



Haven van de toekomst

Bachelor eindproject – Maritieme Techniek

Optimaliseren van hernieuwbare energiesystemen voor een duurzame en zelfvoorzienende haven:

Het havengebied van Maassluis

Author(s):
Marinus Breeve
Vincent van Rijn
Gijs Broere
Mees IJzerman

Supervisors:
Dr.ir. J.F.J. Pruijn,
Dr.ir. H.J. de Koning Gans

Date: 24-01-2025



Samenvatting

Dit rapport onderzoekt hoe de haven van Maassluis kan transformeren tot een duurzame en zelfvoorzienende haven. Het richt zich op de integratie van hernieuwbare energiebronnen, zoals zonne-energie, windenergie en innovatieve technologieën zoals natrium-ionbatterijen. Het rapport behandelt de huidige en toekomstige energiebehoefte, de variabele energieconsumptie en de mogelijkheden voor energieopslag. Daarnaast biedt het een grondige analyse van de beschikbare ruimte, het weer en de ruimtelijke beperkingen en regelgeving. Door middel van een simulatiemodel worden verschillende scenario's geschetst om de meest efficiënte configuratie van hernieuwbare energiebronnen en opslag te bepalen. De resultaten tonen aan dat een combinatie van zonnepanelen, kleine windturbines en natrium-ionbatterijen het meest geschikt is om te voldoen aan de energievraag van de haven. Dit rapport dient als een blauwdruk voor de verduurzaming van vergelijkbare havengebieden.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
Inleiding	6
1 Plan van aanpak	7
1.1 Inleiding	7
1.2 Plan van Aanpak	8
2 Stakeholder analyse	9
3 Energiebehoefteanalyse van de haven	10
3.1 Huidige energiebehoefte	10
3.2 Toekomstige energiebehoefte	11
3.2.1 Warmtepompen	11
3.2.2 Elektrificatie van schepen	12
3.2.3 Verduurzaming gebouwen	13
3.2.4 Totaal potentieel energieverbruik	13
3.3 Variabele energiebehoefte:	13
3.3.1 Algemene variatie energieverbruik	13
3.3.2 Verdeling per maand	14
4 Mogelijke hernieuwbare energiemogelijkheden	17
4.1 Thermische energie– Warmtepomp: functionaliteit, soorten, en vergelijking	17
4.1.1 Soorten warmtepompen	18
4.1.2 Welk systeem is het meest geschikt voor Maassluis?	18
4.2 Hydro kinetische energieconversiesystemen	19
4.2.1 Soorten Hydro kinetische energieconversiesystemen	19
4.2.2 Vergelijking van Horizontale en Verticale Turbine systemen	21
4.2.3 Conclusie: Beste Hydrokinetisch Systeem voor Maassluis	23
4.3 Windenergie op kleine schaal	24
4.3.1 Soorten kleinschalige windturbines	24
4.3.2 Beste toepassing in Maassluis	25
4.4 Zonne-energie	25
4.4.1 Toepassing in Maassluis	25
4.4.2 Voordelen van Zonne-energie in de Haven	26
4.4.3 Conclusie	26
5 Oppervlakteanalyse voor zonne- en windenergie	27
5.1 Beschikbare dakoppervlak	27
5.2 Soorten daken in het gebied	28
Platte Daken	28
Schuine Daken	28
5.3 Ruimtelijke beperkingen en regelgeving	29

5.3.1	Geluidhinder	29
5.3.2	Omgevingswet	29
5.3.3	Bouwbesluit 2012	30
5.3.4	Omgevingsvisie Maassluis	30
5.3.5	Binnenvaartpolitiereglement	30
6	Vergelijking van wind en zonne-energie	31
6.1	Opwekkingscapaciteit van Zonnepanelen versus Windturbines	31
6.2	Efficiëntie per Vierkante Meter	32
6.3	Combineren van Zonne- en Windenergie: Hybride Model	33
6.4	Conclusie	33
7	Opslag van de opgewekte energie: Natrium-ion batterijen versus Lithium-ion batterijen	34
7.1	Werking van Natrium-ion batterijen	34
7.2	Vergelijking met Andere Opslagtechnologieën	34
7.3	Technische specificaties en kosten	35
7.4	Capaciteitseisen voor Maassluis	35
7.5	Beste soort energieopslag voor Maassluis	36
8	Wind- en zonneanalyse	37
8.1	Windrichting en Windsnelheid	37
8.2	Zonintensiteit	38
9	CO2 uitstoot	40
9.1	Huidige en toekomstige CO2 uitstoot	40
9.2	CO2 uitstoot hernieuwbare bronnen	40
9.3	Uitstoot vermindering verduurzaamde haven	41
10	Model	42
10.1	Doel van het Model	42
10.2	Werking van het Model	42
10.2.1	Invoerparameters en Gegevens	43
10.2.2	Financiële Evaluatie	44
10.2.3	Optimale Oplossing	44
10.3	Output van het Model	44
10.4	Toepassing van het Model	45
11	Resultaten	46
11.1	Scenario 1: Huidige energiebehoefte	46
11.2	Scenario 2: Overschakeling naar Elektrische Verwarming	47
11.3	Scenario 3: Elektrische verwarming en elektrisch varen	48
	Discussie	49

Conclusie	52
Referenties	54
12 Appendix A	59
13 Appendix B: Code van het model	65

Inleiding

De wereldwijde energietransitie vraagt om innovatieve oplossingen die de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen verminderen en de uitstoot van broeikasgassen terugdringen. Havens, als logistieke knooppunten met hoge energiebehoeften, bieden unieke kansen om een leidende rol te spelen in deze transitie. Dit rapport richt zich op de verduurzaming van de haven van Maassluis en onderzoekt hoe deze kan transformeren tot een zelfvoorzienende haven.

Het onderzoek richt zich op drie kernvragen:

1. Wat is de huidige en toekomstige energiebehoefte van de haven?
2. Welke hernieuwbare energieoplossingen en opslagtechnologieën zijn het meest geschikt voor de situatie van Maassluis?
3. Hoe kan een simulatiemodel bijdragen aan het optimaliseren van de energiebalans?

Naast een analyse van de energiebehoefte, technologieën en het gedrag van het weer behandelt het rapport ook de ruimte en regelgevende beperkingen. Met behulp van een model worden verschillende scenario's gesimuleerd, waarbij economische en technische haalbaarheid worden geëvalueerd. Het doel is om een praktisch en schaalbaar plan te bieden dat als inspiratie kan dienen voor andere havengebieden.

1 Plan van aanpak

1.1 Inleiding

Het havengebied van Maassluis staat voor een belangrijke uitdaging: het realiseren van een duurzame en zelfvoorzienende energievoorziening. De groeiende vraag naar energie, gecombineerd met de behoefte aan elektrificatie en de integratie van hernieuwbare bronnen, vereist een goed doordacht plan. Dit onderzoek richt zich op het analyseren van het energieverbruik en het identificeren van optimale technologieën voor energieopwekking en -opslag. Het doel is om een praktisch, economisch haalbaar en milieuvriendelijk model te ontwikkelen dat kan dienen als blauwdruk voor de verduurzaming van havengebieden.

1.2 Plan van Aanpak

- 1. Stakeholderanalyse**
 - a. Identificeren van belanghebbenden, zoals de gemeente Maassluis, lokale bedrijven, en betrokken burgers.
 - b. Inventarisatie van hun behoeften, belangen en bijdragen aan de energietransitie.
- 2. Energiebehoefteanalyse**
 - a. Analyse van het huidige energieverbruik in de haven en omliggende gebouwen.
 - b. Schattingen maken van toekomstige energiebehoeften, inclusief de impact van elektrificatie van schepen en verduurzaming van gebouwen.
- 3. Analyse van hernieuwbare energieopties**
 - a. Technische en economische evaluatie van zonne-energie, windenergie en hydrokinetische systemen.
 - b. Vergelijking van technologieën op basis van rendement, kosten en lokale toepasbaarheid.
- 4. Ruimtelijke analyse**
 - a. Onderzoek naar beschikbare daken, open ruimtes en andere locaties voor energieopwekking.
 - b. Analyse van de ruimtelijke beperkingen, zoals wet- en regelgeving en esthetische factoren.
- 5. Opslagmogelijkheden**
 - a. Vergelijking van verschillende energieopslagsystemen, zoals natrium-ionbatterijen en zeezoutbatterijen.
 - b. Beoordeling van de capaciteit en geschiktheid voor seizoensgebonden en dagelijkse fluctuaties.
- 6. Weersdata analyse**
 - a. Analyseren van de zonintensiteit in de haven van Maassluis aan de hand van historische data
 - b. Analyseren van de windsnelheid en windrichting in de haven van Maassluis aan de hand van historische data
- 7. Ontwikkeling van een simulatiemodel**
 - a. Creëren van een model om verschillende energiemaatregelen en scenario's door te rekenen.
 - b. Optimalisatie van de combinatie van opwekking, opslag en gebruik van energie.
- 8. Resultaatverwerking**
 - a. Analyse van de uitkomsten van het simulatiemodel.
 - b. Opstellen van conclusies

2 Stakeholder analyse

High-Interest/ Low-Influence	High-Interest/ High-Influence	Low-Interest/High-Influence	Low-Interest/Low-Influence
<ul style="list-style-type: none"> - Museum - Dr. Ten - Werknemers - Inwoners van Maassluis - Vrijwilligers 	<ul style="list-style-type: none"> - Loods M - Bank/ Investeerder - Gemeente - Bedrijven 	<ul style="list-style-type: none"> - Reinwardt Academy - Ministerie van Cultureel Erfgoed - Midden Delfland 	<ul style="list-style-type: none"> - Toeristen - Havengebied Rotterdam

Tabel 1: Uitkomst stakeholder analyse

Co-creatie sessies Maassluis

Tijdens het onderzoek zijn er co-creatie sessies georganiseerd in Maassluis, waarbij verschillende studenten en instanties samenkwamen om de relevante stakeholders voor het project in kaart te brengen. Deze sessies waren bijzonder waardevol omdat ze inzicht gaven in de belangen en invloed van verschillende partijen, wat hielp om gericht en effectief te werk te gaan. Door deze aanpak wisten we met wie en welke aspecten we rekening moesten houden voordat het onderzoek begon.

Uit deze sessies is gebleken dat de belangrijkste stakeholders voor dit project Loods M, de gemeente Maassluis en de bedrijven in het havengebied zijn. Deze groepen werden geïdentificeerd als stakeholders met zowel een hoog belang als een grote invloed op de uitvoering en uitkomst van het project.

Loods M speelt een cruciale rol omdat het direct betrokken is bij de energievoorziening en het functioneren van de haven. De gemeente Maassluis is essentieel vanwege haar verantwoordelijkheid voor beleid, regelgeving en het ondersteunen van verduurzaming in de regio. De bedrijven in de haven zijn belangrijke stakeholders omdat zij zowel energieverbruikers als potentiële investeerders zijn in duurzame oplossingen.

Door deze stakeholders in een vroeg stadium te betrekken, kon het onderzoek gericht inspelen op hun behoeften en prioriteiten, wat de haalbaarheid en relevantie van de voorgestelde oplossingen heeft vergroot.

3 Energiebehoefteanalyse van de haven

Voordat er een plan kan worden gemaakt om de haven van Maassluis te verduurzamen zal er als eerst een bepaling gemaakt moeten worden van de energiebehoefte van de haven. In hoofdstuk 3.1 wordt er een analyse gemaakt van de huidige energiebehoefte. Vervolgens wordt er in hoofdstuk 3.2 een schatting gemaakt voor de toekomstige energiebehoefte. Tot slot worden in hoofdstuk 3.3 de verschillende variabelen in energiebehoefte door het jaar heen bepaald.

3.1 Huidige energiebehoefte

Om het gebied waar ons project zich plaatsvindt in kaart te brengen zullen we beginnen met het doen van een onderzoek naar de energiebehoefte in dit gebied. Hierbij verdelen we dit onderzoek in drie situaties; huidige energiebehoefte, toekomstige energiebehoefte en mogelijke variatie invloeden door verschillen in vraag en seizoengebonden vraag. Ons interessegebied ligt allemaal op één enkele postcode (3144EG). Volgens data uit de Energie-N tool van Stedin (Stedin, 2023), de Energie-N tool van Liander (Liander, 2023) en waarden van een elektriciteit meter op de walstroom is gebleken dat dit het elektriciteit en gasverbruik is over het jaar 2023 voor ons interessegebied:

Product	Verbruik	
Elektra		
2023	19232	kWh
2022	19023	kWh
2021	17440	kWh
2020	18674	kWh
2019	19232	kWh
Gemiddeld	18720.2	kWh
Gas		
2022	11229	m3
2021	11916	m3
2020	12130	m3
2019	12486	m3
Gemiddeld	11940.3	m3

Tabel 2: Elektriciteits- en gasverbruik van de afgelopen jaren

	2023
Elektriciteit	33000 kWh

Tabel 3: Energie verbruik walstroom 2023

Voor het totale energie verbruik worden de walstroom en gemiddeld energieverbruik op de postcode van het interessegebied opgeteld:

	2023
Gas	13532 m ³
Elektriciteit	51720.2 kWh

Tabel 4: Totaal elektriciteits- en gasverbruik 2023

3.2 Toekomstige energiebehoefte

Het gasverbruik in havengebieden kan nauwkeurig worden omgerekend naar elektriciteitsverbruik door gebruik te maken van de energie-inhoud van aardgas en de efficiëntie van elektrische verwarmingssystemen. De overstap van gas naar elektriciteit voor de verwarming van gebouwen is een van de belangrijkste stappen in de energietransitie. Verwarming met aardgas zorgt voor aanzienlijke uitstoot van broeikasgassen, met name CO₂, die bijdragen aan klimaatverandering. Elektrische verwarming, zoals warmtepompen, kan dit probleem aanpakken door gebruik te maken van hernieuwbare energiebronnen zoals wind- en zonne-energie. Daarnaast kunnen elektrische verwarmingssystemen efficiënter zijn en dragen ze bij aan het verlagen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen (Energie-Nederland, 2023).

Het huidige gasverbruik in het betreffende havengebied bedraagt 13532 m³ per jaar. Om dit gasverbruik om te rekenen naar elektriciteitsverbruik, wordt uitgegaan van de volgende energie-inhoud van aardgas:

1 m³ aardgas bevat 35.17 MJ aan energie (TNO, 2021).
Aangezien 1 kWh gelijk is aan 3.6 MJ, komt dit overeen met:

$$\text{Energie-inhoud per m}^3 \text{ gas} = 35.17 \text{ MJ} \div 3.6 \text{ MJ/kWh} = 9.77 \text{ kWh/m}^3$$

Het jaarlijks elektriciteitsverbruik zonder rekening te houden met efficiëntieverbeteringen wordt berekend door het totale gasverbruik te vermenigvuldigen met de energie-inhoud in kWh per m³:

$$\text{Elektriciteitsverbruik} = 51720.2 \text{ kWh} + 13532 \text{ m}^3 \times 9.77 \text{ kWh/m}^3 = 183927.84 \text{ kWh/jaar}$$

3.2.1 Warmtepompen

Als elektrische warmtepompen worden toegepast, kan de elektriciteitsvraag aanzienlijk afnemen. Warmtepompen hebben doorgaans een Coëfficiënt of Performance (COP) van 3 tot 4, wat betekent dat ze 3-4 keer zoveel warmte leveren per kWh elektriciteit dan gebruikelijke elektrische verwarming (van der Linden et al., 2022). Het percentage elektriciteit dat gebruikt wordt voor verwarming is afhankelijk van het type gebouw en de mate van isolatie, maar het kan tussen 17% en 75% liggen (TNO, 2024). De gebouwen in ons interessegebied zijn kantoren en een hotel. We nemen aan dat dit een gemiddelde representatie is en zullen daarmee een percentage van 48% energie naar verwarming aanhouden. De walstroom wordt niet meegenomen in deze aanname.

Het potentiële elektriciteitsverbruik wordt:

- Besparing bij een COP van 3:

$$(183927.84 - 33000) * 0.48 * \frac{2}{3} = 48296.39 \text{ kWh}$$

- Potentieel elektriciteitsverbruik:

$$183927.84 - 48296.39 = 135631.45 \text{ kWh}$$

- Besparing bij een COP van 3:

$$(183927.84 - 33000) * 0.48 * \frac{3}{4} = 54258.43 \text{ kWh}$$

- Potentieel elektriciteitsverbruik:

$$183927.84 - 54258.43 = 129669.41 \text{ kWh}$$

3.2.2 Elektrificatie van schepen

In de haven liggen op het moment zeven schepen. De meeste hiervan zijn historische schepen die gebruikt worden voor rondvaarten. Dit gaat om enkele dagen per jaar. De drie overige schepen zijn eigendom van Sima charters, een bedrijf gericht op crew transport naar offshore locaties. Tidal Transit heeft afgelopen jaar laten zien dat het mogelijk is om een CTV van dezelfde afmetingen te retrofitten naar een volledig elektrische aandrijflijn. Dit ging om de Ginny Louise met een lengte van 20 m. Op dit schip zijn batterijen met een totale capaciteit van 3.4 MWh geïnstalleerd. Over de actieradius is nog niks bekend. De kosten voor deze retrofit bedragen €9.4 miljoen. De elektrificatie van deze schepen zou verder bijdragen aan het terugbrengen van uitstoot. Om het toekomstbeeld compleet te maken willen we een proefberekening maken voor de potentiële extra benodigde elektriciteit.

Hierbij enkele aannames:

- 3 schepen retrofitten naar elektrische aandrijflijn.
- Elk schip een batterij capaciteit van 3.4 MWh.
- Schepen worden tot 90% leeg gevaren.
- Schepen varen gemiddeld tweemaal per week.

Toename walstroom:

$$\text{Walstroom verbruik toename} = 3 * (3.4 * 0.9) * 2 * 52 = 953.88 \text{ MWh}$$

Potentieel energieverbruik:

- Bij huidig elektriciteitsverbruik: 972.6002 MWh
- Na overstap naar elektrische verwarming: 1137.80784 MWh
- Met warmtepompen: 1085.88 MWh

Dit zou een toename van 571% tot 611% betekenen op basis van de voorgaande berekeningen.

3.2.3 Verduurzaming gebouwen

De gedateerde gebouwen in het interessegebied bieden aanzienlijke mogelijkheden voor energiebesparing en het verminderen van de ecologische voetafdruk. Isolatie van gevels, daken en vloeren is een van de meest kosteneffectieve maatregelen om warmteverlies te beperken en het energieverbruik te verlagen. Volgens Verbeeck en Hens (2010) kan goede isolatie leiden tot een energiebesparing van 20-30% in vergelijkbare gebouwen, afhankelijk van het oorspronkelijke isolatieniveau en het type gebouw.

In ons interessegebied zou een besparing van 25% op het verwarming energieverbruik de volgende reductie geven:

$$(183927.84 - 33000) * 0.48 * 0.75 = 54334.02 \text{ kWh}$$

3.2.4 Totaal potentieel energieverbruik

Wanneer deze verduurzamingen worden doorgevoerd kan een totaal potentieel elektriciteitsverbruik worden bepaald. Voor de warmtepomp toepassing wordt hiervoor een COP van 3.5 gekozen.

$$\begin{aligned} \text{Verbruik na verduurzaming} &= \text{Totaalverbruik} - \text{warmtepomp reductie} - \text{Isolatie} \\ &= 183927.84 - 51277.41 - 54334.02 = 78316.41 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Verbruik na retrofitting} &= \text{verbruik na verduurzaming} + \text{walstroomtoename} \\ &= 78.316 + 953.88 = 1032.196 \text{ MWh} \end{aligned}$$

3.3 Variabele energiebehoefte:

3.3.1 Algemene variatie energieverbruik

Volgens het Internationaal Energieagentschap (IEA) worden seizoensgebonden variaties in de vraag naar elektriciteit sterk beïnvloed door temperatuurgevoelige toepassingen zoals verwarming en koeling, evenals door sectorspecifieke activiteiten zoals industriële productie.

In Europa is de vraag naar elektriciteit bijvoorbeeld doorgaans hoger tijdens de wintermaanden vanwege de toegenomen verwarmingsbehoefte en piekt deze weer in de zomer vanwege de koellast. Aan de aanbodzijde zorgen hernieuwbare bronnen zoals wind en zon voor variabiliteit; windenergie piekt in de winter, terwijl de zonne-energie piekt in de zomer (IEA, 2023).

Dagelijkse variaties worden voornamelijk veroorzaakt door menselijke activiteitspatronen en operationele schema's. Zo volgt het industriële energieverbruik een doordeweekseweekendcyclus, met een verminderde vraag in het weekend. Havens vertonen variabiliteit op basis van scheepvaartschema's en logistieke activiteiten, waarbij bepaalde uren een hogere activiteit ervaren (IEA, 2023). Uurlijkse vraagschommelingen correleren ook met dagelijkse cycli, waarbij piekgebruikstijden overeenkomen met operationele uren voor industriële apparatuur of wanneer bewoners naar huis terugkeren, wat van invloed is op energieverbruikspatronen (IEA, 2023).

Naarmate het aandeel van variabele hernieuwbare energiebronnen groeit, vereisen deze vraagschommelingen verbeterde flexibiliteitsmechanismen, zoals batterijopslag en vraagresponstechnologieën, om het net te stabiliseren en efficiënt aan piekvraag te voldoen. Voor havens in het bijzonder benadrukt de toegenomen elektrificatie, zoals de adoptie van walstroom en geëlektrificeerde kranen, de noodzaak van nauwkeurige voorspellingen en beheer van de vraag naar elektriciteit op fijnere tijdschalen (IEA, 2023).

De toenemende vraag naar elektriciteit in havengebieden maakt de ontwikkeling van microgrids noodzakelijk (Lund et al., 2017). De groei in elektriciteitsbehoefte door de elektrificatie van havenactiviteiten vereist slimme netwerken die energiebronnen en opslag combineren om de capaciteit te waarborgen. Dit maakt efficiënter gebruik van hernieuwbare energie en batterijen mogelijk, wat bijdraagt aan het verduurzamen van haveninfrastructuren (Papadopoulos et al., 2020).

3.3.2 Verdeling per maand

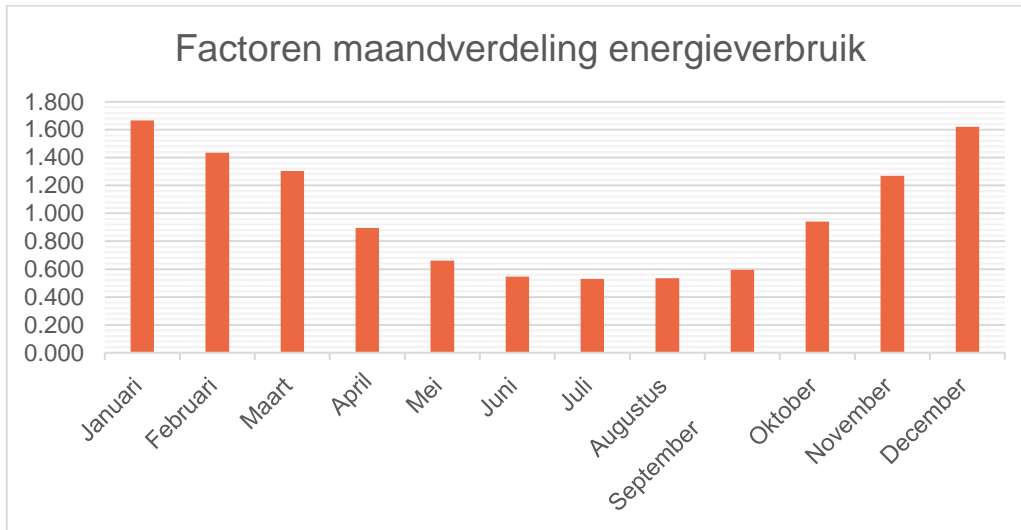
Het energieverbruik in het interessegebied verschilt per maand door voornamelijk buitentemperatuur. Door het ontbreken van maand data zal er een schatting moeten worden gemaakt over de verdeling per maand. We hebben ervoor gekozen dit te doen aan de hand van factoren. Door een factor toe te kennen aan elke maand op basis van de het verwachte relatieve energieverbruik. Het gemiddelde van deze factoren moet één zijn om het totaal verbruik gelijk te houden. Omdat ons interessegebied een diverse energievraag heeft door walstroom, hotel, loods en kantoren nemen we aan dat het landelijk gemiddelde gebruikt kan worden voor de maand weging van het energieverbruik. Het energieverbruik is verdeeld in percentages per maand. (Pure energie, 2024)

Dit is in onderstaande tabel terug te vinden:

Maand	Elektriciteitsverbruik (%)	Gasverbruik (%)	Gecombineerd (%)	Factor
Januari	10.00	18.10	13.89	1.667
Februari	8.60	15.60	11.96	1.435
Maart	8.90	13.00	10.87	1.304
April	7.50	7.40	7.45	0.894
Mei	7.90	2.90	5.50	0.660
Juni	7.20	1.70	4.56	0.547
Juli	7.10	1.50	4.41	0.529
Augustus	7.10	1.60	4.46	0.535
September	7.60	2.10	4.96	0.595
Oktober	8.80	6.80	7.84	0.941
November	9.00	12.30	10.58	1.270
December	10.30	17.00	13.52	1.622
		SUM	100.00	12.00
		Average	8.33	1.00

Tabel 5: Tabel verdelingsfactor energieverbruik

De laatste twee kolommen zijn toegevoegd om de factoren te bepalen. Het gecombineerde percentage per maand is een gewogen gemiddelde van elektriciteitsverbruik en gasverbruik. In de onderstaande grafiek zijn de factoren weergegeven.



Figuur 1: Visualisering verdelingsfactor energieverbruik per maand

De transitie naar duurzame energie in de haven van Maassluis omvat de integratie van elektrificatie, energie-efficiëntie en hernieuwbare energiesystemen. Deze maatregelen zijn gericht op het verminderen van broeikasgasemissies en het verkleinen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.

De haven verbruikt momenteel jaarlijks 13.532 m³ aardgas, wat overeenkomt met 183.927,84 kWh elektriciteit op basis van de energie-inhoud (TNO, 2021). Het vervangen van gasegestookte verwarming door warmtepompen met een prestatiefactor (COP) van 3–4 kan dit elektriciteitsverbruik verminderen tot ongeveer 129.669–135.631 kWh per jaar, ervan uitgaande dat 48% van de energiebehoefte wordt gebruikt voor verwarming (van der Linden et al., 2022). Deze transitie wordt verwacht de energie-efficiëntie te verbeteren en de koolstofemissies aanzienlijk te verlagen.

Het renoveren van de kantoren en het hotel biedt kansen om het energieverbruik voor verwarming te verminderen. Door de isolatie te verbeteren en warmteverlies te minimaliseren, kan de warmtevraag met 25% worden verminderd, wat een jaarlijkse besparing van 54.334,02 kWh oplevert (Verbeeck & Hens, 2010). Hierdoor kan de totale warmte gerelateerde elektriciteitsvraag worden teruggebracht tot 78.316,41 kWh per jaar.

De elektrificatie van schepen biedt een belangrijke kans voor de carbonisatie. Het retrofitten van drie bemanningstransferschepen met volledig elektrische voortstuwingssystemen, elk uitgerust met batterijen met een capaciteit van 3,4 MWh, zal naar schatting de jaarlijkse elektriciteitsvraag met 953,88 MWh verhogen. Dit resulteert in een totale geprojecteerde elektriciteitsvraag van 1.032,20 MWh.

Natrium-ionbatterijen (Na-ion) kunnen worden ingezet voor energieopslag en bieden een kosteneffectieve en duurzame oplossing om vraag en aanbod van energie in balans te

brengen. Deze geavanceerde batterijen zorgen voor een stabiele energievoorziening, zelfs tijdens perioden van lage hernieuwbare opwekking, en ondersteunen de elektrificatie van verwarming en schepen (Nurohmah et al., 2022).

Het voorgestelde toekomstige energienscenario voor de haven van Maassluis toont het potentieel aan van het integreren van elektrificatie, energie-efficiëntie en hernieuwbare energiesystemen om een koolstofarm en duurzaam energiemodel te creëren. Verticale windturbines, zonnepanelen en natrium-ionbatterijen spelen een cruciale rol bij het waarborgen van energie-resiliëntie en -betrouwbaarheid. Deze bevindingen onderstrepen het belang van schone energietechnologieën voor het realiseren van langetermijn-duurzaamheid in havenoperaties.

4 Mogelijke hernieuwbare energiemogelijkheden

Het verduurzamen en zelfvoorzienend maken van het havengebied van Maassluis vraagt om een integrale aanpak waarin hernieuwbare energieoplossingen een centrale rol spelen. Door het slim benutten van lokaal beschikbare energiebronnen kunnen we niet alleen de afhankelijkheid van externe energie verminderen, maar ook bijdragen aan een duurzamere toekomst voor het havengebied. In dit hoofdstuk verkennen we verschillende hernieuwbare energieopties die toepasbaar zijn binnen de context van de haven. Met een focus op technologieën zoals warmtepompen, zonne-energie, en windenergie, onderzoeken we hun potentieel om de energiebehoefte van het gebied te dekken. Deze oplossingen bieden niet alleen voordelen op het gebied van duurzaamheid, maar kunnen ook economische en milieuvriendelijke alternatieven zijn voor traditionele energiebronnen. Dit sluit direct aan bij onze doelstelling om het havengebied toekomstbestendig en energie-efficiënt te maken. In hoofdstuk 4.1 wordt thermische energie behandeld. Vervolgens worden in hoofdstuk 4.2 Hydro kinetische energieconversiesystemen behandeld. Hierna zullen in hoofdstuk 4.3 hernieuwbare windenergie opties worden behandeld. Tot slot wordt er in hoofdstuk 4.4 gekeken naar zonne-energie.

4.1 Thermische energie – Warmtepomp: functionaliteit, soorten, en vergelijking

Een warmtepomp is een efficiënt systeem dat is ontworpen om thermische energie over te dragen van een externe bron zoals buitenlucht, grondwater of elk ander wateroppervlak. De warmtepomp gebruikt deze thermische energie om gebouwen op te warmen of af te koelen. Het principe is gelijk aan dat van een koelkast maar andersom, het neemt de warmte op uit een lage temperatuur bron en verplaatst het naar een hogere temperatuur omgeving maar dan naar het interieur van een gebouw (Carrol et al., 2020). Een warmtepomp gebruikt een koelmiddel wat een belangrijke rol speelt, omdat dit de warmte van buiten absorbeert waarna het de warmte binnen afgeeft nadat het gecondenseerd is.

De ‘‘Coefficient of Performance’’ (COP), die de efficiency meet, geeft aan hoeveel warmte wordt geproduceerd in relatie naar hoeveel energie er wordt gebruikt hiervoor. Dit is dus de ratio van hoeveel verwarming of verkoeling in kilowatts geleverd door een warmtepomp, Q , naar de kilowatts of power geconsumeerd door de warmtepomp, W (Carroll et al., 2020).

Volgens Carrol et al. (2020), een warmtepomp vereist een minimum COP van 2.88 om te kunnen kwalificeren als een hernieuwbaar energiesysteem onder de regulaties van de EU.

4.1.1 Soorten warmtepompen

Er zijn drie belangrijke soorten warmtepompen: luchtbron, grondbron en waterbron. Elk van deze soorten heeft zijn eigen voordelen en nadelen, voornamelijk in koudere klimaten.

Luchtbron Warmtepomp (Lucht-naar-Water of Lucht-naar-Lucht):

Luchtbron warmtepompen nemen warmte van de omgevingslucht en verplaatst deze naar het interieur van een gebouw. Deze systemen zijn het meest populair omdat dit lagere opstartkosten heeft en een gemakkelijke installatie. Echter bevriezen deze systemen sneller in een koude omgeving vanwege de buitenunit die blootgesteld is aan de buitencondities (Carroll et al. 2020). Dit verzwakt de prestatie van dit systeem maar zou kunnen worden voorkomen door de buitenunit in een meer beschutte locatie te installeren. Daarnaast is dit systeem vergeleken met andere systemen minder efficiënt in temperaturen zo laag als -15 tot -20 graden Celsius (García et al., 2023).

Grondbron Warmtepomp (Geothermische warmtepompen):

Grondbron warmtepompen nemen de thermische energie van de ondergrond, wat dit systeem een voordeel geeft. Dit voordeel is dat de temperatuur ondergrond relatief stabiel blijft. Dat is ook waarom dit systeem efficiënter is in koudere klimaten, anders dan andere systemen lukt het grondbron warmtepompen hierdoor om een hogere COP te behouden gedurende het hele jaar (García et al., 2023). Hoewel de installatie meer werk en kosten intensiever is vanwege de noodzaak om te boren, maakt de energie die op de lange termijn wordt bespaard deze systemen op de lange termijn kosten effectiever.

Waterbron warmtepompen (water-naar-water):

Waterbron warmtepompen gebruiken de thermische energie van waterlichamen, bijvoorbeeld uit meren of rivieren. Dit systeem kan een hoge efficiëntie leveren wanneer de bron stabiel in temperatuur blijft. Volgens Tian et al. (2024), kunnen deze het best opereren in koude gebieden waar de bron niet bevriest. Echter zakt de efficiëntie significant wanneer er oppervlaktewater als bron wordt gebruikt. Het gebruik van diep water verzekert een betere prestatie door het hele jaar heen (Tian et al., 2024).

4.1.2 Welk systeem is het meest geschikt voor Maassluis?

Tijdens het doornemen van de vorige paragraaf is het duidelijk geworden dat de belangrijkste factoren bij het kiezen van een geschikte warmtepomp het klimaat en de beschikbare warmtebronnen zijn.

Maassluis ervaart koude winters waarin de vraag naar verwarming het grootst is. Dit maakt de keuze eenvoudig, omdat er in de buurt van Maassluis geen diep water is en de temperatuur in de winter flink daalt. In dit geval is daarom dus een waterbron systeem geconfronteerd met soortgelijke uitdagingen op het gebied van de efficiëntie in de winter als luchtbron warmtepompen, waardoor de minder praktisch zijn in gebieden met koude winters. Dit maakt de water- en luchtbron warmtepompen minder goede opties dan de grondbron warmtepomp. Door de stabiele ondergrondse temperaturen kan dit systeem zijn efficiëntie het hele jaar door behouden. En zoals eerder vermeld, ondanks de hogere installatiekosten vooraf, maken hun betrouwbaarheid en energiebesparingen op de lange termijn en consistente efficiëntie ze tot een uitstekende keuze voor koudere klimaten.

Daarom volgt de conclusie dat voor dit project waar er aanzienlijke verwarmingsbehoeften zijn in de winter, grondbron warmtepompen het beste balans tussen betrouwbaarheid, efficiëntie en kostenbesparingen in de loop van de tijd.

4.2 Hydro kinetische energieconversiesystemen

Aangezien het terrein naast de Maas ligt, zou het een goede optie kunnen zijn om rivierturbines in te zetten om energie op te wekken uit de stroming van de rivier. Dit proces van hydro kinetische energieconversie maakt gebruik van de kinetische energie uit de rivierstroom (Khan et Al., 2013). Dit opkomende type hernieuwbare energietechnologie wordt erkend als een unieke oplossing. In tegenstelling tot traditionele waterkrachtcentrales die dammen of kanalen gebruiken om een kunstmatige waterstroom te creëren, werken hydro kinetische conversiesystemen zonder grote veranderingen aan de rivier of beek.

4.2.1 Soorten Hydro kinetische energieconversiesystemen

Omdat het een opkomend type hernieuwbare energietechnologie is, bestaat er enige verwarring over de definitie van de soorten technologie, gebruiksgebieden en conversiemethoden. In dit gedeelte worden deze problemen uitgelegd aan de hand van huidig onderzoek en trends volgens (Khan et Al., 2013).

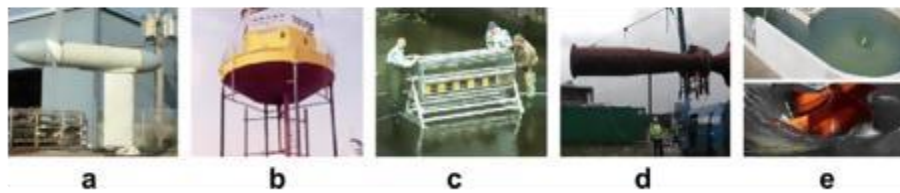
Turbine systemen

- **Axiaal (Horizontaal):** Rotatie-as van de rotor is evenwijdig aan de binnenkomende waterstroom.
- **Verticaal:** De rotatie-as van de rotor staat loodrecht op het wateroppervlak en is ook orthogonaal aan de inkomende waterstroom.
- **Dwarsstroom:** De rotatie-as van de rotor is evenwijdig aan het wateroppervlak en orthogonaal aan de inkomende waterstroom.
- **Venturi:** Versneld water als gevolg van een versmalt systeem.
- **Gravitationele Vortex:** Een kunstmatig opgewekt wervelingseffect wordt gebruikt om een verticale turbine aan te drijven.

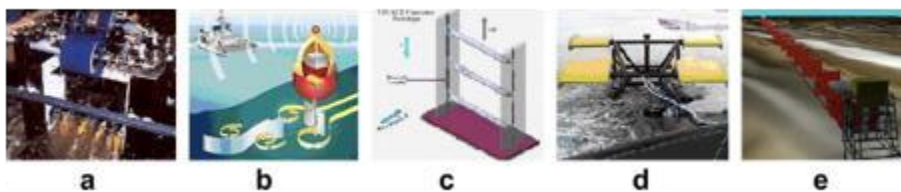
Niet-turbine systemen

- **Flutter Vane:** Systemen die gebaseerd zijn op het principe van energieopwekking door hydro-elastische resonantie in vrij stromend water.
- **Piëzo-elektrisch:** De piëzo-elektrische eigenschap van polymeren wordt gebruikt voor elektriciteitsopwekking wanneer een vel van dit materiaal in de waterstroom wordt geplaatst.
- **Vortex-geïnduceerde trilling:** Maakt gebruik van trillingen die ontstaan door wervelingen aan de neerwaartse zijde van een object in de stroming.
- **Oscillerende hydrofoil:** Verticale oscillatie van hydrofoils kan worden gebruikt om vloeistoffen onder druk te genereren voor daaropvolgende turbinewerking.
- **Zeilen:** Maakt gebruik van de weerstand van lineair of cirkelvormig bewegende folievlakken die in de waterstroom zijn geplaatst.

In 2013 volgens (Khan et Al., 2013) waren veel turbine ontwerpen ontwikkeld (Figuur 2), terwijl systemen zonder turbines vooral nog werden getest (Figuur 3). Er werd aan turbine systemen een stuk meer gewerkt deze systemen al gebruiksklaar waren.



Figuur 2: Voorbeeld van turbine systemen: (a) Free Flow™; (b) Kobold™; (c) Atlantisstrom™; (d) HydroVenturi™; (e) Neo-Aerodynamic™.



Figuur 3: Voorbeelden van systemen zonder een turbine: (a) OCPS™; (b) EEL™; (c) VIVACE™; (d) Seasnail™; (e) Tidal Sails™.

Volgens een recenter overzicht van Ibrahim et al. (2021) bevinden niet-turbine hydrokinetische systemen, zoals flapping foil en flow-induced vibration (FIV) systemen, bevinden zich nog steeds grotendeels in de proof-of-concept-fase. Hoewel deze ontwerpen potentie hebben voor het benutten van energie uit waterstromingen, hebben ze nog niet het niveau van commerciële toepassing bereikt zoals bij op turbine gebaseerde systemen. Turbine ontwerpen blijven het onderzoek en de toepassing van hydrokinetische energie domineren vanwege hun meer geavanceerde ontwikkeling en gereedheid voor implementatie in de echte wereld.

4.2.2 Vergelijking van Horizontale en Verticale Turbine systemen

Bij het vergelijken van opties voor hydrokinetische turbines hebben zowel horizontale als verticale as ontwerpen specifieke technische voordelen en nadelen. Deze factoren zijn van groot belang om effectief te kunnen worden toegepast in rivier- of getijomgevingen (Khan et al., 2013).

Verticale-as-turbines

Verticale-as-turbines, vooral het rechtbladige Darrieus-type, bieden verschillende praktische voordelen:

- **Eenvoudiger ontwerp:** Verticale turbines gebruiken rechte bladen, waardoor ze eenvoudiger en mogelijk goedkoper te produceren zijn in vergelijking met de complexere bladontwerpen van horizontale turbines.
- **Eenvoudige generatorkoppeling:** Bij verticale-as-turbines kan de generator bovenaan de as, boven het wateroppervlak, worden geplaatst. Dit vermindert de noodzaak voor complexe, waterdichte systemen die vaak vereist zijn bij horizontale turbines, waar de generator meestal onder water zit.
- **Behuizing met kanalen:** De cilindrische vorm van verticale turbines maakt het mogelijk om kanalen toe te voegen die de stroomsnelheid rond de bladen verhogen. Dit is minder eenvoudig te realiseren bij horizontale turbines.
- **Lagere geluidsproductie:** Verticale turbines produceren doorgaans minder geluid door minder verlies aan de bladranden, wat de impact op zeeleven kan verminderen.
- **Aanpasbaarheid aan variaties in stroming:** Verticale turbines presteren beter bij variaties in stroomsnelheid binnen een kanaal. Helix- of schuingeplaatste bladen functioneren goed, zelfs wanneer het bovenste deel van de turbine hogere stroomsnelheden ervaart dan het onderste, zoals vaak voorkomt in ondiepe kanalen.

Ondanks hun voordelen hebben verticale-as-turbines ook enkele nadelen:

- **Lager startkoppel:** Verticale-as-turbines hebben vaak externe hulp nodig om te starten, wat hun gebruik complexer kan maken.
- **Ongelijke koppel:** De turbines produceren een ongelijkmatig koppel, wat leidt tot schommelingen in de energie-output en minder consistente prestaties.
- **Lagere efficiëntie:** Vergelijken met horizontale-as-turbines zijn verticale-as-turbines over het algemeen minder efficiënt in het omzetten van waterkracht in energie.
- **Cavities en vermoeidheid:** Door onregelmatige stromingen zijn verticale-as-turbines vatbaarder voor cavities (vorming van dampbellen in water) en structurele vermoeidheid, wat de levensduur van de turbine kan verkorten.

Verticale-as-turbines kunnen in specifieke toepassingen met variabele stromingssnelheden en ruimtebeperkingen voordelen bieden, maar hun lagere efficiëntie en mechanische beperkingen maken ze minder geschikt voor toepassingen waar maximale energie-output vereist is.

Horizontale-as-turbines

Horizontale-as-turbines bieden ook specifieke voordelen, met name op het gebied van efficiëntie en controle:

- **Uitgebreide kennisbasis:** Er is veel onderzoek en praktische kennis beschikbaar over horizontale-as-turbines, met name vanuit toepassingen in wind- en getijdenenergie. Deze ervaring ondersteunt beter ontwerp en grootschalige toepassingen.
- **Hoge prestaties:** Horizontale turbines hebben taps toelopende en gedraaide bladen die liftkrachten gelijkmatig verdelen, waardoor ze zichzelf kunnen starten. Ze presteren optimaal bij hogere snelheden, wat het eenvoudiger maakt om ze te koppelen aan generatoren en de noodzaak voor complexe tandwielsystemen vermindert.
- **Controlemogelijkheden:** Horizontale turbines profiteren van goed ontwikkelde regelmethoden, zoals pitch control, waarmee de snelheid nauwkeurig kan worden gereguleerd en efficiënte werking wordt bevorderd. Deze controle kan ook schade door een te hoge snelheid voorkomen.
- **Stroomversterking met kanalen:** Horizontale-as-turbines kunnen gebruik maken van ringvormige kanalen, die de waterstroom door de turbine helpen vergroten. Dit soort stroomconcentratie is niet haalbaar bij verticale-asontwerpen.

Hoewel horizontale-as-turbines veel voordelen bieden, hebben ze ook enkele nadelen:

- **Complexe bladvorm:** De bladen hebben een complex ontwerp en vereisen nauwkeurige engineering.
- **Onderwatergeneratoren en -bekabeling:** De plaatsing van generatoren onder water en de vereiste bekabeling voegen complexiteit en kosten toe, aangezien deze componenten waterdicht moeten zijn.

4.2.3 Conclusie: Beste Hydrokinetisch Systeem voor Maassluis

Na een grondige evaluatie van hydrokinetische energieconversiesystemen, zoals horizontale-as turbines, is geconcludeerd dat deze methode niet geschikt is voor implementatie in Maassluis. Hoewel deze technologie een hoge energieconversie-efficiëntie biedt en wereldwijd succesvol is toegepast, wegen de nadelen zwaarder binnen de context van dit project.

De belangrijkste redenen voor deze conclusie zijn de hoge initiële kosten en de complexiteit van de installatie. Het implementeren van dergelijke systemen vereist aanzienlijke investeringen in gespecialiseerde infrastructuur en waterdichte technologieën, wat de financiële haalbaarheid beperkt. Bovendien brengt de aanleg van deze systemen complexe vergunningstrajecten met zich mee vanwege de potentiële impact op de rivieromgeving en strenge wet- en regelgeving. Dit zou niet alleen de kosten verhogen, maar ook de implementatietijd aanzienlijk verlengen.

Op basis van deze factoren is besloten dat hydrokinetische energieopwekking op dit moment niet de meest geschikte keuze is voor de duurzame energievoorziening in Maassluis. Het blijft echter een technologie met potentie voor toekomstige toepassing, wanneer financiële en juridische barrières zijn verminderd en de implementatie eenvoudiger kan worden gerealiseerd.

4.3 Windenergie op kleine schaal

Kleinschalige windturbines onderscheiden zich van grootschalige windturbines door een kleinere rotordiameter (3-10 meter) en een vermogen van 1,4 tot 20 kW. Deze turbines worden vaak gebruikt voor huishoudelijke en kleinschalige commerciële toepassingen, met name op locaties met beperkte ruimte of een variabele windrichting. Ze kunnen worden ingezet als aanvulling op bestaande energiebronnen (Tummala et al., 2016).

4.3.1 Soorten kleinschalige windturbines

Kleinschalige windturbines kunnen worden ingedeeld op basis van de rotatie-as en het werkingsprincipe, zoals beschreven door Tummala et al. (2016) en Al-Rawajfeh en Gomaa (2023):

Horizontale-as windturbines (HAWTs)

Bij horizontale-as windturbines is de rotor-as horizontaal en draait deze met behulp van liftkrachten. Deze turbines zijn efficiënt en zelfstartend, maar vereisen een mechanisme om naar de wind te richten. HAWTs zijn geschikt voor open locaties met constante windstroom, zoals de rand van Maassluis. Het rendement van dit type ligt rond de 50-60% (Tummala et al., 2016). Echter, door hun grotere omvang en afhankelijkheid van windrichting zijn ze minder geschikt voor stedelijke gebieden. Daarnaast genereren HAWTs meer geluid door hogere rotatiesnelheden, wat nadelig kan zijn in een stedelijke omgeving (Al-Rawajfeh & Gomaa, 2023).

Verticale-as windturbines (VAWTs)

Verticale-as windturbines hebben een verticale rotor-as, waardoor ze minder gevoelig zijn voor de windrichting. Deze turbines zijn compacter, gemakkelijker te onderhouden en produceren minder geluid dan horizontale-as turbines. Dit maakt ze ideaal voor stedelijke gebieden met variabele windrichtingen, zoals het centrum van Maassluis (Al-Rawajfeh & Gomaa, 2023). VAWTs hebben een rendement van ongeveer 70% en nemen minder ruimte in beslag dan hun horizontale tegenhangers, wat ze aantrekkelijk maakt voor toepassingen in dichtbevolkte gebieden (Tummala et al., 2016).

Savonius-turbines

Savonius-turbines maken gebruik van drag-krachten en hebben een eenvoudig, S-vormig ontwerp. Door hun eenvoudige constructie zijn ze geschikt voor locaties met lage windsnelheden en kleinschalige toepassingen, zoals waterpompen. In Maassluis zouden Savonius-turbines kunnen worden ingezet voor industriële of recreatieve doeleinden. Het rendement is lager dan dat van lift-gebaseerde turbines, maar ze zijn gemakkelijk te onderhouden (Tummala et al., 2016).

Darrieus-turbines

Darrieus-turbines, een type VAWT, werken op basis van liftkrachten en hebben gebogen of rechte bladen. Deze turbines hebben een hoger rendement en kunnen worden geoptimaliseerd met technologieën zoals variabele bladhoekinstellingen. Ze zijn geschikt voor stedelijke gebieden waar windrichtingen vaak veranderen. Darrieus-turbines

genereren ook minder geluid dan HAWTs, wat een voordeel is in stedelijke omgevingen (AlRawajfeh & Gomaa, 2023).

4.3.2 Beste toepassing in Maassluis

De Darrieus-turbines, een type verticale-as windturbine (VAWT), wordt beschouwd als de meest geschikte oplossing voor kleinschalige windenergie in stedelijke gebieden zoals Maassluis. Door hun compacte ontwerp en verticale as nemen ze weinig ruimte in beslag en kunnen ze eenvoudig worden geïntegreerd in bestaande infrastructuren, zoals daken van commerciële gebouwen. Ze functioneren goed bij variabele windrichtingen, wat belangrijk is in stedelijke omgevingen met obstakels zoals gebouwen. Daarnaast genereren ze minder geluid dan horizontale-as turbines, wat bijdraagt aan een prettigere leefomgeving voor bewoners en bezoekers. Hoewel het rendement van Darrieus-turbines iets lager kan zijn dan dat van horizontale-as turbines in open gebieden, bieden ze in stedelijke contexten aanzienlijk hogere efficiëntie dan Savonius-turbines. Door hun eenvoudige ontwerp en onderhoudsgemak zijn de operationele kosten lager, en technologische optimalisaties, zoals variabele bladhoekinstellingen, kunnen hun prestaties verder verbeteren.

4.4 Zonne-energie

Zonne-energie, opgewekt door straling van de zon, is een duurzame en hernieuwbare energiebron die een essentiële rol kan spelen in de energietransitie van Maassluis. In het kader van het project om de haven van Maassluis zelfvoorzienend te maken, biedt zonne-energie een aantrekkelijke oplossing. Met een constante beschikbaarheid en lage operationele kosten is zonne-energie ideaal om het energieverbruik van zowel commerciële gebouwen als de hotelvoorzieningen in de haven te verduurzamen (Khatib et al., 2012; Shaikh et al., 2017).

4.4.1 Toepassing in Maassluis

Binnen het Maassluis-project kan zonne-energie worden toegepast via de installatie van zonnepanelen op daken van bestaande gebouwen, zoals het hotel en de commerciële panden, en op vrijstaande infrastructuren binnen de haven. Deze panelen kunnen het huidige energieverbruik van faciliteiten, zoals walstroomvoorzieningen en haven gerelateerde activiteiten, ondersteunen en in de toekomst voorzien in de stijgende energievraag door de elektrificatie van schepen.

Daarnaast kunnen seizoensgebonden schommelingen in energiebehoefte – bijvoorbeeld door hogere activiteit in de zomer – deels worden opgevangen door batterijsystemen in combinatie met zonnepanelen. Dit maakt zonne-energie een flexibele en schaalbare oplossing voor het project.

4.4.2 Voordelen van Zonne-energie in de Haven

Het gebruik van zonne-energie binnen de haven van Maassluis biedt meerdere voordelen:

- **Duurzaamheid:** Het verlaagt de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en vermindert de CO₂-uitstoot.
- **Economisch rendabel:** Na de initiële investeringskosten zijn de operationele kosten laag.
- **Ruimte-efficiëntie:** Zonnepanelen kunnen worden geïnstalleerd op reeds bestaande structuren, zoals daken en vrije gebieden langs de kades.
- **Seizoensgebonden opslag:** Energie die in de zomer wordt opgewekt, kan worden opgeslagen in batterijen of worden gebruikt om alternatieve brandstoffen zoals waterstof te produceren (Shaikh et al., 2017).

4.4.3 Conclusie

Zonne-energie biedt een duurzame en flexibele oplossing voor het Maassluis-project. Door strategische plaatsing van zonnepanelen en de integratie met andere technologieën, zoals batterijen of waterstofopslag, kan zonne-energie bijdragen aan een zelfvoorzienende haven. Deze technologie sluit niet alleen aan bij de huidige energievraag, maar biedt ook een robuust platform voor toekomstige ontwikkelingen, zoals de elektrificatie van de scheepvaart.

5 Oppervlakteanalyse voor zonne- en windenergie

In dit hoofdstuk wordt er een analyse gemaakt voor de ruimte beschikbare ruimte bij het gebruik van zonnepanelen en windwokkels voor energieopwekking binnen het havengebied van Maassluis. Ten eerste wordt in hoofdstuk 5.1 de beschikbare ruimte op de daken van de loodsen, terminals en andere gebouwen bepaald met satellietbeelden van het havengebied. Vervolgens wordt er in hoofdstuk 5.2 gekeken naar het verschil in geschiktheid van platte en schuine daken voor de plaatsing van zowel zonnepanelen als windwokkels. Hierna wordt in hoofdstuk. Tot slot zal er in hoofdstuk 5.3 worden gekeken naar de beperkingen en regelgeving dat komt kijken bij de plaatsing van zonnepanelen en windwokkels.

5.1 Beschikbare dakoppervlak

Om een nauwkeurige schatting te krijgen van het bruikbare dakoppervlak wordt er gebruik gemaakt van een luchtfoto van het havengebied aan de Govert van Wijnkade. Deze foto is verkregen door een schermopname te maken uit Google Earth (Google, 2024). Hierin zijn de verschillende daken genummerd zoals te zien in Figuur 4. Via de afstand meten functie in Google Earth worden de lengtes en breedtes van de genummerde delen bepaald. Deze waarden zijn met elkaar vermenigvuldigt om het oppervlak van de daken te krijgen. Vervolgens wordt van de niet bruikbare gedeeltes de oppervlakte bepaald, deze zijn geel omlijnd in Figuur 4. Deze oppervlakte wordt van het eerder bepaalde totale dakoppervlak afgehaald om zo een netto bruikbaar dakoppervlak te krijgen. Op de plattegrond het nummer 12 te vinden terwijl hier geen dak staat. Dit komt omdat de luchtfoto's uit Google Earth uit 2022 komen. Intussen is hier wel een dakoppervlak dat ook gebruikt kan worden. Voor de afmetingen hiervan wordt een schatting gedaan.



Figuur 4: Plattegrond Govert van Wijnkade (Google,2024).

Dak nummer	Lengte (m) (x-as)	Breedte (m) (y-as)	Onbruikbare stukken (m ²)	Totale oppervlakte (m ²)
1	60	49	0	2940
2	46,5	27	230	1025,5
3	22	23,5	0	517
4	12,5	26	0	325
5	27	22	0	594
6	29	26,5	70	698,5
7	20	22	50	390
8	21	19	100	299
9	20	10	0	200
10	21	10	0	210
11	22	5	0	110
12	52	30	0	1560

Tabel 6: Afmetingen en oppervlakten per dak

5.2 Soorten daken in het gebied

Bij de plaatsing van zonnepanelen en windwokkels is naast de beschikbare ruimte ook het type dak een belangrijke factor. In deze paragraaf zullen de voor- en nadelen van zowel platte daken als schuine daken worden belicht. Dit wordt gedaan voor zowel de zonnepanelen als de windwokkels.

Platte Daken

Platte daken zijn over het algemeen erg geschikt voor de installatie van zonnepanelen en windwokkels. Deze daken zijn flexibel bij het plaatsen en oriënteren van de zonnepanelen waardoor deze zo efficiënt mogelijk gebruikt kunnen worden. De zonnepanelen kunnen namelijk onder een hoek worden gemonteerd waarmee rekening wordt gehouden met de zonshoek. Hiermee kan de hoeveelheid schaduw tussen de panelen worden geminimaliseerd. De platte daken kunnen ook gebruikt worden voor de plaatsing van windwokkels, hier is echter wel voldoende ruimte voor nodig. Ook moet de structurele draagkracht van de daken voldoende zijn. (1komma5, 2024).

Schuine Daken

Over het algemeen zijn schuine daken iets beperkter in het plaatsen van zonnepanelen. De oriëntatie en hellingshoek van zonnepanelen spelen een belangrijke rol in de efficiëntie. Bij schuine daken is dit niet vrij te bepalen en zullen de zonnepanelen minder efficiënt

geplaats worden in vergelijking met platte daken. Omdat in Nederland de zon gericht is naar het zuiden zullen de daken die richting het zuiden zijn georiënteerd efficiënter zonne-energie opwekken dan de daken die anders zijn georiënteerd zoals te zien in Figuur 5. Daarnaast is de plaatsing van windwokkels op schuine daken ook beperkter in vergelijking met platte daken. Dit komt omdat bij schuine daken het erg lastig is om de windwokkels stabiel te kunnen plaatsen. Hierdoor kunnen er ook meer veiligheidsproblemen optreden. (1komma5, 2024).

Hellingshoek		Oriëntatie van het dak											
		Oosten			Zuiden						Westen		
		-90	-75	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	75
90	56	60	64	67	69	71	71	71	71	69	65	62	58
80	63	68	72	75	77	79	80	80	79	77	74	69	65
70	69	74	78	82	85	86	87	87	86	84	80	76	70
60	74	79	84	87	90	91	93	93	92	89	86	81	76
50	78	84	88	92	95	96	97	97	96	93	89	85	80
40	82	86	90	95	97	99	100	99	98	96	92	88	84
30	86	89	93	96	98	99	100	100	98	96	94	90	86
20	87	90	93	96	97	98	98	98	97	96	94	91	88
10	89	91	92	94	95	95	96	95	95	94	93	91	90
0	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90

Figuur 5: Efficiëntie bij verschillende oriëntaties en hellingshoeken van zonnepanelen

5.3 Ruimtelijke beperkingen en regelgeving

Om alle beperkingen te kunnen hanteren zal er naar verschillende wetten en eisen gekeken worden. Dit zijn wetten opgelegd door de overheid of de Rijkswaterstaat, maar ook eisen van bijvoorbeeld de gemeente van Maassluis of het havengebied van Rotterdam.

5.3.1 Geluidhinder

Bij het gebruik van de windmolens zal er uiteraard geluid ontstaan, hiervoor zijn regels opgesteld door de overheid. In deze wet zijn geluidsgrenzen opgesteld voor verschillende gebieden. Voor havengebieden geldt dat de maximale hoeveelheid uitgestoten geluid uit de installaties 60 DB is. (Rijksoverheid, 2017).

5.3.2 Omgevingswet

De maximale hoogte van de windmolens op de daken binnen het havengebied wordt bepaald in de omgevingswet. Deze begrenzing kan worden gemaakt voor de veiligheid van het luchtvaartverkeer en hiervoor de visuele hinder te verminderen. Ook zal bij het verkrijgen van een omgevingsvergunning rekening gehouden moeten worden met de impact op het landschap en schaduw. (Rijksoverheid, 2024).

5.3.3 Bouwbesluit 2012

Volgens het bouwbesluit 2012 gelden er regels voor de installatie van zonnepanelen op daken. Er wordt geëist dat de installaties veilig zijn en bestand zijn tegen weersomstandigheden. In het bouwbesluit worden de draagkrachtvereisten, onderhoudspunten en de brandveiligheid die nodig zijn voor veilig gebruik en installatie beschreven. (Rijksoverheid, 2012) Dit besluit zal geen invloed hebben op de locatie waar de installaties worden geplaatst.

5.3.4 Omgevingsvisie Maassluis

Voor het behoud van het historisch karakter van Maassluis en de haven kunnen er eisen worden opgesteld door de gemeente. Windmolens lager dan 5 meter mogen zonder omgevingsvergunning geplaatst worden. Dit is niet het geval omdat de windmolens op de daken komen te staan. Om te bepalen wat de maximale hoogte is zal de gemeente van Maassluis gecontacteerd moeten worden. (Denk Mee Maassluis, 2023)

5.3.5 Binnenvaartpolitiereglement

In het binnenvaartpolitiereglement wordt beschreven dat bij duurzame installaties rekening gehouden moet worden met de veiligheid van de scheepsvaart en het vrijhouden van de navigatieruimte. In dit geval zal dit reglement geen beperkingen opleggen omdat zowel de zonnepanelen als de windmolens op de daken van de gebouwen worden geplaatst en dus geen hinder veroorzaken bij de doorgang van schepen. (Rijksoverheid, 2017)

6 Vergelijking van wind en zonne-energie

De overgang naar hernieuwbare energiebronnen speelt een cruciale rol bij het verduurzamen van zeehavens, die een belangrijke schakel vormen in de mondiale logistiek. Havens hebben een groot energieverbruik, wat betekent dat de transitie naar duurzame energie aanzienlijke voordelen kan opleveren in termen van kostenbesparing en het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen. In hoofdstuk 6.1 wordt een vergelijking gemaakt tussen de opwekkingscapaciteit van zonnepanelen en windturbines op het gebied van opwekkingscapaciteit. Vervolgens wordt in hoofdstuk 6.2 de efficiëntie per vierkante meter bepaald. Tot slot zal hoofdstuk 6.3 de voor- en nadelen van een hybride model belichten.

6.1 Opwekkingscapaciteit van Zonnepanelen versus Windturbines

De opwekkingscapaciteit van zonnepanelen en windturbines in een havenomgeving wordt sterk beïnvloed door geografische factoren, zoals de intensiteit van de zonnestraling en de lokale windomstandigheden.

- **Zonnepanelen:** Zonnepanelen zijn geschikt voor gebruik in havengebieden vanwege de beschikbaarheid van grote dakoppervlakken van magazijnen en terminals. In havengebieden kan de jaarlijkse energieproductie van zonnepanelen rond de 150 kWh per m², afhankelijk van de locatie, plaatsingshoek en kwaliteit van de panelen. (*Yield of solar panels, the 10 factors that influence*, 2022)
- **Windturbines:** Windturbines in havengebieden, zoals de kleine Ayanz-windturbine, hebben een opwekkingscapaciteit die sterk afhankelijk is van de windsnelheid en de consistentie van de wind. In kustgebieden zoals de haven van Alexandrië kan een windturbine jaarlijks tussen de 1.500 en 3.000 kWh opwekken, afhankelijk van de lokale windomstandigheden (Assessment of Renewable Energy Supply for Green Ports, 2020). Kusthavens zijn vaak ideaal voor windenergie, omdat de wind in deze gebieden doorgaans constanter is.

Vergelijkingen tonen aan dat windturbines doorgaans meer energie per eenheid kunnen opwekken dan zonnepanelen, maar zonnepanelen leveren een meer consistente opbrengst in gebieden waar de wind onvoorspelbaar is.

6.2 Efficiëntie per Vierkante Meter

De efficiëntie per vierkante meter is een belangrijke factor in de keuze tussen zonnepanelen en windturbines, vooral in havengebieden waar de beschikbare ruimte vaak beperkt is.

- **Zonnepanelen:** Gemiddeld produceren zonnepanelen in havengebieden tussen de 150 en 250 kWh per m² per jaar. Een groot voordeel van zonnepanelen is dat ze op bestaande infrastructuur kunnen worden geïnstalleerd, zoals op daken van magazijnen en kantoren, waardoor geen extra grondoppervlak wordt benut (Assessment of Renewable Energy Supply for Green Ports, 2020).
- **Windturbines:** De energie-efficiëntie per vierkante meter voor grote windturbines is vaak lager dan die van zonnepanelen, vooral vanwege de grote afstand die tussen de turbines moet worden aangehouden om windschaduw te voorkomen. In de haven van Alexandrië moest bijvoorbeeld een minimale afstand worden aangehouden tussen de turbines om de energieopbrengst te optimaliseren (Assessment of Renewable Energy Supply for Green Ports, 2020). Voor kleine windturbines zijn dergelijke resultaten nog lastig te vinden, mede door de vele verschillende soorten kleinschalige turbines. Over de plaatsing van kleine windturbines is wel het een en ander te zeggen. Gebieden met weinig luchtstroom en hoge turbulentie zijn bijvoorbeeld probleemgebieden voor kleine windturbines (Tummala, Velamati, Sinha, Indrajaya, & Krishna, 2016). Kleine windturbines genereren alsnog een relatief hoge opbrengst met een klein oppervlak. Dit maakt de energie-efficiëntie per vierkante meter groter dan dat van zonnepanelen. Over tussenafstanden van deze kleine turbines is echter weinig bekend. Voor de optimale opbrengst kan het zo zijn dat de energie-efficiëntie per vierkante meter een stuk lager uitkomt dan gehoopt. Wel kan deze ‘lege’ ruimte bijvoorbeeld opgevuld worden met zonnepanelen.

In termen van efficiëntie per vierkante meter bieden zonnepanelen een voordeel in gebieden met beperkte ruimte, turbulente luchtstromen of weinig wind, terwijl windturbines hogere opbrengsten kunnen genereren in gebieden met constante en krachtige wind. Het combineren van beide technologieën kan de afhankelijkheid van specifieke weersomstandigheden verminderen en de energie-efficiëntie per vierkante meter vergroten.

6.3 Combineren van Zonne- en Windenergie: Hybride Model

Het combineren van zonne- en windenergie in een hybride systeem biedt voordelen voor de betrouwbaarheid en stabiliteit van de energievoorziening.

- **Complementariteit van Zonne- en Windenergie:** Een hybride systeem waarin zowel zonnepanelen als windturbines worden gecombineerd, kan een stabielere energievoorziening opleveren doordat de technologieën elkaar aanvullen. Zonnepanelen produceren vooral overdag en in de zomermaanden veel energie, terwijl windturbines vaak 's nachts en in de winter efficiënter zijn (A Novel Proposal of Using Solar Panels Mounted on Wind Turbines, 2024). Dit kan zorgen voor een constantere energietoevoer, wat belangrijk is voor havenactiviteiten die dag en nacht doorgaan. Ook ontstaan er vaak lege ruimtes tussen windturbines die opgevuld kunnen worden met zonnepanelen, hierdoor wordt de beschikbare ruimte efficiënter ingedeeld.
- **Voordelen en Uitdagingen:** Door zonne- en windenergie te combineren, kan het energieverbruik van havens beter worden gedekt zonder afhankelijkheid van één specifieke energiebron. Dit leidt tot een meer betrouwbare energievoorziening, met name tijdens piekmomenten van vraag. Hoewel een hybride systeem voordelen biedt in termen van stabiliteit, zijn de initiële kosten hoger dan bij het gebruik van één enkele energiebron. Bovendien brengt de integratie van zonnepanelen en windturbines complexiteit met zich mee, zoals de noodzaak voor energieopslag om fluctuaties op te vangen (Hybrid Renewable Energy System Optimum Design, 2021).

6.4 Conclusie

Bij de vergelijking van zonnepanelen en windturbines voor de opwekking van hernieuwbare energie in havenomgevingen blijkt dat beide technologieën unieke voordelen bieden. Zonnepanelen zijn efficiënter qua ruimtegebruik en hebben lagere initiële kosten, terwijl windturbines een grotere energieopbrengst kunnen leveren in gebieden met constante wind. Een hybride model biedt de beste oplossing voor een stabiele en betrouwbare energievoorziening, door de sterke punten van beide technologieën te benutten en hun zwaktes te compenseren. Voor havens die streven naar verduurzaming, lijkt een gecombineerde benadering met zonne- en windenergie de meest veelbelovende optie te zijn.

7 Opslag van de opgewekte energie: Natrium-ion batterijen versus Lithium-ion batterijen

Dit hoofdstuk zal de verschillende batterijen behandelen maar vooral Natrium-ion batterijen. Dit is omdat de gemeente Maassluis heeft aangegeven te willen investeren in deze soort batterij. In hoofdstuk 7.1 wordt de werking van de Natrium-ion batterijen uitgelegd. Vervolgens worden deze batterijen in hoofdstuk 7.2 vergeleken met andere opslagtechnologieën. Hierna worden in hoofdstuk 7.3 de technische specificaties en kosten bepaald. In hoofdstuk 7.4 worden de capaciteitseisen van de haven van Maassluis gegeven. Tot slot wordt er in hoofdstuk 7.5 een conclusie gegeven.

7.1 Werking van Natrium-ion batterijen

Zeezoutbatterijen, een type natrium-ionbatterij, werken via een "rocking chair"-mechanisme waarin natrium-ionen tussen de anode en kathode bewegen tijdens laad- en ontladcycli. Ze maken gebruik van natrium, dat overvloedig en goedkoop is, en worden vaak beschouwd als een veelbelovend alternatief voor lithium-ionbatterijen. Zeewater kan als bron van natrium dienen, wat de productie milieuvriendelijker en economischer maakt. Dit draagt bij aan een lagere afhankelijkheid van zeldzame aardmetalen, zoals lithium en kobalt (Nurohmah et al., 2022; Yu et al., 2023).

Voordelen:

- Goedkoop en duurzaam door het gebruik van natrium uit zeewater.
- Betere veiligheid dan lithium-ionbatterijen door minder reactieve materialen.
- Milieuvriendelijk door gebruik van overvloedige grondstoffen.

Nadelen:

- Lagere energiedichtheid dan lithium-ionbatterijen.
- Technologie is nog in ontwikkeling, wat grootschalige toepassing beperkt.

7.2 Vergelijking met Andere Opslagtechnologieën

Lithium-ionbatterijen zijn toonaangevend vanwege hun hoge energiedichtheid en lange levensduur. Ze zijn echter duurder door de schaarste van lithium en hebben een grotere milieubelasting. **Flowbatterijen**, zoals vanadium redox, bieden schaalbare opslag en een lange levensduur, maar hebben een lagere efficiëntie en hogere kosten. **Waterstofopslag** is geschikt voor langdurige opslag en heeft een hoog potentieel voor duurzame toepassingen, maar is minder efficiënt door energieverliezen tijdens conversie (Yu et al.,

2023). Zeezoutbatterijen bieden een middenweg door lagere kosten, verbeterde veiligheid en een milieuvriendelijk profiel. Hun beperkingen liggen echter in een lagere energiedichtheid en een minder ontwikkeld industrieel ecosysteem.

7.3 Technische specificaties en kosten

Natrium-ionbatterijen (SIB's) worden steeds meer gezien als een haalbaar alternatief voor lithium-ionbatterijen vanwege hun technische voordelen en lagere kosten. De specificaties van SIB's zijn afhankelijk van de gebruikte materialen en ontwerpstrategieën. Hieronder staan enkele belangrijke technische kenmerken:

1. **Energiedichtheid:** De energiedichtheid van SIB's ligt momenteel rond de 100-150 Wh/kg, iets lager dan die van lithium-ionbatterijen, die 150-250 Wh/kg kunnen bereiken. De ontwikkeling van betere kathode- en anodematerialen, zoals gelaagde overgangsmetaaloxiden en harde koolstof, draagt bij aan verbeteringen in energiedichtheid (Yu et al., 2023).
2. **Levensduur:** SIB's hebben doorgaans een levensduur van 2000-3000 laadcycli, maar met technologische verbeteringen kan dit oplopen tot meer dan 10.000 cycli. Dit maakt ze geschikt voor stationaire energieopslag, waar duurzaamheid essentieel is (Yu et al., 2023).
3. **Laadtijd en Efficiëntie:** Ze bieden een hoge laad- en ontlaad efficiëntie (boven 90%) en zijn relatief ongevoelig voor temperatuurvariaties, wat ze aantrekkelijk maakt voor toepassingen in koude klimaten (Nurohmah et al., 2022).
4. **Materialen:** SIB's maken gebruik van overvloedige materialen zoals natrium uit zeewater, wat de productie goedkoper en duurzamer maakt in vergelijking met lithium-ionbatterijen, die afhankelijk zijn van zeldzame metalen zoals lithium en kobalt.

Kostenanalyse

Een van de grootste voordelen van natrium-ionbatterijen is de potentiële kostenbesparing. Natrium is veel overvloediger en goedkoper dan lithium, wat leidt tot een aanzienlijke vermindering van de materiaalkosten. Het gebruik van natriumchloride (keukenzout) als grondstof voor elektrodematerialen kan de productiekosten tot wel 16,66% verlagen in vergelijking met conventionele methoden (Nurohmah et al., 2022).

7.4 Capaciteitseisen voor Maassluis

Voor het havengebied van Maassluis, waar schommelingen in hernieuwbare energieopwekking optreden, zijn betrouwbare energieopslagoplossingen essentieel. Zeebatterijen kunnen bijdragen aan het balanceren van vraag en aanbod, vooral tijdens piekuren of wanneer hernieuwbare bronnen beperkt zijn. De benodigde opslagcapaciteit kan variëren en moet worden afgestemd op de specifieke energiebehoeften van het gebied. Een combinatie met andere opslagtechnologieën kan helpen om een robuuste en veerkrachtige energie-infrastructuur te creëren (Nurohmah et al., 2022; Yu et al., 2023).

In Maassluis is er nu al 30 m³ aan ruimte beschikbaar voor de SIB, als je dit volume omrekening naar capaciteit krijg je de volgende tabel:

Hoeveelheid	Eenheid
30	m ³
30	Wh/kg
1025	kg/m ³
922.5	kWh

Tabel 7: Berekening mogelijke capaciteit zeezoutbatterij Maassluis

7.5 Beste soort energieopslag voor Maassluis

Zeezoutbatterijen bieden een veelbelovend alternatief voor conventionele opslagtechnologieën, vooral vanwege hun lage kosten, veiligheid en duurzaamheid. Hoewel de technologie nog in ontwikkeling is, kunnen ze een belangrijke rol spelen in de energietransitie van Maassluis. Door ze te combineren met andere opslagoplossingen kan een optimale balans worden bereikt tussen kosten, efficiëntie en capaciteit.

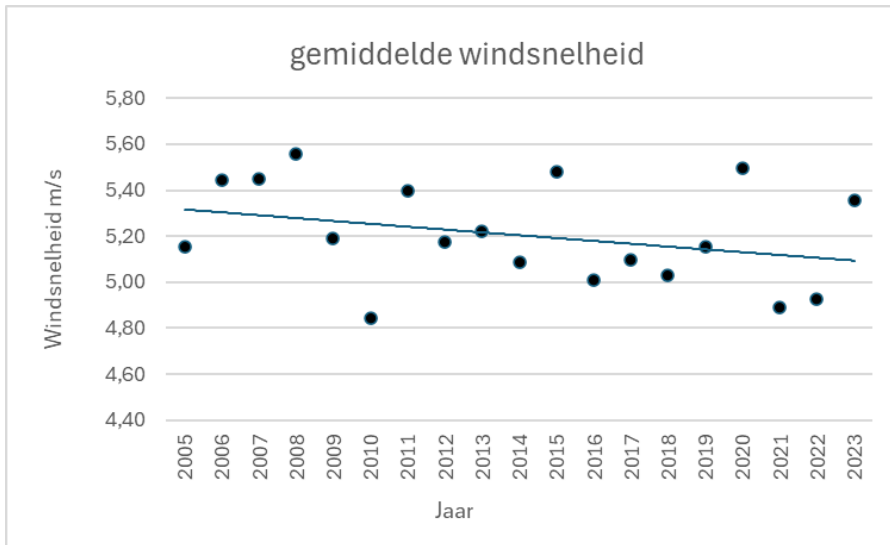
8 Wind- en zonneanalyse

Om te bepalen hoeveel zonnepanelen en windwokkels er geplaatst moeten worden om Maassluis volledig te kunnen voorzien van groene energie, is het belangrijk om te bepalen hoeveel deze opleveren in de weersomstandigheden in Nederland. Om dit te bepalen wordt data van de windrichting, windsnelheid en zonintensiteit in Maassluis geanalyseerd. In hoofdstuk 8.1 wordt een analyse gemaakt van de windrichting en windsnelheid. Vervolgens wordt in hoofdstuk 8.2 een analyse van de zonintensiteit gegeven.

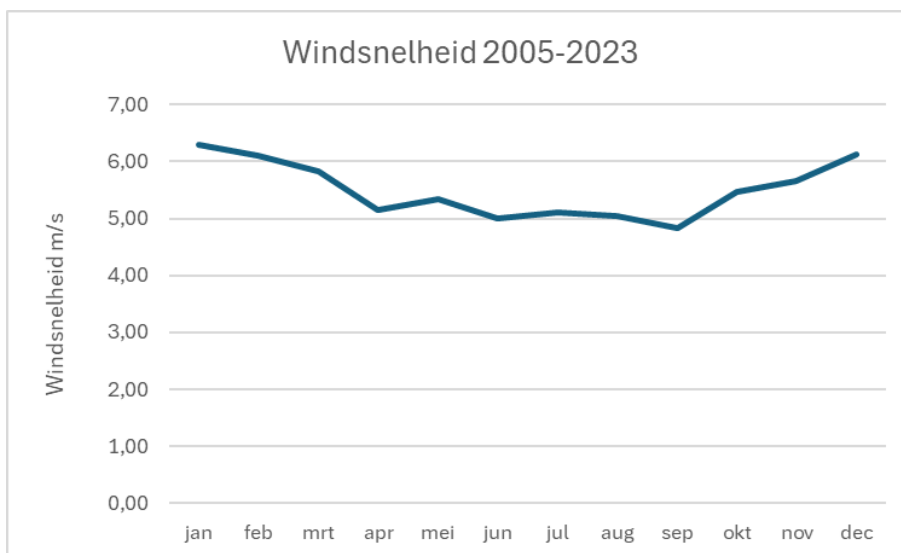
8.1 Windrichting en Windsnelheid

Voor de analyse van de windomstandigheden in de haven van Maassluis is gebruik gemaakt van gegevens van het KNMI. Aangezien Maassluis zelf geen weerstation heeft, zijn de gegevens van het dichtstbijzijnde weerstation, Rotterdam Geulhaven, gebruikt. Dit weerstation levert vergelijkbare data voor de wind in de regio Maassluis. De gemiddelde windrichting en windsnelheid wordt bepaald door middel van de gemiddelde dagwaarden van 1 januari 2005 tot 31 december 2023. Deze dagwaarden zijn beschikbaar gesteld door het KNMI (KNMI,2025).

Van alle dagwaarden is een gemiddelde berekend om zo een gemiddelde te verkrijgen van al deze jaren. De vectorgemiddelde windrichting is 198,51 graden, dit komt overeen met een windrichting uit het zuid-zuidwesten. De vectorgemiddelde windsnelheid is de gemiddelde windsnelheid in de eerder bepaalde specifieke richting en heeft een waarde van 4,651 m/s. De etmaalgemiddelde windsnelheid is de gemiddelde windsnelheid waar niet wordt gekeken in slechts een specifieke richting, deze windsnelheid is 5,298 m/s. Deze gegevens geven een goede indicatie van de windcondities in de haven van Maassluis en zijn nuttig bij het bepalen van de energieopbrengst wanneer windwokkels worden gebruikt. Naast de gemiddelde waarden zijn ook de maandelijkse en jaarlijkse gemiddelde waarden geanalyseerd. Dit wordt gedaan om trends te vinden. De gemiddelde windsnelheid per jaar van de afgelopen 19 jaar is te vinden in Figuur 6 Hier is een jaarlijkse afname te zien, maar omdat de richtingscoëfficiënt erg laag is en de spreiding van de waarden erg hoog. Is er aangenomen dat de jaarlijks gemiddelde windsnelheid niet zal veranderen de komende jaren. De gemiddelde maandelijkse windsnelheden zijn te vinden in Figuur 7. Hier is duidelijk te zien dat in de herfst en winter er hogere windsnelheden zijn dan in de lente en zomer.



Figuur 6: Gemiddelde windsnelheid per jaar van 2005-2023

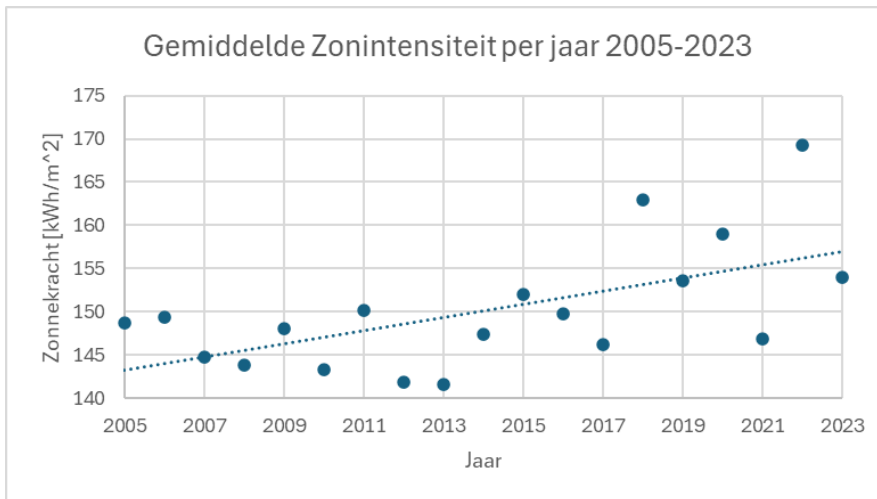


Figuur 7: Gemiddelde windsnelheid per maand van 2005-2023

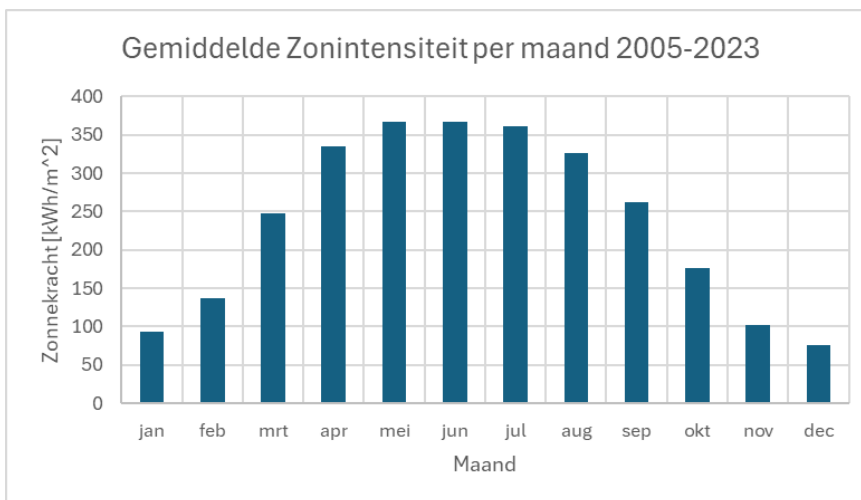
8.2 Zonintensiteit

Voor de bepaling van de hoeveelheid energie die de zonnepanelen kunnen opleveren op de daken in de haven van Maassluis wordt gebruik gemaakt van de PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS) tool van de Europese Commissie (European Commission, Joint Research Centre, 2025). In deze interactieve tool wordt informatie gegeven over de hoeveelheid energie dat de zon levert op een specifieke locatie op aarde.

Allereerst wordt de haven van Maassluis geselecteerd, vervolgens wordt de oriëntatie van de zonnepanelen ingevoerd. Dit is zowel het azimut (richting) als de hellingshoek. Het azimut is 0° dit betekent dat de zonnepanelen gericht zijn op het zuiden. De hoek is 35° dit is de optimale hellingshoek voor zonnepanelen in Nederland (Solarconcept, 2024). Het systeem berekent aan de hand van de ingevoerde waarden de gemiddelde energie dat de zon levert op deze locatie per uur van 1 januari 2005 tot en met 31 december 2023. Van deze data is net als met de windsnelheden ook een gemiddelde per jaar berekend en hiervan een lineaire trendlijn gemaakt, die te zien is in Figuur 8. Met behulp van deze trendlijn met formule $y = 0,7609x - 1382,3$ kan de toename in zonintensiteit per jaar worden berekend. Deze toename bedraagt 0.528% per jaar. Ook is er een grafiek gemaakt van de gemiddelde maandelijkse waarden over de gehele 19 jaar, genaamd Figuur 9. Hieruit is duidelijk geworden dat er een parabolisch verloop is en de zonneopbrengst het hoogst is in de zomermaanden.



Figuur 8: Gemiddelde zonintensiteit per jaar van 2005-2023



Figuur 9: Gemiddelde zonintensiteit per maand van 2005-2023

9 CO2 uitstoot

Wanneer hernieuwbare energiemethoden worden ingezet is het van belang om ook te bepalen hoeveel CO₂ er jaarlijks minder wordt uitgestoten. In Hoofdstuk 9.1 wordt een analyse gedaan van het huidige en verwachte toekomstige CO₂ uitstoot van de haven. Vervolgens wordt in hoofdstuk 9.2 de CO₂ uitstoot van verschillende hernieuwbare bronnen bepaald. Tot slot is er in hoofdstuk 9.3 een totale uitstoot vermindering bepaald.

9.1 Huidige en toekomstige CO2 uitstoot

De CO₂-emissiefactor voor elektriciteit in Nederland bedraagt 0,475 kg CO₂ per kWh (CO₂emissiefactoren, 2020). Met behulp van deze factor en het huidige en toekomstig geschatte verbruik kan de hoeveelheid CO₂ uitstoot per scenario berekend worden. Dit wordt als volgt gedaan:

Situatie	Energieverbruik (MWh)	CO ₂ Uitstoot (ton)
Huidig verbruik	18,72	8,89
Huidig verbruik + Elektrificatie verwarming	78,32	37,20
Huidig verbruik + Elektrificatie verwarming + Elektrificatie schepen	1032,2	490.300

Tabel 8: Energie verbruik en CO₂ uitstoot in 3 verschillende scenario's

9.2 CO2 uitstoot hernieuwbare bronnen

Wanneer hernieuwbare energiesystemen worden gebruikt moeten deze ook worden gemaakt. Tijdens het maken van deze energiesystemen wordt ook CO₂ uitgestoten. Deze uitstoot ligt bij zonnepanelen tussen de 20 en 81 gram CO₂ per kWh per jaar. Deze waarde varieert omdat de uitstoot erg verschilt bij verschillende typen zonnepanelen. Omdat er nog geen specifiek type zonnepanelen is vastgesteld in dit onderzoek zal de gemiddelde uitstoot worden gebruikt van 60 gram CO₂ per kWh per jaar. De gemiddelde levensduur van zonnepanelen is 30 jaar (de Wild-Scholten, 2021).

Daarnaast zal ook bij het fabriceren van de windturbines CO₂ worden uitgestoten. Een windturbine van 3.0 MW zal gedurende zijn levensduur van 20 jaar 5530 ton CO₂ uitstoten (Crawford, 2009).

9.3 Uitstoot vermindering verduurzaamde haven

Na het analyseren van de huidige CO₂ uitstoot en de CO₂ uitstoot van de hernieuwbare bronnen kan een jaarlijkse CO₂ uitstoot vermindering worden berekend. Deze vermindering is hieronder weergegeven.

Situatie	Huidige CO ₂ uitstoot (ton)	Verduurzaamde haven CO ₂ uitstoot (ton)	Uitstoot vermindering (%)
Huidig verbruik	8,89	0.30	96.6
Huidig verbruik + Elektrificatie verwarming	37,20	19,10	48.7
Huidig verbruik + Elektrificatie verwarming + Elektrificatie schepen	490,30	45.4	90.74

Tabel 9: Uitstoot vermindering per scenario

Opvallend is dat in scenario 2 een veel lagere vermindering is dan in de andere twee scenario's. Dit is ook logisch omdat de uiteindelijke energieproductie in verhouding tot de benodigde energieproductie veel hoger ligt vergeleken met scenario 1 en 3. Deze situatie lijkt veel minder goed wat betreft CO₂ uitstoot reductie, maar dit is niet het geval. Omdat de over geproduceerde duurzame energie verkocht kan worden zal dit alsnog gebruikt worden.

10 Model

Met de kennis die is verzameld over de behoeften van Maassluis en het verzamelen van weersgegevens kan een model worden geconstrueerd. Het belangrijkste doel van het model is het leveren van de beste en meest kosteneffectieve oplossing voor het leveren van de meeste hernieuwbare energie aan de haven van Maassluis. In hoofdstuk 10.1 wordt het doel van het model uitgelegd. Vervolgens worden in hoofdstuk 10.2 de invoerparameters en de werkwijze van het model belicht. Hierna worden in hoofdstuk 10.3 de uitvoer gegevens weergegeven en in hoofdstuk 10.4 de toepassing van het model.

10.1 Doel van het Model

Het model is ontworpen om weersgegevens te analyseren in combinatie met technische en financiële parameters om de meest kosteneffectieve oplossing voor hernieuwbare energie te identificeren. Nadat alle mogelijke combinaties zijn doorgerekend, optimaliseert het model de oplossing die de benodigde energie levert met een minimaal energieoverschot. De belangrijkste output van het model omvat de optimale combinatie van zonnepanelen en windturbines voor een specifieke locatie, gedetailleerde schattingen van de energieproductie op maand- en jaarbasis, en financiële metrics zoals installatiekosten, terugverdientijd en potentiële winst of besparingen.

10.2 Werking van het Model

Het model werkt in een reeks stappen die beginnen met het analyseren van weersgegevens om het energieopwekkingspotentieel op locatie te berekenen. Voor zonne-energie gebruikt het model historische data van zonuren, stralingsintensiteit en de efficiëntie van het paneel om de output van verschillende soorten zonnepanelen te schatten. Het potentieel voor windenergie wordt bepaald door windsnelheidsgegevens en turbine specificaties te gebruiken. Vaak zijn specificaties van bedrijven over de windturbines te algemeen. Daarom is er in dit model gebruik gemaakt van de windsnelheid gegevens. Door te bepalen hoeveel energie er in de lucht zit aan de hand van de windsnelheid, de dwarsdoorsnede en de efficiëntie van de turbine kan er bepaald worden wat de opbrengst van de turbine met die windsnelheid is. In Figuur 10 is een schematische weergave van het model te zien als ondersteuning bij de uitleg in de tekst. De code zelf zal toegevoegd zijn in de bijlage in appendix B.



Figuur 10: Schematische weergave van het model

10.2.1 Invoerparameters en Gegevens

Het model maakt gebruik van een uitgebreide set invoerparameters, waaronder weersgegevens, technische specificaties van energiesystemen, locatieparameters, energiebehoeften en economische factoren. Historische weersgegevens van 19 jaar bieden informatie over zonnestraling, windsnelheden en seizoensgebonden variaties. Technische gegevens over zonnepanelen en windturbines, zoals energie-efficiëntie, ruimtebehoefte en vermogen, worden gebruikt om de prestaties te evalueren. De dak geometrie en beschikbare installatie-oppervlakte definiëren de fysieke beperkingen voor de plaatsing van energiesystemen. Maand- en jaarlijkse energiebehoeften in kWh worden gebruikt om ervoor te zorgen dat de geselecteerde configuratie aan de energiebehoeften voldoet. Ten slotte worden installatiekosten, onderhoudskosten en elektriciteitsstarieven (zowel voor het kopen als verkopen van energie) meegenomen in het model om de kostenefficiëntie te beoordelen.

Na het beoordelen van het energieopwekkingspotentieel genereert het model alle mogelijke combinaties van zonnepanelen en windturbines die kunnen worden geïnstalleerd binnen het beschikbare dakoppervlak. Elke combinatie wordt geëvalueerd op maximale energieproductie en ruimtebenutting op basis van dak geometrie en afmetingen van de apparatuur. Voor elke configuratie berekent het model de verwachte maand- en jaarproductie door weersgegevens te integreren met de energieprofielen van de geselecteerde panelen en turbines. Seizoensgebonden variaties worden ook meegenomen om nauwkeurige projecties te bieden.

Momenteel verbruikt de haven jaarlijks 13.532 m³ aardgas, wat overeenkomt met 132.207 kWh elektriciteit (TNO, 2021). In combinatie met het huidige gemiddelde elektriciteitsverbruik van 18720,2 kWh per jaar resulteert dit in een totaal van 183.927,84 kWh per jaar.

Het vervangen van gasverwarming door warmtepompen (Coefficient of Performance (COP) van 3–4) zou de vraag kunnen verlagen tot 129.669–135.631 kWh per jaar, terwijl het aanpassen van gebouwen en het verbeteren van de isolatie het elektriciteitsverbruik gerelateerd aan verwarming verder zou kunnen verlagen tot 78.316,41 kWh (Verbeeck & Hens, 2010).

Het elektrificeren van schepen, inclusief het aanpassen van drie bemanningstransfervaartuigen met een batterijcapaciteit van 3,4 MWh, zou jaarlijks 953,88 MWh toevoegen, waardoor de totale verwachte elektriciteitsvraag op 1.032,20 MWh komt. Natrium-ionbatterijen worden voorgesteld voor energieopslag en bieden kosteneffectieve en betrouwbare oplossingen om vraag en aanbod van energie in evenwicht te brengen, zelfs tijdens periodes van lage hernieuwbare opwekking (Nurohmah et al., 2022).

Deze verschillende use cases zijn onderverdeeld in drie scenario's. Deze scenario's zijn weergegeven in Tabel 10.

Scenarios	Energiebehoefte
Huidige behoefte	18.720 MWh
Behoefte na overstap op elektrische verwarming	78.316 MWh
Behoefte na overstap op elektrische verwarming en elektrificatie van schepen	1032.196 MWh

Tabel 10: Energiebehoefte per scenario

10.2.2 Financiële Evaluatie

Het model evalueert vervolgens de financiële prestaties van elke configuratie. De installatiekosten worden berekend op basis van inkoop- en opzetkosten. De terugverdientijd, of de tijd die nodig is om de initiële investering terug te verdienen, wordt ook geschat. Deze tijd wordt geschat door te kijken wat er op jaarbasis bespaard wordt aan het niet of minder inkopen van elektriciteit en tegelijkertijd het terug leveren aan het net van de overproductie.

10.2.3 Optimale Oplossing

Ten slotte selecteert het model de combinatie van panelen en turbines die voldoet aan de energiebehoeften met de minste overproductie en minimale kosten. Dit zorgt voor een efficiënte benutting van het beschikbare dakoppervlak, afstemming van de energieproductie op de vraag en gemaximaliseerde kostenbesparingen en rendement op investering.

10.3 Output van het Model

Het model biedt een uitgebreide output die de optimale configuratie van zonnepanelen en windturbines bevat, gedetailleerde energieproductieschattingen, financiële analyses en milieu-impactbeoordelingen. De optimale configuratie specificeert het aantal zonnepanelen en windturbines die moeten worden geïnstalleerd, samen met hun plaatsing en oriëntatie op basis van dak geometrie. Energieproductieschattingen omvatten maand- en jaarproducties in kWh, met inbegrip van seizoensgebonden variaties om te helpen bij de planning. De financiële analyse geeft een overzicht van de totale installatiekosten, de terugverdientijd in jaren en de verwachte besparingen of inkomsten gedurende de levensduur van het systeem.

10.4 Toepassing van het Model

Dit model is bijzonder nuttig voor huiseigenaren en bedrijven die op zoek zijn naar kosteneffectieve oplossingen voor hernieuwbare energie. Het helpt stadsplanners bij het integreren van groene energiesystemen in de infrastructuur. Door geavanceerde data-analyse te combineren met financiële modellering stelt dit hulpmiddel besluitvormers in staat om met vertrouwen en duurzaamheid te investeren in hernieuwbare energie.

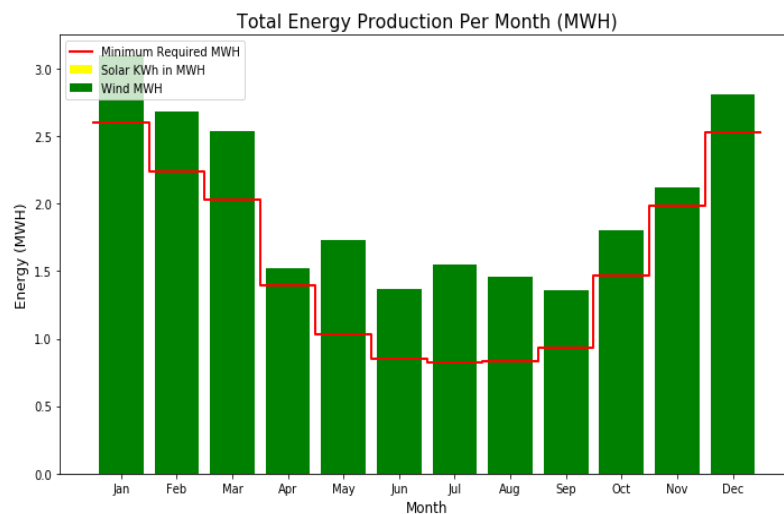
11 Resultaten

Op basis van het model en de eerder gedefinieerde scenario's kunnen we nu de optimale opstellingen voor elk scenario berekenen. In dit hoofdstuk 11.1 wordt de optimale opstelling van scenario 1 gepresenteerd. In hoofdstuk 11.2 die van scenario 2 en in hoofdstuk 11.3 de optimale opstelling van scenario 3.

11.1 Scenario 1: Huidige energiebehoefte

In de huidige situatie lijkt de energiebehoefte vrij eenvoudig te worden gedekt met vijf kleine verticale-as windturbines. Met deze opstelling wordt in alle maanden aan de energiebehoefte voldaan, zoals te zien is in Figuur 11. De maandelijkse energiebehoefte volgt grotendeels het windpatroon gedurende het jaar, waarbij de vraag in de zomermaanden lager is en de windturbines ook minder energie produceren.

De kosten van de windturbines en zonnepanelen bedragen voor deze opstelling bedragen ongeveer 40.000 euro. Rekening houdend met de besparingen op energiekosten en de opbrengst van overtollige energie die aan het net wordt terug verkocht, zou de investering in ongeveer 9 jaar worden terugverdiend.

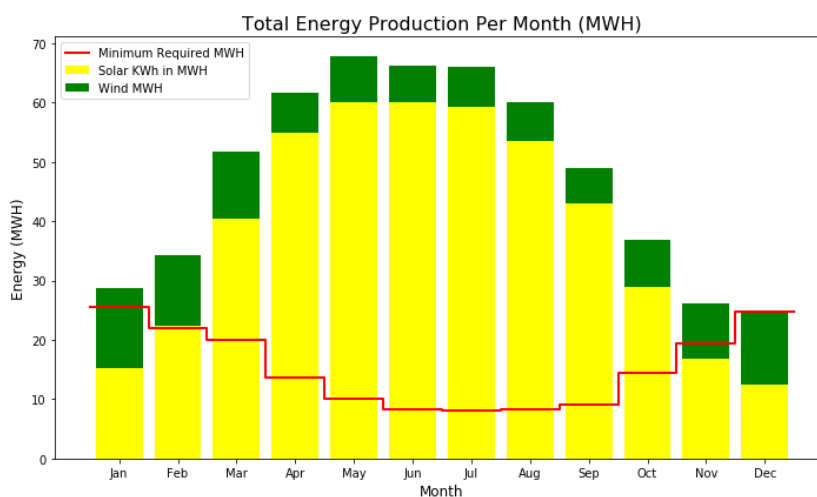


Figuur 11: Model resultaat scenario 1

11.2 Scenario 2: Overschakeling naar Elektrische Verwarming

In het tweede scenario wordt het gebruik van aardgas vervangen door elektrische verwarming. In deze situatie is de energiebehoefte niet langer volledig te dekken met alleen windturbines. Het model gebruikt daarom ook zonnepanelen om voldoende energie te leveren. Zoals te zien is in Figuur 12, voorzien de zonnepanelen in het grootste deel van de energiebehoefte. In de zomermaanden wordt een overschot aan energie geproduceerd, dat terug geleverd kan worden aan het net.

Het model heeft berekend dat er in dit scenario 22 windturbines en 1778 m² zonnepanelen nodig zijn. De kosten van de windturbines en zonnepanelen bedraagt 700.000 euro en de terugverdientijd wordt geschat op ongeveer 9 jaar.

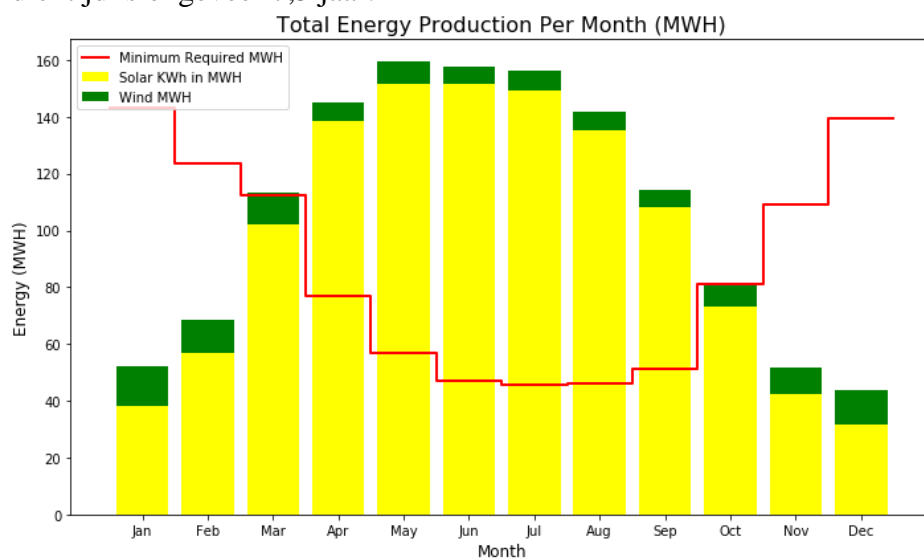


Figuur 12: Model resultaat scenario 2

11.3 Scenario 3: Elektrische verwarming en elektrisch varen

In het laatste scenario blijkt dat de benodigde hoeveelheid energie niet volledig kan worden opgewekt met alleen zonnepanelen en windturbines. Zoals weergegeven in Figuur 13, is er in de wintermaanden een aanzienlijk energietekort. Dit tekort kan worden opgevangen door energie in te kopen van het elektriciteitsnet. Deze extra kosten zijn meegenomen in de totale kosten- en terugverdienberekening.

Deze opstelling omvat 22 windturbines en 4485 m² zonnepanelen. De kosten van de windturbines en zonnepanelen bedragen 1,52 miljoen euro en de geschatte terugverdientijd is ongeveer 7,5 jaar.



Figuur 13: Model resultaat scenario 3

Discussie

Bij het verduurzamen van de haven van Maassluis zijn diverse uitdagingen en potentiële oplossingen geïdentificeerd die de haalbaarheid en efficiëntie van de voorgestelde energiemaatregelen beïnvloeden. Deze discussie plaatst de bevindingen in een bredere context en benadrukt de beperkingen, kansen en implicaties voor toekomstig onderzoek.

Congestie in het Nederlandse elektriciteitsnet

Een belangrijke uitdaging bij de implementatie van hernieuwbare energieoplossingen is de congestie in het elektriciteitsnet in Nederland. Het grootschalig terugleveren van overtollige energie kan het bestaande net overbelasten, wat leidt tot inefficiënties en hogere kosten voor netbeheerders. Dit probleem is met name relevant in de context van een havengebied zoals Maassluis, waar grote hoeveelheden energie van bijvoorbeeld zonnepanelen en windturbines kunnen worden opgewekt. Zonder adequate opslagmogelijkheden of een slim energiemanagementsysteem kan de teruglevering van deze energie bijdragen aan de congestieproblematiek.

Waterstofproductie als oplossing voor energieopslag

Een mogelijke oplossing voor het probleem van energieoverschotten is het gebruik van overtollige energie voor de productie van waterstof. Waterstof kan lokaal worden opgeslagen en gebruikt als een emissievrije energiedrager voor eigen toepassingen, zoals scheepsaandrijving of als back-up voor de havenfaciliteiten. Echter, de huidige kosten en inefficiëntie van waterstofproductie maken het op dit moment een minder aantrekkelijke optie. Toekomstig onderzoek zou zich kunnen richten op technologische verbeteringen en kostendalingen in elektrolyse om waterstofproductie rendabeler te maken, vooral voor lokale toepassingen.

Smart grid en dynamische prijsstrategieën

Een andere benadering voor het omgaan met energiestromen is het gebruik van een smart grid met een dynamisch prijsmodel. Dit systeem houdt rekening met fluctuaties in de terugleverprijs van elektriciteit, waardoor energie kan worden teruggeleverd aan het net op momenten dat de prijs het hoogst is. Omgekeerd kan energieverbruik worden geoptimaliseerd op momenten dat er geen vergoeding wordt verkregen voor teruglevering. Een dergelijk systeem kan bijdragen aan een efficiënter gebruik van opgewekte energie en economische voordelen opleveren voor de haven. De ontwikkeling van dit type systeem vereist echter geavanceerde technologieën en samenwerking met netbeheerders.

Kabelinfrastructuur en kosten

Een belangrijk aspect dat nog niet is onderzocht, maar cruciaal is voor de implementatie van duurzame energieoplossingen, is de kabelinfrastructuur. De aanleg of aanpassing van de elektriciteitsinfrastructuur kan aanzienlijke kosten en complexiteit met zich meebrengen. Met name de capaciteit en levensduur van de kabels moeten worden afgestemd op de verwachte pieken in energieopwekking en -verbruik. Dit vraagt om een gedetailleerde technische en economische analyse om de haalbaarheid van de voorgestelde oplossingen te waarborgen. Toekomstig onderzoek kan zich richten op de optimale infrastructuur voor de specifieke omstandigheden in Maassluis.

Beperkingen en toekomstig onderzoek

Het onderzoek heeft te maken gehad met enkele beperkingen die van invloed zijn op de nauwkeurigheid van de resultaten. Een belangrijke beperking was het gebrek aan gedetailleerde data over het dagelijkse of zelfs uurlijkse energieverbruik van de bedrijven in het havengebied. Hierdoor moesten aannames worden gemaakt bij het modelleren van het energieverbruik, wat tot onzekerheden in de uiteindelijke schattingen kan leiden. Daarnaast zijn de kosten en complexiteit van de kabelinfrastructuur niet volledig in detail onderzocht, hoewel deze een belangrijke invloed kunnen hebben op de implementatie van de voorgestelde oplossingen. Het ontbreken van deze data beperkt de nauwkeurigheid en praktische toepasbaarheid van sommige conclusies.

Toekomstbestendigheid en opschaalbaarheid

Het verduurzamen van de haven van Maassluis moet niet alleen voldoen aan de huidige energievraag, maar ook bestand zijn tegen toekomstige uitdagingen. Dit betekent dat het energiesysteem flexibel en schaalbaar moet zijn, met ruimte voor groei in de energiebehoefte door verdere elektrificatie en uitbreiding van havenactiviteiten. Het inzetten van slimme energiemanagementsystemen en opslagmogelijkheden, zoals batterijen of waterstof, kan bijdragen aan deze toekomstbestendigheid. Daarnaast kunnen ontwikkelingen in technologie, zoals efficiëntere zonnepanelen en batterijen met hogere energiedichtheid, verdere opschaling vergemakkelijken. Door nu al te investeren in infrastructuur die met nieuwe technologieën kan worden uitgebreid, wordt de haven voorbereid op de langere termijn.

Reserves bij bewolkte windstille dagen

Een cruciale uitdaging bij hernieuwbare energie is het omgaan met perioden van lage opwekking, bijvoorbeeld tijdens bewolkte en windstille dagen. Om dit probleem aan te pakken, moet er voldoende energie worden opgeslagen in batterijen of andere buffers. Mocht de opgeslagen energie uitgeput raken, kan de haven tijdelijk stroom afnemen van het reguliere net. Op momenten dat de opwekking hoger is kan deze stroom worden teruggeleverd, zodat de haven netto zelfvoorzienend blijft. Dit concept van "netto zelfvoorzienendheid" minimaliseert de afhankelijkheid van externe energiebronnen, terwijl het systeem flexibel blijft in extreme omstandigheden.

Zeezoutbatterij opslag in stilliggende schepen

De historische schepen die in de haven van Maassluis liggen, bieden een unieke kans om energieopslag te integreren in de bestaande infrastructuur. Door zeezoutbatterijen in deze schepen te plaatsen, kan de haven energieoverschotten opslaan op een milieuvriendelijke en efficiënte manier. Zeezoutbatterijen, als type natrium-ionbatterij, zijn duurzaam, goedkoop, en veiliger dan lithium-ionbatterijen. Het gebruik van deze batterijen in stilliggende schepen combineert innovatie met behoud van cultureel erfgoed. Bovendien biedt de grote laadruimte van schepen voldoende capaciteit voor grootschalige energieopslag, wat bijdraagt aan het balanceren van vraag en aanbod in de haven. In overleg met eigenaren van de historische schepen kan deze oplossing niet alleen een functionele, maar ook een symbolische bijdrage leveren aan de verduurzaming van de haven.

Conclusie

Het onderzoek toont aan dat de haven van Maassluis kan verduurzamen met een integrale aanpak die zich richt op elektrificatie, hernieuwbare energieopwekking en slimme opslagoplossingen. Het gebruik van zonnepanelen in combinatie met kleine windturbines op beschikbare dakoppervlakken, biedt een efficiënte manier om aan de energievraag te voldoen. Natrium-ionbatterijen zijn een veelbelovende technologie voor energieopslag vanwege hun milieuvriendelijkheid en lage kosten. Daarnaast biedt het simulatiemodel waardevolle inzichten in de optimale configuratie van energieopwekking en opslag, rekening houdend met seizoensgebonden en dagelijkse fluctuaties.

De resultaten laten zien dat een netto zelfvoorzienende haven haalbaar is, mits er voldoende opslagcapaciteit wordt geïntegreerd om fluctuaties in vraag en aanbod op te vangen. Het rapport benadrukt ook het belang van samenwerking met lokale stakeholders, zoals de gemeente Maassluis en bedrijven in de haven, om de implementatie te versnellen.

Tot slot biedt het rapport een sterke basis voor toekomstige projecten, waarbij verdere ontwikkelingen in technologieën zoals waterstofproductie en zeezoutbatterijen kunnen bijdragen aan een nog duurzamere haven. Het voorgestelde model en de aanbevelingen dienen als een voorbeeld voor andere havens die soortgelijke stappen willen zetten in de energietransitie.

Disclaimer

Dit rapport heeft AI chatbots gebruikt voor specifieke non-academische redenen zoals:

- Controleren van grammatica, spelling and referenties in de tekst.
- Samenvatten of uitbreiden van teksten en concepten
- Coderen in python
- Verstrekken van generale feedback

AI chatbots zijn niet gebruikt voor:

- Genereren van originele academische input
- Formuleren van conclusies of interpretaties
- Analyseren van data

Alle conclusies, bevindingen en bronnen zijn onafhankelijk geproduceerd en geïdentificeerd door de auteurs.

Referenties

- [1] A. K. Geim and H. A. M. S. ter Tisha, Detection of earth rotation with a diamagnetically levitating gyroscope, *Physica B: Condensed Matter* 294–295, 736 (2001).
- 1komma5. (2024). [Orientatie en hellingshoek zonnepaneel efficiëntie]. Geraadpleegd op 10 december 2024, van <https://1komma5.nl/kennisbank/zonnepanelen/financieel/opbrengst-zonnepanelen-per-maand/>
- A Novel Proposal of Using Solar Panels Mounted on Wind Turbines. (2024). *Enhancement of Power Generation*. <https://www.researchgate.net/publication/385678602>, p. 9.
- Al-Rawajfeh, M. A., & Gomaa, M. R. (2023). Comparison between horizontal and vertical axis wind turbine. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, 12(1), 13-23. https://www.researchgate.net/publication/368840356_Comparison_between_horizontal_and_vertical_axis_wind_turbine
- Assessment of Renewable Energy Supply for Green Ports. (2020). *A Case Study*. <https://www.researchgate.net/publication/338029725>, p. 15.
- Breembroek, G., van den Bosch, A., & Jansen, H. (2020). Technologische oplossingen voor energie-efficiëntie in havengebieden. *Energie & Haven*, 12(4), 33-45.
- Carroll, P., Chesser, M., & Lyons, P. (2020). Air source heat pumps field studies: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275.
- CO2emissiefactoren (2020). Emissiekentallen elektriciteit. Geraadpleegt op 5 Januari 2025 van https://www.co2emissiefactoren.nl/wp-content/uploads/2020/01/CE-Delft-2020-Memo-emissiekentallen_elektriciteit-190426-januari-2020.pdf
- Crawford, R. H. (2009). Life cycle energy and greenhouse gas emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2653-2660.
- de Wild-Scholten, M. J. (2021). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 133, 133-142.
- Denk Mee Maassluis. (2023). *Participatieplatform Omgevingsvisie Maassluis*.
- Energie-Nederland. (2023). *Laagdrempelige energietransitie*. Geraadpleegd van <https://www.energie-nederland.nl/wp-content/uploads/2023/06/Laagdrempelige-energietransitie-stratelligence-3-april-1.2-min.pdf>
- European Commission, Joint Research Centre. (z.d.). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Geraadpleegd op 20 nov 2024, van https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

- García, P. C., Farfán Martín, A., & González-Aguilera, D. (2023). Comparative analysis of ground source and air source heat pump systems under different conditions and scenarios. *Energies*, 16(3), 1289. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1289>
- Geraadpleegd op 25 oktober 2024 via <https://denkmee.maassluis.nl/folders/omgevingsvisie>
- Google. (2024). [2D weergave van de Govert van Wijnkade]. Google Earth. Geraadpleegd op 11 november 2024, van <https://edu.nl/ajfyk>
- Hybrid Renewable Energy System Optimum Design. (2021). *Smart Dispatch for Nearly Zero Energy Ports*. <https://www.researchgate.net/publication/351621246>, p. 22-25.
- Ibrahim, W. I., Mohamed, M. R., et al. (2021). "Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review." https://www.researchgate.net/publication/350991188_Hydrokinetic_energy_harnessing_technologies_A_review
- International Energy Agency. (2023). World energy outlook 2023. Geraadpleegd op 15 november 2024, van <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., & Quaiocoe, J. E. (2013). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 51-64.
- Khatib, T., Mohamed, A., & Sopian, K. (2012). A review of solar energy modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2864–2869. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000767?via%3Dihub>
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (n.d.). Daggegevens van het weer in Nederland: Rotterdam Geulhaven (2005- heden). Geraadpleegd op 10 november 2024 via <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens>
- Liander. (2023). Energie-N tool [Interactieve applicatie]. Geraadpleegd op 19 nov 2024, van <https://energie-n.shinyapps.io/appLiander/>
- Lund, H., et al. (2017). *Challenges in the integration of renewable energy sources into microgrids*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 238–245.
- Nautilus Research. (2023). Elektrificatie van scheepvaart: impact op energieverbruik. Rapport Maritieme Transitie.

- Nurohmah, A. R., Nisa, S. S., Stulasti, K. N. R., Yudha, C. S., Suci, W. G., Aliwarga, K., Widiyandari, H., & Purwanto, A. (2022). Sodium-ion battery from sea salt: a review. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 11(4), 71–89.
https://www.researchgate.net/publication/360026310_Sodium-ion_battery_from_sea_salt_a_review
- Papadopoulos, P., et al. (2020). *Optimization of energy storage systems in microgrids for renewable energy integration*. Energy Reports, 6, 1251-1260.
Performance Evaluation of Small Wind Turbines. (2024). *Case Study Applied to an Ayanz Wind Turbine with Screw Blades*.
<https://www.researchgate.net/publication/385583649>, p. 12.
- Pure Energie. (z.d.). *Verdeling kosten op de energierekening: Wat bepaalt je energiekosten?* Geraadpleegd op 8 januari 2025, van <https://pure-energie.nl/kennisbank/vko/#:~:text=Ongeveer%2062%25%20van%20je%20energierekening,op%20jaarbasis%20voor%20gas%20verbruikt>
- Renewable Capacity Statistics. (2023). IRENA.
<https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-Capacity-Statistics>
<https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2023>, p. 18.
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). (n.d.). *Zon op grote daken*. Geraadpleegd via: <https://www.rvo.nl/>
- Rijksoverheid. (2012). *Bouwbesluit 2012*. Geraadpleegd op 25 oktober 2024, van <https://rijksoverheid.bouwbesluit.com/Inhoud/docs/wet/bb2012>
- Rijksoverheid. (2017). *Binnenvaartpolitiereglement (BPR)*. Geraadpleegd op 25 oktober 2024, van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0003628/2017-01-01>
- Rijksoverheid. (2017). *Wet geluidhinder*. Geraadpleegd op 25 oktober 2024, van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0003227/2017-05-01>
- Rijksoverheid. (2024). *Omgevingswet*. Geraadpleegd op 25 oktober 2024, van <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/omgevingswet>
- Shaikh, M. R. S., Waghmare, S. B., Labade, S. S., Fuke, P. V., & Tekale, A. (2017). A review paper on electricity generation from solar energy. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5(9), 1884–1889.
https://www.researchgate.net/publication/320226399_A_Review_Paper_on_Electricity_Generation_from_Solar_Energy
- Solarconcept (2024). *ideale-hellingshoek-zonnepanelen*. Geraadpleegd op 15 December 2024, van <https://www.solarconcept.nl/artikel/ideale-hellingshoek-zonnepanelen>
- Stedin. (2023). *Energie-N tool [Interactieve applicatie]*. Geraadpleegd op 19 nov 2024, van <https://energie-n.shinyapps.io/appStedin/>

- T. van der Linden, J., Jansen, P., & Bosch, (2022). Efficiëntieverhoging met warmtepompen in de gebouwde omgeving en industrie. *Platform Duurzame Energie*, 21(3), 45-58.
- TenneT. (2022). Toekomstige elektriciteitsinfrastructuur in havengebieden. Jaarverslag TenneT.
- Tian, B., Chu, B., & Jin, H. (2024). Experimental study on the combined heat storage and supply of air/water-source heat pumps. *Buildings*, 14(9), 2836. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/9/2836>
- TNO. (2021). Energie-inhoud en conversiefactoren van fossiele brandstoffen. Technisch rapport, TNO Energieonderzoek.
- TNO. (2021). Energie-inhoud en conversiefactoren van fossiele brandstoffen. Technisch rapport, TNO Energieonderzoek.
- TNO. (2021). Technologische opties voor de elektrificatie van havengebieden. R&D Rapport.
- TNO. (2024). *Impact van elektrificatie op de verduurzaming van gebouwen*. Geraadpleegd van <https://publications.tno.nl/publication/34642884/g9cYolfG/TNO-2024-R10726.pdf>
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351–1371. https://www.researchgate.net/publication/288918068_A_review_on_small_scale_wind_turbines
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351–1371.
- van der Linden, J., Jansen, P., & Bosch, T. (2022). Efficiëntieverhoging met warmtepompen in de gebouwde omgeving en industrie. *Platform Duurzame Energie*, 21(3), 45-58.
- Verbeeck, G., & Hens, H. (2010). Energy savings in retrofitted dwellings: Economically viable? *Energy and Buildings*, 42(1), 57-63. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877880900142X>
- Verbeeck, G., & Hens, H. (2010). Energy savings in retrofitted dwellings: Economically viable? *Energy and Buildings*, 42(1), 57-63. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877880900142X>
- *Yield of solar panels, the 10 factors that influence*. Zonnepanelen Planet. (2022, August 16). <https://www.zonnepanelenplanet.nl/en/yield-solar-panels/>

- Yu, T., Li, G., Duan, Y., Wu, Y., Zhang, T., Zhao, X., Luo, M., & Liu, Y. (2023). The research and industrialization progress and prospects of sodium ion battery. *Journal of Alloys and Compounds*, 958, 170486.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838823017899>
- Zonnepaneelefficientie en kosten
(code):<https://www.zonnepaneelprijzen.nl/kosten/#:~:text=Kosten%20van%20zonnepanelen,%E2%82%AC%20260%20tot%20%E2%82%AC%20307>.[https://www.zonne-paneel.net/rendement-zonnepanelen/#:~:text=Het%20zonnepanelen%20rendement%20\(effici%C3%A4ntie%20zonnepanelen,een%20vermogen%20van%201300%20Wp](https://www.zonne-paneel.net/rendement-zonnepanelen/#:~:text=Het%20zonnepanelen%20rendement%20(effici%C3%A4ntie%20zonnepanelen,een%20vermogen%20van%201300%20Wp).

12 Appendix A

2023

Winter	1.151	1.005		
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1	0.000	0.000	4.692	4.903
2	0.000	0.000	4.602	4.897
3	0.000	0.000	4.533	4.894
4	0.000	0.000	4.470	4.884
5	0.000	0.000	4.410	4.884
6	0.000	0.000	4.354	4.877
7	0.000	0.000	4.289	4.855
8	2.587	0.425	4.346	4.844
9	76.234	4.697	4.427	4.860
10	203.379	11.155	4.914	4.925
11	284.834	15.961	5.614	5.094
12	332.224	18.641	6.236	5.319
13	326.919	18.914	6.659	5.446
14	299.916	16.899	6.875	5.437
15	224.014	12.699	6.888	5.309
16	102.433	6.639	6.673	5.128
17	26.164	1.711	6.240	4.980
18	0.000	0.000	5.809	4.933
19	0.000	0.000	5.479	4.933
20	0.000	0.000	5.284	4.950
21	0.000	0.000	5.139	4.961
22	0.000	0.000	5.004	4.947
23	0.000	0.000	4.877	4.916
24	0.000	0.000	4.758	4.916

Lente				
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1.000	0.000	0.000	7.615	3.754
2.000	0.000	0.000	7.359	3.733
3.000	0.000	0.000	7.127	3.730
4.000	0.000	0.000	6.928	3.715
5.000	1.732	0.653	6.744	3.697
6.000	21.643	4.501	6.745	3.667
7.000	97.624	11.257	7.236	3.684

8.000	244.375	19.968	8.208	3.884
9.000	424.815	29.032	9.317	4.146
10.000	557.224	36.942	10.374	4.414
11.000	650.688	42.949	11.266	4.645
12.000	718.538	46.734	11.970	4.792
13.000	706.482	46.681	12.479	4.910
14.000	666.466	43.647	12.765	4.972
15.000	572.383	37.713	12.837	4.959
16.000	452.957	30.169	12.708	4.868
17.000	289.208	21.485	12.363	4.651
18.000	115.810	12.288	11.776	4.335
19.000	22.454	4.531	10.937	4.012
20.000	1.305	0.539	9.988	3.860
21.000	0.000	0.000	9.278	3.830
22.000	0.000	0.000	8.749	3.823
23.000	0.000	0.000	8.342	3.805
24.000	0.000	0.000	8.006	3.773

Zomer				
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1.000	0.000	0.000	15.778	3.268
2.000	0.000	0.000	15.512	3.256
3.000	0.000	0.000	15.277	3.259
4.000	0.000	0.000	15.059	3.266
5.000	8.689	2.463	14.897	3.264
6.000	47.130	9.807	15.156	3.218
7.000	152.653	18.791	16.102	3.370
8.000	305.202	27.703	17.209	3.655
9.000	471.258	37.142	18.200	3.887
10.000	592.664	45.232	19.102	4.075
11.000	676.728	52.490	19.850	4.253
12.000	740.110	56.626	20.430	4.414
13.000	753.175	57.228	20.833	4.532
14.000	722.482	53.572	21.047	4.625
15.000	631.081	46.955	21.064	4.637
16.000	517.489	38.812	20.917	4.570
17.000	363.047	29.774	20.603	4.434
18.000	195.005	20.481	20.123	4.156
19.000	59.207	11.406	19.470	3.782
20.000	15.477	3.501	18.539	3.453

21.000	0.000	0.000	17.682	3.322
22.000	0.000	0.000	17.020	3.281
23.000	0.000	0.000	16.524	3.272
24.000	0.000	0.000	16.124	3.267

Herfst				
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1.000	0.000	0.000	11.262	3.974
2.000	0.000	0.000	11.109	3.978
3.000	0.000	0.000	10.980	3.960
4.000	0.000	0.000	10.847	3.933
5.000	0.000	0.000	10.717	3.920
6.000	0.052	0.032	10.609	3.929
7.000	23.892	2.699	10.570	3.930
8.000	114.861	8.439	10.920	3.944
9.000	259.724	16.234	11.645	4.107
10.000	352.671	22.868	12.534	4.365
11.000	445.373	27.612	13.365	4.622
12.000	462.087	29.774	14.033	4.810
13.000	450.307	29.381	14.490	4.909
14.000	395.844	26.403	14.712	4.894
15.000	313.748	21.014	14.702	4.786
16.000	215.421	13.948	14.476	4.564
17.000	92.959	6.714	14.007	4.295
18.000	19.218	2.092	13.420	4.109
19.000	0.214	0.075	12.855	4.055
20.000	0.000	0.000	12.379	4.062
21.000	0.000	0.000	12.050	4.050
22.000	0.000	0.000	11.780	4.034
23.000	0.000	0.000	11.545	4.007
24.000	0.000	0.000	11.337	3.993

2043

Winter	1.243	1.009		
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1	0.000	0.000	4.692	4.903
2	0.000	0.000	4.602	4.897
3	0.000	0.000	4.533	4.894
4	0.000	0.000	4.470	4.884
5	0.000	0.000	4.410	4.884

6	0.000	0.000	4.354	4.877
7	0.000	0.000	4.289	4.855
8	2.792	0.426	4.346	4.844
9	82.275	4.712	4.427	4.860
10	219.497	11.189	4.914	4.925
11	307.407	16.010	5.614	5.094
12	358.552	18.698	6.236	5.319
13	352.828	18.971	6.659	5.446
14	323.684	16.950	6.875	5.437
15	241.767	12.738	6.888	5.309
16	110.550	6.659	6.673	5.128
17	28.237	1.716	6.240	4.980
18	0.000	0.000	5.809	4.933
19	0.000	0.000	5.479	4.933
20	0.000	0.000	5.284	4.950
21	0.000	0.000	5.139	4.961
22	0.000	0.000	5.004	4.947
23	0.000	0.000	4.877	4.916
24	0.000	0.000	4.758	4.916

Lente				
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1.000	0.000	0.000	7.615	3.754
2.000	0.000	0.000	7.359	3.733
3.000	0.000	0.000	7.127	3.730
4.000	0.000	0.000	6.928	3.715
5.000	1.869	0.655	6.744	3.697
6.000	23.358	4.515	6.745	3.667
7.000	105.361	11.292	7.236	3.684
8.000	263.742	20.029	8.208	3.884
9.000	458.481	29.120	9.317	4.146
10.000	601.384	37.055	10.374	4.414
11.000	702.255	43.079	11.266	4.645
12.000	775.483	46.877	11.970	4.792
13.000	762.471	46.823	12.479	4.910
14.000	719.283	43.780	12.765	4.972
15.000	617.744	37.828	12.837	4.959
16.000	488.854	30.261	12.708	4.868
17.000	312.128	21.550	12.363	4.651
18.000	124.988	12.326	11.776	4.335

19.000	24.234	4.545	10.937	4.012
20.000	1.409	0.540	9.988	3.860
21.000	0.000	0.000	9.278	3.830
22.000	0.000	0.000	8.749	3.823
23.000	0.000	0.000	8.342	3.805
24.000	0.000	0.000	8.006	3.773

Zomer				
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1.000	0.000	0.000	15.778	3.268
2.000	0.000	0.000	15.512	3.256
3.000	0.000	0.000	15.277	3.259
4.000	0.000	0.000	15.059	3.266
5.000	9.378	2.471	14.897	3.264
6.000	50.865	9.837	15.156	3.218
7.000	164.751	18.848	16.102	3.370
8.000	329.390	27.788	17.209	3.655
9.000	508.606	37.255	18.200	3.887
10.000	639.633	45.370	19.102	4.075
11.000	730.359	52.650	19.850	4.253
12.000	798.764	56.798	20.430	4.414
13.000	812.864	57.402	20.833	4.532
14.000	779.739	53.735	21.047	4.625
15.000	681.094	47.098	21.064	4.637
16.000	558.500	38.931	20.917	4.570
17.000	391.819	29.865	20.603	4.434
18.000	210.459	20.544	20.123	4.156
19.000	63.899	11.441	19.470	3.782
20.000	16.703	3.512	18.539	3.453
21.000	0.000	0.000	17.682	3.322
22.000	0.000	0.000	17.020	3.281
23.000	0.000	0.000	16.524	3.272
24.000	0.000	0.000	16.124	3.267

Herfst				
Hour	G(i)	H_sun	T2m	WS10m
1.000	0.000	0.000	11.262	3.974
2.000	0.000	0.000	11.109	3.978
3.000	0.000	0.000	10.980	3.960

4.000	0.000	0.000	10.847	3.933
5.000	0.000	0.000	10.717	3.920
6.000	0.056	0.033	10.609	3.929
7.000	25.785	2.708	10.570	3.930
8.000	123.963	8.465	10.920	3.944
9.000	280.307	16.283	11.645	4.107
10.000	380.620	22.938	12.534	4.365
11.000	480.669	27.696	13.365	4.622
12.000	498.707	29.864	14.033	4.810
13.000	485.994	29.471	14.490	4.909
14.000	427.214	26.483	14.712	4.894
15.000	338.613	21.078	14.702	4.786
16.000	232.493	13.991	14.476	4.564
17.000	100.326	6.735	14.007	4.295
18.000	20.741	2.099	13.420	4.109
19.000	0.231	0.075	12.855	4.055
20.000	0.000	0.000	12.379	4.062
21.000	0.000	0.000	12.050	4.050
22.000	0.000	0.000	11.780	4.034
23.000	0.000	0.000	11.545	4.007
24.000	0.000	0.000	11.337	3.993

13 Appendix B: Code van het model

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import linprog
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Parameters for wind turbines and solar panels
WIND_TURBINE = {
    'width': 2.8 , #width/diameter in meters
    'height': 3.6 , #height in meters
    'cost': 7761.90, # euros
    'efficiency': 0.4, #efficiency is depended on type of turbine, for a darius its 0.4
    'min_distance' : 10 #minimum distance in meters between wind turbines.
}
WIND_TURBINE['area']= WIND_TURBINE['width'] * WIND_TURBINE["width"]
#ground surface area in square meters
#WIND_TURBINE['area'] = 3

SOLAR_PANEL = {
    'area': 1, # square meters
    'cost': 300, # euros
    'efficiency': 0.2, #efficiency of solar panel
}

# Input values

#dimensions of roofs. used for calculating total area
daken = [
    (60, 49, []),
    (46.5, 27, [(4, 6, 40, 5.75)]),
    (22, 23.5, []),
    (12.5, 26, []),
    (27, 22, []),
    (29, 26.5, [(15, 0, 3.33, 21)]),
    (20, 22, [(7.5, 6, 5, 10)]),
    (21, 19, [(5, 2, 10, 10)]),
    (20, 10, []),
    (21, 10, []),
    (22, 5, []),
    (52, 30, []),
```

```
]
```

```
kwh_return_profit = [0.10, #jan kwh return profit  
                    0.10, #feb  
                    0.10, #mrt  
                    0.10, #apr  
                    0.10, #mei  
                    0.10, #jun  
                    0.10, #jul  
                    0.10, #aug  
                    0.10, #sep  
                    0.10, #okt  
                    0.10, #nov  
                    0.10 #dec  
                    ]
```

```
kwh_cost_month = [0.20, #jan kwh costs per month  
                 0.20, #feb  
                 0.20, #mrt  
                 0.20, #apr  
                 0.20, #mei  
                 0.20, #jun  
                 0.20, #jul  
                 0.20, #aug  
                 0.20, #sep  
                 0.20, #okt  
                 0.20, #nov  
                 0.20 #dec  
                 ]
```

```
#berekening maximum windturbines en oppervlakte
```

```
def calculate_wind_turbines(daken, wokkel_diameter, min_distance):
```

```
    def is_within_exclusion(x, y, exclusions):
```

```
        """
```

```
        Controleer of een punt binnen een niet-buikbaar gebied valt.
```

```
        """
```

```
        for excl_x, excl_y, excl_lengte, excl_breedte in exclusions:
```

```
            if excl_x <= x < excl_x + excl_lengte and excl_y <= y < excl_y + excl_breedte:
```

```
                return True
```

```
        return False
```

```
afstand = wokkel_diameter + min_distance
```

```
wokkel_radius = wokkel_diameter / 2
```

```
totaal_aantal_wokkels = 0
```

```
details = []
```

```
totaal_buikbaar_oppervlak = 0
```

```

for lengte, breedte, exclusions in daken:
    # Bereken bruikbaar dakoppervlak
    totaal_oppervlak = lengte * breedte
    niet_bruikbaar_oppervlak = sum(excl_lengte * excl_breedte for excl_x, excl_y,
excl_lengte, excl_breedte in exclusions)
    bruikbaar_oppervlak = totaal_oppervlak - niet_bruikbaar_oppervlak
    totaal_bruikbaar_oppervlak += bruikbaar_oppervlak

# Bereken het maximale aantal wakkels in lengte- en breedterichting
wakkels_lengte = int((lengte - 2 * wakkel_radius) // afstand)
wakkels_breedte = int((breedte - 2 * wakkel_radius) // afstand)

# Houd een lijst bij van mogelijke posities
mogelijke_posities = []

for i in range(wakkels_lengte):
    for j in range(wakkels_breedte):
        positie_x = i * afstand + wakkel_radius + afstand / 2
        positie_y = j * afstand + wakkel_radius + afstand / 2

        # Controleer of de positie binnen een niet-bruikbaar gebied valt
        if not is_within_exclusion(positie_x, positie_y, exclusions):
            mogelijke_posities.append((positie_x, positie_y))

aantal_wakkels_dak = len(mogelijke_posities)
details.append(aantal_wakkels_dak)
totaal_aantal_wakkels += aantal_wakkels_dak

return totaal_aantal_wakkels, details, totaal_bruikbaar_oppervlak
max_turbines, details, totaal_bruikbaar_oppervlak = calculate_wind_turbines(daken,
WIND_TURBINE['width'], WIND_TURBINE['min_distance'])

#total_area = 20
total_area = totaal_bruikbaar_oppervlak # Total available area in square meters
required_power_daily = 0 # Required daily power threshold in kWh
required_power_monthly = 0 # Required monthly power threshold in kWh
required_power_yearly = 1032.196 * 1000 #power required in kwh
#required_power_yearly = 52000+44000# Required yearly power threshold in kWh
#cost_constraint = 1000000 # Cost constraint in euros

monthly_required = [1.667 * required_power_yearly/12, #jan
1.435* required_power_yearly/12, #feb
1.304* required_power_yearly/12, #mrt
0.894* required_power_yearly/12, #apr
0.660 *required_power_yearly/12, #mei
0.547* required_power_yearly/12, #jun

```

```

0.529 * required_power_yearly/12, #jul
0.535 * required_power_yearly/12, #aug
0.595 * required_power_yearly/12, #sep
0.941*required_power_yearly/12, #okt
1.270* required_power_yearly/12, #nov
1.622* required_power_yearly/12] #dec required power per month in kwh

#weather data
#importing the weather data from the excel sheet
#first wind
#using pandas we can extract data from excel sheet

# Path to the Excel file
excel_file_path = "Weer Data averages.xlsx"

# Create a Pandas ExcelFile object to access sheet names
excel_data = pd.ExcelFile(excel_file_path)

# Define the years of interest
years_of_interest = list(range(2005, 2024))

# Initialize an empty list to collect DataFrames
dataframes = []

# Loop through the sheets for each year and collect the data
for year in years_of_interest:
    sheet_name = str(year)

    if sheet_name in excel_data.sheet_names:
        # Read the data from the current year's sheet
        df = pd.read_excel(excel_data, sheet_name=sheet_name, skiprows=3, nrows = 31,
        usecols="A:M", index_col=0)

        # Clean the DataFrame
        df_cleaned = df.fillna(0)
        df_cleaned['year'] = year

        # Debug: Check the index and columns before resetting
        #print(f"Before reset, index for year {year}: {df_cleaned.index}")

        # Reset the index and ensure it's renamed to "Day"
        df_cleaned.reset_index(inplace=True)
        if "Row Labels" in df_cleaned.columns:

```

```

df_cleaned.rename(columns={"Row Labels": "day"}, inplace=True)

# Debug: Check columns after resetting
#print(f"After reset, columns for year {year}: {df_cleaned.columns}")
#print(df_cleaned.head(5))
# Melt the DataFrame to have days, months, and values as columns
df_melted = df_cleaned.melt(id_vars=["day", "year"], var_name="month",
value_name="Windspeed")

# Append the processed DataFrame to the list
dataframes.append(df_melted)

# Combine all DataFrames into one
windspeed_data = pd.concat(dataframes, ignore_index=True)

# Set a MultiIndex: Year, Month, Day
windspeed_data.set_index(["year", "month", "day"], inplace=True)
windspeed_data = windspeed_data.drop(windspeed_data[windspeed_data["Windspeed"]
== 0].index)

#print(windspeed_data)

# Assuming `windspeed_data` is your DataFrame with columns ["Year", "Month",
"Day", "Windspeed"]

# Step 1: Define the bins for wind speed
bins = np.arange(0, windspeed_data["Windspeed"].max() + 0.5, 0.5)

# Step 2: Group data by Month and calculate occurrences in bins
# Use `pd.cut` to bin the wind speeds and group by Month and bin
grouped = (
    windspeed_data.groupby("month")["Windspeed"]
    .apply(lambda speeds: pd.cut(speeds, bins=bins).value_counts())
    .unstack(level=1)
)

# Step 3: Prepare boxplot data
# Extract windspeed data grouped by Month
boxplot_data = windspeed_data.groupby("month")["Windspeed"].apply(list)

# Sort the boxplot_data index (month) to follow chronological order
month_order = [
    "januari", "februari", "maart", "april", "mei", "juni",
    "juli", "augustus", "september", "oktober", "november", "december"
]

boxplot_data = boxplot_data.loc[month_order]

```

```

# Step 4: Plot a boxplot
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.boxplot(boxplot_data, labels=boxplot_data.index, vert=True)
plt.title("Boxplot of Wind Speeds Across 12 Months")
plt.xlabel("Month")
plt.ylabel("Wind Speed (m/s)")
plt.xticks(rotation=45)
plt.grid(axis="y")
plt.show()

import seaborn as sns

# Assuming `windspeed_data` has columns ["year", "month", "windspeed"]

# Step 1: Group by year and month, calculate mean windspeed
mean_windspeeds = (
    windspeed_data.groupby(["year", "month"])["Windspeed"]
    .mean()
    .reset_index()
)

# Step 2: Pivot the table to have months as columns for heatmap
mean_windspeeds_pivot = mean_windspeeds.pivot(index="year", columns="month",
values="Windspeed")

# Step 3: Ensure months are ordered correctly (Dutch month names)
month_order = [
    "januari", "februari", "maart", "april", "mei", "juni",
    "juli", "augustus", "september", "oktober", "november", "december"
]
mean_windspeeds_pivot = mean_windspeeds_pivot[month_order]

# Step 4: Plot the heatmap
plt.figure(figsize=(14, 8))
sns.heatmap(
    mean_windspeeds_pivot,
    annot=True, # Show the mean wind speeds in the cells
    fmt=".1f", # Format to one decimal place
    cmap="coolwarm", # Colormap for visualizing trends
    cbar_kws={"label": "Mean Wind Speed (m/s)"}
)

# Step 5: Customize the plot
plt.title("Mean Wind Speed Per Month Per Year", fontsize=16)
plt.xlabel("Month", fontsize=12)
plt.ylabel("Year", fontsize=12)

```

```

plt.xticks(rotation=45)
plt.tight_layout()

# Show the plot
plt.show()

#show months out of years.
years = list(range(2005,2024))
months = [
    "januari", "februari", "maart", "april", "mei", "juni",
    "juli", "augustus", "september", "oktober", "november", "december"
]

#to individually acces a month
sorted_data = windspeed_data.sort_index()
maand_data = sorted_data.loc[(years[0], months[2])]
#print(maand_data)

solar_data = pd.read_excel(excel_data, sheet_name = "Zonnedata", skiprows=5, nrows =
228, usecols="A:C",header = None, names=["year", "month", "solar_output"])
#print(solar_data)
#this was much easier than wind data so far

#calculate output power wind turbine

# min 2 m/s max 10 m/s
# min 50 w, max 550 w
#knik op 4m/s @ 100w
#based on values above is a rough estimisation of the power output per day for any
given windspeed per 1 turbine
def windpower(windspeed):
    if windspeed < 2:
        windpower = 0
    elif (windspeed <= 4 and windspeed >= 2):
        windpower = windspeed * 25
    elif (windspeed <=10 and windspeed >= 4):
        windpower = (windspeed * 75) - 200
    elif 10 < windspeed <=14:
        windpower = 550
    else:
        windpower = 0

    windkwhday = windpower * 24 / 1000

```

```

    return windkwhday

#eff savionius = max 0.15
# eff darrieus = max 0.4
def windpowerv2(windspeed):
    if windspeed > 14:
        windkwhday = 0
    else:
        b = WIND_TURBINE['width']
        h = WIND_TURBINE['height']
        eff = WIND_TURBINE['efficiency']
        crossarea = b * h
        p = 0.5 * 1.29 * windspeed**3 * eff * crossarea
        windkwhday = p *24 / 1000

    return windkwhday

#calculate power output solar panels
#efficiency times solar power in kwh at location.

#dataframe maken van windpowers dit zijn dus
#de opbrengsten in kwh per dag van een kleine turbine

#copy of the original dataframe

windpower_data = windspeed_data.copy()
#apply windpower function
windpower_data["Windspeed"] = windpower_data["Windspeed"].apply(windpowerv2)
#rename column
windpower_data.columns = windpower_data.columns.str.replace("Windspeed",
"windkwh")

#print(windpower_data)

#maken van een array van oplevering per maand per unit
#eerst vanuit windpower_data alle januari's, februari's, etc middelen
#make array for montly data
#sort windpower data so its workable

sorted_windpower_data = windpower_data.sort_index()

#print(sorted_windpower_data.loc[(years[0],months[1])])

windpwr_month_avg = []

```



```

for m in range(len(months)):
    working_array = []
    for y in range(len(years)):
        working_array = np.append(working_array,
                                   sorted_windpower_data.loc[(years[y],months[m])].sum())
    windpwr_month_avg = np.append(windpwr_month_avg, np.sum(working_array)/19)

#print((windpwr_month_avg))
print(sum(windpwr_month_avg)) #yield kwh per turbine per year

#now we have an array for average kwh per windturbine per month

#get watts of windturbine
hoursyear = 365*24
watt = sum(windpwr_month_avg) / hoursyear
print(watt * 1000)

#first sort the data
months_solar = ['Jan', 'Feb', 'Mar', 'Apr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Oct', 'Nov', 'Dec']
sorted_solar_data = solar_data.set_index(["year", "month"]).sort_index()
#print(sorted_solar_data)
#print(sorted_solar_data.loc[(years[0],months_solar[0]), "solar_output"])

#solar panel efficiency has not been taken into account yet,
#but will be taken account in the for loop
solarpwr_month_avg = []
for m in range(len(months)):
    working_array_sol = []
    for y in range(len(years)):
        working_array_sol = np.append(working_array_sol,
                                       sorted_solar_data.loc[(years[y],months_solar[m]), "solar_output"])

    append_val = (np.sum(working_array_sol)/19)*SOLAR_PANEL['efficiency']

    solarpwr_month_avg = np.append(solarpwr_month_avg, append_val)

#print(solarpwr_month_avg)
#print(np.sum(solarpwr_month_avg)) #kwh per year per solar panel

swatt = sum(solarpwr_month_avg) / hoursyear
print(swatt * 1000)

```

```

#Scenario development
#determine combinations of solar/wind over given area

#first its important to calculate the maximum number of turbines that can be placed
#as its unrealistic to fill the roof with them since then turbines in the centre
#wont get any wind and produce power

def calc_comb(area_a, area_b, total_area, max_turbines):
    combinations = []

    #max a
    max_b = max_turbines

    #loop possibilities of A and fill remaining with B
    for count_b in range(max_b +1):
        #remaining area after A
        rem_area = total_area - (count_b*area_b)

        #if area positive divide over a
        if rem_area >= 0 and area_a > 0:
            #maxa
            max_a = int(rem_area // area_a)
            for count_a in range(max_a +1):
                #check if value is correct
                total_used_area = (count_b * area_b) + (count_a * area_a)

                if total_used_area <= total_area:
                    combinations.append((count_a, count_b))

    return combinations

#a is solar, b is wind

combinations = calc_comb(SOLAR_PANEL['area'], WIND_TURBINE['area'],
total_area, max_turbines)

#now area is divided over solar and wind with all possible combinations.
#remember a is solar b is wind.
#divide area over solar/wind. Determine total output.
#print(combinations)
#thats a lot of numbers
#print(max_turbines)

#now use the above combinations to make a month list of total KWH
#a = solar b = wind
#solarpwr_month_avg , windpwr_month_avg
#print(combinations[1][:])

```

```

total_kwh_month = []

#appendtotal = []
#appendtotal = np.append(appendtotal, combinations[1][0] * solarpwr_month_avg +
combinations[1][1] * windpwr_month_avg)
#print(appendtotal)

#print(len(appendtotal))
#print(solarpwr_month_avg * 3)

total_kwh_array = []
totalsolar_kwh_array = []
totwind_kwh_array = []
for combo in combinations:
    solarpanels, turbines = combo
    totalsolkwh = solarpanels*solarpwr_month_avg #*1.1056 # in 2043 solar panel output
will be increased because of rising solar strenght
    totwindkwh = turbines*windpwr_month_avg
    total_kwh = totalsolkwh + totwindkwh
    total_kwh_array.append(total_kwh)
    totalsolar_kwh_array.append(totsolkwh)
    totwind_kwh_array.append(totwindkwh)

total_kwh_array = np.array(total_kwh_array)
totalsolar_kwh_array = np.array(totsolar_kwh_array)
totwind_kwh_array = np.array(totwind_kwh_array)

#print(len(total_kwh_array))

#find the net kwh per month
net_kwh = total_kwh_array - monthly_required

print('running')
#find the minimum total kwh, so minimal requirement to give back to the grid, while
having all months positive
netpos_array = []
netniepos_array = []
testvals = []
for i in range(len(combinations)):

    test = []

    for month in range(12):
        if net_kwh[i][month] >= 0:
            test.append(1)

```

```

else:
    test.append(0)

    testval_val = sum(test)
    testvals.append(testval_val)
maxmonth = np.max(testvals) # in case it doesnt deliver a net positive for all 12 months
this will find
#the maximum amount of months it can provide a net positive for. We will further take
this to find the best cost effective version
print('maximum amount of positive months', maxmonth)

for i in range(len(combinations)):

    if testvals[i] == maxmonth:
        profit_value = []
        for month in range(12):
            if net_kwh[i][month] >=0:
                value = net_kwh[i][month] * kwh_return_profit[month]
            else:
                value = (net_kwh[i][month] * kwh_cost_month[month])
            profit_value.append(value)
        yearlyprof = np.sum(profit_value)

        netpos_value = np.sum(net_kwh[i]) , yearlyprof, combinations[i][0],
combinations[i][1], i
        netpos_array.append(netpos_value)

min_comb_kwh = min(netpos_array, key = lambda x: x[0])
min_comb_cost = min(netpos_array, key = lambda x: x[1])
print('done')

#we want to see this effect in a graph
#in case we want to see different combinations:
target_wind = 20
combinations_array = np.array(combinations)
indices1 = np.where(combinations_array[:, 1] == target_wind)[0]
comb = 21 #number of solar panels
#combination = indices1[comb]

# in case we want combinations based on the netpos array

```

```

target_wind = 50

# Initialize the results array
matching_indices = []

# Search through the netpos_array for matches
for index, entry in enumerate(netpos_array):
    wind_value = entry[3] # 3rd index in each entry corresponds to combinations[i][1]
    if wind_value == target_wind:
        matching_indices.append((index, entry[4])) # Append (index in netpos_array,
        value of i)
#matching indices now shows first the index for within netpos_array and
#second the index in combinations which is useful for the other variables
#comb = 3
#combination = matching_indices[comb][1]

#using optimal found above
#-----
#---leave this combination on if above is not used
combination = min_comb_kwh[4]
print('combination:', combination, combinations[combination])
print('Total MWH produced per year', "%.2f" %
np.sum(total_kwh_array[combination]/10**3), ' MWH')
print('for this combination')
print('m2 solar panels =', combinations[combination][0])
print('n turbines =', combinations[combination][1])
print('minimum turbine distance =', WIND_TURBINE['min_distance'])
totalkwh = np.sum(total_kwh_array[combination])
percturb = np.sum(totwind_kwh_array[combination]) / totalkwh * 100
percsol = np.sum(totsolar_kwh_array[combination])/totalkwh * 100
surf_wind_perc = (combinations[combination][1]*WIND_TURBINE['area']/total_area
* 100
surf_solar_perc = combinations[combination][0]/total_area * 100

print('percent kwh of turbines is', "%.2f" % percturb, "%")
print('percent kwh of panels is', "%.2f" % percsol, "%")
print('area percent of turbines is', "%.2f" % surf_wind_perc, "%")
print('area percent of panels is', "%.2f" % surf_solar_perc, "%")

```

```

#plotting

plt.figure(figsize=(10, 6))

# Bar for solar in yellow
plt.bar(months_solar, totsolar_kwh_array[combination]/10**3, color='yellow',
label='Solar KWh in MWH')

# Bar for wind in green, stacked on top of solar
plt.bar(months_solar, totwind_kwh_array[combination]/10**3,
bottom=totsolar_kwh_array[combination]/10**3, color='green', label='Wind MWH')
#create stairs plot to show monthly needs
edges = np.arange(-.5, 12, 1)
monthly_required_mwh = [x / 10**3 for x in monthly_required]
monthly_required_steps = monthly_required_mwh + [monthly_required_mwh[-1]]
plt.step(edges, monthly_required_steps, where='post', color='red', linewidth=2,
label='Minimum Required MWH')

# Add labels, title, and legend
plt.title("Total Energy Production Per Month (MWH)", fontsize=16)
plt.xlabel("Month", fontsize=12)
plt.ylabel("Energy (MWH)", fontsize=12)
plt.legend(loc="upper left")

# Show the plot
plt.tight_layout()
plt.show()

#net kwh per month graph

# Bar for wind in green, stacked on top of solar
plt.bar(months_solar, net_kwh[combination]/10**3, color='green', label='Net MWH')

# Add labels, title, and legend
plt.title("Net Energy Production Per Month (MWH)", fontsize=16)
plt.xlabel("Month", fontsize=12)
plt.ylabel("Energy (MWH)", fontsize=12)
plt.legend(loc="upper left")

# Show the plot
plt.tight_layout()
plt.show()

##### other results

```

```

print('yearly need', required_power_yearly, "KWH")
yearly_yield = np.sum(total_kwh_array[combination])
print('yearly yield', "%.2f" % yearly_yield, "KWH" )

print('yearly yield in % of yearly need', "%.2f" % ((yearly_yield /
required_power_yearly)*100) )
print('difference is', "%.2f" % (yearly_yield - required_power_yearly), 'KWH')
#now that we have an array of KWH Produced per month
#we want to get the total cost for each combination

initial_costs = []
for combo in combinations:
    solarpanels, turbines = combo
    cost = WIND_TURBINE['cost'] * turbines + solarpanels * SOLAR_PANEL['cost']
    initial_costs.append(cost)
initial_costs = np.array(initial_costs)
print('De initiële kosten van dit project zijn:', "%.2f" %
(initial_costs[combination]/10**6), 'miljoen euro')

#in order to get the yearly cost we need to know each month what we over produced or
missed out
#then we can know the monthly costs/gains and calculate a yearly costs and see how that
stacks up to the costs before.
#then we know the yearly profit
#calculate monthly costs/gains to find yearly costs/gains
#first what did it cost before
yearly_cost_before = []
for month in range(12):
    cost = kwh_cost_month[month] * monthly_required[month]
    yearly_cost_before.append(cost)
yearly_cost = np.sum(yearly_cost_before)
yearlyprof = []
for month in range(12):
    if net_kwh[combination][month] >=0:
        monthlyprof = net_kwh[combination][month]*kwh_return_profit[month]
    else:
        monthlyprof = net_kwh[combination][month] * kwh_cost_month[month]
    yearlyprof.append(monthlyprof)
yearly_gain = sum(yearlyprof)

yearly_profit = yearly_cost + yearly_gain

#how many years would be needed before break even?
break_even = initial_costs[combination]/yearly_profit
print('it would take', "%.2f"% break_even, 'years to recoup the investment costs')

```