



Solpanelsystemförbättring

Axel Gottberg

Examensarbete
Distribuerade energisystem
2018

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Distribuerade energisystem
Identifikationsnummer:	5076
Författare:	Axel Gottberg
Arbetets namn:	Solpanelsystemförbättring
Handledare (Arcada):	DI Kim Rancken
Uppdragsgivare:	Arcada, Institutionen för energi- och materialteknik
Experthandledare:	Ing. Harri Anukka
<p>Sammanfattning:</p> <p>Det här examensarbetet har forskat i Yrkeshögskolan Arcadas solpanelanläggning. Målet med arbetet var att undersöka om ett alternativt arrangemang av solpanelerna skulle vara möjligt, och att utreda hurdan inverkan på energiproduktionen det skulle ha. I arbetet visades det att ett alternativt arrangemang av solpanelerna var möjligt. Det alternativa arrangemanget visade sig ha en positiv inverkan på energiproduktionen.</p>	
Nyckelord:	Energiproduktion, optimering, solenergi, solpanel, vindlast
Sidantal:	45
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Distribuerade energisystem
Identification number:	5076
Author:	Axel Gottberg
Title:	Solpanelsystemförbättring
Supervisor (Arcada):	M.Sc. Kim Rancken
Commissioned by:	Arcada, Institutionen för energi- och materialteknik
Expert supervisor:	B.Sc. Harri Anukka
<p>Abstract:</p> <p>This thesis examined the photovoltaic power plant at Arcada university of applied sciences. The plant was installed in 2017 and consists of 476 pv modules with a total power of 150 kWp. The modules face northwest and southeast with a 10° tilt angle. The plant is expected to produce 125 MWh of energy annually. The aim of the study was to find out if a different arrangement of the modules would be possible, and to determine what the impact on energy production would be. The study was done from a technical perspective and economical factors were not taken into consideration. Both literature in the field and simulation tools available to the public were used. A suggestion for an alternative arrangement of the modules was presented. It was chosen to arrange all the modules in a southeast heading with a 24° tilt angle. The wind load on the pv modules was also calculated, and it was shown that the modules could be under a wind load of 1,67 kN. The energy production of the present arrangement and the alternative arrangement was simulated. For the present arrangement the annual energy production was 110 MWh, which could be compared with the expected production of 125 MWh. The energy production of the alternative arrangement was 125 MWh annually, which meant an increase of 14 %. The increase was greatest in the spring in April and May and in the autumn in September and October. This thesis showed that a different arrangement of the pv modules would be possible if a larger area of the roof was used for the modules. The alternative arrangement was shown to have a positive effect on the energy production.</p>	
Keywords:	Energy production, pv module, optimization, solar energy, wind load
Number of pages:	45
Language:	Swedish
Date of acceptance:	

FÖRORD

I det här examensarbetet har man forskat i solpanelanläggningen på Yrkeshögskolan Arcadas tak. Det har varit en intressant och lärorik upplevelse att skriva det här arbetet om solpaneler, ett område som jag inte hade så mycket erfarenhet av från tidigare.

Jag vill tacka min handledare DI Kim Rancken för idén till arbetet och för alla goda råd och handledning som jag fått under skrivandets gång.

Helsingfors 17.5.2018

Axel Gottberg

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING

ABSTRACT

FÖRORD

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SPECIALTERMER OCH FÖRKORTNINGAR

FIGURER OCH TABELLER

1	INLEDNING	9
2	BAKGRUND	10
2.1	Forskningsobjekt: Arcada.....	10
3	SOLENERGI OCH SOLPANELER	12
3.1	Allmänt om solpaneler.....	16
3.2	Installation av solpaneler.....	20
4	ENERGIPRODUKTION MED SOLPANELER	24
4.1	Vindlaster.....	27
4.2	Uppskattning av energiproduktion.....	32
5	ARCADAS SOLPANELSYSTEM OCH OPTIMERING AV DET	34
5.1	Installation och vindlaster.....	38
5.2	Jämförelse av energiproduktion.....	40
6	ANALYS	42
7	SAMMANDRAG	43
	KÄLLOR	44

BILAGOR

Specialtermer och förkortningar

AM	Luftmassa (Air Mass).
A_{ref}	Arean som påverkas av vindlasten.
β	Solpanelernas lutningsvinkel i grader.
c_d	Vindbyarnas dynamiska effekt.
c_f	Formfaktorn för kraft.
c_s	Inverkan av fastighetens storlek och proportioner på vindlasten.
$c_s c_d$	Bärverksfaktorer.
d	Solpanelradernas avstånd i meter.
γ_s	Solhöjden över horisonten i grader.
h	Höjden hos ett skuggande objektet.
λ	Byggnadens effektiva slankhet.
l	Solpanelernas längd i meter.
L	Avstånd till ett skuggande objektet.
Ψ_s	Solens azimutvinkel i grader.
$q_p(h)$	Vindhastighetstrycket på takåsens höjd.
$q_{p0}(z)$	Egenvärdet för vindens hastighetstryck.
W_p	Solpanelernas maxeffekt vid standardtestförhållanden (Watts peak)

Figurer

Figur 1. Solpaneler på Arcadahusets tak.

Figur 2. Direkt och diffus strålning. /5/

Figur 3. Årliga strålningsmängder i Europa på en optimalt vinklad 1 kW_p solpanel riktad söderut. /6/

Figur 4. Soltimmar i medeltal per månad i Helsingfors och Jyväskylä 1971–2000. /7/

Figur 5. Total installerad effekt för solpaneler 2000–2012. /9/

Figur 6. Solpanelens funktionsprincip. /11/

Figur 7. Monokristallina och polykristallina solpaneler. /12/

Figur 8. Spänning- och strömkurva för en multikristallin solcell. /5/

Figur 9. En inverter som är kopplad till elnätet. /4/

Figur 10. Lutningsvinkel och azimutvinkel för solpaneler. /5/

Figur 11. Inverkan på energiproduktionen hos solpaneler med riktningar och lutningsvinklar som avviker från det optimala. /8/

Figur 12. Solpanelernas radavstånd beroende på panelernas längd, solhöjden och solens azimutvinkel. /13/

Figur 13. Solhöjden över horisonten i Helsingfors mellan 21 december och 21 juni. /15/

Figur 14. Den effektiva vindklassen i städer nära kusten. /16/

Figur 15. Inmatningssida för parametrar i PVGIS. /18/

Figur 16. Arcadahusets bottenplan och väderstrecken. /19/

Figur 17. Orima AK3 justerbar installationsställning för solpaneler. /20/

Figur 18. Solhöjden i grader över Helsingfors den 1 februari. /15/

Tabeller

Tabell 1. Beaktandet av terrängklassens förändring när terrängklassen byter från 0 rakt till IV. /16/

Tabell 2. Byggnadens effektiva slankhet λ . /16/

Tabell 3. Formfaktorns c_f beroende på byggnadens slankhet och sidoförhållande. /16/

Tabell 4. Vindhastighetstryckets egenvärde $q_{p0}(z)$ (kN/m^2) i olika terrängklasser. /16/

Tabell 5. Energiproduktionen i kWh månadsvis för nuvarande arrangemang.

Tabell 6. Energiproduktionen i kWh månadsvis för alternativt arrangemang.

Tabell 7. Jämförelse av energiproduktionen i kWh mellan nuvarande arrangemang och ett alternativt arrangemang.

1 INLEDNING

Solenergi utgör en växande del av energiproduktionen i Finland. Med ambitiösa klimatmål om minskade utsläpp är förnybara energikällor som sol- och vindkraft en viktig del av lösningen för att minska utsläppen. I takt med att solpaneler har blivit allt populärare har också panelernas pris sjunkit. För att solenergi ska kunna tävla med andra energikällor är det viktigt att anläggningar planeras och installeras noggrant för att göra dem så konkurrenskraftiga som möjligt.

I det här arbetet har man bekantat sig med solenergi och solpaneler i allmänhet och också gått in på olika faktorer som gäller för planering av en solpanelanläggning. Man har bekantat sig med anläggningen på Arcadahusets tak och gjort en jämförelse för ett alternativt arrangemang av solpanelerna. Jämförelsen har gjorts ur ett tekniskt perspektiv och ekonomiska synvinklar har inte beaktats.

Som källor har man använt litteratur inom området från både finska och internationella källor. Man har också använt sig av diverse allmänt tillgängliga simuleringsverktyg för att göra analyser som behövts i arbetet.

2 BAKGRUND

Målet med det här arbetet var att undersöka solpanelanläggningen på Arcadahusets tak och upplägget av panelerna, för att sedan kunna utreda om ett alternativt upplägg skulle vara möjligt, och om det alternativa upplägget i så fall skulle ha en positiv inverkan på energiproduktionen.

2.1 Forskningsobjekt: Arcada

Yrkeshögskolan Arcada är en högskola med ungefär 200 anställda och 2700 studenter. På Arcada är utbildningsspråken svenska och engelska, och man erbjuder 17 utbildningar på bachelor-nivå och 10 utbildningar på magisternivå inom fyra olika institutioner. Institutionerna är ekonomi och affärsanalys, energi- och materialteknologi, hälsa och välfärd samt kultur och kommunikation. /1/

Arcadas alla utbildningar finns i Arcadahuset, som ligger i Arabiastranden i Helsingfors. Fastigheten är invigd år 2004 och har en yta på totalt 16 000 m² med tre ”torg” och olika special- och inlärningsmiljöer. Arcadahuset ägs av Fastighets Ab Arcada Nova. År 2011 beviljades Arcada ”Finland Green Office”-certifikatet av Världsnaturfonden WWF, och det fortsattes år 2017. Green Office är ett miljöprogram som har som mål att minska koldioxidutsläpp, minska det ekologiska fotspåret och höja ekoeffektiviteten. /2/

I maj 2017 installerades 476 solpaneler på Arcadahusets tak. Solpanelerna ska stå för en tiondel av Arcadas energiförbrukning och väntas producera 125 000 kWh årligen. I Arcadahuset är det ventilationen och belysningen som står för den största delen av elförbrukningen. Arcada vill som grön högskola prioritera förnybar energi. Ur miljövinkel ser man det positiva resultatet direkt och man väntar sig att investeringen ekonomiskt kommer att återbetalas inom tio år. Det finns varken träd eller höga byggnader som skapar skuggor runt Arcadahuset vilket gör att fastigheten är optimal för solpaneler. Anläggningen ska vara som effektivast mellan mars och oktober och produktionen väntas vara som högst i juli. /3/

Solpanelerna i anläggningen som ligger på Arcadahusets tak är monterade på längden i ställningar för två paneler per styck. I ställningarna lutar panelerna åt motsatta håll i en fast vinkel på 10°. Ställningarna hålls på plats med betongtyngder som ballaster. I figur 1 ser man en bild av solpanelerna på Arcadahusets tak.



Figur 1. Solpaneler på Arcadahusets tak.

Solpanelerna i anläggningen är tillverkade av JinkoSolar och modellen är JKM315PP. Panelerna har en effekt på 315 W_p i standardtestförhållanden. Panelerna är tillverkade av polykristallint kisel och de har en verkningsgrad på 16,23 %. En panel har en total yta på 1,94 m² och de yttre måtten är 1956 x 992 mm, och de väger 26,5 kg styck, (se bilaga 1).

I anläggningen finns 5 st. trefas invertrar för att omvandla den likström som solpanelerna producerar till växelström. Invertrarna är tillverkade av Solar Edge och modellen är SE27.6K. De har en nominell effekt på 27,6 kVA_{ac} och kan matas med 37,25 kW_{dc} från solpanelerna, (se bilaga 2).

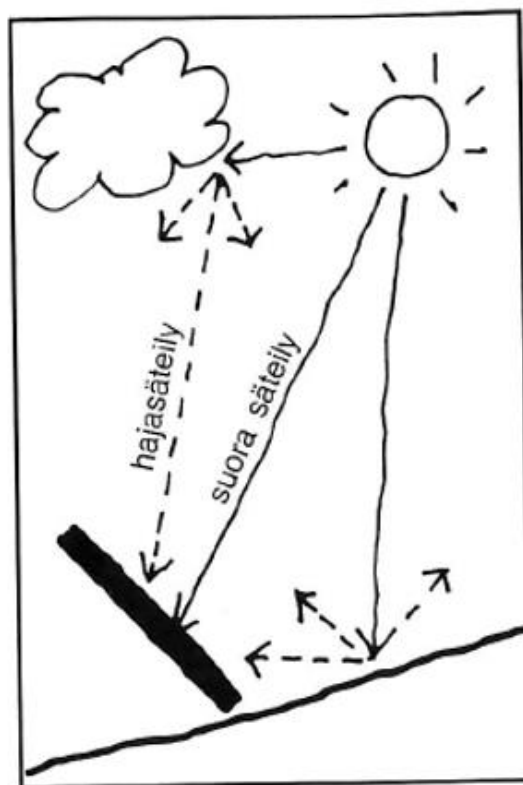
Med 476 st. solpaneler med en effekt på 315 W_p blir alltså den totala teoretiska effekten för anläggningen $476 \times 0,315 \text{ kW} = 149,94 \text{ kW}_p$.

3 SOLENERGI OCH SOLPANELER

Nästan all den energi som används i världen kommer från solen. Den direkta strålningsenergin från solen är ändå bara en del. Även vattenkraft, vind- och vågenergi samt bioenergi från växter kommer från solen. Från solen kommer också ursprungligen de fossila bränslena stenkol, olja och naturgas, som under miljontals år bildats av rester från växter som har producerats av solen. /4, s 7/

I solen frigörs stora mängder energi från fusion av väteatomer till heliumatomer. Av den effekt som solen avger träffar ungefär 172 000 TW jorden. På en vågrät yta utanför jordens atmosfär blir det en effekt på 1,35–1,39 kW/m². Den effekten kallas också för solar-konstanten. Atmosfären minskar dock effekten, och på jordens yta är den omkring 0,8–1 kW/m². /5, s 10–11/

Den totala solstrålningsenergin som träffar jorden kan delas in i direkt och diffus strålning. Direkt solstrålning är den strålning som kommer rakt igenom atmosfären. Diffus solstrålning är den strålning som speglas av molekylerna i atmosfären och molnen. Dit hör också den strålning som speglas tillbaka från jordens yta. Under molniga dagar kan 80% av ljuset vara diffus strålning, och en klar sommardag är den ungefär 20 % på en vågrät yta. I Finland är ungefär hälften av den totala strålningen diffus strålning. I figur 2 ses de olika typerna av strålning. /5, s 12/

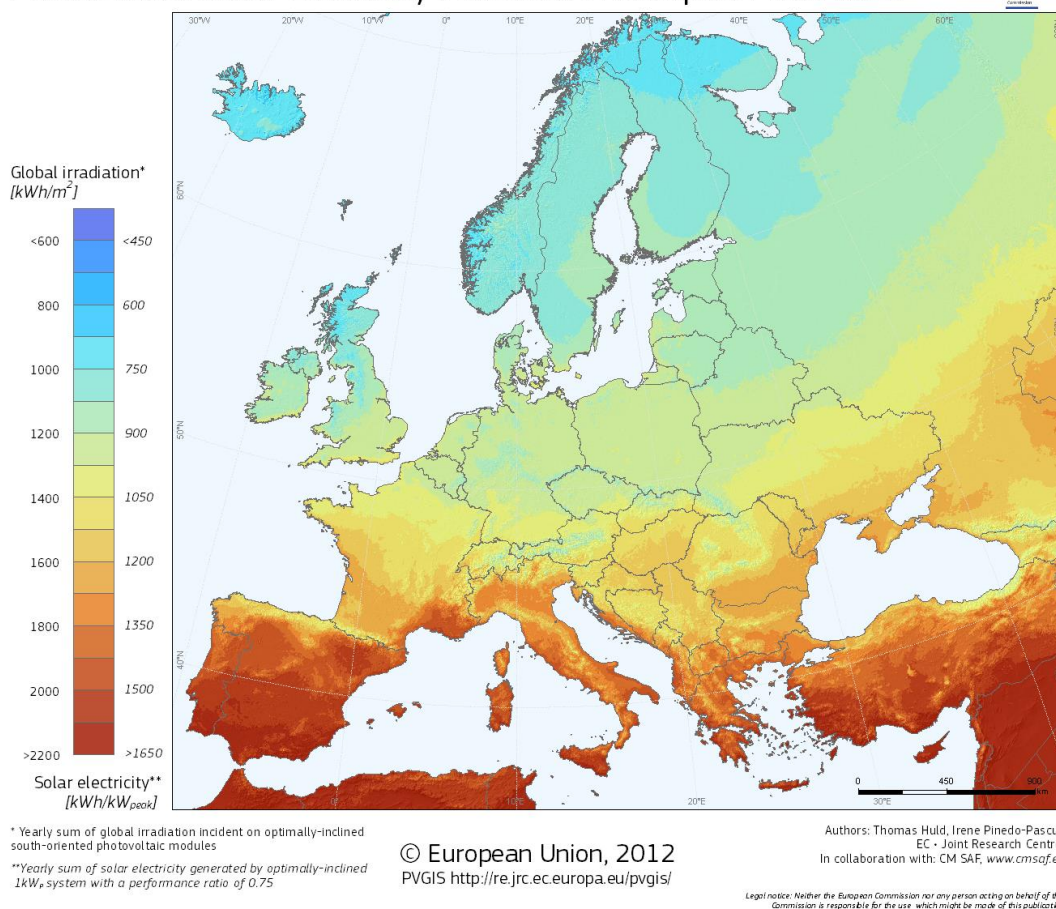


Figur 2. Direkt och diffus strålning. /5/

Den energimängd från solen som samlas på jorden varierar beroende på var i världen man befinner sig. Nära ekvatorn, där solen lyser i en nästan lodrät vinkel mot jorden, är strålningsenergin riklig. Ju närmare polerna man rör sig, desto mindre blir vinkeln, och mängden energi minskar. Närmare polerna minskar energimängden också eftersom solens strålar måste röra sig en längre väg genom atmosfären. /4, s 18/

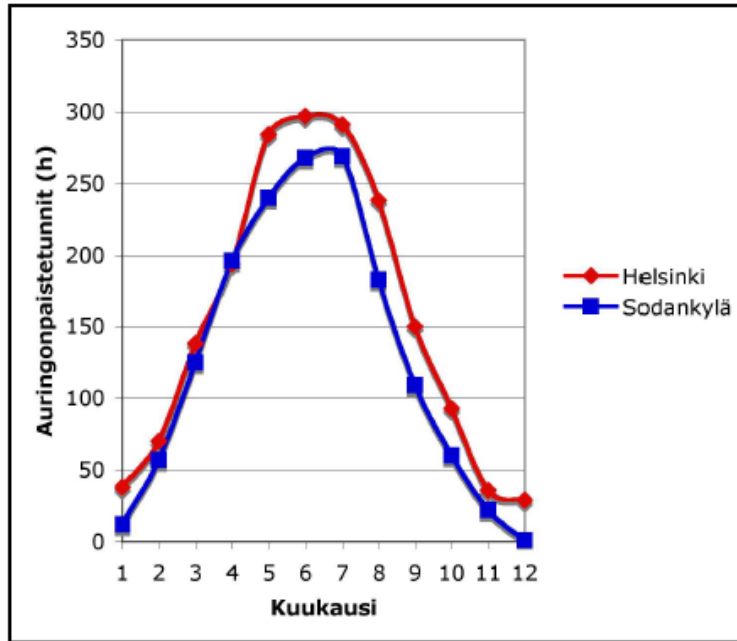
I Finland uppgår den årliga strålningsmängden till ca 900 kWh/m^2 , vilket är ungefär lika mycket som i Norra Tyskland, trots att Finland ligger längre norrut. Det beror dels på att det regnar mindre och inte är lika mycket moln i Finland som i Tyskland, och dels på att dagarna är längre på sommaren. I figur 3 ses en karta över Europa med årliga strålningsmängder på en optimalt vinklad solpanel med en effekt på 1 kW_p . /4, s 18–19, 24/

Photovoltaic Solar Electricity Potential in European Countries



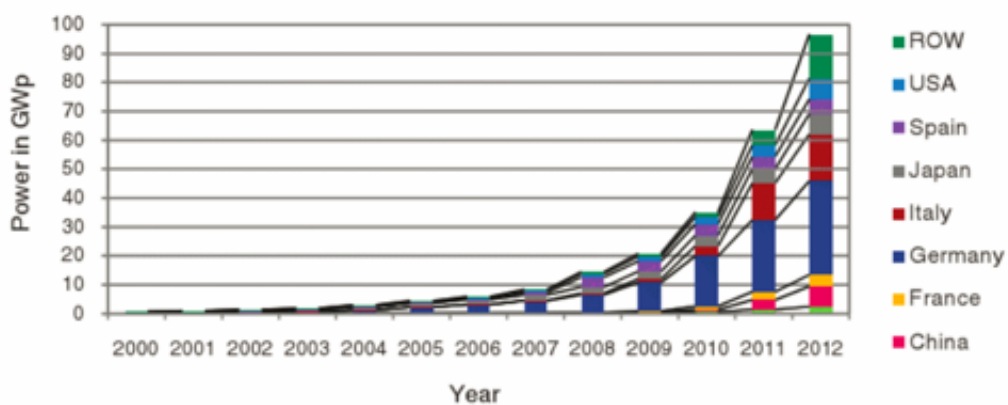
Figur 3. Årliga strålningsmängder i Europa på en optimalt vinklad 1 kW_p solpanel riktad söderut. /6/

Antalet soltimmar, alltså hur många timmar per månad som solen lyser, varierar kraftigt i Finland beroende på årstiden. I Helsingfors i december när dagen är som kortast, kan solen lysa som mest ca 5 timmar i dygnet, medan den i juni lyser nästan 20 timmar. Mellan maj och juli lyser solen i medeltal lite under 300 timmar i månaden. Meteorologiska institutet har mätt soltimmarna på olika orter i Finland och har räknat ut det årliga och månatliga medeltalet för åren 1971–2000. Under den tidsperioden har solen i medeltal lyst 1858 timmar per år i Helsingfors. I figur 4 ses antalet soltimmar i medeltal per månad i Helsingfors och Sodankylä. /7, s 5/



Figur 4. Soltimmar i medeltal per månad i Helsingfors och Sodankylä 1971–2000. /7/

Marknaden för solpaneler har ökat kraftigt under de senaste 15 åren. År 2000 var den totala installerade effekten för solpaneler i världen under 2000 MW, medan den år 2015 redan överskred 200 000 MW. Samtidigt har priset på solpaneler sjunkit, och ligger nu på under 50 cent/kW. I figur 5 ses den totala installerade effekten av solenergi i världen från år 2000 till år 2012. /8, s 135/

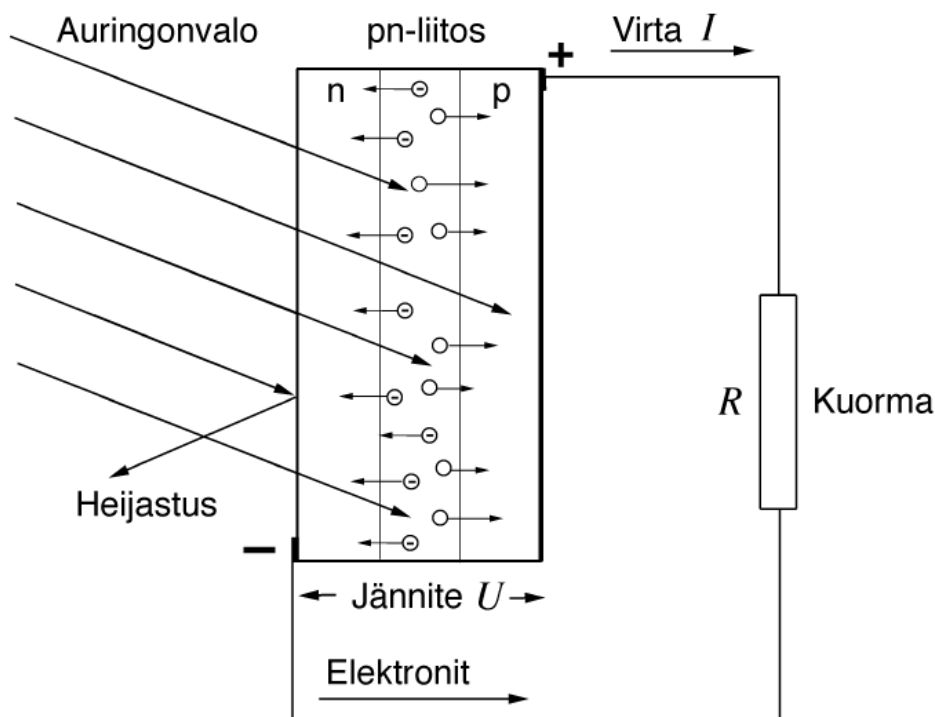


Figur 5. Total installerad effekt för solpaneler 2000–2012. /9/

År 2017 dominerade solenergi investeringar i ny energiproduktion i världen. Totalt installerades det 98 GW ny kapacitet, mera än någon annan teknologi: förnybar, fossil eller kärnkraft. Den största bidragande faktorn var Kina, som ensam stod för mera än hälften av den installerade kapaciteten på totalt 58 GW ny kapacitet. /10/

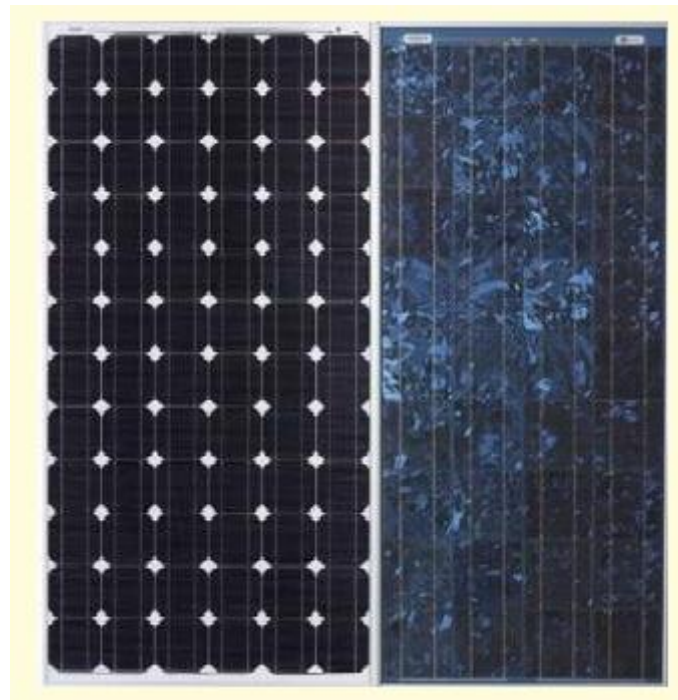
3.1 Allmänt om solpaneler

Solceller tillverkas av halvledarmaterial, som i vanliga förhållanden är isolerande, men som blir ledande när de träffas av energi. De producerar likström tack vare den fotoelektriska effekten. Solceller tillverkas oftast av kisel, och de består av två olika skikt, p- och n-skiktet, som delas av en pn-övergång. För att solceller av kisel ska få sina egenskaper är P-skiktet dopat med bor och n-skiktet dopat med fosfor. I solcellen samlar sig elektronerna på en sida och bildar öppningar på den andra sidan, och skapar därmed ett elektriskt fält mellan skikten. Ljus bildar par av elektroner och öppningar i halvledarmaterialet som kan användas till att generera ström till en yttre last. I figur 6 ses funktionsprincipen för solpaneler. /5, s 120–121; 4, s 34–35/



Figur 6. Solpanelens funktionsprincip. /11/

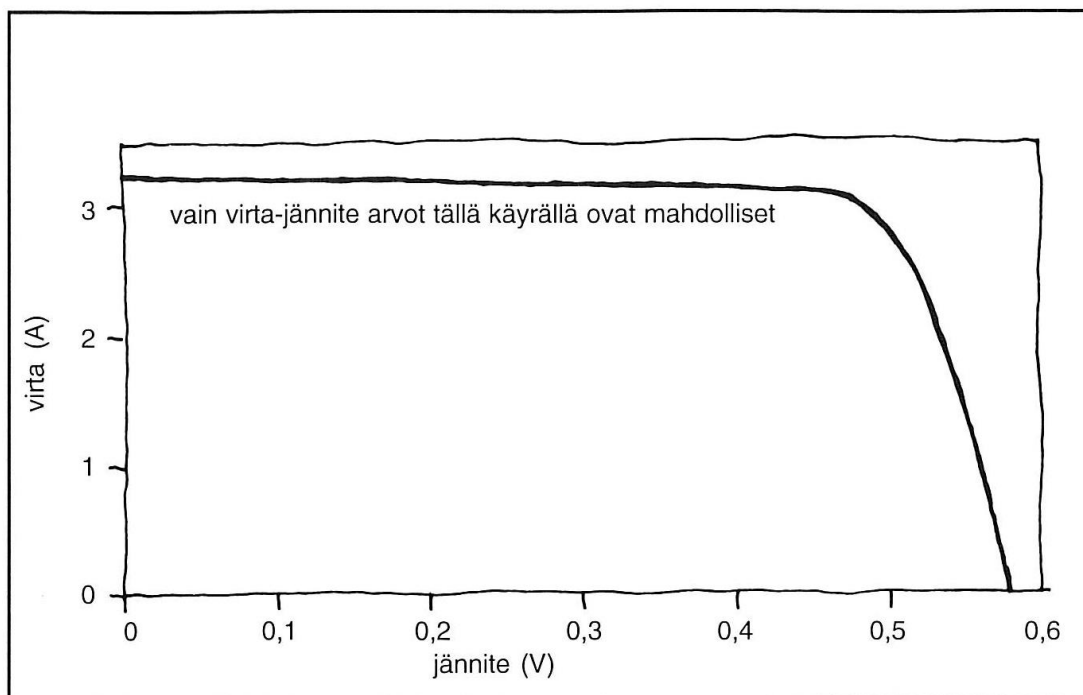
Solpaneler tillverkas oftast av solceller som är gjorda av endera monokristallint eller polykristallint kisel. Monokristallina celler tillverkas av förädlat kisel, som formats till en stång och därefter sågats till 0,35–0,45 mm tjocka skivor. Monokristallint kisel är dyrt eftersom det tar lång tid att tillverka och kräver noggrannhet i tillverkningsprocessen. Polykristallina solceller tillverkas genom gjutning. Polykristallina celler är billigare än monokristallina solceller eftersom tillverkningsprocessen inte är lika krävande. Monokristallina paneler har en verkningsgrad på 17–21 %, medan polykristallina paneler har en verkningsgrad på 16–19 %. De första solpanelerna som tillverkades gjordes av monokristallint kisel men i dagens läge är den vanligaste paneltypen gjord av polykristallint kisel. I figur 7 ses exempel på solpaneler av monokristallint och polykristallint kisel. /5, s 124; 4, s 43–44/



Figur 7. Monokristallina och polykristallina solpaneler. /12/

Solpaneler av mono- och polykristallint kisel hålls funktionsdugliga nästan för evigt. Deras energiproduktion sjunker dock med tiden och minskar med ungefär 0,5 % i året. Tillverkarna intygar att solpanelernas energiproduktion är 80 % av en ny panels produktion i 25 års tid. En vettig användningstid för en solpanel är alltså minst 25 år, men ofta är den betydligt längre än det. /4, s 47/

En solpanel består av flera solceller. En solcells storlek är oftast ca 10x10 cm och dess tjocklek 0,1–0,4 mm. När ljus träffar solcellen skapar den en spänning på ungefär 0,5 V och genererar ström beroende på cellens storlek och strålningseffekten. Under jämnt ljus varierar spänningen i en solcell medan strömmen hålls ganska konstant, ända upp till en viss spänning. Genom att rita ut alla möjliga spännings- och strömkombinationer i en graf får man en s.k. I-U kurva. I figur 8 ses ett exempel på en I-U kurva för en polykristallin solcell under standardtestförhållanden. Man kan använda sig av alla lägen i grafen, men i verkligheten fungerar den bara med ett värde åt gången. Värdet beror på den krets som cellen är kopplad till. Om cellen inte kopplas till någon krets är strömmen 0 A och spänningen 0,6 V under en viss ljusintensitet. Det här är cellens tomgångsspänning. Om man kortsluter cellen genom att koppla ihop båda ändorna av den, sjunker spänningen till 0 V och strömmen stiger till 3,2 A. Det här kallas för kortslutningsström, och är den högsta strömmen som kan gå igenom cellen vid en viss ljusintensitet. /5, s 121–122/



Figur 8. Spännings- och strömkurva för en polykristallin solcell. /5/

Spänningen för en enskild cell är inte tillräcklig för att ge någon nytta, men genom att koppla flera celler i serie kan man höja spänningen. Vanligtvis är 36 celler kopplade i serie i en panel vilket ger den en spänning på drygt 20 V och en effekt på 150 W_p. I en panel kan det också vara 60 celler kopplade i serie. Då får man en tomgångsspänning på ungefär 35 V och en effekt på 250 W_p. Det förekommer också solpaneler med större eller mindre antal celler beroende på panelernas användningssyfte. /4, s 46/

Solpanelernas egenskaper testas i ett standardtest (STC, standard testing conditions). I standardtestförhållanden är strålningens effekt 1000 W/m², solcellernas temperatur 25°C och luftmassavärdet (AM, air mass) 1,5. AM värdet 1,5 betyder att solens strålning motsvarar det att den filtreras i atmosfären över ett avstånd som är 1,5 gånger atmosfärens tjocklek. /4, s 47; 8, s 139/

Solpanelanläggningar kan vara kopplade till elnätet eller utgöra självständiga system. Självständiga system som inte är kopplade till nätet kallas off-grid system. I anläggningar som är kopplade till nätet kan elektriciteten användas för fastighetens eget bruk eller matas ut till elnätet. I första hand producerar man elektricitet till fastighetens eget bruk, men eftersom förbrukningen är varierande leder det ofta till att en del av produktionen först matas ut i nätet för att sedan måsta köpas tillbaka senare. Eftersom man bara får betalt för priset på elenergi när man matar ut el i nätet, vilket är ungefär en tredjedel av det totala priset på köpt elektricitet, är det inte speciellt lönsamt. Det totala priset på elektricitet innehåller priset på elenergi, överföringsavgifter, elskatt och mervärdesskatt. /8, s 142, 162–163/

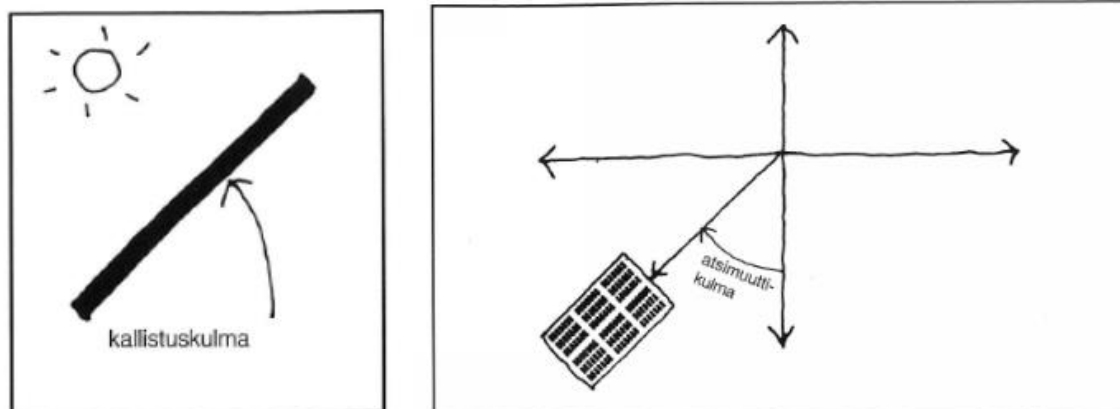
Huvudkomponenterna i en solpanelanläggning som är kopplad till elnätet är solpaneler och växelriktare. Solpanelerna producerar likström som måste omvandlas till växelström med en inverter, för att sedan kunna användas i fastigheten eller matas ut i nätet. Invertrar som är kopplade till elnätet måste uppfylla de gällande säkerhetsstandarderna. I Finland kan en bra inverter ha en livstid på över 20 år, men det lönar sig ändå att räkna med att man måste byta ut invertern en gång under anläggningens livstid. I anläggningar med en effekt på under 3 kW_p använder man oftast enfas invertrar, medan invertrarna i större anläggningar är trefas modeller. I figur 9 ses en inverter som är kopplad till elnätet. /8, s 142–145/



Figur 9. En inverter som är kopplad till elnätet. /4/

3.2 Installation av solpaneler

När man installerar solpaneler finns det två vinklar att beakta: lutningsvinkeln och azimutvinkeln. Lutningsvinkeln är vinkeln mellan ett vågrätt plan och panelen. Azimutvinkeln är solpanelernas riktning, där 0° är rakt söderut, $+90^\circ$ västerut och -90° österut. När jorden roterar runt sin axel ser solen ut att flytta sig på himlen, och den inkommande strålningen träffar panelen hela tiden med olika vinkel. Vinkeln mellan den inkommande strålningen och panelens vinkel kallas för infallsvinkel. I figur 10 ser man lutningsvinkeln och azimutvinkeln för solpaneler. /5, s 13–14/

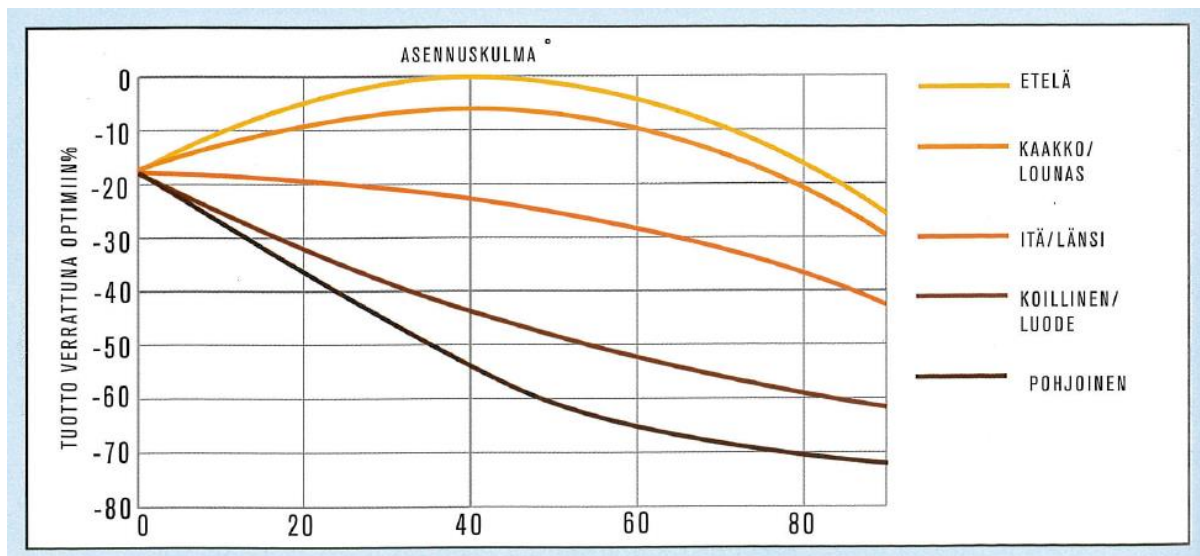


Figur 10. Lutningsvinkel och azimutvinkel för solpaneler. /5/

Mest effekt får man ut från en solpanel när strålningen kommer vinkelrätt mot den, dvs. infallsvinkeln är 0° . Beroende på vilken breddgrad man befinner sig varierar solens höjd. En tumregel för bästa lutningsvinkel för att maximera årsproduktionen i Finland är breddgraden -20° . I Finland varierar solens höjd mycket under de olika årstiderna. Om man vill optimera energiproduktionen vintertid bör panelerna stå nästan lodrätt. För optimal energiproduktion under tidsperioden maj-juli är den optimala lutningsvinkeln mindre än den optimala vinkeln för hela året. /8, s 18/

Solpanelerna riktas oftast söderut, men om det t.ex. finns byggnader som skuggar anläggningen kan man rikta panelerna i riktningar mellan väst och öst. Med en azimutvinkel som avviker från söder blir energiproduktionen dock mindre än det optimala. Med att rikta panelerna mot sydväst eller sydost minskar årsproduktionen inte märkbart, utan det påverkar mera vilken tid på dagen som energi produceras. Om energiförbrukningen är störst på morgonen kan det löna sig att rikta panelerna österut, och om förbrukningen är störst på eftermiddagen kan det löna sig att rikta dem västerut. Genom att avvika från en azimutvinkel på 0° med $\pm 45^\circ$ minskar energiproduktionen bara med ca 7% från det optimala. /8, s 17–18/

I Finland har man alltså oftast rekommenderat att solpanelerna riktas mot söder i 40° vinkel. Elproduktionen minskar dock rätt långsamt med att riktningen ändras. Det samma gäller panelernas vinkel, och med nuvarande priser hos solpaneler kan man säga att den optimala vinkeln är den som man producerar mest energi med så förmånligt som möjligt. I figur 11 ser man den procentuella inverkan på energiproduktionen hos solpaneler med riktningar och lutningsvinklar som avviker från det optimala. /8, s 180–181/



Figur 11. Inverkan på energiproduktionen hos solpaneler med riktningar och lutningsvinklar som avviker från det optimala. /8/

Genom att installera panelerna i en lägre lutningsvinkel än den optimala uppnår man en del fördelar för anläggningen:

- Installationskostnaderna blir lägre, vilket leder till att den producerade elektriciteten ofta blir billigare än med den optimala lutningsvinkeln.
- Panelernas skuggande effekt blir mindre, vilket jämnar ut skillnaden jämfört med anläggningar med brantare lutningsvinkel.
- Anläggningen är mindre utsatt för vind.
- Panelerna utnyttjar diffus strålning effektivt.

Speciellt i anläggningar var solpanelerna installeras på rader efter varandra bör man utöver energiproduktionen också beakta installationskostnaderna. /8, s 181/

När man installerar solpaneler är det viktigt att försöka minimera skuggningar. Hela området från öst till väst bör kollas igenom för skuggningsobjekt. Skuggningar orsakas av träd, höga byggnader och andra konstruktioner. Också sådana hinder som inte direkt hindrar solljus kan påverka energiproduktionen genom att minska den diffusa strålningen. Även små skuggor kan ha betydande inverkan på hela anläggningens energiproduktion. Om en solcell i en solpanel är skuggad minskar det panelens produktion med 35–50 %. Oftast fördelar sig skuggningarna på flera solpaneler och påverkar bara en del av cellerna. /8, s 181–182/

I Finland installeras de flesta solpanelsystemen på byggnaders tak. För plåt- och tegeltak finns det färdiga solpanelspaket som passar för både nybyggen och saneringar. Om taket är lutande installeras panelerna oftast i samma vinkel och riktning som takfallet. Panelerna bör vara på den bärande delen av taket, och man får t.ex. inte använda sig av stupränorna vid montering. /8, s 179/

Platta tak är de mest krävande taken att installera solpaneler på. Med platta tak måste man beakta takets bärförmåga och de vindkrafter som panelerna utsätts för. Man måste också undvika att skada takets ytbeläggning. De vanligaste installationerna på platta tak är:

- Flytande installation med ballaster.
- Aerodynamisk flytande installation med små riktade ballaster.
- Aerodynamisk flytande installation kombinerad med fästningar av t.ex. lim.
- Fast installation med pelare.

Det är skäl att endast använda ett system vars funktionalitet har bekräftats med hållbarhetsberäkningar. /8, s 179/

4 ENERGIPRODUKTION MED SOLPANELER

När man planerar en solpanelanläggning måste man välja riktningen och lutningsvinkeln för panelerna samt avgöra hur man lägger ut panelerna på taket. Om man har ett lutande tak blir lutningsvinkeln och riktningen oftast takfallets lutning och riktning. Då kan man i princip täcka hela taket med paneler eftersom de inte skuggar varandra. När det kommer till platta tak bli det lite mera komplicerat. För att kunna göra upp en plan för hur man effektivast kunde arrangera panelerna behöver man veta med hurudant radavstånd och i vilken riktning man bör rikta panelerna. Solpanelernas lutningsvinkel inverkar på radavståndet men också på vindlasten som panelerna utsätts för. För att bestämma lutningsvinkeln och riktningen kan man använda sig av de riktlinjer som ges i kapitel 3.2 men radavståndet bör man räkna ut.

I en anläggning med vinklade paneler på flera rader efter varandra måste man ta i beaktande att panelerna kan skugga varandra, och försöka minimera detta. Enligt en riktlinje för planering av solpanelsanläggningar bör man undvika att raderna skuggar varandra mitt på dagen under hela året, för att minimera skuggningen när strålningen är som störst. Det betyder att radavståndet borde vara så långt att panelerna inte skuggar varandra vid middag under vintersolståndet, när solen är som lägst på året. Med formel 1 kan man räkna ut det behövliga avståndet mellan panelraderna när man vet solens höjd, panelernas längd och lutningsvinkel samt solens azimutvinkel. I figur 12 ser man de olika variablerna som används i formel 1. /13, s 6/

$$d = l \cos\beta + \frac{l \sin\beta}{\tan\gamma_s} \cos\Psi_s \quad [1]$$

där,

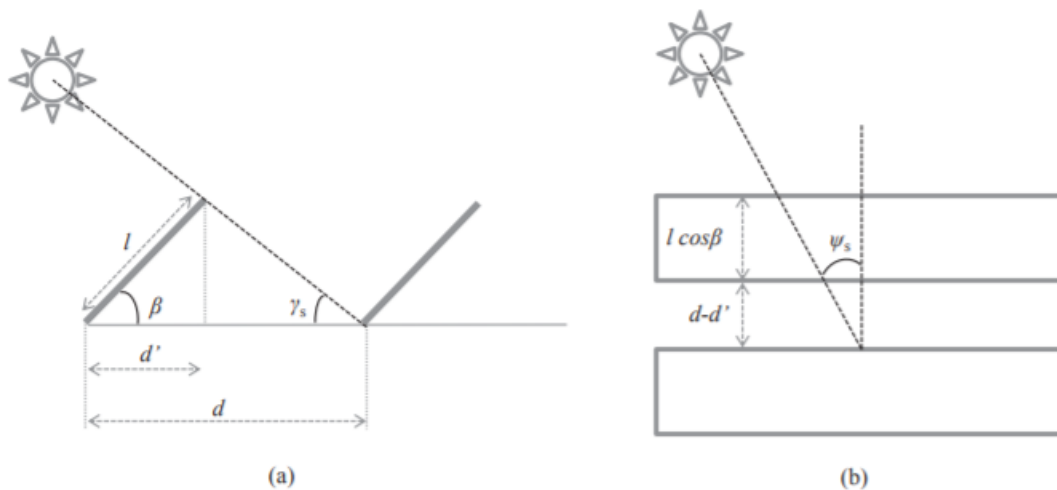
d är panelradernas avstånd i meter.

l är solpanelernas längd i meter.

β är solpanelernas lutningsvinkel i grader.

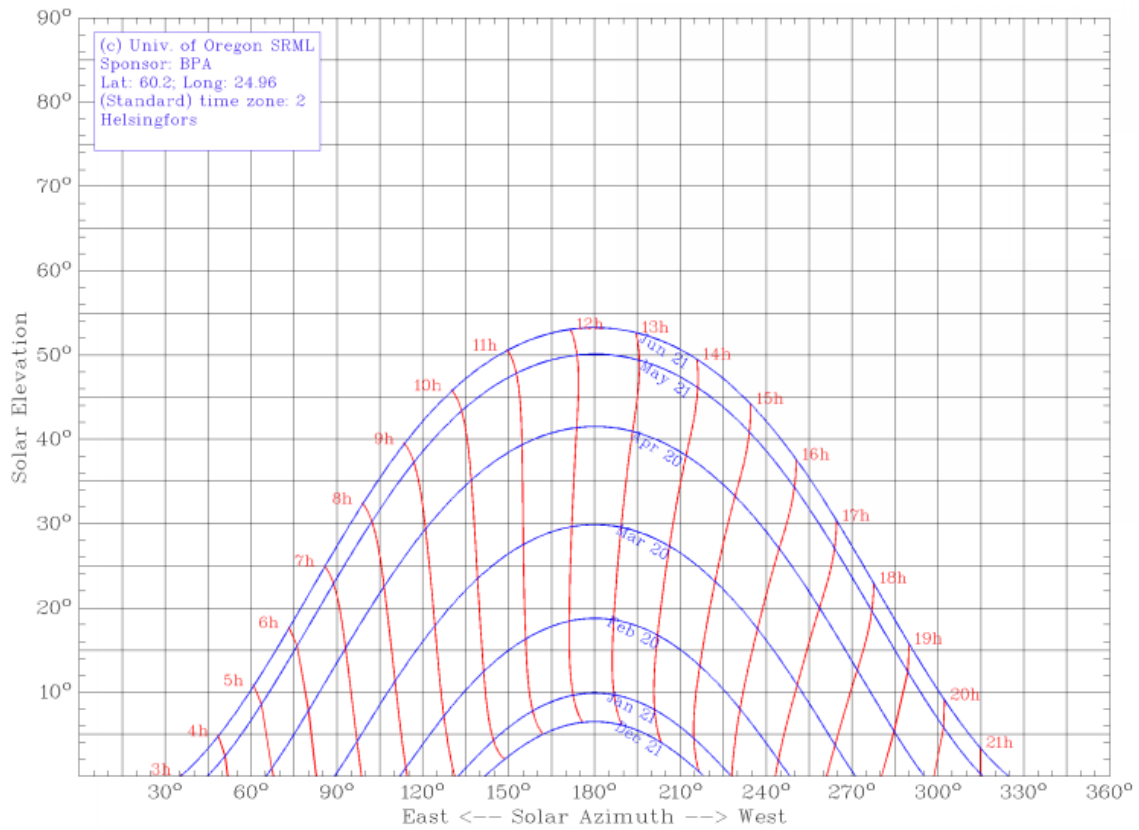
γ_s är solhöjden över horisonten i grader.

Ψ_s är solens azimutvinkel i grader.



Figur 12. Solpanelernas radavstånd beroende på panelernas längd, solhöjden och solens azimuthvinkel. /13/

För att få reda på solens höjd över horisonten och dess azimuthvinkel under olika årstider har här valts användning av ett program som räknar ut dem. Programmet, som heter sun path chart program, har gjorts av University of Oregon och det är gratis att använda. Man matar först in koordinaterna för den position var anläggningen finns. Sun path chart-programmet ritat sedan ut solens höjd och azimuthvinkel i grader under en dag sett från den givna positionen. I figur 13 visas solhöjden över horisonten i Helsingfors mellan 21 december och 21 juni. /14/



Figur 13. Solhöjden över horisonten i Helsingfors mellan 21 december och 21 juni. /15/

Eftersom det förutom andra solpaneler också kan finnas utstickare och andra objekt på taket som kan kasta skugga på panelerna måste också avståndet till dem beaktas. När man vet solhöjden och höjden hos det skuggande objektet kan man räkna ut minimiavståndet till det med formel 2.

$$L = \frac{h}{\tan \gamma_s} \quad [2]$$

där,

L= avstånd till det skuggande objektet.

h=höjden hos det skuggande objektet.

γ_s =Solhöjden över horisonten i grader.

4.1 Vindlaster

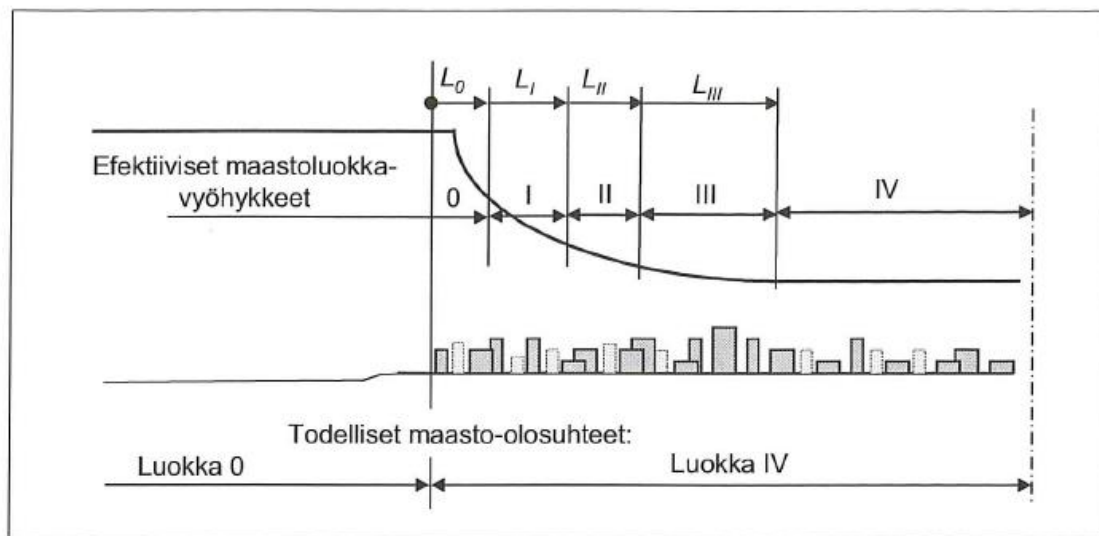
Solpanelerna är utsatta för väder och vind året runt. Därför är det viktigt att se till att de inte flyger iväg under en storm. För att uppskatta hurdana vindlaster som panelerna utsätts för har man i det här arbetet valt att använda sig av de riktlinjer som ges i RIL 201-1-2017 Suunnitteluperusteet ja Rakenteiden kuormat. Riktlinjerna är tolkningar av eurokoden EN 1991-1-4 för att bestämma vindlasterna hos olika konstruktioner.

Vindlasterna varierar med tiden och de orsakar tryck mot utsidan av solida konstruktioner. I RIL 201-1-2017 framställs vindlasterna förenklat som tryck eller kraft som har samma inverkan som de kraftigaste vindbyarna har. Vindlasterna är egenvärden som baserar sig på grundvärdena för vindhastighet eller vindtryck, och den årliga sannolikheten att de överskrider är 0,02. Det betyder att de upprepar sig i medeltal vart 50:de år. /16, s 127/

För att komma fram till den totala vindkraften som panelerna utsätts för måste man ta reda på alla de faktorer som är inblandade. Första steget är att bestämma vilken terrängklass som byggnaden finns i.

Vindens styrka varierar beroende på hurdan terräng som omgiver byggnaden. Eurokoden delar in terrängen i fem klasser beroende på terrängens grovhet. Klasserna är från 0 till IV var 0 är havet eller ett kustområde nära öppet hav, I är en sjö eller ett område med lite växtlighet, II är ett område med låg växtlighet och olika hinder som träd eller hus på ett avstånd av minst 20 gånger höjden hos hindret från varandra, III är ett område med regelbunden växtlighet eller byggnader som är närmare varandra än 20 gånger höjden hos hindret och IV är ett område var minst 15 % av ytan är täckt med byggnader vars medelhöjd överskrider 15 m (se bilaga 3). De egentliga terrängförhållandena påverkar vindens hastighet. Om byggnaden ligger nära det stället var terrängens grovhet ändras bör man använda sig av den slätare klassens vindparametrar. Om byggnaden ligger under 2 km från den slätare klassen 0 bör man använda sig av parametrarna för klassen 0. Om byggnaden ligger under 1 km från den slätare klassen 1, 2 eller 3 bör man använda sig av parametrarna för den slätare klassen. /16, s 130/

Den nationella bilagan till EN 1991-1-4 ger en möjlighet att noggrannare betrakta terrängklasserna. Det kan finnas behov för detta i finska kuststäder var terrängklassen ändras från 0 rakt till IV. I de här fallen kan man göra beräkningarna noggrannare genom att beakta förhöjningen av nollnivån i vindens vertikala hastighetsfördelning. Förutom det kan man använda data från mätstationer som mäter havsvindars dämpning. På basis av detta får man en zonindelning som visas i figur 14. Zonindelningen är beroende av byggnadens höjd och avståndet från stället var terrängförhållanden förändras från zon 0 till zon IV. /16, s 131–132/



Figur 14. Den effektiva vindklassen i städer nära kusten. /16/

I tabell 1 visas de avstånd L från förändringspunkten av terrängklass från vilka man kan använda vindparametrarna för slätare terrängklasser. Avstånden L delar in stadsområdet i zoner som visas i figur 14 och från vilka man kan välja den effektiva terrängklassen för byggnaden. /16, s 131–132/

Tabell 1. Beaktandet av terrängklassens förändring när terrängklassen byter från 0 rakt till IV. /16/

z (m)	Efektiivisten maastoluokkien rajat			
	L_0 (km)	L_I (km)	L_{II} (km)	L_{III} (km)
60	2,0	4		
40	1,0	2,0	10	
≤ 20	0,5	1,0	2	10

För att räkna ut den vindkraft som solpaneler utsätts för kan man använda sig av formel 3 som ges i RIL-201-1-2017 för att räkna ut vindkraften på byggnader när byggnadens höjd är mindre än dess bredd. Man antar då att det vindtryck som råder på takåsen gäller för hela byggnaden. /16, s 140/

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(h) A_{ref} \quad [3]$$

där,

F_w är den totala vindkraften i kN.

$c_s c_d$ är bärverksfaktorer.

c_f är formfaktorn för kraft.

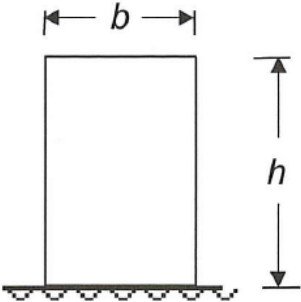
$q_p(h)$ är vindhastighetstrycket på takåsens höjd.

A_{ref} är arean som påverkas av vindlasten.

Den första faktorn är bärverksfaktorn som betecknas $c_s c_d$ och den tar i beaktande två olika faktorer som påverkar den totala kraften. Faktorn c_s är inverkan av fastighetens storlek och proportioner. Den tar i beaktande att vindtryckets största värden inte verkar samtidigt på olika ställen i en stor byggnad. Faktorn c_d tar i beaktande de dynamiska effekterna av vindbyar. Bärverksfaktorn kan räknas ut enligt EN 1991-1-4 men man kan också anta att $c_s c_d = 1,0$ för byggnader som är under 15 m höga, för fasad och takelement som har en egenfrekvens under 5 Hz och för byggnader som har bärande väggar och är under 100 m höga och är lägre än 4 gånger byggnadens längd mot vinden. /16, s 145/

Nästa faktor är c_f som är formfaktorn för kraft. Den är beroende av byggnadens slankhet och förhållandet mellan längden och bredden hos byggnaden. Formfaktorn innehåller också friktionens inverkan. För att få reda på formfaktorn måste man först ta reda på byggnadens effektiva slankhet λ . I tabell 2 ser man hur byggnadens slankhet räknas ut beroende på byggnadens höjd. /16, s 140–141/

Tabell 2. Byggnadens effektiva slankhet λ . /16/

Rakenteen mittasuhteet, tuuli kohtisuoraan tasoa vasten	Tehollinen hoikkuus λ
	<p>kun $h < 15$ m, $\lambda = 2 h/b$ kun $h \geq 50$ m, $\lambda = 1,4 h/b$</p> <p>Välialueella $15 \text{ m} < h < 50 \text{ m}$ sovelletaan interpolointia.</p> <p>Huom: Tämä ohje ei koske hyvin hoikkia rakennuksia, joille $\lambda > 10$.</p>

När man vet byggnadens effektiva slankhet får man formfaktorn c_f från tabell 3 genom att räkna ut förhållandet mellan byggnadens sidor d/b var d är byggnadens djup och b är byggnadens bredd sett från vindens riktning. /16, s 141/

Tabell 3. Formfaktorns c_f beroende på byggnadens slankhet och sidoförhållande. /16/

λ	Sivusuhte d/b								
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50
≤ 1	1,2	1,2	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54	0,54
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,07	0,65	0,58	0,58
10	1,40	1,40	1,60	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63	0,63

Följande faktor är $q_p(h)$ som är vindhastighetstrycket på takets höjd. Vindhastighetstrycket baseras på vindhastighetens grundvärde $v_b=21$ m/s. Utgångsläget för att räkna ut vindlasten är egenvärdet för vindens hastighetstryck $q_{p0}(z)$, som är beroende av terrängklassen och byggnadens höjd. Utöver det påverkar också formen på terrängen runt byggnaden vindens hastighetstryck och det bör beaktas ifall terrängen har en lutning på över 0,05. Höjden räknas från marken bredvid byggnaden. Vindens hastighetstryck i olika terrängklasser visas i tabell 4. /16, s 136/

Tabell 4. Vindhastighetstryckets egenvärde $q_{p0}(z)$ (kN/m^2) i olika terrängklasser. /16/

z (m)	Maastoluokka				
	0	I	II	III	IV
0	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
1	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
2	0,78	0,52	0,39	0,35	0,32
5	0,96	0,65	0,53	0,35	0,32
8	1,05	0,73	0,61	0,43	0,32
10	1,09	0,76	0,65	0,47	0,32
15	1,18	0,83	0,72	0,55	0,40
20	1,24	0,88	0,77	0,60	0,45
25	1,29	0,92	0,82	0,65	0,50
30	1,33	0,95	0,85	0,68	0,54
35	1,37	0,98	0,88	0,72	0,57
40	1,40	1,01	0,91	0,74	0,60

Den sista faktorn A_{ref} är arean som påverkas av vindlasten. Arean är bredden gånger höjden "sedd av vinden". /16, s 140/

4.2 Uppskattning av energiproduktion

För att få en uppfattning om energiproduktionen i ett solpanelsystem har här valts användning av ett simuleringsverktyg. Verktöget heter Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) och är resultatet av ett EU-projekt som forskar i Solenergi och solpaneler. Programmet är web-baserat och det är gratis att använda.

PVGIS kombinerar solstrålningsmodeller med interpolerad markinformation tillgänglig från den europeiska solstrålningsatlasen. Programmet tar förutom solstrålningen i beaktande även temperaturen, vindhastigheten och typen av solpanel. Som resultat får man den månatliga och årliga energiproduktionen för anläggningen. /17/

I figur 15 visas inmatningssidan för simuleringsverktyget PVGIS. I verktyget måste man först på en karta markera var anläggningen finns, vilket ger en koordinaterna för platsen. Sedan ska man välja solstrålnings databas av de databaser som finns tillgängliga för det området man valt. Efter det väljer man vilken typs solpaneler man har. Verktöget tar i beaktande temperatur- och strålningsförluster beroende på vilken typ man väljer. Systemförlusterna innefattar alla förluster i anläggningen vilka leder till att effekten till nätet är mindre än den som produceras av solpanelerna. Förlusterna orsakas av förluster i kablar och invertrar och av smuts på panelerna. Installationspositionen tar i beaktande temperaturförluster om panelerna är integrerade i byggnaden, då de blir betydligt varmare än om de är fristående. Man ska till sist ange lutningsvinkeln och azimutvinkeln för panelerna. /18/

Cursor:

Selected: 60.201, 24.965

Elevation (m): 1

Use terrain shadows:

Calculated horizon

Upload horizon file

[↓ csv](#)

Valitse tiedosto Ei valittua tiedostoa

GRID CONNECTED
PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV
?

TRACKING PV

OFF-GRID

MONTHLY DATA

DAILY DATA

HOURLY DATA

TMY

Solar radiation database* PVGIS-SARAH ▼

PV technology* Crystalline silicon ▼

Installed peak PV power [kWp]* 1

System loss [%]* 14

Fixed mounting options

Mounting position* Free-standing ▼

Slope [°]* 35

Azimuth [°]* 0

PV electricity price

PV system cost (your currency) []

Interest [%/year] []

Lifetime [years] []

Optimize slope

Optimize slope and azimuth

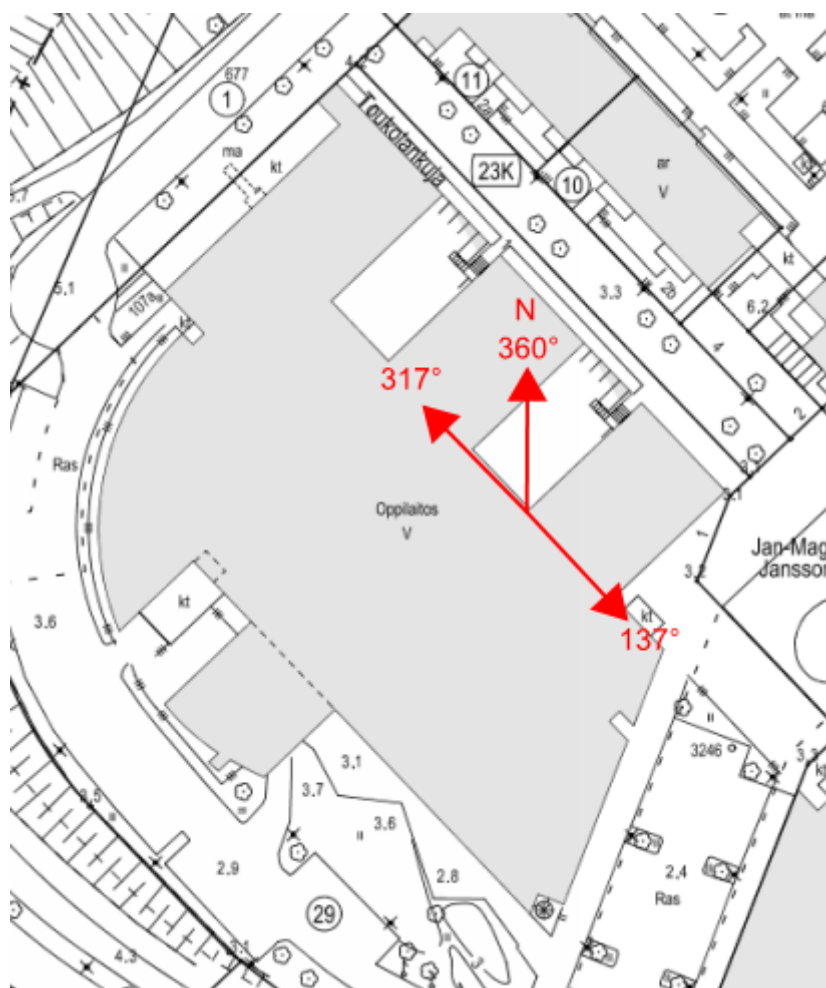
👁 Visualize results

↓ Download csv

Figur 15. Inmatningsida för parametrar i PVGIS. /18/

5 ARCADAS SOLPANELSYSTEM OCH OPTIMERING AV DET

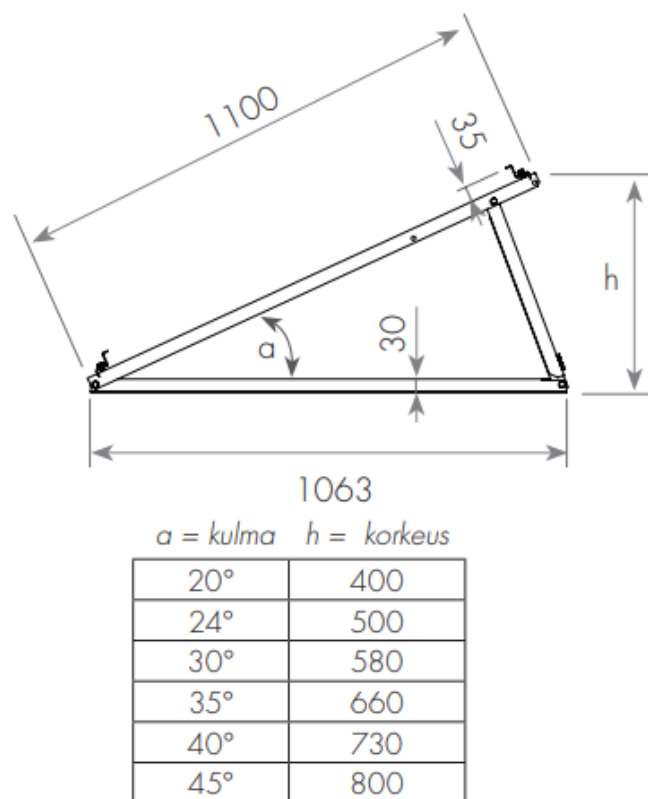
Det nuvarande upplägget för solpanelerna är alltså rader med dubbla solpaneler med 10° lutning 180° åt olika håll från varandra. Paret av solpaneler är placerade i rader som ligger vinkelrätt längsmed Arcadahusets huskropp. Panelerna har placerats på taket till B-, C- och E-blocket och på taket mellan E- och F-blocken. I samband med det här arbetet har en principritning gjorts över det nuvarande upplägget (se bilaga 4). När man mäter ut väderstrecken på kartan i figur 16 ser man att hälften av panelerna är riktade i vinkeln 317° och hälften är riktade i vinkeln 137° . För att omvandla de här värdena till azimutvinklar där söder är 0° kan man subtrahera 180° från de absoluta riktningarna. Det ger $317^\circ - 180^\circ = 137^\circ$ och $137^\circ - 180^\circ = -43^\circ$.



Figur 16. Arcadahusets bottenplan och väderstrecken. /19/

För att kunna optimera solpanelsystemet på Arcadahusets tak måste man ta i beaktande både upplägget för det nuvarande arrangemanget och fastighetens egenskaper. De nuvarande ställningarna som panelerna är monterade i är inte justerbara utan de är avsedda att användas i en fast 10° lutningsvinkel i en öst-västlig riktning. Det betyder att de inte går att använda om man vill installera panelerna i en brantare vinkel.

I det här arbetet har man valt att använda en ställning med en justerbar lutningsvinkel. Ställningen som tillverkas av Orima-Tuote Oy är av modellen AK3. Ställningen kan beroende på takmaterialet endera fästas i taket eller monteras med ballaster. Ställningen har en justerbar lutningsvinkel på 20–45°. I figur 17 ses en måttritning av ställningen. /20/

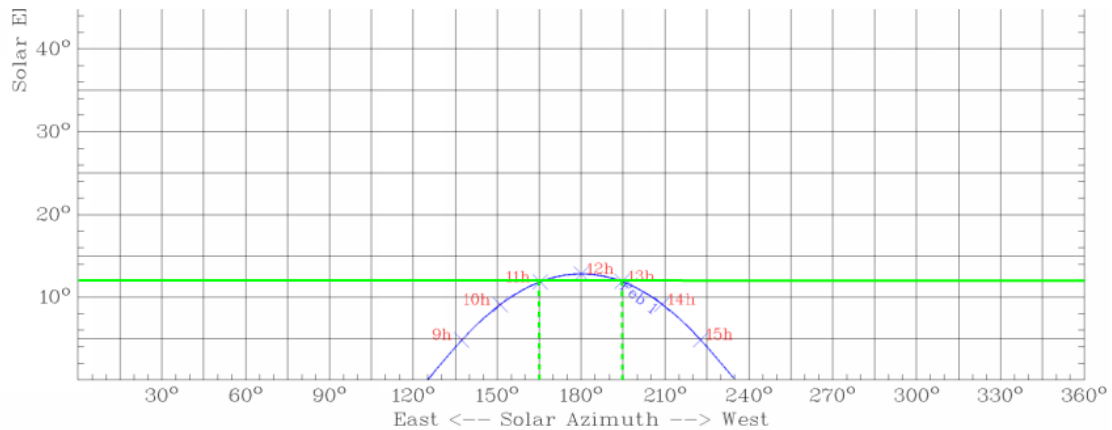


Figur 17. Orima AK3 justerbar installationsställning för solpaneler. /20/

Som man ser i figur 16 är Arcadahusets huskropp inte vänd rakt söderut utan mera mot sydost. Det i kombination med att det ovanför ”torgen” mellan D- och E- samt E- och F-blocken finns takfönster som avgränsar takytan gör att man i det här arbetet har valt att placera raderna av solpaneler vinkelrätt mot Arcadahusets huskropp. Det ger en azimutvinkel för anläggningen på -43° . Det här har man gjort eftersom det bildas naturliga utrymmen för panelraderna mellan takhuvar och takfönster. Det gör även installationen av panelerna lättare. En azimutvinkel som avviker från 0° med mindre än 45° påverkar inte heller den årliga energiproduktionen påtagligt.

Även när det gäller val av lutningsvinkeln för solpanelerna måste man beakta det nuvarande utgångsläget. I det här fallet måste man främst beakta panelernas skuggande effekt och den vindlast som de utsätts för. Enligt tumregeln för att maximera årsproduktionen (breddgraden -20°) är den optimala lutningsvinkeln i Helsingfors $60^\circ - 20^\circ = 40^\circ$. För att försäkra sig om att alla paneler ryms på taket och för att minska deras vindfång har man i det här arbetet dock valt att avvika från den optimala vinkeln, och valt att använda en lutningsvinkel på 24° som passar den valda ställningen.

För att kunna räkna ut på vilket avstånd panelraderna bör installeras behöver man förutom lutningsvinkeln också veta solhöjden över horisonten och solens azimutvinkel. Om man följer riktlinjen att solpanelerna inte ska skugga varandra mitt på dagen under hela året måste man ta reda på vad solhöjden är under vintersolståndet. I figur 13 kan man avläsa att solhöjden i Helsingfors är endast ungefär $6,5^\circ$ den 21 december under vintersolståndet. Om man använder sig av en solhöjd på $6,5^\circ$ när man räknar ut avståndet mellan panelraderna leder det dock till onödigt långa avstånd, speciellt eftersom man i det här fallet måste ta i beaktande att alla 476 solpaneler ska rymmas på taket. Under vintermånaderna är solstrålningen i Finland inte speciellt riklig och i figur 4 kan man avläsa att antalet soltimmar i januari och december är endast ungefär 40 timmar i månaden. I det här arbetet har man därför valt att använda en solhöjd på 12° över horisonten och att betrakta solhöjden från februari framåt för att bestämma avståndet mellan panelraderna. Det betyder att solpanelerna helt eller delvis skuggar varandra när solhöjden är under 12° . I figur 18 ser man att solen är ovanför 12° i Helsingfors mellan kl. 11 och 13 den 1 februari. Man ser också att solen då har en azimutvinkel på $\pm 15^\circ$ från sydlig riktning.



Figur 18. Solhöjden i grader över Helsingfors den 1 februari. /15/

När man vet alla parametrar som behövs för att bestämma radavståndet d mellan solpanelerna kan man räkna ut det enligt formel 1. Solpanelernas längd l är 0,99 m, lutningsvinkeln β är 24° , solhöjden över horisonten γ_s är 12° och solens azimutvinkel Ψ_s är 15° .

$$d = 0,99 \text{ m} \times \cos(24^\circ) + \frac{1 \text{ m} \times \sin(24^\circ)}{\tan(12^\circ)} \cos(15^\circ) = 2,73 \text{ m}$$

Avståndet mellan panelraderna blir alltså minst 2,73 m mätt från den främre kanten på solpanelen till nästa solpanel enligt figur 12. På Arcadahusets tak finns det också andra objekt som kan skugga panelerna som måste tas i beaktande. Runt takkanten går det en upphöjning som har en höjd på ungefär 0,4 m. Även avståndet till takfönstren mellan D- och E- samt E- och F-blocken måste beaktas. Takfönstren har en höjd på ungefär 1,5 m. För att räkna ut minimiavståndet L till de skuggande objekten kan man använda formel 2 när man vet höjden på de skuggande objekten och solhöjden γ_s som är den samma som används för att bestämma radavstånden.

$$L_{takkant} = \frac{0,4 \text{ m}}{\tan(12^\circ)} = 1,88 \text{ m}$$

$$L_{takfönster} = \frac{1,5 \text{ m}}{\tan(12^\circ)} = 7,06 \text{ m}$$

På basis av de uträknade radavstånden mellan solpanelerna och avståndet till de skuggande objekten på Arcadahusets tak har man i det här arbetet gjort en principritning för ett alternativt arrangemang av solpanelerna (se bilaga 5).

5.1 Installation och vindlaster

Arcadahuset har ett platt tak med en ytbeläggning av filt som täcks med ett lager grus. Eftersom man bör undvika att skada ytbeläggningen är det i princip uteslutet att ankra fast panelerna i takmaterialet. I det här arbetet har man därför valt att använda en flytande konstruktion med ballaster. För att kunna uppskatta hur stora ballaster som behövs måste man räkna ut hurdana vindlaster som panelerna utsätts för. Det kan man göra enligt den process som beskrivs i kapitel 4.1.

För att räkna ut hurdana vindlaster som solpanelerna utsätts för måste man alltså först bestämma i vilken terrängklass som anläggningen befinner sig. Arcadahuset ligger i Arabiastranden som är bredvid Gammelstadsfjärden, som inte direkt är öppet hav men som nog kan antas höra till terrängklass 1. Det är inte heller långt till vad som kan kallas öppet hav och därmed hör till terrängklass 0. Eftersom det är svårt att avgöra var gränsen för terrängklasserna går har det i det här arbetet valts att använda klass 0.

Som bärverksfaktor $c_s c_d$ används i det här arbetet 1,0 eftersom det antas att solpanelerna har en egenfrekvens under 5 Hz.

För att få reda på formfaktorn c_f för solpanelerna måste man alltså först räkna ut deras effektiva slankhet λ enligt tabell 2. Panelerna som används har en bredd på 1,96 m och höjden på en panel installerad i 24° vinkel är 0,5 m med ställning enligt figur 17. Eftersom höjden för den här installationen är under 15 m blir $\lambda=2 h/b$, alltså $\lambda = 2 \times \frac{0,5}{1,96} = 0,51$.

När man vet den effektiva slankheten måste man ännu räkna ut sidoförhållandet d/b för installationen. I figur 17 kan man avläsa att djupet hos installationen är ungefär 1,06 m och bredden är samma som ovan, alltså 1,96 m. Sidoförhållandet blir då $\frac{1,06}{1,96} = 0,54$. När man vet slankheten och sidoförhållandet kan formfaktorn c_f avläsas från tabell 3. För den här installationen blir formfaktorn $c_f = 1,37$.

För att få reda på vindhastighetstrycket $q_p(h)$ behöver man veta takets höjd. Arcadahuset har 5 våningar vid A-, B- och C-blocken men endast 4 våningar vid D-, E- och F-blocken. I det här arbetet har det valts att endast räkna ut vindlasten för den högre delen av byggnaden var vindhastighetstrycket är större. Takets höjd ovanför marken är där ungefär 20 m. I det här arbetet antas också att marken inte lutar avsevärt runt byggnaden. Således kan vindhastighetstryckets egenvärde $q_{p0}(z)$ användas. Från tabell 4 kan då avläsas att vindhastighetstrycket för terrängklass 0 är $q_{p0} = 1,24 \text{ kN/m}^2$.

Arean A_{ref} sett från vindens riktning får man genom att räkna bredden gånger höjden. Arean A_{ref} blir då för den här installationen $1,96 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 0,98 \text{ m}^2$.

När man sätter in alla faktorer i formel 3 får man den totala vindkraften F_w som en solpanel utsätts för.

$$F_w = 1 \times 1,37 \times 1,24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 0,98 \text{ m}^2 = 1,67 \text{ kN/panel}$$

Det här värdet kan användas för att uppskatta den ballast som behövs för att hålla en solpanel på plats och kan jämföras med det egenvärde för snölast på marken som gäller i södra Finland på $2,5 \text{ kN/m}^2 / 16$, s 98/. I verkligheten bör man ändå räkna ut vindlasten för hela panelrader och bestämma ballasten enligt det. Det är också värt att notera att vindlasterna inte nödvändigtvis är lika stora på hela taket.

5.2 Jämförelse av energiproduktion

För att kunna jämföra energiproduktionen för det nuvarande arrangemanget med det alternativa arrangemanget har man i det här arbetet använt simuleringsverktyget PVGIS som det redogörs för i kapitel 4.2 För alla simuleringar i det här arbetet har som solstrålningens databas använts PVGIS-SARAH, som paneltyp har kristallint kisel använts, som systemförluster har 14 % använts vilket PVGIS ger som förval, och som installationsposition har fristående installation använts.

För simuleringen av det nuvarande upplägget av solpanelerna antas att hälften av panelerna har en azimutvinkel på 137° och hälften en azimutvinkel på -43° . Vidare antas att alla har en fast lutningsvinkel på 10° . Eftersom panelerna är riktade åt olika håll måste två simulationer utföras med $74,97 \text{ kW}_p$ som effekt för att få ut den totala energiproduktionen.

I tabell 5 ses resultat av simuleringen med PVGIS för det nuvarande arrangemanget. Värdena visas i kWh per månad för de båda azimutvinklarna skilt och summan av de båda visas på nedersta raden. Den totala energiproduktionen för det nuvarande upplägget blir då $110\,200 \text{ kWh}$ i året. Detta kan jämföras med den uppskattning av en årlig produktion på $125\,000 \text{ kWh}$ som det redogörs för i kapitel 2.1.

Tabell 5. Energiproduktionen i kWh månadsvis för nuvarande arrangemang.

Azi- mut	Jan	Feb	Mars	April	Maj	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totalt
-43	385	1350	4300	7000	10100	10300	10300	7870	4680	2230	524	183	59222
137	161	772	3110	5950	9250	9710	9640	6980	3690	1390	256	69	50978
Totalt	546	2122	7410	12950	19350	20010	19940	14850	8370	3620	780	252	110200

För det alternativa arrangemanget har alltså alla solpaneler i anläggningen en azimutvinkel på -43° och en lutningsvinkel på 24° . Den totala effekten för anläggningen är $149,94 \text{ kW}_p$.

I tabell 6 ses resultatet av simuleringen med PVGIS för det alternativa arrangemanget. Värdena visas i kWh per månad med den totala årsproduktionen i den sista kolumnen. Den totala energiproduktionen för det alternativa arrangemanget blir alltså 125 469 kWh i året. Simuleringen beaktar dock inte det faktum att raderna skuggar varandra under vissa solhöjder.

Tabell 6. Energiproduktionen i kWh månadsvis för alternativt arrangemang.

Azimut	Jan	Feb	Mars	April	Maj	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totalt
-43	1170	3420	9800	14900	20700	20600	20700	16400	10300	5400	1450	629	125469

I tabell 7 ses en jämförelse av energiproduktionen mellan det nuvarande arrangemanget och det alternativa arrangemanget. Som man kan se i tabell 7 är den månatliga ökningen av energiproduktionen störst på våren i mars och april och på hösten i september och oktober. Den totala ökningen av årsproduktionen uppgår till 15 269 kWh, en ökning på 14 %.

Tabell 7. Jämförelse av energiproduktionen i kWh mellan nuvarande arrangemang och ett alternativt arrangemang.

Arrange- mang	Jan	Feb	Mars	April	Maj	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Totalt
Nuva- rande	546	2122	7410	12950	19350	20010	19940	14850	8370	3620	780	252	110200
Optimerat	1170	3420	9800	14900	20700	20600	20700	16400	10300	5400	1450	629	125469
Förän- dring	624	1298	2390	1950	1350	590	760	1550	1930	1780	670	377	15269

6 ANALYS

I det här arbetet har man visat att det är möjligt att höja den årliga energiproduktionen för solpanelanläggningen på Arcadahusets tak. Det skulle förutsätta att de nuvarande ställningarna byts ut och att en större del av takytan skulle användas för panelerna.

Med en livslängd på minst 25 år för en solpanelanläggning i allmänhet blir effekten av en årlig ökning av energiproduktionen på 14 % avsevärd. Det är också värt att beakta att den största ökningen av produktionen placerar sig på de månader då det är mest aktivitet i fastigheten.

De vindlaster som räknats ut i det här arbetet är grova uppskattningar för en panel och ska tas som sådana. För att räkna ut det verkliga behovet av ballaster för installationen skulle det krävas noggrannare uträkningar av en konstruktionsplanerare.

I det här arbetet har man inte beaktat de ekonomiska aspekterna för optimeringen. För att kunna avgöra om det är lönsamt eller inte att ändra det nuvarande upplägget skulle det vara skäl att göra en jämförelse mellan kostnaderna för att arrangera om solpanelerna och den nytta som kan fås av en ökad energiproduktion. Vidare kunde man också undersöka ytterligare alternativa arrangemang av solpanelerna.

7 SAMMANDRAG

Det här examensarbetet har forskat i Yrkeshögskolan Arcadas solpanelanläggning. Anläggningen som installerades år 2017 består av 476 solpaneler och har en total effekt på 150 kW_p. Panelerna är riktade mot nordväst och sydost med en lutningsvinkel på 10°. Anläggningen väntas producera 125 MWh energi årligen.

Målet med arbetet var att undersöka om ett alternativt arrangemang av solpanelerna skulle vara möjligt, och att utreda hurdan inverkan på energiproduktionen det skulle ha. Arbetet gjordes ur ett tekniskt perspektiv och ekonomiska synvinklar beaktades inte. I arbetet användes både litteratur inom området och allmänt tillgängliga simuleringsverktyg för att göra analyser. Man bekantade sig med solenergi och solpaneler i allmänhet samt med olika faktorer som gäller för planering av solpanelanläggningar.

Som resultat av arbetet uppkom ett förslag till ett alternativt arrangemang av solpanelerna. Man valde att rikta alla paneler i en sydvästlig riktning med en lutningsvinkel på 24°. Man räknade också ut hurdana vindlaster som panelerna kan utsättas för och kom fram till att en panel kan utsättas för en vindkraft på 1,67 kN. I arbetet simulerade man energiproduktionen för det nuvarande arrangemanget och det alternativa arrangemanget. För det nuvarande arrangemanget uppgick energiproduktionen till 110 MWh om året, vilket kunde jämföras med den utlovade produktionen på 125 MWh om året. För det alternativa arrangemanget uppgick energiproduktionen till 125 MWh om året, vilket innebar en ökning på 14 %. Ökningen var störst på våren i mars och april och på hösten i september och oktober.

I arbetet visades det att ett alternativt arrangemang av solpanelerna var möjligt om man använde en större del av takytan för panelerna. Det alternativa arrangemanget visade sig ha en positiv inverkan på energiproduktionen.

KÄLLOR

- /1/ *Om Arcada*, Yrkeshögskolan Arcada. Tillgänglig: <http://www.arcada.fi/sv/om-arcada/bakgrund>
Hämtad: 10.4.2018.
- /2/ *Arcadahuset*, Yrkeshögskolan Arcada, Tillgänglig: <http://start.arcada.fi/sv/arcadahuset>
Hämtad: 10.4.2018.
- /3/ *Solpaneler ska stå för en tiondel av Arcadas energiförbrukning*, Yrkeshögskolan Arcada. Tillgänglig: <https://www.arcada.fi/sv/aktuellt/solpaneler-ska-sta-en-tiondel-av-arcadas-elforbrukning>
Hämtad: 10.4.2018.
- /4/ Rae Perälä. 2017, *Aurinkosähköä*, Tallin: Alfamer/Karisto Oy, 152 s.
- /5/ Bruno Erat, Vesa Erkkilä, Christer Nyman, Kimmo Peippo, Seppo Peltola, Hannu Suokivi. 2008, *Aurinko-opas*, Borgå: Soltekniska föreningen rf, 208 s.
- /6/ *Country and regional maps*. Photovoltaic Geographical Information System. Tillgänglig: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index_c.html
Hämtad: 10.4.2018
- /7/ *Aurinkoenergia*. 2010, Suntekno Oy, 8 s. Tillgänglig: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/aurinkoenergia.pdf>
Hämtad: 7.4.2018.
- /8/ Markku Tahkokorpi, Bruno Erat, Pekka Hänninen, Christer Nyman, Asko Rasinkoski, Mats Viljander. 2016, *Aurinkoenergia Suomessa*, Riga: Into Kustannus, 207 s.
- /9/ Konrad Mertens. 2013, *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*, John Wiley & Sons, Incorporated, New York. Available from: ProQuest Ebook Central. [5 April 2018].
- /10/ *Banking on sunshine: World added far more solar than fossil fuel generating capacity in 2017*. UN Environment. Tillgänglig: <http://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/banking-sunshine-world-added-far-more-solar-fossil-fuel-power>
Hämtad: 10.4.2018.
- /11/ *Aurinkopaneelit*. 2010, Suntekno Oy, 9 s. Tillgänglig: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf>
Hämtad: 7.4.2018.

- /12/ *Aurinkosähköteknologiat*. Helsinki university of technology. Tillgänglig: <http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/pv/pv-tekno.html>
Hämtad: 16.4.2018
- /13/ Nuria Martín-Chivelet. 2016, Photovoltaic potential and land-use estimation methodology, *Energy*, Volume 94, s. 233-242. Tillgänglig: ScienceDirect.
Hämtad: 9.4.2018.
- /14/ *About sun path charts*. University of Oregon. Tillgänglig: <http://solardat.uoregon.edu/AboutSunCharts.html>
Hämtad: 21.4.2018
- /15/ *Sun Path Chart Program*. University of Oregon. Tillgänglig: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>
Hämtad: 6.4.2018.
- /16/ *RIL 201-1-2017 suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat*. 2017, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry, Helsingfors: Grano Oy, 210 s.
- /17/ *Presentation*. Photovoltaic Geographical Information System. Tillgänglig: Photovoltaic Geographical Information System
Hämtad: 18.4.2018
- /18/ *Performance of grid-connected PV*. Photovoltaic Geographical Information System. Tillgänglig: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP
Hämtad: 23.4.2018
- /19/ *Karta över Helsingfors*. Helsingfors stad. Tillgänglig: <http://kartta.hel.fi/#>
Hämtad: 10.4.2018
- /20/ *Aurinkopaneelikiinnikkeet*. Orima-Tuote Oy. Tillgänglig: http://www.orima.fi/files/4915/1694/9921/Orima_AK_3_Aurinkopaneelin_asennuskolmio_20-45.pdf
Hämtad: 22.4.2018

Jinkosolar jkm320pp-72

www.jinkosolar.com



JKM320PP-72

305-320 Watt

POLY CRYSTALLINE MODULE

Positive power tolerance of 0/+3%

ISO9001:2008, ISO14001:2004, OHSAS18001 certified factory.
IEC61215, IEC61730 certified products.










(4BB)



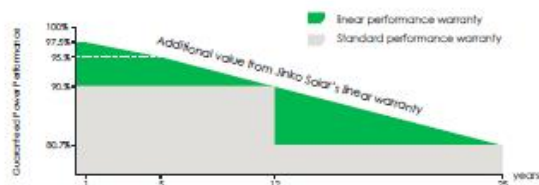


KEY FEATURES

- 
4 Busbar Solar Cell:
 4 busbar solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.
- 
High Power Output:
 Polycrystalline 72-cell module achieves a power output up to 320Wp.
- 
Anti-PID Guarantee:
 Limited power degradation of Eagle module caused by PID effect is guaranteed under 60°C/88% RH condition for mass production.
- 
Low-light Performance:
 Advanced glass and surface texturing allow for excellent performance in low-light environments.
- 
Severe Weather Resilience:
 Certified to withstand: wind load (2400 Pasad) and snow load (5400 Pasad).
- 
Durability against extreme environmental conditions:
 High salt mist and ammonia resistance certified by TÜV NORD.
- 
Temperature Coefficient:
 Improved temperature coefficient decreases power loss during high temperatures.

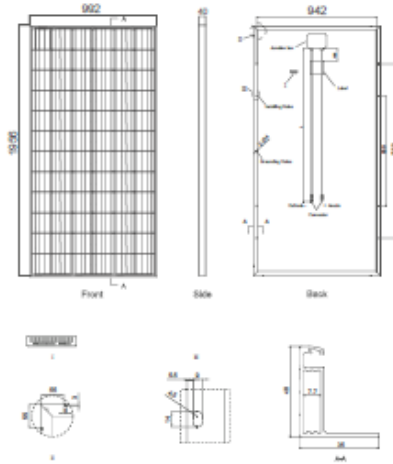
LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

10 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty



Bilaga 1 (2/2)

Engineering Drawings

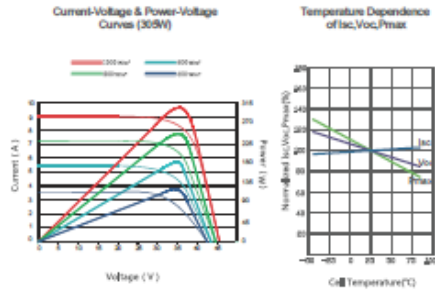


Packaging Configuration

(Two boxes → One pallet)

25pcs/ box, 50pcs/pallet, 600 pcs/40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	Poly-crystalline	156×156mm (6 inch)
No. of cells	72 (6×12)	
Dimensions	1956×992×40mm (77.01×39.05×1.57 inch)	
Weight	26.5 kg (58.4 lbs.)	
Front Glass	4.0mm, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass	
Frame	Anodized Aluminium Alloy	
Junction Box	IP67 Rated	
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² Length: 900mm or Customized Length	

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM305PP		JKM310PP		JKM315PP		JKM320PP	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	305Wp	226Wp	310Wp	231Wp	315Wp	235Wp	320Wp	238Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	36.8V	33.6V	37.0V	33.9V	37.2V	34.3V	37.4V	34.7V
Maximum Power Current (Imp)	8.30A	6.72A	8.38A	6.81A	8.48A	6.84A	8.56A	6.86A
Open-circuit Voltage (Voc)	45.6V	42.2V	45.9V	42.7V	46.2V	43.2V	46.4V	43.7V
Short-circuit Current (Isc)	8.91A	7.22A	8.96A	7.26A	9.01A	7.29A	9.05A	7.30A
Module Efficiency STC (%)	15.72%		15.98%		16.23%		16.49%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C							
Maximum system voltage	1000V(DC) (IEC)							
Maximum series fuse rating	15A							
Power tolerance	0~+3%							
Temperature coefficients of Pmax	-0.40%/°C							
Temperature coefficients of Voc	-0.30%/°C							
Temperature coefficients of Isc	0.06%/°C							
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C							

STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 🌡 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5

NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 🌡 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌬 Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

The company reserves the final right for explanation on any of the Information presented hereby. EN-MKT-320PP_rev2015

Solar edge extended power three phase inverters

solaredge

SolarEdge Extended Power Three Phase Inverters

SE15K - SE27.6K



INVERTERS

Specifically designed to work with power optimizers

- Superior efficiency (98%)
- Small, lightest in its class, and easy to install
- Built-in module-level monitoring
- Internet connection through Ethernet or Wireless
- IP65 – Outdoor and indoor installation
- Fixed voltage inverter, DC/AC conversion only
- Optional integrated DC Safety Unit - eliminates the need for external DC isolators (SE25K and SE27.6K only)
- Optional DC surge protection and DC fuses (SE25K and SE27.6K only)

Bilaga 2 (2/2)

solar edge SolarEdge Extended Power Three Phase Inverters SE15K - SE27.6K

	SE15K	SE16K	SE17K	SE25K	SE27.6K	
OUTPUT						
Rated AC Power Output	15000	16000	17000	25000	27600	VA
Maximum AC Power Output	15000	16000	17000	25000	27600	VA
AC Output Voltage - Line to Line / Line to Neutral (Nominal)	380 / 220 ; 400 / 230					Vac
AC Output Voltage - Line to Neutral Range	184 - 264.3					Vac
AC Frequency	50/60 ± 3					Hz
Maximum Continuous Output Current (per Phase)	23	25.5	26	38	40	A
Residual Current Detector / Residual Current Step Detector	300 / 30					mA
Grids Supported - Three Phase	3 / N / PE (WYE with Neutral)					V
Utility Monitoring, Islanding Protection, Configurable Power Factor, Country Configurable Thresholds	Yes					
INPUT						
Maximum DC Power (Module STC)	20250	21600	22950	33750	37250	W
Transformer-less, Ungrounded	Yes					
Maximum Input Voltage	900					Vdc
Nominal DC Input Voltage	750					Vdc
Maximum Input Current	22	23	23	37	40	Adc
Reverse-Polarity Protection	Yes					
Ground-Fault Isolation Detection	700kΩ Sensitivity					
Maximum Inverter Efficiency	98					%
European Weighted Efficiency	97.6	97.7	97.7	98	98	%
Nighttime Power Consumption	< 2.5					W
ADDITIONAL FEATURES						
Supported Communication Interfaces ^H	RS485, Ethernet, Zigbee (optional), Wi-Fi (optional), Built-in GSM (optional)					
DC SAFETY UNIT (OPTIONAL)						
2-pole Disconnection	N/A					1000V / 40A
DC Surge Protection	N/A					Type II, field replaceable
DC Fuses on Plus & Minus	N/A					Optional, 20A
Compliance	N/A					UTE-C13-712-1
STANDARD COMPLIANCE						
Safety	IEC-62103 (EN50178), IEC-62109, AS3100					
Grid Connection Standards ^H	VDE-AR-N-4103, G59/3, AS-4777, EN 50438, CEI-021, VDE 0126-1-1, CEI-016 ^H , BDEW ^H					
Emissions	IEC61000-6-2, IEC61000-6-3, IEC61000-3-11, IEC61000-3-12					
RoHS	Yes					
INSTALLATION SPECIFICATIONS						
AC Output	Cable Gland - diameter 13-21					mm
DC Input	2 MC4 pairs		3 MC4 pairs; with optional DC safety unit: cable glands - diameter 5-10mm			
Dimensions (HxWxD)	540 x 315 x 260					mm
Dimensions with Safety Unit (HxWxD)	N/A					773 x 315 x 260
Weight	33.2					kg
Weight with Safety Unit	N/A					48
Operating Temperature Range	-20 - +60 (M40 version -40 - +60)					°C
Cooling	Fan (user replaceable)					
Noise	< 50					dBA
Protection Rating	IP65 - Outdoor and Indoor					
Bracket Mounted (Bracket Provided)						

^H Refer to Datasheets -> Communications category in Downloads page for specifications of optional communication options: <http://www.solaredge.com/groups/support/downloads>

^H For all standards refer to Certifications category in Downloads page: <http://www.solaredge.com/groups/support/downloads>

^H Model SE27.6K only

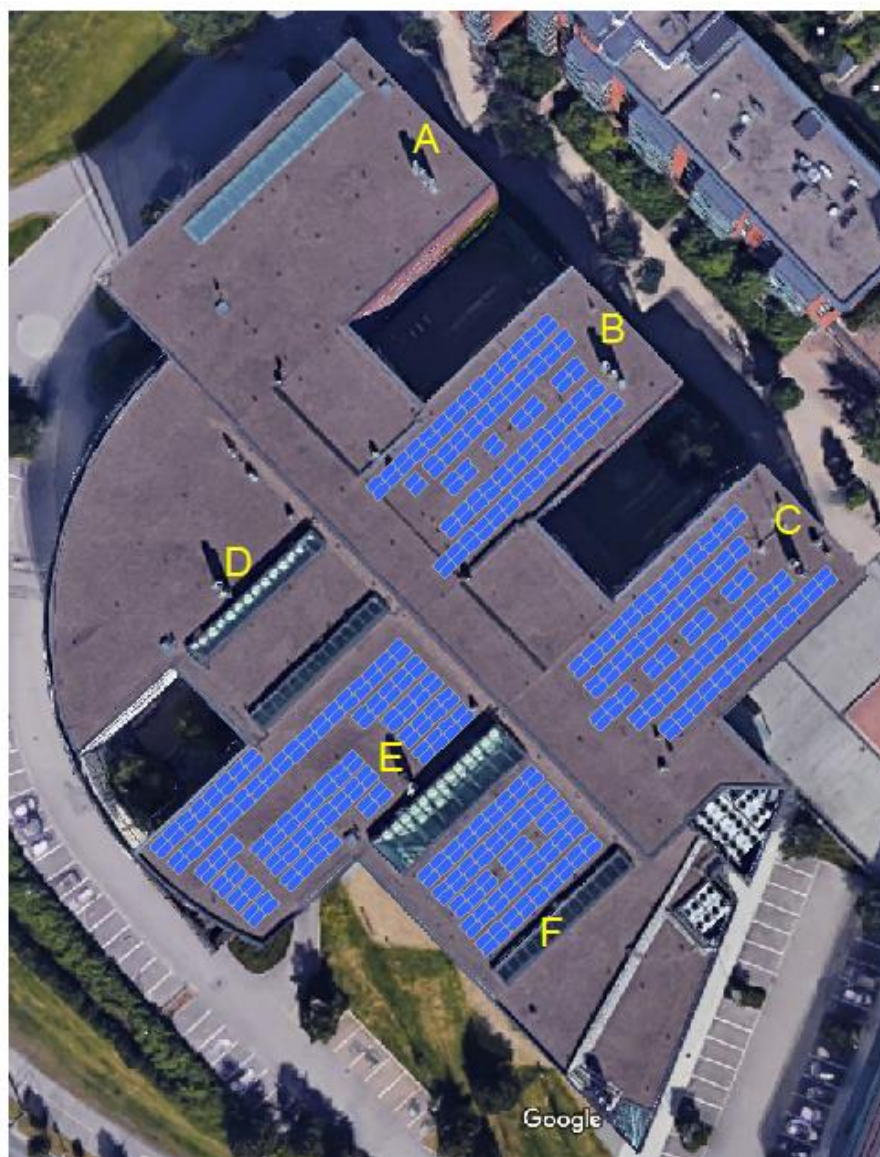


© SolarEdge Technologies, Inc. All rights reserved. SOLAREEDGE, the SolarEdge logo, OPTIMIZED BY SOLAREEDGE are trademarks or registered trademarks of SolarEdge Technologies, Inc. All other trademarks mentioned herein are trademarks of their respective owners. Date: 12/2015, V.01. Subject to change without notice.

Terrängklasserna enligt EN 1991-1-4

	
<p>Maastoluokka 0: Meri, avoimen meren äärellä oleva rannikkoalue.</p>	<p>Maastoluokka I: Järvi tai alue, jolla on vähäistä kasvillisuutta eikä esteitä.</p>
	
<p>Maastoluokka II: Alue, jolla on matalaa kasvillisuutta, kuten heinää tai ruohoa ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), jotka ovat vähintään esteen 20-kertaisen korkeuden etäisyydellä toisistaan.</p>	<p>Maastoluokka III: Alue, jolla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä esteitä, jotka ovat esteen 20-kertaista korkeutta lähempänä toisiaan (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä).</p>
<p>Maastoluokka IV: Alue, jolla vähintään 15 % alasta on rakennusten peitossa ja joiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m.</p>	

Principritning över nuvarande arrangemang



Principritning över alternativt arrangemang

