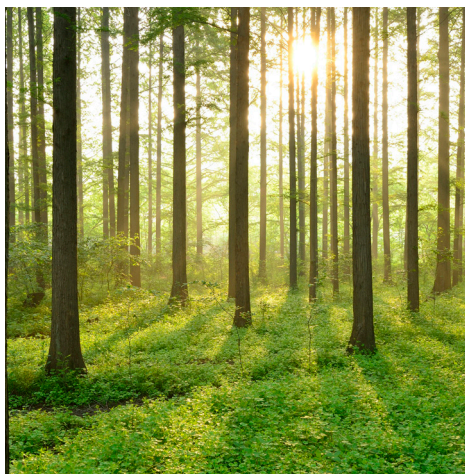


SKUGGNINGSHANDBOK

RAPPORT 2017:385



Skuggningshandbok

Design av solcellssystem för
minimerad inverkan av skuggning

ANNA BENGTTSSON

ERIK HOLM

DAVID LARSSON

BJÖRN KARLSSON

ISBN 978-91-7673-385-1 | © Energiforsk 2017

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Projektet "Design av PV-system för minimerad inverkan av skuggning" har genomförts inom ramen för Solel-programmet som drivits i samverkan mellan Energimyndigheten och näringslivet.

Projektet startades för att det tidigare saknats en lättillgänglig handbok riktad till arkitekter och beställare som beskriver principer för att minimera skuggningens negativa effekter på solelsproduktionen.

Projektet har genomförts av Högskolan i Gävle, akademin för teknik och miljö, under ledning av Björn Karlsson. I projektgruppen har även Anna Bengtsson, Erik Holm och David Larsson ingått.

Förhoppningen är att rapporten kan ge ett betydelsefullt bidrag till branschens kompetensuppbyggnad och därmed underlätta solcellsutbyggnaden i Sverige.

Sammanfattning

Solel är en viktig teknik vid omställningen till ett förnybart energisystem. De kommande åren väntas antalet solcellsinstallationer öka avsevärt, och allt fler solcellsmoduler kommer att placeras där skuggning ibland förekommer. För att kunna bygga effektiva och välfungerande solcellssystem krävs kännedom om hur denna skuggning kan hanteras.

Att minimera inverkan från skuggning är komplext, och det är svårt att utfärda generella rekommendationer, men väldigt övergripande gäller följande:

- Vid nybyggnation eller takomläggningar är det lämpligt att placera skuggande föremål så att inverkan på en eventuell solcellsanläggning minimeras.
- Idag finns bypass-dioder i alla solcellsmoduler. Tillsammans med effektoptimerare i växelriktaren begränsar de kraftigt inverkan från skuggning. Genom förbikoppling sjunker enbart utbytet från de skuggade modulerna, så länge detta ger högst effekt. Därmed förblir de oskuggade modulerna ofta opåverkade.
- Om flera moduler är skuggade vid samma tidpunkt kan det vara lämpligt att sammankoppla dessa till en egen effektoptimerare, exempelvis i växelriktaren. På så vis kan de bidra till solelproduktionen även vid skuggning. Om de däremot blandas med oskuggade moduler kommer de ofta att förbikopplas, varpå de inte bidrar till solelproduktionen.
- I system med flera parallellkopplade strängar, där skuggade moduler inte kan sammankopplas, är det lämpligt att fördela dem jämnt över de olika strängarna om detta är möjligt.
- Decentraliserade effektoptimerare, som moduloptimerare eller modulväxelriktare, är verkningslösa vid vissa varianter av skarpa skuggor, exempelvis från kanter. Däremot kan de fylla en funktion vid splittrad skuggning, exempelvis från träd.

I och med komplexiteten, och mängden av parametrar som kan varieras, fokuserar denna handbok på att gå igenom det aktuella kunskapsläget, både när det gäller skuggningens inverkan på utbytet och när det gäller teknik som kan användas för att minimera skuggningsförluster. Förhoppningen är att ge läsaren så goda kunskaper om skuggning av solcellsmoduler att denne själv kan dra slutsatser för hur skuggningen i det aktuella solcellssystemet bör hanteras.

Summary

Solar energy will play an important role in the transition to a global renewable energy system, and the amount of photovoltaic installations are expected to increase significantly in the coming years. Consequently, more and more solar cells will be shaded and comprehensive knowledge of shading effects will be crucial when planning high performance solar electricity systems for the future.

Shading of PV systems is a very complex subject, and it is difficult to give detailed recommendations. Anyhow, some general conclusions can be drawn:

- New buildings and roofs shall, as far as possible, be designed to minimize the impacts of shadings on PV modules. This can for example be done by placing ventilation equipment on the northern parts of the roof.
- Nowadays, there are at least one bypass diode in almost all models of PV modules. Together with maximum power point trackers (MPPTs), often integrated in the inverters, the influence of shading is strongly reduced. With bypass diodes, only the yield from the shaded modules is decreasing, as the diodes often let the current pass by these modules. The rest of the string remains unaffected.
- If many modules are shaded at the same time of the day, it may be appropriate to connect them to their own MPPT, for example in the inverter. With this solution, the modules will produce electricity even though they are shaded. If they instead are mixed with unshaded modules, they will often be bypassed and not contribute as much to the electricity production.
- In systems with several strings connected in parallel, where the shaded modules cannot have their own MPPT it is, if possible, advisable to distribute them evenly across the various strings.
- Decentralized MPPTs, i.e. micro inverters or power optimizers, are most often not effective on sharp edged shadings, e.g. from buildings. However, they may increase the yield when the shadings are more fragmented, e.g. from trees.

Due to the complexity of shaded PV systems, this guide focuses on the current state of knowledge, both in terms of how shading affects the yield and in terms of technology that can be used to minimize shading losses. Hopefully you as a reader get such a deep understanding of shadings in general, that you can estimate the shading effects, and analyze how to minimize them, on your particular PV system.

Good luck!

Innehåll

Summary	5
1 Inledning	8
2 Sol och skuggning	9
2.1 Solinstrålningens komponenter	9
2.2 Skuggning från damm, snö och avföring från fåglar	11
2.3 Permanenta skuggor	11
2.4 Solhöjder och skuggors längd	13
2.4.1 Solhöjd och effektiv solhöjd	13
2.5 Val av skuggvinkel	15
2.5.1 Skuggning mellan rader	16
2.5.2 Tumregler	17
3 Från halvledare till solcell	19
3.1 Halvledare	19
3.1.1 Dopning	20
3.1.2 PN-övergångar och dioder	21
3.2 Solcellen och dess Funktion	23
3.2.1 Solcellers beteende visas i IV-kurvor	24
3.2.2 Elproduktionens beroende av strålning och temperatur	25
3.2.3 Seriekoppling av solceller	26
4 Skuggning av solceller	28
4.1 Optimeringsutrustning	28
4.1.1 Bypass-dioder	28
4.1.2 Effektoptimerare på sträng- eller systemnivå	30
4.1.3 Moduloptimerare	31
4.1.4 Modulväxelriktare	32
4.1.5 Kostnadsjämförelse mellan olika teknikval	33
4.2 Skuggningens påverkan på modulen	34
4.2.1 Homogen skugga på kristallin kiselmodul	34
4.2.2 Heterogen skugga på kristallin kiselmodul	35
4.2.3 Skuggning av tunnfilmmoduler	36
4.2.4 Modulernas orientering	36
4.3 Skuggade seriekopplade strängar	38
4.4 Skuggade parallellkopplade strängar	39
4.5 Effektoptimerare och modulväxelriktare	40
4.6 Exempel olika konfiguration av samma anläggning	45
5 Fallstudier i PVsyst	46
5.1 Skuggning mellan rader	46
5.2 Kantskuggning villa	48
5.3 Skugga från avluftningsrör på lutande och platta tak	49

5.4	Kantskuggning platt tak	51
5.5	Skuggningsmodellering i PVsyst	53
5.5.1	Ingen skugga	53
5.5.2	Linjär skugga	53
5.5.3	Enligt strängar	53
5.5.4	Detaljerad enligt modullayout	54
5.6	Utvärdering av resultat i PVsyst	54
5.6.1	Förslag för bättre skuggningsberäkningar	55
6	Sammanfattande slutsatser	56
7	Appendix 1: Effektiva solhöjder i Sverige	59
8	Appendix 2: Årlig Instrålningsfördelning	61
9	Referenser	64

1 Inledning

Människans påverkan på klimatet domineras av koldioxidutsläpp från användning av fossila energikällor. Solceller är en del av lösningen, men för att kunna bygga effektiva och välfungerande system krävs kännedom om hur skuggning kan hanteras.

För att begränsa de klimatpåverkande koldioxidutsläppen är det avgörande att ställa om till ett förnybart energisystem, där solenergi kommer att vara en viktig beståndsdel. Internationella energirådet, IEA, menar exempelvis att solen kommer att vara den främsta källan till elektricitet i världen år 2050. Även i Sverige finns stor potential och Energimyndigheten anser att 5–10 % av elen bör komma från solen år 2040. Det är bra mycket mer än den tusendel solenergi som finns i den svenska elmixen idag.

När antalet solcellssystem växer kommer allt fler solceller att installeras på existerande byggnader med skuggningsproblem. För att kunna bygga kostnadseffektiva och välfungerande solcellsanläggningar är det då avgörande att veta hur skuggningen påverkar systemen, och vilka åtgärder som kan vidtas för att minimera problematiken.

I grunden är solceller väldigt känsliga för skuggning. Det beror på att de vanligen seriekopplas för att öka spänningen. Konsekvensen blir att den cell som nås av lägst solinstrålning även begränsar utbytet från övriga celler i serien. Därmed är det i första hand lämpligt att, i så stor utsträckning som möjligt, undvika skuggning. Ibland kan det ändå finnas skäl att placera solceller även på skuggade ytor. Hur stora konsekvenser skuggningen verkligen får beror då på en mängd faktorer, såsom vid vilken tidpunkt den förekommer, hur strängningen är gjord och vilka tekniska komponenter, som bypass-dioder och optimerare, som används för att hantera skuggningen. Att förstå dessa komplexa faktorer är avgörande för att kunna hantera och minimera inverkan från skuggning.



Figur 1 Solceller i Varberg placerade med avstånd till träd, och mellan rader, för att minimera inverkan från skuggning.

2 Sol och skuggning

Solcellsanläggningar påverkas betydligt mer av skugga än vad solvärmeanläggningar gör. Hur stora konsekvenser skuggningen får beror på skuggans egenskaper och på hur solcellsanläggningen, och omgivande objekt, utformas för att minimera produktionsförluster till följd av skuggning.

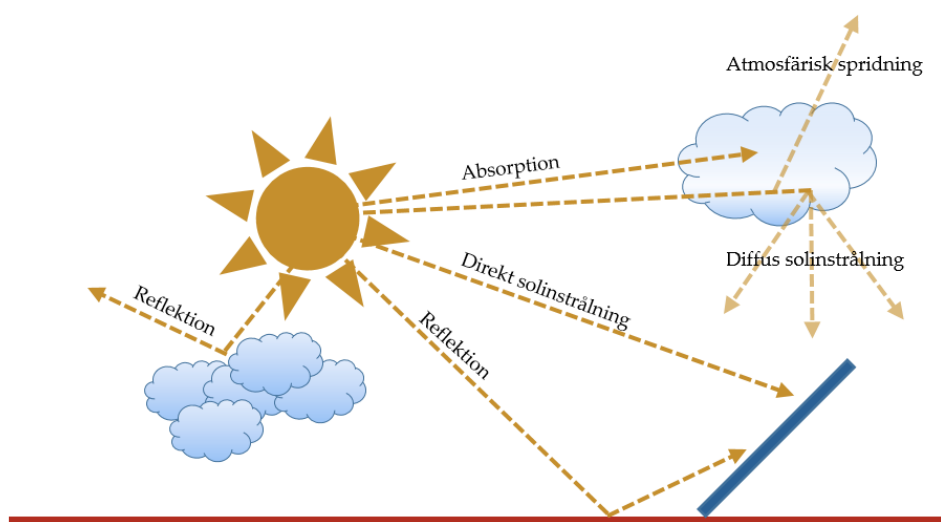
2.1 SOLINSTRÅLNINGENS KOMPONENTER

Den solinstrålning som når en solcellsmodul, och som begränsas av eventuell skuggning, kan delas in i olika komponenter. Globalstrålningen är den totala mängden solstrålning som träffar en yta, exempelvis solcellsmodulen. Den består i sin tur av direkt solinstrålning, diffus solinstrålning och reflekterad solinstrålning. Den direkta solinstrålningen lyser rakt mot solcellsmodulen, och är således mycket låg under molniga dagar. Den diffusa solinstrålningen består av ljus som spridits av atmosfären eller reflekterats av moln, och den kommer således inte från en specifik riktning utan från hela himlavalvet. Denna strålning dominerar under molniga dagar, och gör att det blir ljust vid jordytan trots att solens direkta strålar inte kommer fram. Den reflekterade strålningen är strålning som studsar på något annat innan den når modulen, exempelvis mark eller byggnader. Exempelvis är reflektionen från omgivningen hög då det finns snö.



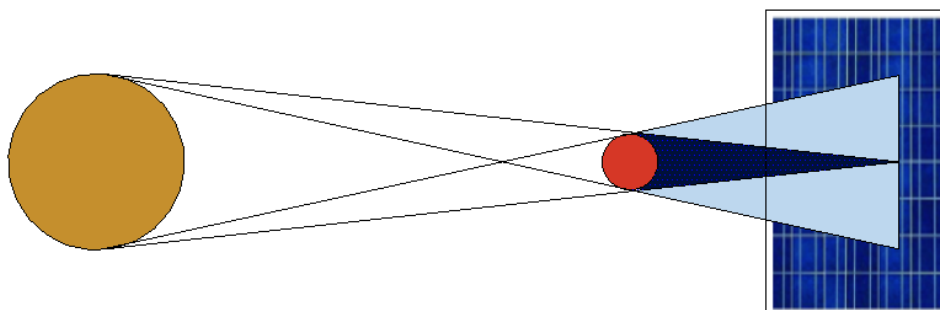
Figur 2 Solceller kan exempelvis skuggas av fläkttrum, luftningsrör eller snö. Av estetiska skäl kan det ändå vara rimligt att täcka hela ytor med solceller, trots skuggning, som på huset nederst till höger (Foto: Solkompaniet/A-hus).

Den diffusa solinstrålningen utgör ungefär hälften av globalstrålningen under ett år i Sverige¹. En solig dag kan den direkta komponenten däremot utgöra runt 90 % av den inkommande strålningen. Om en byggnad då skuggar bort den direkta komponenten finns i princip bara den diffusa delen kvar, varför energin som når solcellsanläggningen sjunker med cirka 90 %.



Figur 3 Solinstrålningens olika komponenter.

Skuggors utbredning beror på det skuggande objektets storlek och höjd, samt solens position på himlen. Vanligen delas skuggor från solen in i två delar, en kärnskugga och en halvskugga, se Figur 4. Ju närmre modulen det skuggande objektet befinner sig, desto mörkare blir skuggan som träffar solcellen. Kärnskuggan från ett närliggande objekt reducerar solinstrålningen med runt 60–80 %, medan minskningen bara är ungefär hälften så stor i halvskuggan². Den generella rekommendationen är därför att undvika kärnskuggning av solceller i den mån det går.



Figur 4 Ljusblå halvskugga och mörkblå kärnskugga.

¹ (Stridh 2015)

² (The German Energy Society 2013)

2.2 SKUGGNING FRÅN DAMM, SNÖ OCH AVFÖRING FRÅN FÅGLAR

Vissa skuggor är av tillfällig karaktär som kommer och går i perioder. Det är lämpligt att då och då undersöka solcellsanläggningen så att inga nya skuggor uppstått, exempelvis från löv, uppväxande vegetation eller avföring från fåglar, och i möjligaste mån avlägsna dessa.

Damm och nedsmutsning medför betydande skuggningsproblem i delar av världen, bland annat i vissa ökenområden. I Sverige är dessa problem dock i allmänhet obetydande³ och kan ofta minimeras genom upplutning av modulerna. Ju större upplutning, desto högre hastighet på det rengörande regnvattenflödet över modulerna. Maximal effekt fås vid en upplutning på runt 30 grader⁴.

Under vinterhalvåret skuggas solceller i delar av Sverige av snö. Detta sammanfaller dock med de månader då solinstrålningen på våra breddgrader är låg, vilket gör produktionsbortfallet obetydande. Framåt vårkanten, då solinstrålningen stiger, ökar modultemperaturen och snön glider oftast av. I vissa fall kan det dock ändå vara rimligt att fundera över hur inverkan från snö kan minimeras, exempelvis genom orienteringen av modulerna, se avsnitt 4.2.4. Det är även lämpligt att utforma snörasskydd så att skuggning minimeras, dels från snörasskydden i sig själva och dels från den snö som lägger sig på dem. Vanligen rekommenderas ett avstånd på nästan en meter mellan snörasskyddet och den lägsta modulen. Detta är även lämpligt för att undvika att en tungt lager snö, som sitter på snörasskyddet, trycker mot modulens nederkant.

2.3 PERMANENTA SKUGGOR

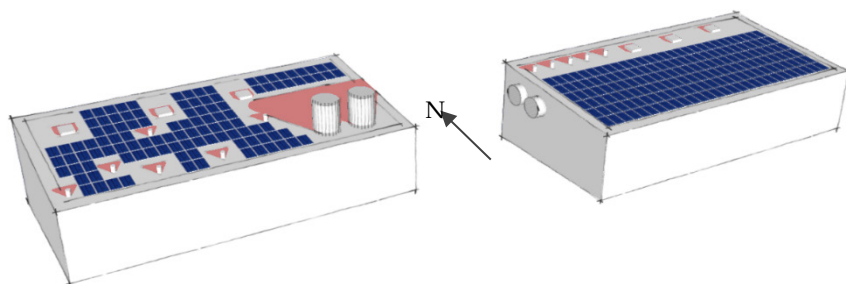
Permanent skuggor kommer vanligen från omgivande byggnader, ventilationsrum och andra påbyggnader, luftningsrör, takluckor, och träd. Dessutom uppstår intern skuggning mellan modulraderna i upplutade solcellsanläggningar.

Vid nybyggnation av solcellsanläggningar kan uppstickande föremål ibland hanteras så att betydande skuggor undviks, se figurerna 7a-c. Det kan exempelvis handla om att i möjligaste mån samla föremål och placera dem norr om solcellerna, eller om att utforma objekt så att de blir så låga som möjligt.

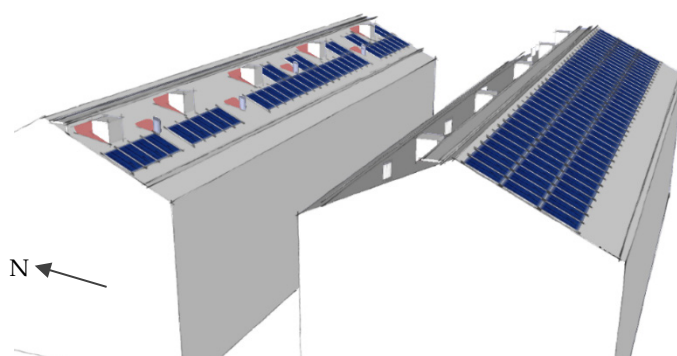
I övrigt bör avstånd till skuggande föremål beaktas vid utformning av solcellsanläggningar. Som vi ser längre fram i denna handbok går det idag att utforma solcellsanläggningar så att produktionsförluster minimeras, trots vissa skuggor. Ändå är det inte särskilt kostnadseffektivt att placera moduler alltför nära skuggande föremål, och vi ska nu titta närmare på hur dessa avstånd kan beräknas.

³ (Energiforsk u.d.)

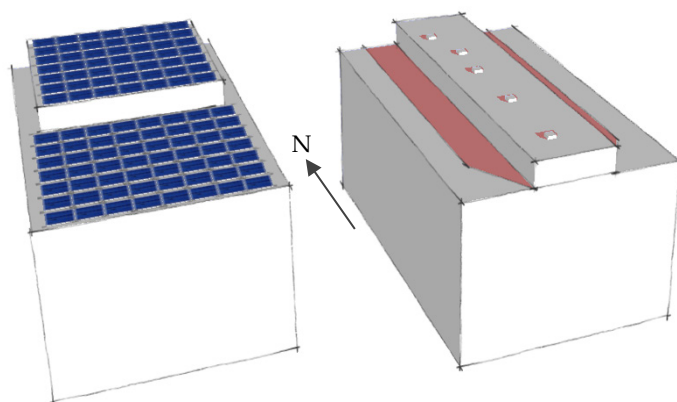
⁴ (The German Energy Society 2013)



Figur 7a Byggnaden till vänster har ventilation utspridd över taket vilket leder till en komplex mindre installation jämfört med den högra byggnaden där ventilation och skuggande objekt har förlagts till vägg samt samlats på norra delen av taket.



Figur 7b På det vänstra huset sitter ventilation på taket som vetter mot söder och snörasskyddet är placerat högt upp på taket. Det gör att endast ett mindre, komplext system kan installeras. På det högra huset har takstege och ventilation förlagts till det nordliga taket, vilket medför att större, enklare system kan installeras. Dessutom har snörasskyddet placerats närmare takfoten vilket gör att ytterligare en rad med solceller får plats.



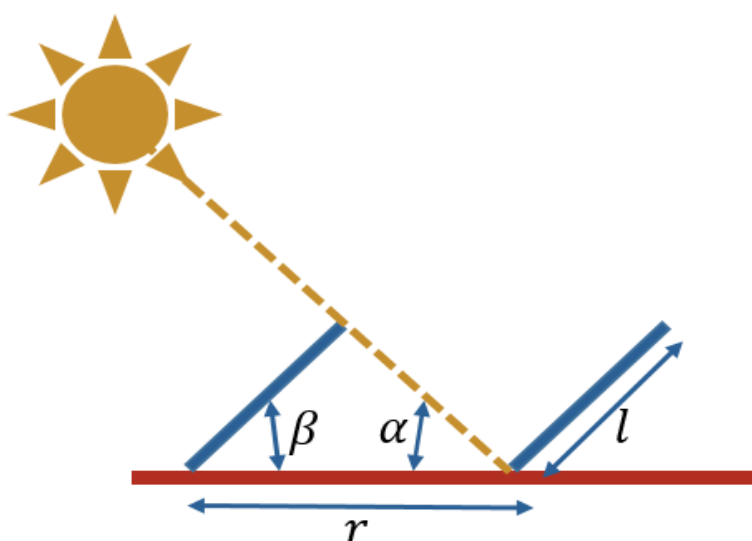
Figur 7c Den högra byggnaden har ett långsmalt fläkttrum som sträcker sig över hela taket vilket resulterar i små takytor som till stora delar är skuggade. Vänstra byggnaden har ett lika stort fläkttrum, placerat på norra delen av taket men betydligt bredare. Här finns bra ytor för solcellsinstallationer.

2.4 SOLHÖJDER OCH SKUGGORS LÄNGD

På grund av jordens rotation och jordaxelns lutning har solen olika infallsvinklar under dagen och under året. Skuggorna blir därmed olika långa. Det lämpliga avståndet mellan ett skuggande objekt och en solcellmodul beror på objektets höjd och placering, samt i vilken utsträckning man vill undvika skuggning av modulen.

2.4.1 Solhöjd och effektiv solhöjd

Skuggans längd beror av solhöjden, α , det vill säga vinkeln mellan horisonten och siktlinjen mot solen. Ofta används solhöjden för att beräkna skuggans längd i samma plan som solen.



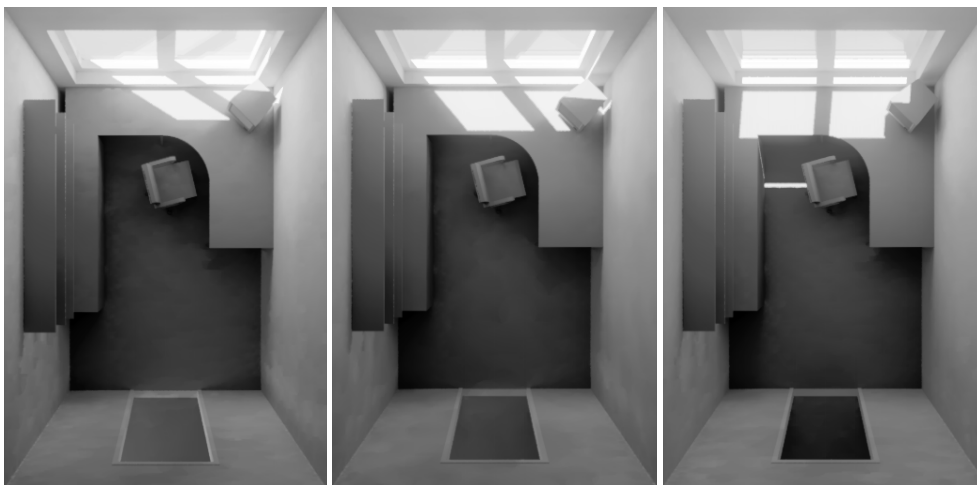
Figur 8 Definitioner: α =solhöjd, β =modullutning, r =radavstånd, l =modulens längd om stående moduler.

Exempelvis kan en given solhöjd, vinkelrätt mot modullraderna, användas tillsammans med modulupplutningen, β , och modul längden, l , för att beräkna ett lämpligt radavstånd, r . Vid detta radavstånd är solcellerna oskuggade, så länge solen står högre än den givna solhöjden. En sådan solhöjd kallas för skuggvinkel. Radavståndet beräknas med hjälp av följande ekvation:

$$r = l \cdot \left(\cos \beta + \frac{\sin \beta}{\tan \alpha} \right)$$

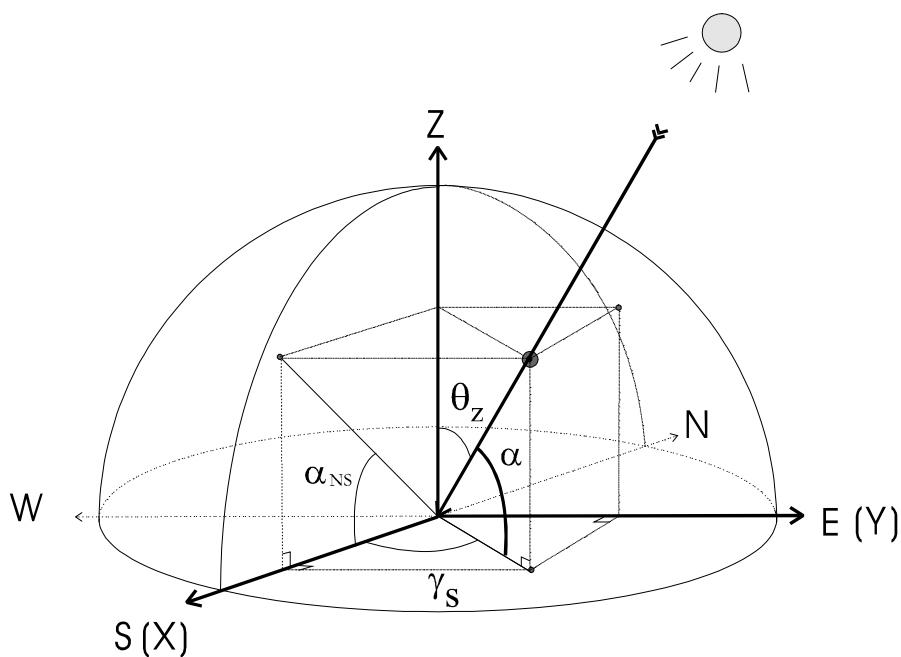
I vissa fall, då solen inte står precis i söder, kan det vara relevant att ta reda på skuggans utbredning i nord-sydlig riktning. Exempelvis kan det vara intressant om byggnader med öst-västlig utsträckning står söder om ett långsträckt solcellssystem i söderläge⁵. Skuggans utbredning i nord-sydlig riktning beräknas med hjälp av den effektiva solhöjden, vilket är den projicerade solhöjden mot det vinkelräta vertikalkplanet i nord-sydlig riktning. Höga effektiva solhöjder ger korta skuggor, och låga effektiva solhöjder ger långa skuggor. I figuren nedan syns en skugga från söderfönsters spröjsar. Hur långt in i rummet skuggan når, alltså rakt neråt i bilden, beror av den effektiva solhöjden.

⁵ (Jansson 2001)



Figur 9 Solljus och skuggor från ett söderfönster klockan 9, 10 och 12 vid sommarsolståndet. Solen når längst in i rummet klockan 12.00, när den effektiva solhöjden är som lägst. Söder är uppåt i bilden.

I bilden nedan pekar x-axeln rakt mot söder, medan z-axeln pekar mot zenit. X-Z-planet är således det vinkelräta vertikalanplanet i nord-sydlig riktning. Vinkeln α är solhöjden, γ_s är solens asimetvinkel och α_{NS} är den effektiva solhöjden.



Figur 10 Vinkeln α är solhöjden, γ_s är solens asimetvinkel och α_{NS} är den effektiva solhöjden.

I ett kartesiskt koordinatsystem kan solhöjden beskrivas med följande koordinater:

$$X = \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma_s)$$

$$Y = \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma_s)$$

$$Z = \sin(\alpha)$$

Den effektiva solhöjden kan sedan beräknas med hjälp av den konventionella solhöjden och solens asimut.

$$\tan(\alpha_{NS}) = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma_s)} = \frac{\tan(\alpha)}{\cos(\gamma_s)}$$

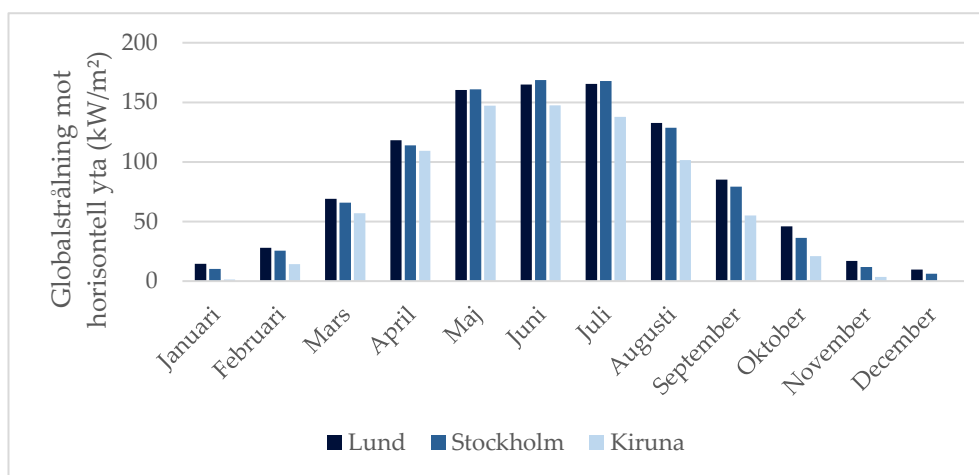
Den effektiva solhöjden, α_{NS} , varierar under dagen och året, se Appendix 1. Vid dagjämningarna är den effektiva solhöjden konstant, vilket innebär att skuggor faller lika långt, längs det vinkelräta vertikalkplanet i nord-sydlig riktning, under hela dagen. På sommaren är den effektiva solhöjden som störst på morgonen och kvällen, vilket innebär kortare skuggor då och längre skuggor mitt på dan. På vintern däremot är den effektiva solhöjden som störst mitt på dagen, vilket innebär kortare skuggor då och längre skuggor på morgonen och kvällen.

2.5 VAL AV SKUGGVINKEL

Vid design av solcellsanläggningar har den valda skuggvinkeln stor påverkan på hur ofta modulerna skuggas och hur stora avstånd som antas för att undvika skuggning. I Sverige finns ingen allmänt vedertagen praxis för vilken skuggvinkel som bör antas⁶, och den varierar vanligen mellan 12 och 20 grader.

Vilken vinkel som är lämplig varierar mellan olika anläggningar och olika platser i landet. Genom att studera solens instrålning vid olika tidpunkter kan den som designar solcellsanläggningar dock få vägledning till vilken skuggvinkel som kan vara rimlig för det aktuella systemet.

I Figur 11 syns globalstrålningen under året mot en horisontell yta i Lund, Stockholm och Kiruna. På samtliga orter träffas ytorna av allra mest solenergi under mars till september. Under dessa månader är det runt 90 % av årsenergin som träffar den horisontella ytan. Motsvarande siffra för en yta, som lutats upp 40° mot söder, är cirka 85 %. Detta innebär att solceller ger som mest energi under sommarhalvåret, ungefär mellan dagjämningarna.



Figur 11 Globalstrålning mot horisontell yta på olika orter.

⁶ (Stridh 2016)

Solinstrålningen varierar även över dagen, och därmed spelar skuggning vid olika tidpunkter olika roll. I Appendix 2 presenteras globalinstrålningen mot en horisontell yta, respektive en yta som lutar 40° mot söder, vid olika solhöjder i Lund, Stockholm och Kiruna. Dessutom presenteras även den direkta solstrålningens andel av globalstrålningen vid varierande solhöjder. Vid skuggning bortfaller huvudsakligen den direkta delen av solinstrålningen. Om det skuggande objektet skärmar av betydande delar av himlen påverkas dock även den diffusa delen av instrålningen. Därmed det kan vara relevant att beakta både den globala och direkta instrålningen, för att förstå skuggningens inverkan.

Enligt figurerna i Appendix 2 inkommer den största delen av globalstrålningen mot en horisontell yta i Stockholm mitt på dagen när solhöjden är över 20 grader. Detta inträffar ungefär mellan dagjämningarna, vilket stämmer väl överens med 1 som också anger att det är då globalinstrålningen är som störst. För Lund och Kiruna gäller att merparten av globalinstrålningen inkommer då solhöjden är över cirka 20 respektive 15 grader.

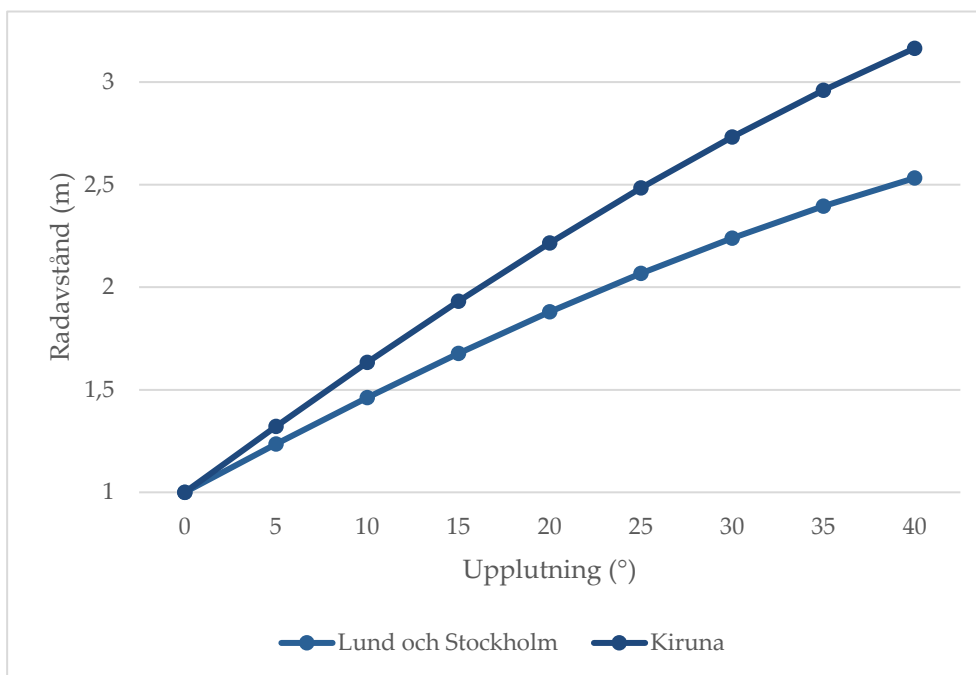
Enligt figurerna i Appendix 2 når runt 60 % av globalstrålningen en horisontell yta i Stockholm mellan klockan 9 och 15 under sommarhalvåret, se den svarta rutan. Andelen är ungefär samma i både Lund och Kiruna. Dessutom bör det beaktas att solcellsanläggningar vanligen inte byggs med kraftig begränsning av instrålningen både på förmiddagen och eftermiddagen. En horisontell yta i Stockholm nås av över 70 % av globalstrålningen mellan klockan 9 och klockan 15.

Skuggning påverkar huvudsakligen den direkta delen av instrålningen. Om skuggning avskärmar den direkta instrålningen vid alla andra tidpunkter än mellan 9 och 15 under sommarhalvåret, innebär det ett bortfall på cirka 20 % av den globalstrålning som når solcellsanläggningen under året.

Enligt ovanstående resonemang är det således viktigast att undvika skuggning under timmarna mitt på dagen under sommarhalvåret. Ju längre norrut, desto större andel av solinstrålningen inkommer under sommarmånaderna. I norr kommer en större del av solinstrålningen från lägre solhöjder, vilket gör att en högre modullutning är lämplig. Låga solhöjder kräver också längre avstånd till skuggande föremål.

2.5.1 Skuggning mellan rader

I solcellsanläggningar med upplutade rader kan radavståndet, för att undvika intern skuggning mellan modulraderna, beräknas med hjälp av skuggvinkeln. Om denna sätts till 20 grader i Lund och Stockholm samt 15 grader i Kiruna, och en modul med sidan 1 meter används, krävs radavstånd enligt figuren nedan för att undvika skuggning mellan raderna.



Figur 12 Radavstånd för att undvika skuggning mellan 9 och 15 under sommarhalvåret för moduler upplutade rakt mot söder. Observera att modulens bredd är 1 m, varför radavståndet blir 1 m vid 0° upplutning (då ligger modulerna kant i kant).

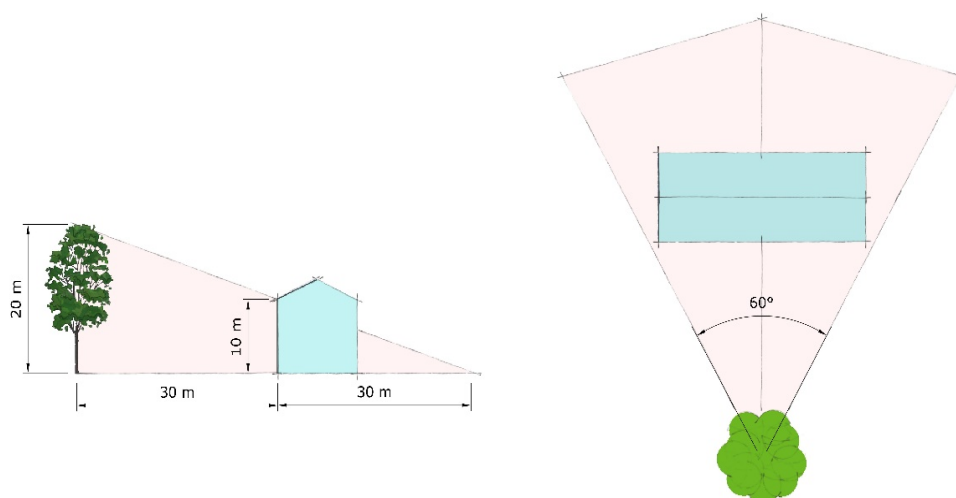
Med en modullutning på 15 grader krävs då ett avstånd, från framkant till framkant på moduleraderna, på cirka 1,7 meter i Lund och Stockholm och 1,9 meter i Kiruna. Observera att när modulerna ligger platt krävs ett radavstånd på 1 meter, vilket är lika med sidan på modulen. De ligger alltså kant i kant.

2.5.2 Tumregler

Ibland nämns vissa tumregler för hur skuggor kan hanteras. En sådan är att solceller inte bör placeras på ytor där avståndet till ett skuggande objekt är mindre än tre gånger höjdskillnaden dem emellan, i en sektor som är +/- 30 grader relativt norr, se Figur 13. Det är nyttigt att känna till vad denna tumregel innebär.

Tumregeln att avståndet mellan skuggande objekt och modul bör vara minst tre gånger höjdskillnaden är dem emellan, bygger på ett antagande om en skuggvinkel på 18 grader. Ett avstånd på två gånger höjdskillnaden innebär en skuggvinkel på cirka 27 grader, medan fyra gånger höjdskillnaden innebär en skuggvinkel på 14 grader.

Tumregeln att den valda skuggvinkeln är relevant i en sektor som är +/- 30 grader relativt norr från det skuggande objektet baseras på jordens rörelse runt solen. Vinkelhastigheten är 15 grader per timme ($360^\circ/24h$), och således visar sektorn den yta där skuggan faller under fyra timmar mitt på dagen, alltså från omkring klockan 10 till 14 (normaltid). Den som vill veta var skuggan faller mellan 9 och 15 bör utgå från en sektor som är +/-45 grader relativt norr från det skuggande objektet.



Figur 13 En tumregel att inte placera solceller närmare än tre gånger det skuggande föremålets höjd i en sektor som är +/- 30 grader relativt norr.

3 Från halvledare till solcell

Solceller är fascinerande uppfinningar, som på ett nästan magiskt vis omvandlar ljus från solen till el som vi människor kan använda.

Energien som finns i ljus, till exempel solljus, anses bestå av så kallade fotoner. Energien hos en foton beror av dess frekvens, ν , och Plancks konstant, h :

$$E = \nu \cdot h$$

Ljuset hastighet, c , beräknas som produkten av dess frekvens, ν , och våglängd, λ :

$$c = \nu \cdot \lambda$$

Vilket betyder att energin hos en foton även kan uttryckas som en funktion av våglängden:

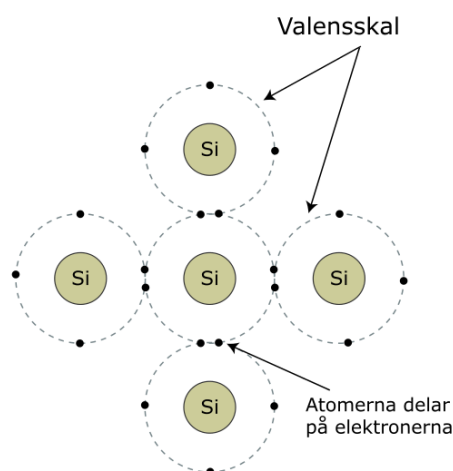
$$E = \frac{c \cdot h}{\lambda}$$

Ju kortare våglängd ljuset har, desto mer energi kan det således avge momentant. För att kunna använda energin i fotonerna, krävs dock ett sätt att fånga in den och nyttiggöra den, exempelvis genom solceller som omvandlar solens ljus till elektricitet. Grunden till denna omvandling är ett halvledarmaterial, vanligen kisel, som är strukturerat så att det uppstår en spänning mellan fram- och baksidan när materialet är belyst⁷.

3.1 HALVLEDARE

Halvledare är material som inte leder ström vid låga temperaturer, men som börjar leda ström när temperaturen ökar eller när energi finns tillgänglig⁸. Halvledarmaterial är mycket vanliga i elektrisk utrustning, och huvudkomponenten i en solcell. Den vanligaste halvledaren kisel (med den kemiska beteckningen Si), med en viss inblandning av andra material.

Kislatomerna är bundna till varandra med kovalenta bindningar. Det är starka bindningar, som innebär att varje kiselatom, med fyra valenselektroner, delar elektroner med fyra andra kiselatomer, för att få ett fullt valensskal med åtta elektroner, se Figur 14. Vid den absoluta nollpunkten (-273,15 °C) är alla bindningarna intakta, det vill säga obrutna, och kiset fungerar som en isolator. Vid högre temperaturer,



Figur 14 Kovalenta bindningar mellan kiselatomer.

⁷ (Energiforsk u.d.)

⁸ (Francisco och Salvadores 2015)

eller när solljus träffar materialet, bryts bindningarna och elektroner frigörs. Elektronerna kan röra sig i materialet, vilket innebär att dess förmåga att leda ström ökar.

Hur mycket energi som krävs för att frigöra en elektron beror på materialets bandgap, det vill säga den energi som krävs för att flytta elektronen från valensbandet till ledningsbandet. För att maximera tillvaratagandet av solens energi tillverkas solceller av material med bandgap som gör det möjligt att absorbera en stor del av solstrålningens spektrum. Om en foton med för låg energi träffar materialet händer ingenting, medan en foton med för hög energi både ger upphov till en frigjord elektron och lite värme. Varje frigjord elektron lämnar ett utrymme bakom sig, som kallas för ett hål. Hålet kan fyllas av en annan närliggande elektron, som då lämnar sin bindning. Detta kräver normalt ingen extra energi, utan de hål som bildats kan flytta sig i materialet. På så vis beter sig hålen likt elektronerna, fast med positiv laddning.

Kisel har i rumstemperatur enstaka frigjorda elektroner och hål, men det rör sig fortfarande om ett så litet antal att ledningsförmågan är ytterst begränsad⁹. Därför måste kiset dopas för att kunna fungera som en solcell.

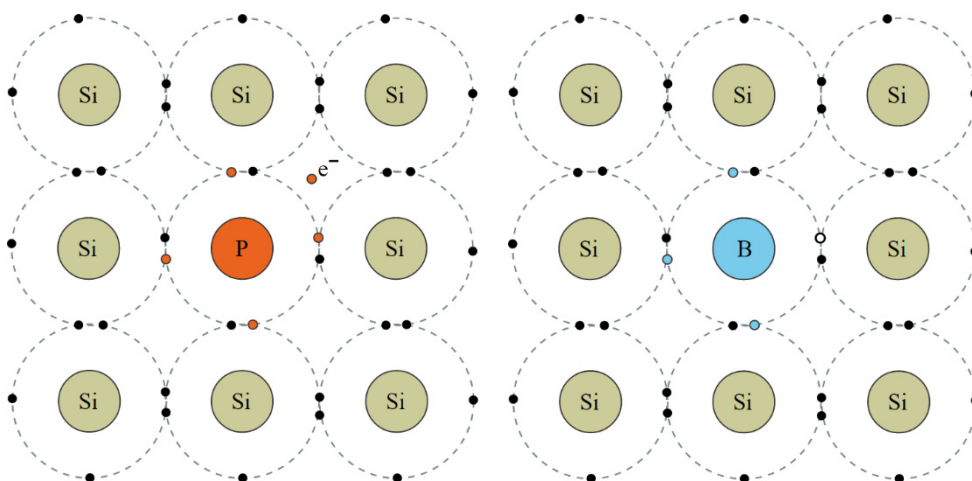
3.1.1 Dopning

Solceller består av två varianter av dopat kisel: N-dopat och P-dopat, se Figur 15. Själva dopingen innebär att laddningsbärare, i form av elektroner och hål, tillförs för att öka kislets ledningsförmåga vid rumstemperatur.

N-dopat kisel innehåller extra elektroner genom att ett störämne med fler valenselektroner än kisel, till exempel fosfor (P), har tillförts. Fosforatomer har fem valenselektroner, varav endast fyra kan skapa kovalenta bindningar till omgivande kiselatomer. Därmed är den överblivna elektronen fri, och kan bidra till materialets ledningsförmåga. Materialet kallas för N-dopat eftersom det har negativa laddningsbärare, men som helhet har det ingen laddning – det finns ju fortfarande lika många positivt laddade protoner i atomkärnorna som det finns negativt laddade elektroner runtomkring.

P-dopat kisel har istället extra hål eftersom ett störämne med färre valenselektroner än kisel har använts. Boratomer (B) har exempelvis tre valenselektroner, som kan bilda kovalenta bindningar till omgivande kiselatomer. På den fjärde platsen, där en elektron saknas, skapas istället ett hål. Materialet kallas för P-dopat eftersom det har positiva laddningsbärare, men som helhet har det ingen laddning.

⁹ (Bowden och Honsberg 2016)



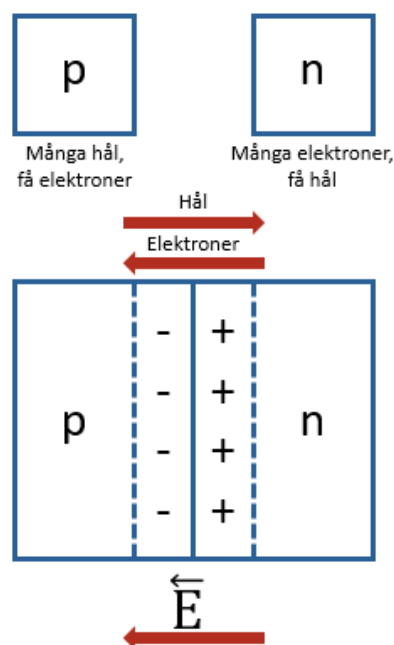
Figur 15 P-dopat och N-dopat kisel.

3.1.2 PN-övergångar och dioder

När ett N-dopat material får kontakt med ett P-dopat material skapas en PN-övergång precis i området där de två halvledartyperna möts. Det speciella med en PN-övergång är att den fungerar som en isolator, fastän de ingående halvledarmaterialen leder ström. Det är även möjligt att skapa PN-övergångar som leder ström i en riktning, men fungerar som isolatorer i den andra riktningen. En sådan PN-övergång kallas för en diod, och utgör grunden för solcellernas funktion.

När ett N-dopat material får kontakt med ett P-dopat material, kommer elektroner och hål att röra sig mellan halvledartyperna¹⁰. Rörelsen beror på två mekanismer:

- **Diffusion:** Molekyler och partiklar rör sig slumpvis så snart temperaturen är över den absoluta nollpunkten, vilket innebär att de med tiden kommer att förflytta sig från områden med stark koncentration (många partiklar av samma slag) till områden med svagare koncentration (färre partiklar av samma slag). Koncentrationsskillnaderna mellan områdena jämnas därmed ut.
- **Drift:** I ett elektriskt fält kommer partiklars rörelse bero av på fältets styrka och riktning. Elektroner rör sig i mot det elektriska fältet, medan hål rör sig i samma riktning som det elektriska fältet¹¹.



Figur 16 PN-övergång med laddningsseparation.

¹⁰ (Francisco och Salvadores 2015)

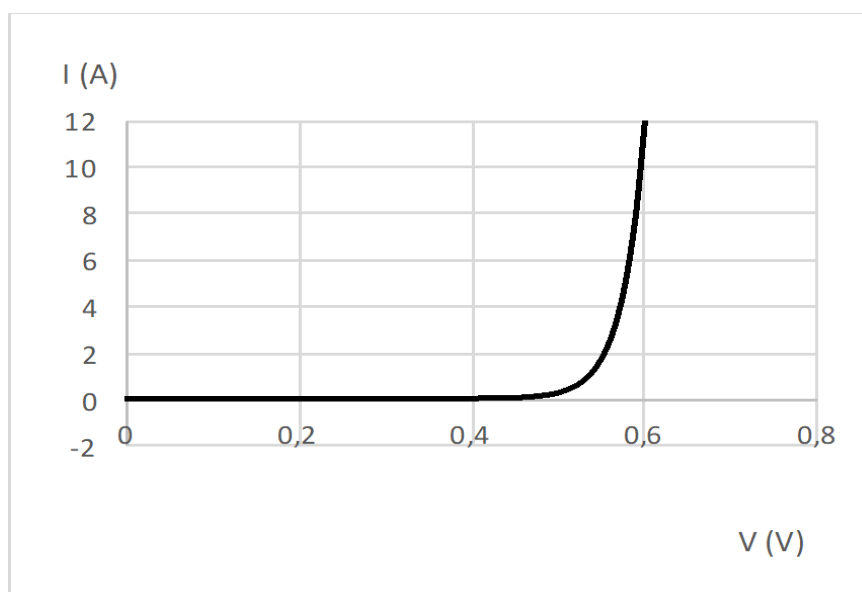
¹¹ (Bowden och Honsberg 2016)

Den N-dopade halvledaren har ett överskott på elektroner, som genom diffusion kommer att röra sig in i det P-dopade materialet. Där hittar elektronerna hål, som de rekombinerar med. Laddningsbäraren försvinner och atomerna blir negativt laddad. På samma vis kommer hål, från överskottet i den P-dopade halvledaren, att diffundera in i det N-dopade materialet och rekombinera med elektroner där. Laddningsbäraren försvinner och atomerna blir positivt laddad. Det bildas alltså ett område, en PN-övergång, utan laddningsbärare, men med en del som är positivt laddad och en del som är negativt laddad. Ett elektriskt fält, som motverkar diffusionen, byggs upp. När driftströmmen blivit lika stor som diffusionsströmmen är PN-övergången i jämvikt.

Om en framspänning läggs över PN-övergången påverkas jämvikten. Det elektriska fältet försvagas och diffusionsströmmen ökar exponentiellt med spänningen, vilket innebär att PN-övergången leder ström i den här riktningen.

Om en backspänning läggs över PN-övergången förstärks det elektriska fältet och i princip kan ingen ström passera. Om spänningen ökas tillräckligt mycket sker ett genombrott. PN-övergången börjar leda ström, men den skadas ofta samtidigt.

Figuren nedan beskriver karakteristiken hos en kiseldiod, det vill säga förhållandet mellan ström och spänning när en framspänning läggs över dioden.



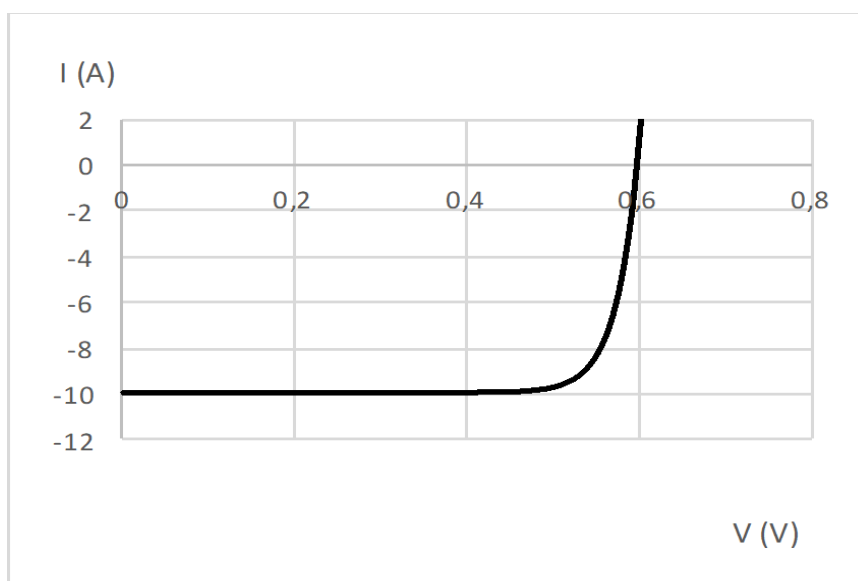
Figur 17 IV-kurvan för en diod i framspänningsriktningen.
En kiseldiod börjar leda ström vid cirka 0,6 V.

3.2 SOLCELLEN OCH DESS FUNKTION

Den grundläggande komponenten i en solcell är PN-övergången, som också innebär att solcellen är en diod, som endast leder ström i en riktning.

När solljus, eller mer precist fotoner med den rätta energinivån, träffar det N-dopade och det P-dopade halvledarmaterialet skapas frigjorda elektroner och hål i båda materialen. I en solcell kan de antingen gå in i utarmningsskiktet och rekombinera, vilket innebär att elektron-hål-paret därmed är borta, eller också kan fältet i PN-övergången användas för att separera elektroner från hål så att rekombination undviks. Om solcellens framsida kopplas samman med baksidan kan laddningsbärare istället ledas runt i kretsen, innan de rekombinerar, och på så vis är det möjligt att tillvarata strömmen¹². Den genererade strömmen går i diodens backriktning, vilket innebär att strömmen genom seriekopplade solceller begränsas av den cell som genererar minst antal elektroner. De elektriska kontakterna i solceller består av vanligen av en metallplatta på solcellens baksida och ett rutnät på solcellens framsida.

Eftersom solcellen är en diod, har den i mörker samma karakteristik som dioden i Figur 18. När solcellen träffas av ljus skiftas kurvan nedåt, och den belysta solcellens karakteristik ses i den fjärde kvadranten. När spänningen över dioden ökar blir diodströmmen större. Mer ström går då åt "fel håll" och mindre ström ut i ledningen. Vid tomgångsspänning rekombinerar alla elektroner.

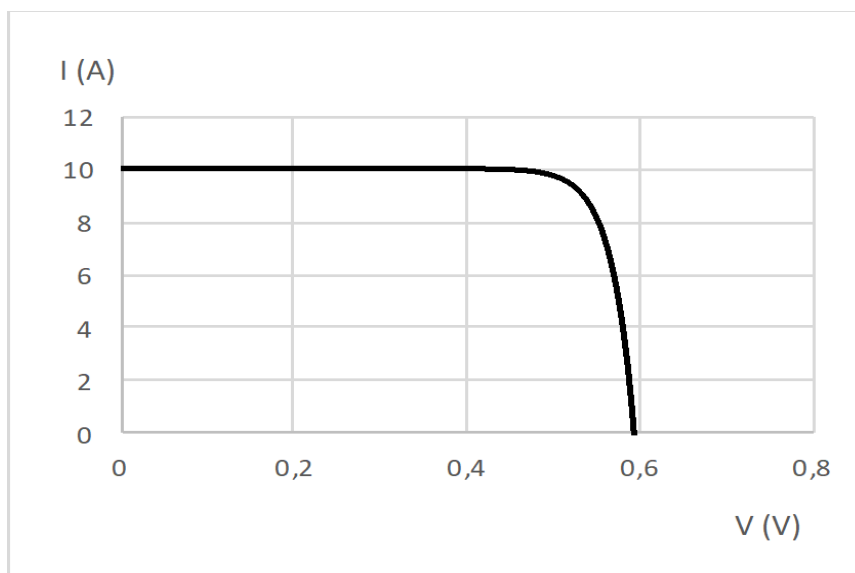


Figur 18 Då solens strålar träffar dioden skapas en ström i backriktningen. Denna skiftar kurvan nedåt.

¹² (Bowden och Honsberg 2016)

3.2.1 Solcellers beteende visas i IV-kurvor

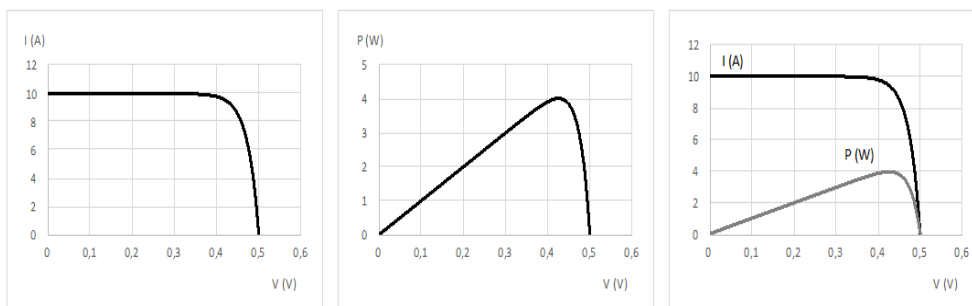
Solcellens beroende mellan ström och spänning, som syns i 19, är nödvändig att studera närmare för att förstå hur celler, moduler och hela system fungerar. Kurvan kallas för en IV-kurva, och vänds vanligen upp och ner för bättre överblick.



Figur 19 IV-kurvan i figur 17 vänd upp och ner.

Ibland skapas även en PV-kurva över hur effekten varierar med spänningen, eller en kombination av de båda.

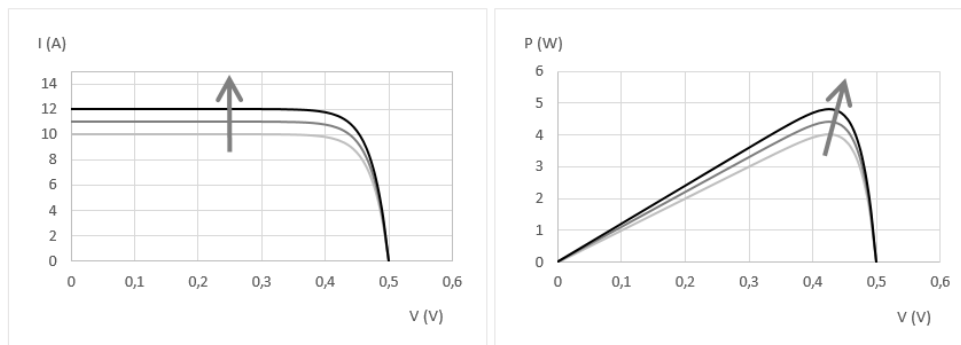
Maximal ström, så kallad kortslutningsström (I_{sc}), uppstår när spänningen är noll. Maximal spänning, så kallad obelastad spänning (V_{oc}) uppstår när strömmen är noll. Där emellan ligger maxeffektpunkten, Maximum Power Point (MPP), som är den punkt på kurvan där maximal effekt kan tas ut. När en solcell befinner sig i den punkten producerar den så mycket användbar energi, i form av el, som möjligt. Denna punkt är inte konstant, utan varierar precis som IV-kurvan medinstrålning och temperatur.



Figur 20 IV-kurva, PV-kurva och kombinerad graf.

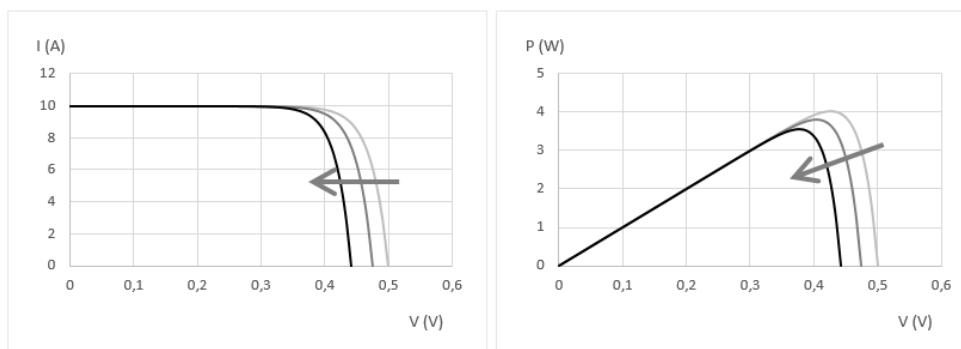
3.2.2 Elproduktionens beroende av strålning och temperatur

Solinstrålningen och temperaturen har stor påverkan på solcellens IV-kurva, och därmed också på hur mycket användbar energi solcellen producerar. Om övriga förutsättningar är konstanta kommer solcellens kortslutningsström (I_{sc}) att öka linjärt med solinstrålningen. IV-kurvan flyttas därmed uppåt, när solinstrålningen ökar, och maxeffektpunkten stiger också – vilket stämmer väl överens med att solceller ger mer elektricitet under soliga dagar än under molniga.



Figur 21 IV-kurvans och PV-kurvans beroende av solinstrålningen.

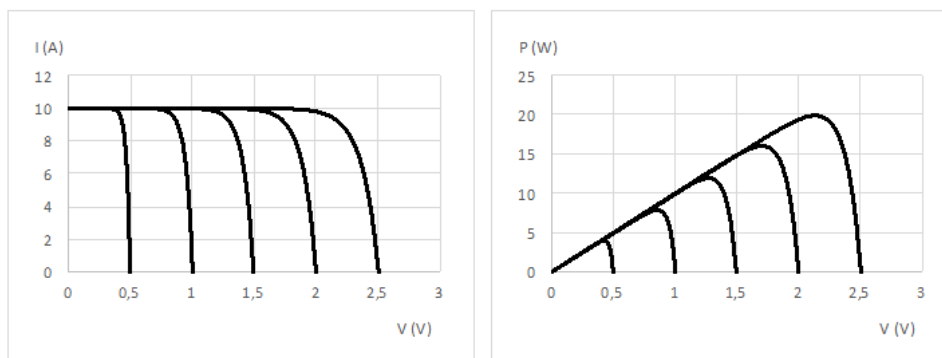
Om övriga förutsättningar är konstanta kommer däremot solcellens obelastade spänning (V_{oc}) att sjunka när temperaturen ökar. Vid stigande temperatur flyttas IV-kurvan därmed åt vänster, och maxeffektpunkten sjunker – vilket innebär att solceller ger mindre elektricitet under varma dagar än under kyligare dagar.



Figur 22 IV-kurvans och PV-kurvans beroende av temperaturen.

3.2.3 Seriekoppling av solceller

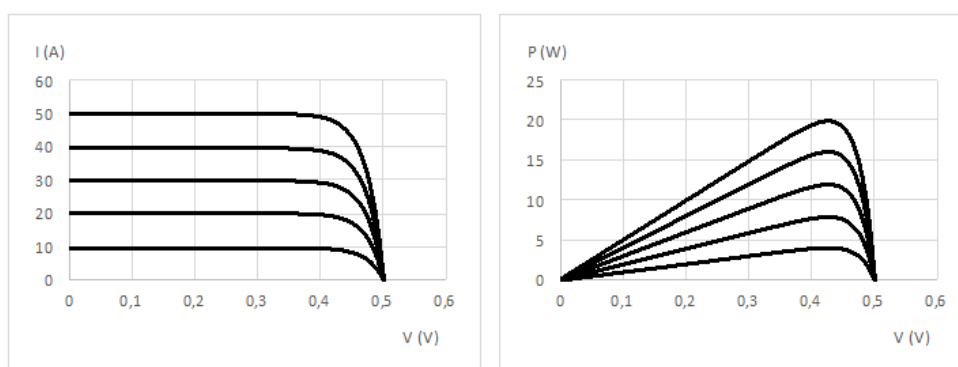
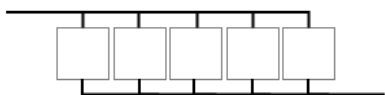
Vid seriekoppling av identiska celler genereras samma strömstyrka i alla celler och varje cell ger samma spänning som adderas.



Figur 23 IV-kurva och PV-kurva för seriekopplade solceller.

I Figur 23 ovan visas IV-kurvorna för fem seriekopplade solceller.

Vid parallellkoppling summeras strömmarna som genereras i varje cell.

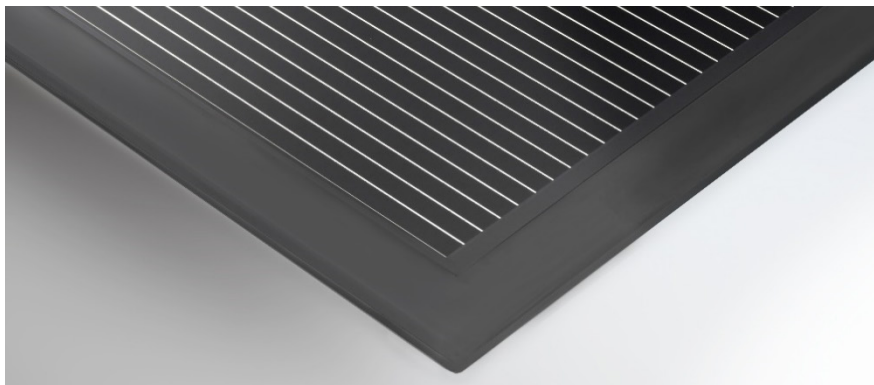


Figur 24 IV-kurva och PV-kurva för parallellkopplade solceller.

I Figur 24 ovan är fem solceller parallellkopplade.

Som synes i figurerna ovan är systemets maximala effekt lika, 20 W, både i den seriekopplade- och i den parallellkopplade kretsen. För att undvika höga strömmar, och istället få upp spänningen till en nivå där exempelvis växelriktaren

kan arbeta¹³, seriekopplas vanligen solcellsmoduler. En vanlig polykristallin kiselmodul innehåller vanligen 36 till 72 seriekopplade celler¹⁴, medan tunnfilmsmoduler kan innehålla fler än 150 seriekopplade celler¹⁵ som har samma längd som modulens långsida.



Figur 25 Hörnet på en tunnfilmsmodul. Varje svart rand är en cell, som är lika lång som modulens långsida.

Det är inte ovanligt med strängar som omfattar 22 seriekopplade moduler, som i sin tur består av vardera 60 seriekopplade solceller. Om cellerna har samma IV-kurvor som i figurerna ovan nås då en spänning på 660 V, medan den maxima strömmen bestäms av cellernas kortslutningsström som är 10 A.

¹³ (Energiforsk u.d.)

¹⁴ (The German Energy Society 2013)

¹⁵ (Solibro 2016)

4 Skuggning av solceller

Skuggning av solceller omges av en mängd myter, bland annat att skuggning av enskilda celler måste undvikas till varje pris – annars stryps strömmen genom hela strängen. I det här avsnittet kommer vi att se att så inte nödvändigtvis är fallet, även om myten bär på viss sanning.

Enligt 21 minskar strömmen linjärt med mängden ljus som träffar solcellen. Dessutom genereras, enligt Figur 23, samma strömstyrka i alla seriekopplade solceller. En skuggad cell kommer då att strypa strömmen i hela strängen. Denna negativa effekt kan minskas genom inkoppling av bypass-dioder.

4.1 OPTIMERINGSUTRUSTNING

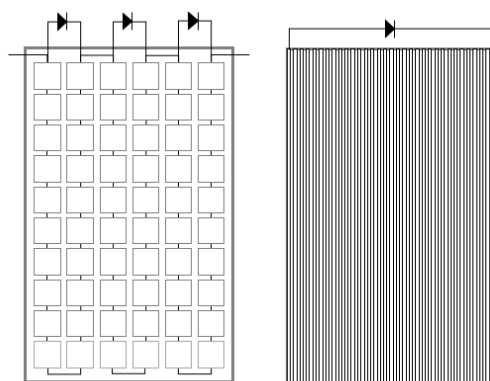
För att minimera skuggningsproblem finns bypass-dioder, även kallade förbikopplingsdioder eller shunt-dioder, i alla standardmoduler. De låter ström passera förbi skuggade solcellerna, så att en skuggad slinga eller modul slutar att utveckla elektrisk effekt. Därmed begränsar den skuggade slingan eller modulen inte längre strömmen från övriga celler. De oskuggade cellerna kan då fortsätta att arbeta i sin maximala effektpunkt (MPP) och utveckla maximal elektrisk effekt.

För att hitta solcellernas maximala effektpunkt, och avgöra om bypass-dioder ska ta över eller ej, används olika sorters effektoptimerare. I följande avsnitt förklaras funktionen hos dessa komponenter

4.1.1 Bypass-dioder

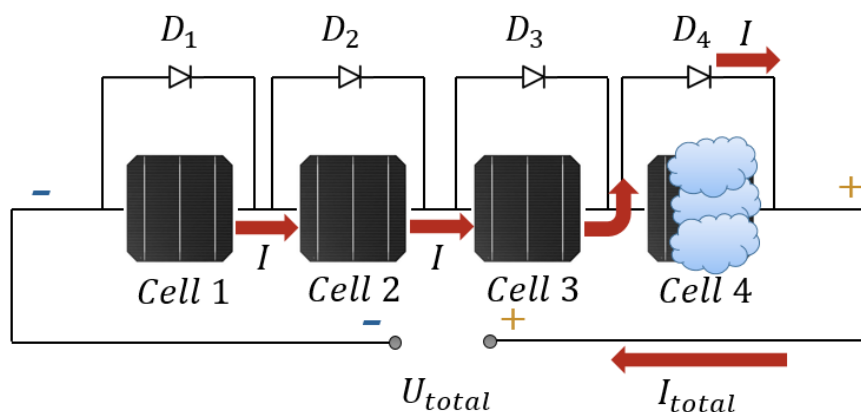
En vanlig kiselmodul består oftast av 60 celler, fördelade på tre seriekopplade slingor. Varje slinga är parallellkopplad med en bypass-diod, som är vänd i motsatt riktning mot solcellernas inbyggda diod. Det innebär att den utvecklade fotoströmmen går i bypass-diodens framriktning.

En vanlig tunnfilmsmodul består ofta av flera hundra seriekopplade celler, men vanligen används bara en bypass-diod som är parallellkopplad över alla cellerna i en modul.



Figur 26 Bypass-dioder i en kristallin kiselmodul respektive i en tunnfilmsmodul.

Under normala driftförhållanden ger solcellerna en framspänning, vilket innebär att det ligger en backspänning över de parallellkopplade och motsatt riktade bypass-dioderna. Dioderna leder då ingen ström.



Figur 27 Seriekopplade solceller med en by-pass diod över varje cell. En cell är skuggad.

När en seriekopplad solcell skuggas kommer den att generera mindre ström, varpå de övriga cellerna försöker att trycka en större ström, än den intern genererade, genom cellen. Det uppstår en då en backspänning över cellen och en framspänning över den motsatt riktade bypass-dioden. Bypass-dioden börjar då leda ström, vilket innebär att överströmmen tas över av dioden. Samtidigt uppstår ett spänningsfall i framriktningen på dioden, som vanligen ligger på mellan 0,5 och 1 V¹⁶, och den avger därmed värme. Även den skuggade solcellen avger värme, eftersom den vid backspänning övergår till att vara en last istället för en elproducent.

Spänningsfallet över de skuggade solcellerna kan beräknas genom nedanstående ekvation. I en slinga på 20 solceller, där 19 belysta celler ger en spänning på 0,5 V vardera och där bypass-dioden ger ett spänningsfall på -0,5 V, blir spänningsfallet över den skuggade cellen:

$$U_{skuggade} = -n_{oskuggade} \cdot U_{oskuggad} + U_{bypass} = -19 \cdot 0,5V + -0,5V = -10V$$

¹⁶ (Vossier, o.a. 2015)

NÄSTAN SOM VATTEN!

En sträng av solceller kan liknas vid en vattenledning, där de belysta cellerna är som små pumpar som skapar ett flöde framåt, proportionellt mot solinstrålningen. Om en cell skuggas skapas en förträngning på vattenledningen. De övriga pumparna fortsätter att arbeta, men flödet kan inte passera förträngningen. Det finns risk för läckage, i solcellen i form av hotspots, om det inte finns en envägsventil, eller bypass-diod, där vattnet kan passera.

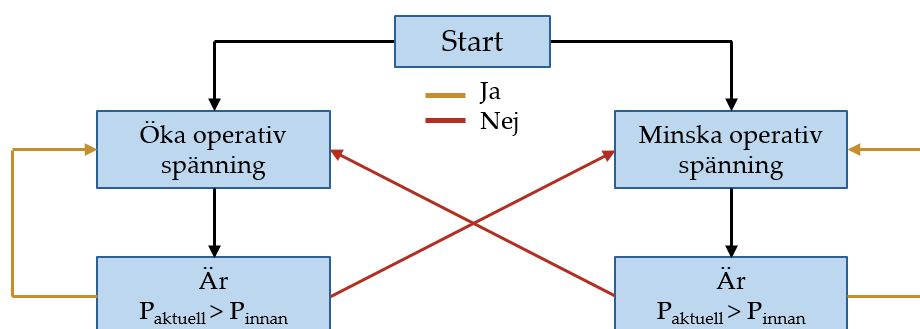
För att den skuggade solcellen inte ska skadas måste dess genombrottsspänning vara högre än den backspänning som kan uppstå vid skuggning. Kristallina kiselceller har vanligen en genombrottsspänning som är lägre än -10 V¹⁷. Solceller med egenskaper enligt exemplet ovan kan därmed seriekopplas i slingor om maximalt 20 celler per bypass-diod innan genombrottsspänningen riskerar att överskridas.

4.1.2 Effektoptimerare på sträng- eller systemnivå

Vanligen sitter en eller flera effektoptimerare (eng. Maximum Power Point Tracker, MPPT) i varje växelriktare. Till dessa parallellkopplas en eller flera strängar. Effektoptimerare är elektroniska system som, genom att reglera resistansen, styr var på IV-kurvan solcellerna befinner sig. På så vis hittar optimeraren den arbetspunkt där solcellerna utvecklar så stor elektrisk effekt som möjligt under givna förutsättningar.

Flera olika algoritmer kan användas för att skapa en optimeringsfunktion, men den vanligaste kallas för "perturb and observe" och bygger på en "trial and error"-metodik. Metoden fungerar genom att växelriktaren justerar spänningen en aning, för att sedan observera om effekten ökar. Om så är fallet justeras spänningen ytterligare i samma riktning, till en topp är nådd.

Den stora fördelen med centraliserade växelriktare, jämfört med exempelvis modultimerare eller modultväxelriktare, är det begränsade antalet komponenter och den lägre kostnaden. Den största nackdelen är att alla moduler, som seriekopplas till samma effektoptimerare, måste arbeta vid samma strömstyrka. Därmed uppstår förluster, exempelvis vid skuggning, då skuggade moduler förbikopplas eller då de tvingar hela systemet att arbeta vid en lägre maxeffektpunkt.



Figur 28 Algoritmen "perturb and observe".

Andra nackdelar är att växelriktaren, genom perturb-and-observe-algoritmen, ständigt prövar nya spänningsnivåer. Därmed pendlar solcellerna kring maxeffektpunkten vid stationära driftförhållanden, och arbetar alltså i princip aldrig vid en optimal spänningsnivå. Dessutom riskerar optimeraren, vid snabba växlingar i solinstrålning, att spåra i fel riktning.

¹⁷ (Bronsveld, o.a. 2012)

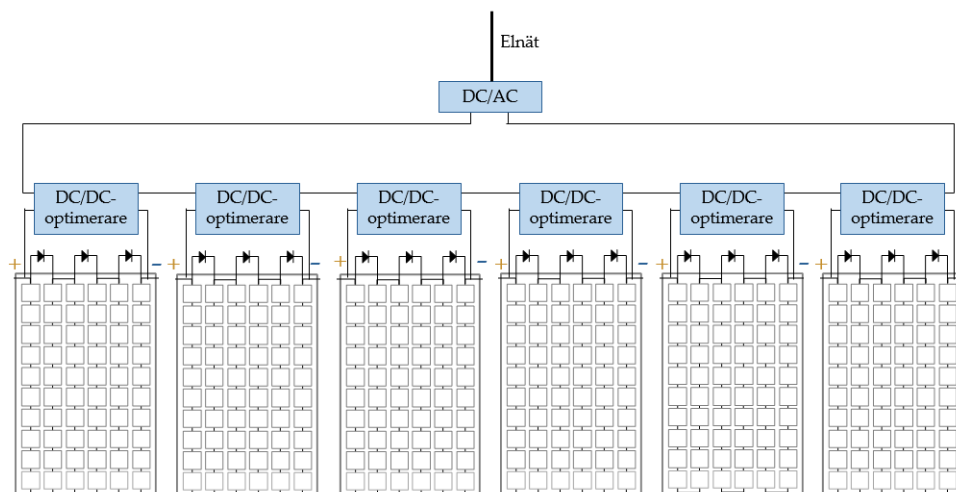
Den som installerar centrala växelriktare i skuggade system behöver även beakta växelriktarens lägsta spänningsnivå, se exempelvis Tabell 1 för tre växelriktare med en effekt på 10 kW. Vid kraftig skuggning finns risk för att så många moduler förbikopplas att spänningen sjunker under växelriktarens arbetsområde. Förlusterna kan bli betydande om växelriktaren slutar att arbeta, trots att solcellsmodulerna genererar viss elproduktion.

Tabell 1 Minsta spänningsnivå för tre vanliga växelriktare med en effekt på 10 kW.

Växelriktare	Lägsta spänningsnivå
SMA Sunny Tripower 10 000 TL	150 V (min input voltage)
Fronius Symo 10.0-3-M	200 V (min input voltage)
Sungrow SG 10KTL EC	250 V (startup voltage)

4.1.3 Moduloptimerare

Vid användning av optimerare på sträng- eller systemnivå kommer solcellerna att arbeta vid den maxeffektpunkt som gäller för hela strängen eller systemet. Det innebär ofta att enskilda moduler kommer att arbeta utanför sin maxeffektpunkt, vilket orsakar förluster i systemet. Ett sätt att minimera förlusterna är att använda decentraliserade optimerare, eller moduloptimerare (eng. DC-DC-optimizers). Dessa kan monteras så att de hittar maxeffektpunkten för små grupper av moduler, för enskilda moduler och även för separata slingor i moduler. När varje optimerare hittat sin maxeffektpunkt kommunicerar de med varandra för att reglera strömstyrkan genom modulerna till en gemensam nivå. Genom skuggade moduler ökas strömstyrkan, på bekostnad av spänningen, så att de inte begränsar strömmen genom resten av strängen¹⁸. Konvertering till växelspanning sker sedan med en sträng- eller centralväxelriktare. Den innehåller inte någon effektföljare, utan arbetar vid en given spänning¹⁹.



Figur 29 Sträng med moduloptimerare.

¹⁸ (Gallardo Saavedra 2016)

¹⁹ (The German Energy Society 2013)

Moduloptimizerare har ett spänningsintervall, inom vilket de kan arbeta, se tabellen nedan. Om spänningen från modulen sjunker under den lägsta nivån, kommer optimeraren att justera upp den till en nivå där optimeraren kan arbeta. Detta sker på bekostnad av strömstyrkan, som då sjunker avsevärt, liksom modulens uteffekt²⁰.

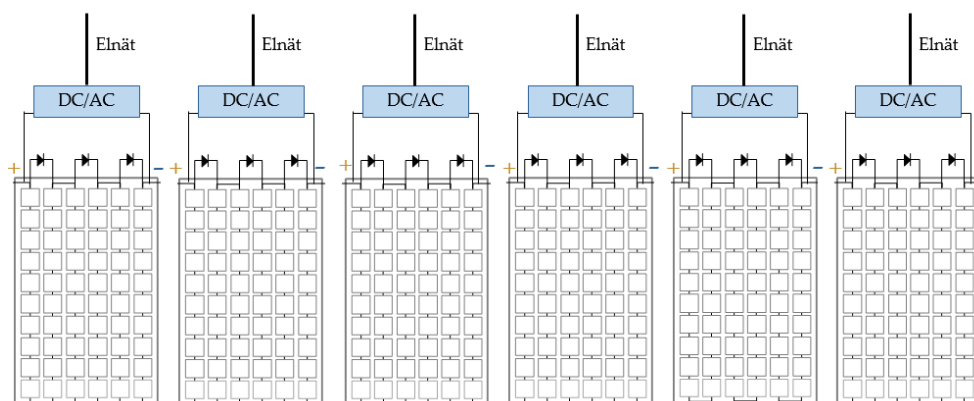
Tabell 2 Optimerare och deras spänningsintervall.

Fabrikat	Rekommenderad effekt (STC)	MPPT Range	Operating Range
Solar Edge Power Optimizer P350	350 W	8 - 60 V	≤ 60 V
Tigo Dual Maximizer MM 2ES-50	375 W	16 - 48 V	≤ 52 V

4.1.4 Modulväxelriktare

Ett annat sätt att minimera de förluster som uppstår vid obalans i systemet är att använda modulväxelriktare istället för sträng- eller systemväxelriktare.

Modulväxelriktare sätts vanligen på baksidan av varje modul och omvandlar där solcellernas likström till växelström. Varje modul kan då arbeta vid sin maxeffektpunkt, utan att påverka övriga moduler. Nackdelar är modulväxelriktarnas högre kostnad, sämre verkningsgrad och förmodade kortare livslängder.



Figur 30 Sträng med modulväxelriktare.

Liksom moduloptimizerare har modulväxelriktare ett spänningsintervall, inom vilket de kan arbeta, se tabellen nedan.

Tabell 3 Modulväxelriktare och deras spänningsintervall.

Fabrikat	Rekommenderad effekt (STC)	MPPT Range	Operating Range
Enphase M250	210 - 310 W	27 - 39 V	16 - 48 V
SMA Sunny Boy 240	≤ 300 W	23 - 39 V	23 - 45 V

²⁰ (Francisco och Salvadores 2015)

4.1.5 Kostnadsjämförelse mellan olika teknikval

Vid investeringsanalyser för solcellsanläggningar måste nyttan med att ständigt ligga nära systemets maxeffektpunkt vägas mot kostnaden för att införskaffa och installera många optimerare.

Vid högskolan i Gävle har tre system, med olika optimeringsutrustning, installerats. I Tabell 4²¹ redovisas materialkostnader, från 2016, för de ingående komponenterna. Observera att installationskostnaden, som vanligtvis ökar med antalet decentraliserade komponenter, inte ingår i beräkningarna.

Tabell 4 Kostnader för de tre olika systemen i Gävle.

System	Komponenter	Pris SEK	Ökad kostnad
Strängväxelriktare	6 moduler + 1 växelriktare	18 300	0 %
Moduloptimerare (Tigo)	6 moduler + 3 optimerare + 1 växelriktare + 1 Maximizer Management Unit + 1 Energy Gateway	27 400	50 %
Modulväxelriktare	6 moduler + 3 modulväxelriktare	19 600	7 %

Systemet med moduloptimerare är betydligt dyrare än de två andra systemen. Modulväxelriktare har dock en lägre verkningsgrad än moduloptimerare. Dessutom har modulväxelriktare förmodligen även en kortare livslängd än optimerare, vilket innebär ett större behov av att ersätta komponenter under solcellsanläggningens livslängd.

²¹ (Francisco Contero, o.a. 2016)

4.2 SKUGGNINGENS PÅVERKAN PÅ MODULEN

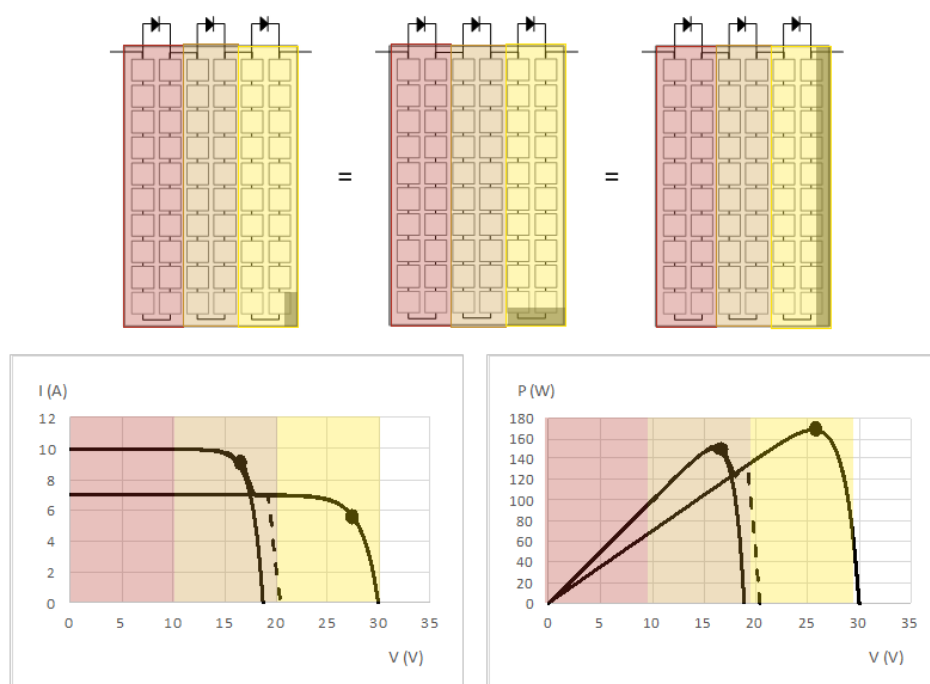
Hur skuggning påverkar ett solcellssystem kan vara svårt att förutse, då det beror av flera faktorer. I följande avsnitt tittar vi närmare på några tydliga fall, från modulnivå till strängnivå.

4.2.1 Homogen skugga på kristallin kiselmodul

I Figur 31 illustreras tre moduler som skuggas på olika vis:

- En solcell i en slinga är skuggad till 30 %.
- Två solceller i en slinga är skuggade till 30 %.
- Hälften av solcellerna i en slinga är skuggade till 30 %.

Eftersom den mest skuggade cellen avgör strömstyrkan genom slingan, kommer de tre modulerna bete sig identiskt. I alla tre modulerna ger den skuggade slingan en 30 % lägre ström än de övriga två slingorna. Det innebär att de modulerna har två maxeffektpunkter, vilka syns i IV- och PV-diagrammen i figuren.



Figur 31 Skuggning av modul.

Den vänstra maxeffektpunkten nås när bypass-dioden tar över överströmmen, så att den skuggade slingan slutar att utveckla någon elektrisk effekt. De övriga två slingorna kan då fortsätta att arbeta vid den oskuggade strömstyrkan. Dock uteblir spänningen från den skuggade slingan, och dessutom uppstår ett spänningsfall över bypass-dioden. Modulen kommer därmed att arbeta vid en ström på strax under 10 A, vid en spänning på nära 20 V och generera en effekt på en bit under 200 W.

Den högra maxeffektpunkten uppstår när bär bypass-dioden inte tar över. Istället begränsar då den skuggade slingan övriga slingor, så att strömmen genom hela modulen blir 30 % lägre. Samtidigt bidrar den skuggade slingan då till spänningen,

och spänningsfallet över bypass-dioden uteblir. Modulen kommer därmed att arbeta vid en ström på strax under 7 A, vid en spänning på nära 30 V och generera en effekt på en bit under 210 W.

Den högra maxeffektpunkten förblir lika om istället två, eller tre för den delen, av slingorna skuggas så att strömmen från båda dessa blir 30 % lägre (en bit under 7 A, 30 V, 210 W).

Däremot kommer den vänstra maxeffektpunkten att förändras²². Om två bypass-dioder tar över överströmmen från två slingor förblir strömstyrkan från modulen strax under 10 A, medan spänningen sjunker till nära 9 V (glöm ej spänningsfallet över dioderna!) och den utvecklade elektriska effekten blir endast nära 90 W.

GLÖM INTE...

...att strömmen och effekten i exemplen utvecklas vid STC, alltså vid 25 grader och en solinstrålning på 1000 W/m². Oftast råder andra förhållanden, och förlusterna från skuggning blir då mindre.

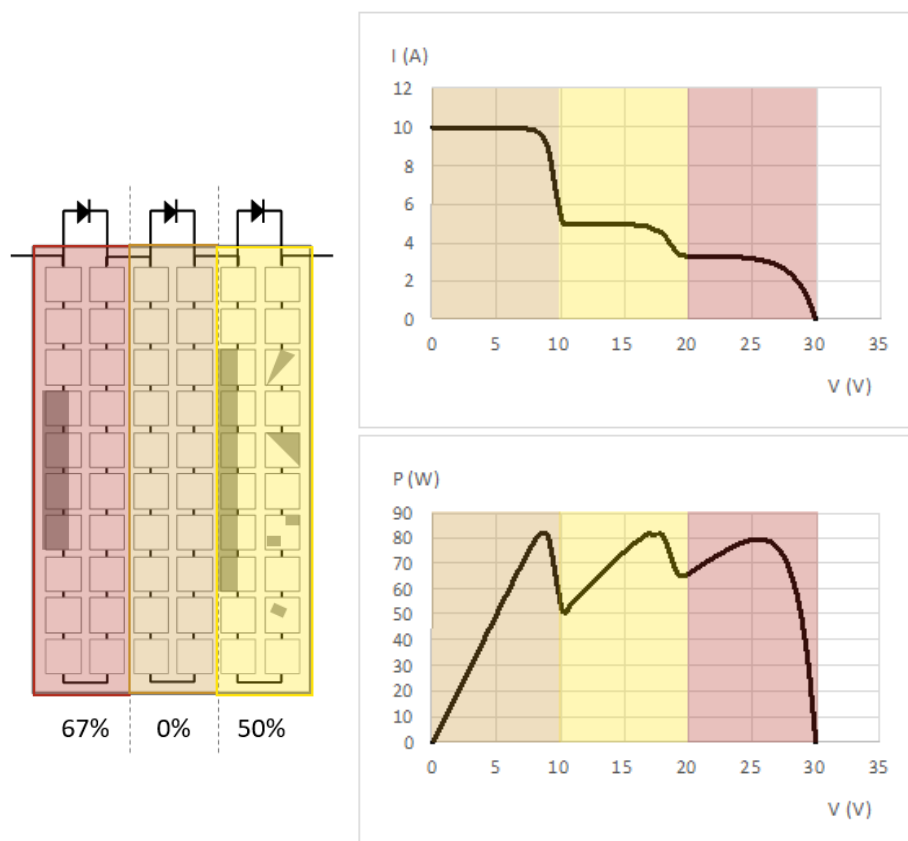
4.2.2 Heterogen skugga på kristallin kiselmodul

Inte sällan är skuggbilden på modulen varierad, med varierande intensitet på skuggan över olika slingor. Exempelvis kan detta gälla när träd skuggar solcellerna. I Figur 32 syns en modul med följande skuggor:

- I den vänstra slingan skuggas fyra celler till 67 %.
- I den mittersta slingan finns inga skuggor.
- I den högra slingan finns flera mindre skuggor, medan sju celler skuggas till 50 %.

I figuren syns modulens IV-kurva. Vid denna typ av skuggning ger de tre maxeffektpunkterna samma effekt: en bit under 100 W (ungefär 10 A · 10 V, 5 A · 20 V eller 3,3 A · 30 V).

²² (Jansson 2001)



Figur 32 Heterogen skuggning av modul, exempelvis från träd.

4.2.3 Skuggning av tunnfilmmoduler

Då tunnfilmmoduler oftast bara innehåller en bypass-diod får de inte flera maxeffektpunkter på samma vis som de kristallina kiselsolcellerna. Skuggas 10 % av en cell sjunker strömmen genom hela modulen med 10 %, och antingen tar bypass-dioden över, eller så gör den inte det. Man kan säga att tunnfilmssolceller antingen är "på" eller "av", och det är därmed intressantare att studera dem i en hel sträng än enskilt. Cellernas långsmala utformning innebär dock att skuggor kan ge olika konsekvenser beroende på hur modulerna är orienterade.

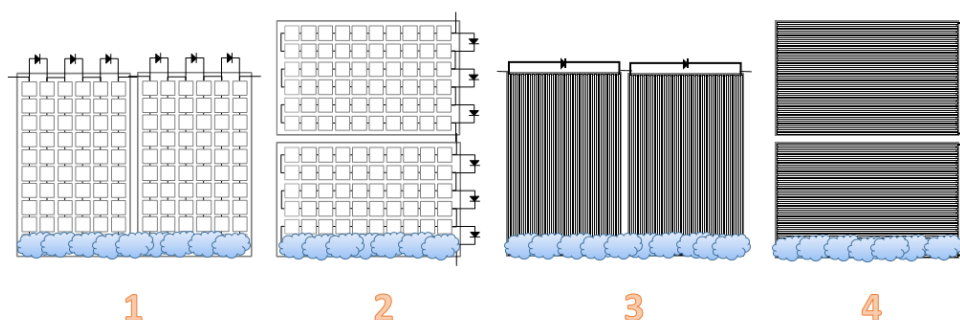
4.2.4 Modulernas orientering

Bypass-diodernas placering och de enskilda solcellernas form gör att påverkan från skuggning ibland kan förändras avsevärt beroende på hur modulerna orienteras. I Figur 33 syns fyra exempel där kristallina kiselsolceller respektive tunnfilmssolceller skuggas av snö.

1. Tolv kristallina kiselsolceller skuggas till 100 %, men strömmen i samtliga sex slingor stryps. Ingen elektrisk effekt kan utvecklas i modulerna och produktionen från modulerna sjunker med 100 %.
2. Tio kristallina kiselsolceller skuggas till 100 %, men alla är i samma slinga där bypass-dioden tar över. Det innebär att elektrisk effekt kan utvecklas i de

resterande fem slingorna, och produktionen från modulerna sjunker endast med cirka 17 %.

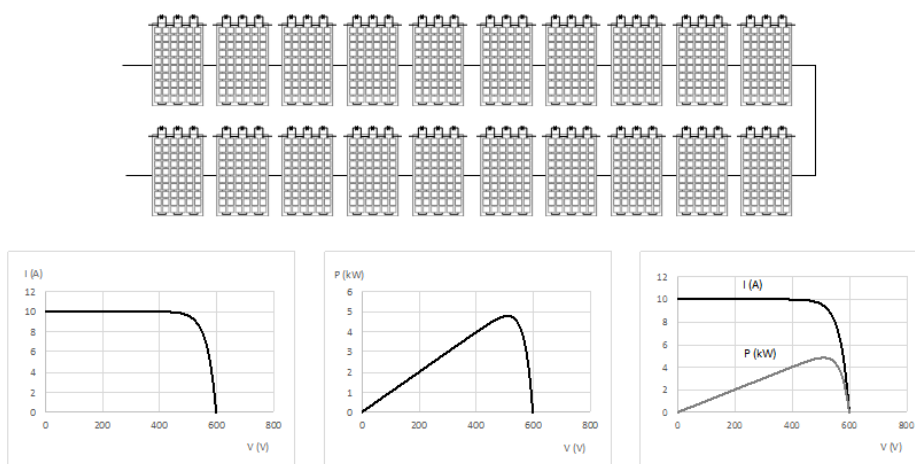
3. Samtliga 150 tunnfilmssolceller i varje modul skuggas till 10 %, vilket innebär att strömmen genom modulerna minskar med 10 %. Produktionen från modulerna minskar således också med 10 %.
4. 15 av 150 tunnfilmssolceller i en modul skuggas till 100 %, men då modulen bara består av en slinga tar bypass-dioden över och strömmen stryps genom modulen. Elektrisk effekt kan utvecklas i den oskuggade modulen, men den samlade produktionen från de två modulerna sjunker ändå med 50 %.



Figur 33 Vertikal respektive horisontell orientering vid snö på kristallina kiselmoduler och tunnfilmmoduler.

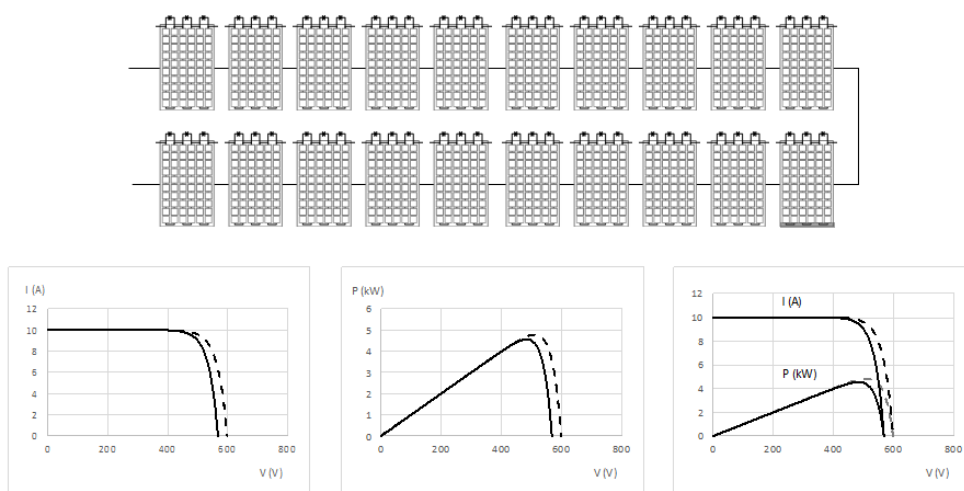
4.3 SKUGGADE SERIEKOPPLADE STRÄNGAR

Vanligen seriekopplas moduler i strängar för att få upp spänningen till en högre nivå. I större anläggningar med kristallina kiselmoduler är det inte ovanligt med 22–26 moduler i serie i en sträng. I Figur 34 syns en oskuggad sträng med 20 seriekopplade moduler, som ger en ström på 10 A, en spänning på 600 V ($20 \cdot 30$ V) och en effekt på strax under 6 000 W.



Figur 34 Seriekopplad sträng utan skugga.

I Figur 35 är alla tre slingorna i en modul skuggade till 20 %, och endast 8 A kan genereras i modulen vilket skulle innebära att strängens utveckling av elektrisk effekt skulle reduceras till runt 4 800 W ($8 \text{ A} \cdot 600 \text{ V}$). Därför tar bypass-dioderna över, så att den fulla strömmen kan flyta genom strängen, men istället förloras modulens bidrag till spänningen. Strängen arbetar nu vid 10 A, strax under 570 V och utvecklar en elektrisk effekt på nära 5 700 W.



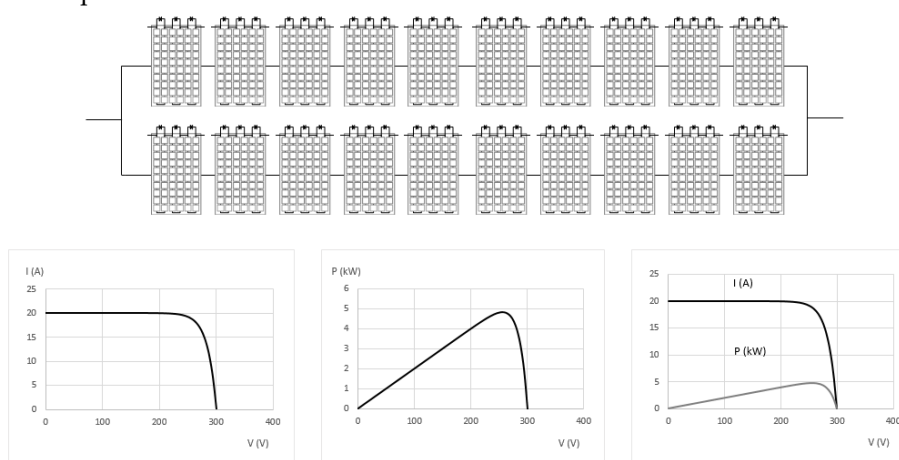
Figur 35 Seriekopplad sträng med en skuggad modul.

Om likadana skuggor faller över flera moduler i strängen, så att bypass-dioderna tar över, sjunker spänningen ytterligare. Om fler än fyra moduler skuggas fås ett högre utbyte då bypass-dioderna slutar att leda och samtliga moduler istället arbetar vid en ström på 8 A. Det spelar då inte längre någon roll för utbytet om ännu fler, eller alla, moduler skuggas på samma sätt.

4.4 SKUGGADE PARALLELLKOPPLADE STRÄNGAR

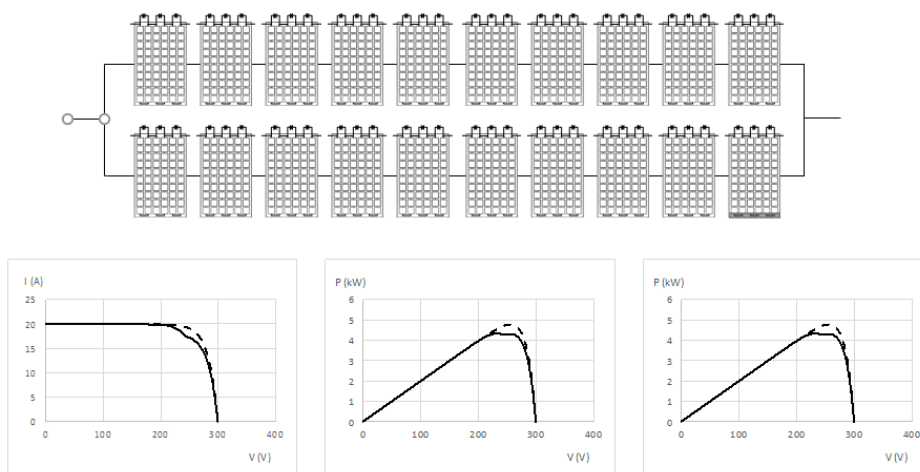
Även om det är relativt ovanligt förekommer det att man väljer att parallellkoppla enskilda moduler i ett system. Desto vanligare är att seriekoppla moduler till strängar, som sedan parallellkopplas till en gemensam effektoptimerare i växelriktaren.

Spänningen är identisk över parallellkopplade komponenter, medan strömmen fördelas över de olika parallellkopplade delarna. I Figur 36 visas två parallellkopplade strängar, med 10 seriekopplade moduler i varje, helt utan skuggor. Varje sträng ger då en ström på 10 A och en spänning på 300 V ($10 \cdot 30$ V), vilket innebär att de tillsammans ger en ström på 20 A, en spänning på 300 V och en effekt på nära 6 000 W.



Figur 36 Två parallellkopplade strängar utan skugga.

I figuren nedan är alla tre slingorna i en modul skuggade till 20 %, och endast 8 A kan passera genom modulen. Med en spänning på 300 V över båda strängarna innebär det en utvecklad elektrisk effekt på strax under 5 400 W ($8 \text{ A} \cdot 300 \text{ V} + 10 \text{ A} \cdot 300 \text{ V} = 5 400 \text{ W}$). Om istället bypass-dioderna tar över uteblir spänningen från den skuggade modulen. Spänningen över båda strängarna sjunker således till 270 V, medan strömmen ligger kvar på 10 A i varje sträng. Den utvecklade elektriska effekt blir även då strax under 5 400 W (cirka $10 \text{ A} \cdot 270 \text{ V} + 10 \text{ A} \cdot 270 \text{ V} = 5 400 \text{ W}$).

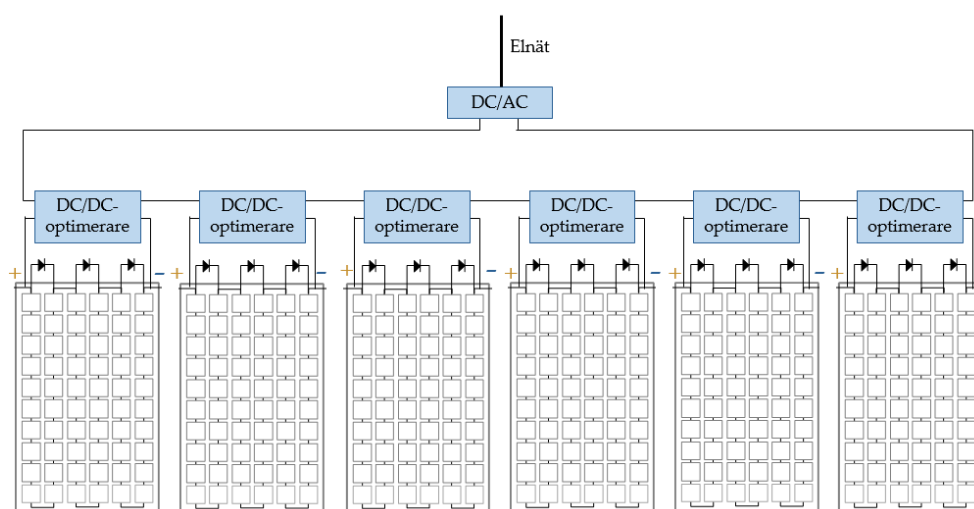


Figur 37 Skuggning av en modul.

4.5 EFFEKTOPTIMERARE OCH MODULVÄXELRIKTARE

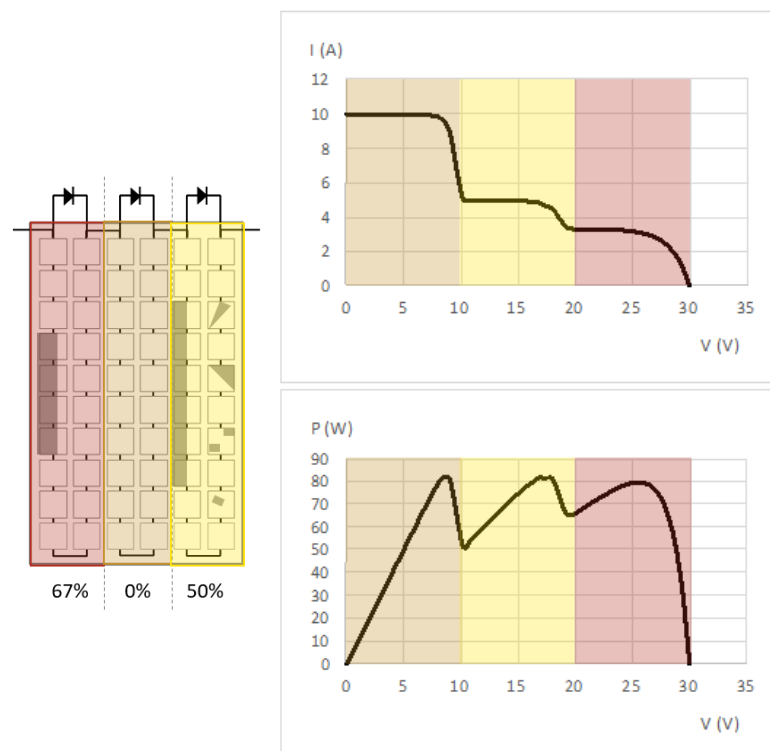
Ibland används decentraliserade effektoptimerare (moduloptimerare) eller modulväxelriktare för att minimera förlusterna från skuggning. Trots olika teknik fungerar båda genom att låta varje modul arbeta vid dess maxeffektpunkt, oberoende av de andra modulerna, och därför hanteras de i denna handbok i samma avsnitt.

I figuren nedan syns en principiell skiss över ett solcellssystem med moduloptimerare, men det skulle lika gärna kunna vara modulväxelriktare. I det här fallet har systemet sex seriekopplade moduler och sex optimerare. Varje modul har 60 seriekopplade solceller fördelade på tre bypass-dioder.



Figur 38 Sträng med moduloptimerare.

Vi ska nu titta närmare på det scenario som beskrevs i avsnitt 4.2.2 där slingorna i en modul skuggas 67 %, 0 % respektive 50 %, se IV-kurvan nedan.

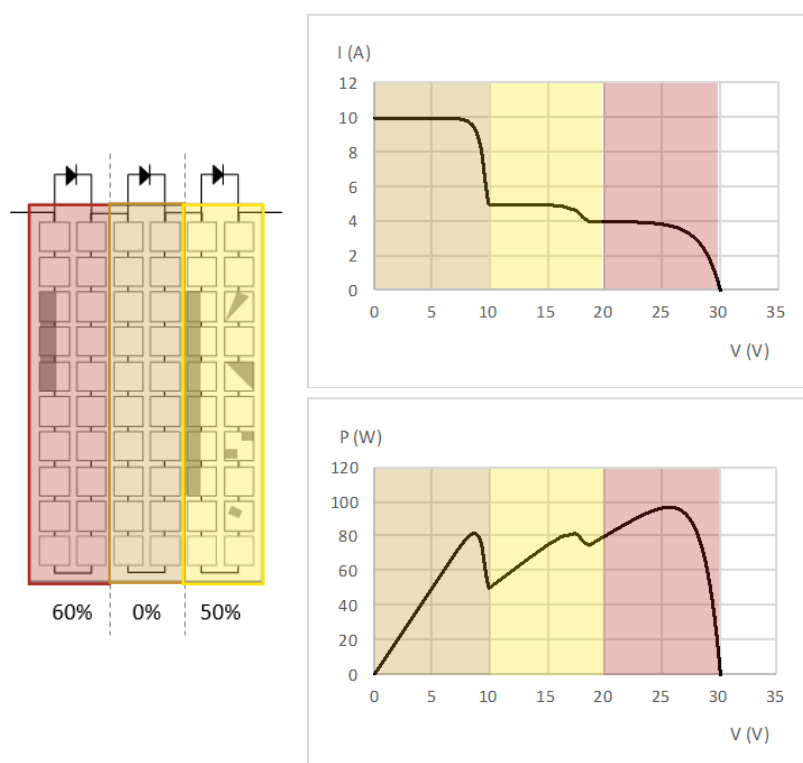


Figur 39 Heterogen skuggning av modul, 67 %, 0 % och 50 %.

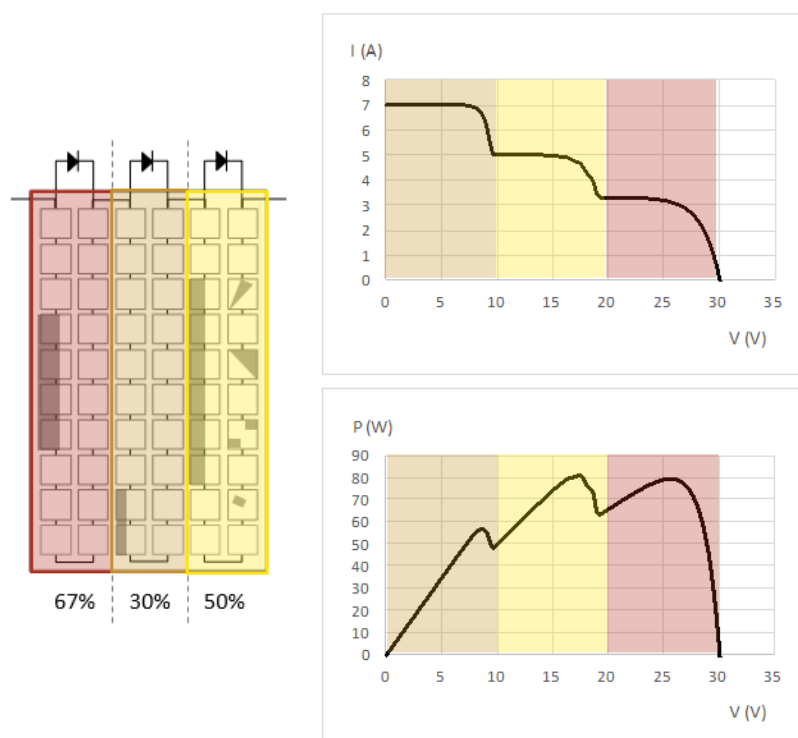
Vid denna typ av skuggning ger de tre maxeffektpunkterna samma effekt: en bit under 100 W. Utan modulloptimerare eller modulväxelriktare kommer den seriekopplade modulen att arbeta vid full ström, 10 A, och en spänning på 10 V. Bypass-dioderna leder strömmen förbi två slingor. Eftersom modulens tre maxeffektpunkter ger samma effekt gör det ingen skillnad att använda modulloptimerare eller modulväxelriktare, utbytet blir ändå identiskt.

Annorlunda blir det om någon av de två skuggade slingorna är mindre skuggad än i Figur 39, se figur Figur 40, där den vänstra slingan är skuggad till 60 % istället för 67 %. Maxeffektpunkten vid en ström på 4 A ger ett högre utbyte, nära 120 W, än vid full ström, nära 100 W, och modulloptimerare eller modulväxelriktare gör att modulen kan arbeta vid den lägre strömstyrkan.

På samma vis fyller modulloptimerare eller modulväxelriktare en funktion om alla modulens slingor skuggas, se Figur 41. Utan modulloptimerare eller modulväxelriktare ger modulen inget utbyte. De fem oskuggade modulerna kommer att försöka trycka en ström på 10 A genom modulen, varpå bypass-dioderna leder överskottsströmmen förbi alla de tre skuggade slingorna. En modul som endast har dioder kommer därmed inte att ge något utbyte, medan en modul med modulloptimerare eller modulväxelriktare kommer att arbeta vid den maxeffektpunkt som ger störst utbyte.

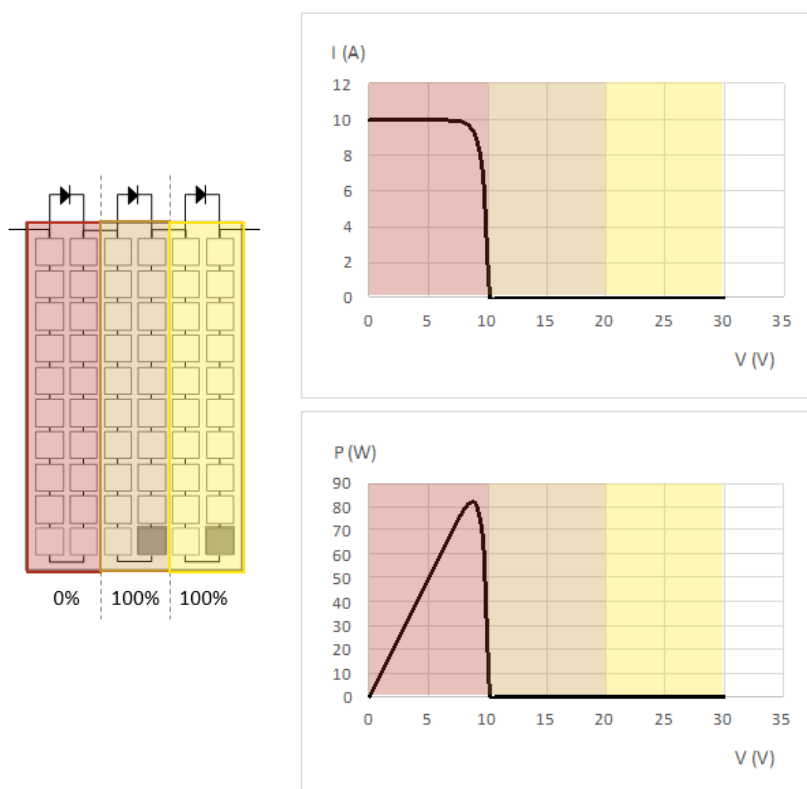


Figur 40 Heterogen skuggning av modul, 60 %, 0 % och 50 %.



Figur 41 Heterogen skuggning av modul, 67 %, 30 % och 50 %.

Det finns även skuggningsfall då moduler med enbart bypass-dioder ger ett högre utbyte än moduler med moduloptimerare eller modulväxelriktare. Ett exempel illustreras i Figur 42 nedan, där två slingor i en modul skuggas till 100 %. Utan moduloptimerare eller modulväxelriktare kommer den seriekopplade modulen, precis som i exemplet ovan, att arbeta vid full ström på strax under 10 A, en spänning på nära 10 V och således ge en effekt på cirka 100 W. Både moduloptimerare och modulväxelriktare har däremot ett spänningsintervall, inom vilket de kan arbeta, se Tabell 2 och Tabell 3 i avsnitt 4.1.3 och 4.1.4. En spänning på 10 V ligger under den lägsta nivån för exempelvis optimerare från Tigo, som har ett spänningsintervall på 16 - 48 V (Tigo Dual Maximizer MM 2ES-50). Optimeraren kommer därmed att justera upp spänningen till en nivå där optimeraren kan arbeta, vilket sker på bekostnad av strömstyrkan. Strömstyrkan sjunker avsevärt, liksom utbytet från modulen som går mot noll²³.



Figur 42 Två slingor är helt skuggade.

²³ (Francisco och Salvadores 2015)

I de fall då modulloptimerare eller modulväxelriktare ökar utbytet, till exempel då alla slingorna i en modul skuggas, beror systemets maxeffektökning även på hur övriga moduler i strängen skuggas. Figur 43²⁴ visar en sträng på sex moduler, där samtliga tre slingor i ett varierat antal moduler (här med 72 celler) skuggas till 37 %.

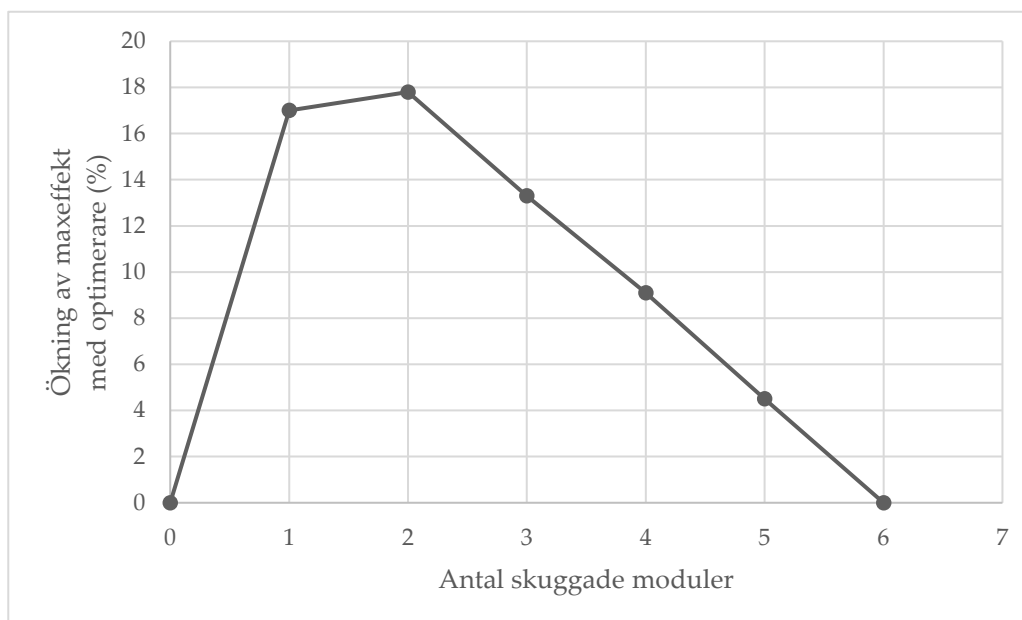
Modulloptimerare eller modulväxelriktare gör störst skillnad då systemet är ojämnt skuggat. I det fall då alla moduler skuggas lika mycket fyller modulloptimerare eller modulväxelriktare ingen funktion²⁵.

I moduler med tre slingor är modulloptimerare eller modulväxelriktare således verkningsfulla om:

- Alla slingorna i en modul är skuggade.
- Endast en slinga är skuggad och då mindre än 33 %.
- Två slingor är skuggade, den minst skuggade mindre än 50 % alternativt den mest skuggade slingan mindre än 67 %.

Däremot fyller varken modulloptimerare eller modulväxelriktare någon funktion när:

- Den skuggade modulens maxeffektpunkt fås vid full ström.
- En cell i varje slinga är helt (100 %) skuggad – ingen ström kan då gå genom modulen.
- Alla slingor i hela strängen är lika skuggade (eller oskuggade).
- Modulens maxeffektpunkt ligger utanför modulloptimerarens eller modulväxelriktarens spänningsintervall.



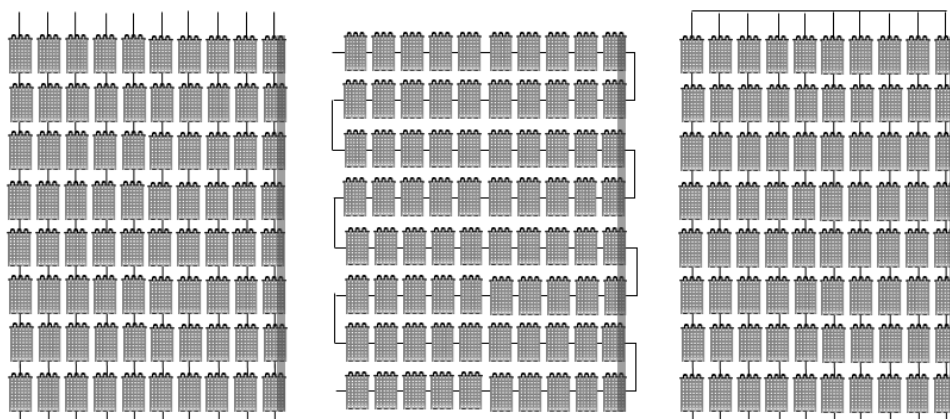
Figur 43 En sträng på sex moduler, där samtliga tre slingor i ett varierat antal moduler (här med 72 celler) skuggas till 37 %.

²⁴ (Gallardo Saavedra 2016)

²⁵ Ibid

4.6 EXEMPEL OLIKA KONFIGURATION AV SAMMA ANLÄGGNING

Ett tak har 100 solcellsmoduler, vardera bestående av 60 celler och tre by-passdioder, monterade i tio kolumner. I Figur 44 syns tre olika konfigurationer av denna anläggning. En skugga faller från sidan och skuggar därmed 70 % av den ena slingan i samtliga tio moduler i kolumnen längst till höger. Slingan ger således 30 % av full ström. Beroende av konfigurationen ger skuggan olika stor påverkan på uteffekten.



Figur 44 Tre olika konfigurationer av 100 moduler.

I den vänstra konfigurationen är varje kolumn med moduler ansluten till varsin strömväxelriktare. De nio helt oskuggade kolumnerna kommer därmed att ge fullt utbyte. Även i den skuggade kolumnen kommer två kretsar i varje modul att arbeta vid full ström, och by-pass-dioderna kommer att leda strömmen förbi den skuggade slingan. Den skuggade kolumnen kommer således att ge 2/3 av full spänning, vilket innebär att skuggan minskar uteffekten från hela anläggningen med 3,3 %. Den lägre spänningen i den skuggade kolumnen medför dock en risk för att hamna utanför växelriktarens arbetsspänning, vilket innebär att denna slås ifrån och utbytet blir noll. Skuggan minskar då uteffekten från hela anläggningen med 10 %. Moduloptimerare eller modulväxelriktare fyller ingen funktion vid denna konfigurerings.

I den mittersta konfigurationen är alla 100 moduler seriekopplade. Även i denna konfiguration kommer by-pass-dioderna att leda strömmen förbi den skuggade slingan. Skuggade moduler kommer att ge 2/3 av full spänning, men den relativa spänningsförlusten är lägre än i fallet ovan. Ändå minskar skuggan uteffekten från hela anläggningen med 3,3 %. Moduloptimerare eller modulväxelriktare fyller ingen funktion vid denna konfigurerings.

I den högra konfigurationen är samtliga tio kolumner parallellkopplade, vilket innebär att de nio oskuggade modulerna kommer att bestämma arbetsspänningen. De skuggade modulerna kommer därmed att vara tvungna att arbeta vid full spänning, och kommer endast att kunna ge 30 % av arbetsströmmen och 30 % av full effekt. Således minskar skuggan uteffekten från hela anläggningen med 7 %. Vid denna konfigurerings ökar moduloptimerare eller modulväxelriktare utbytet genom att istället låta modulerna arbeta vid 2/3 av full spänning. Därmed skulle uteffekten från anläggningen endast minska med 3,3 % precis som vid övriga konfigurationer.

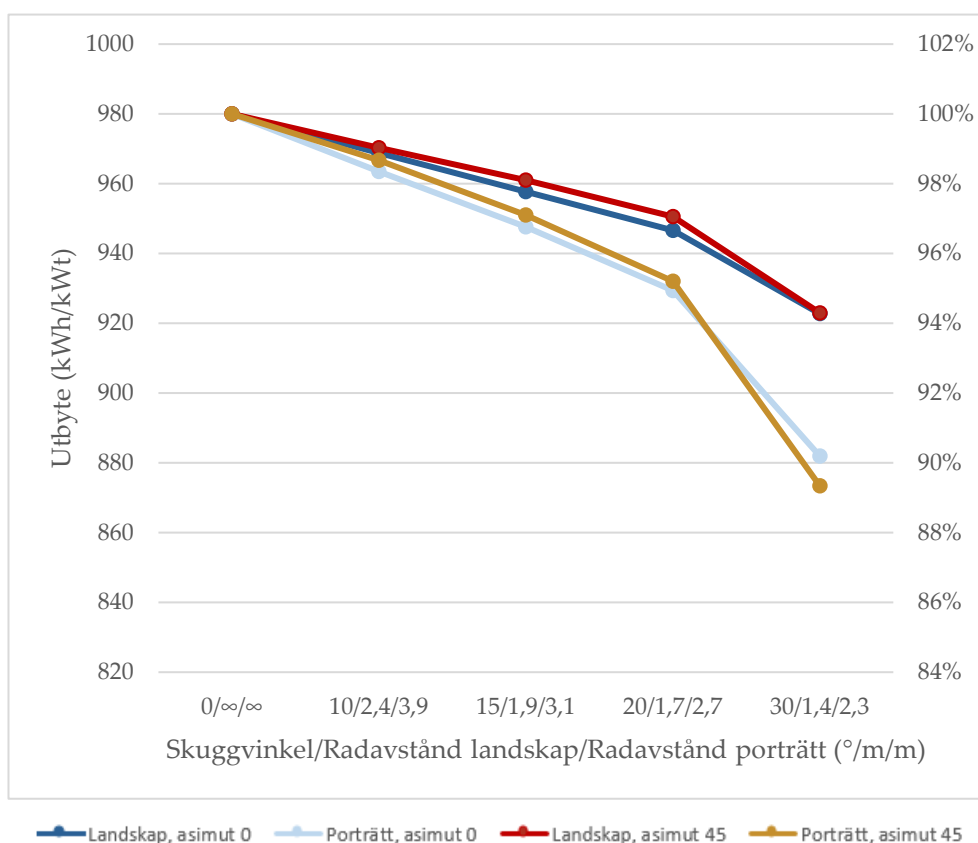
5 Fallstudier i PVsyst

PVsyst är kanske den vanligast förekommande programvaran för dimensionering av solcellsanläggningar och beräkningar av dess produktion.

I nedanstående avsnitt presenteras PVsyst-beräkningar för olika anläggningar. Beräkningarna är tänkta att ge en fingervisning om hur årsproduktionen påverkas av vissa vanligt förekommande skuggor.

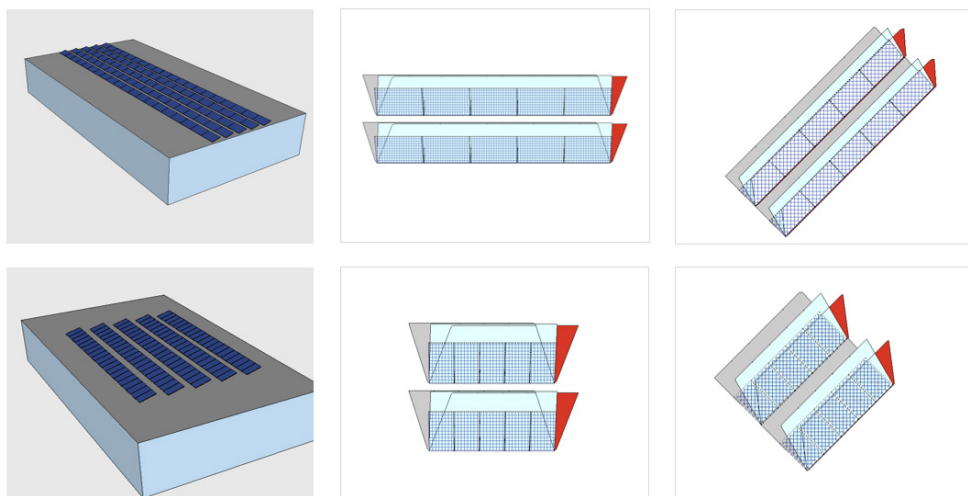
5.1 SKUGGNING MELLAN RADER

På markytor eller stora platta tak är det vanligt med lutande moduler. Nedanstående beräkningar gäller för en anläggning på 25 kW_t i Stockholm, där modulerna lutats upp 15 grader mot söder (asimut 0°) respektive sydost (asimut -45°) och monterats i fem rader.



Figur 45 Utbyte vid varierande radavstånd. Utbytet beror på flera faktorer, exempelvis modulernas strängning, vilket inte beaktas här.

Lämpligt radavstånd beror på vilken skuggvinkel som anses acceptabel. Ju längre radavstånd, desto större utbyte eftersom skuggningen då minskar. Vid skuggvinkeln 0 grader, som innebär oändligt radavstånd, fås fullt utbyte. Dock medför längre radavstånd att färre moduler får plats på en given yta.

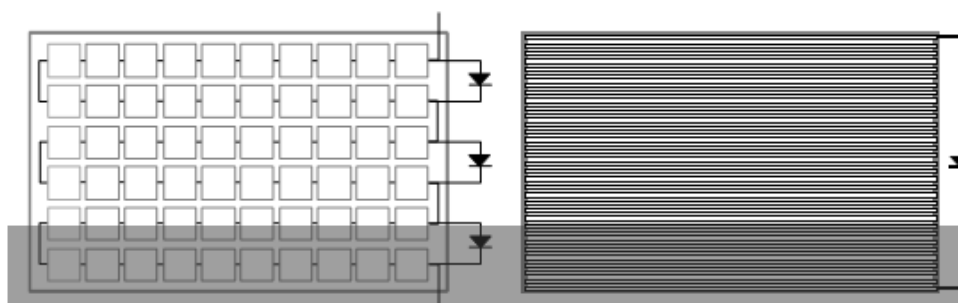


Figur 46 Skuggning mellan rader klockan 9 (grå), 12 (blå) och 15 (röd) för landskapsorientering(övre) och porträttorientering(undre) vid dagjämning. Översiktsbild, asimut 0° och asimut -45°.

Vid nordligare breddgrader står solen lägre, och det kan vara lämpligt att välja en lägre skuggvinkel för att minimera förluster.

För att minimera skuggningsförluster mellan rader är det lämpligt att montera kristallina standardmoduler i landskapsposition, dvs liggande moduler, Figur 47. Skuggning mellan raderna påverkar då solcellsmodulernas slingor en i taget, varpå övriga slingor kan fortsätta att generera ström. Om modulen monteras stående i porträttposition påverkas alla tre slingor så snart en liten del av modulen skuggas, vilket ger en större påverkan på den totala elproduktionen, se 33.

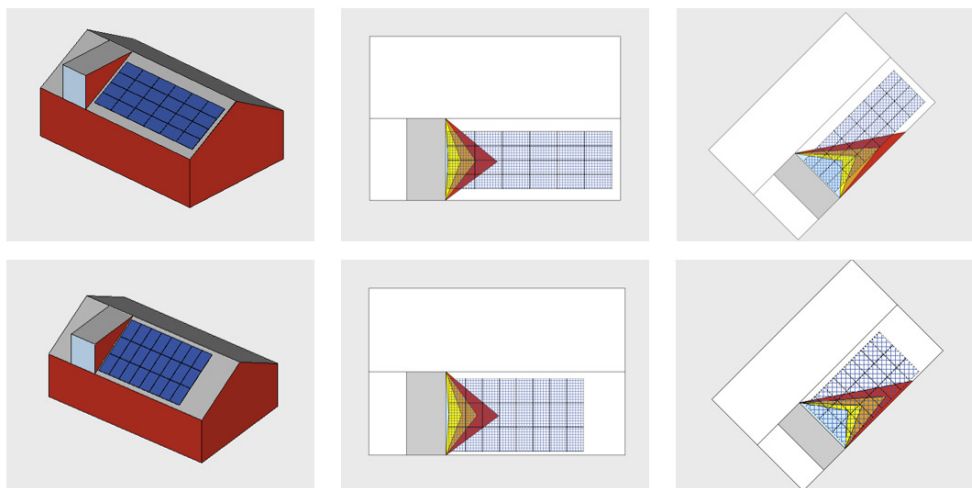
För tunnfilmsolceller gäller det motsatta. Om de monteras liggande, enligt Figur 47, skuggas en hel cell så snart solen står tillräckligt lågt. Eftersom tunnfilmssolceller bara har en bypass-diod stryper den skuggade cellen strömmen genom hela modulen, vilket ger en kraftig påverkan på elproduktionen. Om modulerna istället monteras stående skuggas endast en del av varje cell, vilket innebär att elproduktionen kan fortgå, om än på en reducerad nivå.



Figur 47 Liggande montering av standardmodul och tunnfilmsmodul.

5.2 KANTSKUGGNING VILLA

På villatak utgörs skuggande föremål ofta av takkupor, eller liknande. Nedanstående beräkningar gäller för ett villatak i Stockholm med en lutning på 30 grader mot söder (asimut 0°) respektive sydost (asimut -45°).



Figur 48 Skuggning från takkupa klockan 12 (blå), 13 (gul), 14 (orange) och 15 (röd) för landskapsorientering och porträttorientering vid dagjämningarna. Översiktsbild, asimut 0° och asimut -45°.

I sin grundutformning är anläggningens storlek 6 kW_t, och moduler är då monterade alldeles intill takkupan. Det årliga utbytet sjunker därmed med cirka 10 % till följd av skuggningen, se kolumnerna *Utan kantskugga* och *Kantskugga* i tabellen nedan. Minskningen är något större vid asimut 45 grader eftersom skuggningen ökar. Oavsett asimut ger montering i porträttposition högst utbyte, eftersom bypass-dioderna bättre kan hantera skuggningen.

För att minimera inverkan från skuggning tas sedan de fyra modulerna närmast takkupan bort. Den installerade effekten som ryms på taket uppgår då endast till 5 kW_t, se kolumnen *Minimerad skugga* i tabellen nedan. Årsproduktionen blir något lägre än då anläggningen hade full storlek, men samtidigt ökar utbytet till nästan samma nivå som den helt oskuggade anläggningen.

Tabell 5 Produktion och utbyte vid asimut 0°.

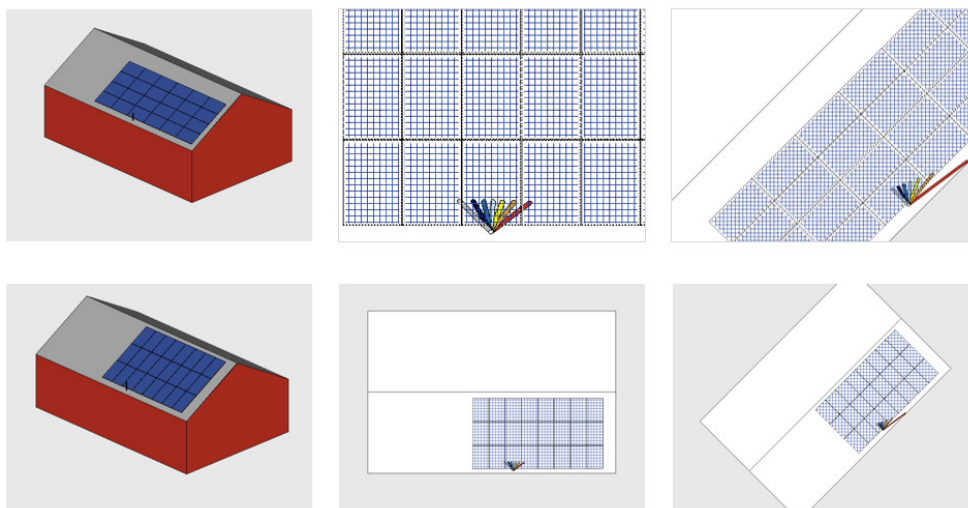
Asimut 0°	Landskap			Porträtt	
	Utan kant-skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga
Installerad effekt (kW _t)	6	6	5	6	5
Årsproduktion (MWh)	6,28	5,72	5,15	5,88	5,17
Utbyte (kWh/kW _t)	1047	954	1030	981	1034

Tabell 6 Produktion och utbyte vid asimut -45°.

Azimut -45°		Landskap		Porträtt	
	Utan kant-skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga
Installerad effekt (kW _t)	6	6	5	6	5
Årsproduktion (MWh)	5,93	5,25	4,86	5,44	4,88
Utbyte (kWh/kW _t)	988	875	972	907	975

5.3 SKUGGA FRÅN AVLUFKNINGSRÖR PÅ LUTANDE OCH PLATTA TAK

På många tak förekommer skuggning från avluftningsrör. Nedanstående beräkningar gäller för ett villatak i Stockholm med en lutning på 30 grader mot söder (asimut 0°) respektive sydost (asimut -45°).



Figur 49 Skuggning från rör klockan 9 (grå), 10 (mörkblå), 11 (blå), 12 (ljusblå), 13 (gul), 14 (orange) och 15 (röd) för landskapsorientering och porträttorientering vid dagjämningarna. Översiktsbild, asimut 0° och asimut -45°.

Tabell 7 Produktion och utbyte vid asimut 0°.

Asimut 0°		Landskap		Porträtt	
	Utan kant-skugga	Rör-skugga	Minimerad skugga	Rör-skugga	Minimerad skugga
Installerad effekt (kW _t)	6	6	5,75	6	5,75
Årsproduktion (MWh)	6,28	6,28	6,01	6,28	6,01
Utbyte (kWh/kW _t)	1047	1046	1045	1046	1045

Tabell 8 Produktion och utbyte vid asimut -45°.

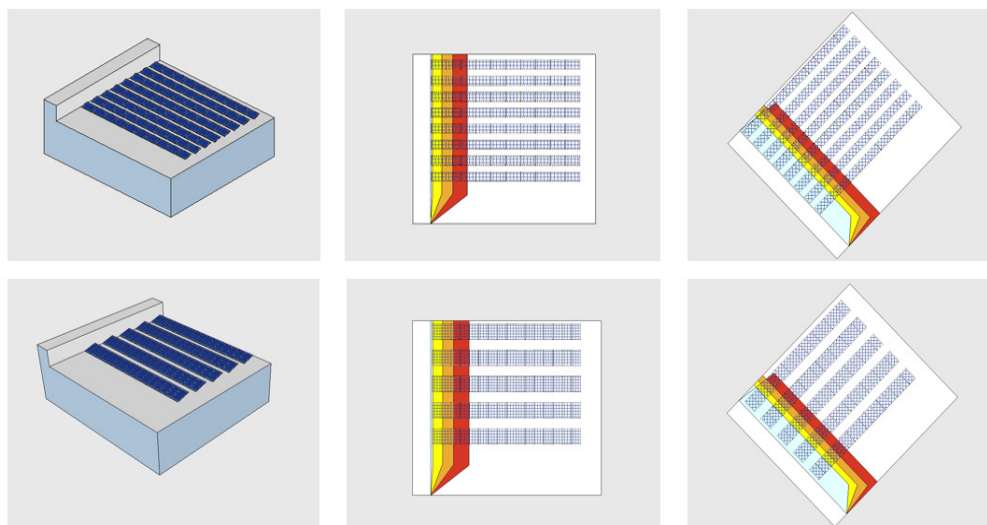
Asimut -45°		Landskap		Porträtt	
	Utan kant-skugga	Rör-skugga	Minimerad skugga	Rör-skugga	Minimerad skugga
Installerad effekt (kW _t)	6	6	5,75	6	5,75
Årsproduktion (MWh)	5,93	5,92	5,67	5,93	5,67
Utbyte (kWh/kW _t)	988	987	986	988	987

Flertalet simuleringar, med olika konfigurationer, visar att PVsysts beräkningar ger ett lägre utbyte då moduler plockats bort så att skuggningen från röret sjunker. Detta kan finnas flera orsaker till detta, exempelvis att förlusterna ökar av olika anledningar, men det är också möjligt att PVsyst inte är helt tillförlitligt när det gäller skuggning från rör, se avsnitt 6.

När det gäller skuggning från rör kan det ändå konstateras att påverkan på systemets årsproduktion är låg. Om ett rör skuggar en enskild modul, kommer skuggade slingor att förbikopplas av bypass-dioderna, och resten av systemet kan arbeta som vanligt. Det är förmodligen bäst att porträttorientera modulerna, då det är möjligt, eftersom skuggan då enbart träffar enstaka slingor. Om den skuggade modulen är placerad precis norr om röret, så att den i princip alltid skuggas, kommer dess utbyte att vara betydligt lägre än från övriga moduler. Samtidigt är marginalkostnaden för en sådan modul låg, och det kan exempelvis finnas estetiska skäl till att ändå placera ut den. Ett alternativ kan också vara att minska avluftsrorens storlek, så att de får plats under modulerna. Förmodligen utgör modulerna ett tillräckligt skydd mot att snö lägger sig över rören, men detta är något som bör undersökas närmare genom praktiska försök.

5.4 KANTSKUGGNING PLATT TAK

På stora platta takytor förekommer ofta fläktrum eller påbyggnader som skuggar delar av taket. Nedanstående beräkningar gäller för en anläggning på 20 kW_t i Stockholm, där modulerna lutats upp 15 grader mot söder (asimut 0°) respektive sydost (asimut -45°). Den tillgängliga ytan begränsar hur anläggningen kan utformas. Med en skuggvinkel på 20 grader finns det utrymme för åtta rader då modulerna landskapsorienteras, och fem rader då modulerna porträttorienteras.



Figur 50 Skuggning från fläktrum klockan 12 (blå), 13 (gul), 14 (orange) och 15 (röd) för landskapsorientering och porträttorientering vid dagjämningarna. Översiktsbild, asimut 0° och asimut -45°.

Utan kantskugga ger landskapsorientering högst utbyte, vilket beror på att modulerna då kan hantera skuggningen mellan raderna bättre, se avsnittet ovan om radavstånd. Med kantskugga från fläktrummet sjunker årsproduktionen cirka 10 %. Även då modulerna skuggas av fläktrummet är det lämpligt att montera dem i landskapsorientering, eftersom utbytet då blir högst. I exemplet ovan, med takkupan på villan, var porträttposition mest fördelaktigt vid kantskugga. Att resultatet blir annat på detta tak beror på att fördelarna med bypass-diodernas förmåga att hantera skuggan mellan raderna överväger.

Om moduler inte placeras allra närmast fläktrummet, där skuggan är som kraftigast, blir utbytet högre. Dock får betydligt färre moduler plats på den tillgängliga ytan, vilket innebär att årsproduktionen från anläggningen sjunker med 20–25 %.

Tabell 9 Produktion och utbyte vid asimut 0°.

Asimut 0°	Landskap			Porträtt		
	Utan kant-skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga	Utan kant-skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga
Installerad effekt (kW _t)	20	20	14	20	20	15
Årsproduktion (MWh)	18,8	17,1	13,0	18,5	16,8	13,6
Utbyte (kWh/kW _t)	941	854	929	924	840	908

Tabell 10 Produktion och utbyte vid asimut -45°.

Asimut -45°	Landskap			Porträtt		
	Utan kant-skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga	Utan kant-skugga	Kant-skugga	Minimerad skugga
Installerad effekt (kW_t)	20	20	14	20	20	13,75
Årsproduktion (MWh)	18,2	16,0	12,6	17,8	15,8	12,1
Utbyte (kWh/kW_t)	910	801	897	892	788	879

I exemplet ovan är modulerna placerade så att de huvudsakligen träffas av en vertikal skugga från fläktrummet. Vid vissa tidpunkter, då solen står lågt i sydväst, kommer dock systemet träffas av en diagonal skugga. Tidigare försök har visat att diagonal skuggning ger störst effektförluster i förhållande till den skuggade arean, eftersom fler slingor då påverkas än vid enbart horisontell eller vertikal skuggning²⁶.

²⁶ (Jansson 2001)

5.5 SKUGGNINGSMODELLERING I PVSYST

PVsyst är kanske den vanligast förekommande programvaran för dimensionering av solcellsanläggningar och beräkningar av dess produktion. Programmet brister dock i användarvänlighet och eventuellt även i tillförlitlighet. Dessutom är det svårt att utvärdera resultaten, eftersom beräkningsmodellerna är dolda. För att råda bot på detta har Sandia National Laboratories genom PVPMP (Photovoltaics Performance Modeling Collaborative) tagit fram funktioner för beräkningar av solcellsanläggningars prestanda i MatLab och Phyton. Funktionerna ger användaren full insyn i beräkningar och simuleringar, men dessvärre är tröskeln hög och kräver kunskaper om antingen MatLab eller Phyton.

I PVsyst kan uppskattningar av inverkan från skuggning göras med hjälp olika antaganden med varierande osäkerheter: *Ingen skugga* (*No shading*), *Linjär skugga* (*Linear shadings*), *Enligt strängar* (*According to module strings*) och *Detaljerad enligt modullayout* (*Detailed, according to Module Layout*). I nedanstående avsnitt beskrivs de olika antagandena, och varför resultaten skiljer sig beroende på simuleringsmodell i PVsyst 6.4.7.

5.5.1 Ingen skugga

Produktionsuppskattningar med hjälp av modellen *Ingen skugga* bygger på ett antagande om att anläggningen är helt oskuggad. PVsyst räknar inte ens in intern skuggning mellan raderna i en anläggning med upplutade moduler. Denna simuleringsmodell ger således det högsta värdet på anläggningens årsproduktion.

5.5.2 Linjär skugga

Produktionsuppskattningar där skuggor hanteras med hjälp av *Linjär skugga* i PVsyst, bygger på antagandet att skuggade seriekopplade celler inte alls påverkar varann. Produktionsminskningen är alltså linjärt proportionell mot minskningen av solinstrålningen som når anläggningen till följd av skuggningen. Således ger *Linjär skugga* en uppskattning av den lägsta nivån på skuggningens inverkan, och i exemplet ovan sjunker årsproduktionen endast med 3 %.

5.5.3 Enligt strängar

Produktionsuppskattningar där skuggor hanteras med hjälp av *Enligt strängar*, bygger istället på antagandet att en skuggad cell påverkar alla övriga seriekopplade celler i en sträng. Beräkningen *Enligt strängar* tar alltså ingen hänsyn till bypass-dioders förmåga att förbikoppla skuggade slingor i modulerna.

Användaren väljer själv strängkonfiguration och *Fraction for electrical effect (FFEE)*, som anger storleken på produktionsminskningen när någon del av strängen skuggas. En FFEE på 100 % sänker produktionen till noll, så snart någon del av strängen skuggas, medan en FFEE på 10 % sänker produktionen med en tiondel av oskuggad produktion när strängen skuggas. PVsyst rekommenderar att denna faktor sätts till nära 100 % om det skuggande objektet exempelvis är ett skjul, och mellan 60 och 80 % om det skuggade objektet exempelvis är en skorsten eller en avlägsen byggnad.

5.5.4 Detaljerad enligt modullayout

Till sist bygger produktionsuppskattningar, där skuggor hanteras med hjälp av *Detaljerad enligt modullayout*, på antagandet att bypass-dioder kan förbikoppla skuggade slingor. Användaren ställer själv in strängningen och antalet bypass-dioder. Således bör *Detaljerad enligt modullayout* ge det mest exakta resultatet. Användaren ges även möjlighet att ta del av anläggningens IV-kurva, med intervaller på 15 minuter.

5.6 UTVÄRDERING AV RESULTAT I PVSYST

I Tabell 11 presenteras hur PVsysts beräkningar av årsproduktionen skiljer sig beroende på vald simuleringsmodell. Samtliga beräkningar gäller för en anläggning där 100 moduler, med tre bypass-dioder vardera, lutats upp 15 grader mot söder och monterats i fem rader. Vald skuggvinkel är 30 grader, och radavståndet är därmed olika beroende på om modulerna monterats i landskaps- eller porträttorientering.

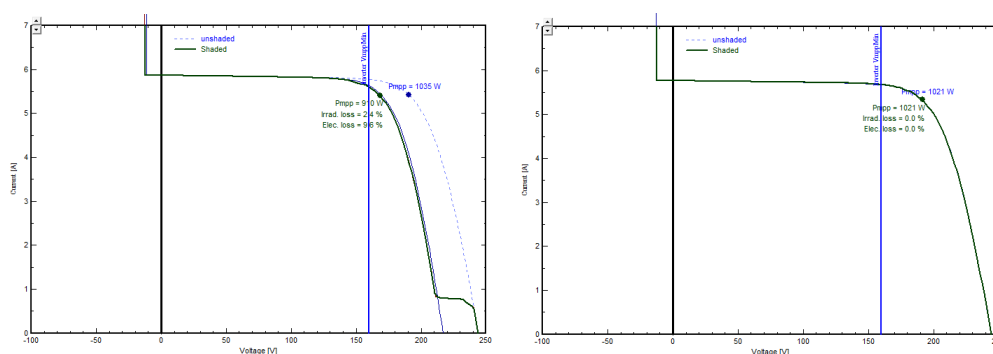
Tabell 11 Årlig elproduktion med olika simuleringsmodeller i PVsyst.

Simuleringsmodell	Andel av oskuggad, landskapsorientering	Andel av oskuggad, porträttorientering
Ingen skugga	100 %	100 %
Linjär skugga	97 %	97 %
Enligt strängar, FFEE = 100 %	92 %	91 %
Enligt strängar FFEE = 10 %	96 %	96 %
Detaljerad enligt modullayout	94 %	91 %

Det är svårt att utvärdera resultaten utan att göra mätningar i fält, men det kan ändå konstateras att de verkar någorlunda rimliga. Då modulerna endast skuggas internt mellan raderna är det rimligt att produktionen vid landskapsorientering ligger något över produktionen vid porträttorientering.

Simuleringar av skuggning från mindre objekt, exempelvis avloppsluftsledningsrör, tyder däremot på att PVsyst i vissa fall har svårt att hantera detta. Därmed är det avgörande att användaren studerar och utvärderar resultaten noga. Exempelvis beräknade PVsyst i vissa fall ett ökat utbyte trots att det var uppenbart att den skuggade ytan minskat avsevärt. Dessvärre försvåras felsökning av begränsad användarvänlighet och insyn i beräkningsmodellerna, och det är därmed svårt att dra slutsatser kring vad eventuella fel beror på.

Vidare indikerar testmodelleringar att PVsysts IV-kurvor ibland innehåller felaktigheter. I Figur 51 syns exempelvis IV-kurvor för en liten solcellsanläggning den 27 juni klockan 12.45 respektive klockan 13.00. Anläggningen skuggas mitt på dagen av ett uppstickande rör, vilket endast syns i kurvan från 12.45. Kurvan från 13.00 indikerar däremot full produktion, vilket är orimligt med tanke på skuggningen. Liknande felaktigheter kan sedan observeras under hela eftermiddagen. Felaktiga IV-kurvor behöver inte nödvändigtvis indikera att PVsysts beräkningar av årsproduktionen är felaktiga, inte minst eftersom IV-kurvorna baseras på femtonminutersvärden och årsproduktionen baseras på timvärden, men det kan finnas ett samband.



Figur 51 IV-kurvor från PVsyst för anläggning som skuggas av ett smalt rör den 27 juni klockan 12.45 respektive 13.00.

5.6.1 Förslag för bättre skuggningsberäkningar

För att kunna göra detaljerade beräkningar av skugginverkan på solcellsanläggningars årsproduktion krävs bättre och mer tillförlitliga simuleringsprogram. Exempelvis kan PVsyst bli betydligt bättre genom:

- Tillförlitliga resultat för alla typer av skuggning, både när det gäller beräkningar av årsproduktion och visualisering av IV-kurvor.
- Förbättrad användarvänlighet. Gränssnittet är stökigt och svårt att överblicka, vilket gör tröskeln hög för oerfarna användare. Det är svårt att rita upp objekt i 3D-verktyget, och att placera dem korrekt i förhållande till varandra, vilket försvårar detaljerade skuggningsförsök. Det är lätt att missa alternativ, och svårt att överblicka vad som blivit fel. Dessutom är manualen svårbegriplig.

6 Sammanfattande slutsatser

Solel kommer att vara en viktig teknik vid omställningen till ett förnybart energisystem. När antalet solcellssystem växer kommer allt fler solceller att installeras på existerande byggnader med skuggningsproblem. För att kunna bygga kostnadseffektiva och välfungerande solcellsanläggningar är det då avgörande att veta hur skuggningen påverkar systemen, och vilka åtgärder som kan vidtas för att minimera problematiken.

I grunden är solceller väldigt känsliga för skuggning. Det beror på att de seriekopplas för att önskvärd spänning skall erhållas. Konsekvensen blir att den cell som nås av lägst solinstrålning även begränsar utbytet från övriga celler i serien. Därmed är det i första hand önskvärt att, i så stor utsträckning som möjligt, undvika skuggning.

Vid nybyggnation eller takomläggningar är det lämpligt att placera skuggande föremål så att inverkan på en eventuell solcellsanläggning minimeras. Det kan exempelvis handla om att i möjligaste mån samla avloppsluftningar, ventilationsrum och taksäkerhet, och placera dem norr om solcellerna. Det kan även röra sig om att utforma objekt så att de blir så låga som möjligt.

Skuggans längd vid en viss tidpunkt beror av solhöjden, det vill säga vinkeln mellan horisonten och siktlinjen mot solen. Den dimensionerande solhöjden, även kallad skuggvinkeln, kan användas för att beräkna ett lämpligt avstånd mellan moduler och skuggande föremål. I hela landet är solinstälningen som störst mitt på dagen under sommarhalvåret. Den som vill undvika skuggning då bör anta en skuggningsvinkel på högst 20 grader i södra Sverige och högst 15 grader i norra Sverige.

Ibland kan det finnas skäl att placera solceller även på skuggade ytor. Hur stora konsekvenser skuggningen verkligen får beror då på en mängd faktorer, såsom vid vilken tidpunkt den förekommer, hur strängningen är gjord och vilka tekniska komponenter, som bypass-dioder och optimerare, som används för att hantera skuggningen.

Idag finns minst en bypass-diod i alla solcellsmoduler. I en vanlig kristallin kiselmodul är solcellerna seriekopplade i tre slingor med tre bypass-dioder. Varje slinga är alltså parallellkopplad med en bypass-diod. En vanlig tunnfilmsmodul består ofta av flera hundra seriekopplade celler, men ofta används bara en bypass-diod som är parallellkopplad över alla cellerna i en och samma slinga. Tillsammans med effektoptimerare i växelriktaren begränsar bypass-dioderna kraftigt inverkan från skuggning. Genom förbikoppling sjunker enbart utbytet från de skuggade slingorna, så länge detta ger högst effekt. Om effekten istället är högst med inkopplade slingor, justerar effektoptimeraren spänningen så att bypass-dioderna blir verkningslösa. Då kan även skuggade slingor bidra till elproduktionen.

Den som vill minimera skuggningens inverkan bör därmed fundera över hur modulerna orienteras och sammankopplas.

För att minimera skuggningsförluster mellan lutande moduler är det lämpligt att montera kristallina standardmoduler i landskapsposition. Skuggning mellan raderna påverkar då solcellsmodulernas slingor en i taget, varpå övriga slingor kan fortsätta att generera ström. Om modulen monteras stående i porträttposition påverkas alla tre slingor så snart en liten del av modulen skuggas, vilket ger en större påverkan på den totala elproduktionen. För tunnfilmssolceller gäller däremot det motsatta. För att minimera skuggningsförluster vid skarpa kantskuggor, som från fläktrum eller takkupor, är det istället lämpligt att montera kristallina standardmoduler i porträttposition. Skuggning påverkar även då en i taget av solcellsmodulernas slingor. Även här gäller det motsatta för tunnfilmssolceller. Ibland förekommer dock både skuggning mellan rader och skarpa kantskuggor, och i de flesta fall är det då förmodligen bäst att montera kristallina kiselmoduler i landskapsposition.

Solcellsanläggningar kan utformas på många olika vis, men ofta seriekopplas moduler i en sträng som ansluts till en effektoptimerare i växelriktaren. Antag att en skugga minskar produktionen från vissa slingor med 10 %, medan övriga slingor är oskuggade. By-passdioderna kommer då att förbikoppla de skuggade slingorna, så länge dessa utgör mindre än 10 % av det totala antalet slingor. Om mer än 10 % av slingorna skuggas kommer effekten att bli högre om de istället kopplas in. Om skuggan minskar produktionen från vissa slingor med 80 %, kommer de att förbikopplas så länge dessa är mindre än 80 % av det totala antalet, och så vidare.

En vanlig konfiguration är även att parallellkoppla två (eller fler) strängar till en och samma effektoptimerare i växelriktaren. Då förändras ovanstående resonemang något, eftersom spänningen alltid är lika över de två strängarna. En förbikopplad modul i ena strängen resulterar därmed i ett spänningsfall över båda strängarna – skuggeffekterna fortplantar alltså sig. Om en skugga minskar produktionen från vissa slingor med 10 %, medan övriga är oskuggade, kommer slingorna att förbikopplas så länge dessa är mindre än 5 % av det totala antalet. Om en skugga istället minskar produktionen med 80 %, kommer slingor att förbikopplas så länge dessa är mindre än 40 % av det totala antalet, och så vidare.

Om flera moduler är skuggade vid samma tidpunkt kan det vara lämpligt att sammankoppla dessa till en egen effektoptimerare, exempelvis i växelriktaren. På så vis kan de bidra till solelproduktionen även vid skuggning. Om de däremot blandas med oskuggade moduler kommer de ofta att förbikopplas, varpå de inte bidrar till solelproduktionen.

I system med flera parallellkopplade strängar, där skuggade moduler inte kan sammankopplas i en egen sträng, är det istället lämpligt att fördela dem jämnt över de olika strängarna om detta är möjligt, eftersom skuggeffekterna annars fortplantar sig från skuggade till oskuggade strängar.

Generellt sett gäller det att vara observant på att inte konfigureringen leder till att så många moduler förbikopplas att spänningen hamnar under växelriktarens

arbetsområde, så att denna slås av helt och elproduktion går förlorad. Den lägsta spänningsnivån ligger dock förhållandevis lågt hos många växelriktare.

Moduloptimizerare eller modulväxelriktare kan vara verkningsfulla, men under specifika förhållanden. Vid andra förhållanden kan de helt sakna effekthöjande funktion. I moduler med tre slingor är moduloptimizerare eller modulväxelriktare verkningsfulla om:

- Alla slingorna i en modul är skuggade, eller
- Endast en slinga är skuggad och då mindre än 33 %, eller
- Två slingor är skuggade, den minst skuggade mindre än 50 % alternativt den mest skuggade slingan mindre än 67 %.

Däremot fyller varken moduloptimizerare eller modulväxelriktare någon funktion när:

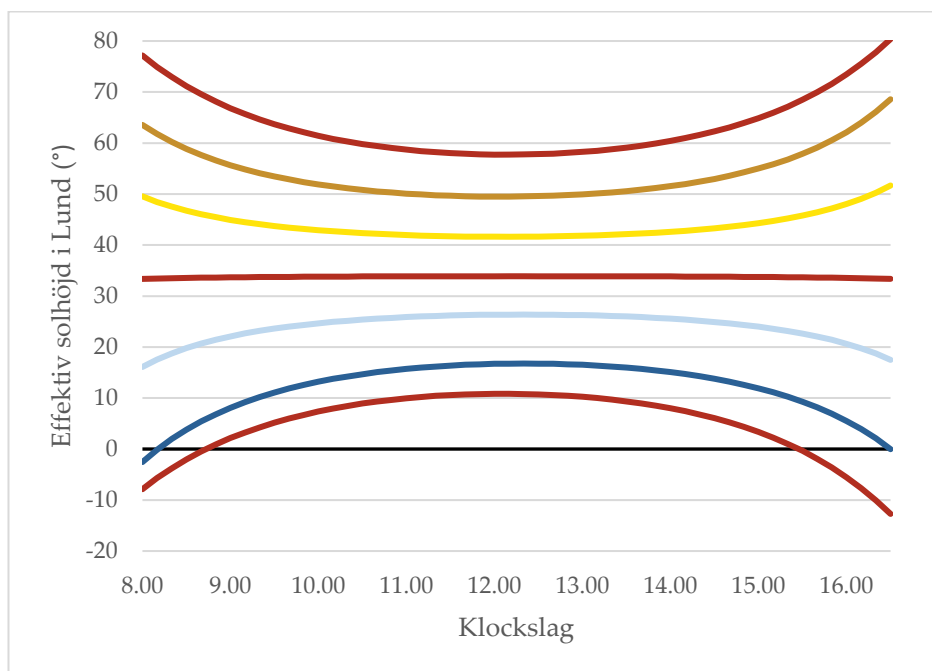
- Den skuggade modulens maxeffektpunkt fås vid full ström, eller
- En cell i varje slinga är helt (100 %) skuggad, så att ingen ström kan gå genom modulen, eller.
- Alla slingor i hela strängen är lika skuggade eller oskuggade, eller
- Modulens maxeffektpunkt ligger utanför moduloptimizerarens eller modulväxelriktarens spänningsintervall.

Moduloptimizerare är betydligt dyrare än modulväxelriktare, där de senare dock har en lägre verkningsgrad. Modulväxelriktare har dessutom förmodligen en kortare livslängd än optimerare, vilket innebär ett större behov av att ersätta komponenter under solcellsanläggningens livslängd.

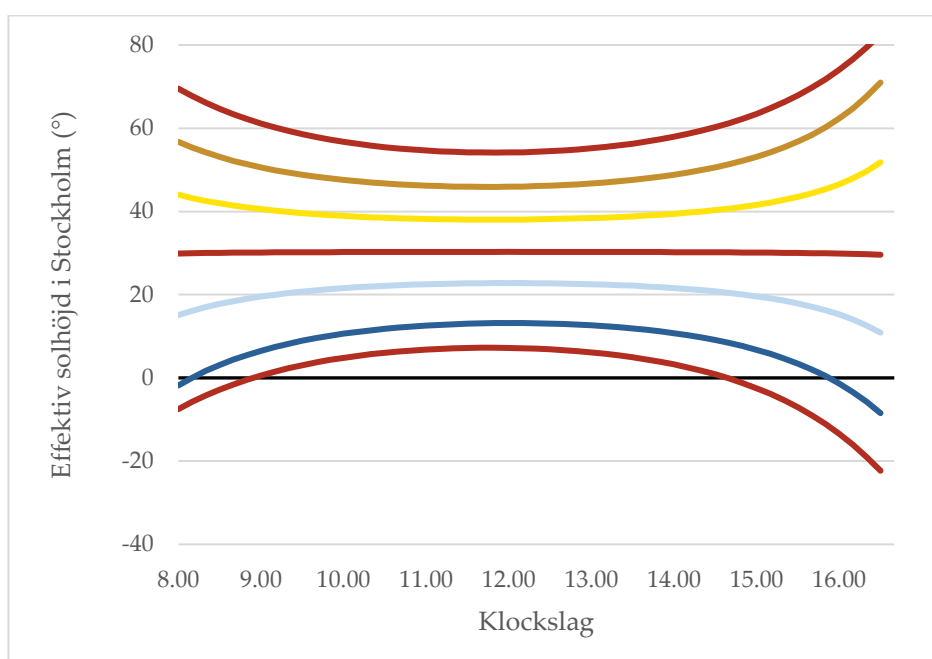
Till sist kan det konstateras att skuggning av solcellssystem är komplext, och att det är svårt att utfärda några generella rekommendationer. Simuleringsprogram, som PVsyst, innehåller funktioner för att beräkna skuggningens inverkan, men innehåller stora brister i både tillförlitlighet, transparens och användarvänlighet. Därmed är det angeläget att utveckla bättre simuleringsprogram. I väntan på detta gör den som vill minimera skuggningsförluster klokt i att skaffa sig ordentligt med kunskap. Endast så är det möjligt att göra en specifik analys av hur skuggningen i det aktuella solcellssystemet bör hanteras.

7 Appendix 1: Effektiva solhöjder i Sverige

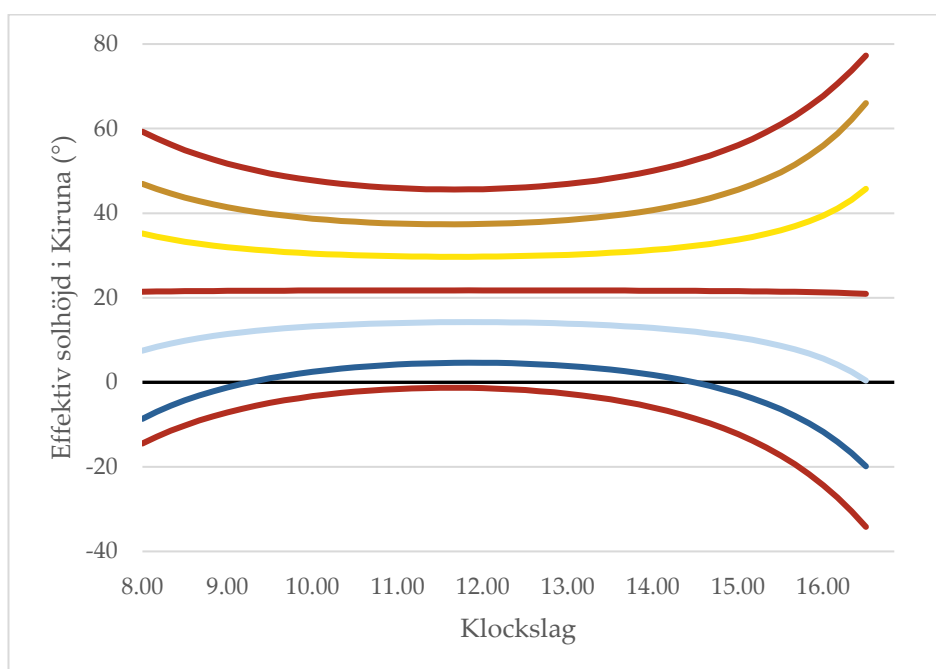
I nedanstående figurer presenteras effektiva solhöjder eller skuggvinklar vid olika tidpunkter på året i Lund, Stockholm och Kiruna.



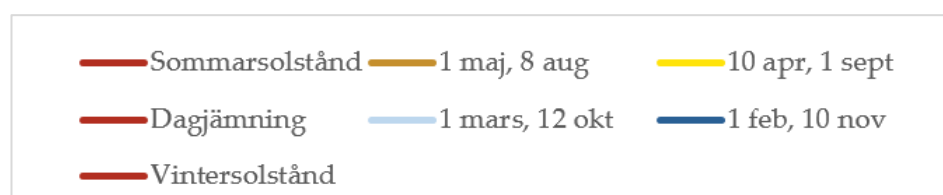
Figur 52 Effektiv solhöjd i Lund vid olika tidpunkter på året.



Figur 53 Effektiv solhöjd i Stockholm vid olika tidpunkter på året.

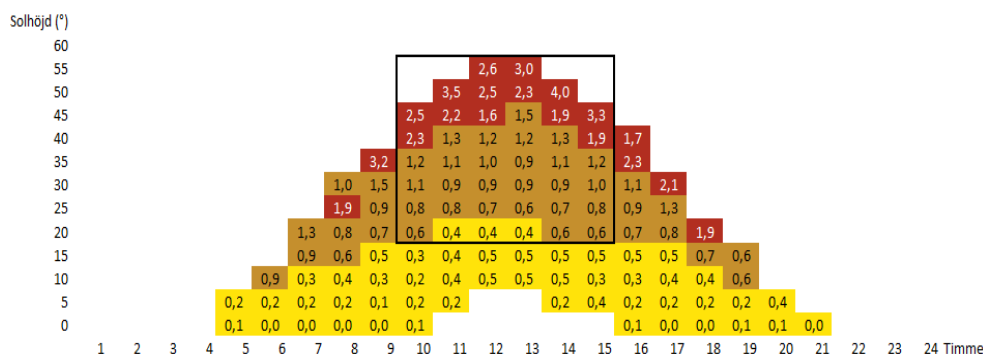


Figur 54 Effektiv solhöjd i Kiruna vid olika tidpunkter på året.

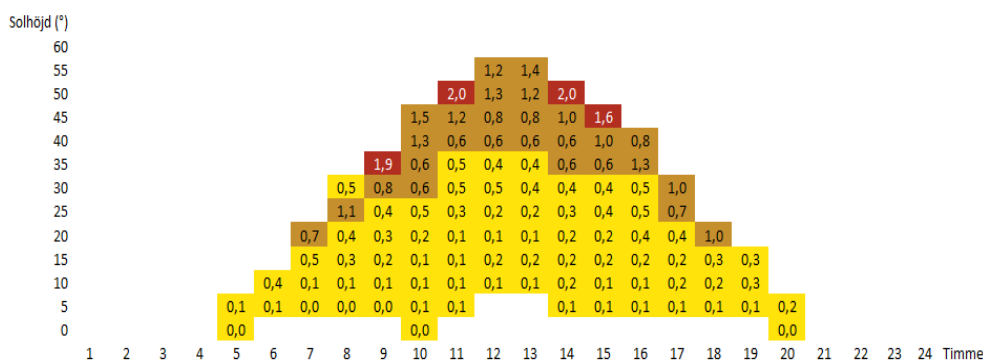


Figur 55 Förklaring

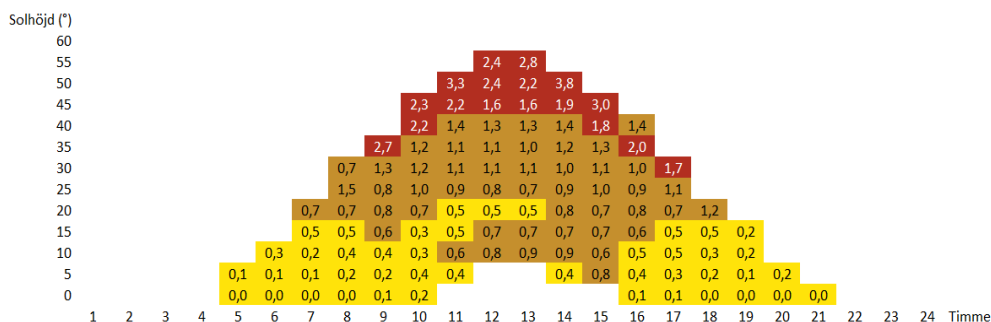
8 Appendix 2: Årlig Instrålningsfördelning



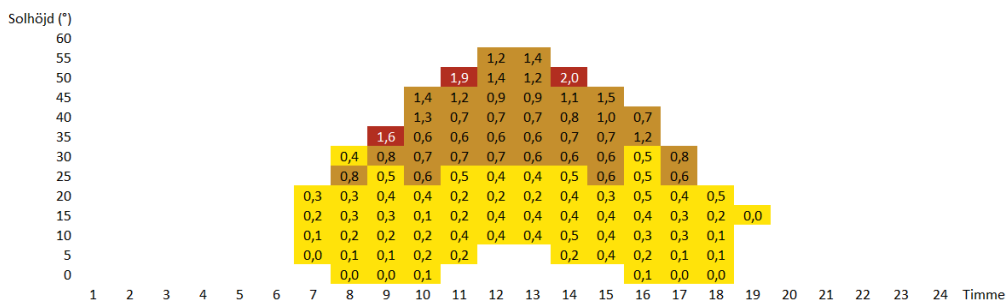
Figur 56 Procentandel av global solinstrålning mot en horisontell yta under medelår i Lund.



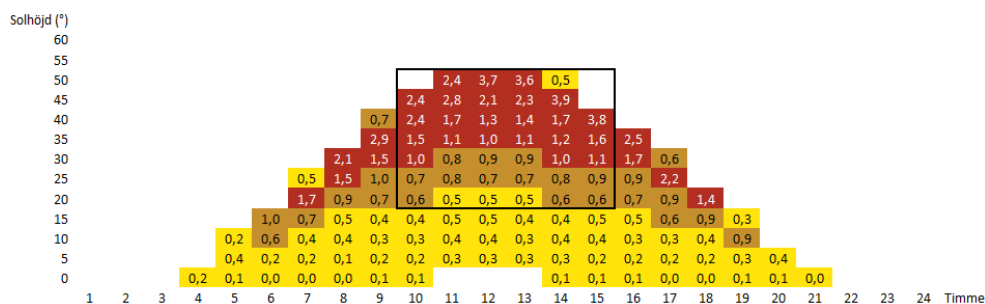
Figur 57 Direkt solinstrålning, som procentandel av globalstrålning, mot horisontell yta under medelår i Lund.



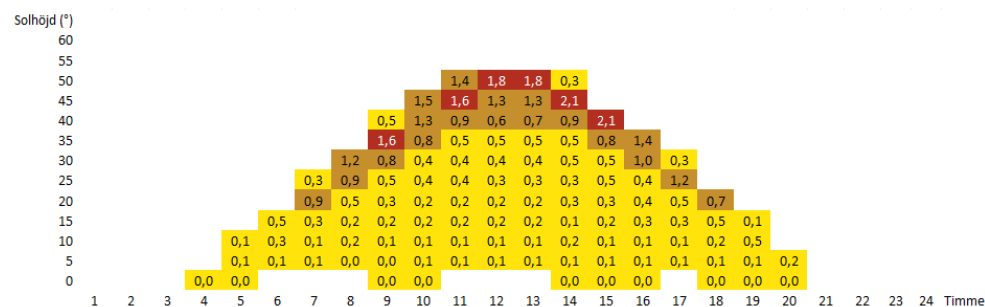
Figur 58 Procentandel av global solinstrålning mot en yta som lutar 40° mot söder under medelår i Lund.



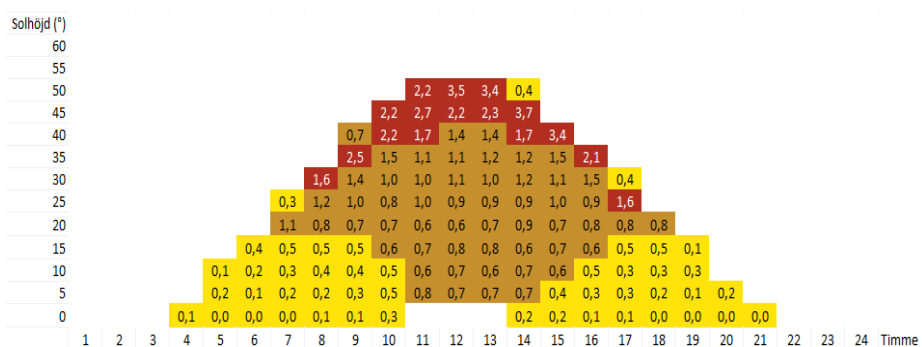
Figur 59 Direkt solinstrålning, som procentandel av globalstrålning, mot en yta som lutar 40° mot söder under medelår i Lund.



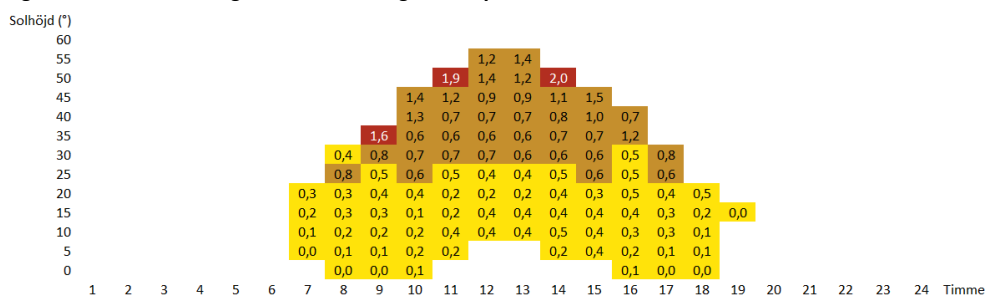
Figur 60 Procentandel av global solinstrålning mot en horisontell yta under medelår i Stockholm.



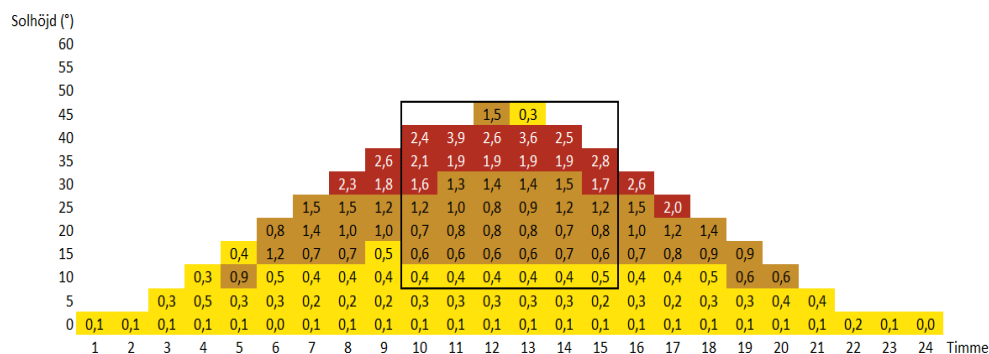
Figur 61 Direkt solinstrålning, som procentandel av globalstrålning, mot horisontell yta under medelår i Stockholm.



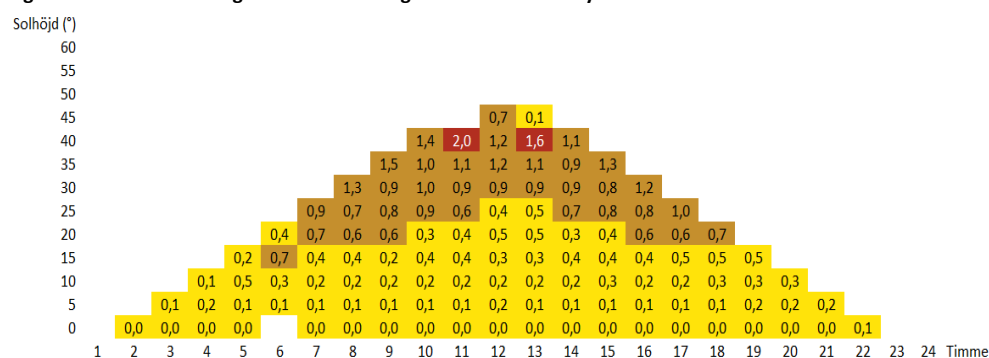
Figur 62 Procentandel av global solinstrålning mot en yta som lutar 40° mot söder under medelår i Stockholm.



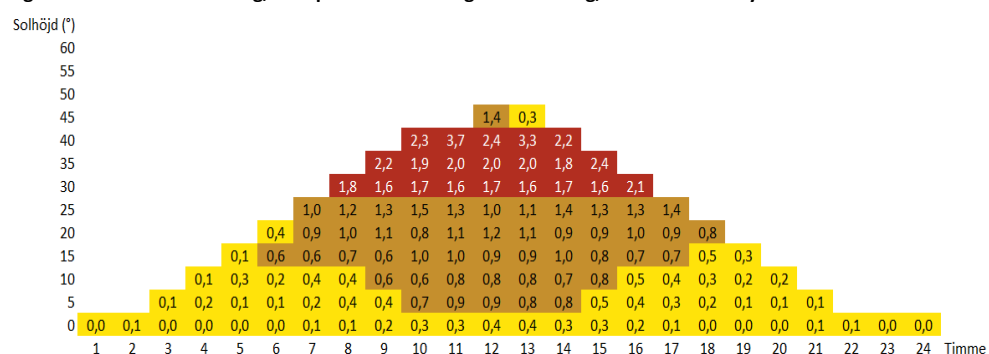
Figur 63 Direkt solinstrålning, som procentandel av globalstrålning, mot en yta som lutar 40° mot söder under medelår i Stockholm.



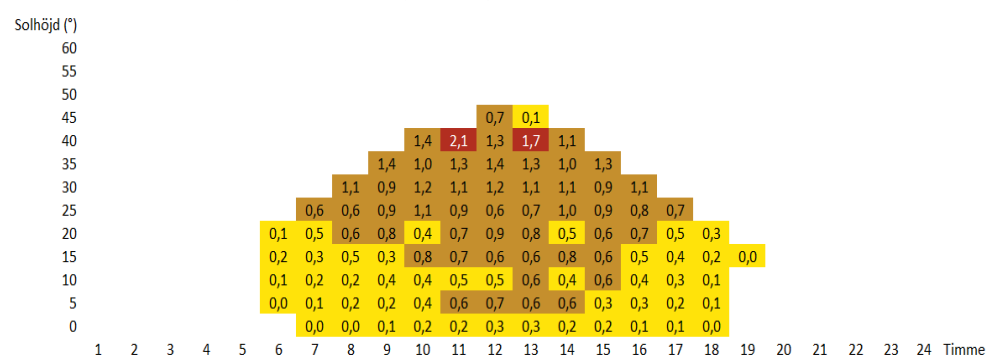
Figur 64 Procentandel av global solinstrålning mot en horisontell yta under medelår i Kiruna.



Figur 65 Direkt solinstrålning, som procentandel av globalstrålning, mot horisontell yta under medelår i Kiruna.



Figur 66 Procentandel av global solinstrålning mot en yta som lutar 40° mot söder under medelår i Kiruna.



Figur 67 Direkt solinstrålning, som procentandel av globalstrålning, mot en yta som lutar 40° mot söder under medelår i Kiruna.

9 Referenser

- Bowden, Stuart, och Christiana Honsberg. *PVEducation.org*. 2016.
<http://pveducation.org/pvcdrom/conduction-in-semiconductors> (använd den 20 10 2016).
- Bronsveld, Paula, Gianluca Coletti, P Barton, P Manshanden, och L Geerligs.
 "Differences in reverse bias voltage behavior of n-type and p-type multicrystalline solar cells." *Energy Procedia*, vol. 27, 2012: 109-115.
- Energiforsk. *Solelprogrammet*. u.d.
<http://www.solelprogrammet.se/projekteringsverktyg/energiiberakningar/#Skuggning> (använd den 05 10 2016).
- Francisco Contero, Jose, João Gomes, Mattias Gustafsson, och Björn Karlsson. "The impact of shading in the performance of three different solar PV systems." *Conference Proceedings EuroSun*. Palma de Mallorca, 2016.
- Francisco, Jose, och Contero Salvadores. *Shadowing effect on the performance in solar PV-cells*. Gävle: Höskolan i Gävle, 2015.
- Gallardo Saavedra, Sara. *Analysis and simulation of shading effects on photovoltaic cells*. Gävle: Höskolan i Gävle, 2016.
- Jansson, Simon. *Skugginverkan på PV-moduler*. Stockholm: Vattenfall Utveckling AB, 2001.
- Karlsson, Björn. *Professor i energisystem vid Höskolan i Gävle* (den 20 10 2016).
- Solibro. *Production process*. 2016. <http://solibro-solar.com/en/product/production-prozess00/> (använd den 17 11 2016).
- Stridh, Bengt. *Bengts nya villablogg*. den 04 02 2015.
<http://bengtsvillablogg.info/2015/02/04/skillnad-mellan-global-diffus-och-direkt-solinstrahlung/> (använd den 01 12 2016).
- Stridh, Bengt. *Utvärdering av Sveriges första MW-solcellspark*. Eskilstuna/Västerås: Mälardalens Höskola, 2016.
- The German Energy Society. *Planning and Installing Photovoltaic Systems*. London: Earthscan, 2013.
- Vossier, Alexis, Federico Gualdi, Alain Dollet, Richard Ares, och Vincent Aimez.
 "Approaching the Shockley-Queisser limit: General assessment of the main limiting mechanisms in photovoltaic cells." *Journal of applied physics*, no. 117, 2015: 015102 1-8.

SKUGGNINGSHANDBOK

Solcell är en viktig teknik när vi nu ställer om till ett förnybart energisystem. Antalet solcells-installationer ökar och allt fler solcellsmoduler kommer därför att placeras där skuggning förekommer. Det är viktigt att hantera skuggningen för att man ska kunna bygga effektiva och väl fungerande solcellssystem.

Att minimera inverkan från skuggning är komplext och det är därför svårt att ge generella rekommendationer, men här beskrivs övergripande vad man bör tänka på och vilka lösningar och hjälpmedel som finns.

Handboken tar upp det aktuella kunskapsläget, både när det gäller skuggningens inverkan på utbytet och när det gäller den teknik som kan användas för att minimera förlusten av skuggning. Tanken är att ge läsaren kunskap om skuggning av solcellsmoduler så att var och en själv kan dra slutsatser för hur skuggning i det aktuella solcellssystemet bäst ska hanteras.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk