

Opbrengst van zonnepanelen met een dakhoek van 90° en 75° in december en juni afhankelijk van de stand t.o.v. het zuiden (azimuth).

1 Opbrengst in december

In mijn notitie: “Opbrengst van zonnepanelen in december afhankelijk van de dakhoek (slope) en de stand t.o.v. het zuiden (azimuth)” van 11-3-2024 wordt in figuur 1 de reductiefactor gegeven voor dakhoeken van 75°, 60°, 45°, 30° en 15° en zeven scheefhoeken t.o.v. een paneel met een dakhoek van 75° dat precies naar het zuiden gericht is. De grootste scheefhoek is 90°. Een dakhoek van 90° werd in deze notitie niet meegenomen.

Op het Ecologieforum werden vragen gesteld over vrijstaande panelen met een dakhoek van 90° en een grotere scheefhoek dan 90°. Met behulp van de website van PVGIS Europe werden berekeningen uitgevoerd voor een dakhoek van 90° en scheefhoeken groter dan 90°. De gevonden kromme werd vergeleken met die voor een dakhoek van 75° omdat daarvoor de opbrengst in december het hoogst is. De website van PVGIS Europe heeft als link:

https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en

Op deze website klik je eerst op het blok “Photovoltaic performance”. Links op het blad dat dan opent, staat een kaartje. Je moet dan op Nederland klikken want anders werkt er niets. Je kunt dan rechts invullen hoeveel kW piek er totaal geïnstalleerd wordt. Je kunt ook de dakhoek ofte wel de hellingshoek (slope) en de scheefhoek t.o.v. het zuiden (azimuth) invullen. Als je dan klikt op het blok “Visualize results” dan krijg je een staafdiagram met de opbrengst per maand in kWh. Als je de cursor op de staaf houdt, dan wordt de opbrengst in kWh gegeven.

Stel we kiezen het aantal zonnepanelen zodanig dat het piekvermogen 10 kW is. Hiervoor zijn ongeveer 24 panelen van 1,1 m breed, 1,75 m hoog en 430 W piek nodig. Voordelen van de keuze van 10 kW piek zijn dat de waardes voor een ander piekvermogen eenvoudig van die voor 10 kW piek afgeleid kunnen worden en dat bij afronding van de maandopbrengst op één kWh, maar een kleine fout gemaakt wordt.

Ik heb de opbrengst in december bepaald voor twee verschillende dakhoeken namelijk 90° en 75° en voor dertien verschillende scheefhoeken t.o.v. het zuiden. Een positieve azimuth betekent dat de richting draait naar het westen. Ik heb ook een negatieve azimuth, dus draaiing naar het oosten, geprobeerd maar dat levert nagenoeg hetzelfde resultaat op als bij draaiing naar het westen. Azimuth wordt afgekort tot az. De opbrengst wordt gegeven in een staafdiagram. De in het staafdiagram afgelezen opbrengst in kWh afgerond op 1 kWh wordt gegeven in tabel 1.

Dakhoek	az. = 0°	az. = 15°	az. = 30°	az. = 45°	az. = 60°	az. = 75°	az. = 90°	az. = 105°	az. = 120°	az. = 135°	az. = 150°	az. = 165°	az. = 180°
90°	340 kWh	327 kWh	294 kWh	244 kWh	187 kWh	132 kWh	86 kWh	52 kWh	33 kWh	29 kWh	29 kWh	29 kWh	29 kWh
75°	363 kWh	350 kWh	318 kWh	269 kWh	210 kWh	153 kWh	104 kWh	66 kWh	46 kWh	41 kWh	41 kWh	41 kWh	41 kWh

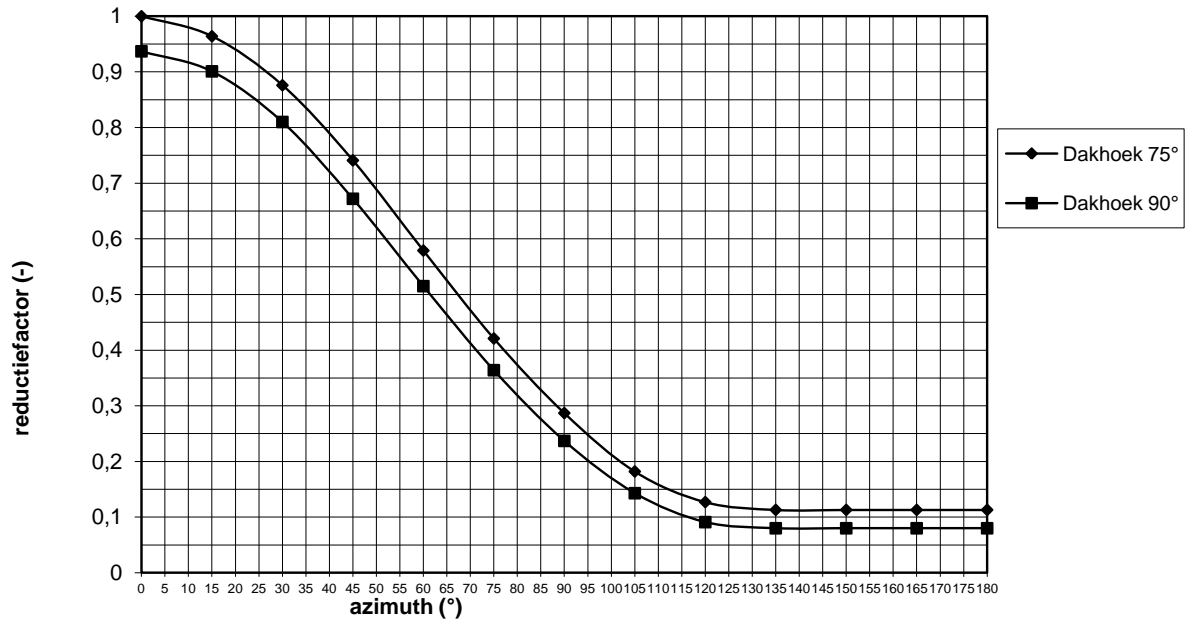
Tabel 1 Opbrengst van zonnepanelen met een dakhoek van 90° en 75° in december in kWh afhankelijk van de azimuth voor 10 kW piek

In tabel 1 is te zien dat de opbrengst het hoogst is voor een dakhoek van 75° en een azimuth van 0°. Deze opbrengst is 363 kWh. Als we alle berekende waarden delen door 363 dan krijgen we de reductiefactor waarmee de maximale opbrengst gereduceerd wordt als gevolg van een dakhoek van 90° en een bepaalde azimuth. De reductiefactoren worden gegeven in tabel 2.

Dakhoek	az. = 0°	az. = 15°	az. = 30°	az. = 45°	az. = 60°	az. = 75°	az. = 90°	az. = 105°	az. = 120°	az. = 135°	az. = 150°	az. = 165°	az. = 180°
90°	0,937	0,901	0,810	0,672	0,515	0,364	0,237	0,143	0,091	0,080	0,080	0,080	0,080
75°	1	0,964	0,876	0,741	0,579	0,421	0,287	0,182	0,127	0,113	0,113	0,113	0,113

Tabel 2 Reductiefactoren in december t.o.v. een dakhoek van 75° en een azimuth van 0°

De gevonden reductiefactoren worden voor de twee dakhoeken 90° en 75° gegeven in figuur 1 als functie van de azimuth.



Figuur 1 Reductiefactor als functie van de dakhoek en de azimuth t.o.v. een paneel met een dakhoek van 75° en een azimuth van 0° voor de maand december

In figuur 1 is te zien dat de daling van de reductiefactor nog maar beperkt is voor een azimuth kleiner dan ongeveer 20°. De kromme voor een dakhoek van 90° ligt over het gehele azimuth bereik lager dan de kromme voor een dakhoek van 75°. Wanneer de kromme voor een dakhoek van 90° vergeleken wordt met de kromme voor een dakhoek van 60° die gegeven wordt in de notitie van 11-3-2024 dan is te zien dat de kromme voor een dakhoek van 60° toch aanzienlijk beter is, vooral voor grote scheefhoeken tot 90°.

Bij grote scheefhoeken neemt de opbrengst sterk af. Bij een scheefhoek van 90° en een dakhoek van 75° is de opbrengst nog maar een factor 0,287 van de opbrengst voor een dakhoek van 75° en een scheefhoek van 0°. Bij een scheefhoek van 90° en een dakhoek van 90° is de opbrengst nog maar een factor 0,237 van de opbrengst voor een dakhoek van 75° en een scheefhoek van 0°. Het is daarom een slecht idee om panelen met een dakhoek van 90° onder een scheefhoek van 90° te plaatsen, zelfs als dubbelzijdige panelen gebruikt worden. Bij grotere scheefhoeken dan 90° daalt de reductiefactor tot 0,113 voor een dakhoek van 75° en tot 0,080 voor een dakhoek van 90°.

De reductiefactoren voor scheefhoeken groter dan 90° kunnen groter worden dan de berekende waarden als het gesneeuwd heeft omdat de lichtenergie die via reflectie op sneeuw op het paneel valt veel groter is. Met sneeuw kan in het programma van PVGIS echter geen rekening gehouden worden. Het voordeel van een dakhoek van 90° is dat er geen sneeuw op het paneel blijft liggen. Ik denk echter dat dit bij een dakhoek van 75° ook het geval is. Het frame voor een dakhoek van 75° is ook sterker.

Er worden tegenwoordig ook dubbelzijdige panelen geleverd waarbij de achterkant bijna net zo goed is als de voorkant (zie Wikipedia Bifacial solar cells). Als deze panelen maar weinig duurder zijn dan enkelzijdige panelen dan kan toepassing van deze panelen voor een grote dakhoek toch rendabel zijn, vooral als er sneeuw ligt. Uit figuur 1 blijkt echter dat voor een maximale opbrengst, de panelen precies op het zuiden gezet moeten worden en dat een dakhoek van 75° het beste is. Het is wel zo dat de achterkant van het paneel dan een dakhoek van 105° heeft en dat voor dakhoeken groter dan 90° op de website van PVGIS geen berekeningen kunnen worden uitgevoerd waardoor de concentratiefactor niet bepaald kan worden. Maar hij zal zeker kleiner zijn dan 0,080; stel 0,05.

Panelen met een grote dakhoek zijn in de zomer veel slechter dan panelen met een kleine dakhoek. Dit wordt aangetoond in mijn notitie: "Opbrengst van zonnepanelen op het zuiden afhankelijk van de dakhoek (slope) en de maand". Maar als de salderingsregeling komt te vervallen dan is de waarde van de opgewekte energie in de winter veel hoger dan die van de opgewekte energie in de zomer en daardoor is het toch gunstiger om het systeem te optimaliseren voor de winter.

Bij panelen met een dakhoek van 90° of 75° in een zonnepark, zal men een behoorlijke afstand tussen de rijen moeten handhaven om in de winter geen last te hebben van schaduwwerking. De ruimte tussen de rijen kan dan echter gebruikt worden om een gewas te laten groeien waardoor bij een dergelijk zonnepark niet alle grond aan de landbouw onttrokken wordt.

Op de website van Wikipedia staat een interessant artikel over tweezijdige zonnepanelen. Men komt hier via de link: https://www.wikipedia.org/wiki/Bifacial_solar_cells. Er wordt een grafiekje gegeven waarin de dagopbrengst van tweezijdige panelen met oost-west oriëntatie vergeleken wordt met de dagopbrengst van eenzijdige panelen die op het zuiden staan en waarbij de panelen een dakhoeck hebben van 90°. Ik heb zo mijn twijfels of in dit grafiekje wel panelen met elkaar vergeleken worden die een even groot piekvermogen of een even groot oppervlak hebben. Er wordt ook niet gegeven voor welke maand het grafiekje geldt. Wat wel duidelijk te zien is, is dat panelen die op het zuiden gericht zijn hun maximum vermogen midden op de dag leveren en dat panelen met een oost-west oriëntatie eerder op de dag beginnen, later op de dag eindigen en dat er op het midden van de dag een dip in de kromme zit.

Er wordt ook een grafiekje gegeven waarin de verhouding tussen het aantal geplaatste tweezijdige en eenzijdige panelen gegeven wordt afhankelijk van het jaar. Hierin is te zien dat tweezijdige panelen steeds meer gebruikt gaan worden en dat in 2025 al ongeveer de helft van het aantal nieuw geplaatste panelen tweezijdig is. Door deze ontwikkeling worden tweezijdige panelen steeds goedkoper t.o.v. eenzijdige panelen. Als ze bijna even duur zijn, dan zijn tweezijdige panelen te prefereren vanwege de extra opbrengst van de achterkant van het paneel.

Er worden vijf verschillende typen tweezijdige panelen gemaakt. Voor elk type wordt de bifaciality gegeven. Dit is het gecombineerde rendement van twee kanten. Het hoogste gecombineerde rendement wordt gegeven voor het type HIT en daarvoor is het 95-100 %. Dit betekent dat de opbrengst bijna even hoog is als voor twee eenzijdige panelen die met de achterkanten tegen elkaar gezet worden. Op de website van PVGIS Europe kunnen geen berekeningen uitgevoerd worden voor tweezijdige panelen maar de grafiek zoals gegeven wordt in figuur 1 kan wel gebruikt worden om inzicht te krijgen in de opbrengst van dit soort panelen.

Stel we gebruiken een dakhoeck van 90° en het type HIT en we nemen aan dat het gecombineerde rendement 100 % is. Stel we plaatsen het paneel oost-west wat betekent dat de scheefhoek 90° is. In figuur 1 is af te lezen dat de reductiefactor voor december voor een eenzijdig paneel 0,237 is. Voor een tweezijdig paneel wordt deze factor dan twee maal zo hoog en dus 0,474. Stel we plaatsen een tweezijdig paneel precies op het zuiden wat betekent dat de scheefhoek voor één kant 0° is en voor de andere kant 180°. In figuur 1 is af te lezen dat de reductiefactor voor de voorkant 0,937 is en voor de achterkant 0,080. Voor beide kanten samen dus 1,017. Dit is in december voor panelen op het zuiden dus een factor $1,017 / 0,474 = 2,146$ hoger dan voor panelen die oost-west opgesteld staan. Op basis van de totale dagopbrengst is opstelling op het zuiden dus veel gunstiger in december.

Het is wel zo dat panelen met een oost-west opstelling eerder op de dag beginnen en later op de dag eindigen maar het kan zijn dat de grafiek uit Wikipedia waarin dit aangetoond wordt speciaal geldig is voor de zomermaanden omdat de zon dan vroeg opkomt en laat onder gaat. Toch zou overwogen kunnen worden om een deel van tweezijdige panelen met een dakhoeck van 90° op het zuiden te plaatsen en een deel oost-west te plaatsen. De gezamenlijke opbrengst wordt dan gelijkmatiger over de dag verdeeld.

Een aspect dat op de website van PVGIS Europe niet meegenomen kan worden is de invloed van sneeuw. Als het gesneeuwd heeft dan treedt er extra instraling van energie op vanwege reflectie. De opbrengst kan dan aanzienlijk hoger worden met name voor die kant van een tweezijdig paneel die niet naar de zon gericht is.

De waarde van de opgewekte energie wordt bepaald door de schaarste. Hoewel oost-west opgestelde panelen in december dus veel minder opwekken dan panelen die op het zuiden staan, leveren zij al wel eerder en later op de dag energie. Als de energie dan meer waard is dan midden op de dag dan kan dit de lagere totale dagopbrengst financieel compenseren.

2 Opbrengst in juni

Tot nu toe werd alleen de opbrengst in december bekeken omdat dit de meest kritische maand is. In mijn notitie: "Opbrengst van zonnepanelen op het zuiden afhankelijk van de dakhoeck (slope) en de maand" is te zien dat een dakhoeck van 90° in de zomermaanden ongeveer de helft aan opbrengst geeft als de opbrengst voor een dakhoeck van 15°. Maar in deze notitie staan de panelen op het zuiden en is de scheefhoek dus 0°. Om tweezijdige panelen met een oost-west opstelling en een dakhoeck van 90° in de zomer te kunnen vergelijken met panelen die precies op het zuiden staan is het nodig om ook grafieken voor juni te maken. Dit werd op dezelfde manier gedaan als voor december.

Stel we kiezen het aantal zonnepanelen zodanig dat het piekvermogen 10 kW is. Ik heb de opbrengst in december bepaald voor twee verschillende dakhoeken namelijk 90° en 75° en voor dertien verschillende scheefhoeken t.o.v. het zuiden. Een positieve azimuth betekent dat de richting draait naar het westen. Ik heb ook een negatieve azimuth, dus draaiing naar het oosten, geprobeerd maar dat levert nagenoeg hetzelfde resultaat op als bij draaiing naar het westen. Azimuth wordt afgekort tot az. De opbrengst wordt gegeven in een staafdiagram. De in het staafdiagram afgelezen opbrengst in kWh afgerond op 1 kWh wordt gegeven in tabel 3.

Dakhoek	az. = 0°	az. = 15°	az. = 30°	az. = 45°	az. = 60°	az. = 75°	az. = 90°	az. = 105°	az. = 120°	az. = 135°	az. = 150°	az. = 165°	az. = 180°
90°	659 kWh	664 kWh	699 kWh	741 kWh	759 kWh	759 kWh	737 kWh	685 kWh	630 kWh	548 kWh	458 kWh	386 kWh	346 kWh
75°	885 kWh	892 kWh	913 kWh	940 kWh	946 kWh	930 kWh	904 kWh	846 kWh	782 kWh	691 kWh	600 kWh	513 kWh	468 kWh

Tabel 3 Opbrengst van zonnepanelen met een dakhoek van 90° en 75° in juni in kWh afhankelijk van de azimuth voor 10 kW piek

In tabel 3 is te zien dat de opbrengst voor een dakhoek van 75° hoger is dan voor een dakhoek van 90° . De opbrengst voor een dakhoek van 90° is echter niet maximaal voor een scheefhoek van 0° maar voor een scheefhoek van 60° . Toch wordt de opbrengst van 885 kWh voor een dakhoek van 75° en een scheefhoek van 0° als referentie opbrengst genomen en wordt de reductiefactor t.o.v. deze waarde bepaald net zoals dat ook voor december gedaan werd. Sommige reductiefactoren voor een dakhoek van 75° worden hierdoor groter dan 1. Als we alle berekende waarden delen door 885 dan krijgen we de reductiefactor waarmee de maximale opbrengst gereduceerd wordt als gevolg van een dakhoek van 90° en een bepaalde azimuth. De reductiefactoren worden gegeven in tabel 4.

Dakhoek	az. = 0°	az. = 15°	az. = 30°	az. = 45°	az. = 60°	az. = 75°	az. = 90°	az. = 105°	az. = 120°	az. = 135°	az. = 150°	az. = 165°	az. = 180°
90°	0.745	0.750	0.790	0.837	0.858	0.858	0.833	0.774	0.712	0.619	0.518	0.436	0.391
75°	1	1.008	1.032	1.062	1.069	1.051	1.021	0.956	0.884	0.781	0.678	0.580	0.529

Tabel 4 Reductiefactoren in juni t.o.v. een dakhoek van 75° en een azimuth van 0°

De gevonden reductiefactoren worden voor de twee dakhoeken 90° en 75° gegeven in figuur 2 als functie van de azimuth.



Figuur 2 Reductiefactor als functie van de dakhoek en de azimuth t.o.v. een paneel met een dakhoek van 75° en een azimuth van 0° voor de maand juni

In figuur 2 is te zien dat een dakhoek van 75° voor alle scheefhoeken toch aanzienlijk beter is dan een dakhoek van 90° . Maar stel dat we toch willen dat de dakhoek 90° is omdat we dan maximale vrije ruimte hebben tussen de panelen als zij vrij in het veld opgesteld worden. Voor een eenzijdig paneel is de reductiefactor 0,745 voor een scheefhoek van 0° , 0,833 voor een scheefhoek van 90° en 0,391 voor een scheefhoek van 180° . Aangenomen wordt dat de reductiefactor voor een scheefhoek van 270° gelijk is aan die voor 90° en dus ook 0,833 is. Stel we passen tweezijdige panelen toe van het type HIT en we nemen aan dat het gecombineerde rendement 100 % is. We krijgen dan dezelfde opbrengst als wanneer twee enkelzijdige panelen met de rug tegen elkaar gezet worden (als het piekvermogen ook gelijk is).

Voor een tweezijdig paneel dat precies op het zuiden staat krijgen we dan een totale reductiefactor van $0,745 + 0,391 = 1,136$. Voor een tweezijdig paneel dat oost-west staat krijgen we dan een totale reductiefactor van $0,833 + 0,833 = 1,666$. Een paneel dat oost-west staat is in juni dus een factor $1,666 / 1,136 = 1,61$ beter dan een paneel dat precies op het zuiden staat. Daarbij komt ook nog dat een tweezijdig paneel dat oost-west staat eerder op de dag begint met leveren en later op de dag eindigt met leveren.

In hoofdstuk 1 werd aangetoond dat een tweezijdig paneel met een dakhoek van 90° dat oost-west staat in december veel slechter is dan een tweezijdig paneel dat precies op het zuiden staat. Energie die in december opgewekt wordt is echter veel meer waard dan energie die in juni opgewekt wordt. Zonder precies te weten hoeveel de waarde van de opgewekte energie is afhankelijk van de maand en afhankelijk van het uur op de dag is niet te bepalen wat nu economisch gezien de beste opstelling is.

In figuur 2 is te zien dat een eenzijdig paneel met een dakhoek van 75° voor een scheefhoek van 0° een factor $1 / 0,745 = 1,342$ beter is dan een eenzijdig paneel met een dakhoek van 90° . Voor een tweezijdig paneel staat de achterkant onder een dakhoek van 105° als de voorkant onder een dakhoek van 75° staat. Met het programma van PVGIS Europe kunnen geen berekeningen uitgevoerd worden voor dakhoeken groter dan 90° . Maar de reductiefactor voor een dakhoek van 105° en een scheefhoek van 180° kan wel geschat worden. In figuur 2 en tabel vier is af te lezen dat de reductiefactor voor een dakhoek van 75° en een scheefhoek van 180° , 0,529 is en dat hij voor een dakhoek van 90° en een scheefhoek van 180° , 0,391 is. Het verschil is dus $0,529 - 0,391 = 0,138$. Stel nu eens dat de reductiefactor met dezelfde waarde daalt als de dakhoek vergroot wordt van 90° naar 105° . Voor een dakhoek van 105° en een scheefhoek van 180° wordt de reductiefactor dan $0,391 - 0,138 = 0,253$.

De gecombineerde reductiefactor voor een tweezijdig paneel waarvan de voorkant op een dakhoek van 75° staat wordt dan voor een scheefhoek van 0° , $1 + 0,253 = 1,253$. Dit is een factor $1,253 / 1,136 = 1,103$ hoger dan de waarde van 1,136 die geldt voor een tweezijdig paneel met een dakhoek van 90° en een scheefhoek van 0° . In figuur 1 is te zien dat het verschil tussen een dakhoek van 75° en een dakhoek van 90° in december minder groot is dan het verschil in juni. Maar voor tweezijdig panelen die op het zuiden geplaatst worden, is het dus toch beter om een dakhoek van 75° i.p.v. 90° toe te passen.