns data för 14 år, men endast sju av dem användes till beräkningar av medeltemperaturen. Detta då de olika årens mätserier var olika långa. Det var möjligt att anpassa data så att alla 14 år hade använts, men det visade sig vara svårt och tidskrävande. Eftersom sju år ger ett relativt säkert värde så ansågs de sju åren räcka.

För att kunna uppskatta hur mycket pumparna används antogs det i detta fall att pumparna skulle gå på full effekt när utomhustemperaturen var 20 grader eller över. De antogs vidare att den lilla pumpen var helt avstängd vid de tillfällena som temperaturen var under 20 grader. I verkligheten finns det möjlighet att själv reglera inomhustemperaturen, vilket kan leda till att pumpen ändå används. Alla pumparna går inte heller alltid med full effekt som antagits här. Men det ger ändå en bra bild över hur mycket pumparna kan behöva användas.

Anledningen till att just 20 grader är en brytpunkt är att inomhustemperaturen på Staben inte får gå över 24 grader. Därför antogs 20 grader vara en rimlig temperatur att utgå ifrån då även solstrålningen kommer att bidra till en ökad temperatur inomhus.

Ytterligare en osäkerhet med att endast titta på utomhustemperaturen för att bestämma pumparnas behov är att huset i sig lagrar värme. Både från människorna som arbetar i byggnaden och från solen under dagtid. Denna värme avges till inomhusluften även om det är kallt ute.

C5.3 Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

För uträkning av energin från solcellsanläggningen användes beräkningsprogrammet PVGIS. Då PVGIS är en produkt från europeiska kommissionen ansågs det vara från en tillförlitlig källa. Men osäkerheter finns ändå i programmet. Data som används har interpolerats mellan olika punkter vilket leder till osäkerheter. Mätningarna i sig innehåller också osäkerheter. Åren för data som används i programmet är från 1998-2011, så de är nya och går att använda för att undersöka nyinstallation av solceller (Europeiska kommissionen, 2010). Beräkningarna som används för att utifrån installerad topp effekt undersöka hur mycket solcellernas prestanda sjunker är tagna från vetenskapliga artiklar och kan därför anses tillförlitliga (Europeiska kommissionen, 2015).

Ett problem som uppstår här i nordnorden är att vi har mycket diffus solstrålning, på grund av att ljuset bryts i atmosfären. Den diffusa solstrålningen är svår att förutsäga, särskilt vid molnighet, och beräknas genom statistiska metoder (Liu & Jordan, 1960). Därför är beräkningar från satellitbilder osäkra när det gäller den diffusa solstrålningen.

Programmet används för att göra grova uppskattningar, ekvationerna och antaganden som programmet bygger på är allmänt giltiga. Det går inte att anpassa till exakta förhållanden på en site, men ger ändå en bra bild över hur mycket energi som går att utvinna från solceller.

C5.4 Resultat

Siffrorna som redovisats i resultatet är att ses som ungefärliga värden, och kan användas för att jämföra dimensionerna på solcellsanläggningen med resultatet från projektet.

Fall 2 som undersöker huruvida effektbehovet kan täckas eller inte visar endast hur stor solcellsanläggningen behövde vara om energiförbrukningen skulle täckas. Det säger inte så mycket om hur väl produktionen sammanfaller med förbrukningen, men då det momentana behovet inte kan täckas om inte batterilagring används ansågs detta fall beskriva förutsättningarna för att i så hög grad som möjligt täcka kylpumparnas förbrukning.

C6 Slutsats

Valideringens syfte var att oberoende av simuleringen dimensionera en solcellsanläggning för att täcka behovet av elkraft för en befintlig kylanläggning på Staben, Uppsala Science Park. Dimensionerna på solcellsanläggningen uppgår till 3,8 kW installerad topeffekt om produktionen ska täcka vad kylpumparna förbrukar under ett år. Om produktionen av elkraft ska täcka vad kylpumparna förbrukar under augusti månad krävs en solcellsanläggning på 7 kW installerad topeffekt. Dessa värden ska användas för att validera att resultaten av simuleringen är rimliga.

Referenser

- Europeiska kommissionen (2010). *PVGIS radiation databases*.
http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/databasehelp_en.html [2015-08-31]
- Europeiska kommissionen (2015). *Performance of Grid-connected PV*.
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> [2015-05-01]
- Fagerman, P. (2015). *Besök på Staben*. (Personlig intervju) [2015-05-12]
- Liu, B. Y., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 1-19.
- Mathworks (2015). *Overview*.
<http://se.mathworks.com/products/matlab/?refresh=true> [2015-05-20]
- Nilsson, J. (2013). *Soldriven kylning i Sverige*. Karlstad: Karlstad universitet.
- Nilsson, S. (2015). *Energi och effekt*.
http://www.varmahus.se/energiskola/energi_effekt.php [2015-08-30]
- Stridh, B. (2015). *Hur påverkar lutning och väderstreck produktionen av solex II*.
<http://bengtsvillablogg.info/2015/01/22/hur-paverkar-lutning-och-vaderstreck-produktionen-av-solex-ii/> [2015-08-31]
- Vasakronan (2015). *Uppsala Science Park*.
<http://uppsalasciencepark.vasakronan.se/> [2015-08-31]
- Zimmermann, U. (2015a). *Solenergi - solceller*. Uppsala, Sverige: Uppsala Universitet.
- Zimmermann, U. (2015b). *Solcellers verkningsgrad*. (E. Nordlander, Intervjuare) [2015-04-21]

Bilaga D Analys av sambandet mellan utomhustemperatur och strålningsintensitet

Solcellers effekt beror på solinstrålning samt solcellers temperatur, som i sin tur beror på utomhustemperaturen och på solinstrålning. För att få en uppfattning om hur effekten från solcellerna beror på väderdata genomfördes en analys för temperatur ($^{\circ}C$) och intensitet (W/m^2). Dessa parametrar varierar över tid vilket innebär att solcellernas effekt påverkas. Analysen syftade till att finna samband i utomhustemperatur och strålningsintensitet. Väderdata har undersökts vid 95 procent sannolikhet. Osäkerhetsanalysen genomfördes med kod i MATLAB.

Temperatur och strålningsintensitet var uppmätt var tionde minut under sju år. Genomsnittlig data per dygn för dataserierna antogs vara normalfördelad, därför användes metoden multivariabel normalfördelning med två variabler. Genom att undersöka konfidensintervallfunktionen ”prediction interval function” så kunde en viss osäkerhet visas grafiskt innesluten av en geometrisk ellips. Denna ellips valdes efter en 95 procentig säkerhet. Detta innebär att till exempel ett solintensitetsintervall kan plockas fram med 95 procent säkerhet för en bestämd temperatur.

Resultatet i studien är en ellips som skapades i MATLAB. Ellipsen kan användas för att ge information om solcellernas medeldygnseffekt, det vill säga hur mycket pumpen kan förbruka dygnsvis av solcellernas effekt. Ellipsen ger också information om variationen för solinstrålning vid en viss temperatur och vice versa.

Korrelationen mellan temperatur och intensitet var positiv 0.42. Eftersom avvikande extrema punkter för medelvärdet inte fanns visar det att produktionen från solcellerna lär vara ganska jämn årsvis under perioden maj-september.

D1 Inledning

Kylpumpar i ett hus på Science Park i Uppsala skulle drivas med ett visst antal solceller. Solcellers effekt beror på solinstrålning samt solcellers temperatur, som i sin tur beror på utomhustemperaturen och på solinstrålning.

En del av kylpumparna i huset har antagits bero på utomhustemperaturen. Därmed skulle kylpumparna slås på vid utomhustemperaturen $20^{\circ}C$ vilket gör denna temperatur intressant att undersöka. Den huvudsakliga frågeställningen var att kvantifiera sambandet mellan utomhustemperatur och strålningsintensitet. Därmed är det möjligt att undersöka möjligheterna för om pumpens driftbehov överensstämmer med levererad effekt från solcellerna.

D2 Teori

D2.1 Data

När två parametrar analyseras kan det vara intressant att undersöka hur parametrarna följer varandra. Det vill säga, sambandet mellan två parametrar. Sambandet kan beskrivas av kovarians och korrelation. Kovarians avgör om sambandet är positivt eller negativt, det vill säga om trenderna för variablerna rör sig åt samma håll eller motsatt håll (så som reklamkostnad och försäljning respektive pris och försäljning). För att överbygga enhetsproblem används begreppet korrelation som ett mått på styrkan av ett samband som varierar mellan perfekt negativt samband (-1), inget samband (0) och perfekt positivt samband (1) (Jorgéus, 2009).

Analyserade data är temperatur ($^{\circ}C$) och strålningsintensitet (W/m^2) och dessa har undersökts eftersom de parametrarna varierar och påverkar solcellernas effekt eftersom verkningsgraden hos solcellerna beror av solinstrålning samt temperatur på solcellerna (Nilsson, 2013). Osäkerheten som undersöktes valdes till 5 procent eftersom det är standard inom statistiska sammanhang (Jorgéus, 2009).

D2.2 Multivariabel normalfördelning

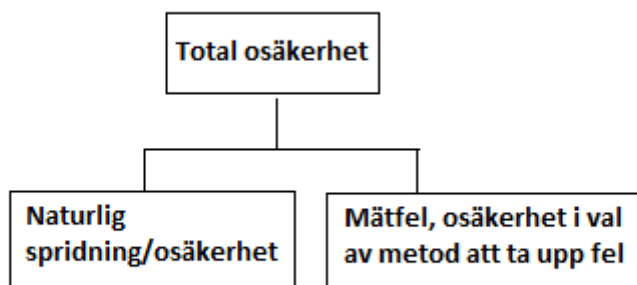
Eftersom datan består av två olika variabler användes en multivariabel fördelning. Både strålningsintensitet och temperatur är normalfördelad (Bondesson, 2015) vilket indikerar att även den multivariabla distributionen är normalfördelad. Multivariabel normaldistribution är en generalisering av den invarianta normalfördelningen för två (eller fler) variabler. Det innebär en distribution för vektorer med variabler som korrelerar, där varje vektor har endimensionell normalfördelning. I det enklaste fallet är det ingen korrelation mellan variabler och då är elementen i vektorerna oberoende endimensionellt normalfördelade. Den multivariabla normaldistributionen är parametriserad med en medelvärdesvektor och en kovariansmatris Σ . Dessa är analoga till medelvärdes- och variansparametrar av endimensionell normalfördelning, alltså med en variabel (Mathworks, Multivariate normal distribution).

En kovariansmatris, Σ , generaliserar variansen i flera dimensioner. Det innebär att variationen i ett tvådimensionellt rum inte kan karaktäriseras av ett nummer utan måste representeras av en 2x2 matris. Det räcker heller inte att variansen bara beskrivs i x- och y-riktning. Diagonalen hos kovariansmatrisen innehåller variansen för alla variabler medan de icke-diagonala elementen innehåller kovariansen mellan parametrarna. Varje kovariansmatris är symmetrisk, vilket innebär att kovariansen inte beror på vilken variabel man tittar på.

Medelvektorn består av medelvärdena för respektive parametervektor, det vill säga medelvärdet av vektorerna för temperaturen respektive intensiteten (Spruyt, 2014).

D2.3 Osäkerhet

Osäkerhet kan bero på den naturliga spridningen samt mätfel samt val av metod/modell för att hantera data. Detta illustreras i figur 1 nedan (Prästings m.fl., 2014). Den genomförda analysen tar enbart hänsyn till den naturliga spridningen.



Figur 1. Den totala osäkerheten representeras i två grenar där grenen naturlig spridning/osäkerhet är intressant för den genomförda osäkerhetsanalysen.

För att kunna anpassa en viss osäkerhet till datan användes “prediction interval function” (PDF). Denna funktion motsvarar en χ_k^2 -fördelning lika med funktionen F. χ_k^2 -fördelning säger att antalet frihetsgrader k motsvarar en ellips då k=2. En viss osäkerhet motsvarar ett värde på F och genom att beräkna F kan den ritas i en graf med mätpunkterna. Denna graf med mätpunkterna samt värden på F motsvarar en konturplot, det vill säga en ellips som innesluter mätpunkter. Ekvationen som motsvarar χ_k^2 -fördelningen och därmed funktionen F ges av ekvation 1 (Soitani, 1964):

$$(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu) \leq x_k^2(p) \quad \text{Ekvation 1}$$

D3 Metod

D3.1 Begränsningar

Dygnsmedelvärden kan påverkas med avseende på antal mätpunkter. Därför har var tionde minut använts istället för exempelvis varje timme. Mätvärden för sju år användes för att få så många mätpunkter som möjligt, vilket i större utsträckning gav ett säkrare resultat än mätpunkter från exempelvis ett år. Data per år togs från 1 maj till 30 september eftersom dessa månader ansågs relevanta med avseende på kylpumparnas förväntade drift. Datan är dock uppmätt under 17 år men bara sju år var användbara eftersom det saknades mätpunkter för de andra åren.

Utöver den naturliga variationen kan det även finnas modellosäkerhet i den statistiska modellen som antagits. Till exempel kanske den valda modellen (i detta fall multivariabel normalfördelning) inte är anpassad efter datan på det mest lämpliga sätt (Prästings, et al., 2014). Dock har den naturliga variationen uteslutande undersökt, det vill säga modellosäkerhet har ej granskats.

D3.2 Osäkerhetsanalysens genomförande

Först skapades ett rutnät för att beräkna funktionen Fs värde i punkterna i rutnätet. Rutnätets axlar skapas genom *linspace* och rutnätet tillverkades sedan med hjälp av kommandot *meshgrid*. Kovariansmatrisen, Σ , samt medelvärdesvektorn, μ , beräknades med hjälp av MATLAB. Beräkningarna utfördes med matlabkommandona “cov” samt “mean”. Därefter beräknades funktionen F i punkterna i rutnätet med hjälp av axlarna samt Σ och μ . Detta alstrade en Z-axel som användes för att skapa ellips-plotten, vilket kunde ske med kommandot *contour*. Även en surfaceplot kunde skapas med hjälp av Z-axeln, vilket beskrivs längre ner i stycke 3.2.

Punkterna som alstrades som x- och y-axel till rutnätet kördes i en *for*-loop för att kunna stoppas in i prediction interval function (PDF) och därmed finna värdena på F för olika höjder på z-axeln. Då punkterna kördes klart i *for*-looparna så hade många F-värden beräknats vilket tillsammans med x- och y-axlarna utgjorde förutsättningen för att kunna rita surface-grafen och olika konturplottar.

För att tydliggöra syftet med konturplotten kunde mätdata ritas in i konturplotten. Detta genomfördes genom att hämta in indatan till programmet via en mat-fil. Datan modifierades för att passa analysen behov. Den första modifieringen var att sortera in datamängderna årsvis för att kunna använda de sju utvalda åren. Sorteringen skedde genom *for*-loopar samt *if*-satser. Därefter delades varje år upp i antalet dygn baserat på antalet mätpunkter, vilket resulterade i 144 mätpunkter per dygn eftersom datan hade mätts upp var tionde minut. Detta genomfördes med kommandot *reshape*, vilket innebär att vektorn med mätdata för ett år blev en matriser som fick storleken “antalet mätpunkter per dygn x antalet dagar på ett år”, dvs 144 x 356. Medelvärdet för varje kolonn togs sedan fram genom kommandot *mean*. Detta utfördes för de sju intressanta åren, vilket resulterade i sju vektorer med 365 kolonner (dvs sju år med 356 dagar per år). Detta gav således dygnsmedel för sju år. Dessa sju

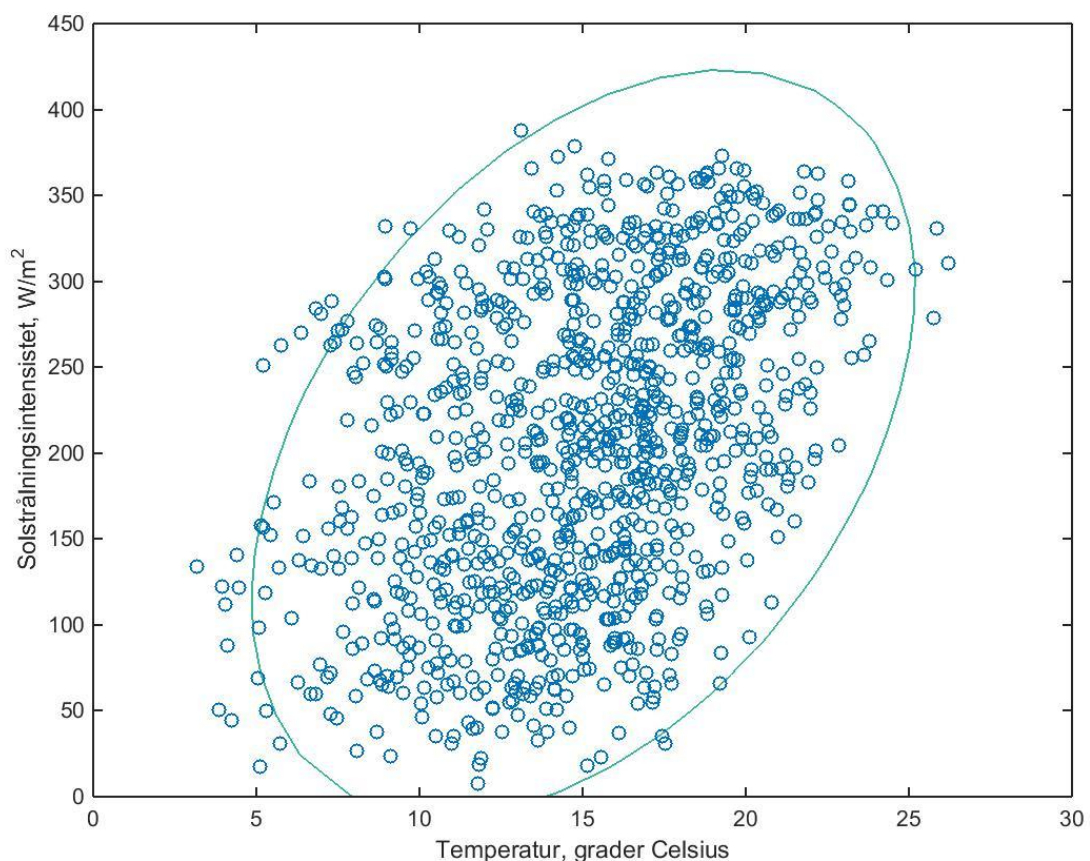
vektorer sattes ihop till en vektor för respektive variabel (temperatur respektive intensitet). De två resulterande vektorerna kunde därefter plottas mot varandra, med *scatter*-kommandot, vilket resulterade i en graf med mätvärdena där x-axeln motsvarade temperatur och intensitet befann sig på y-axeln. Denna graf infogades slutligen i samma graf som innehöll konturplotten för att åskådliggöra resultatet tydligare, det vill säga för att se hur konturen inneslöt 95 procent av punkterna.

Ytterligare en graf plottades, en så kallad surface-plot. Den visar samma funktion F som konturplotten gör, men med den tredje axeln z med olika F -värden markerad vilket ger ett tredimensionellt resultat. Detta är bara ett annat sätt att redovisa konturplotten. Surface-plottens skapades med hjälp av kommandot *surf*.

D4 Resultat

D4.1 Grafer

Figur 2 visar ellipsen för den 95 procentiga sannolikheten för sambandet temperatur och strålningsintensitet, vilket motsvarar funktionens F s värde 6. Det innebär att punkterna innanför ellipsen kommer inträffa med en 95 procent sannolikhet, det vill säga olika konfidensintervall kan tas fram för bestämd temperatur alternativt strålningsintensitet (Elfverson & Hellman, 2015).

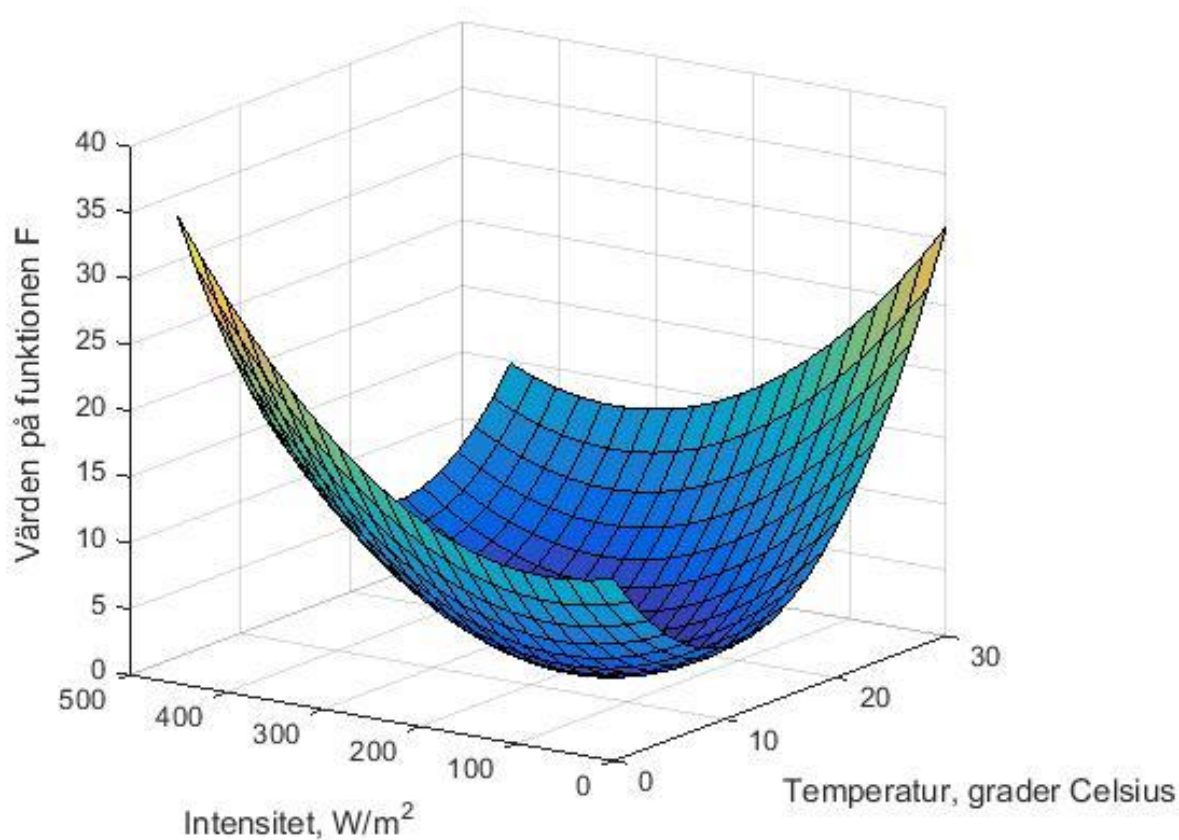


Figur 2. Konturplot för sambandet temperatur och strålningsintensitet. Punkterna inom konturen motsvarar de värden som inträffar med 95 % sannolikhet, vilket motsvarar funktionens F värde 6. Datan i mitten av ellipsen är tätare fördelad än i kanterna på ellipsen, vilket indikerar normalfördelning. Detta överensstämmer med antagandet.

Ett konfidensintervall som väljs vid temperaturen 20°C svarar mot den minsta solinstrålningen, cirka 90 W/m^2 , inom intervallet. Detta innebär att när medeltemperaturen är 20°C så kommer solcellerna försörja pumpen med en effekt som motsvaras av en viss strålningsintensitet, däribland den minsta intensiteten. Detta innebär att pumpen minsta effekt per dygn vid 20°C svarar mot strålningsintensiteten 90 W/m^2 med 95 % säkerhet.

På samma sätt visar figur 2 att den maximala medelsolinstrålningen under ett tidsintervall på 10 minuter kan vara runt 430 W/m^2 med en 95 procentig säkerhet vid 20°C .

I figur 3 ses resultatet av att ta med z-axeln i konturplotten. Detta är bara ett annat sätt att visa konturplottar där ett visst värde på F ej antagits. Ett tvärsnitt genom ett visst värde på F, det vill säga z-axeln, ger en konturplot (Elfverson & Hellman, 2015).



Figur 3. Funktionen F visas tre-dimensionellt. Det vill säga, figuren visar samma resultat som konturplotten i figur 2 men med fler värden på F. Förhållandet mellan temperatur, instrålning och F-värde visas i grafen.

D4.2 Kovariansmatris

Kovariansmatrisen för mätdatan ges av ekvation 2.

$$\text{cov}(T, I) = \begin{bmatrix} 17.3 & 156.6 \\ 156.6 & 7896.0 \end{bmatrix} \quad \text{Ekvation 2}$$

De icke-diagonala elementen i formel kovariansmatris visar att kovariansen är 156,6. För att åskådliggöra vilket typ av beroende kovariansen innebär beräknades korrelationen med ekvation 3.

$$\rho_{T,I} = \frac{\text{cov}(T,I)}{\sigma_T \sigma_I} \rightarrow \rho_{T,I} = \frac{156,6}{4,16 \cdot 88,86} = \frac{156,6}{369} = 0,42 \quad \text{Ekvation 3}$$

Där $\rho_{T,I}$ är korrelationen, $\text{cov}(T, I)$ är kovariansen samt σ_T och σ_I är standardavvikelsen. (Jorgéus, 2009) Detta ger korrelationen 0.42 enligt ovanstående uträkning. Korrelationen visar att det finns ett positivt samband på 0.42, vilket verkar rimligt eftersom temperatur följer av bland annat intensitet. Värdet är dock inte nära ett perfekt samband på 1.

D5 Diskussion

Den resulterande konturplottens ellips visar att det inte finns många punkter som avviker kraftigt från det 95 procentiga intervallet. Detta ger en känsla av att fördelningen är ganska jämn och att det inte kommer finnas några punkter som är väldigt konstiga, till exempel väldigt låg temperatur och maximal solinstrålning. Detta ger kunskap om hur solinstrålningen och temperaturen ungefär förhåller sig. Det gör att vi kan utesluta att oväntade scenarios händer, så som exemplet med hög temperatur och låg intensitet, med 95 procent säkerhet.

Korrelationsvärdet 0.42 visar att det finns ett positivt samband mellan variablerna temperatur och intensitet. Sambandet var inte perfekt (det vill säga 1), vilket inte är oväntat eftersom det finns dagar då intensiteten inte avgör temperaturen och vice versa. Exempelvis finns det varma dagar med lite solinstrålning. Det verkar även rimligt att korrelationen blev positiv och inte negativ eftersom parametrarna följer varandra.

Figur 2 samt korrelationen visar att temperatur och intensitet följer varandra. Detta innebär att då kylpumparna behövs, alltså med ökad inomhustemperatur, bör med stor sannolikhet vara i samband med att utomhustemperaturen ökar. Således ger det att pumparnas förbrukade effekt lär öka i samband med högre temperatur samt intensitet, det vill säga då solcellerna sannolikt producerar mer el. Detta är ett positivt resultat för att minska mängden köpt el till kylpumparna.

Surfaceplotten, enligt figur 3, visar att fördelningen för modellen förmodligen är normalfördelad vilket överensstämmer med antaganden som gjorts för analysen. Den visar att det är normalfördelat eftersom att differensen mellan ett punktvärde och medelvärdesvektorn blir större och större ju längre ifrån μ punktvärdet kommer (det vill säga längre ifrån mitten på grafen i origo). Med andra ord ses normalfördelningen i grafen från figur 3, eftersom den är kon-formad.

Modellfelets osäkerhet samt systematiska fel på mätdata (till exempel fel på temperaturmätare) har inte inkluderats i osäkerhetsanalysen enligt begränsningar i avsnitt D2.3. Med modellfelet anses här valet av modell, multivariabel normalfördelning, som fördelning för medeldatan. Att den försummas beror dels på att metoden valdes med avseende på relevans för datan, med andra ord är modellen utvald med avseende på den använda datan. Det beror även på att det är svårt att beräkna ett modellfel av denna typ. Därför valdes enbart det naturliga felet att undersökas i analysen, eftersom det är spridningen hos mätdatan som är resultatet i analysen.

Det kunde varit intressant att undersöka maximala värden istället för medelvärden. Detta hade gett en mer konkret bild om exakt vilka punkter som skulle kunna ske, exempelvis en maximal instrålning för en bestämd temperatur. Resultatet hade dock inte givit information om solcellernas produktion under tid eftersom mätdatan är uppmätt med 10e minuters intervall. En maximalvärdesundersökning hade dock kunnat vara intressant för att få information om extrema punkter.

En annan intressant aspekt ur ett osäkerhetsanalysperspektiv vore att analysera utdata, det vill säga solcellernas effekt. Dock hade detta krävt mätdata på solcellernas effekt vilket inte finns uppmätt eftersom solcellerna ännu inte är installerade.

D6 Slutsatser

Studien visade att korrelationen mellan temperatur och strålningsintensitet var 0.42. Detta ger i förlängningen att solcellernas effekt bör öka då pumparna behöver förbruka effekt mestadels av tiden.

Den positiva korrelationen visar att väderförhållandena betar sig ganska förutsägbart, vilket är bra för att kunna uppskatta hur mycket effekt solcellerna levererar i medeltal under månaderna 1 maj till 30 september per år. Eftersom det inte finns avvikande extrema punkter för väderdata ger det en ganska jämn produktion av solel under perioderna maj-september årsvis.

Referenser

- Bondesson, L. (2015). *National Encyklopedin*.
www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/normalfordelning [2015-05-21]
- Elfverson, D. & Hellman, F. (2015). *Analys av två datamängder och dess korrelation* (Personlig Intervju) [2015-05-15]
- Elfverson, D. & Hellman, F. (2015). *Att skapa konturplott* (Personlig Intervju) [2015-04-24]
- Elfverson, D., Hellman, F. & Larsson, E. (2015). *Hur man kan utföra en osäkerhetsanalys för intensitet och temperatur* (Personlig interjvu) [2015-04-10]
- Elverson, D. (2015). *Genomgång av kod* (Personlig interjvu) [2015-04-28]
- Jensen, L. (2010). *Analys av osäkerhet i beräkning av energianvändning i hus och utveckling av säkerhetsfaktorer*, Lund: Lunds tekniska högskola.
- Jorgéus, C. (2009). *Matematisk statistik med tillämpningar*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Mathworks (u.å.) *Multivariate normal distribution*.
<http://se.mathworks.com/help/stats/multivariate-normal-distribution.html> [2015-04-15]
- Nilsson, J. (2013). *Sol driven kylning i Sverige*, Karlstad: Karlstad universitet.
- Prästings, A., Larsson, S. & Müller, R. (2014). *Utvärdering av osäkerheter i geotekniska parametrar*, u.o.: u.n.
- Soitani, M. (1964). *Tolerance regions for a multivariate normal population*, u.o.: Annals of the Institute of Statistical Mathematics.
- Spruyt, V. (2014). *Computer vision for dummies*.
<http://www.visiondummy.com/2014/04/geometric-interpretation-covariance-matrix/> [2015-04-12]

Bilaga E Ekonomiska aspekter på solcellsanläggningar

Kostnaden för solcellsanläggningar har sjunkit de senaste åren. I dagsläget kostar anläggningar för privat bruk under 15 kW runt 20 SEK per installerad W inklusive en grundkostnad på 10 000 SEK. Som företag kan man söka bidrag hos länsstyrelsen för 30 procent av material- och installationskostnaderna. Det är dock många som söker bidraget och det är inte troligt att det avsatta medlet kommer att räcka för nyinkomna ansökningar.

Solcellsanläggningar producerar el när solen lyser och inte alltid när behovet finns, vilket innebär att det under vissa tidpunkter kan produceras överskottsel. Överskottselen kan då säljas på elnätet till en mindre summa än vad man betalar för att köpa in den.

Enligt bilaga B dimensionerades solcellsanläggningen på Uppsala Science Park till 3 kW, vilken skulle kosta runt 70 000 SEK. Återbetalningstiden beräknades till mellan 13 och 14 år beroende framtida elpriser. Om bidrag för solcellsanläggningen beviljas kortas återbetalningstiden ner med cirka 4 år.

E1 Inledning

För att beräkna återbetalningstiden på solcellsanläggningen har en sammanställning av de ekonomiska förutsättningarna gjorts. Jämförelser gjordes mellan olika scenarier gällande ekonomin kring solcellsanläggningen, samt jämförelser mellan olika storlekar på solcellsanläggningar för att uppskatta hur mycket återbetalningstiden varierar. Syftet är att ta reda på om det är ekonomiskt rimligt att installera en solcellsanläggning på Science Park.

E2 Teori

En sammanställning av hur de ekonomiska förutsättningarna ser ut för solcellsanläggningar presenteras i nedanstående punkter.

E2.1 Priser på solcellssystem

Prisutvecklingen på solcellssystem har sjunkit de senaste åren. År 2009 kostade kommersiella solcellssystem under 20 kW runt 100 kr per installerad W men har fram till 2013 sjunkit till en kostnad på 19 kr per W. För större kommersiella solcellssystem på mer än 20 kW har kostnaden sjunkit från runt 75 kr per W år 2007 till 18kr per W år 2013 (Rydell, 2015).

Ett solcellspaket för en privatperson inklusive installation och med en märkeffekt på under 15 kW kostar mellan 18 och 28 kr per W. Generellt sätt så blir kostnaden per installerad kW något lägre ju högre installerad märkeffekt anläggningen har. Det lägre priset på 18 kr per installerad W får man när man börjar närma sig anläggningar på över 8-10 kW. Ett solcellspaket på 5 kW kostar mellan 100 000 och 120 000 kr (Stridh, 2014).

Prissänkningen beror främst på att priset på solcellsmoduler har sjunkit på världsmarknaden samt att konkurrensen har ökat bland svenska företag. År 2010 fanns det 37 stycken företag som erbjöd solcellsmoduler på den svenska marknaden och 2013 hade antalet ökat till 110 företag (Rydell, 2015). Priset på solcellssystem uppskattas halveras fram till 2030 baserat på en prognos av IEA (International Energy Agency). IEA spår även att andelen el i världen producerad av solceller kommer att öka från 1 procent till 16 procent år 2050 (IEA, 2014).

E2.2 Bidrag till solcellssystem

Från och med första januari 2015 gäller en ny stödnivå för solcellsanläggningar. Företag kan ansöka om att få bidrag till installationen samt för materialkostnaden för själva anläggningen. Som företag kan man få högst 30 procent av kostnaden beviljad som stödbidrag. Högsta möjliga stöd per solcellssystem är 1,2 miljoner kronor samt maximalt 37 000 kronor plus moms per installerad kW elektrisk topp effekt. För att få stödet måste åtgärder ha påbörjats tidigast 1 juli 2009 samt installationen vara slutförd senast 31 december 2016 (Gustafsson, 2015).

Solcellsstödet söks hos länsstyrelserna som varje år blir tilldelade medel från staten. Storleken på medlen baseras 25 procent på invånarantal och 75 procent på antal sökta medel i länet. Uppsalas län blev tilldelade drygt 2,2 miljoner kronor år 2014. Stödet delas ut till solcellsanläggningar så länge de avsatta medlen räcker, vilket innebär att det inte finns några garantier på att man får stöd för sin anläggning (Gustafsson, 2015).

Mellan 2013 och 2016 har staten i avsikt att avsätta 280 miljoner kronor i stöd till solcellsanläggningar. Dock har många ansökningar kommit in och bara 40 procent av dessa har beviljats. På grund av de långa köerna samt en ovisshet gällande framtida tillskott från staten till solcellsmedel kommer nyinkomna ansökningar troligtvis inte att få ta del av de avsatta pengarna (Stridh, 2015).

Endast nätanslutna solcellssystem kan få bidrag, dvs. stöd ges ej till anläggningar med en batteribank som buffert (Gustafsson, 2015).

E2.3 Överskottsel

Solcellsanläggningar producerar el när solen lyser, därför kan man inte anpassa elproduktionen efter behovet. En väldimensionerad solcellsanläggning kan producera överskottsel ljusa dagar när elbehovet är lågt. Undantag finns om lasten har en konstant miniminivå som är högre än solcellsanläggningens maxproduktion.

E2.3.1 Batteribank

Med en batteribank kan man lagra den överskottsel som inte konsumeras för framtida användning när produktionen är låg. Batteribanker används främst till mindre solcellsanläggningar där det inte finns möjlighet eller är lönsamt att ansluta till elnätet, som exempelvis båtar och sommarstugor. Batteribanker till större system som är integrerade i elnätet förekommer i stort sett inte idag i Sverige då det inte är lönsamt (Andersson, 2015).

E2.3.2 Försäljning av överskottsel

I stället för att lagra överskottsel i en batteribank kan elen säljas på elnätet vid överproduktion. Man räknas som mikroproducent om man inte säljer mer än vad man köper, har en huvudsäkring på mindre än 63 ampere samt en solcellsanläggning på mindre än 43,5 kW. Många elbolag köper in el från mikroproducenter och de flesta betalar Nord Pools timspotpris plus eller minus några ören (Vattenfalls solcellsavdelning, 2015).

E2.3.3 Elcertifikat

Om man producerar egen förnyelsebar el kan man få ett elcertifikat för varje MWh man har exporterat ut på elnätet (E.ON, 2015). Man får ett elcertifikat först när man har exporterat en hel MWh. Dessa elcertifikat kan man sedan sälja på en öppen marknad där Svenska Kraftnät administrerar handeln. Under 2013 var medelpriset 25 öre/kWh och då elcertifikat säljs i volymer om 1 MWh fick man då i medel 250 kr för ett elcertifikat (SKM, 2014).

Endast energiproducenter som producerar förnyelsebar el kan få elcertifikat. Elleverantörer och elintensiva företag har sedan skyldighet att köpa in ett visst antal elcertifikat beroende på årets kvot samt mängden el de säljer. Kvoten för elcertifikat är förutbestämd för varje år fram till 2035. Exempelvis måste en leverantör som säljer 1000 MWh el köpa in 150 elcertifikat om kvoten det året ligger på 15 procent. Den extra kostnaden för elleverantörerna som elcertifikaten medför läggs på elpriset och betalas av konsumenterna (Ekonomifakta, 2015).

Som mikroproducent behöver man en elmätare för att registrera elen som exporteras ut på nätet. Detta blir dock ingen extra kostnad då nätägaren är skyldig att installera en elmätare om kunden vill sälja elcertifikat (Rydell, 2015).

E2.4 Skatt

Då el från solcellsanläggningar har framställts utan en generator undantages den från skatteplikt, enligt lagen 11 kap. 2 § 2 (1994:1776) om skatt på energi (LSE). Man behöver då inte betala energiskatt på el producerad från en solcellsanläggning. Även el producerad från anläggningar med en generatoreffekt på mindre än 100 kW och inte är en yrkesmässig elleverantör är undantagen från energiskatt (Skatteverket, 2015b).

E2.4.1 Skattereduktion

Vid överföring av överskottsel på elnätet kan en fysisk eller juridisk person få skattereduktion för den el som matas ut på nätet, dock får man inte mata ut mer än vad man totalt konsumerar under ett år. För att få skattereduktions krävs även att energikällan är förnyelsebar samt att man har en säkring på anslutningspunkten på högst 100 ampere. För varje kWh som matas ut på elnätet får man en skattereduktion på 60 öre. Taket för skattereduktion ligger på 30 000 kWh per år eller 18 000 kr per år (Rydell, 2015). Exempelvis kan en villa som producerar solel exportera 2000 kWh på elnätet och importera 18 000 kWh under ett år, och då importen är större än exporten kan man få en skattereduktion på 1 200 kr (Skatteverket, 2015b).

E2.4.2 Moms

Moms betalas av alla företag som är momspliktiga, men betalas inte för egenanvänd el. Däremot måste man betala moms på den egenproducerade el man skickar ut på elnätet för försäljning. Man betalar då moms på elcertifikaten, elöverföringsavgiften samt spotpriset (Rydell, 2015). Momsen för energi ligger på 25 procent av försäljningspriset (Skatteverket, 2015c).

E2.5 Sammanställning av intäkter vid elförsäljning

Den totala intäkten då man säljer överskottsel på nätet blir 89 öre per kWh och då inräknas spotpris, moms, skattereduktion och elcertifikat. En sammanställning kan ses i tabell 1.

Tabell 1. *Intäkter från försäljning av 1 kWh på elnätet, öre/kWh*

Del av försäljningspriset	Öre/kWh
Spotpris	36*
Moms	-25
Skattereduktion	60
Elcertifikat	18**
Summa:	89

*Genomsnittligt spotpris 2014

**Genomsnittligt pris för elcertifikat under 2014

E2.6 Lönsamhet

Solenergi är en gratis energikälla vilket innebär att produktionskostnaderna för solceller är noll, borträknat underhållskostnader och investeringskostnader. När man säljer solceller på nätet, eller konsumerar solceller för eget bruk och undviker att köpa in elkraft från elnätet, så sparar man pengar för varje producerad kWh solceller. Man sparar mer per producerad kWh om man konsumerar den för eget bruk än om man säljer solceller, då man får mindre betalt per kWh vid försäljning än vad man betalar för att köpa in el (Rydell, 2015). För att spara så mycket som möjligt per installerad kW toppoeffekt solceller bör solcellsanläggningen dimensioneras så att så stor del som möjligt av den producerade elen konsumeras lokalt av fastigheten, samt minimera mängden överskottsel ut på nätet, utan att anläggningen blir för liten.

E2.6.1 Framtida elpriser

Solcellsanläggningars lönsamhet hänger till stor del ihop med prisutvecklingen på elmarknaden. Ett högre elpris gynnar solcellsägare då den undvikta utgiften för el från nätet blir större, vilket i sin tur gynnar återbetalningstiden.

Elpriset består dels av en rörlig del samt en fast del, där den rörliga delen dels bestäms av spotpriset på den nordiska elmarknaden. Spotpriset varierar timvis och bestäms av utbud och efterfrågan (Rydell, 2015).

Det är många faktorer som kan påverka elmarknaden i framtiden, varav en är den ökande andelen förnyelsebar energi i elsystemet. Förnyelsebara elproducenter som vindkraftverk och solcellsanläggningar har ökat kraftigt och exponentiellt de senaste åren, speciellt i Tyskland, och förväntas öka även i framtiden. En större andel väderberoende energiproducenter kommer att leda till mer volatila men i medel lägre elpriser. Det beror på att energikällan, vinden och solen, är gratis samt att de inte producerar el efter behov. Under vindstilla vinternätter är efterfrågan på el stor men produktionen från solceller och vindkraft mycket liten, vilket leder till höga elpriser samt ett stort importbehov. Samtidigt kan en stor överproduktion av el under ljusa och blåsiga dagar leda till en övermättad elmarknad och mycket låga elpriser (Bodin, 2013).

Något som kan höja elpriset i framtiden är nedläggningar av flertalet baskraftanläggningar runt om i Europa som kol- och gaskraftanläggningar, då de är för gamla samt inte tillräckligt lönsamma med

dagens låga energipris. Tyskland planerar även att stänga ner fler av sina kärnkraftverk, totalt 8 GW fram tills 2022, vilket kommer att bidra till att pressa upp elpriset (Bodin, 2013).

Sedan 2005 har EU krav på att kraftsektorn måste köpa utsläppsrätter för sina CO²-utsläpp i ett försök att hejda den globala uppvärmningen. Det innebär en ökad kostnad för elproduktion av gas- och kolkraftverk vilket i sin tur höjer marknadspriset på el. Kostnaden för utsläppsrätter har varit låga på grund av ett överbud på marknaden, men förväntas att öka då EU väntas ta ett beslut om att minska antalet utsläppsrätter. Detta skulle medföra ett högre elpris (Bodin, 2013).

En prognos från Profu gällande fyra olika scenarier av den Nordiska elmarknadens framtida elpris spår en årlig höjning fram till 2030 på mellan 1,0 och 3,9 procent (Unger, 2014).

E3 Antaganden och begränsningar

Då ansökningarna om solcellsbidrag är många och det inte finns tillräckligt med avsatta medel från staten för att täcka alla ansökningar i dagsläget är det troligt att nyinkomna ansökningar inte kommer att beviljas. Det är därmed realistiskt att anta att solcellsanläggningen på Science Park inte kommer att få bidrag. En jämförelse har dock gjorts för att se skillnaden i återbetalningstid med eller utan solcellsbidrag.

För att täcka kylpumparnas behov dimensionerades anläggningen till 3 kW (se bilaga B). För att undersöka hur återbetalningstiden varierar med anläggningens storlek beräknades även scenarier med större anläggningar (3-10 kW).

Då endast en anläggning antogs byggas på Science Park uteslöts mängdrabatter och paketpriserna var i samma prisklass som för privata solcellsanläggningar. Paketpriset för en privat solcellsanläggning inklusive installation under 15 kW ligger på mellan 18 till 28 kr per W, men prisökningen är dock inte helt linjär (Stridh, 2014). Anläggningar med en lägre installerad effekt är dyrare per W än en anläggning med en högre installerad effekt. Ett antagande gjordes därmed att utöver en grundkostnad på 10 000 kr kostar solcellsanläggningar på lägre än 5 kW 20 kr per W. Anläggningar med en högre installerad effekt än 5 kW, och lägre än 15 kW, antas kosta 18 kr (Rydell, 2015).

Då batteribanker för lagring av el till större system inte är lönsamma idag antas att eventuell överskottsels säljs på elnätet.

Elpriset antogs öka med mellan 1,0 och 3,9 procent per år fram till 2030, vilket skulle ge en total höjning på 16 till 77 procent av dagens elpris. Genomsnittet för spotpriset på den Nordiska elmarknaden var 36 öre per kWh under 2014 och höjningen innebär att spotpriset skulle landa på mellan 42 och 63 öre per kWh år 2030. För att beräkna återbetalningstiden på solcellsanläggningar räknades ett medelvärde ut för ökningen och spotpriset antogs därmed vara konstant.

E4 Metod

Teorin togs fram baserat på en litteraturstudie av olika rapporter samt internetsidor. Baserat på det sammanställda resultatet gjordes en jämförelse av återbetalningstid mellan olika scenarier baserat på ekonomiska förutsättningar.

Bilaga E

De olika förutsättningarna som varierades var följande:

1. Storlek på solcellsanläggningen, installerad märkeffekt (kW)
2. Spotpriset, framtida prisutveckling (kr/kWh)
3. Med eller utan solcellsbidrag (30 procent av grundinvesteringen)

E4.1 Grundinvestering

Grundinvesteringen räknades ut genom ekvation 1 och 2.

Solcellssystem 0-5 kW:

$$20\,000 * E = G \quad \text{Ekvation 1}$$

Solcellssystem <5-15 kW:

$$17\,500 * E = G \quad \text{Ekvation 2}$$

E = installerad märkeffekt (kW)

G = grundinvestering (kr)

E4.2 Återbetalningstid

Uträkningen av återbetalningstiden baserades på grundinvesteringen samt inbetalningsöverskottet man får per år i och med installationen av solcellsanläggningen utna hänsyn till ränta.

Inbetalningsöverskottet baseras på undvikta utgifter per år i och med färre inköpta kWh samt inkomst per år från elförsäljning och räknas ut enligt ekvation 3.

$$In = S * F + (P - S) * I \quad \text{Ekvation 3}$$

In = Inbetalningsöverskott (kr/år)

P = producerad solel (kWh/år)

S = såld överskottsel (kWh/år)

F = försäljningspris av solel (kr/kWh): spotpris, skattereduktion, moms samt elcertifikat (se tabell 1)

I = inköpspris från elnätet (kr/kWh)

Återbetalningstiden räknas därefter ut genom ekvation 4.

$$\text{Å} = \frac{G}{In} \quad \text{Ekvation 4}$$

Å = återbetalningstid (år)

G = grundinvestering (kr)

In = Inbetalningsöverskott (kr/år)

E4.3 Spotpriset

En förenklad beräkning gjordes för att räkna ut det framtida spotpriset med en procentuell höjning per år. Spotpriset år 2030 beräknades med ekvation 5.

$$Sp = Nsp * (Hp + 1)^{15} \quad \text{Ekvation 5}$$

Sp = spotpriset år 2030 (öre/kWh)

Spn = nuvarande spotpris (öre/kWh)

Hp = procentuell ökning per år (decimalform)

För att räkna på den årliga procentuella höjningen togs ett medelvärde på mellanskillnaden från det nuvarande spotpriset samt spotpriset år 2030. Medelvärdet lades sedan till det nuvarande spotpriset vilket gav ett spotpris med ett konstant värde som användes för att beräkna återbetalningstiden, se ekvation 6.

$$Spm = Spn + \frac{Sp - Spn}{2} \quad \text{Ekvation 6}$$

Spm = ett medelvärde på spotpriset över 15 år (öre/kWh)

Spn = nuvarande spotpris (öre/kWh)

Sp = spotpriset år 2030 (öre/kWh)

E4.4 Elproduktion

Värden på antal producerade och sålda kWh hämtades från en modell av solcellsanläggningen (se bilaga B).

E5 Resultat

Följande priser togs fram på solcellsanläggningar med en installerad märkeffekt på 3, 5 och 10 kW. Priserna är inklusive moms och installation.

Tabell 2. *Kostnader för olika solcellsanläggningar baserat på märkeffekten, inklusive installation och moms.*

Märkeffekt (kW)	Grundinvestering (kr)
3	70 000*
5	110 000*
10	185 000**

*Beräknades med ekvation 1

**Beräknades med ekvation 2

Återbetalningstiden beräknades för två olika fall med 1 och 3,9 procents årlig höjning, samt med eller utan solcellsbidrag. Beräkningen gjordes med två konstanta värden på spotpriset och visas i tabell 3. Resultat baserade på fallet med 1 procents årlig höjning av spotpriset visas i tabell 4 och illustreras i figur 1, samt resultatet från beräkningar där spotpriset ökade årligen med 3,9 procent visas i tabell 5 och figur 2.

Bilaga E

Tabell 3. *Medelvärde av spotpris.*

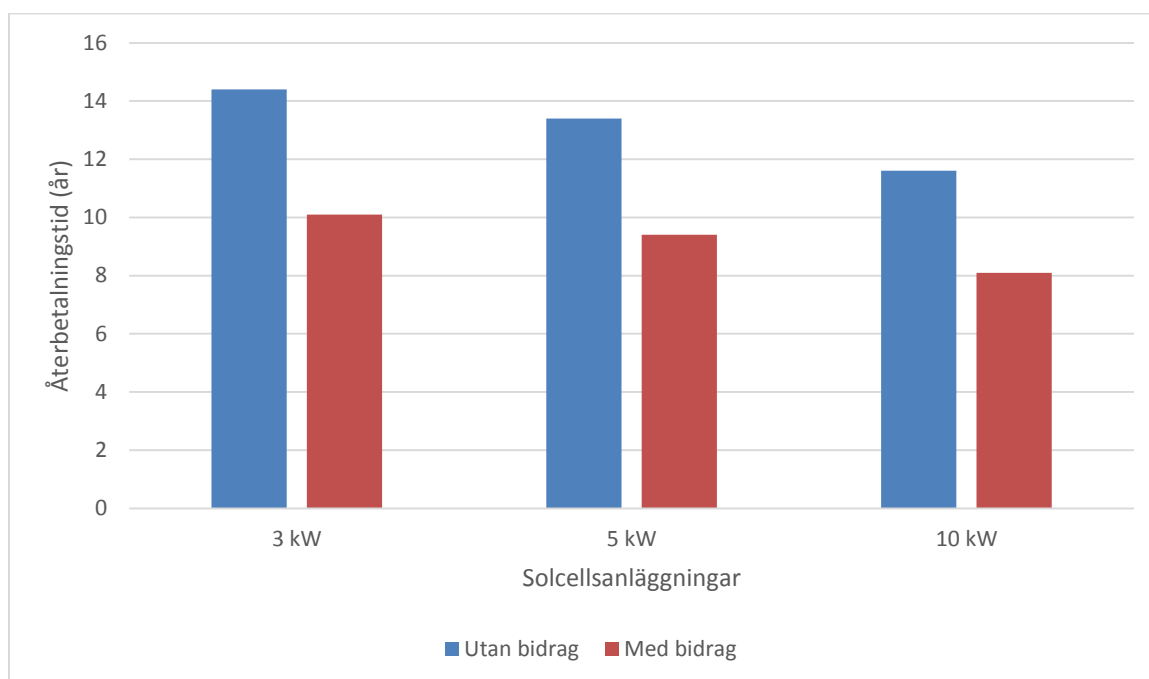
Årlig procentuell höjning (%)	Konstant medelvärde* (öre/kWh)
1	39
3,9	50

*beräknades med ekvation 6

Tabell 4. *Årlig ökning av spotpriset med 1 procent.*

Märkeffekt (kW)	Producerad el (kWh)	Såld el (kWh)	Återbetalningstid (år)	Återbetalningstid med bidrag* (år)
3	3487	0	14,4	10,1
5	5929	50	13,4	9,4
10	11683	1182	11,6	8,1

*Solcellsbidraget är 30 procent av grundinvesteringen

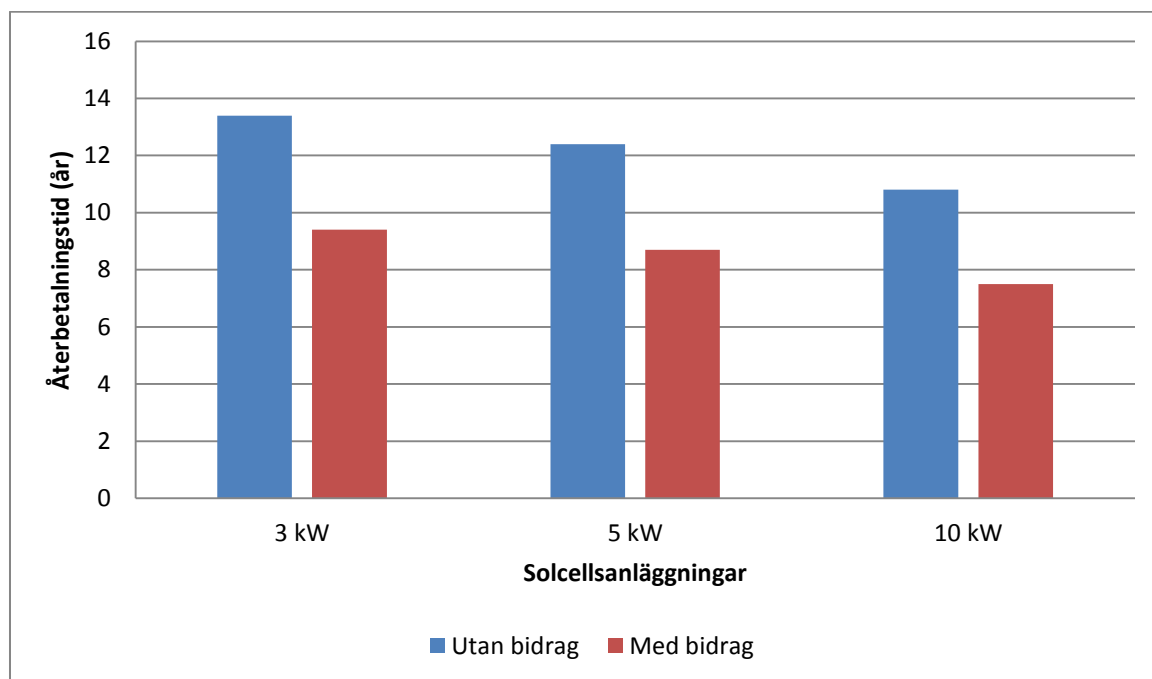


Figur 1. Återbetalningstiden på tre olika solcellsanläggningar med 3, 5 och 10 kW installerad effekt, där spotpriset ökar med 1 procent per år samt med eller utan solcellsbidrag.

Tabell 5. Årlig ökning av spotpriset med 3,9 procent.

Märkeffekt (kW)	Såld el (kWh)	Producerad el (kWh)	Återbetalningstid (år)	Återbetalningstid med bidrag* (år)
3	0	3487	13,4	9,4
5	50	5929	12,4	8,7
10	1182	11683	10,8	7,5

*Solcellsbidraget är 30 procent av grundinvesteringen



Figur 2. Återbetalningstiden på tre olika solcellsanläggningar med 3, 5 och 10 kW installerad effekt, där, spotpriset ökar med 3,9 procent per år med eller utan solcellsbidrag.

E6 Diskussion

Resultatet av beräkningen av återbetalningstiden visar på att återbetalningstiden blir kortare med en större anläggning samt beviljat solcellsbidrag. Den kortaste återbetalningstiden blev scenariot med en anläggning på 10 kW och en årlig höjning av spotpriset på 3,9 procent, samt beviljat solcellsbidrag. Scenariot med längst återbetalningstid var en anläggning på 3 kW och med en årlig höjning av spotpriset på 1,0 procent utan beviljat solcellsbidrag.

Trots att investeringskostnaden är högre för större anläggningar producerar de tillräckligt mycket el för att vara lönsammare än små anläggningar. Det hör troligtvis ihop med att investeringskostnaden blir högre per installerad märkeffekt (kW) ju mindre anläggningen är. I beräkningen av grundinvesteringen ingick en grundkostnad på 10 000 kr utöver kostnaden per installerad kW, vilken utgör en större del av den totala kostnaden ju lägre installerad effekt anläggningen har.

Den största enskilda påverkan på återbetalningstiden utgjordes av solcellsbidraget. Om bidraget blev beviljat kortades återbetalningstiden ner med runt 4 år för anläggningar på 3 och 5 kW samt med runt 3 år för anläggningar på 10 kW.

En årlig ökning av spotpriset på 3,9 procent gav som väntat en kortare återbetalningstid än en årlig ökning på 1,0 procent. Skillnaden rör sig om runt ett år på samtliga anläggningar.

E7 Slutsatser

För att täcka kylpumparnas behov i byggnaden på Science Park dimensionerades solcellsanläggningen till 3 kW (se bilaga B). En anläggning på 3 kW får en återbetalningstid på mellan 13 och 14 år beroende på framtida elprisutvecklingar. Med ett beviljat solcellsbidrag kommer återbetalningstiden kortas ner med runt 4 år.

En större anläggning med en installerad märkeffekt på 5 kW gav en kortare återbetalningstid på mellan 12 och 13 år, samt en anläggning på 10 kW gav en återbetalningstid på mellan 11 och 13 år, beroende på elprisutvecklingen.

Ur ett rent ekonomiskt perspektiv är de större solcellsanläggningarna ett bättre alternativ för Staben på Science Park då de har en något kortare återbetalningstid. I det här fallet är det dock endast intressant att täcka pumparnas behov med en anläggning på 3 kW, vilken visade sig ha en rimlig återbetalningstid på 13 till 14 år.

Referenser

Andersson, M. (2015). Om batteribankar. (Personlig Intervju) [2015-04-17]

Bodin, M. (2013). *Vilka stora förändringar påverkar elpriserna på sikt?* Modity energy trading.

E.ON (2015). *Ersättning och avgifter.*

<https://www.eon.se/privatkund/Produkter-och-priser/Elnat/Producera-din-egen-el/Ersattning--avgifter/> [2015-05-20]

Ekonomifakta (2015). *Elcertifikat.*

<http://www.ekonomifakta.se/sv/Fakta/Energi/Styrmedel/Elcertifikat/> [2015-05-21]

- Gustafsson, A. (2015). *Stöd till solceller*.
<https://www.energimyndigheten.se/Hushall/Aktuella-bidrag-och-stod-du-kan-soka/Stod-till-solceller/> [2015-05-21]
- IEA (2014). *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy - 2014 edition*. Hämtat från International Energy Agency:
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy---2014-edition.html> [2015-08-30]
- Rydell, A. (2015). *Solceller på Uppsalahems fastigheter*. Uppsala: Uppsala Univsersitet.
- Skatteverket (2015a). *25, 12 eller 6 procents moms?*
<http://www.skatteverket.se/foretagorganisationer/moms/vadarmoms/2512eller6procentmoms.4.7459477810df5bccdd480005156.html> [2015-05-20]
- Skatteverket (2015b). *Arkiv för Rättslig vägledning - skatteverkets ställningstaganden*.
<https://www.skatteverket.se/rattsinformation/arkivforrattsligvagledning/stallningstaganden/2011/stallningstaganden2011/13165113811111.5fc8c94513259a4ba1d800038476.html> [2015-05-20]
- Skatteverket (2015c). *Skattereduktion för mikroproduktion av förnyelsebar el*.
<http://www.skatteverket.se/privat/fastigheterbostad/mikroproduktionavfornybarel/skattereduktionformikroproduktionavfornybarel.4.12815e4f14a62bc048f4220.html> [2015-05-21]
- SKM (2014). *SKM Elcertificate price history (SEK)*.
<http://www.skm.se/priceinfo/history/2014/> [2015-08-30]
- Stridh, B. (2014). *Vad kostar solceller*.
<http://bengtsvillablogg.info/2014/11/06/vad-kostar-solceller-uppdatering-20141106/> [2015-08-30]
- Stridh, B. (2015). *50 miljoner till investeringsstöd för solceller under 2015*.
<http://bengtsvillablogg.info/2015/01/07/50-miljoner-till-investeringsstod-for-solceller-under-2015/> [2015-08-30]
- Unger, T. (2014). *Analys av långsiktig elprisutveckling för långsiktig planering och investering*.
<http://www.profu.se/pdf/L%C3%A5ngsiktig%20elprisutveckling20140204.pdf> [2015-08-30]
- Vattenfalls solcellsavdelning (2015). *Sälja överskottsel på nätet. (Personlig intervju)* [2015-04-24]

Bilaga F MATLAB-kod för simuleringsmodell

Koden är den som användes för att köra simuleringar i Simulink och skapa grafer av resultaten i Matlab. Programmet laddar först in relevanta vektorer i Matlab och kör sedan modellen, som använder vissa av dessa vektorer som indata. Simuleringsmodellen skapar i sin tur vektorer som sedan används i koden. Koden skapar sedan några grafer av relevant information. Den första figuren ger en graf där Stabens elförbrukning plottas tillsammans med solcellernas elproduktion. Den andra figuren föreställer pumparnas elförbrukning och solcellernas elproduktion ackumulerade över ett år. Den sista grafen visar samma sak, dock inte ackumulerat utan genomsnittsvärden varje dag under året.

```
close all           %Rensar workspace och plotfönster
clear all
clc

load('KandGrafVektorer.mat') %Läser in nödvändiga vektorer med indata
load('KandAllaVektorer.mat') %Läser in nödvändiga vektorer med indata
sim('Simuleringsmodellen') %Kör simuleringsmodellen i Simulink
AnlaggningStorlek = mean(AnlaggningStorlekVektor.Data);
%Skapar en konstant av anläggningens yta
ID1Sol = ID1Sol.Data; %Skapar en vektor av indata för solinstrålning
ID2Temp = ID2Temp.Data; %Skapar en vektor av indata för utetemperatur
ID3Elforb = ID3Elforb.Data; %Skapar en vektor av indata för Stabens
                        %elförbrukning
ProduceradSolEl = SolElPerKvadrat*AnlaggningStorlek; %Beräknar producerad el
figure(1) %Plottar Stabens elförbrukning mot producerad solel
plot(ID3Elforb)
hold on
plot(ProduceradSolEl)
xlabel('Timme på året')
ylabel('kW')
legend('Stabens elförbrukning','Solelproduktion')
figure(2) %Plottar pumparnas elförbrukning mot producerad solel
plot(SolElAck)
hold on
plot(PumpForbAck,'--')
xlabel('Timme på året')
ylabel('kWh')
legend('Solcellernas produktion','Pumparnas förbrukning')
for i = 1:365
ProduceradSolElDag = ProduceradSolEl(((i-1)*24+1):i*24);
%Skapar en vektor med värden för producerad el varje timme under en dag
SummaSolElDag(i) = sum(ProduceradSolElDag);
SnittSolElDag(i) = SummaSolElDag(i)/24;
%Summerar alla värden och räknar ut genomsnittsproduktionen varje dag
end
for e = 1:365
PumpElforbDag = PumpForb(((e-1)*24+1):e*24);
SummaPumpElforbDag(e) = sum(PumpElforbDag);
SnittElforbDag(e) = SummaPumpElforbDag(e)/24;
%Motsvarande för elförbrukningen
end
figure(8) %Plottar genomsnitt av elproduktionen varje dag
plot(SnittSolElDag) %mot genomsnitt av elförbrukningen varje dag
```

Bilaga F

```
hold on %under ett år
plot(SnittElforbDag)
xlabel('Dag på året')
ylabel('kW')
legend('Solcellernas produktion','Pumparnas förbrukning')
```

MATLAB-kod för uppskattning av variation hos variabler och indata

Följande är en funktion för att köra en viss version av Simulink-modellen, och spara särskilda utparametrar i en vektor.

```
runOlle6.m
function objV=runOlle6(Kinternal)
global K1 solddelavprod konsdelavhus indikator solel amountsold amountconsumed
objV=zeros(6,length(Kinternal));
for i=1:length(Kinternal) %
    K1=Kinternal(i); %
    sim('KandSystemBatteriV2TestOlle6'); % runs the simulink model
objV((1:6),i)=[solddelavprod(end),konsdelavhus(end),indikator(end),solel(end),amountsold(end),amo
untconsumed(end)]];
end
```

Följande skript kör funktionen runOlle6 och plottar utvalda variabler och deras derivator:

Koerbakoer6.m

```
global K1 solddelavprod konsdelavhus indikator solel amountsold amountconsumed
```

```
a = ceil(input('Ange minsta storlek för anläggningen [m^2]: '));
b = floor(input('Ange största storlek för anläggningen [m^2]: '));
intervall=a:b;
A = runOlle6(intervall);
h = 1; % stepsize
A4 = A(4,:);
A5 = A(5,:);
A6 = A(6,:);
A456=[A4;A5;A6];
B4 = diff(A(4,:))/h;
B5 = diff(A(5,:))/h;
B6 = diff(A(6,:))/h;
B=[B4;B5;B6];
```

```
plot(intervall,A456)
title('Årsproduktion, försäljning och konsumtion av solel som funktion av anläggningens storlek')
xlabel('Anläggningens storlek [m^2]')
ylabel('EI [kWh]')
legend('Producerad solel','Såld solel','Konsumerad solel')
```

Följande skript modifierar indatan och kör simuleringsmodellen upprepade gånger, en gång med datan på solinstrålning och utomhustemperatur för varje år.

createysadata4.m

```
load('KandHusetsElförbrukningHelÅr2014.mat')
load('solochtemp.mat') % Laddar sol- och temperaturdata för åren 1998-
% 2014, given på 10-minutersintervall, i variablerna Sol och Temp
Solyears = zeros(1,17); % Förallokerar en array för datan för alla år
Tempyears = zeros(1,17); % "-"
% For-loopen räknar alla år 1998-2014, tar ut varje års data och lägger i
```

```

% en kolonn i matrisen Solyears respektive Tempyears
for i=1:17
    year = 1997+i;
    Solyear = Sol(Sol(:,1)==year,6);
    Solyears(1:length(Solyear),i)=Solyear;
    Tempyear = Temp(Temp(:,1)==year,6);
    Tempyears(1:length(Tempyear),i)=Tempyear;
end
Solyearsh = zeros(8760,17); % Förallokerar en array för timgenomsnitt av
    % datan, h står för timmar
Tempyearsh = zeros(8760,17); % "-
% Här tas genomsnitt av varje följd av 6 st datapunkter för både sol- och
% temp-data. Då varje punkt är data för 10-mins-intervall blir de nya
% punkterna genomsnitt för varje timme
for i=1:17
    for j=1:8760
        Solyearsh(j,i) = mean(Solyears(6*j-5:6*j,i));
        Tempyearsh(j,i) = mean(Tempyears(6*j-5:6*j,i));
    end
end
Solyearh = zeros(8760,2); % Förallokerar en indata-matris med soldata till
    % modellen
Solyearh(:,1) = 1:8760; % Sätter timestamp i vänstra kolonnen
Tempyearh = Solyearh; % Skapar en likadan för temp-datan
resultat_solel=zeros(1,17); % Förallokerar en resultat-matris
resultat_pumpkons=zeros(1,17); % "-
resultat_salj=zeros(1,17); % "-
resultat_konsdelavhus=zeros(1,17); % "-
global soldata tempdata % Indatan till simuleringen behöver vara global
    % för att kunna varieras
% Här varieras indatan för varje år och skickas in i modellen.
for i=1:17;
    Solyearh(:,2)=Solyearsh(:,i);
    Tempyearh(:,2)=Tempyearsh(:,i);
    soldata = Solyearh;
    tempdata = Tempyearh;
    sim('modellen.slx')
    resultat_solel(1:length(solproduktion),i)=solproduktion;
    resultat_pumpkons(1:length(pumpkonsumtion),i)=pumpkonsumtion;
    resultat_salj(i)=solddelavprod(end);
    resultat_konsdelavhus(i)=konsdelavhus(end);
end
snitt_solel=zeros(8760,1);
snitt_pumpkons=snitt_solel;
snitt_salj=mean(resultat_salj);
snitt_konsdelavhus=mean(resultat_konsdelavhus);
for i=1:8760;
    snitt_solel(i)=mean(resultat_solel(i,:));
    snitt_pumpkons(i)=mean(resultat_pumpkons(i,:));
end
snitt_ack_prod=sum(snitt_solel);
snitt_avkastning=snitt_ack_prod/70;
snitt_ack_pumpkons=sum(snitt_pumpkons);
timmar = 1:8760;
figure(1)

```

Bilaga F

```
plot(timmar,snitt_solel)
figure(2)
plot(timmar,snitt_pumpkons)
% figure(3)
% plot(timmar,solproduktion)
```

Bilaga G MATLAB-kod för validering

För att beräkna utomhustemperaturen för åren mellan 2000-2013 användes beräkningsprogrammet MATLAB. Scriptet för denna beräkning samt resultatet redogörs i denna rapport.

Utomhustemperaturen visade sig vara 17 grader eller över 14,07 % av året, och 49,75 % av augusti månad.

```
load('wheatherdata.mat');
global Temp
%% Temperaturdata
% Detta är ett program som beräknar hur stor del av tiden som utomhustemperaturen är 17 grader och
över. Detta då kylpumparna kan antas gå igång på full effekt vid dessa tidpunkter. Temperaturdata är
angivna med 10-minutersintervall från åren 2001-03, 2005, 2007, 2010 samt 2013.
%% årlig temperaturdata
% Vektorer skapas för åren där temperaturen ska undersökas. I dessa vektorer kommer
temperaturdata att lagras.
t_Y01=[];
t_Y02=[];
t_Y03=[];
t_Y05=[];
t_Y07=[];
t_Y10=[];
t_Y13=[];
% En loop som delar upp temperaturdata från olika år så att dessa kan särskiljas från varandra.
for n=1:length(Temp)
if(Temp(n,1))==2001;
t_Y01=[t_Y01 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2002;
t_Y02=[t_Y02 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2003;
t_Y03=[t_Y03 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2005;
t_Y05=[t_Y05 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2007;
t_Y07=[t_Y07 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2010;
t_Y10=[t_Y10 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2013;
t_Y13=[t_Y13 Temp(n,6)];
end
end
%% Beräkning av temperature
% Medelvärdet för alla tidpunkter beräknas genom att summera de sju åren. Därefter visas
temperaturen i en graf. Ett medelvärde beräknas för att göra resultatet mer tillförlitligt och
allmängiltigt.
Sum_t=((t_Y01+t_Y02+t_Y03+t_Y05+t_Y07+t_Y10+t_Y13)./7).';
plot(Sum_t)
```

Bilaga G

```
title('Temperatur, Årligt medel');
xlabel('M%tpunkter, var 10:e min');
ylabel('Temperatur, grader celcius');
% En loop görs för att undersöka hur stor del av året som temperaturen är
% över respektive under 17 grader. I variabeln Pump nedan ges en
% procentsats för detta. Eftersom kylpumpen kan antas gå igång när
% utomhustemperaturen är över 17 grader kan denna siffra ses som en
% bra uppskattning över pumpens användning.
Under17=0;
over17=0;
for i=1:length(Sum_t)
if Sum_t(i)<17;
Under17=Under17+1;
else Sum_t(i)>=17;
over17=over17+1;
end
end
% En beräkning görs för att se hur stor andel av tiden som pumpen är igång, om den används då
% temperaturen är över 17 grader.
Pump=100*(over17/(over17+Under17))
%% Temperaturdata för augusti
% Vektorer skapas för augusti de åren där temperaturen ska undersökas.
% I dessa vektorer kommer temeperaturdatan att lagras. Just Augusti undersöks då det är en månad då
% temperaturen i landet är varm, medan solinstrålningen hela tiden blir mindre. Eftersom kylbehovet
% fortfarande kommer att vara stort i kombination med lägre solinstrålning är augusti en intressant
% månad att undersöka närmare.
t_aug=[];
t_aug01=[];
t_aug02=[];
t_aug03=[];
t_aug05=[];
t_aug07=[];
t_aug10=[];
t_aug13=[];

% En loop som delar upp temperaturdatan frÅn olika år så att dessa kan särskiljas från varandra.
for j=1:length(Temp);
if(Temp(j,1))==2001 && (Temp(j,2))==8;
t_aug01=[t_aug01 Temp(j,6)];
end
if(Temp(j,1))==2002 && (Temp(j,2))==8;
t_aug02=[t_aug02 Temp(j,6)];
end
if(Temp(j,1))==2003 && (Temp(j,2))==8;
t_aug03=[t_aug03 Temp(j,6)];
end
if(Temp(j,1))==2005 && (Temp(j,2))==8;
t_aug05=[t_aug05 Temp(j,6)];
end
if(Temp(j,1))==2007 && (Temp(j,2))==8;
t_aug07=[t_aug07 Temp(j,6)];
end
if(Temp(j,1))==2010 && (Temp(j,2))==8;
t_aug10=[t_aug10 Temp(j,6)];
end
end
```



```

if(Temp(j,1))==2013 && (Temp(j,2))==8;
t_aug13=[t_aug13 Temp(j,6)];
end
end
% Medelvärde för alla tidpunkter beräknas genom att summera de sju åren.
% Därefter visas temperaturen i en graf. Ett medelvärde beräknas för att göra resultatet mer
tillförlitligt och allmängiltigt.
Sum_taug=((t_aug01+t_aug02+t_aug03+t_aug05+t_aug07+t_aug10+t_aug13)./7).';
figure(2);
plot(Sum_taug)
title('Temperatur, medel augusti');
xlabel('M%tpunkter, var 10:e min');
ylabel('Temperatur, grader celcius');
% En loop görs för att undersöka hur stor del av augusti som temperaturen är
% över respektive under 17 grader. I variabeln PumpAug nedan ges en
% procentsats för detta. Eftersom kylpumpen kan antas gå igång när
% utomhustemperaturen är över 17 grader kan denna siffra ses som en
% bra uppskattning över pumpens användning.
Under17Aug=0;
over17Aug=0;
for k=1:length(Sum_taug)
if Sum_taug(k)<17;
Under17Aug=Under17Aug+1;
else Sum_taug(k)>=17;
over17Aug=over17Aug+1;
end
end
% En beräkning görs för att se hur stor andel av tiden som pumpen är igång om den används då
temperaturen är över 17 grader.
PumpAug=100*(over17Aug/(over17Aug+Under17Aug))

```


Bilaga H MATLAB-kod för analysen av solinstrålningen och utomhustemperaturen

Följande kod användes för att vid analysen av solinstrålningen och utomhustemperaturen. Den skapar konturplotten på solinstrålningen och utomhustemperaturen samt en kovariansmatris för dessa två parametrar.

```
function contourplot()
%% SKAPA RUTNÄT
% Välj över vilka värden på T och I som konturplotten ska vara
% T=(0,30), I=(0,450) valdes med avseende på medeldata per dag
Taxis = linspace(0,30, 20); % Temperaturaxel: 0-30
Iaxis = linspace(0,450, 20); % Intensitetaxel: 0-450
% Detta skapar rutnätet. T och I blir matriser, se
% plotten nedan
[T, I] = meshgrid(Taxis, Iaxis);
plot(T, I, 'b. ');
title('Punkterna som F beräknas i')
xlabel('Temperaturen, grader Celsius')
ylabel('Intensitet, W/m^2')
%% BERÄKNA FUNKTIONEN F I PUNKTERNA I RUTNÄTET
% Från programmet Data_7Y.m ges mu och Sigma
% Dessa värden är beräknade från data
mu = [15.0223, 205.8032];
Sigma = 1.0e+03*[0.0173, 0.1566; 0.1566, 7.8960];
% Beräkna funktionen Fs värde i punkterna
Z = F(T, I, mu, Sigma)
%% RITA FIGURER
% Konturplot där Matlab väljer värden på F
figure
contour(T, I, Z);
title('Konturplot. Matlab väljer värden på konturerna')
xlabel('Temperaturen, grader Celsius')
ylabel('Intensitet, W/m^2')
% Konturplot för 95 % säkerhet
% Dvs för F=5,9915
figure
% Sista argumentet säger att konturerna ska gå från 5.9915 till
% 5.9915. Det blir bara en kontur för F=5.9915
contour(T, I, Z, [5.9915, 5.9915]);
title('')
xlabel('Temperatur, grader Celsius')
ylabel('Solstrålningsintensitet, W/m^2')
% F valdes till F=5.9915. Detta värde motsvarar säkerheten 95%.
% Går att kontrollera genom att räkna F=chi2inv(0.95,2)=5.9915
% där 2 är antalet frihetsgrader som motsvarar 95 % ???
% Det kontrollerades framförallt genom att kolla plotten och
% räkna antalet punkter utanför ellipsen (7) och dividera med
% totala antalet punkter (153) --> 0.0458 vilket motsvarar 5 %
hold on
% Följande ritar in mätpunkterna i konturplotten
% Sol.mat innehåller mätvärdena
load('Sol.mat');
```

Bilaga H

```
global Temp
global Sol
% Här ska data för intensiteten in i vektorer
% för åren 1998-2014
s_Y=[];
s_Y98=[];
s_Y99=[];
s_Y00=[];
s_Y01=[];
s_Y02=[];
s_Y03=[];
s_Y04=[];
s_Y05=[];
s_Y06=[];
s_Y07=[];
s_Y08=[];
s_Y09=[];
s_Y10=[];
s_Y11=[];
s_Y12=[];
s_Y13=[];
s_Y14=[];
% For-loop med if-satser sorterar data för intensitet
% i åren 1998-2014
for n=1:length(Sol);
    if(Sol(n,1))==1998;
        s_Y98=[s_Y98 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==1999;
        s_Y99=[s_Y99 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2000;
        s_Y00=[s_Y00 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2001;
        s_Y01=[s_Y01 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2002;
        s_Y02=[s_Y02 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2003;
        s_Y03=[s_Y03 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2004;
        s_Y04=[s_Y04 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2005;
        s_Y05=[s_Y05 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2006;
        s_Y06=[s_Y06 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2007;
        s_Y07=[s_Y07 Sol(n,6)];
    end
end
```

```

    if(Sol(n,1))==2008;
        s_Y08=[s_Y08 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2009;
        s_Y09=[s_Y09 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2010;
        s_Y10=[s_Y10 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2011;
        s_Y11=[s_Y11 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2012;
        s_Y12=[s_Y12 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2013;
        s_Y13=[s_Y13 Sol(n,6)];
    end
    if(Sol(n,1))==2014;
        s_Y14=[s_Y14 Sol(n,6)];
    end
end
% Reshape ordnar intensitet i 144 punkter per kolonn
% per år för utvalda år (01,02,03,05,07,10,13)
% Sedan beräknas medelvärdet (mean) per dygn för ovanstående år
sr_Y01=reshape(s_Y01,144,365);
sm_Y01=mean(sr_Y01,1);
sr_Y02=reshape(s_Y02,144,365);
sm_Y02=mean(sr_Y02,1);
sr_Y03=reshape(s_Y03,144,365);
sm_Y03=mean(sr_Y03,1);
sr_Y05=reshape(s_Y05,144,365);
sm_Y05=mean(sr_Y05,1);
sr_Y07=reshape(s_Y07,144,365);
sm_Y07=mean(sr_Y07,1);
sr_Y10=reshape(s_Y10,144,365);
sm_Y10=mean(sr_Y10,1);
sr_Y13=reshape(s_Y13,144,365);
sm_Y13=mean(sr_Y13,1);
%% Skapar relevanta soldagar (ms betecknar maj-september)
Soldagar_ms=(121:273);
% Hämtar medelvärdet för intensitet för soldagarna per år
sm_ms01=sm_Y01(Soldagar_ms);
sm_ms02=sm_Y02(Soldagar_ms);
sm_ms03=sm_Y03(Soldagar_ms);
sm_ms05=sm_Y05(Soldagar_ms);
sm_ms07=sm_Y07(Soldagar_ms);
sm_ms10=sm_Y10(Soldagar_ms);
sm_ms13=sm_Y13(Soldagar_ms);
% Radvektor skapas för soldagars intensitet för de utvalda åren
Soldagar_mstot=[sm_ms01,sm_ms02,sm_ms03,sm_ms05,sm_ms07,sm_ms10,sm_ms13];
% Orimliga värden tas bort ur radvektorn
Orimlig=Soldagar_mstot>500;
% Uppdaterar soldagar, utan orimliga värden
Soldagar2_mstot = Soldagar_mstot( [1:313,316:end] );

```

Bilaga H

```
%% FORTSÄTTNING RITA FIGURER
% Här ska data för temperatur in i vektorer
% för åren 1998-2014
t_Y=[];
t_Y98=[];
t_Y99=[];
t_Y00=[];
t_Y01=[];
t_Y02=[];
t_Y03=[];
t_Y04=[];
t_Y05=[];
t_Y06=[];
t_Y07=[];
t_Y08=[];
t_Y09=[];
t_Y10=[];
t_Y11=[];
t_Y12=[];
t_Y13=[];
t_Y14=[];
% For-loop med if-satser sorterar data för temperatur
% i åren 1998-2014
for n=1:length(Temp);
    if(Temp(n,1))==1998;
        t_Y98=[t_Y98 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==1999;
        t_Y99=[t_Y99 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2000;
        t_Y00=[t_Y00 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2001;
        t_Y01=[t_Y01 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2002;
        t_Y02=[t_Y02 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2003;
        t_Y03=[t_Y03 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2004;
        t_Y04=[t_Y04 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2005;
        t_Y05=[t_Y05 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2006;
        t_Y06=[t_Y06 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2007;
        t_Y07=[t_Y07 Temp(n,6)];
    end
    if(Temp(n,1))==2008;
```



```

    t_Y08=[t_Y08 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2009;
t_Y09=[t_Y09 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2010;
t_Y10=[t_Y10 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2011;
t_Y11=[t_Y11 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2012;
t_Y12=[t_Y12 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2013;
t_Y13=[t_Y13 Temp(n,6)];
end
if(Temp(n,1))==2014;
t_Y14=[t_Y14 Temp(n,6)];
end
end
% Reshape ordnar intensitet i 144 punkter per kolonn
% per år för utvalda år (01,02,03,05,07,10,13)
% Sedan beräknas medelvärdet (mean) per dygn för ovanstående år
tr_Y01=reshape(t_Y01,144,365);
tr_Y01=reshape(t_Y01,144,365);
tm_Y01=mean(tr_Y01,1);
tr_Y02=reshape(t_Y02,144,365);
tm_Y02=mean(tr_Y02,1);
tr_Y03=reshape(t_Y03,144,365);
tm_Y03=mean(tr_Y03,1);
tr_Y05=reshape(t_Y05,144,365);
tm_Y05=mean(tr_Y05,1);
tr_Y07=reshape(t_Y07,144,365);
tm_Y07=mean(tr_Y07,1);
tr_Y10=reshape(t_Y10,144,365);
tm_Y10=mean(tr_Y10,1);
tr_Y13=reshape(t_Y13,144,365);
tm_Y13=mean(tr_Y13,1);
%% Skapar relevanta soldagar
% Hämtar medelvärdet för temperaturen för soldagarna per år
tm_ms01=tm_Y01(Soldagar_ms);
tm_ms02=tm_Y02(Soldagar_ms);
tm_ms03=tm_Y03(Soldagar_ms);
tm_ms05=tm_Y05(Soldagar_ms);
tm_ms07=tm_Y07(Soldagar_ms);
tm_ms10=tm_Y10(Soldagar_ms);
tm_ms13=tm_Y13(Soldagar_ms);
% Radvektor skapas för soldagars intensitet för de utvalda åren
Soldagar_mttot=[tm_ms01, tm_ms02, tm_ms03, tm_ms05, tm_ms07, tm_ms10, tm_ms13];
% Anpassad vektor efter intensitetsvektorn
Soldagar2_mttot = Soldagar_mttot( [1:313,316:end] );
% Temperaturdygnsmedel plottas mot intensitetdygnsmedel
scatter(Soldagar2_mttot,Soldagar2_mstot)
stdT = std(Soldagar2_mttot)

```

Bilaga H

```
stdI = std(Soldagar2_mstot)
% En surface-plot. Ett annat sätt att rita funktionen
figure
surf(T, I, Z);
title('')
xlabel('Temperatur, grader Celsius')
ylabel('Intensitet, W/m^2')
zlabel('Värden på funktionen F')
%% FUNKTIONEN SOM VI VILL PLOTTA
% F - Funktionen som vi vill plotta
% Alltså (x-mu)^T*Sigma^(-1)*(x-mu)
% Här är x en 2-vektor x=(T, I)
%
% T - En matris med värden på temperaturen
% I - En matris med värden på solinstrålningen
% T och I skapas med meshgrid()
% mu - medelvärdet (2-vektor, my=(mu_T, mu_I))
% Sigma - variansmatrisen
function Z = F(T, I, mu, Sigma)

% Vi vill beräkna funktionen för alla par (T(i,j), I(i,j)) och
% lägga i Z(i,j)
m = size(T,1);
n = size(T,2);
Z = zeros(m,n);
mu = mu(:); % Gör om mu till kolonnvektor om den inte är det
SigmaInv = inv(Sigma);
%% LOOPA ÖVER PUNKTERNA I RUTNÄTET
for i=1:m
    for j=1:n
        x = [T(i,j); I(i,j)];
        Z(i,j) = (x - mu)^*SigmaInv*(x-mu);
    end
end
end
```


SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energiogteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000