

PROJECT B

Fotovoltaïsch potentieel in Millingen aan de Rijn

Simone Stocco (# 24860)

Master o Bionica / Biomimetica

Faculteit Technologie en Bionica

Rijn-Waal University of Applied Sciences

Project B

Begeleider: Prof. Dr. Georg Bastian



Origineel geschreven in het Engels, vertaling d.m.v. Google translate

ABSTRACT:

De toenemende bezorgdheid over milieukwesties heeft geleid tot een verandering in de benadering van de menselijke ontwikkeling. Met name de belangstelling voor meer duurzame en hernieuwbare energie is toegenomen. Tot nu toe zijn fossiele brandstoffen de belangrijkste energetische bron en worden tegelijkertijd verondersteld verantwoordelijk te zijn voor de negatieve effecten van menselijke activiteit op het milieu. Bovendien zijn die bronnen beperkt. Het vinden van een alternatieve hernieuwbare energiebron wordt beschouwd als het startpunt om de negatieve trend om te buigen. Energie die wordt geproduceerd met behulp van zonnestraling is een van de voorbeelden van groene en hernieuwbare bronnen. Fotovoltaïsche systemen zijn een gevestigde technologie die in staat is om de straling van de zon om te zetten in elektrische energie. Ondanks de grote technologische ontwikkeling die de afgelopen jaren heeft plaatsgevonden, blijven traditionele praktische problemen bestaan, zoals grote oppervlaktevereisten voor installatie en de kloof tussen optimale productiesites en consumptiesites. Op het dak geïnstalleerd PV-systeem kan beide problemen mogelijk tegelijk oplossen, bovendien vertrouwen ze op reeds bestaande infrastructuren die de installatiekosten beperken. Er zijn veel studies uitgevoerd om grootschalige systemen te onderzoeken waarbij grote stedelijke gebieden betrokken zijn (van kleine dorpen tot steden tot hele regio's). Het doel van dit document is om de potentiële elektriciteitsproductie te bestuderen die kan worden bereikt door alle beschikbare daken (zowel huishoudens als industriële gebouwen) in Millingen aan de Rijn, een kleine stad in Nederland, te bestrijken. De verkregen waarden worden vergeleken met het werkelijke elektriciteitsverbruik. Het onderzoek maakt deel uit van een groter project, dat tot doel heeft het dorp energetisch onafhankelijk te maken door middel van hernieuwbare bronnen. De gebruikte methodologie is gebaseerd op online gevonden open source data en statistische analyse. Eerst werden de gebouwen geïventariseerd en in klassen ingedeeld op basis van hun vorm, oriëntatie en afmeting door visueel onderzoek van satellietkaarten. De grootte is bepaald aan de hand van gegevens van het rijkskadaster. Aan de hand van bestaande literatuur en visueel onderzoek werd de werkelijk beschikbare dakoppervlakte berekend door middel van correctiecoëfficiënten. Ten slotte werd door middel van een online tool van PV * Sol de potentiële energieproductie geschat, wat resulteerde in bijna 3 keer het huishoudelijk verbruik (14.569 GWh potentiële geproduceerde energie, 42,89 GWh geschat energieverbruik). De resultaten veranderen als een opslagsysteem wordt overwogen, in dit geval is de geproduceerde potentiële energie iets minder dan de verbruikte. Dit aspect valt buiten het bestek van dit onderzoek en is alleen opgenomen om een voorlopige referentie te hebben. De verkregen waarden zijn het resultaat van een kwalitatieve analyse en verder onderzoek moet worden uitgevoerd om de nauwkeurigheid te vergroten en de parameters op te nemen die voor de eenvoud zijn verwaarloosd, en dus meer betrouwbare schattingen opleveren.

Inhoudsopgave

Lijst van tabellen.....	4
1 Invoering.....	5
2 Methodologie.....	7
2.1 Dakeninventaris.....	8
2.2 Potentiële energieproductie.....	11
2.3 Analyse van de energievraag.....	12
2.4 Economische analyse.....	12
3. Resultaten.....	13
3.1 Fysiek potentieel.....	13
3.2 Gebouweninventaris.....	14
3.3 Hellende daken voorraad.....	14
3.4 Potentiële energieproductie.....	14
3.5 Vermogen consumptie.....	15
3.6 Economisch analyse.....	15
3.7 Samenvatting.....	17
4 Discussie.....	17
5 Toekomstperspectieven.....	19
6. Conclusie.....	20
7 Referenties	21
8 Bijlage 1.....	22
9 Bijlage 2.....	24

Lijst van tabellen

Tabel 1: gebruikte corrigerende parameters	10
Tabel 2: technische kenmerken van het PV-paneel dat wordt gebruikt om het systeem te simuleren .	11
Tabel 3.1: geografisch en technologisch potentieel van conventionele huishoudens voor de oriëntatieklassen “op het zuiden”	14
Tabel 3.2: geografisch en technologisch potentieel van conventionele huishoudens voor de oriëntatieklassen “op het noorden”	14
Tabel 3.3: geografisch en technologisch potentieel van bijzondere gebouwen voor de oriëntatieklassen “op het zuiden”	15
Tabel 3.4: geografisch en technologisch potentieel van bijzondere gebouwen voor de oriëntatieklassen “noordgericht”	15
Tabel 3.5: geografisch en technologisch potentieel van flatgebouwen (huishoudens en bijzondere gebouwen)	15
Tabel 4: Totaal elektriciteitsverbruik in Millingen woningen in de afgelopen 7 jaar en relatieve gemiddelde waarde	15
Tabel 5: parameters gebruikt voor de berekening van het rendement van de investering en de resulterende afschrijvingstijd	16
Tabel 6: schatting van de energetische opbrengst voor EROI-berekening	16
Tabel 7: schatting van de energetische kost van het systeem voor EROI-berekening	16
Tabel 8: overzicht van de resultaten van de potentiële energieproductie en geschat energieverbruik .	17
Tabel 9: eindresultaten, rekening houdend met een opslagsysteem	18
Tabel A. 1: inventaris woongebouwen, afhankelijk van grootte, vorm en oriëntatie van de dakrand ..	24
Tabel A.2: inventaris bijzondere gebouwen, afhankelijk van grootte, vorm en oriëntatie van de dakrand	24
Tabel A. 3 voetafdrukgebied van woongebouwen afhankelijk van oriëntatie en relatief geschat dakoppervlak	25
Tabel A. 4: voetafdrukgebied van speciale gebouwen afhankelijk van oriëntatie en relatief geschat dakoppervlak.	25
Tabel A.5: beschikbare dakoppervlakte woongebouwen afhankelijk van oriëntatie	26
Tabel A.6: speciale gebouwen beschikbaar dakoppervlak afhankelijk van oriëntatie	26

1. Inleiding

Het alarm over de negatieve effecten van menselijke ontwikkeling op het milieu is de afgelopen decennia toegenomen. Kwesties als lucht-, bodem- en waterverontreiniging, broeikas effect, gecombineerd met de beperking van de middelen leidden tot een verandering in de benadering van de gevolgen van de technologische vooruitgang. Bijgevolg waren verschillende onderzoeken en projecten gericht op het vinden van een oplossing voor die problemen, met als doel de schade die in het verleden is aangericht te verminderen en tegelijkertijd het algehele proces om te zetten in een duurzamer proces. Energie is een van de fundamentele aspecten van technologische ontwikkeling. In feite is de industriële revolutie bepaald door de omschakeling van de belangrijkste energiebron: van door mensen aangedreven machines naar door stoom aangedreven motoren. Vandaar het belang van het onderzoek in deze richting. Tot nu toe waren fossiele brandstoffen de belangrijkste energiebron. Tegelijkertijd zijn ze ook verantwoordelijk voor de negatieve effecten die de planeet beïnvloeden. Bovendien zijn die middelen beperkt, aangezien de menselijke bevolking exponentieel toeneemt en het verbruik van hulpbronnen als gevolg daarvan toeneemt, waardoor een hernieuwde belangstelling voor alternatieve oplossingen steeds relevanter wordt in de wetenschappelijke gemeenschap. Het idee is om ons productieve en consumerende systeem progressief om te zetten in processen die duurzamer zijn voor het milieu en onbeperkt beschikbaar zullen zijn: zon, wind, geothermie, water, enz. Zijn allemaal voorbeelden van schone en hernieuwbare energiebronnen die op de rol van fossiele brandstoffen ten minste gedeeltelijk vervangen. Het is belangrijk erop te wijzen dat bij de huidige stand van de techniek geen van de hernieuwbare energiebronnen in staat is om de traditionele fossiele brandstoffen volledig te vervangen. De overheersende benadering is om meer technologieën te combineren om deze beperking te overwinnen en hybride systemen te vormen. Over dit onderwerp zijn veel projecten en onderzoeken uitgevoerd.

Fotovoltaïsche (PV) technologie is een van de meest bestudeerde, dus ook een van de meest gevestigde. Door middel van halfgeleiders laten zonnepanelen toe om de energie die door de zon wordt uitgestraald om te zetten in elektrische stroom, met andere woorden, de elektromagnetische energie die door de zon wordt uitgestraald, wordt omgezet in elektrische energie. PV-systemen zijn de laatste jaren op grote schaal gebruikt, zelfs onder particuliere gebruikers. Door de commercialisering van deze technologie kon het onderzoek vooruitgaan en hun prestaties opmerkelijk verbeteren. Omdat het is gebaseerd op schone en onbeperkte hernieuwbare energiebronnen, speelt de efficiëntie een minder belangrijke rol in hun analyse. Belangrijker zijn aspecten die verband houden met hun economische en milieu-impact die in dit document kort zullen worden besproken. Een van de grootste beperkingen van deze technologie houdt verband met de variabiliteit van het systeem. Met andere woorden, PV-systemen zijn alleen in staat om de energievorm onmiddellijk om te zetten, maar hebben niet de intrinsieke capaciteit om deze energie op te slaan. De energieopbrengst is sterk afhankelijk van vele omgevingsfactoren (locatie, weer, positionering, dag / nacht cyclus, etc.), in tegenstelling tot andere traditionele energiebronnen ontbreekt het aan operationele continuïteit. Hieruit vloeit de ergste beperking van fotovoltaïsche energie voort: de noodzaak om de systemen geïnstalleerd te hebben op locaties waar de energievoorziening vereist is, en meestal vallen de optimale productielocaties en de meest verbruikende gebieden helemaal niet samen. PV op het dak zou mogelijk een oplossing kunnen bieden voor dit probleem, vandaar de interesse van de wetenschappelijke gemeenschap. Door fotovoltaïsche systemen te monteren op reeds bestaande gebouwen zal het bodemverbruik worden voorkomen, dat het een relevant aspect is, vooral in dichtbevolkte gebieden, de installatiekosten kunnen verlagen en last but not least zou kunnen zorgen voor schone energie die de logistieke problemen vermindert of elimineert aan het energietransport. Daarom vertegenwoordigen daken van gebouwen een enorm potentieel voor grootschalige PV-toepassingen. [1-9]

De strategie van de Europese unie voor energieomschakeling ten gunste van hernieuwbare bronnen omvat ook deze strategie, zoals blijkt uit de talrijke artikelen waarnaar wordt verwezen. Dit artikel onderzoekt experimenteel het specifieke geval, dat al is toegepast in verschillende real-life experimenten, om alle gebouwen in de gemeente uitgebreid te bedekken met PV-panelen om een grootschalig systeem te creëren dat in staat is om grote hoeveelheden elektrische energie te produceren, en mogelijk voldoen aan alle lokale energievraag. Het doel van dit onderzoek is om de potentiële fotovoltaïsche energieproductie van alle daken van Millingen aan de Rijn te kwantificeren. Dit werk maakt deel uit van een groter project dat tot doel heeft een complex systeem te ontwikkelen dat de stad onafhankelijk maakt

vanuit energetisch oogpunt. Het idee is om groene energie op te wekken met het eerder genoemde grootschalige PV-systeem, en waterstof te gebruiken als opslagbrandstof: het overschot aan energie zal worden gebruikt om waterstof te produceren, dat later kan worden gebruikt als brandstof om elektriciteit te produceren wanneer de energie wordt geleverd door PV-cellen is niet voldoende. De eerste stap in deze richting betreft de globaal kwalitatieve analyse van de potentiële energieproductie die met alle beschikbare daken kan worden gedaan. Het is belangrijk om de belangrijkste kenmerken van het geanalyseerde monster te noemen. Millingen aan de Rijn is een kleine gemeente, waarvan de gebouwen meestal bestaan uit woonhuizen en enkele grotere gebouwen voor commerciële, agrarische of industriële doeleinden. School en kerken zijn de enige uitzonderingen. Het energetisch profiel van de gemeente wordt dus vooral bepaald door het huishoudelijk verbruik.

Zoals vermeld in de vorige paragraaf, zijn er al veel onderzoeken uitgevoerd, zelfs als er verschillende benaderingen en tools zijn gebruikt, blijft de fundamentele structuur die wordt gebruikt dezelfde. De meest gebruikte benadering wordt bepaald door een hiërarchische benadering, georganiseerd in niveaus die vrijwel de energietransductie van de zonnestraling naar het elektriciteitsnet volgen. Elk niveau wordt gekenmerkt door een gedeeltelijk verlies van de vorige hogere fase: bijv. de straling van de zon buiten de atmosfeer is veel hoger dan die op het aardoppervlak. Op basis daarvan volgt de evaluatie van de PV het onderzoek van verschillende potentialen:

1. Fysiek of theoretisch
2. Geografisch
3. Technologisch
4. Economisch

Het fysieke potentieel wordt gedefinieerd als de hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt. Het hangt sterk af van de breedtegraad, aangezien de straling verandert met de locatie op aarde. Bovendien is het triviaal dat deze waarde afhankelijk is van het seizoen, het weer en van de dag / nachtcyclus. In de meeste onderzoeken, inclusief deze, worden de resultaten jaarlijks in overweging genomen, dus die aspecten worden intrinsiek in overweging genomen zodra de locatie is geselecteerd. Het geografische potentieel wordt bepaald door de daadwerkelijke hoeveelheid straling die kan worden benut, met andere termen wordt het gedefinieerd als het citaat van zonnestraling die kan worden verzameld met behulp van het beschikbare gebied dat beschikbaar is voor gebruik. In deze opdracht wordt het weergegeven door het beschikbare dakoppervlak, verkregen uit het totale dakoppervlak door de onbruikbare delen af te trekken die worden ingenomen door andere kenmerken (bijv. Schoorstenen, ramen, antennes, enz.). Technologisch potentieel is gerelateerd aan de efficiëntie van de zonnepanelen en van het totale systeem, gegeven het beschikbare oppervlak geeft het het percentage van de zonne-energie aan dat daadwerkelijk kan worden omgezet in elektrische stroom. Het is triviaal dat dit aspect verband houdt met de gebruikte PV-technologie en met de elektrische componenten die voor het elektrische compartiment zijn geselecteerd (bedrading, omvormer, enz.). In deze analyse is gekozen voor een standaard paneel en omvormer als referentie, om de algemeenheid van deze beoordeling te behouden. [1-9]

Hoewel het buiten het bereik van deze analyse valt, is er ook een kort economisch potentieel geëvalueerd, alleen om een alomvattend beeld van de beoordeling te geven. Twee parameters zijn beschouwd als het rendement van de investering (ROI) en het energierendement van de investering (EROI). De eerste kwantificeert de jaren die nodig zijn om de investering terug te verdienen, de laatste geeft een coëfficiënt aan die gewoonlijk wordt gebruikt om het netto energetisch voordeel van een specifieke energiebron te schatten. Het wordt gebruikt om verschillende energiebronnen te vergelijken en hun kwaliteit te kwantificeren in termen van hoeveel energie er wordt gewonnen in vergelijking met de energie die nodig is om het te oogsten (d.w.z. equivalente energetische kosten voor panelenproductie, installatie, transport, enz.). EROI is ook erg belangrijk in termen van duurzaamheid, omdat het een bruikbare index biedt van de netto-energieanalyse die deel uitmaakt van de beruchte methodologie van levenscyclusanalyse, die de milieu-impact van een project analyseert vanuit een holistisch oogpunt. Dit laatste deel van de analyse is puur informatief en kan niet uitputtend en accuraat worden beweerd. [10-12]

Deze hiërarchische benadering werd gebruikt om deze analyse uit te voeren. In dit artikel zijn alle gegevens verkregen uit open bronnen die online beschikbaar zijn. In het bijzonder om het technologische potentieel te evalueren, werd een online tool ter beschikking gesteld

door PV*Sol werd gebruikt (<http://pvsol-online.valentin-software.com/#/>). De software berekent ook automatisch het stralingsprofiel zodra de locatie is geselecteerd. Een extra online tool van de Europese Commissie, Photovoltaic Geographical Information System (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html), werd gebruikt als vergelijking en om de bestralingsgegevens met hoge nauwkeurigheid te bepalen. De evaluatie van het geografische potentieel, d.w.z. de inventarisatie van de daken, gebeurde met behulp van satellietkaarten die vrij toegankelijk zijn vanaf websites van de Nederlandse overheid. In detail werden kadasterkaarten (Publieke Dienstverlening Op de Kaart beschikbaar op <https://www.pdok.nl/viewer/>) gebruikt om de gemiddelde voetafdruk grootte te beoordelen, terwijl hoogtekaart (Actueel Hoogtebestand Nederland beschikbaar op <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>) werden gebruikt om het hoogteprofiel van de gebouwen, dus de dakhelling, en het type constructie te bepalen. Om de morfologie van dubbelzinnige gebouwen verder te verduidelijken, werden de satellietbeelden van de online tools gebruikt en soms ook de afbeeldingen van Google maps (<https://www.google.it/maps>).

Om het rendement van de investering te bepalen, werd een andere online tool gebruikt (<http://pvcalc.org/pvcalc>). Hoewel veel parameters kunnen worden opgenomen om een gedetailleerde economische analyse uit te voeren, zijn alleen de basisfuncties gebruikt.

In de volgende paragrafen wordt de methodologie in detail gepresenteerd, met bijzondere aandacht voor de aannames en vereenvoudigingen die zijn gemaakt om de evaluatie te vereenvoudigen.

Vervolgens wordt de potentiële energieproductie in Millingen aan den Rijn gedetailleerd weergegeven, inclusief alle tussenstappen met relatieve tabellen. De resultaten worden vervolgens besproken en de potentiële energieproductie wordt vergeleken met het geschatte energieverbruik. Omwille van de discussie is een voorbeeld van een opslagsysteem gehypostatiseerd, evenals een korte economische studie van het PV-systeem om de betekenis van de algehele analyse te vergroten. In het afsluitende deel worden de resultaten van het onderzoek samengevat en worden vooruitzichten voor het toekomstige werk gepresenteerd.

2 Methodologie

De methodologie is ontworpen volgens het potentieelconcept dat in de vorige paragraaf is beschreven. Om de potentiële energieproductie uit zonnestraling met fotovoltaïsche cellen te evalueren en af te stemmen op de vraag van het dorp, werd de opdracht opgedeeld in drie hoofdstappen:

1. Dakeninventarisatie om de mogelijk beschikbare oppervlakte te bepalen
2. Berekening van de potentiële energieproductie
3. Analyse van de energievraag
4. Economische analyse

Bovendien is gekozen voor een statistische benadering, gezien het relatief grote aantal woningen. De huishoudens zijn ingedeeld in een relevant aantal klassen, afhankelijk van verschillende parameters zoals grootte, oriëntatie en typologie. Om de berekening te vereenvoudigen en tegelijkertijd nauwkeurige resultaten te geven, worden gemiddelde waarden gebruikt voor zowel de bepaling van de grootte van het gebouw, de dakhellingen als voor de schatting van het energieverbruik.

Behalve de analyse van de energievraag, werd al het andere deel van het onderzoek uitgevoerd door middel van gratis online tools. In de volgende secties wordt de methodologie van elke stap in detail beschreven.

2.1 Dakinventaris

De inventaris van de daken vormt de kern van de analyse van het Geografisch potentieel. Naar bereken het totale beschikbare dakoppervlak voor de installatie van fotovoltaïsche systemen, op basis van een statistische benadering op klassen werd gekozen. Het idee is om de berekening te vereenvoudigen door rekening te houden met grote groepen entiteiten die dat wel hebben dezelfde kenmerken in plaats van afzonderlijke gebouwen één voor één. Inderdaad, een berekening op basis van echte gegevens, verworven door directe maatregelen zou tijdrovend zijn geweest en de daadwerkelijke verbetering van de nauwkeurigheid niet rechtvaardigen de extra inspanning. De meting zal worden teruggebracht tot enkele relevante woningen, die zullen worden gebruikt als model om de kenmerken van de respectievelijke algemene klasse te schatten. Een uitzondering wordt vertegenwoordigd door speciaal gebouwen, dat zijn alle grote gebouwen die geen wooneenheden zijn: commerciële en industriële gebouwen, supermarkten, kerken en grote boerenschuren. Die gebouwen heten voortaan gewoon bijzonder gebouwen. Aangezien in die gevallen de variantie te groot is en het aantal gebouwen beperkt is, gelden de werkelijke waarden zijn in overweging genomen en de resultaten afzonderlijk berekend om een eventuele toekomstige analyse te vergemakkelijken.

De inventarisatie werd gedaan door 34 gebouwklassen te definiëren, afhankelijk van belangrijke parameters die de prestaties van PV-systeem, naast de grootte van het huishouden. Type, vorm, oriëntatie en de aanwezigheid van aanvullende kenmerken waren de kenmerken die werden gebruikt om de klassen te bepalen. De helling is een ander belangrijk kenmerk van het dak in termen van PV-prestaties, maar er zijn slechts twee klassen gemaakt rekening houdend met deze parameter: platte en hellende daken. Deze vereenvoudiging wordt gerechtvaardigd door het feit dat de uitgevoerde simulaties hebben aangetoond het effect van de helling is verwaarloosbaar: in het bereik van de waargenomen hellingen (minimum 20 °, maximum 54 °) is het potentiële verschil in energieoutput ongeveer 3%. Zo werd de gemiddelde waarde van 38 ° gekozen voor de schuine daken van de woonhuizen, terwijl voor de bijzondere gebouwen een steilheid van 18 ° werd gekozen. Afhankelijk van het type werden de woningen onderverdeeld in twee klassen: enkelvoudig en meervoudig. In de eerste categorie zijn omvatte alle vrijstaande eengezinswoningen waarin elke unit een eigen dak heeft; meerdere huizen zijn gemaakt van meerdere wooneenheden die gegroepeerd zijn onder een gemeenschappelijk dak, dat als een unieke long kan worden beschouwd dak voor de doeleinden van deze analyse. Bovendien hebben de twee klassen ook verschillende gemiddelde maten. Een ander kenmerk dat werd gebruikt om de klassen te definiëren, was de vorm van het dak. In het bijzonder naast de traditionele rechthoekige gebouwen, andere twee contouren werden geïdentificeerd: 'T' en 'L' vormige huizen. Het is triviaal dat in die gevallen het beschikbare dakoppervlak kleiner is ten opzichte van een gelijkwaardige rechthoekige basis gebouw. Evenzo is er een speciale klasse gebouwen gemaakt om de huizen met bestaande kenmerken op te nemen (schoorstenen, ramen, terrassen, ect.) op het dak die de beschikbare ruimte voor PV-panelen verkleinen.

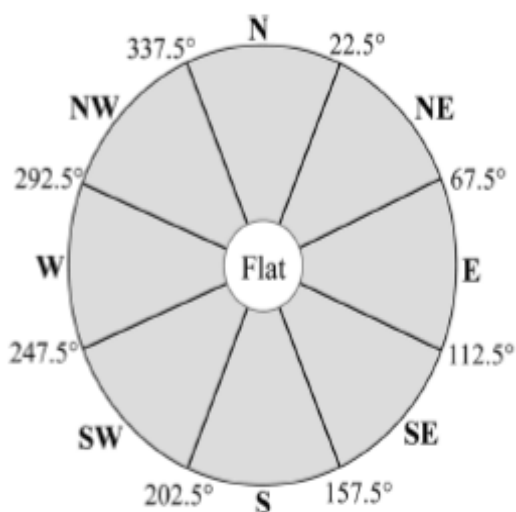
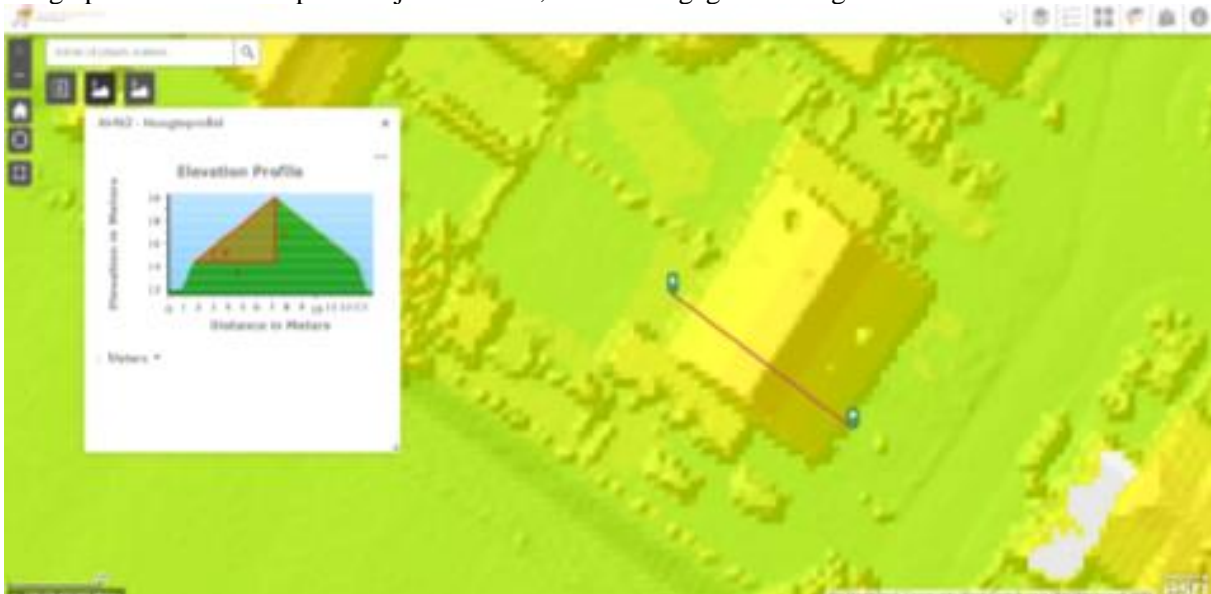


Figure 1: cardinal points and ranges used to determine the orientation classes. Taken without permission from [9]

Als laatste werden huishoudens ingedeeld afhankelijk van de oriëntatie van de gevels van het dak: deze parameter is er een van het belangrijkste sinds een paneel op het noorden is geweest berekend om ongeveer 50% minder energie te produceren. Van bestaande literatuur en voor uitgevoerde simulaties was het besloten om 8 lessen te hebben om een goede te hebben benadering maar vermijden van onnodige complexiteit. De klassen werden geselecteerd op basis van de 4 belangrijkste kardinaal punten en 4 tussenliggende punten; dus elke klas omvat een bereik van 45 °. Figuur 1 toont de gebruikte klassen met betrekking tot de windstreken. Om vast te stellen de oriëntatie van de daken, grafische inspectie van de satelliet afbeeldingen en hoogtekarten werden gebruikt. In het bijzonder voor vereenvoudiging van de inventaris werd aangenomen dat alle daken waren perfect symmetrisch. Vandaar de richting van de daken gevels zijn afgeleid van de oriëntatie van het dak

nok (waar de twee hellende vlakken samenkomen), omdat het gemakkelijker was om de uitlijning te bepalen met behulp van de centrale steek. De richting van de twee loodrechte dakvlakken werd eenvoudig bepaald door de verkregen oriëntatie respectievelijk 90° op te tellen of af te trekken. Elk gebouw van de stad werd geïnventariseerd op oriëntatie, typologie en grootte, door middel van visuele inspectie van satellietbeelden, verkregen van Google maps en PDOK-viewer. Het is belangrijk erop te wijzen dat alle daken geschikt zijn bevonden voor de installatie van PV-systemen: er werd geen rekening gehouden met de structurele integriteit van de gebouwen of inadequate daken (bijvoorbeeld gemaakt van asbestpanelen). Bovendien werden de reeds bestaande PV-panelen buiten beschouwing gelaten, aangezien het doel van dit onderzoek was om de totale potentiële energieproductie te schatten, in plaats van degene die nog zou kunnen worden bereikt. Per bouwtype is de gemiddelde footprint ($A_{\text{footprint}}$) bepaald, waarbij 100 woningen als steekproef zijn genomen. Zoals vermeld in de vorige paragraaf, werd het vervolgens gebruikt om de grootte van de gebouwen voor elke klasse in te schatten. De gegevens zijn verzameld via de online tool van de Nederlandse kadasterdatabase (Publieke Dienstverlening Op de Kaart beschikbaar op <https://www.pdok.nl/viewer/>). De gemiddelde helling (θ) van de daken werd bepaald met een online tool van de publieke website (<https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>) die een interactieve tool heeft die het mogelijk maakt om het hoogtepfiel van een bepaalde lijn te kennen, zoals weergegeven in figuur 2



Figuur 2: Voorbeeld van hoogtekkaart; een interactieve tool laat toe om een lijn te tekenen (rechthoekig van de foto, over het dak van een huis) en de software toont het hoogtepfiel van dat segment (aan de linkerkant). in rood zijn de geometrische entiteiten gespecificeerd die worden gebruikt om de helling te berekenen (x , y , θ). Aangepast zonder toestemming van <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>.

De helling werd eenvoudig berekend met behulp van de hoogte (y) en de lengte (x) van het dak met behulp van de eenvoudige goniometrische formule:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

Door het voetafdrukgebied te projecteren met de hellingshoek van het dak, is het mogelijk om het dakoppervlak (A_{roof}) te schatten met behulp van de formule

$$A_{\text{roof}} = \frac{1}{\cos \theta} \cdot A_{\text{footprint}}$$

Bij conventionele huishoudens werd aangenomen dat daken met een helling van 38 ° hellen, terwijl industriële gebouwen en landbouw een helling van 18 ° versnipperen.

Bij de platte daken is aangenomen dat de panelen onder de optimale hellingshoek (dus 41 °) geplaatst zouden worden. Gezien de afstand tussen de rijen, hun wederzijdse schaduwwerking en de benodigde installatiestructuren, werd gekozen voor een correctiecoëfficiënt van 0,5. Betekent dat slechts de helft van het werkelijke dakoppervlak dat naar schatting nuttig is voor de productie van PV-energie. [7]

Door de aanwezigheid van schoorsteenramen en andere voorzieningen wordt het beschikbare dakoppervlak verkleind. Visuele inspectie en satellietmetingen werden gebruikt om de kenmerken van de daken te bepalen (vorm, aanwezigheid van ramen of schoorstenen, enz.). Om het berekende dakoppervlak te corrigeren, is een reeks coëfficiënten geselecteerd, afhankelijk van de klasse. Die correctiecoëfficiënten zijn vermeld in de onderstaande tabel (tabel 1).

Tabel 1: gebruikte corrigerende parameters

Table 1: corrective parameters used

Feature	Corrective coefficients
Installation space (borders, etc.)	0.9
Windows	0.7
'T' and 'L' shape building	0.8
Flat roofs	0.5

Bovendien werd voor elke klasse verondersteld dat 10% van het dak niet bruikbaar was voor PV-doeleinden, beide om op te nemen: schattingsfouten, de technische ruimte die nodig is voor installatie en onderhoud of andere kenmerken van het dak die niet konden worden geïdentificeerd (bijv. Uitstekende richels of onregelmatigheden). De waarden van die coëfficiënten stammen af van bestaande literatuur en directe meting van de satellietbeelden via de geïntegreerde tools. [9]

De volgende formule vat het gebruik van de correctiecoëfficiënten samen om het beschikbare dakoppervlak (A_{beschikbaar}) te verkrijgen uitgaande van het berekende dakoppervlak, waarbij C het totale product van de coëfficiënten vertegenwoordigt. Afhankelijk van de klasse is het opgebouwd uit één of meerdere correctiefactoren.

$$A_{available} = C \cdot A_{roof}$$

Nadat elk gebouw in een van de categorieën was ingedeeld, werd het aantal gebouwen vermenigvuldigd met de gemiddelde voetafdruk van de specifieke klasse. Op deze manier werd de totale footprint van elke klasse verkregen. Met behulp van het eerder besproken symmetrieprincipe werden de klassen verder onderverdeeld op basis van de feitelijke oriëntatie van de dakgevels en werd vervolgens het beschikbare oppervlak voor elke klasse verkregen met behulp van de beschreven coëfficiënten. Het eindresultaat van dit deel van de analyse is de totale beschikbare oppervlakte voor elke oriëntatieklasse, verkregen door alle klassen binnen dezelfde oriëntatiegroep bij elkaar op te tellen. Dit was nodig omdat alle individuele klassen verschillende correctiecoëfficiënten hebben, daarom is het noodzakelijk om eindelijk het totale beschikbare dakoppervlak te berekenen.

2.2 Potentiële energieproductie

Uitgaande van het beschikbare dakoppervlak berekend in de vorige paragraaf, werd de potentiële energieproductie ingeschat. Hiervoor werd een online beschikbare software gebruikt: PV * SOL. Het programma vereist dat de gebruiker verschillende parameters invoert, die worden gebruikt om de energieproductie te berekenen. De software houdt automatisch rekening met de verliezen, zowel van het technische deel (elektrische verliezen door het PV-systeem zelf) als van het fysieke deel (stralingsverliezen door weersomstandigheden, dag-nachtcyclus en seizoensvariaties). Door gebruik te maken van de hiërarchische benadering die in de vorige sectie is gepresenteerd, maakt PV * SOL het mogelijk om zowel het fysieke als het technische potentieel in één keer in te schatten. Het is namelijk mogelijk om een specifieke locatie te selecteren en de software berekent automatisch het hele jaar door de instralingswaarden op een bepaald hellend vlak. De bestralingswaarden werden ook gecontroleerd met behulp van de online tool van de Europese Commissie: Photovoltaic Geographical Information System. De software zou ook kunnen worden gebruikt om de stroomproductie te analyseren, maar de gegevens kunnen alleen worden gevisualiseerd op basis van individuele huishoudens, dus dit deel werd genegeerd en de vergelijking werd gemaakt met de dataset die werd verstrekt door het leverende bedrijf. In bijlage 1 zijn screenshots te zien van de gebruikte software (figuur 4 en 5). De ingevoerde parameters waren:

- Locatie van het systeem
- Oriëntatie van het dak
- Helling van het dak
- Kenmerken van de PV-panelen: technologie, efficiëntie, type opstelling, aantal panelen
- Type omvormer

Voor elke klas is een berekening gemaakt. Het is duidelijk dat de locatie tijdens alle simulaties constant blijft. Om nauwkeurige waarden te hebben, zonder de algemeenheid van de analyse te verliezen, werd een generieke typologie van panelen en omvormers geselecteerd (de software zelf maakt het gebruik van merkloze apparaten mogelijk). Met name het type en aantal omvormers wordt automatisch berekend, maar dit is niet nodig voor het doel van deze beoordeling, behalve voor de evaluatie van de verliezen. De opstelling van de panelen werd geacht te gebeuren met panelen met ventilatie aan de achterkant: de temperatuur kan de uiteindelijke efficiëntie van het systeem sterk beïnvloeden, dus de potentiële energieproductie. Op de breedtegraden van Nederland is de temperatuurschommeling niet doorslaggevend in de PV-prestaties, dus het heeft geen sterk effect. In onderstaande tabel staan de technische kenmerken van de gebruikte panelen vermeld.

Tabel 2: technische kenmerken van het PV-paneel dat wordt gebruikt om het systeem te simuleren

Table 2: technical characteristics of the PV panel used to simulate the system

PV panel characteristics	
Power peak	300 W
Efficiency	17.89%
Technology	Monocrystalline
Dimension of the panel	1.677 m ²

Gezien het beschikbare dakoppervlak is het mogelijk om het aantal panelen te berekenen dat geïnstalleerd zou kunnen worden voor elke oriëntatieklasse, gedeeld door de afmetingen van een enkel paneel. Alle berekeningen zijn gedaan met een conservatieve benadering, waarbij alle resultaten op de kleinere eenheid zijn afgerond. Het aantal panelen is vereist als parameter voor de PV * SOL-software. Andere parameters zouden gespecificeerd kunnen worden voor de analyse, maar verdere analyse is nodig om ze te gebruiken in de simulatie: schaduweffecten, albedo en vervuiling werden verwaarloosd. Met name het schaduweffect betreft de analyse van de geprojecteerde schaduw van nabije objecten die de prestatie van de PV-panelen kunnen verminderen. Albedo is een parameter die wordt gebruikt om de hoeveelheid zonnestraling te schatten die wordt geabsorbeerd of gereflecteerd door de omgeving (bijv. Sneeuw zal de meeste straling reflecteren, terwijl zwarte aarde het meeste ervan zal absorberen). Vervuiling verwijst naar de verliezen die worden veroorzaakt door de stofdeeltjes die zich ophopen op het oppervlak van het paneel en hun efficiëntie verminderen. Over het algemeen zijn die parameters afhankelijk van

de locatie en op het eenpersoonshuishouden, ook al is een schatting op stadsschaal mogelijk. De analytische inspanning overtreft de mogelijke toename van de nauwkeurigheid die kan worden bereikt; daarom werden die parameters genegeerd. Verdere analyse zou die parameters kunnen overwegen om de nauwkeurigheid van de analyse te vergroten. Nadat alle gegevens waren ingevoerd, werd het vermogen berekend met behulp van de PV * SOL-software.

2.3 Analyse van de energievraag

De energievraag werd geëvalueerd op basis van het totale verbruik van het dorp. De bron van deze informatie is de lokale energieleverancier (LIANDER). De verkregen gegevens hebben betrekking op het totale elektrische energieverbruik ten opzichte van de afgelopen zeven jaar (2013-2019). De gemiddelde waarde is gebruikt om het energieverbruik in te schatten, om de mogelijke variaties tenminste gedeeltelijk af te vlakken. Voor dezelfde periode werden ook de gegevens met betrekking tot het elektriciteitsverbruik op wijkniveau verstrekt, samen met de gegevens over het gasverbruik. Die gegevens zijn niet gebruikt in deze analyse, maar kunnen nuttig zijn bij een volgende meer gedetailleerde analyse. (de volledige gegevens zijn hier te vinden). In deze paper wordt het energieverbruik slechts vergeleken met de potentiële energieproductie op jaarschaal, om een idee te hebben van de mogelijkheden van zo'n grootschalig PV-systeem. In deze analyse werd geen rekening gehouden met het energieverbruik gerelateerd aan de industriële of commerciële activiteiten.

2.4 Economische analyse

Zoals eerder vermeld, is het doel van deze sectie om een compleet overzicht te geven van de beoordeling in al zijn aspecten, dus de berekeningen zijn bedoeld om niet nauwkeurig te zijn, maar geven slechts een globaal idee. Bovendien zou het nuttig zijn om bij het toekomstige onderzoek van het project een voorlopige verwijzing te hebben. Het rendement van de investering werd berekend met behulp van gratis online software (<http://pvcalc.org/pvcalc>). Opgemerkt moet worden dat de mogelijkheden van deze tool veel groter zijn dan die gebruikt om de analyse uit te voeren in dit document: de basisconfiguratie van de software werd gebruikt om te bepalen in welke jaren de investering terugverdiend wordt. Met name de gebruikte technische parameters zijn het nominale vermogen en het jaarrendement van het systeem. De eerste hangt af van het aantal geïnstalleerde panelen en hun technische specificatie, de laatste hangt af van de geografische locatie (fysiek potentieel). Om een eenvoudig resultaat te krijgen, is het noodzakelijk om ook twee economische parameters op te nemen: de opstartkosten (inclusief aanschaf en installatie) en de aard van de gebruikte fondsen. Om de berekening te vereenvoudigen, is aangenomen dat alle financiering met eigen fondsen gebeurt. Gezien de gegevens uit de literatuur werd besloten om de kostprijs vast te stellen op 1340 € / kWp, waarbij kWp staat voor kilowattpiekproductie (maximaal vermogen dat nominaal door de panelen kan worden geproduceerd). De nuttige output is het rendement van de investering in termen van jaren. In bijlage 1 wordt een screenshot van de tool getoond (figuur 6 en 7). [10-12]

Om de kwaliteit van de ene of de andere bron te schatten, wordt de EROI gebruikt. Het wordt gedefinieerd als de verhouding van de energie die wordt geproduceerd door de energie die wordt verbruikt om het systeem te maken, uitgedrukt in de volgende formule.

$$EROI = \frac{E_{produced}}{E_{invested}}$$

Het is vrij ingewikkeld om een dergelijke waarde te berekenen, omdat het van vele variabelen afhangt en sterk wordt beïnvloed door hoe de randvoorwaarden van het systeem zijn gedefinieerd (d.w.z. welke entiteiten zijn opgenomen als geïnvesteerde energie: productie, onderhoud, transport, enz.). EROI houdt rekening met de hele levenscyclus van het systeem, dus van het fabricageproces tot het einde van de levensduur van het product. In dit document heeft de geproduceerde energie

beschouwd als de totale potentiële energie die door het PV-systeem in 25 jaar zou kunnen worden geproduceerd, eenvoudig verkregen door de totale energie-output te vermenigvuldigen met het aantal jaren. Aangenomen wordt dat in een dergelijke periode een totaal verlies van 5% in de PV-prestatie optreedt, als gevolg van verschillende factoren zoals degradatie van het systeem, onderhoud, vuil, enz. De waarde werd vervolgens gedoken naar het totale beschikbare oppervlak. De noemer is berekend uitgaande van een in de literatuur gevonden zogenaamde Cumulative Energy Demand (CED) kost van 290 kWh / m². Een kostprijs voor de vervanging van de defecte apparatuur is opgenomen, volgens een conservatieve benadering is gekozen voor een gemiddelde waarde van 10kWh / m². Andere kosten die in het referentiedocument worden beschreven, zijn verwaarloosd (d.w.z. het energie-equivalent van arbeid en kapitaal). Bovendien is in dit stadium van de analyse geen rekening gehouden met het opslagsysteem. [10-12]

3. Resultaten

In de volgende sectie worden de resultaten gepresenteerd. Alleen de meer relevante gegevens worden in deze paragraaf gerapporteerd, de ontbrekende en volledige gegevens worden verstrekt in de bijlage (bijlage 2) aan het einde van de paper. Het is belangrijk er nogmaals op te wijzen dat de geïllustreerde gegevens niet helemaal nauwkeurig zijn, aangezien het een voorlopig rapport betreft en daarom is gekozen voor een kwalitatieve methode. Desalniettemin zijn de resultaten statistisch nauwkeurig. Alle definitieve resultaten over de potentiële energieproductie zijn jaarlijks gebaseerd. Alle gebouwen in Millingen Aan der Rehin zijn overwogen. Er werden benaderingen gemaakt op basis van bestaande literatuur en visuele inspectie op satellietbeelden.

3.1 Fysiek potentieel

Met behulp van de twee in de methodologie genoemde software's werd in Millingen aan der Rijn een jaarlijkse instraling geschat van 1022,1 kWh / m². In detail toont figuur 3 de grafische weergave van de instraling in de stad tot en met 2016.

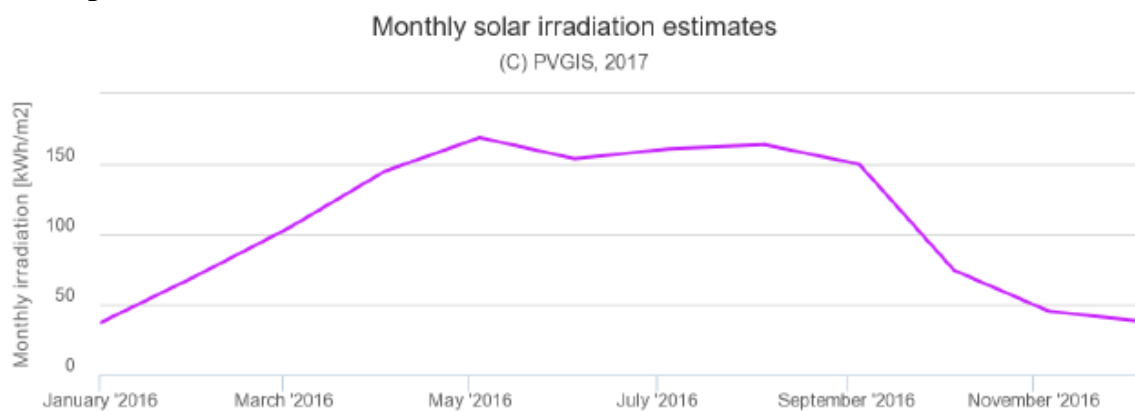


Figure 3: Example of irradiation profile in Millingen through the year in 2016. Taken without permission from https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html.

Figuur 3: Voorbeeld van bestralingsprofiel in Millingen door het jaar in 2016. Genomen zonder toestemming van https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html.

3.2 Gebouweninventaris

In de **bijlage tabel A.1** is de indeling van de gebouwen naar type en nokoriëntatie weergegeven.

Tabel A.2 toont dezelfde inventaris voor de bijzondere gebouwen.

3.3 Schuine daken inventaris

In **tabel A.3** en **A.4** wordt het totale voetafdrukgebied voor elke klasse geïllustreerd, respectievelijk voor conventionele huishoudens en speciale gebouwen. Daarnaast wordt voor elke oriëntatieklasse het geschatte totale dakoppervlak gerapporteerd.

Tabel A.5 en **A.6** tonen het beschikbare dakoppervlak voor elke klasse, verkregen na toepassing van de relatieve correctiecoëfficiënten. In de laatste rij wordt het totaal beschikbare dakoppervlak gerapporteerd.

3.4 Potentiële energieproductie

De volgende tabellen (**tabel 3.1-3.4**) tonen het totale beschikbare dakoppervlak voor elke klasse, het respectieve aantal panelen dat zou worden geïnstalleerd en tenslotte de potentiële stroomproductie voor elk oriëntatiebereik. De waarden voor de noord-, noordoost- en noordwestrichting zijn weergegeven in een aparte tabel om de vergelijking met de andere richtingen te vergemakkelijken (meestal worden noordgerichte daken uitgesloten bij de planificatie van PV-systemen). Onder elke tabel wordt de relatieve totale energie-output vermeld. De eerste twee tabellen (**3.1 en 3.2**) verwijzen naar woongebouwen, terwijl het tweede paar (**3.3 en 3.4**) naar de bijzondere gebouwen verwijzen. De laatste tabel toont het beschikbare dakoppervlak, het aantal modules en de potentiële geproduceerde energie voor de platte daken (**tabel 3.5**).

Tabel 3.1: geografisch en technologisch potentieel van conventionele huishoudens voor de oriëntatieklassen “op het zuiden”

Table 3.1: geographical and technological potential of conventional households for the “south-facing” orientation classes

Orientation	E	S-E	S	S-W	W
total available roof area [m²]	41826	31718	38039	23843	41826
n of modules	24945	18917	22687	14220	24945
energy output [kWh]	5479087	5045603	6580409	3951095	5799398
Total energy output [kWh]	2,686E+07				
	26,86 GWh				

Tabel 3.2: geografisch en technologisch potentieel van conventionele huishoudens voor de oriëntatieklassen “op het noorden”

Table 3.2: geographical and technological potential of conventional households for the “north-facing” orientation classes

Orientation	N-W	N	N-E
total available roof area [m²]	31717	37886	23994
n of modules	18917	22596	14311
energy output [kWh]	3298020	3266597	2405764
Total energy output [kWh]	8970381		
	8,97 GWh		

Tabel 3.3: geografisch en technologisch potentieel van bijzondere gebouwen voor de oriëntatieklassen “zuidgericht”

Orientation	E	S-E	S	S-W	W
total available roof area [m²]	1613	4854	1442	4760	1613
n of modules	962	2895	860	2838	962
energy output [kWh]	227322	766001	371337	770934	235302
Total energy output [kWh]	2,371E+06				
	2,371 GWh				

Tabel 3.4: geografisch en technologisch potentieel van bijzondere gebouwen voor de oriëntatieklassen “noordgericht”

Table 3.4: geographical and technological potential of special buildings for the “north-facing” orientation classes

Orientation	N-W	N	N-E
total available roof area [m²]	4854	1442	4760
n of modules	2895	860	2838
energy output [kWh]	616728	170028	591523
Total energy output [kWh]	1,378E+06		
	1,378 GWh		

Tabel 3.5: geografisch en technologisch potentieel van flatgebouwen (huishoudens en bijzondere gebouwen)

Table 3.5: geographical and technological potential of flat buildings (households and special buildings)

flat roofs	
total available roof area [m²]	19000
n of modules	11332
energy output [kWh]	3317965
Total energy output [kWh]	3,318E+06
	3,318 GWh

3.5 Stroomverbruik

Tabel 4 toont het totale verbruik van huishoudens in Millingen over de afgelopen 7 jaar. Hieronder wordt de gemiddelde waarde gerapporteerd.

Tabel 4: Totaal elektriciteitsverbruik in Millingen woningen in de afgelopen 7 jaar en relatieve gemiddelde waarde

Table 4: Millingen residential houses total electricity consumption in the past 7 years and relative average value

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Total electricity consumption [kWh]	1,479E+07	1,377E+07	1,390E+07	1,528E+07	1,519E+07	1,448E+07
Average electricity consumption [kWh]	1,457E+07					
	14,569 GWh					

3.6 Economische analyse

In de volgende paragraaf worden de resultaten van de economische analyse beknopt weergegeven. Om een zinvolle analyse van de verstrekte gegevens te hebben, moet een vergelijking worden gemaakt met zowel vergelijkbare hernieuwbare technologieën als meer traditionele. Aangezien dit onderzoek verbannen is van de doeleinden van dit artikel, worden de resultaten herby vergeleken met het papier dat als referentie wordt gebruikt.

Tabel 5 toont het rendement van de investering (ROI) in termen van jaren en de gebruikte parameters.

Tabel 5: gebruikte parameters voor de berekening van het rendement van de investering en de resulterende afschrijvingstijd

Table 5: parameters used for the return of invest calculation, and resulting amortization time

Return of invest calculations (ROI)	
N° of panels	187980
Nominal peak power of one panel (kW _p)	300
Total nominal power installed (kW _p)	56394000
Annual Yield per kW _p (kWh/kW _p)	861
Price (per kW _p)	1340
Own funds (%)	100
Amortisation time (years)	8,9

Tabel 6: schatting van de energetische opbrengst voor EROI-berekening

Table 6: estimation of the energetical yield for EROI calculation

Energy produced	
Total energy production per year (kWh/year)	42893113
Total energy production in 25 years (kWh)	1,019E+09
Total available area (m ²)	315189
Specific yield (kWh/m ²)	3232

Tabel 7: schatting van de energetische kosten van het systeem voor EROI-berekening

Table 7: estimation of the energetical cost of the system for EROI calculation

energy invested	
CED of the system (kWh/m ²)	290
Equivalent cost for faulty equipment (kWh/m ²)	10
total energy invested (kWh/m ²)	300

In de volgende twee tabellen (**tabel 6 en 7**) worden de parameters die in aanmerking worden genomen voor het energetisch rendement van de investering (EROI) geïllustreerd. Respectievelijk vertegenwoordigt de bovenste de energieproductie, dus de teller van de formule. Terwijl de noemer wordt bepaald door de energetische kosten weergegeven in **tabel 7**.

Uiteindelijk kwam de EROI uit op 10,7.

3.7 Samenvatting

Samenvattend wordt in onderstaande tabel (tabel 5) de potentiële energieproductie berekend en het geschatte energieverbruik gerapporteerd. Door alle beschikbare daken in Millingen te dekken, werd geschat dat het mogelijk zou zijn om 42,89 GWh / jaar elektrische energie te produceren door de zonnestraling via PV-panelen te benutten. Tegelijkertijd werd het energieverbruik geschat op 14,56 GWh / jaar.

Tabel 8: overzicht van de resultaten van de potentiële energieproductie en geschat energieverbruik
Table 8: overview of the results of the potential energy production and estimated energy consumption

Total potential energy production	42,89 GWh
Total estimated energy consumption	14,57 GWh

4. Discussie

In deze analyse werd in totaal 2452 gebouwen in aanmerking genomen, voornamelijk huishoudens en een klein percentiel van industriële en agrarische structuren. Van die gebouwen werd een totaal dakoppervlak van 379653,2 m² geschat, waarvan ongeveer 80% als beschikbaar werd beschouwd voor de installatie van PV-systemen. De potentiële energieproductie door exploitatie van dit gebied en door middel van generieke zonnepanelen met up-to-date technische specificaties, resulteerde in ongeveer 30% van de benodigde energie. In feite is er, zoals te zien is in **tabel 5**, een overschot aan energieproductie van ongeveer 2/3. Het is belangrijk om de grenzen en grenzen van deze beoordeling aan te geven voordat u met de analyse van de resultaten begint. Deze studie is nodig als een eerste stap op weg naar een breder duurzaamheidsproject en heeft als enig doel de eerste ruwe gegevens te leveren die kunnen worden gebruikt om een idee te krijgen en als startpunt voor een meer gedetailleerde analyse. Met alle vereenvoudigingen en methoden die in aanmerking worden genomen, is het nauwkeurniveau van dit onderzoek mogelijk niet lager dan een foutbereik van 10%, wat een aanvaardbare benadering is in dit type analyse, maar het zou natuurlijk niet aanvaardbaar zijn in het geval van een planificatie project. Dezelfde aanpak werd gevolgd toen de inventarisklassen werden bepaald (hellingsbereik, oriëntatiebereik, enz.). Zelfs de gegevens met betrekking tot het stroomverbruik kunnen niet als exacte waarden worden beschouwd, aangezien de gebruikte waarde wordt verkregen door de waarden van de afgelopen jaren te middelen. Om dezelfde reden zijn variaties in de parameters verwaarloosd om de berekeningen te vereenvoudigen. Het fysieke potentieel kan bijvoorbeeld niet alleen variëren in de nacht-dagcyclus, maar ook in de seizoensschaal en zelfs op lange termijn (d.w.z. decennia). Op dezelfde manier is de nauwkeurigheid van de visuele inspecties die worden uitgevoerd om de corrigerende coëfficiënten te bepalen, vatbaar voor fouten, aangezien deze is gebaseerd op subjectieve analyse. Desalniettemin kan de algemene analyse als nuttig worden beschouwd als de verklaarde beperkingen in gedachten worden gehouden, aangezien deze een voorlopige kwalitatieve beoordeling van het probleem kan geven.

Als we naar de resultaten kijken, is de hoeveelheid potentiële energieproductie veel groter dan de energie die nodig is om aan de energetische eisen van de stad te voldoen. Dit resultaat kan gemakkelijk verkeerd worden gelezen en tot een verkeerde conclusie leiden: het is belangrijk om op enkele cruciale punten te wijzen. Ten eerste gebeurt in deze analyse de vergelijking tussen energieverbruik en productie op jaarschaal, ten tweede wordt aangenomen dat de twee curves zich in dezelfde fase bevinden of met andere woorden dat vraag en aanbod gedurende de tijd altijd gepaard gaan. In werkelijkheid is dit zelden het geval. Integendeel, meestal vallen de meest productieve periodes nooit samen met de meest consumerende uren. In feite is tijdens de zomer de oogstbare energie groter omdat het daglicht langer duurt en de azimut van de zon hoger is, waardoor de potentiële energie die geproduceerd kan worden veel groter zal zijn dan in de winter. Tegelijkertijd gebruiken de meeste gezinnen 's morgens vroeg op een meer prominente manier elektriciteit

en laat in de avond, terwijl ze minder verbruiken als de PV-productie piekt in de centrale uren van de dag. Hetzelfde concept geldt ook voor variaties die verband houden met de weersomstandigheden. Om het verschil tussen de productie- en verbruikspieken te compenseren, moet een opslagsysteem worden overwogen. Een systeem dat het mogelijk maakt het overschot aan energie op te slaan en vervolgens beschikbaar te stellen wanneer dat nodig is. Hoewel het ontwerp van een opslagsysteem afwijkt van de doelstellingen van deze opdracht, werd er toch een fundamentele afweging gemaakt.

Voor wat in de vorige paragraaf is vermeld, moet een opslagsysteem worden overwogen om de fluctuaties tussen geproduceerde en verbruikte energie te compenseren. Met de introductie van een dergelijk apparaat veranderen de prestatie en de resultaten van de analyse aanzienlijk. Dit duurzaamheidsproject beoogt op lange termijn waterstof als opslagbrandstof te gebruiken. Zo werd als voorbeeld een op waterstof gebaseerd opslagsysteem ontworpen. Er wordt uitgegaan van het worstcasescenario, waarbij alle elektriciteit via brandstofcellen wordt omgezet in chemische energie en wordt opgeslagen in de vorm van waterstofgas. Uiteindelijk kan, indien nodig, de energie die in de chemische bindingen van de waterstofmoleculen wordt gestuwd, worden omgezet in elektriciteit, altijd door middel van brandstofcellen. Qua efficiëntie kan het eerste conversieproces grofweg een waarde hebben tot 60%, terwijl het tweede tot 50% kan bedragen. Als een volledige conversiecyclus wordt overwogen (elektriciteit-waterstof-elektriciteit), zou het totale rendement ongeveer 30% zijn. Terugkomend op de resultaten van dit document, met een op waterstof gebaseerd opslagsysteem zou de effectieve energieproductie, als gevolg van de conversieverliezen, mogelijk met een factor 70% worden verminderd. In de volgende tabel (tabel 7) worden de bijgewerkte gegevens gerapporteerd:

Tabel 9: eindresultaten, rekening houdend met een opslagsysteem

Table 9: final results, considering a storage system

Total potential energy production (considering a Hydrogen storage system)	12.87 GWh
Total estimated energy consumption	14,57 GWh

In dit geval is het verschil tussen geproduceerde en verbruikte energie veel kleiner, maar het belangrijkste is dat de potentiële geproduceerde energie iets kleiner werd dan de verbruikte energie. Zelfs als de kloof klein is en het verschil te wijten zou kunnen zijn aan schattingsfouten, is het belangrijk om hiermee rekening te houden voor de toekomstige analyse. Het kwantitatieve verschil is niet echt nauwkeurig, daarom kan het niet worden gebruikt om een conclusie te trekken, maar het kan een interessant kwalitatief idee geven van wat er zou kunnen gebeuren als een opslagsysteem is inbegrepen. Onder deze omstandigheden zou de energetische onafhankelijkheid moeilijker te bereiken zijn, aangezien de potentiële energieproductie iets niet voldoende is om het verbruik op basis van deze analyse te ondersteunen.

Zoals verwacht zijn de panelen op het noorden (Noord, Noord-Oost en Noord-West) veel minder efficiënt dan de panelen in de andere richtingen: in vergelijking met de optimale panelen op het zuiden produceren ze tot 50% minder elektriciteit. Op dit punt wordt bij de keuze om deze optie, die meestal niet wordt genomen, te overwegen of minder, rekening gehouden met economische en milieuaspecten.

Een andere belangrijke overweging is dat de resultaten in dit document alleen betrekking hebben op het huishoudelijk verbruik: het energieverbruik voor industriële en commerciële activiteiten werd niet in aanmerking genomen. Anderzijds werden hun daken meegenomen in de bepaling van het beschikbare oppervlak voor PV-installatie. Het is triviaal dat, zelfs als er in Millingen geen grote industrieën zijn, de extra energievraag hoger zou zijn. Sterker nog, als het project wordt uitgebreid naar andere diensten, moet rekening worden gehouden met aanvullende bronnen van duurzame energie. Openbaar en privévervoer via elektrische auto's of boten op batterijen en openbare verlichting zijn enkele voorbeelden van voorzieningen die kunnen worden aangedreven door hernieuwbare energie.

Met betrekking tot de economische analyse wordt een investeringsrendement (ROI) van 8,9 jaar geschat, wat veel lager is dan de standaardlevensduur van dergelijke PV-systemen. Zoals aangenomen in de berekeningen, tegenwoordig een functioneel

levensduur van ongeveer 25 jaar, en er wordt meer verwacht. Volgens de berekeningen die zijn gemaakt met de online tool, is de initiële investering volledig terugverdiend na minder dan de halfwaardetijd van het systeem. Bovendien zijn de verkregen resultaten consistent met het huidige commerciële PV-systeem, dat een ROI heeft tussen 7 en 10 jaar. Zoals vermeld in de methodologie, werd aangenomen dat alle financiering afkomstig is van eigen fondsen, waardoor het resultaat enigszins zou kunnen veranderen bij verschillende financiële randvoorwaarden. Er werd een EROI-waarde van 10,7 berekend. Dit resultaat is moeilijker te begrijpen omdat het een vergelijking met andere bronnen of systemen vereist. Kijkend naar de resultaten die zijn berekend in het document dat als referentie wordt gebruikt, ligt de EROI die in dit document wordt verkregen zeer dicht bij die waarde. Ze berekenen inderdaad een EROI variërend van 9,1 tot 9,7, wat resulteert in een verschil van 10% met betrekking tot de waarde die in dit document wordt verkregen. Een dergelijke foutmarge kan als volledig bevredigend worden beschouwd gezien de kwalitatieve aard van deze analyse. Ook in dit geval zouden in dit deel van de beoordeling verschillende aanvullende parameters kunnen worden overwogen om het niveau van de nauwkeurigheid en de betekenis van de analyse te verhogen. [10-12]

5 Toekomstperspectieven

De resultaten die in dit vooronderzoek zijn verkregen, geven een eerste idee over de haalbaarheid van het duurzaamheidsproject in Millingen, maar kunnen niet als nauwkeurige referentie worden gebruikt in de latere uiteindelijke planificatiefase. De verschillende vereenvoudigingen en veronderstellingen moeten worden gecorrigeerd en gedetailleerder geanalyseerd om de nauwkeurigheid te verhogen. De inventarisatie van de huishoudens moet bijvoorbeeld worden uitgevoerd op basis van actuele gegevens en niet op basis van statistieken. Dit zou ook kunnen worden gedaan met behulp van speciale software waarmee automatisch het geografische potentieel kan worden bepaald via de analyse van de satellietbeelden. Hetzelfde geldt voor de bepaling van de correctiecoëfficiënten. De analyse moet ook worden uitgevoerd met inachtneming van de verwaarloosde parameters (schaduweffecten, reeds bestaande systemen, vervuilingseffect, enz.) Om een nauwkeurigere schatting te krijgen. Met andere woorden, de kwaliteit van de onbewerkte gegevens moet worden verbeterd om betrouwbaardere resultaten te krijgen.

Het belang van een opslagsysteem is aangetoond: een nauwkeurige dimensionering kan de prestaties van het totale grootschalige PV-systeem sterk beïnvloeden. Daarom moet rekening worden gehouden met een geschikte opslagtechnologie. Om dit te doen is een nauwkeurigere vergelijking van het verbruik / productiesnelheid nodig. Met name om de fluctuaties tussen de twee grootheden in te schatten, en deze dus met een geschikt systeem te kunnen compenseren, zijn op uurbasis gebaseerde gegevens (of zelfs met een kleinere resolutie) nodig. Aan de andere kant moet een meer holistische visie worden aangenomen, moet het fysieke potentieel ook over een langere periode worden geëvalueerd om de natuurlijke fluctuaties in termen van zonnestraling te compenseren. Op deze manier zou de analyse nauwkeuriger zijn en de resultaten betrouwbaarder.

Het economische en ecologische aspect zou nader onderzocht moeten worden, vooral in termen van EROI en over de mogelijkheid om panelen ook op de noord gerichte daken te plaatsen.

Ten slotte moet de mogelijkheid worden onderzocht om ook verticale wanden te benutten om PV-installaties te realiseren, bijvoorbeeld in de grote ongebruikte industriële gebouwen aan de oevers van de rivier.

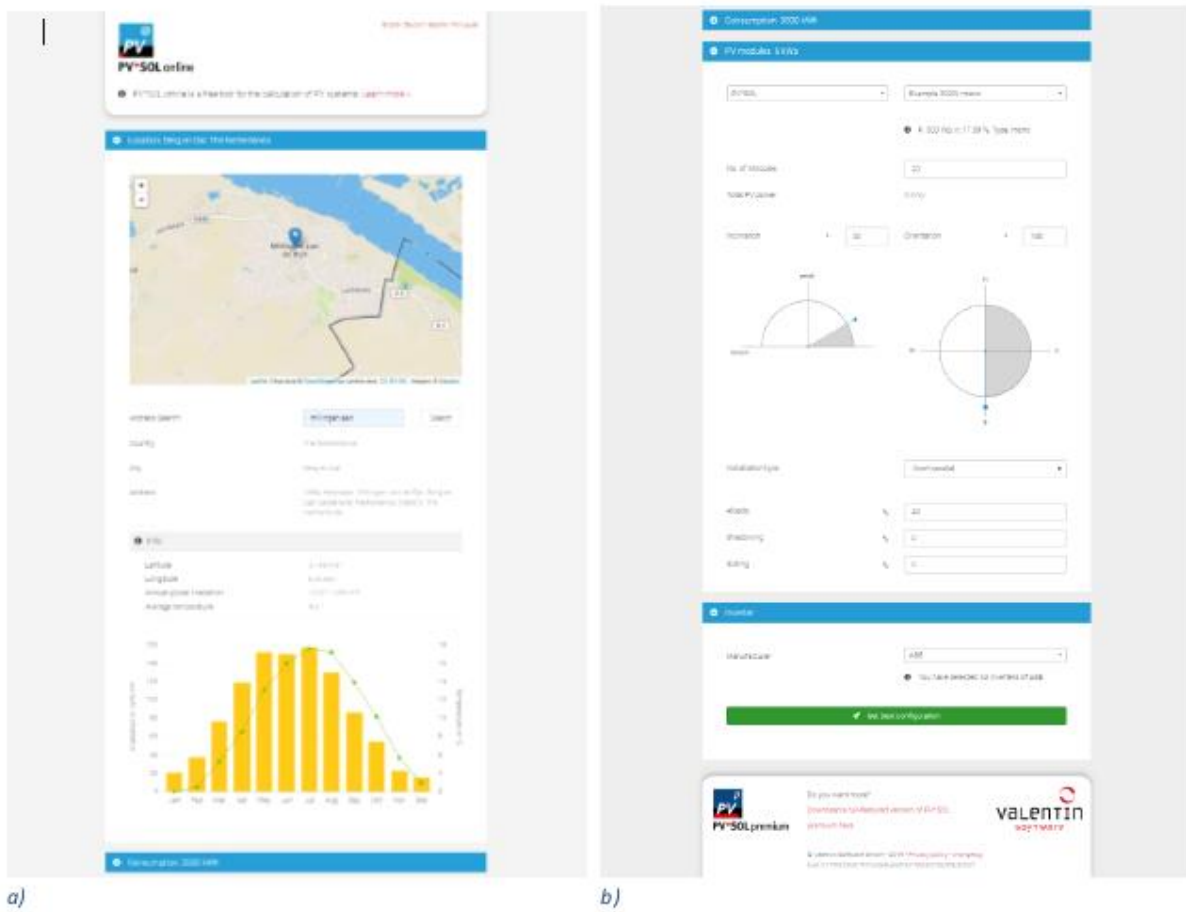
6. Conclusie

In dit artikel is de potentiële productie van elektrische energie uit zonnestraling via fotovoltaïsche technologie in een kleine stad in Nederland onderzocht. Met name het PV-potentieel op het dak van het geheel van de gebouwen in de gemeente werd bestudeerd. Deze voorlopige beoordeling maakt deel uit van een breder project dat tot doel heeft Millingen aan der Rijn energetisch onafhankelijk te maken van het landelijke elektriciteitsnet, uitsluitend door middel van duurzame energiebronnen. Er werd een hiërarchische methodologie voorgesteld: uitgaande van de beschikbare instraling (fysiek potentieel) werd het beschikbare dakoppervlak geschat (geografisch potentieel) en tenslotte werd de potentiële energieproductie berekend (technisch potentieel). De analyse is uitgevoerd met behulp van gratis online tools. Het beschikbare dakoppervlak werd afgeleid uit online kaarten (satelliet, hoogte en kadaster) en met behulp van statistische benaderingen. Alle daken van de stad werden geïnventariseerd en ingedeeld in relevante groepen, gedefinieerd door verschillende kenmerken zoals oriëntatie, vorm en grootte. Het verkregen beschikbare oppervlak werd gebruikt om de potentiële energieproductie te berekenen via online software. De uiteindelijke resultaten werden vergeleken met het elektriciteitsverbruik, waarvan de gegevens werden verkregen van de lokale energieleverancier (LIANDER). Ondanks de kwalitatieve analyse, uitgevoerd met een conservatieve benadering, bleek de potentiële stroomproductie (42,89 GWh) veel hoger te zijn dan de verbruikte energie (14,57 GWh). Desalniettemin is aangetoond dat een opslagsysteem in overweging moet worden genomen om de variaties tussen energievraag en -aanbod te compenseren (energie wordt geproduceerd wanneer deze niet nodig is en vice versa). Als een dergelijk systeem wordt overwogen, met name een systeem op basis van waterstof als opslagbrandstof, is de potentiële elektriciteitsproductie iets niet voldoende om het verbruik te dekken. Omdat het een eerste analyse is, biedt de kwalitatieve aard van de verkregen resultaten een goede statistische eerste blik van de opdracht, maar verder onderzoek is nodig om de nauwkeurigheid van de resultaten te vergroten. Parameters zoals schaduweffecten en seizoensvariaties moeten in detail worden onderzocht, industriële consumptie moet worden meegenomen in de analyse en de kwaliteit van de onbewerkte gegevens moet worden verhoogd (voetafdrukoppervlak, helling, correctiecoëfficiënten). Bovendien moet een adequaat opslagsysteem worden overwogen en moet de analyse van de gegevens dienovereenkomstig worden gericht: energieverbruik en -verbruik moeten ten minste op uurschaal worden vergeleken. Concluderend levert dit onderzoek een bruikbaar startpunt op in termen van PV-potentieel voor het duurzaamheidsproject in Millingen aan der Rijn.

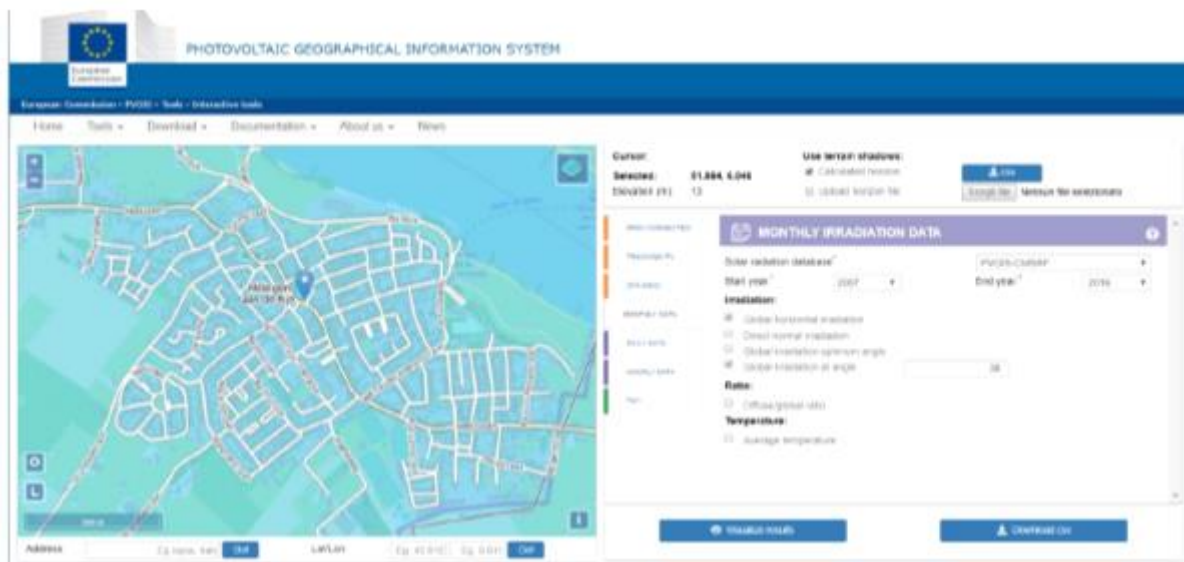
7 referenties

- [1] Song, X., Huang, Y., Zhao, C., Liu, Y., Lu, Y., Chang, Y., & Yang, J. (2018). An Approach for Estimating Solar Photovoltaic Potential Based on Rooftop Retrieval from Remote Sensing Images. *Energies*, 11(11), 3172. doi: 10.3390/en11113172
- [2] Mainzer, K., Fath, K., Mckenna, R., Stengel, J., Fichtner, W., & Schultmann, F. (2014). A high-resolution determination of the technical potential for residential-roof-mounted photovoltaic systems in Germany. *Solar Energy*, 105, 715–731. doi: 10.1016/j.solener.2014.04.015
- [3] Bergamasco, L., & Asinari, P. (2011). Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy). *Solar Energy*, 85(5), 1041–1055. doi: 10.1016/j.solener.2011.02.022
- [4] Mainzer, K., Killinger, S., Mckenna, R., & Fichtner, W. (2017). Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques. *Solar Energy*, 155, 561–573. doi: 10.1016/j.solener.2017.06.065
- [5] Bódis, K., Kougias, I., Jäger-Waldau, A., Taylor, N., & Szabó, S. (2019). A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109309. doi: 10.1016/j.rser.2019.109309
- [6] Martín-Chivelet, N. (2016). Photovoltaic potential and land-use estimation methodology. *Energy*, 94, 233–242. doi: 10.1016/j.energy.2015.10.108
- [7] Ordóñez, J., Jadraque, E., Alegre, J., & Martínez, G. (2010). Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2122–2130. doi: 10.1016/j.rser.2010.01.001
- [8] Theodoridou, I., Karteris, M., Mallinis, G., Papadopoulos, A. M., & Hegger, M. (2012). Assessment of retrofitting measures and solar systems potential in urban areas using Geographical Information Systems: Application to a Mediterranean city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6239–6261. doi: 10.1016/j.rser.2012.03.075
- [9] Mansouri Kouhestani, F., Byrne, J., Johnson, D., Spencer, L., Hazendonk, P. and Brown, B. (2018). Evaluating solar energy technical and economic potential on rooftops in an urban setting: the city of Lethbridge, Canada. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(1), pp.13-32.
- [10] Raugei, M., Fullana-I-Palmer, P., & Fthenakis, V. (2012). *The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles*. *Energy Policy*, 45, 576–582. doi: 10.1016/j.enpol.2012.03.008
- [11] Raugei, M., Sgouridis, S., Murphy, D., Fthenakis, V., Frischknecht, R., Breyer, C., ... Stolz, P. (2017). *Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response*. *Energy Policy*, 102, 377–384. doi: 10.1016/j.enpol.2016.12.042
- [12] Van Sark, W. G. J. H. M., & Schoen, T. (2017). Photovoltaic system and components price development in the Netherlands. In *Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 2866-2869). WIP-Renewable Energies.

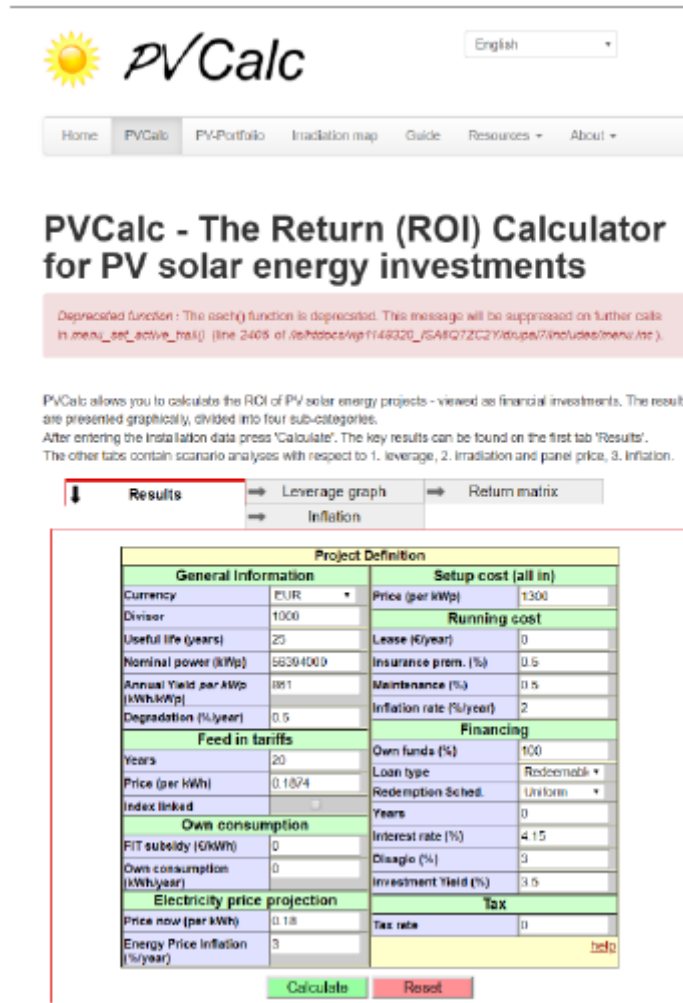
8 Bijlage 1



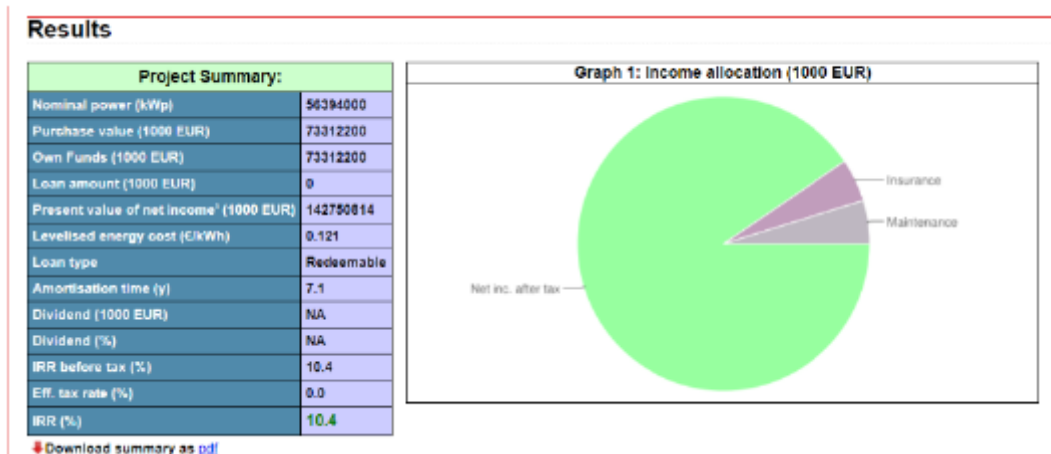
Figuur 4: a) en b) schermbeelden van de online tool die wordt gebruikt om de potentiële stroomproductie te schatten (<http://pvsol-online.valentin-software.com/#/>)



Figuur 5: screenshot van de tool Photovoltaic Geografisch Informatie Systeem van de Europese Commissie (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvgi_tools/en/tools.html)



Figuur 6: screenshot van de online tool die wordt gebruikt om het rendement van de investering te berekenen (<http://pvcalc.org/pvcalc>)



Figuur 7: screenshot die de resultaten van de economische analyse laat zien (<http://pvcalc.org/pvcalc>)

9 Bijlage 2

In de volgende bijlage worden alle relevante tabellen vermeld. Verdere informatie vindt u in het bijgevoegde Excel-werkblad, daarnaast vindt u meer gedetailleerde gegevens over het energieverbruik in dit bestand.

Tabel A. 1: inventaris woongebouwen, afhankelijk van grootte, vorm en oriëntatie van de dakrand
Table A. 1: residential buildings inventory, depending on size, shape and orientation of the roof edge

Roof Edge Orientation		N-S	W-E	SW	SE	No orientation
single units	double pitched	177	169	142	153	-
	double pitched with windows	26	17	2	6	-
	flat	-	-	-	-	42
	4 pitched	6	3	-	27	-
	angled double pitched	-	6	-	-	-
	"T" double pitched	56	19	19	13	-
multiple units	single pitched	-	1	-	1	-
	double pitched	406	390	334	201	-
	flat	-	-	-	-	99
	double pitched with windows	9	14	29	9	-

Tabel A.2: inventaris bijzondere gebouwen, afhankelijk van grootte, vorm en oriëntatie van de dakrand
Table A. 2: special buildings inventory, depending on size, shape and orientation of the roof edge

Roof Edge Orientation	N-S	W-E	SW	SE	No orientation
industrial, agriculture shreds	9	4	14	22	-
large flat buildings (school, supermarket, etc.)	-	-	-	-	25
church	-	1	1	-	-

Tabel A. 3 voetafdrukgebied van woongebouwen afhankelijk van oriëntatie en relatief geschat dakoppervlak
 Tabel A. 4: voetafdrukgebied van speciale gebouwen afhankelijk van oriëntatie en relatief geschat dakoppervlak

Table A. 3 residential buildings footprint area depending on orientation and relative estimated rooftop area

	Orientation	E	S-E	S	S-W	W	N-W	N	N-E	No orientation
single units footprint area [m ²]	double pitched	10620	8520	10140	9180	10620	8520	10140	9180	
	double pitched with windows	1560	120	1020	360	1560	120	1020	360	
	flat	-	-	-	-	-	-	-	-	5040
	4 pitched	810	270	810	270	810	270	810	270	
multiple units footprint area [m ²]	angled double pitched	0	0	420	0	0	0	420	0	
	T° double pitched	3920	1330	1330	910	3920	1330	1330	910	
	single pitched	0	0	120	0	0	0	0	120	
	double pitched	20300	16700	19500	10050	20300	16700	19500	10050	9900
area [m ²]	double pitched with windows	450	1450	700	450	450	1450	700	450	
	Total footprint area [m ²]	37660	28390	34040	21220	37660	28390	33920	21340	14940
	Total rooftop area [m ²]	47791,2	36027,4	43197,4	26928,6	47791,2	36027,4	43045,1	27080,8	14940

Table A. 4: special buildings footprint area depending on orientation and relative estimated rooftop area

	Orientation	E	S-E	S	S-W	W	N-W	N	N-E	No orientation
special buildings footprint area [m ²]	Industrial/agriculture sheds	1706	5032,5	1104,5	5032,5	1706	5032,5	1104,5	5032,5	-
	large flat buildings (school, supermarket, etc)	-	-	-	-	-	-	-	-	27283
	church	-	100	420	-	-	100	420	-	-
	Total footprint area [m ²]	1706	5132	1524	5032	1706	5132	5132	1524	5032
	Total rooftop area [m ²]	1793	5393	1601	5288	1793	5393	1601	5288	28674

Tabel A.5: beschikbare dakoppervlakte woongebouwen afhankelijk van oriëntatie
 Tabel A. 6: speciale gebouwen beschikbaar op het dak, afhankelijk van de oriëntatie

Table A. 5: residential buildings available rooftop area depending on orientation

Orientation	E	S-E	S	S-W	W	N-W	N	N-E	No orientation
double pitched	12129	9730	11581	10484	12129	9730	11581	10484	
double pitched with windows	1247	95	815	287	1247	95	815	287	
flat									4536
4 pitched	925	308	925	308	925	308	925	308	
angled double pitched	0	0	383	0	0	0	383	0	
"T" double pitched	3979	1350	1350	923	3979	1350	1350	923	
single pitched	0	0	152	0	0	0	0	152	
double pitched	23184	19073	22271	11478	23184	19073	22271	11478	8910
flat									
double pitched with windows	359	1159	559	359	359	1159	559	359	
Total available rooftop area [m²]	41825	31717	38038	23842	41825	31717	37886	23994	6723

Table A. 6: special buildings available rooftop area depending on orientation

Orientation	E	S-E	S	S-W	W	N-W	N	N-E	No orientation
industrial/agriculture sheds	1793	5289	1160	5289	1793	5289	1160	5289	-
large flat buildings (school, supermarket, etc)	-	-	-	-	-	-	-	-	27283
church		105	441	-	-	105	441	-	-
Total available rooftop area [m²]	1613	4854	1440	4760	1613	4854	1440	4760	12277