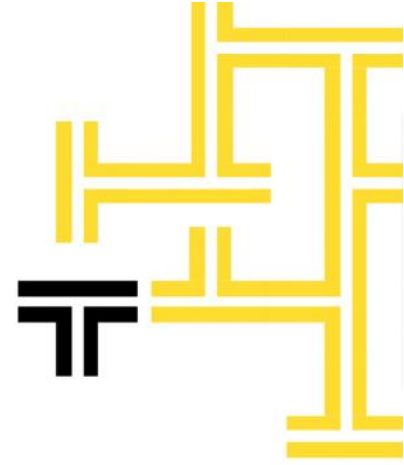




Opgewekt op de flat

**Het Opwekken van Hernieuwbare
Energie in Appartementengebouwen**

Heleen Jeurink

6 juli 2018

UNIVERSITY OF TWENTE.

Opgewekt op de flat

Het opwekken van hernieuwbare energie in appartementengebouwen

Bachelor Eindopdracht voor Civiele Techniek, Universiteit Twente

Auteur: Heleen Jeurink

Opdrachtgever: Trebbe Wonen B.V. te Zwolle

Begeleiders: Nico Blaauw (Trebbe Wonen B.V.)
Silu Bhochhibhoya (Universiteit Twente)
Marc van Buiten (Universiteit Twente)

Datum: 6 juli 2018

Voorwoord

Broodjes kroket, lunchwandelingen, een bezoekje aan Brabant; het zijn een paar onverwachte aspecten van mijn bachelor eindopdracht bij Trebbe Wonen B.V. in Zwolle. Het begon met belangstelling voor (utiliteits)bouw, en hoe dat zo duurzaam mogelijk kan. Toen volgde ik het vak 'Energy Management in Buildings' tijdens mijn minor in Trondheim. Een kleine zoektocht op internet bracht me daarna bij Trebbe en na een prettig gesprek met Nico Blaauw kon ik daar aan de slag. Het was een leerzame periode. Naast de inhoud van mijn opdracht, waarover genoeg te lezen in de rest van dit verslag, heb ik ook een beeld gekregen van wat er in een bouwbedrijf allemaal gebeurt. En hoe het is om hele dagen op kantoor te zitten. Werkend aan een onderzoeksopdracht is dat soms ook wel een beetje saai. Gelukkig waren er dan wel collega's in de buurt voor een praatje, een lunchwandeling of af en toe een lunchlezing.

Natuurlijk wil ik graag Trebbe Wonen B.V. bedanken voor de mogelijkheid om bij hen deze opdracht te doen en vooral Nico Blaauw, mijn begeleider. Ook mijn begeleider van de UT, Silu Bhochhibhoya, en beoordelaar Marc van Buiten wil ik graag danken voor de hulp. Daarnaast hebben Jan Fuite en Jochem Straathof bijgedragen door hun bereidheid om hun vakkennis te delen.

Samenvatting

Om klimaatverandering tegen te gaan, zal de Nederlands overheid in 2020 nieuwe regels instellen voor alle nieuwe gebouwen: de BENG. Bij Trebbe Wonen B.V. bleek echter dat de eis wat betreft opwekking van duurzame energie erg lastig haalbaar is voor appartementengebouwen in het HoogWonen concept: minimaal 50% van de benodigde energie moet zelf hernieuwbaar worden opgewekt. Daarom gaat dit onderzoek op zoek naar de beste manier om toch deze 50% energie op te kunnen wekken. Allereerst zijn alle technieken verzameld die hieraan een bijdrage kunnen leveren, een selectie hieruit is verder uitgewerkt: (1) Luchtwarmtepomp; (2) Zonne-energie; (3) Bodemwarmtepomp; (4) Windenergie.

Uit de energieberekeningen is gebleken dat voor elk concept het behalen van de eisen mogelijk is, echter windenergie heeft weinig mogelijkheden tot verbetering en zal waarschijnlijk op een ongunstige locatie niet kunnen voldoen zonder een ander systeem. Bij het gebruik van zonne-energie of een collectieve bodemwarmtepomp is meer speling waardoor deze ook bij een hoger gebouw of strengere eisen nog toegepast kunnen worden.

In de kostenraming is de luchtwarmtepomp met meerkosten van €1100 per appartement het goedkoopst qua investering, een collectieve warmtepomp is het duurst met ruim €8000 extra per appartement (ten opzichte van de referentie situatie). Ook gebruik van zonne-energie is redelijk goedkoop met zo'n €2500 per appartement. De prijs van windenergie is niet bekend, maar de inschatting is dat deze zeer hoog is. De warmtepompen behoeven echter meer onderhoud dan de andere systemen, waardoor deze jaarlijks hogere kosten hebben. De energiekosten zijn voor de concepten vergelijkbaar, aangezien deze op basis van dezelfde eisen ontworpen zijn.

Kijkend naar de overige aspecten is onder andere efficiëntie beoordeeld: bodemwarmte heeft een hoog rendement en is constant door het jaar heen. Een luchtwarmtepomp en zonne-energie leveren daarentegen de meeste energie in de zomer, terwijl 's winters de vraag het hoogst is. Daarnaast kunnen een luchtwarmtepomp en windturbine overlast veroorzaken. Een collectieve installatie op lage temperatuur heeft minder leidingsverlies, zodat veel energie bespaard wordt ten opzichte van een waterleiding op hoge temperatuur. Hiervoor is echter wel een duur systeem nodig om het water op te warmen voor tapwater. Als laatste zijn luchtwarmtepompen weinig esthetisch, terwijl een zonne-gevel of windturbine een gebouw juist een moderne uitstraling kunnen geven.

Alle bevindingen combinerend in een multi-criteria analyse, komt de aanbeveling naar voren om gebruik te maken van zonne-energie (collectoren en PV-panelen op de gevel). Enkel gekeken naar kosten is een

luchtwarmtepomp het beste alternatief, zo lang het gebouw niet meer dan zo'n 5 lagen telt. Zonne-energie is ook geschikt voor hogere gebouwen. Bij toepassing van een PV-gevel zal wel de capaciteit van het elektriciteitsnet en de mogelijkheid tot energieopslag onderzocht moeten worden.

Summary

The Dutch government introduced a new law for sustainable building, the so-called BENG, in order to stop climate change. At Trebbe Wonen B.V. it turned out however that the rules concerning energy generation are difficult to meet for their apartment buildings: at least 50% of the energy demand must be met. First, all possible techniques are summarized, out of which a selection is made to be evaluated: (1) Air source heat pump; (2) Solar energy; (3) Geothermal heat pump; (4) Wind energy.

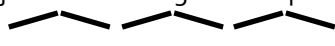
According to the energy performance calculations, it turns out that all concepts can meet the BENG-requirements. However, wind-energy is on the edge and won't be sufficient without any other sustainable system. The use of solar and wind energy is on the other hand more promising, even for higher buildings or more strict requirements.

Secondly, costs are evaluated. As for the investment, the air source heat pump is the cheapest with additional costs of €1100, a collective geothermal heat pump is the most expensive with over €8000 of additional costs (compared to the reference situation). Using solar energy is affordable too: about €2500 of additional costs. Costs for the wind energy system have not been released. The heat pumps have higher maintenance costs though, which makes this less profitable on the longer term. Besides, the lifetime of heat pumps is shorter than solar panels or collectors. This makes the life-cycle costs for air heat pump and solar energy comparable, despite different investment costs.

Looking at other aspects, also efficiency is evaluated: geothermal heat is very efficient and constant throughout the year. An air sourced heat pump and solar energy generate however the most energy in summer, whilst the main energy demand is during winter. Besides, air heat pumps and a wind turbine can cause noise disturbances. A low temperature water distribution system has low energy losses, but needs an expensive system to boost temperature for the use of tap water. Finally, air heat pumps are not quite esthetic, but a solar wall or wind turbine can on the other hand modernize a building's appearance.

All in all, the multi-criteria analysis states that solar energy should be used (combination of solar collectors and solar façade). Only considering costs, the air sourced heat pump would be best, as long as the building's height does not exceed circa 5 floors. Solar energy is however suitable for higher buildings. The application of a solar façade leads to the need for investigation of the local power grid and next to that the possibility of use of energy storage.

Begrippenlijst

<i>All-electric woning</i>	Een woning zonder gasaansluiting, enkel op het elektriciteitsnet aangesloten.
<i>BENG-eisen</i>	'Bijna Energie Neutrale Gebouwen'. Nieuwe eisen met betrekking tot duurzaamheid in de bouw die vanaf 2020 ingevoerd zullen worden.
<i>BIPV</i>	Building Integrated PhotoVoltaics, oftewel zonnepanelen geïntegreerd in een gebouw.
<i>Bodemwarmte</i>	Warmte uit ondiepe bodem (<500m diepte). Is in principe zonne-energie.
<i>Boosterwarmtepomp</i>	Verhoogt water van lage temperatuur naar hoge temperatuur, op basis van het warmtepompprincipe. Wordt toegepast om water voor lage-temperatuur verwarming ook voor warmtapwater te kunnen gebruiken.
<i>Duurzame energie</i>	Energie waarvan de opwekking het milieu niet belast.
<i>Elektrische energie</i>	Energie in de vorm van elektrisch geladen deeltjes. Bij een spanningsverschil gaan elektronen bewegen: elektrische energie.
<i>Gebouwgebonden energieverbruik</i>	Dit omvat de energie benodigd voor installaties in het gebouw. Inclusief verwarming, warmwatervoorziening, koeling en verlichting.
<i>Gebruiksgebonden energieverbruik</i>	Dit omvat de energie voor apparaten. Inclusief de waterkoker, wasmachine, computer, et cetera.
<i>Geothermie</i>	Bodemwarmte uit diepe bodem (>500m diepte), afkomstig vanuit aardkern.
<i>Hernieuwbare energie</i>	Energie afkomstig van een onuitputtelijke bron. Biomassa is bijvoorbeeld wel hernieuwbaar, maar minder duurzaam door uitstoot van CO ₂ en fijnstof.
<i>MCA</i>	Multi-Criteria Analyse. Methode om alternatieven systematisch en transparant te vergelijken.
<i>Omvormer</i>	Apparaat dat gelijkstroom omzet in wisselstroom. Wordt gebruikt om elektriciteit uit zonne- of windenergie bruikbaar te maken voor het elektriciteitsnet.
<i>O/W-opstelling</i>	Opstelling voor PV-panelen waarbij deze niet op zuid maar in afwisselende richting georiënteerd zijn, oriëntatie is daarbij niet van belang. Geeft optimale opbrengst op beperkt oppervlak. Zijaanzicht: 
<i>PV-paneel</i>	Photovoltaïsch zonnepaneel, het 'standaard' zonnepaneel dat stroom opwekt uit zonne-energie. Dit om te onderscheiden van een zonnecollector, die thermische energie opwekt.
<i>Thermische energie</i>	Energie in de vorm van warmte.
<i>Warmtepomp</i>	Een apparaat dat energie overdraagt van het ene naar het andere medium, voornamelijk gebruikt om een lage temperatuur om te zetten naar hoge temperatuur. (Zie ook Paragraaf 4.4)
<i>Warmtepompboiler</i>	Deze boiler verwarmt warmtapwater volgens het warmtepompprincipe, met als bron warmte uit afgezogen ventilatielucht.
<i>Warmtewisselaar</i>	Brengt thermische energie over van de ene naar de andere warmtedrager. Wordt bijvoorbeeld gebruikt om warmte uit de bodem te onttrekken naar vloeistof in de bodembron van een bodemwarmtepomp.
<i>WKK</i>	Warmtekrachtkoppeling, het gebruik van afvalwarmte in de elektriciteitsproductie.
<i>WKO</i>	Warmte-koude opslag, systeem voor energieopslag in de bodem. Grondwater wordt gebruikt als buffer voor warmte ('s zomers) en koude ('s winters).

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting.....	3
Summary.....	4
Begrippenlijst	5
1 Inleiding.....	8
1.1 Probleemstelling	8
2 Doelstelling	9
2.1 Onderzoeksvragen	9
3 Methode.....	9
3.1 Deelvraag 1 – Theoretisch kader.....	9
3.2 Deelvraag 2 – Conceptkeuze	10
3.3 Deelvraag 3 – Conceptevaluatie.....	10
3.4 Deelvraag 4 – Vergelijking en conclusie	11
3.5 Leeswijzer	11
4 Theoretisch kader.....	12
4.1 Concept HoogWonen	12
4.2 BENG-eisen	12
4.3 Overige eisen en regels.....	13
4.4 Werking warmtepomp	14
4.5 Duurzaam wonen	15
4.6 Huidige situatie	16
5 Conceptkeuze.....	17
5.1 Beschikbare technieken.....	17
5.2 Criteria	18
5.3 Afweging technieken.....	18
5.4 Concept 0 – Referentie	19
5.5 Concept 1 – Omgevingsluchtwarmte	19
5.6 Concept 2 - Zonne-energie	19
5.7 Concept 3 – Bodemwarmte	20
5.8 Concept 4 - Wind	20
6 Energieopbrengst	20
6.1 Concept 0 – Referentie	20
6.2 Concept 1 – Omgevingsluchtwarmte	21
6.3 Concept 2 – Zonne-energie	21
6.4 Concept 3 – Bodemwarmte	23

6.5	Concept 4 – Wind	23
6.6	Validatie resultaten	24
6.7	Gevoeligheidsanalyse	24
7	Kostenberekening	24
7.1	Theorie	24
7.2	Investerings- en onderhoudskosten	25
7.3	Subsidie	26
7.4	Levensduur	26
7.5	Conclusie	27
8	Kwalitatieve criteria	27
8.1	Maakbaarheid	28
8.2	Veiligheidsrisico	29
8.3	Efficiëntie	30
8.4	Installatie	30
8.5	Overlast	30
8.6	Esthetisch	31
9	Multi Criteria Analyse	31
9.1	Gevoeligheidsanalyse	32
10	Conclusie	32
11	Discussie	33
12	Aanbevelingen	34
13	Bibliografie	35
	Bijlage A – Voor-/Nadelen technieken	38
	Bijlage B – Globale berekening concepten	40
	Bijlage C – Beschikbaar oppervlak PV	42
	Bijlage D – Uniec rapport referentiesituatie	44
	Bijlage E – Uniec berekeningen	49
	Bijlage F – Gevoeligheidsanalyse Uniec ²	55
	Bijlage G – Kostenberekening	56
	Bijlage H – Installaties	59
	Bijlage I – MCA	60

1 Inleiding

De laatste jaren horen we meer en meer dat we onze leefstijl moeten gaan aanpassen om klimaatverandering tegen te gaan en zo 'de wereld te redden'. Met onze enorme CO₂-uitstoot beïnvloeden we het klimaat en door toenemende urbanisatie lijkt dit probleem zich alleen maar uit te breiden. Om dit aan te pakken hebben de Verenigde Naties de Sustainable Development Goals opgezet, waaronder de volgende speerpunten: schone energie (7); duurzame steden (11); klimaatactie (13) (Verenigde Naties, 2015).

In Nederland is momenteel 14% van de elektriciteit afkomstig van hernieuwbare bronnen (CBS, 2018), maar van de totale energie (zowel elektrische als thermische energie) is slechts 6,6% hernieuwbaar (CBS, 2018). Met de opkomende beweging #vangaslos en de energietransitie maakt Nederland stappen in de juiste richting, maar er zijn nog flinke verbeteringen nodig om deze 6,6% te verdubbelen tot de doelstelling voor 2020: 14% (Europese Commissie, 2017). In de huidige trend wordt de 10% niet eens gehaald (Grafiek 1).

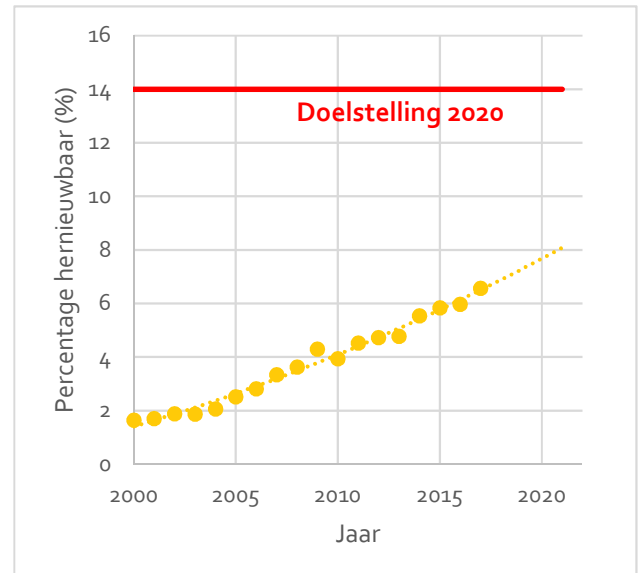
Wanneer men bedenkt dat 40% van de totale energieconsumptie afkomstig is van gebouwen (Europees Parlement, 2010) en 75% van deze gebouwen energie-inefficiënt is (Europese Commissie, 2016), mag het duidelijk zijn dat er grote winst te behalen is in de bouwsector. Er is echter een groot aantal percepties van 'duurzaam bouwen': materiaalkeuze, afvalmanagement, gezond binnenklimaat, hernieuwbare energie opwekken, multifunctioneel ontwerpen, veerkrachtig ontwerp et cetera.

Om dit te concretiseren heeft de Nederlandse overheid nieuwe eisen in het leven geroepen: Bijna Energie Neutrale Gebouwen (BENG). Alle nieuwe gebouwen worden vanaf 2020 beoordeeld op de drie BENG-indicatoren: energiebehoefte, primair fossiel energieverbruik en het aandeel hernieuwbare energie.

1.1 Probleemstelling

Het probleem waar Trebbe Wonen B.V. nu tegenaan loopt is dat al vanaf 5 verdiepingen de BENG-3 eis van 50% hernieuwbare energie nauwelijks haalbaar is, zelfs wanneer het gehele dak bedekt wordt met PV-panelen (Trebbe HoogWonen, 2017). Ook enkele andere onderzoeken wijzen ditzelfde probleem uit: in een artikel van Staal-Guijt (2015) blijkt de eis voor 5 verdiepingen enkel haalbaar met gebruik van een warmtepomp of stadsverwarming, maar bij een hoogte van 11 verdiepingen blijkt geen van de door hen berekende opties aan deze 50% te kunnen voldoen. Ook in een onderzoek van Van der Heide, Vreeman & Valk (2016) worden enkele innovatieve opties voor energieopwekking doorgerekend. Hieruit resulteert dat enkel toepassing van een collectief systeem met boosterwarmtepomp dit aandeel significant verhoogt, gebruik van een warmtepomp en gebouw geïntegreerde PV-panelen leveren in mindere mate ook een verbetering.

De genoemde onderzoeken laten zien dat er nog niet voldoende kennis beschikbaar is over mogelijke oplossingen die Trebbe zou kunnen toepassen in hun HoogWonen concept. Bovendien zijn de afgelopen jaren veel technieken (door)ontwikkeld, waardoor eerdere relevante onderzoeken al vaak achterhaald zijn. Daarom zullen in dit onderzoek enkele mogelijkheden uitgewerkt worden om de appartementengebouwen van Trebbe aan de nieuwste duurzaamheidseisen te laten voldoen. Op basis van een vergelijking van deze opties wordt vervolgens een aanbeveling gegeven welke oplossing het meest geschikt is om uit te voeren.



Grafiek 1: Aandeel hernieuwbare energie tot 2017 (groen) en doelstelling 2020 (rood) (CBS, 2018)

2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om een aanbeveling te geven op welke manier het best hernieuwbare energie opgewekt kan worden in appartementengebouwen, zodat de nieuwe BENG-eisen gehaald kunnen worden. Een aantal opties zullen op verschillende criteria beoordeeld worden waarmee bepaald kan worden welke optie het meest geschikt is voor de toepassing van Trebbe.

Het onderzoek is niet gericht op energiebesparing (BENG 1 en 2), aangezien dit tot nu toe geen problemen heeft opgeleverd. Energiebesparende maatregelen zoals isolatie en slimme installaties worden daarom niet meegenomen. De uitkomst moet geschikt zijn voor verschillende situaties en op verschillende locaties in Nederland, dus er wordt verondersteld dat er geen stadsverwarming of andere locatieafhankelijke energiebron beschikbaar is. Ook een gasaansluiting is niet meer mogelijk in verband met het besluit van de Nederlandse overheid om vanaf juli 2018 geen bouwaanvragen op gas meer te accepteren.

2.1 Onderzoeksvragen

De vraag waar dit onderzoek antwoord op zal geven luidt:

Wat is de beste oplossing om het HoogWonen concept van Trebbe Wonen B.V. in de toekomst te laten voldoen aan de voorgenomen BENG-3 eis, waarbij minimaal 50% van de benodigde energie zelf duurzaam opgewekt moet zijn?

Deze vraag is onderverdeeld in 4 deelvragen. Het beantwoorden van deze vragen moet leiden tot het antwoord op de hoofdvraag.

Q1: Wat moet er aan de huidige situatie veranderen om gebouwen te verduurzamen zodat aan de BENG-criteria voldaan kan worden?

Q2: Welke technieken zijn beschikbaar voor het opwekken van hernieuwbare energie in appartementengebouwen?

Q3: In hoeverre kunnen de vier concepten, opgesteld op basis van deelvraag 2, aan de eisen en criteria voldoen?

Q4: Welk concept is de beste oplossing om de duurzaamheidseisen te behalen?

Met de antwoorden op bovenstaande vragen zal het mogelijk zijn een gegrond advies te geven aan toekomstige cliënten van Trebbe Wonen B.V. wat betreft het opwekken van hernieuwbare energie.

3 Methode

Het onderzoek wordt uitgewerkt aan de hand van de in Paragraaf 2.1 opgestelde deelvragen. In dit hoofdstuk wordt daarom per deelvraag de gebruikte methode toegelicht. In praktijk wordt deze volgorde echter niet volledig aangehouden aangezien er een wisselwerking bestaat tussen de opeenvolgende stappen. Wanneer bijvoorbeeld uit een kostenanalyse blijkt dat een concept eenvoudig goedkoper gemaakt kan worden, moet het originele concept aangepast worden en daarmee ook de energieberekeningen. Door te itereren zullen de concepten vanuit de verschillende oogpunten geoptimaliseerd worden.

3.1 Deelvraag 1 – Theoretisch kader

Allereerst is het van belang voldoende achtergrondkennis te hebben om het onderzoek te beginnen. Daarom zal over een aantal onderwerpen een deskresearch uitgevoerd worden om antwoord te geven op de volgende vragen:

- Hoe ziet het gebouw eruit waar de oplossing op toegepast moet kunnen worden?
- Wat zijn de nieuwe BENG-eisen?
- Zijn er andere eisen waaraan voldaan moet worden?

- Wat is de huidige situatie in Nederland wat betreft duurzaam wonen? Wat zijn de uitdagingen en aandachtspunten?

Wanneer deze vragen beantwoord zijn, beschikt men over voldoende achtergrondkennis om mogelijke concepten te gaan opstellen en logisch te kunnen redeneren over de effectiviteit en haalbaarheid hiervan.

3.2 Deelvraag 2 – Conceptkeuze

In de tweede deelvraag worden kaders voor de vier concepten gevormd. Er kunnen natuurlijk meer concepten gemaakt worden, maar door de beschikbare tijd is gekozen om vier concepten uit te werken. Hiervoor worden eerst alle technieken geïnventariseerd die duurzame energie op kunnen wekken in het appartementengebouw, zowel gangbare als geheel nieuwe technieken. Door middel van een deskresearch worden ook de voor- en nadelen van toepassing van deze technieken bekeken. Deze zijn ook deels te vinden door extreme projecten te bekijken zoals een energieneutrale wolkenkrabber, door te praten met specialisten uit de sector en door de laatste trends te volgen via het nieuws, tijdschriften en beurzen. Voor het bepalen van voor- en nadelen is het bovendien belangrijk praktijkervaring mee te nemen van de begeleider en bijvoorbeeld een installateur.

Gebaseerd op de voor- en nadelen worden de criteria vastgesteld waarop de concepten geëvalueerd zullen worden. Hoe aan deze criteria waarden worden toegekend en hoe daaruit een conclusie zal volgen, wordt bij deelvraag 4 bepaald.

Uit de gevonden technieken moeten als laatste de concepten gevormd worden. Hieruit wordt een selectie gemaakt die toepasbaarheid, duurzaam en doeltreffend is. De overgebleven technieken uit deze selectie worden vervolgens vergeleken aan de hand van de eisen, criteria en aandachtspunten uit de eerste deelvraag. Hieruit volgen de kaders voor de concepten: tijdens de conceptevaluatie worden deze in steeds meer detail uitgewerkt volgens het systems engineering principe.

3.3 Deelvraag 3 – Conceptevaluatie

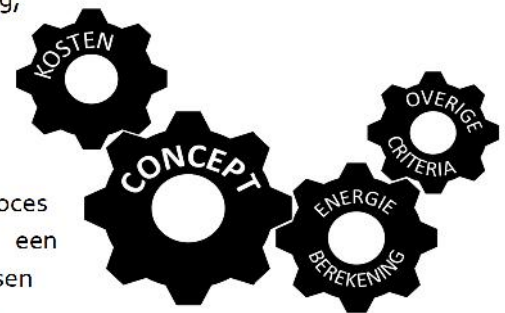
De opgestelde concepten worden vervolgens eerst verder ingevuld op basis van de BENG-eisen, deze concepten moeten vanzelfsprekend uitvoerbaar en veilig zijn. De uitkomsten hiervan worden gebruikt voor kostenberekening. De overige eisen worden kwalitatief beoordeeld en zullen ook minder zwaar wegen in de uiteindelijke vergelijking.

Voor de beoordeling van concepten moet een duidelijk referentiepunt zijn ten opzichte waarvan de concepten vergeleken worden. Hiervoor wordt de huidige 'all-electric BENG' oplossing binnen het HoogWonen concept gebruikt die ook aan de gestelde eisen voldoet, maar niet een efficiënte oplossing lijkt te zijn. Uit de energieberekening volgt dus de besparing ten opzichte van dit referentiepunt; uit de kostenberekening volgen de meerprijs in de investering en de winst in de gebruiksfase.

De energieberekeningen zullen uitgevoerd worden in het rekenprogramma Uniec^{2,2}. Hierin kunnen de eigenschappen van het gebouw en installaties worden ingevoerd, vervolgens berekent het programma het energieverbruik en onder meer de 3 BENG-indicatoren. Hiervoor wordt een basisbestand gebruikt wat het referentiegebouw voorstelt, dat vervolgens per concept aangepast wordt. Dit betekent in praktijk dat het verwarmingssysteem, het warmwatersysteem en een PV-installatie aangepast kunnen worden, de karakteristieken van het gebouw zelf blijven onaangepast.

De kostenberekening is gebaseerd op een inschatting van de investering, onderhoudskosten en subsidie. De jaarlijkse energiekosten volgen uit de energieberekening. Op basis van de levensduur wordt vervolgens de netto constante waarde bepaald. Als laatste worden de overige kwalitatieve criteria beoordeeld per concept.

Bij deze deelvraag speelt de iteratieve eigenschap van een ontwerpproces een belangrijke rol. Uit elke berekening of beoordeling blijkt een verbeterpunt van het concept. Door het concept hierop aan te passen moeten ook de eerdere berekeningen bijgewerkt worden, waardoor deze deelvraag veel tijd in beslag zal nemen. Het is afhankelijk van de beschikbare tijd in hoeverre de concepten geoptimaliseerd kunnen worden.



Figuur 1: Onderlinge afhankelijkheid ontwerpproces

3.4 Deelvraag 4 – Vergelijking en conclusie

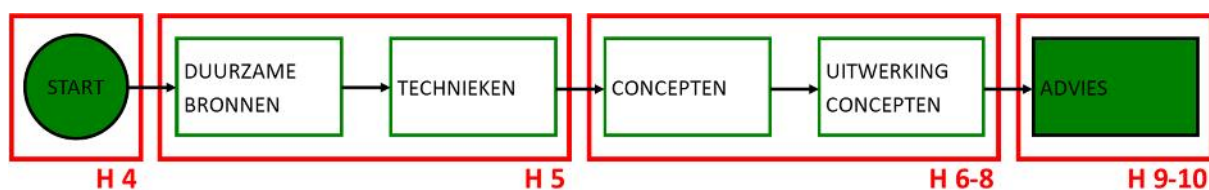
Om tot resultaten en een aanbeveling te komen, moeten de concepten met elkaar vergeleken worden en de voor- en nadelen afgewogen. Dit zal gebeuren aan de hand van een multi-criteria analyse (MCA). Deze methode geeft een systematisch en transparant framework, bedoeld voor evaluatie van complexe projecten met tegengestelde belangen. Bij dit onderzoek is bijvoorbeeld het doel om een zo hoog mogelijke energie-efficiëntie, maar ook zo laag mogelijke kosten te bereiken. De MCA-methode kan hierbij helpen en inzicht geven in het keuzeprocess.

Elk criterium krijgt een weging, afhankelijk van de partijen die baat hebben bij het criterium en in welke mate zij invloedrijk zijn. Vervolgens worden de resultaten van deelvraag 3 genormaliseerd, dat wil zeggen dat de uitkomsten elk criterium geschaald worden zodat deze vergelijkbaar zijn. Hieruit volgt een eindscore voor elk concept en blijkt welke optie het meest geschikt is om toe te passen in het concept HoogWonen. Aangezien de perceptie van 'beste optie' subjectief is, komt er daarnaast een beknopt overzicht met de belangrijkste kentallen en voor- en nadelen van elk concept.

Als laatste stap van het onderzoek zal de onzekerheid van de uitkomsten geëvalueerd moeten worden. Dit betreft met name de energieberekening, de kostenbepaling en de multi-criteria analyse. Door inputwaarden te variëren wordt het effect op de uitkomsten eenvoudig zichtbaar en kan een inschatting van de onzekerheid gemaakt worden. Hiermee en met alle opgedane kennis tijdens het onderzoek, zal het resultaat kritisch bediscussieerd worden en kan de laatste hand aan de aanbeveling gelegd worden.

3.5 Leeswijzer

In Hoofdstuk 4 wordt allereerst de benodigde theoretische kennis uitgelegd. Dan worden de kaders van de concepten opgesteld met een toelichting van deze conceptkeuze (Hoofdstuk 5). Alle concepten worden hierna doorgerekend op energieprestatie (Hoofdstuk 6) en beoordeeld op de kostenberekening en de overige criteria (Hoofdstuk 7). Tijdens dit proces zullen de concepten in steeds meer detail beschreven worden. De resultaten van de beoordeling worden gebruikt voor een vergelijking in de vorm van een multi-criteria analyse (Hoofdstuk 8) om daarmee een conclusie op te maken uit de resultaten en vervolgens een aanbeveling op te stellen voor Trebbe en toekomstige klanten.



Figuur 2: Leeswijzer

4 Theoretisch kader

In dit hoofdstuk wordt de theoretische achtergrond uitgelegd die benodigd is om de aanpak van dit onderzoek te begrijpen. Allereerst zal het concept HoogWonen worden toegelicht, waarop de uitkomst van het onderzoek toepasbaar moet zijn. Vervolgens volgt een achtergrond over duurzaamheid in de bouw met als conclusie de belangrijkste kansen om hierin een verbetering te realiseren.

4.1 Concept HoogWonen

Trebbe HoogWonen heeft twee nieuwe standaardconcepten voor appartementengebouwen: het gebouw met centrale ontsluiting of met galerijontsluiting (resp. links en rechts in Figuur 3), beide zijn standaard 3-6 verdiepingen (15-46 appartementen) maar kunnen in de toekomst ook hoger gemaakt worden. De gebouwen hebben momenteel een EPC tussen 0,4 en -0,5, maar voldoen nog niet standaard aan de BENG (zie voor uitleg Paragraaf 4.4 en 4.2). Het meest toegepaste concept is de centrale ontsluiting.



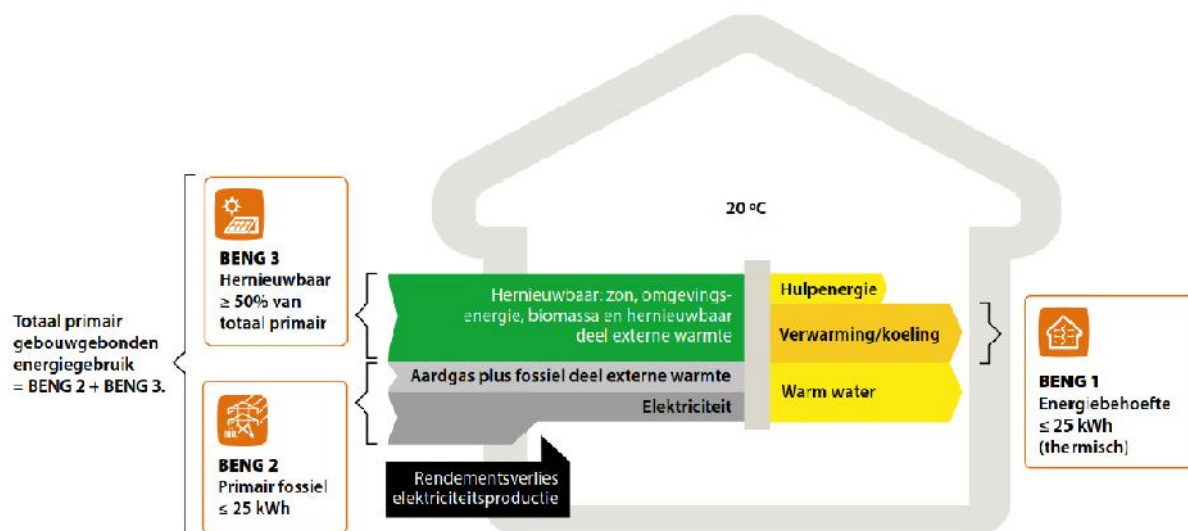
Figuur 3: HoogWonen concepten centrale ontsluiting (links) en galerijontsluiting (rechts)

Uitgangspunt voor dit onderzoek is het appartementengebouw met centrale ontsluiting van 6 verdiepingen. Deze bevat in totaal 32 appartementen van 70 m² elk: 6 per verdieping en op de begane grond 2 appartementen en 32 bergingen. De huidige appartementen hebben een cv-ketel in de berging, in de appartementen is een boiler en ruimte voor een eventuele stadsverwarmingsunit of warmtepomp.

Het huidige concept HoogWonen kan worden aangeboden in 3 verschillende opties wat betreft energieverbruik: gasverbruik, all-electric en all-electric met warmtepomp. Hierbinnen kan vervolgens nog gekozen worden voor 'Bouwbesluit' ('BENG' vanaf 2020), 'Energie neutraal' of 'Nul-op-de-meter'.

4.2 BENG-eisen

Momenteel is het wettelijk verplicht een energielabel en EPC-berekening uit te voeren volgens NEN7120. De Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) wordt sinds 1995 gebruikt om de energie efficiëntie van een gebouw te kwantificeren, de bijbehorende eisen zijn enkele malen aangescherpt en sinds 2015 mag de EPC maximaal 0,4 zijn (EPC=0 betekent energieneutraal). Daarnaast is er het energielabel, een relatief eenvoudige afspiegeling van de energieprestatie, gebaseerd op isolatie en installaties. Een label ligt tussen A (zeer zuinig) en G (zeer onzuinig). (Warmtepomp Info, 2017)



Figuur 4: BENG-eisen geschematiseerd (LenteAkkoord, 2017)

Vanaf 2020 zal de NEN7120 vervangen worden door NTA8800: de zogenaamde BENG (Bijna Energie-Neutrale Gebouwen). De voorlopige eisen¹ zijn weergegeven in Tabel 1 en Figuur 4: BENG-eisen geschematiseerd. De energieprestatie wordt in de nieuwe methode gemeten aan de hand van de 3 BENG-indicatoren:

1. BENG 1 Energiebehoefte (kWh/m²/jaar)
energieverbruik voor verwarming en koeling
2. BENG 2 Primair fossiel energieverbruik (kWh/m²/jaar)
Primair energieverbruik voor verwarming, koeling, warmtapwater en ventilatie
Bij primair energieverbruik worden ook systeemverlies, hulpenergie en rendement meegerekend
3. BENG 3 Aandeel hernieuwbare energie (%)
Bepaald door
$$\frac{\text{hernieuwbare energie}}{\text{hernieuwbare energie} + \text{primair energiegebruik}}$$

(LenteAkkoord, 2017)

In het concept HoogWonen en in andere hoogbouw blijkt het behalen van deze eisen echter erg moeilijk. BENG 1 en 2 kan vaak aan voldaan worden door goede isolatie en zuinige installaties, maar BENG 3 lijkt alleen mogelijk door PV-panelen op het omliggende terrein en/of een warmtepomp te plaatsen. In het vervolg van dit onderzoek wordt gekeken naar een oplossing om de eisen toch te kunnen halen (Tabel 1).

Gebouwfunctie	1 – Energiebehoefte (kWh/m ² /jaar)	2 – Primair fossiel energieverbruik (kWh/m ² /jaar)	3 – Aandeel hernieuwbare energie (%)
Woningen en woongebouwen	25	25	50
Utiliteitsgebouwen	50	25	50
Onderwijsgebouwen	50	60	50
Gezondheidszorggebouwen	65	120	50

Tabel 1: BENG-eisen (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2017)

4.3 Overige eisen en regels

Niet alleen op nationaal niveau maar ook internationaal zijn regels en doelen gesteld wat betreft het energieverbruik in gebouwen. In deze paragraaf een overzicht van de eisen waaraan voldaan moet worden.

¹ Waarschijnlijk worden de BENG-eisen halverwege 2018 bijgesteld

4.3.1 Mondiaal

Vanuit de Verenigde Naties zijn in 2015 de 'Sustainable Development Goals' vastgesteld. Het uitgangspunt is het beschermen van mensen, aarde, welvaart, vrede en partnerschap. Deze Sustainable Development Goals zijn de basis voor zowel Europees als nationaal beleid. Op het vlak van duurzaam bouwen zijn doel 7, betaalbare en schone energie, en 13, klimaatactie, als uitgangspunt genomen. Conform deze punten is op de klimaattop in Parijs besloten dat de aarde niet meer dan 2 graden mag opwarmen.



Figuur 5: VN Doelen (Verenigde Naties, 2015)

4.3.2 Europees

De mondiale doelen zijn door de Europese Commissie doorgetrokken naar het 'Clean energy for all Europeans' beleid, met als eerste mijlpaal het 20-20-20 plan: 20% minder CO₂-uitstoot (t.o.v. 1990), 20% van de energie hernieuwbaar en 20% verbetering in energie-efficiëntie voor 2020. Deze doelen zijn uitgebreid naar mijlpalen in 2030 en 2050. (Europese Commissie, 2009)

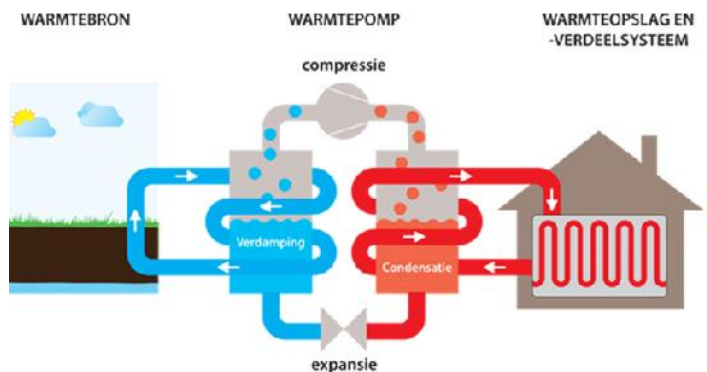
Het beleid is geconcretiseerd in de EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), waarin de regelgeving voor gebouwen gegeven wordt. In artikel 9 wordt beschreven dat uiterlijk 31 december 2020 alle nieuwe gebouwen bijna energie-neutraal dienen te zijn, een begrip dat elke lidstaat zelf mag definiëren (Europees Parlement, 2010).

4.3.3 Nationaal

In Nederland is sinds 2012 het nieuwe Bouwbesluit van toepassing op alle nieuwe en bestaande bouwwerken, om veiligheid en bruikbaarheid te waarborgen. Deze is gebaseerd op de EPBD. In het Bouwbesluit is momenteel de EPC opgenomen, dit zal vervangen worden door de BENG. Wanneer hieraan voldaan, worden dus automatisch ook de Europese eisen gehaald.

4.4 Werking warmtepomp

Warmtepompen kunnen een verschillende bron gebruiken maar het principe van warmtewinning blijft gelijk. In deze paragraaf volgt een beknopte uitleg van dit warmtepomp principe.



Figuur 6: Warmtepomp Principe (Zonne-paneel.net)

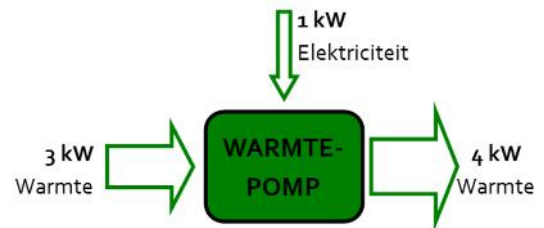
Het systeem bestaat uit 3 aparte gesloten leidingen. Het eerste neemt warmte op uit de omgeving en verwarmt hiermee vloeistof in de tweede leiding zodat dit verdampt. Een compressor verhoogt de druk op het gas, waarmee ook de temperatuur verhoogt. Dit gas geeft zijn warmte vervolgens af aan water in de derde leiding, wat direct voor verwarming van de woning gebruikt kan worden. Het gas condenseert tijdens dit proces en bij het expansieventiel verlagen zowel de druk als temperatuur, zodat de vloeistof weer warmte op kan nemen uit de eerste leiding en opnieuw het proces kan doorlopen.

Als warmtebron zijn verschillende opties mogelijk:

- Lucht;
- Oppervlaktewater;
- Gesloten bodembron;

- Open bodembron, in plaats van een gesloten leiding wordt hierbij grondwater opgepompt en na gebruik op lage temperatuur weer in de bodem gepompt.

Het rendement van een warmtepomp wordt vaak weergegeven in de COP (Coëfficiënt of Performance) en geeft de verhouding weer tussen toegevoegd en afgegeven vermogen. In het voorbeeld van Figuur 7 is de COP dus $\frac{4}{1} = 4$ of 400%



Figuur 7: Warmtepomp met COP 4 of 400%

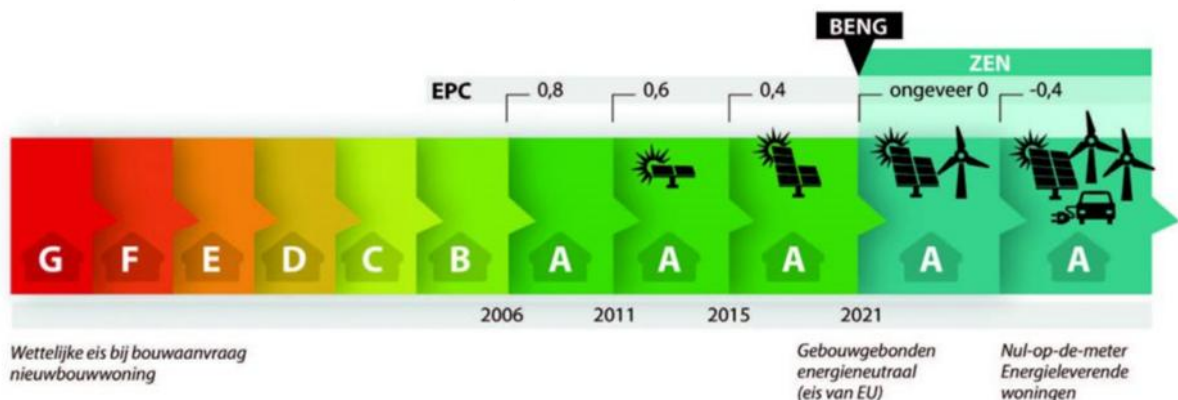
4.5 Duurzaam wonen

Op het gebied van duurzaam wonen worden verschillende aanduidingen gehanteerd die elk een iets andere betekenis hebben. Daarom hierbij alle termen op een rijtje:

BENG	Bijna Energie Neutrale Gebouwen (zie ook Paragraaf 4.2)
(n)ZEB	nearly Zero Energy Building = BENG
Energie neutraal	EPC=0, gebouwgebonden energieneutraal (Inclusief installaties)
Nul op de meter (NoM)	Energierkening=0, gebouw- en gebruiksgebonden energieneutraal (Inclusief installaties en gebruik huishoudelijke apparaten)
ZEN	Zeer Energiezuinige Nieuwbouw. "Van BENG tot energieleverend, met de bewoner als uitgangspunt."
Passief huis	Maakt optimaal gebruik van passieve verwarming (zon, bewoners, apparaten). Geeft energieverbruik weer.

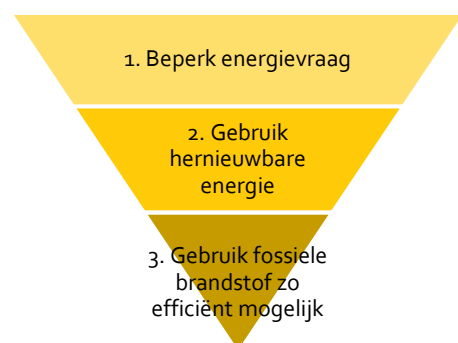
Tabel 2: Energieprestatie termen (Blaauw, 2017)

In onderstaande figuur zijn nogmaals deze termen geïllustreerd, met daarbij de ontwikkeling van wettelijke eisen van de afgelopen paar jaar. Vanaf 2021 moet alle nieuwe gebouwen dus minimaal gebouwgebonden energieneutraal zijn (dat wil zeggen wanneer met de installatie voor verwarming en warm tapwater meerekent, zonder huishoudelijke apparaten).



Figuur 8: Energieprestatie nieuwbouwwoningen (Hendriks Coppelmans)

Als handvat wordt vaak het Trias Energetica (Figuur 9) gebruikt waarin drie stappen worden beschreven richting een duurzaam gebouw (Eurima, n.d.). Volgens dit principe moet men eerst proberen energieverbruik te voorkomen, vervolgens kan duurzame energie gebruikt worden en waar geen andere oplossing mogelijk is, moeten fossiele brandstoffen zo efficiënt mogelijk gebruikt worden. De methode van BENG kan vergeleken worden met de bestaande theorie van het 'Trias Energetica'. De BENG werkt, met een kleine aanpassing in volgorde, volgens hetzelfde principe (Tabel 3).



Figuur 9: Trias Energetica

Trias Energetica

- Stap 1: Energieverbruik beperken
- Stap 2: Hernieuwbare energie
- Stap 3: Efficiënt energiegebruik

BENG

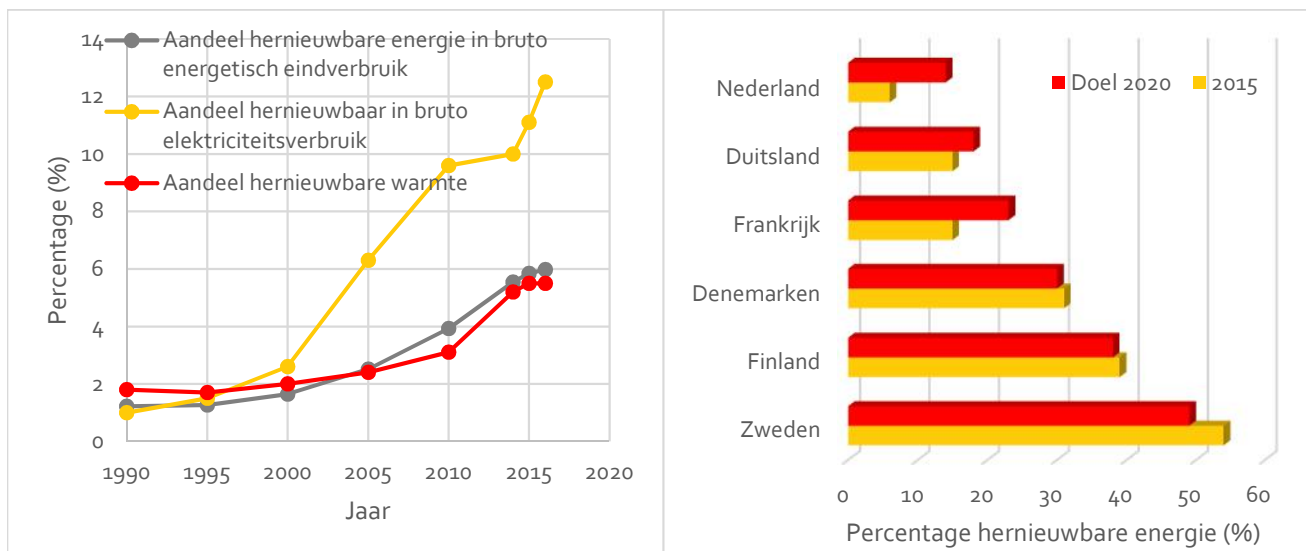
- BENG 1: Energiebehoefte
- BENG 3: Hernieuwbare energie
- BENG 2: Primair fossiel energiegebruik

Tabel 3: Trias Energetica vergeleken met BENG

Hernieuwbare energie kan verdeeld worden in elektriciteit en warmte. Hernieuwbare bronnen zijn oneindig, dit in tegenstelling tot fossiele brandstoffen. De meest gebruikte hernieuwbare bronnen zijn zonne-energie, wind, bodemwarmte, waterkracht en biomassa (U.S. Energy Information Administration, 2017). Duurzame energie is behalve hernieuwbaar ook niet-milieubelastend.

4.6 Huidige situatie

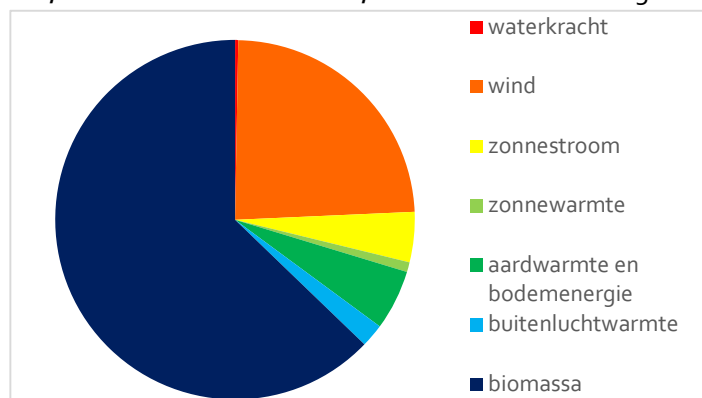
In een gemiddeld 2-persoons appartement wordt per jaar ongeveer 3.000 kWh elektriciteit en 1.000 m³ gas (staat gelijk aan ongeveer 10.000 kWh) verbruikt (Milieu Centraal, 2015). Zo'n 75% van het totale gasverbruik wordt gebruikt voor verwarming, wat neerkomt op ruim 55% van het totale energiegebruik. In Nederland is in 2017 slechts 6,6% van deze verbruikte energie hernieuwbaar, bij warmte-energie ligt dat percentage zelfs nog significant lager dan bij elektriciteit (Grafiek 2) (CBS, 2017).



Grafiek 2: Aandeel hernieuwbare energie in Nederland (links); Klimaatdoelen in Europa (rechts) (CBS, 2017)

Het aandeel hernieuwbare energie is de afgelopen jaren weliswaar gestegen, maar wanneer vergeleken met de rest van Europa blijken de Nederlandse resultaten toch tegen te vallen. De meeste landen hebben hun 2020-doelstelling in 2015 al (bijna) gehaald, maar Nederland is met 6,6% zelfs niet halverwege de doelstelling van 14% (CBS, 2018).

In Nederland wordt verreweg het grootste gedeelte van de hernieuwbare energie opgewekt uit biomassa, ook wind levert een aanzienlijk aandeel. Op het vlak van zonne-energie en aard- en bodemwarmte valt de Nederlandse markt tegen, zo is in Europa gemiddeld 9% van de hernieuwbare energie zonne-energie, tegen 2% in Nederland (CBS, 2015).



Grafiek 3: Hernieuwbare energiebronnen in Nederland

4.6.1 Aandachtspunten

Uit de getallen in deze paragraaf blijkt dat op een aantal punten meer verbetering mogelijk is dan gemiddeld. De focus zou hierom moeten liggen op:

- **Thermische Energie.** Meer dan de helft van de energie in een gemiddeld huishouden wordt gebruikt voor bereiding van warmtapwater en ruimteverwarming, terwijl het aandeel hernieuwbaar bij warmte aanzienlijk lager ligt dan bij elektriciteit.
- **Kosten.** In Nederland is de prijs van elektriciteit ongeveer 3,5 keer zo hoog als gas. Er moet gefocust worden op een betaalbaar alternatief voor gas.
- **Zonne-energie en aardwarmte** zijn de hernieuwbare energiebronnen met de grootste potentie.
- **Innovatie.** Met de huidige trend zijn de Nederlandse klimaatdoelen onhaalbaar, er moet geïnnoveerd worden.

5 Conceptkeuze

Om een gegronde keuze te kunnen maken van technieken voor het opwekken van duurzame energie, moeten allereerst alle mogelijke technieken geïnventariseerd worden. In dit hoofdstuk zullen de beschikbare technieken op een rijtje worden gezet, om hiervan vervolgens een afweging en keuze in te maken. Hierna volgt een omschrijving van elk van de gekozen concepten met de belangrijkste voor- en nadelen.

5.1 Beschikbare technieken

In de EPBD en BENG is vastgesteld welke energiebronnen hernieuwbaar zijn. Per bron zijn er diverse technieken beschikbaar voor de energieopwekking, zoals weergegeven in onderstaande Tabel 4. Per techniek zijn er verscheidene producenten met variatie in toepassing, kwaliteit en energieopbrengst. De bij berekeningen gebruikte waarden worden verder toegelicht in Hoofdstuk 6.

Bron	Technieken
Zon	PV-panelen (photovoltaïsch) Inclusief Building Intergrated PV Zonnecollectoren (thermisch) PVT-panelen (photovoltaïsch/thermisch)
Wind	Horizontale turbine Verticale turbine Powernest ²
Bodemwarmte	Open bron/ Warmte-Koude opslag Gesloten bron
Geothermie	Diepe bodemenergie
Omgevingswarmte	Buitenlucht-warmtepomp Oppervlaktewater-warmtepomp
Waterkracht	Hoogteverschil Stroming
Groene brandstof	Biomassa (voornamelijk houtpellets) Groengas Waterstof
Externe warmte	Restwarmte industrie Afvalverbrandingsinstallatie

Tabel 4: Beschikbare technieken voor opwekking hernieuwbare energie.

² Zie Paragraaf 5.8

Wanneer gebruik wordt gemaakt van een lage-temperatuurnetwerk met vloerverwarming, zoals gebruikelijk bij warmtepompen en zonnecollectoren, kan een boosterwarmtepomp geïnstalleerd worden. Deze kan water op lage temperatuur via het warmtepompprincipe (Paragraaf 4.4) opwarmen tot hoge temperatuur, zodat dit geschikt wordt voor gebruik als warmtapwater. Zo kan het warme water op lage temperatuur gedistribueerd worden en in het appartement pas een 'boost' krijg voor warmtapwater, zodat het leiding verlies minimaal is.

5.2 Criteria

Het doel van het onderzoek is natuurlijk dat de aanbevolen oplossing ook geïmplementeerd wordt. Of dit gebeurt hangt niet alleen af van de energieprestatie, maar ook van financiën (zowel investering als gebruikskosten) en andere belangen zoals ontwerp, montage, marketing of onderhoud (Entrop, 2013).

Om de concepten te kunnen vergelijken moeten deze beoordeeld worden op een aantal criteria die de wensen van alle stakeholders vertegenwoordigen. Als eerste zijn er enkele eisen waaraan elk alternatief moet voldoen:

- BENG-eisen
- Uitvoerbaar
- Veilig

Vervolgens zijn de beoordelingscriteria als volgt vastgesteld:

- Kosten (netto constante waarde)
- Efficiëntie (aandeel hernieuwbare energie in %)
- Installatie (kwalitatief)
- Overlast (kwalitatief)
- Esthetisch (kwalitatief)

Uit een onderzoek van Murray en Cotgrave (2007) blijkt dat voornamelijk de kosten doorslaggevend zijn in ontwerpkeuzes, duurzaamheid wordt door kopers veel minder belangrijk geacht. Daarom zullen kosten het zwaarstwegende criterium worden.

De eerste twee criteria worden kwantitatief bepaald, in respectievelijk de netto constante waarde en het percentage hernieuwbare energie. De overige criteria zullen beoordeeld worden op een --/++ schaal, zodat ook deze scores uiteindelijk meegenomen kunnen worden in de multi-criteria analyse.

5.3 Afweging technieken

In Bijlage A – Voor-/Nadelen technieken – zijn voor de technieken zoals vermeld in Paragraaf 5.1 de belangrijkste voor- en nadelen weergegeven waarop de conceptkeuze gebaseerd is. Een aantal technieken wordt verworpen wegens de in rood weergegeven nadelen, te weten locatieafhankelijkheid, onvoldoende toepasbaarheid, te laag rendement en niet volledige duurzaamheid.

Vervolgens is gekeken welke technieken het best aansluiten op de kansen zoals geformuleerd in paragraaf 4.6.1: thermische energie, betaalbaarheid, zon-/aardwarmte en innovatie. Hiermee komen de volgende technieken naar voren als het meest geschikt als aanvulling op/ ter vervanging van PV-panelen:

Techniek	Thermisch	Betaalbaar	Zon- /aardwarmte	Innovatief
1) Omgevingsluchtwarmtepomp	X	X		
2) { Building Integrated PV			X	X
Zonnecollector	X		X	
PVT	X		X	X
3) Bodemwarmtepomp	X		X	
4) Powernest (Paragraaf 5.8)				X

Tabel 5: Geschikte technieken

Zoals te zien in Tabel 5 worden met deze technieken alle aandachtspunten gedekt, hierbij worden BIPV, zonnecollector en PVT samengevoegd in één concept 'Zonne-energie'. Het alternatief biomassa lijkt aanvankelijk goed te scoren, echter in verband met uitstoot van fijnstof en niet volledige duurzaamheid is gekozen deze optie niet in het onderzoek mee te nemen.

De gekozen concepten worden in de volgende paragrafen verder toegelicht, te beginnen met de referentiesituatie die ter vergelijking gebruikt zal worden. Voor een indicatie van de haalbaarheid van de verschillende concepten, is de verwachte energieopbrengst bepaald in een globale berekening.

5.4 Concept 0 – Referentie

Het uitgangspunt in dit onderzoek is de versie 'all-electric – BENG'. De installaties bestaan uit een elektrische boiler in elk appartement en convectoren voor verwarming, warmteterugwinning uit (balans)ventilatie en doucheput, en 356 PV-panelen in O/W-opstelling. Dit aantal PV-panelen past niet op het dak, daarom wordt een (prijzige) overdekte parkeergarage bijgebouwd waarop de overige panelen passen. Een ander nadeel is dat het elektriciteitsverbruik erg hoog ligt omdat zowel ruimteverwarming als bereiding van warmtapwater elektrisch zijn.

5.5 Concept 1 – Omgevingslucht warmte

Uit de lucht rondom een gebouw kan veel warmte gewonnen met behulp van een buitenlucht warmtepomp. Deze onttrekt warmte aan de buitenlucht en gebruikt dit om vervolgens water voor verwarming of warm tapwater te verwarmen. De techniek is relatief makkelijk te installeren en daarmee goedkoop.

De warmtepomp staat echter bekend om geluidsoverlast en ook moet tijdens de winter rekening gehouden worden met een lager rendement wegens een lagere buitentemperatuur.

Bij een globale berekening (zie Bijlage B) blijkt dat er 32 warmtepompen van zo'n 3,5 kW nodig zijn voor volledige warmtevoorziening. Binnen het concept kan gevarieerd worden in het aantal en type warmtepompen. Bovendien is deze techniek te combineren met bijvoorbeeld PV-panelen op het dak.

Uitgangspunt

32 warmtepompen van 3,5 kW

COP = 4

1000 vollasturen

Resultaat

-28.000 kWh elektriciteit

+400 GJ warmte

39% hernieuwbaar

Tabel 6: Berekening Concept 1

5.6 Concept 2 - Zonne-energie

De zon levert 5.000 keer zo veel energie als de totale vraag van de wereld (Physee, 2018). Het dakoppervlak is te klein voor de benodigde energie via PV-panelen, maar geveloppervlak is nog wel beschikbaar voor opwekking van zonne-energie. Er zijn verschillende technieken beschikbaar om elektriciteit, warmte of beide op te wekken uit zonne-energie. Deze technieken zijn redelijk ver ontwikkeld en daarmee betaalbaar, echter gebruik op gevels is een nieuwe toepassing wat de installatie prijzig maakt. Wanneer het volledige dak en één gevel gebruikt worden voor PV-panelen en zonnecollectoren, lijkt de complete warmtevraag en bovendien een deel van de benodigde elektriciteit opgewekt te kunnen worden (zie Bijlage B). Hierbij moeten echter werkelijke opbrengst en verliezen in de installaties uitvoeriger bepaald worden.

Om de verschillende technieken optimaal te gebruiken, kan binnen het concept gevarieerd worden met PV, zonnecollectoren en PVT (combinatie warmte/elektriciteit), maar ook de mogelijkheden van innovatieve technieken zoals transparante, beweegbare of gekleurde zonnepanelen worden bekeken.

Uitgangspunt

285 m² dakoppervlak

230 m² geveloppervlak

203 Wp/m² (PV)

1,88 GJ/m² (collector)

Resultaat

+31.000 kWh elektriciteit

+400 GJ warmte

67% hernieuwbaar

Tabel 7: Berekening Concept 2

5.7 Concept 3 – Bodemwarmte

De bodem heeft een constante warmte door het jaar heen die daarom erg geschikt is om te gebruiken voor warmtevoorziening. Op de meeste locaties in Nederland is deze techniek toepasbaar, maar dit moet wel vooraf gecontroleerd worden. De installatie is vrij duur, maar het systeem heeft een hoger rendement dan bijvoorbeeld een buitenluchtwarmtepomp en is bovendien zeer constant. Bijna alle duurzame kantoorgebouwen in Nederland gebruiken daarom bodemwarmte (Zeiler, Gvozdenović, de Bont, & Maassen, 2016).

Een inschatting van de opbrengst is berekend op vergelijkbare manier als concept 1, echter met een hoger rendement (zie Bijlage B). Hierbij zijn 32 warmtepompen verondersteld, voor elk appartement één, van 4 kW. Dit lijkt voldoende te zijn voor de volledige warmtevoorziening.

Vervolgens kan gevarieerd worden in het aantal en type warmtepompen, door de lage temperatuur is ook een collectief systeem met boosterwarmtepomp mogelijk. De bodemwarmtepomp kan eventueel gecombineerd worden met PV-panelen op het dak.

Uitgangspunt

32 warmtepompen van 4 kW

COP = 5

1000 vollasturen

Resultaat

-22.000 kWh elektriciteit

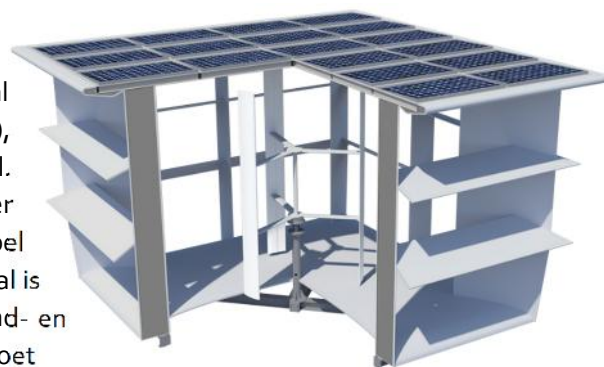
+400 GJ warmte

42% hernieuwbaar

Tabel 8: Berekening Concept 3

5.8 Concept 4 - Wind

In Nederland is het aandeel windenergie momenteel al 24% van de totale hernieuwbare energie (CBS, 2017), maar in stedelijke omgeving is dit aandeel minimaal. Ervaringen hiermee zijn tot op heden tegengevallen, er zijn echter een aantal nieuwe technieken die wel rendabel lijken. Met name het 'Powernest' (Figuur 10), dat speciaal is ontwikkeld voor hoogbouw en een combinatie van wind- en zonne-energie toepast, lijkt veelbelovend. De praktijk moet echter nog uitwijzen wat de daadwerkelijke opbrengst is.



Figuur 10: PowerNEST (Ibis Power, 2017)

Wanneer één Powernest van 6x6m geïnstalleerd wordt, kan dit jaarlijks zo'n 11% van de benodigde elektriciteit genereren (afhankelijk van locatie). Er is inmiddels ook een dakbedekkende versie beschikbaar, er zal gekeken moeten worden naar de toepasbaarheid hiervan op het HoogWonen concept. Een dergelijke installatie op windenergie kan eventueel gecombineerd worden met een warmtepomp of zonnegevel.

Uitgangspunt

1 Powernest

6x6m

Resultaat

+23.000 kWh elektriciteit

+0 GJ warmte

11% hernieuwbaar

Tabel 9: Berekening Concept 4

6 Energieopbrengst

Elk concept wordt doorgerekend op de energieprestatie wanneer deze wordt toegepast in het appartementengebouw. Als uitgangspunt wordt de referentiesituatie gebruikt, het rapport met in- en output van rekenprogramma Uniec² is te vinden in Bijlage C. De berekeningen van de concepten bevinden zich in Bijlage D, de resultaten worden in dit hoofdstuk gepresenteerd. Tot de berekening behoren de gebouwgebonden systemen voor verwarming, warmtapwater, ventilatie, verlichting en zonnestroom gecombineerd met de gebouwkenmerken. Gemeenschappelijke installaties zoals de lift hoeven niet meegerekend te worden (Jan Fuite, persoonlijke communicatie, 16 mei 2018).

6.1 Concept 0 – Referentie

In de referentiesituatie wordt alle warmte elektrisch opgewekt met een elektrische boiler en convectoren. Met 200 PV-panelen is het volledige dak bedekt, dit zorgt echter voor slechts 23% hernieuwbare energie. BENG-3 is enkel te behalen door ook in de omgeving PV-panelen te plaatsen, bijvoorbeeld op een parkeergarage, wat niet wenselijk is.

Voor ventilatie is voor een D-systeem gekozen, dat wil zeggen zowel mechanische toe- als afvoer van lucht. Dit systeem leidt tot een zeer laag warmteverlies en maakt warmteterugwinning uit afvoerlucht mogelijk, wat zeer gunstig is voor het behalen van de BENG. Dit systeem is toegepast in alle concepten.

6.2 Concept 1 – Omgevingsluchtwarmte

In het eerste concept wordt warmte uit omgevingslucht gebruikt voor verwarming van de woning en warmtapwater. Hiervoor krijgt elk appartement een warmtepomp met buitenlucht als bron geplaatst op het dak, aangevuld met PV-panelen op het dak. Vanwege beperkte ruimte binnen wordt gebruik gemaakt van een monoblock warmtepomp, waarbij de gehele warmtepomp buiten staat, bovendien geeft een monoblock een hoger rendement en minder geluidsoverlast dan een split unit, waarbij de bron buiten en warmtepomp binnen staat. De monoblock kan vervolgens gecombineerd worden met een warmtepompboiler, deze gebruikt warmte uit ventilatieafvoerlucht om warmtapwater mee te verwarmen.

Een combinatie met een boosterwarmtepomp is in overweging genomen. Omdat dit echter alleen bij een collectieve verwarmingsbron zeer gunstig is, is besloten deze niet te combineren met een individuele warmtepomp. De winst zou niet opwegen tegen de investering in twee types warmtepompen.

Warmtepomp	PV-panelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
AWB Genia air 5/2	0	17	60	19%
AWB Genia air 5/2	140	17	25	53%
AWB Genia air 5/2 i.c.m. warmtepompboiler	150	17	22	50%

Tabel 10: Energieberekeningen concept omgevingsluchtwarmte

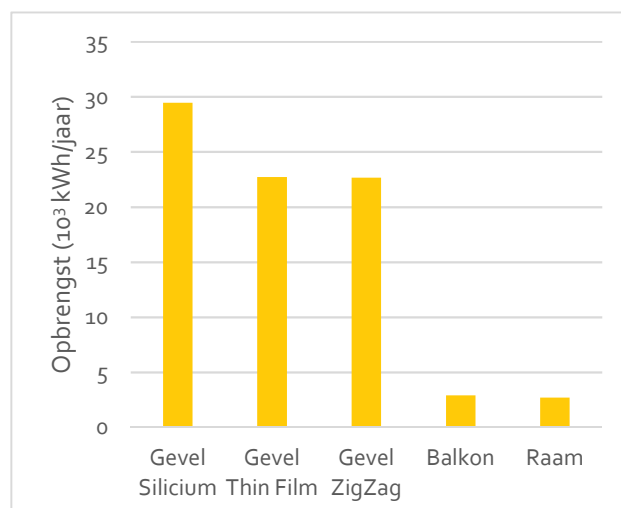
Uit de berekeningen blijkt dat wanneer de buitenluchtwarmtepomp wordt gebruikt voor zowel verwarming als warmtapwater, de resultaten vergelijkbaar zijn met de combinatie met de warmtepompboiler. Omdat voor de eerste optie de installatie makkelijker en goedkoper is, is deze optie gekozen als het concept Omgevingsluchtwarmte.

6.3 Concept 2 – Zonne-energie

Binnen het begrip zonne-energie zijn er verscheidene technieken beschikbaar om elektrische of thermische energie op te wekken: PV-panelen voor elektrische energie, zonnecollectoren voor thermische energie en PVT-panelen voor een combinatie. Deze drie technieken zijn eerst apart getest om vervolgens te concluderen hoe het concept zonne-energie eruit zal zien.

6.3.1 BIPV

Gebruik van zonnepanelen in de gevel wordt ook aangeduid met 'Building Integrated PV' (BIPV) oftewel 'gebouw geïntegreerd PV'. Deze term dekt naast gevels ook bijvoorbeeld zonne-energie uit een balkon, raam of geluidswand. Het gebruik van zonneramen en PV in balkons is onderzocht, maar door beperkt oppervlak is de opbrengst klein en bovendien heeft het zonneraam een efficiëntie van slechts 25% ten opzichte van de overige technieken. Daarom is besloten deze technieken niet verder mee te nemen in het concept.



Grafiek 4: Opbrengst per type zonnepanelen

De ZigZag techniek plaatst de PV-panelen gezigzagd aan de gevel (Figuur 11), zodat de panelen een gunstige hoek hebben en reflectie kunnen opvangen. De opbrengst per m² zonnepaneel is bijna 2 keer zo groot als een silicium gevel, maar door een relatief klein oppervlak per m² gevel is de totale opbrengst vergelijkbaar met thin-film cellen. Daarom zal het dure ZigZag Solar systeem niet verder overwogen worden.

Uit berekeningen blijkt dat minimaal drie gevels benodigd zijn voor het behalen van de BENG-eisen voor zowel silicium als thin-film cellen (Bijlage D). Wegens het lage gewicht en duurzame productie gaat de voorkeur uit naar thin-film.

Gevel	Dak	BENG 1	BENG 2	BENG 3
Kristallijn O+Z+W	192	17	25	59%
Thin-film O+Z+W	200	17	25	59%

Tabel 11: Energieberekeningen concept BIPV



Figuur 11: Zigzag systeem (ZigzagSolar, 2018)

6.3.2 Zonneboiler

Een zonneboiler met zonnecollector(en) op het dak kan warmtapwater duurzaam verwarmen. Bij berekeningen (Bijlage D) is gekeken naar de uitkomsten wanneer elk appartement 1 of 2 zonnecollectoren zou krijgen. Hieruit blijkt dat 1 collector, wanneer PV-panelen het resterende dakoppervlak bedekken, 48% hernieuwbare energie kan produceren. Een uitbreiding naar 2 collectoren levert slechts 6% verbetering en is daarom de investering niet waard. Wel moet de BENG 2 (primaire energie) nog verder verlagen.

Collectoren	PV-panelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
32	0	17	75	21%
32	150	17	37	48%
64	100	17	46	51%

Tabel 12: Energieberekening Zonnecollector

6.3.3 PVT

PVT of hybride zonnepanelen zijn zonnepanelen die zowel elektriciteit (PVT) als thermische energie (PVT) kunnen opwekken. Door het gecombineerde systeem zal de efficiëntie van zowel het 'PV-' als het 'T-gedeelte' lager zijn dan een PV-paneel of zonnecollector (Zondag, 2003). Daarom moet bepaald worden of dit verlies opweegt tegen de winst in ruimte.

	BENG 1	BENG 2	BENG 3
32 PVT-panelen, aangevuld met PV-panelen	17	36	50%
32 Zonnecollectoren, aangevuld met PV-panelen	17	37	48%

Tabel 13: PVT versus zonnecollectoren

Uit een energieberekening blijkt dat de PVT-panelen iets beter presteren dan zonnecollectoren in combinatie met PV-panelen, dit verschil is echter minimaal. De aanschafkosten van een PVT-installatie liggen aanzienlijk hoger dan van een gangbare zonnecollector en boiler, dus de geringe winst is deze investering niet waard.

6.3.4 Conclusie

Wanneer men de uitkomsten uit de voorgaande paragrafen bekijkt, lijken PV-panelen geïntegreerd in de gevel en zonnecollectoren het best toepasbaar. Enkel een zonnecollector aangevuld met PV op het dakoppervlak kan niet aan de BENG-eisen voldoen (Paragraaf 6.3.2), dus deze zal gecombineerd worden met een zonnegevel.

	BENG 1	BENG 2	BENG 3
Zonnegevel (3 gevels) + 200 PV	17	25	59%
Collectoren icm zonnegevel (1 gevel) + 110 PV	17	25	61%

Tabel 14: Opties concept zon

Beide opties kunnen voldoen aan de eisen. Omdat er bij de combinatie collectoren/zonnepanelen minder gevel- en dakoppervlak benodigd is voor PV-panelen, wordt deze optie haalbaarder geacht en daarom gekozen als 'concept Zon'. Bovendien is er binnen deze optie mogelijkheid tot compensatie bij verliezen door bijvoorbeeld schaduw en ongunstige oriëntatie of bij uitbreiding van het gebouw.

6.4 Concept 3 – Bodemwarmte

In dit concept wordt een collectieve bodembron gebruikt, deze wordt vervolgens aangesloten op de warmtepompen. Hierbij is de keuze om voor elk huishouden een aparte warmtepomp aan te sluiten, of om een klein aantal collectieve warmtepompen te installeren en elk huishouden met een boosterwarmtepomp hun eigen warmtapwater te laten produceren. De beide opties zijn doorgerekend:

Warmtepomp	Zonnepanelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
Individueel	158	17	25	55%
Collectief met booster	98	17	25	57%

Tabel 15: Energieberekeningen concept Bodemwarmte

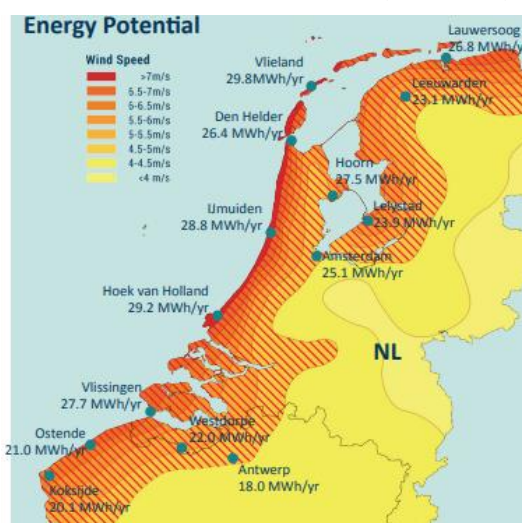
Met beide systemen is het mogelijk de BENG-criteria te halen, een keuze hangt af van kosten van de installaties. Bij een collectief systeem zijn minder bodemwarmtepompen en PV-panelen benodigd, maar vormen de boosterwarmtepompen wel een extra kostenpost. Vanwege deze onzekerheid wordt bij de kostenanalyse een definitieve keuze gemaakt tussen de twee systemen.

6.5 Concept 4 – Wind

Een aantal energiebronnen, waaronder windenergie, zijn nog niet correct opgenomen in de Uniec² software omdat deze nog gewaardeerd moeten worden (Uniec², 2018). Daarom is de energieopbrengst van het Powernest handmatig berekend en vervolgens een equivalent aantal zonnepanelen bijgeplaatst in de software.

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van de opbrengst van een enkele unit (7,2x10,8m) op een gebouw van 10 verdiepingen in Amsterdam: 25,1 MWh/jaar (Ibis Power, 2017). Dit is gecorrigeerd naar 24,0 MWh/jaar voor een hoogte van 5 verdiepingen. Wanneer het volledige dak bedekt wordt met de PowerNEST, kunnen maximaal 4 units geplaatst worden.

Uit berekeningen (Bijlage D) blijkt dat de BENG-criteria slechts gehaald kunnen worden wanneer het volledige dak bedekt wordt met het PowerNEST systeem. Wel levert het systeem ruim 2,5 maal meer energie per oppervlak dan wanneer alleen PV-panelen geplaatst worden.



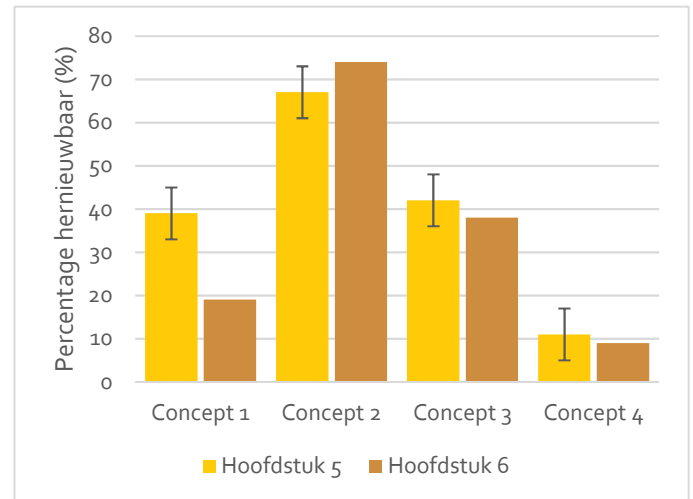
Figuur 12: Geschatte opbrengst PowerNEST (Ibis Power, 2017)

PowerNEST	Opbrengst PowerNEST	BENG 1	BENG 2	BENG 3
1 unit (7.2x10.8m)	24000	17	92	9%
1 unit +150 PV	24000	17	54	31%
Volledig dak	96000	17	21	64%

Tabel 16: Energieberekening concept wind

6.6 Validatie resultaten

Ter controle van de uitkomsten uit Uniec², zijn de resultaten vergeleken met de inschattingen uit Hoofdstuk 5. In Uniec² is hiervoor de situatie ingevoerd zoals gebruikt in Hoofdstuk 5. De beide waarden zijn weergegeven in Grafiek 5. Hier wordt duidelijk dat enkel concept 1 – de luchtwarmtepomp – erg afwijkt van de inschatting. Hiervoor zijn enkele oorzaken aan te wijzen: (1) Wanneer de warmtepomp niet voor verwarming maar voor warmtapwater wordt gebruikt, is de efficiëntie lager (2) Door lagere temperatuur in de winter is de efficiëntie over het gehele jaar lager dan de COP. De COP gecompenseerd voor deze factoren wordt de SPF (SeizoensPrestatieFactor) genoemd, in dit geval zou de SPF circa 2,0 zijn (Bouw-Energie, 2018). Wanneer de inschatting in Hoofdstuk 5 gemaakt wordt met de SPF=2 in plaats van de COP=4, is de uitkomst van Uniec² weliswaar laag maar niet langer onbetrouwbaar.



Grafiek 5: Validatie resultaten

6.7 Gevoeligheidsanalyse

In een gevoeligheidsanalyse is het effect op BENG 3 getest wanneer vrij te kiezen waarden met 20% toe- of afnemen. De resultaten zijn te vinden in Bijlage F. In Tabel 17 zijn de 5 meest invloedrijke parameters weergegeven. Wanneer de parameter met 20% toe- of afneemt, zal de waarde van BENG 3 dus binnen de range vallen ten opzichte van de oorspronkelijke waarde.

Parameter	Effect
Leidinglengte boiler/afgifte	96-113%
Diameter leiding boiler/afgifte	91-109%
Piekvermogen PV	74-130%
Ventilatie PV	95-110%
Rendement BoosterWP	84-109%

Tabel 17: Gevoeligheidsanalyse Uniec²

De eerste drie parameters zijn echter eenvoudig te bepalen op basis van ontwerp en materiaalkeuze. De ventilatie van PV-panelen kan aan de hand van het ontwerp ingeschat worden, er wordt vanuit gegaan dat PV op de gevel matig en op het dak sterk geventileerd is. Enkel de laatste parameter, uit concept Bodem Collectief, moet ingeschat worden en heeft een significant effect. Op basis van het rendement van de bodemwarmtepomp, het rendement van de boosterwarmtepomp en het aandeel van beide systemen kan deze waarde vastgesteld worden. Het is dus van belang om deze waarde te controleren op juistheid.

7 Kostenberekening

Of de uiteindelijk gekozen maatregel daadwerkelijk uitgevoerd kan worden, hangt in grote mate af van de kosten hiervan. Hierbij is niet alleen de investering van belang, maar ook de onderhoudskosten en levensduur van de installatie. Zo kunnen de concepten ook op het financiële aspect vergeleken worden.

7.1 Theorie

Om een overzicht te krijgen van de totale kosten moet de hele levenscyclus meegenomen, dit gebeurt in een 'Life Cycle Cost' (LCC) analyse. De posten die hier onderdeel van uitmaken zijn:

- Investering
 - Energiekosten
 - Onderhoudskosten
 - Eindwaarde
- (Zeiler, Gvozdenović, de Bont, & Maassen, 2016)

Alle kosten worden berekend met de referentiesituatie als uitgangspunt. Hierdoor kan het bijvoorbeeld gebeuren dat de onderhoudskosten lager zijn dan in de referentie, waardoor de extra kosten negatief zijn. De eindwaarde is in grote mate afhankelijk van de locatie en zal daarom niet meegerekend worden. Daarnaast geeft de Nederlandse overheid momenteel subsidie om duurzame energie te stimuleren, waarvoor elk concept in aanmerking komt en die dus ook meegerekend wordt. Alle waarden moeten inclusief btw bepaald worden, anders zijn de kosten en subsidie niet samen te voegen tot een totale post. De posten binnen de LCC worden daarmee:

- Meerprijs (= extra investering t.o.v. referentie – investeringssubsidie)
- Jaarlijkse kosten (= extra onderhoudskosten – winst in energiekosten – jaarlijkse subsidie)

Om rekening te houden met waardeverandering in de toekomst zijn de kosten gecorrigeerd voor inflatie en disconteringsvoet tot de 'Net Present Value' (NPV). De gebruikte waardes zijn respectievelijk 2,5% (N. Blaauw, 2018) en 4,5% (García-Gusano, Espegren, Lind, & Kirkengen, 2016). Door de NPV van alle kasstromen tijdens de levensduur van de installatie te sommeren, volgt de NPV van de complete installatie:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1 + d - i)^t}$$

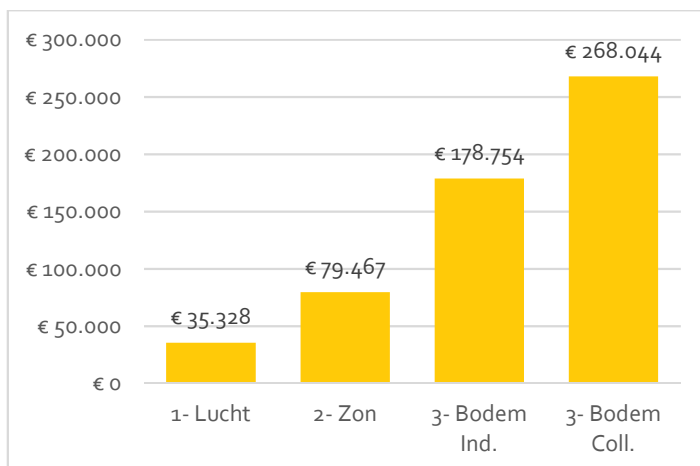
R_t = inkomst/uitgave in jaar t (€)
 d = disconteringsvoet (%) = 4,5%
 i = inflatiefactor (%) = 1,5%
 n = levensduur (jaar) (Bhoochhibhoya, 2018)

Wanneer de NPV negatief is, zijn de totale baten groter geweest dan de kosten en is de investering dus winstgevend. In de meeste gevallen is deze waarde echter positief.

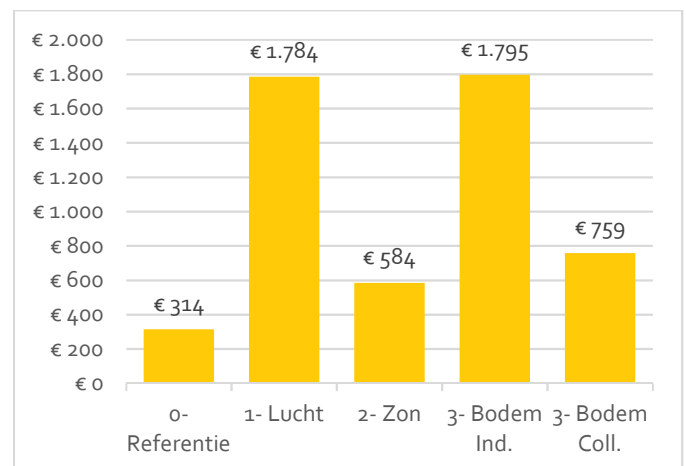
7.2 Investerings- en onderhoudskosten

Voor de bepaling van kosten zijn zowel de investering als onderhoudskosten ingeschat, beide ten opzichte van de referentiekosten. Staartkosten, tot wel 10% van de totale kosten, worden hierbij verwaarloosd omdat hierover geen gegevens bekend zijn. De baten bestaan uit de verminderde energiekosten en zijn eenvoudig te berekenen met de uitkomsten uit de energieberekening in Uniec². Omdat alle concepten echter op dezelfde eisen ontworpen zijn, is het verschil hiertussen minimaal. De complete berekening is te vinden in Bijlage G, de uitkomsten zijn in onderstaande grafieken weergegeven.

De investerings- en onderhoudskosten van een PowerNEST zijn niet vrijgegeven waardoor voor het concept wind geen betrouwbare berekening uitgevoerd kon worden. Voor de bodemwarmtepomp zijn zowel een individueel als collectief systeem berekend, uit de energieberekeningen werd immers niet direct duidelijk welk concept het beste is.



Grafiek 6: Extra investeringskosten



Grafiek 7: Jaarlijkse kosten

7.3 Subsidie

Om duurzame energie te promoten, wordt door de Nederlandse overheid subsidies gegeven op systemen om hernieuwbare energie op te wekken. Twee regelingen waar dit project voor in aanmerking komt zijn de InvesteringsSubsidie Duurzame Energie (ISDE) en Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE+).

ISDE

Via deze subsidie kan men een eenmalige vergoeding krijgen bij aanschaf van zonneboilers, warmtepompen, biomassaketels en pelletkachels. Concept 2 (zonneboiler) en Concepten 1 en 3 (Warmtepomp) komen hiervoor in aanmerking komen. Hierbij wordt een vast bedrag voor een type zonneboiler of warmtepomp uitgekeerd, gerekend wordt met de waarden zoals te zien in de tabel. (RVO, 2018)

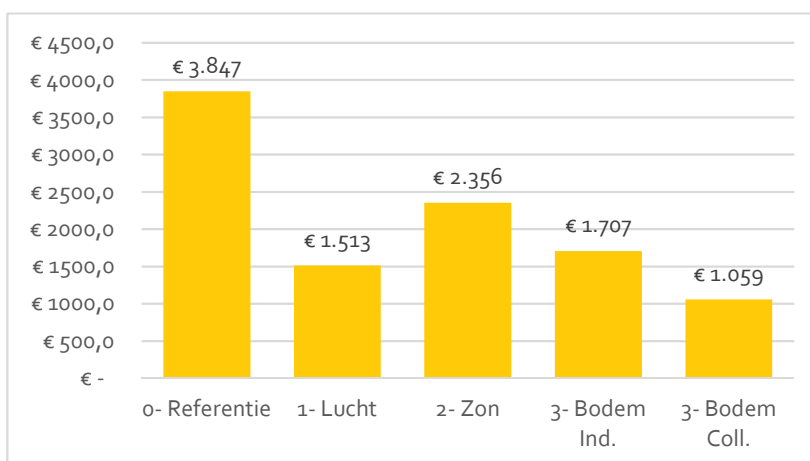
	Subsidie
Zonneboiler: Nefit 1-120	€860
LuchtWP: AWB GeniaAir 5/2	€1800
BodemWP: Nibe F1245-5	€2800
BodemWP: Nibe F1245-8	€3000

Tabel 18: Subsidiebedragen ISDE

SDE+

De andere regeling geeft een compensatie aan de zakelijke markt voor het feit dat duurzaam opgewekte energie meer kost dan standaard grijze energie. Er wordt verondersteld dat woningcorporaties hiervan gebruik kunnen maken. Men krijgt hierbij gedurende 15 jaar een jaarlijks bedrag, afhankelijk van de energieopbrengst en energieprijzen (RVO, 2018). Dit geldt voor de bronnen biomassa, geothermie, water, wind en zon (vanaf 15 kWp voor PV en 140 kWh voor thermisch). Alle concepten komen in aanmerking voor subsidie op zonne-energie (PV), voor thermische zonne-energie wordt de ondergrens niet gehaald.

De huidige vergoeding voor PV is 3,5 cent per kWh, gebaseerd op 950 vollasturen. Dit betekent een jaarlijks bedrag tussen €1000 en €2350 voor dit onderzoek (Grafiek 8). Voor windenergie geldt een bijdrage van 2,7 cent per kWh, wat leidt tot €650 voor het concept Wind. (RVO, 2018)



Grafiek 8: Jaarlijkse SDE+ subsidie

7.4 Levensduur

Voor de bepaling van de NPV-waarde is de levensduur van de installaties nodig. Omdat de kosten enkel de meerprijs van de installatie zelf zijn, wordt de levensduur van de installatie en niet van het gehele gebouw gebruikt. Echter niet elk onderdeel heeft dezelfde levensduur, daarom is met de opdrachtgever een inschatting gemaakt van de kostenverhoudingen tussen onderdelen. Op basis van deze verdeling de totale levensduur per concept bepaald. Voor de concepten zonne-energie en wind is de levensduur voor elk onderdeel gelijk, beide 25 jaar. Lucht- en bodemwarmtepomp zijn berekend volgens Tabel 19.

Onderdeel	Aandeel Kosten	Levensduur
Warmtepomp	80%	15
Overig	20%	50
Totaal		22

Onderdeel	Aandeel Kosten	Levensduur
Warmtepomp	65%	15
Bodembron	35%	50
Totaal		27

Tabel 19: Bepaling levensduur luchtwarmtepomp (links) en bodemwarmtepomp (rechts)

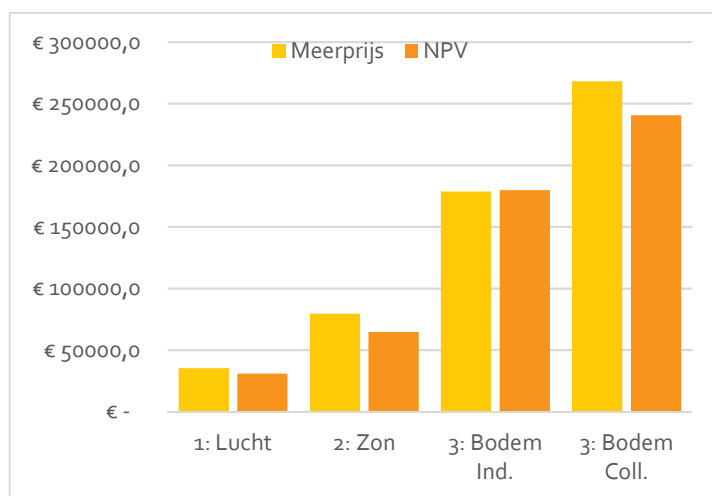
7.5 Conclusie

Door de kosten, baten en subsidies bij elkaar op tellen, kunnen de totale meerkosten en de net present value (NPV) bepaald worden (Tabel 20). Het concept Wind is hierin niet opgenomen bij gebrek aan betrouwbare data. Ter referentie van de onderstaande getallen: De originele prijs van 1 appartement ligt rond de €120.000. (Trebbe Wonen B.V., 2017)

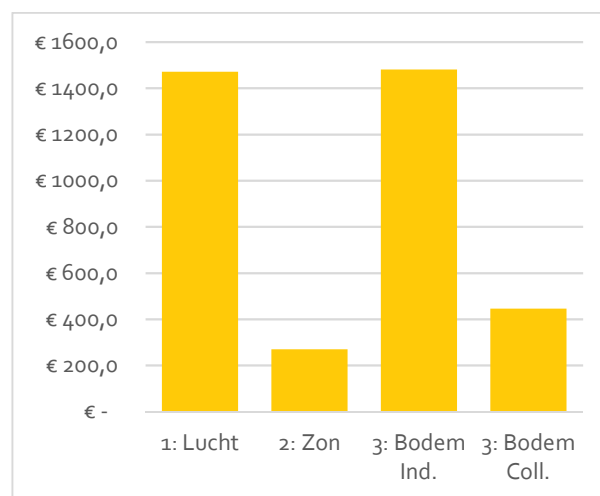
Concept	0: Referentie	1: Lucht	2: Zon	3: Bodem Ind.	3: Bodem Coll.
Investering	€ 1,141,998	€ 1,177,326	€ 1,221,465	€ 1,320,752	€ 1,410,042
Extra investering		€ 35,328	€ 79,467	€ 178,754	€ 268,044
Extra investering per appartement		€ 1,104	€ 2,483	€ 5,586	€ 8,376
Jaarlijks onderhoud	€ 314	€ 1,784	€ 584	€ 1,795	€ 759
Extra onderhoud		€ 1,470	€ 270	€ 1,481	€ 445
Jaarlijkse subsidie	€ 3,847	€ 1,513	€ 2,356	€ 1,707	€ 1,059
Extra subsidie*		€ -2,334	€ -1,491	€ -2,140	€ -2,788
Levensduur		22 jaar	25 jaar	27 jaar	27 jaar
NPV		€ 30,866	€ 64,635	€ 179,674	€ 240,560

Tabel 20: Resultaten kostenberekening; *Negatieve waarden omdat elk van de concepten minder jaarlijkse subsidie krijgt dan de referentie, die jaarlijks €3847 zou kunnen ontvangen.

Uit de resultaten blijkt dat de eerste twee concepten, luchtwarmtepomp en zonne-energie, de laagste aanschafkosten hebben, de concepten zonne-energie en een collectieve warmtepomp hebben de laagste onderhoudskosten. Ondanks dat heeft toch de luchtwarmtepomp de laagste net present value, snel gevolgd door het zonne-energie concept.



Grafiek 9: Meerprijs t.o.v. referentie & Net Present Value



Grafiek 10: Jaarlijkse kosten

8 Kwalitatieve criteria

Naast de energieprestatie en kosten, zijn er enkele andere criteria waarop de concepten beoordeeld worden (Paragraaf 5.2). Allereerst worden de eisen (uitvoerbaar en veilig) bekeken in Paragraaf 8.1 en 8.2. Vervolgens worden de concepten kort geëvalueerd op de punten efficiëntie, installatie, overlast en esthetiek (Paragraaf 8.3 t/m 8.6). Deze criteria worden op een --/++ schaal beoordeeld op basis van deze evaluatie.

8.1 Maakbaarheid

Alle alternatieven moeten vanzelfsprekend maakbaar zijn. Daarom wordt elk concept gecontroleerd op uitvoerbaarheid op verschillende vlakken. In het geval een concept onvoldoende maakbaar blijkt, moet deze aangepast worden totdat uitvoer wel mogelijk is.

8.1.1 Omgevingsluchtwarmte

Er is onvoldoende dakoppervlak om 32 lucht-/water warmtepompen en 140 PV-panelen naast elkaar te plaatsen (Bijlage F). Wanneer de onderconstructie van de PV-panelen 1,5 meter wordt verhoogd, kunnen de warmtepompen hieronder geplaatst worden zodat wel voldoende ruimte is.

Daarnaast moet men rekening houden met de waterdruk veroorzaakt door het hoogteverschil tussen warmtepomp en appartement. Dit vormt geen probleem tot ongeveer 5 verdiepingen, maar hoger zal de druk te hoog worden voor het systeem van de waterpomp (Jan Fuite, persoonlijke communicatie, 16 mei 2018). Dit zal meegenomen moeten worden bij een eventuele uitbreiding in de hoogte van het concept HoogWonen.

8.1.2 Zon

Voor het concept Zon wordt een combinatie van zonnecollectoren en PV-panelen op het dak en gevel geplaatst. Voor de PV-panelen op zowel dak als gevel is een montagesysteem beschikbaar. Op het dak moeten 110 PV-panelen en 32 zonnecollectoren geplaatst worden. Dit betekent dat de PV-panelen op een systeem van 1m hoogte geplaatst worden, zodat er voldoende oppervlak is (zie Bijlage F).

De zonnecollectoren zullen aangesloten worden op een zonneboiler in elk appartement, die het warmtapwater zal verzorgen. De verwarming gebeurt nog steeds via elektrische convectoren, zoals in de referentiesituatie.

8.1.3 Bodemwarmte

In het concept bodemwarmte wordt gebruik gemaakt van een gesloten systeem warmtepomp, met een verticale bron (zie ook Paragraaf 4.4), vanwege de lagere kosten voor zowel aanschaf als onderhoud en administratie ten opzichte van een open bron. Ook is een open systeem niet altijd toegestaan in verband met beschermde gebieden. Een horizontale bron zou meer oppervlak behoeven dan beschikbaar, dus een verticale bron moet toegepast worden.

Door de kleine energievraag kan een appartement toe met zo'n 2-3 kW vermogen uit de bodembron. Bij een dergelijk vermogen kan men toe met 1 boorput per 2 appartementen, dus dan zouden 16 boringen gezet moeten worden. Met de benodigde 5 meter tussenruimte (Warmtepomp-Weetjes, 2018) is daarvoor een oppervlak van 15x15m vereist, dit is kleiner dan het oppervlak van het appartementengebouw dus er is voldoende ruimte beschikbaar.

Als aanvulling op de warmtepomp worden PV-panelen geplaatst op het dak. Deze zullen direct op het dak (optie 2) of 1 meter verhoogd (optie 1) staan, zodat ruimte is voor het benodigd aantal panelen.

Optie 1: Individuele warmtepomp

In elke woning zal een warmtepomp voor verwarming en warmtapwater komen zodat de energiekosten individueel verrekend kunnen worden. Dit zal een kleine warmtepomp zijn (bijvoorbeeld de NIBE F1245-5 van 5kW) maar kan nog kleiner. Verwarming gebeurt op lage temperatuur via vloerverwarming.

Optie 2: Collectieve warmtepomp

Bij de tweede optie worden er 6 collectieve warmtepompen geplaatst, een voor alle boven elkaar gelegen appartementen. De warmtepompen hebben elk een vermogen van 10 kW en zijn geplaatst in de techniekruimte op de begane grond. Via een lage-temperatuur leiding wordt het verwarmde water gedistribueerd naar de appartementen. In elk appartement komt vervolgens een boosterwarmtepomp om de temperatuur te verhogen voor warmtapwater.

Bij een collectief systeem kan individueel watergebruik alleen gemonitord worden met speciaal hiervoor geïnstalleerde meters. Ook kan gekozen worden om elk appartement een vaste prijs te laten betalen, zodat deze bemetering en bijbehorende administratie niet nodig zijn.

8.1.4 Wind

Bij plaatsing van een PowerNEST systeem op het dak van het appartementengebouw, moet voornamelijk rekening gehouden worden met het extra gewicht dat op het dak komt te rusten. Het gewicht van het systeem is ongeveer $1,1 \text{ kN/m}^2$ (Ibis Power, 2017). De standaard blijvende belasting van een dakconstructie is $0,3\text{-}2,2 \text{ kN/m}^2$, met daarbij een opgelegde belasting van 1 kN/m^2 (Oosterhoff, 2008), dus met de PowerNEST zou de totale belasting bijna verdubbelen. Bij nieuwbouw moet dit meegenomen worden in het ontwerp, bij een eventuele toepassing in renovatie is een onderzoek naar de draagkracht van de dakconstructie nodig.

8.2 Veiligheidsrisico

Omdat gebruik wordt gemaakt van bestaande technieken die aangeboden worden door bedrijven, wordt verondersteld dat alle opties voldoen aan de veiligheidscriteria bij installatie en periodiek onderhoud door een gecertificeerde monteur. Voor elk concept zijn desondanks de grootste risico's vermeld.

8.2.1 Omgevingsluchtwarmte

Het belangrijkste risico van een lucht/waterwarmtepomp wordt veroorzaakt door beweging van de warmtepomp. Alle bewegende delen van de warmtepomp zijn bedekt door de kast de buitenunit. Bij installatie dient de warmtepomp stevig aan de ondergrond gemonteerd te worden, om eventuele beweging door vibratie of windbelasting te voorkomen.

8.2.2 Zonne-energie

Wanneer zonnepanelen of -collectoren niet correct gemonteerd worden op het gebouw, kan dit leiden tot lekkages, te grote dakbelasting of problemen met afwaaien bij grotere windsnelheden. Voor een zonneboiler is bovendien een legionellabesmetting mogelijk wanneer water te lang stilstaat in de leidingen. Daarnaast is er voor PV een risico op brand bij hoge stroomsterkte, met name in de omvormer en een eventueel aangesloten accu (niet in dit geval) (van der Heide R., 2017). Daarom is het zaak te zorgen dat deze omvormer in een brandwerende ruimte staat met voldoende ventilatie en een rookmelder. Bij bereikbare plaatsen, zoals wanneer PV geïntegreerd wordt in de gevel, moet bovendien rekening gehouden worden met diefstal of vernieling.

8.2.3 Bodemwarmte

Bij een gesloten systeem wordt geen grondwater verplaatst, slechts warmte uit het grondwater wordt opgenomen via een warmtewisselaar. Hierdoor ontstaat geen risico op verontreiniging van grondwater of te grote waterverplaatsing waardoor aardbevingen kunnen ontstaan (dit gebeurt slechts op grotere schaal). Daarnaast moet een legionellabesmetting worden voorkomen door af en toe het systeem op hoge temperatuur ($60 \text{ à } 70^\circ\text{C}$) door te spoelen (Installatieprofs, 2016).

Qua locatie mag er geen bron geboord worden in grondwater beschermgebieden en wanneer zich op te kleine afstand andere bodembronnen bevinden. Voor een goede boring moet vooraf worden onderzocht hoe de ondergrond er op locatie uit ziet.

8.2.4 Wind

Voor plaatsing van een PowerNEST moet verzekerd worden dat het dak voldoende draagkracht heeft voor de constructie. De bewegende onderdelen, namelijk de windturbine zelf, zijn bedekt door de rest van de constructie waardoor mensen geen gevaar lopen hiermee in aanraking te komen. Bovendien is de kans dat vogels geraakt worden aanzienlijk kleiner dan bij een conventionele windturbine. De PowerNEST bevat een remsysteem dat in werking treedt bij te hoge windsnelheden (Ibis Power, 2017).

Net zoals bij PV-panelen is ook hier een risico op brand, voornamelijk bij omvormers. Daarom moeten de omvormers in een brandveilige ruimte geplaatst worden en het systeem moet regelmatig gecontroleerd worden.

8.3 Efficiëntie

De efficiëntie van elk concept hangt af van twee punten: (1) Komt de verhouding warmte/elektriciteit tussen opgewekt en benodigd overeen? (2) Op het moment dat de meeste energie nodig is, is het systeem dan het meest efficiënt?

Bij gebruik van een warmtepomp aangevuld met PV-panelen, komt de verhouding warmte/elektriciteit goed overeen met de energievraag. Bij het concept zon is het aandeel elektriciteit al onevenredig groot, bij het concept wind wordt helemaal geen duurzame warmte opgewekt.

De meeste energie is nodig in de winter, dan heeft de luchtwarmtepomp echter een lager rendement vanwege lage buitentemperaturen. Ook zonne-energie is niet efficiënt, verreweg de meeste energie wordt immers in de zomer opgewekt. Enkel bodemwarmte heeft ook 's winters een stabiel rendement.

8.4 Installatie

Van elke installatie is in Bijlage H een tekening opgenomen. De kwaliteit van installatie hangt af van: (1) Weinig apparaten, dus eenvoudig onderhoud? (2) Weinig leidingwerk en daarmee leidingverlies? (3) Zijn de langste leidingen op lage-temperatuur, dus weinig leidingverlies?

Qua apparaten is in de referentiesituatie slechts een elektrische boiler per appartement nodig, dit geldt voor concept wind. Bij de eerste twee concepten komen daar een warmtepomp en naverwarmer (concept lucht) of een zonnecollector en -boiler (concept zon) bij. Bij de individuele warmtepomp is de installatie zeer eenvoudig, de 32 warmtepompen vervangen de hele verwarmingsinstallatie. In het collectieve systeem komen daarbij de boosterwarmtepompen, maar zijn minder warmtepompen nodig.

Wanneer men kijkt naar leidingwerk, is concept wind zeer efficiënt. Voor de concepten lucht en zon komt daarbij een aansluiting naar de warmtepomp of zonnecollector. Het systeem met individuele bodemwarmtepomp behoeft echter zeer veel leidingwerk, door aparte circuits voor verwarming en warmtapwater. Dit is in het collectief systeem beperkt door de leidingen voor beide te gebruiken.

In het uitgangspunt is water in de (zeer korte) leiding op hoge temperatuur, wat relatief veel verlies veroorzaakt. In de concepten lucht, zon en bodem-collectief zijn de lange leidingen op lage temperatuur. Enkel bij een individuele bodemwarmtepomp is een lange leiding op hoge temperatuur nodig.

8.5 Overlast

Wanneer een bepaalde installatie in een appartementengebouw overlast voor bewoners, zal deze optie niet uitgevoerd worden. De voornaamste reden voor overlast is geluid, de verschillende geluidsniveaus zijn te vinden in Tabel 21. De eis volgens het Bouwbesluit is <30dB in verblijfsruimten. Omdat de apparaten buiten of in een techniekruimte geplaatst zijn, zal deze eis gehaald worden. Dit sluit lichte geluidsoverlast echter niet geheel uit.

Apparaat	Maximale geluidsdruk	Te vergelijken met...	Bron
Bodemwarmtepomp	22 dB	Ruisen van boomblaadjes	(Nibe NL, 2018)
Omvormer PV	30 dB	Fluisteren	(Schiebaan, 2016)
Boosterwarmtepomp	35 dB	Bibliotheek	(Nathan Systems, 2012)
Windturbine	37 dB		(Ibis Power, 2017)
Luchtwarmtepomp	58 dB	Elektrische tandenborstel	(AWB, 2017)

Tabel 21: Geluidsniveau gebruikte apparaten

Naast geluid zouden mensen overlast kunnen ervaren door reflectie van het zonlicht op de PV-panelen. Zeker wanneer PV-panelen op de gevel geplaatst worden, kan dit effect optreden. Omdat glas in een gevel dit effect evengoed veroorzaakt, wordt reflectie niet als overlast door zonnepanelen beschouwd. Als laatste is het onplezierig als de installatie veel ruimte inneemt in het appartement. Dit treedt enkel bij een collectieve bodemwarmtepomp *niet* op, in alle overige gevallen moet een warmtepomp of boiler vat in de woning geplaatst worden.

8.6 Esthetisch

Voor kopers en huurders, en eerder in het proces voor de architect, is het belangrijk dat een gebouw er goed uit ziet. Het is dus een pre als de installatie óf esthetisch is óf onzichtbaar, daarnaast moet de architect vrijheid hebben in zijn ontwerp.

Het gehele systeem van bodemwarmte is geplaatst onder de grond of in het gebouw zelf en zal dus niet zichtbaar zijn. De luchtwarmtepompen staan wel buiten en worden in het algemeen niet als mooi ervaren. Door deze op het dak of geïntegreerd in de gevel te plaatsen zijn de warmtepompen minder opvallend, maar ze zullen altijd zichtbaar blijven. De concepten zon en wind hebben beide een systeem dat zeer goed zichtbaar is, maar door het strakke design en keuze in kleur hebben beide een positieve bijdrage aan de architectuur van het gebouw. Deze installaties beperken echter wel de vrijheid van de architect in zijn ontwerp.

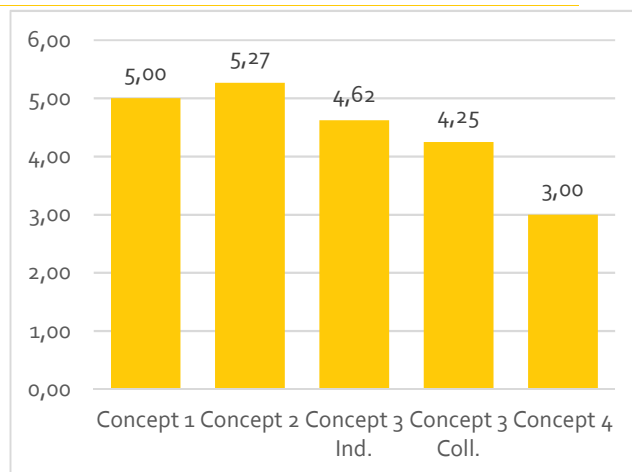


Figuur 13: EnergyWall (eigen afbeelding)

9 Multi Criteria Analyse

Een multi-criteria analyse (MCA) combineert verschillende criteria om alternatieven met elkaar te vergelijken. Hiervoor zijn de uitkomsten van de kostenberekening en de kwalitatieve scores op basis van Hoofdstuk 8 gebruikt. Omdat voor het concept wind geen kosten bepaald zijn, krijgt deze dezelfde waarde toegekend als het duurste concept. De waarden zijn genormaliseerd en gesommeerd. De gehele berekening is te vinden in Bijlage I.

In de MCA scoort concept 2 – Zon – de hoogste score, concept 4 – Wind – eindigt laatste. Opvallend is dat concept 3 en 4, ondanks de zwaar meetellende hoge kosten, toch niet ver achterblijven. Dit wordt immers gecompenseerd met hoog rendement en efficiënte installatie.



Grafiek 11: Resultaat MCA

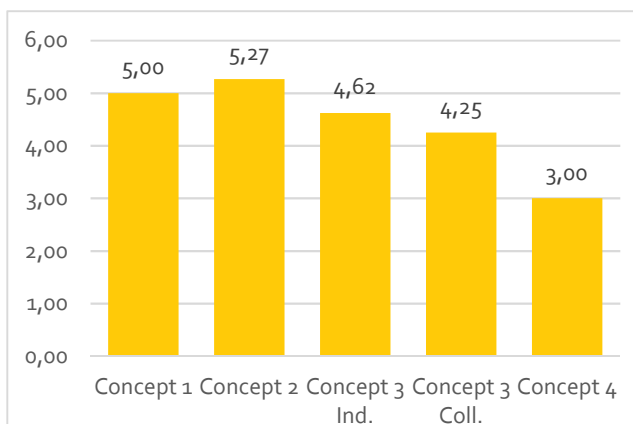
	Kosten	Efficiëntie	Installatie	Overlast	Esthetisch
Weging	3	1	1	2	2
Concept 1 – Lucht	€ 30.866	0	0	-	-
Concept 2 – Zon	€ 64.635	-	0	0	0
Concept 3.1 – Bodem (Ind.)	€ 179.674	++	-	0	+
Concept 3.2 – Bodem (Coll.)	€ 240.560	++	+	0	+
Concept 4 - Wind	-	--	++	0	0

Tabel 22: Multi Criteria Analyse

9.1 Gevoeligheidsanalyse

In een korte gevoeligheidsanalyse is de invloed van wegingen en scores op de resultaten van de MCA bekeken. Door wegingen van de criteria te variëren, blijkt de invloed van de wegingen en de betrouwbaarheid van het resultaat (zie alle resultaten in Bijlage I).

Uit de analyse blijkt dat met name de kosten zeer veel invloed hebben op de uitkomst. Wanneer deze zwaarder meetellen dan nu het geval is, komt de luchtwarmtepomp als beste uit de vergelijking, deze is immers het goedkoopst. Wanneer de kosten echter dezelfde of een lagere weging krijgen dan de overige criteria, komt in nagenoeg alle gevallen de collectieve bodemwarmtepomp als beste uit de test (Grafiek 12). Het zal daarom in praktijk van groot belang zijn om bij een eventuele koper te inventariseren hoe groot belang hij heeft bij een goedkope oplossing tegenover de andere criteria.



Grafiek 12: Resultaat MCA bij gelijke weging criteria.

10 Conclusie

In dit onderzoek zijn enkele concepten geëvalueerd om de nieuwe BENG-eisen te kunnen behalen voor het HoogWonen concept van Trebbe Wonen B.V. In eerste instantie lijken de meest veelbelovende opties te zijn: lucht-warmtepomp, zonne-energie, bodemwarmte en windenergie. De belangrijkste resultaten zijn te vinden in Tabel 23.

Concept	1: Lucht	2: Zon	3: Bodem Ind.	3: Bodem Coll.	4: Wind
Meerprijs	€ 35,328	€ 79,467	€ 178,754	€ 268,044	-
Meerprijs/ appartement	€ 1,104	€ 2,483	€ 5,586	€ 8,376	-
NPV	€ 30,866	€ 64,635	€ 179,674	€ 240,560	-
Score MCA	5,00	5,27	4,62	4,25	3,00
Voordeel	Goedkoopst	Goedkoop Uitstraling gebouw	Constant rendement Onzichtbaar	Constant rendement Onzichtbaar Weinig leidingverlies	Uitstraling gebouw
Nadeel	Geluid Geen constant rendement	Geen constant rendement	Duur Veel leidingverlies	Duur	Duur Nog onbetrouwbaar

Tabel 23: Belangrijkste resultaten onderzoek

Uit de multi-criteria volgt dat het concept Zon de beste optie is volgens dit onderzoek. De realisatie van zonnecollectoren en een 'zonne-gevel' is relatief goedkoop bekeken over de totale levensduur. Daarnaast veroorzaakt deze optie geen enkele overlast voor bewoners en is een zonne-gevel esthetisch. Enkel de efficiëntie is minder dan enkele andere concepten, omdat verreweg de meeste energie in de zomer wordt opgewekt, terwijl de energievraag bij lagere wintertemperaturen aanzienlijk hoger is dan 's zomers. Kijkend naar de aandachtspunten zoals geformuleerd in Paragraaf 4.6.1, voldoet dit concept hier het beste aan.

Als tweede volgt het concept met de luchtwarmtepomp. Deze is nog goedkoper dan het zonne-energie concept, maar ook inefficiënt wat betreft de hoge energieopbrengst 's zomers en grote vraag 's winters. Daarnaast kan deze optie wél overlast veroorzaken en bovendien zien de warmtepompen er niet fraai uit.

Gebruik van bodemenergie is qua efficiëntie een stuk constanter door het jaar heen, maar door zeer hoge kosten is dit momenteel slechts op zeer grote schaal haalbaar. Wanneer echter de kosten minder zwaar worden meegeteld, komt een collectieve warmtepomp als beste naar voren. Windenergie in de stad is ook nog erg duur en bovendien levert dit enkel elektriciteit waardoor het reguliere net overbelast kan raken.

De aanbeveling volgens dit onderzoek is om optimaal gebruik te maken van zonne-energie, door PV-panelen op de gevel en door met zonnecollectoren warmte op te wekken, om te gebruiken voor verwarming van ruimte en tapwater.

11 Discussie

De verschillende concepten zijn vergeleken op basis van de opgestelde criteria en bijbehorende ingeschatte wegingen. De beoordeling is echter zeer afhankelijk van het doel van de opdrachtgever. Wanneer deze zo goedkoop mogelijk wil bouwen zal de luchtwarmtepomp het meest aan te bevelen zijn, maar wanneer de kosten geen belangrijke rol spelen is een bodemwarmtepomp aan te raden. Als de opdrachtgever een eventueel statement wil maken om duurzaamheid te promoten en bewustzijn te creëren, zou een zonne-gevel of zelfs een windinstallatie de aanbeveling zijn. Dit onderzoek kan als handvat gebruikt worden, maar daarbij moet men onthouden dat de uiteindelijke aanbeveling ook zeer afhankelijk is van de wensen van de opdrachtgever.

In de kostenberekening is een inschatting van de kosten gemaakt voor de verschillende opties. Hierbij zijn enkel de meerkosten ten opzichte van de referentie bepaald, niet de totale kosten. Daardoor kan een verschil in kosten erg groot lijken, terwijl dit op het totaal slechts een klein verschil is. Ook kunnen de daadwerkelijke kosten in werkelijkheid anders uitvallen, maar de berekende kosten geven een goede afspiegeling van de onderlinge verhouding in kosten en een redelijke inschatting van daadwerkelijke kosten.

Inhoudelijk gezien wordt er nog erg weinig aandacht besteed aan het effect wat lokale elektriciteitsopwekking heeft op het landelijke elektriciteitsnet. Nu steeds meer mensen zelf stroom opwekken met voornamelijk zonnepanelen, wordt de benodigde capaciteit van het stroomnet ook steeds groter. Netbeheerders hebben nu op enkele plaatsen al moeite om alle woningen binnen acceptabele tijd aan te sluiten, wanneer in de toekomst meer op zonne-energie gefocust wordt zal dit een steeds beperkender factor worden. Daarnaast zal het probleem zich voordoen dat 's zomers de opbrengst het grootst is, terwijl 's winters de energievraag het hoogst is. Hiervoor zal opslag nodig zijn, maar momenteel wordt zijn hiervoor nog te weinig rendabele oplossingen. Binnen het onderzoek is ervan uitgegaan dat de elektriciteit probleemloos teruggeleverd kan worden aan het net, maar in praktijk zal in de toekomst een andere oplossing nodig zijn wanneer dit op steeds grotere schaal zal gebeuren.

12 Aanbevelingen

Bij een eventuele realisatie van een van de onderzochte concepten, zal eerst op de locatie gekeken moeten worden hoe de omstandigheden zijn. Hierbij is onder andere van belang: oriëntatie van het gebouw, schaduw, netcapaciteit, geschikte bodem voor bodemwarmte, wind, aanwezigheid van stadsverwarming et cetera. Elk van deze factoren kan immers invloed hebben op de conceptkeuze.

Vervolgens kunnen onderdelen van de concepten gecombineerd worden om tot een optimaal alternatief te komen. In een volgend onderzoek zou het gebruik van zonnecollectoren als bron voor een warmtepomp onderzocht kunnen worden. Hiermee kan namelijk de warmte van de zon gebruikt worden in combinatie met de efficiëntie van de warmtepomp, waarbij PV-panelen direct de benodigde stroom opwekken. Ook PVT-panelen zijn bruikbaar voor deze techniek. Daarnaast zou gekeken moeten worden naar de mogelijkheden voor rendabele lokale energieopslag. Opties hiervoor zijn bijvoorbeeld accu's (duur), waterstof (momenteel nog te inefficiënt) of kleinschalige warmte-koude opslag (duur en enkel op grote schaal). Opslag wordt momenteel nog nauwelijks toegepast, maar zal in de toekomst onmisbaar zijn om pieken in de energieopbrengst op te kunnen vangen.

Bodemwarmte vraagt een grote investering en maakt het daarom onbereikbaar voor kleine projecten. Dit is echter wel een zeer goede en constante bron van duurzame warmte. Daarom zou bodemwarmte of geothermie (grotere diepte dan bodemwarmte) meer geschikt zijn op grotere schaal, bijvoorbeeld als stadsverwarmingsnetwerk voor een complete woonwijk. Een gemeente zou bijvoorbeeld zo'n project kunnen uitvoeren voor een nieuwe woonwijk, waardoor de woningen duurzaam verwarmd kunnen worden maar de investering verdeeld en daarmee betaalbaar is.

Interessant is om een vergelijkbaar onderzoek uit te voeren voor een hoger gebouw van bijvoorbeeld 10 of 15 lagen. Dan zal de luchtwarmtepomp niet langer het hoogteverschil kunnen overbruggen (door te hoge druk) waardoor dit concept ontoepasbaar wordt. Hier wordt wellicht bodemwarmte onmisbaar, mede omdat dat op grotere schaal uitgevoerd kan worden. Ook zal het dakoppervlak relatief nog kleiner worden, waardoor PVT-panelen aantrekkelijker worden om dit beperkte oppervlak toch te kunnen gebruiken voor zowel elektrische als thermische energie.

Tenslotte moet men niet de invloed van slimme systemen en menselijk gedrag onderschatten. Wanneer bewoners zich bewust zijn van het effect van kleine aanpassingen zoals lampen in ongebruikte ruimtes uitzetten, een waterbesparende douchekop of de thermostaat een graad lager instellen, dan zal het energiegebruik drastisch afnemen. Ook zogenaamde 'Smart Buildings', die verschillende systemen slim aan elkaar koppelen, kunnen een grote besparing opleveren. Een duurzame wereld is enkel mogelijk door rekening te houden met alle aspecten die hierbij komen kijken: duurzaam opwekken en besparen met als uitgangspunt een leefbare stad.

13 Bibliografie

- AWB. (2017). GeniaAir systeem All electric en Hybrid. Amsterdam, Noord-Holland, Nederland.
- Bhochhibhoya, S. (2018, Juni). LCC Tool. Enschede, Nederland.
- Blaauw, N. (2017, December). Presentatie Infolunch BENG. Zwolle, Overijssel, Nederland.
- Bouw-Energie. (2018). *SPF Warmtepomp*. Opgehaald van bouw-energie.be: <http://www.bouw-energie.be/nl/bereken/spf-warmtepomp>
- CBS. (2015). *Elektriciteit in Nederland*. Den Haag: Centraal Bureau voor de Statistiek.
- CBS. (2017). *Hernieuwbare energie in Nederland 2016*. Den Haag: Centraal Bureau voor de Statistiek.
- CBS. (2018, May 30). *Aandeel hernieuwbare energie naar 6,6%*. Opgehaald van www.cbs.nl: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2018/22/aandeel-hernieuwbare-energie-naar-6-6-procent>
- CBS. (2018, March 2). *Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen*. Opgehaald van opendata.cbs.nl: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82610NED/table?ts=1523351951397>
- Entrop, B. (2013). *Assessing energy techniques and measures in residential buildings: a multidisciplinary perspective*. Enschede: Gildeprint.
- Eurima. (n.d.). *Trias Energetica*. Opgehaald van www.eurima.org: <https://www.eurima.org/energy-efficiency-in-buildings/trias-energetica.html>
- Europees Parlement. (2010). *Richtlijn 2010/31/EU betreffende de energieprestatie van gebouwen*. Straatsburg: Europese Unie.
- Europese Commissie. (2009). *2020 Climate & Energy Package*. Opgehaald van ec.europa.eu: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en
- Europese Commissie. (2016). *Annex: Accelerating clean energy in buildings*. Brussel: Europese Commissie.
- Europese Commissie. (2017). *Bijlagen bij: Voorstel voor een richtlijn van het Europees Parlement en de Raad ter bevordering van het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen*. Brussel: Europese Commissie.
- García-Gusano, D., Espegren, K., Lind, A., & Kirkengen, M. (2016). The role of the discount rates in energy systems optimisation models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016(59), 56-72.
- Goodwin, P., & Wright, G. (2004). *Decision Analysis for Management Judgment*. Chichester, West Sussex, Engeland: John Wiley & Sons Ltd.
- Harmelink, M. (2015). *Hernieuwbare energie in Bijna EnergieNeutrale Gebouwen*. Utrecht: RvO.
- Humanities Education Centre. (2009). *What is Sustainability?* Opgehaald van Global Footprints: <http://www.globalfootprints.org/sustainability>
- Ibis Power. (2017). PowerNEST. Eindhoven, Noord-Brabant, Nederland.
- Installatieprofs. (2016, Mei 11). *Legionella gevaar voor gebruikers warmtepompboiler*. Opgehaald van installatieprofs.nl: <https://www.installatieprofs.nl/nieuws/verwarming/warmtepompen/legionella-gevaar-voor-gebruikers-warmtepompboiler>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Annex III: Technology-specific Cost and Performance Parameter*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Janssen, R. (2001). On the Use of Multi-Criteria Analysis in Environmental Impact Assessment in The Netherlands. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 101-109.

- LenteAkkoord. (2017). *Woningbouw volgens BENG - do's and don'ts voor bijna energieneutrale gebouwen*.
- Meurink, A., Muller, G., & Segers, R. (2016). *Hernieuwbare Energie in Nederland 2016*. Den Haag: Centraal Bureau voor de Statistiek.
- Milieu Centraal. (2015). *Gemiddeld energieverbruik*. Opgehaald van [www.milieucentraal.nl: https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/snel-besparen/grip-op-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/](https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/snel-besparen/grip-op-je-energierekening/gemiddeld-energieverbruik/)
- Murray, P., & Cotgrave, A. (2007). Sustainability literacy: the future paradigm for construction education? *Structural Survey*, 25(1), 7-23.
- Nathan Systems. (2012, November 8). *Warm tapwater Boosterwarmtepomp WWB 20*. Opgehaald van [nathansystems.nl: https://www.nathansystems.nl/uploads/files/Nathan/Nieuws/AIT/08-11-2012-Booster/Booster_Aktionsflyer_NL_07.pdf](https://www.nathansystems.nl/uploads/files/Nathan/Nieuws/AIT/08-11-2012-Booster/Booster_Aktionsflyer_NL_07.pdf)
- Nibe NL. (2018). *NIBE water/water warmtepompen*. Opgehaald van [nibenl.eu: https://www.nibenl.eu/nibedocuments/24487/M10829-22.pdf](https://www.nibenl.eu/nibedocuments/24487/M10829-22.pdf)
- Oosterhoff, J. (2008). *Kracht + Vorm*. Zoetermeer: Bouwen met Staal.
- Physee. (2018). *Our Story*. Opgehaald van www.physee.eu: <http://www.physee.eu/our-story>
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2015). *Energieprestatie (EPC)*. Opgehaald van [www.rvo.nl: https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/nieuwbouw/energieprestatie-epc](https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/nieuwbouw/energieprestatie-epc)
- Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. (2017). *Wettelijke eisen - BENG*. Opgehaald van [www.rvo.nl: https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/nieuwbouw/energieprestatie-beng/wettelijke-eisen-beng](https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/nieuwbouw/energieprestatie-beng/wettelijke-eisen-beng)
- RVO. (2018). *Investeringssubsidie duurzame energie ISDE*. Opgehaald van [RVO.nl: https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/investeringssubsidie-duurzame-energie-isde](https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/investeringssubsidie-duurzame-energie-isde)
- RVO. (2018). *Stimulering Duurzame Energieproductie*. Opgehaald van [RVO.nl: https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/stimulering-duurzame-energieproductie](https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/stimulering-duurzame-energieproductie)
- Schiebaan, L. (2016, Februari 15). *Geluid van een omvormer*. Opgehaald van [fritts.nl: https://fritts.nl/omvormer-zonnepanelen-geluid/](https://fritts.nl/omvormer-zonnepanelen-geluid/)
- Silu. (2018). LCC. (ik, Interviewer)
- Staal-Guijt, P. (2015). *Variantberekeningen voor eisen aan BENG*. Den Haag: RvO.
- The Parliamentary Office of Science and Technology. (2016, Mei). *Carbon Footprint of Heat Generation*. Londen: Houses of Parliament UK.
- Trebbe HoogWonen. (2017). *Trebbe Hoog Wonen Brochure*.
- Trebbe HoogWonen. (2017). *Trebbe Hoog Wonen: Energiescenario's*.
- Trebbe Wonen B.V. (2017). *HoogWonen Prijzen*. Zwolle, Nederland.
- U.S. Energy Information Administration. (2017, June 1). *What is renewable energy?* Opgeroepen op March 6, 2018, van [eia - energy explained: https://www.eia.gov/energyexplained/?page=renewable_home](https://www.eia.gov/energyexplained/)
- Uniec2. (2018, April 4). *Ontwikkelingen in BENG*. Opgehaald van [Uniec2: https://uniec2.nl/2018/04/04/ontwikkelingen-in-beng/](https://uniec2.nl/2018/04/04/ontwikkelingen-in-beng/)

- Valckenborg, R. e. (2017). Zigzag structure in facade optimizes PV yield while aesthetics are preserved. *European Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 2481-2486). Eindhoven: Solar Energy Application Centre.
- van der Heide, J., Vreemann, H., & Valk, H. (2016). *Onderzoek innovatieve opties BENG*. Utrecht: RvO.
- van der Heide, R. (2017, Maart 13). *Verzekeraar Interpolis waarschuwt voor risico's zonnepanelen*. Opgehaald van fluxenergie.nl: <https://www.fluxenergie.nl/verzekeraar-interpolis-waarschuwt-risicos-zonnepanelen/>
- Verenigde Naties. (2015, September 25). *Sustainable Development Goals*. Opgehaald van www.un.org: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- Warmtepomp Info. (2017). *Epg Epc Epn*. Opgehaald van warmtepomp-info.nl: <https://www.warmtepomp-info.nl/tapwaterkosten/epg-epc-epn/>
- Warmtepomp-Weetjes. (2018). Opgehaald van Warmtepomp-Weetjes: <https://warmtepomp-weetjes.nl/>
- Zeiler, W., Gvozdenović, K., de Bont, K., & Maassen, W. (2016). Toward cost-effective nearly zero energy buildings: The Dutch Situation. *Science and Technology for the Built Environment*, 911-927.
- ZigzagSolar. (2018). *Info*. Opgehaald van zigzagsolar.nl: <http://zigzagsolar.nl/info/>
- Zondag, H. e. (2003, Maart 6). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 2003(74), 253-269.

Bijlage A – Voor-/Nadelen technieken

In deze bijlage zijn de belangrijkste voor- en nadelen weergegeven voor de beschikbare technieken om hernieuwbare energie op te wekken. De nadelen in rood zijn een reden waarom een techniek wordt verworpen, bijvoorbeeld omdat het niet toepasbaar is op het HoogWonen concept of omdat er een gasaansluiting benodigd is.

	Voordelen	Nadelen
PV-panelen	In ontwikkeling Goedkoop	Vraagt groot dakoppervlak Vraag/aanbod timing Einde saldering
BIPV	Groot potentieel bij hoogbouw Geen dakpannen oid nodig 1 partij	Vervangbaarheid Duur Nieuw en onbekend
Transparante zonnepanelen	Esthetisch	Veranda, Serre, Overkapping Beschikbaarheid Minder efficiënt
Zonnecollectoren	Combineren met warmtepomp Installatie Hoog rendement	Lange leidingen Voorraadvat
PVT-panelen	Efficiënt ruimtegebruik Prestatie door koeling Esthetisch Combinatie met warmtepomp	Duur Zwaar Lage temperatuur

Tabel 24: Technieken op basis van zonne-energie

	Voordelen	Nadelen
Horizontale windturbine	Constant door het jaar	Toepasbaarheid op gebouwen Geluid Vogels
Verticale windturbine	Constant door het jaar Veilig	Geluid Laag rendement Vogels
Ridgeblade	Subtiel Efficiënt	Duur Niet rendabel Alleen op schuin dak
Powernest	Efficiënt Stil Esthetisch 15-20.000 kWh comb. PV	Va 5 etages hoogte 6x6m Nog nauwelijks toegepast

Tabel 25: Technieken obv windenergie

	Voordelen	Nadelen
Bodemwarmte – open bron	Gangbaar Rendement Koeling (geldt niet voor BENG3) Stil	Tank Aanschafkosten Waterwingebied Enkel warmte geldt duurzaam Monitoring Alleen op grote schaal
Bodemwarmte – gesloten bron	Gangbaar Rendement Koeling (geldt niet voor BENG3) Stil	Aanschafkosten Waterwingebied Enkel warmte geldt duurzaam
Geothermie (<500m diep)	Constante temperatuur Rendement Koeling Stil	Aanschafkosten Ondergrond afhankelijk Waterwingebied Alleen op grote schaal

	Betrouwbaar	
Buitenlucht warmtepomp	Goedkoop Makkelijke installatie Rendement	Kleine Δt , grote P → Geluid Lelijke kast Lager rendement in de winter Lager rendement dan bodemwp Korte levensduur
Oppervlaktewater warmtepomp	Goedkope installatie Koeling Rendement	Locatieafhankelijk Temperatuurverloop

Tabel 26: Technieken obv bodem-/ omgevingsenergie

	Voordelen	Nadelen
Ventilatielucht warmtepomp	Makkelijke installatie Goedkoop	Geen volledig hernieuwbare bron Afhankelijk van ventilatie
Warmtewiel	Makkelijke installatie Goedkoop Hoge efficiëntie	Geen volledig hernieuwbare bron Onderhoud en apparatuur
Waterkracht uit regenwater	Overal beschikbaar Gebruik van hoogteverschil	Niet rendabel
Biomassa (houtpellets)	Veel data bekend Hoog rendement Goedkope brandstof Niet weersafhankelijk	Duurzaamheid dubieus Beschikbaarheid grondstoffen Uitstoot fijnstof Benodigde ruimte Transport
Doucheput WTW	Goedkoop Makkelijke installatie	Geen hernieuwbare bron
Externe warmte (industrie/ AVI)	Stil Eenvoudige aansluiting Comfortabel Onderhoud	Duurzaamheid variabel Locatieafhankelijk Verliezen Kosten Koeling
Brandstofcel	Opslag Wkk mogelijk Stil	Productie 44% efficiënt Meer voor bij el. overschot Levensduur Onderhoud
IJsbuffer	Alternatief voor wko Koeling Langdurige opslag Duur	Geen verbetering tov wko Weinig data bekend Buffervat

Tabel 27: Technieken obv overige energiebronnen

Alternatieve technieken zoals beweging van mensen (sportschool), lichaamswarmte, fietsen of waterafvoer zijn origineel en hebben een goede PR-waarde, maar zijn kijkende naar efficiëntie niet rendabel.

Bijlage B – Globale berekening concepten

Concept 1 - Buitenlucht

Energiebehoefte

Elektriciteit: 100.000 kWh

Warmte: 400 GJ

Warmtepomp

$$opbrengst (kWh) = vermogen(kW) \cdot aantal\ warmtepompen (n) \cdot vollasturen(uur)$$

$$vermogen = 3,5\ kW$$

$$aantal\ warmtepompen = 32$$

$$vollasturen = 1000\ uur$$

$$opbrengst = 3,5 \cdot 32 \cdot 1.000 = 112.000\ kWh = 400\ GJ$$

$$verbruik (kWh) = \frac{opbrengst (kWh)}{COP}$$

$$opbrengst = 112.000\ kWh$$

$$COP = 4$$

$$verbruik (kWh) = \frac{112.000}{4} = 27.750\ kWh$$

Percentage hernieuwbaar

Elektriciteit = -28%

Warmte = 100%

Totaal = 39% (gecorrigeerd voor verhouding in vraag elektriciteit/warmte)

Concept 2 - Zon

Energiebehoefte

Elektriciteit: 100.000 kWh

Warmte: 400 GJ

Zonne-energie

$$opbrengst = vermogen(Wp/m^2\ of\ GJ/m^2) \cdot oppervlak(m^2) \cdot factor_{NL} \cdot factor_{oriëntatie}$$

$$vermogen_{PV} = 203\ Wp/m^2$$

$$vermogen_{collector} = 1,88\ GJ/m^2$$

$$oppervlak_{PV,dak} \approx 38m^2$$

$$oppervlak_{PV,gevel} = 230m^2$$

$$oppervlak_{collector,dak} = 250m^2$$

$$factor_{NL} = 0,85$$

$$factor_{oriëntatie,dak} = 0,85$$

$$factor_{oriëntatie,gevel} = 0,65$$

$$opbrengst_{PV,dak} = 203 \cdot 38 \cdot 0,85 \cdot 0,85 = 5573\ kWh$$

$$opbrengst_{PV,gevel} = 203 \cdot 230 \cdot 0,85 \cdot 0,65 = 25796\ kWh$$

$$opbrengst_{collector} = 1,88 \cdot 250 \cdot 0,85 = 400\ GJ$$

Percentage hernieuwbaar

Elektriciteit = 31%

Warmte = 100%

Totaal = 67% (gecorrigeerd voor verhouding in vraag elektriciteit/warmte)

Concept 3 - Bodemwarmte

Energiebehoefte

Elektriciteit: 100.000 kWh

Warmte: 400 GJ

Warmtepomp

$$opbrengst (kWh) = vermogen(kW) \cdot aantal\ warmtepompen (n) \cdot vollasturen(uur)$$

$$vermogen = 3,5\ kW$$

$$aantal\ warmtepompen = 32$$

$$vollasturen = 1000\ uur$$

$$opbrengst = 3,5 \cdot 32 \cdot 1000 = 112000\ kWh = 403\ GJ$$

$$verbruik (kWh) = \frac{opbrengst (kWh)}{COP}$$

$$opbrengst = 112000\ kWh$$

$$COP = 5$$

$$verbruik (kWh) = \frac{112000}{5} = 22400\ kWh$$

Percentage hernieuwbaar

Elektriciteit = 22%

Warmte = 100%

Totaal = 42% (gecorrigeerd voor verhouding in vraag elektriciteit/warmte)

Concept 4 - Wind

Energiebehoefte

Elektriciteit: 100.000 kWh

Warmte: 400 GJ

Opbrengst PowerNest

$$opbrengst = 23.000\ kWh/jaar$$

Percentage hernieuwbaar

Elektriciteit = 23%

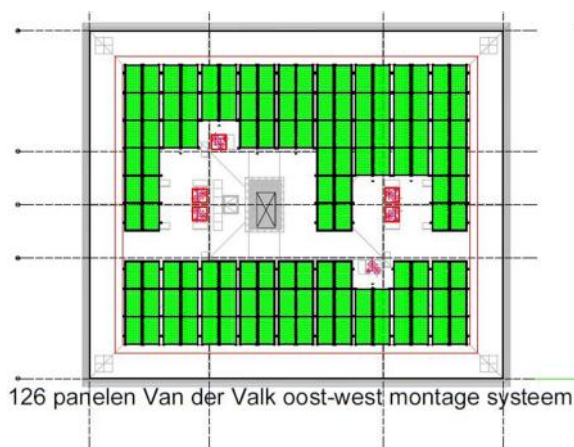
Warmte = 0%

Totaal = 11% (gecorrigeerd voor verhouding in vraag elektriciteit/warmte)

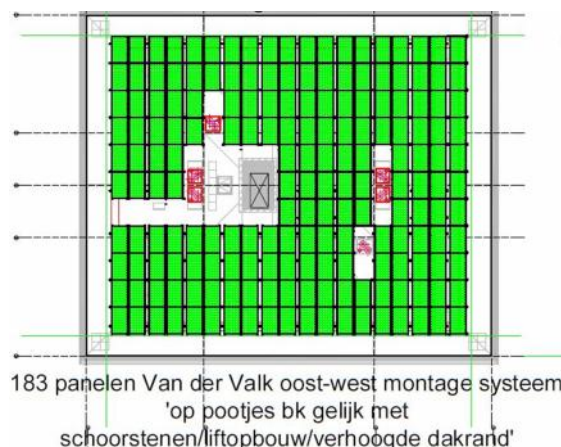
Bijlage C – Beschikbaar oppervlak PV

Dak

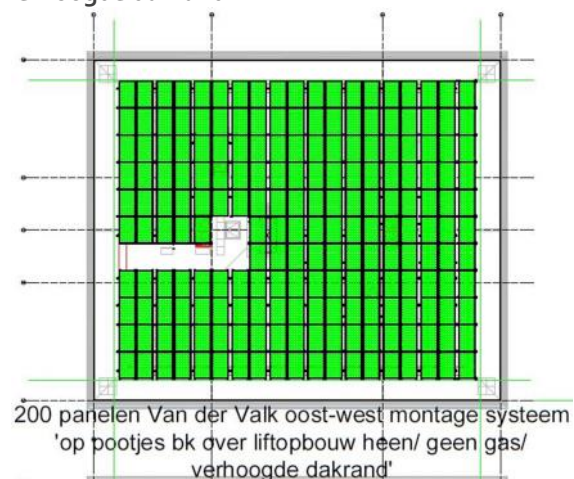
Het maximum aantal PV-panelen op het dak is bepaald aan de hand van de volgende tekeningen.



Figuur C.1: 126 panelen, niet opgehoogd, zonder verhoogde dakrand



Figuur C.2: 183 panelen, 1m opgehoogd, met verhoogde dakrand



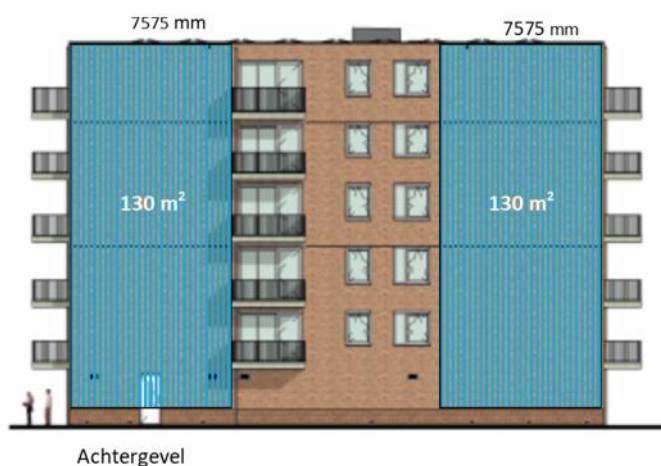
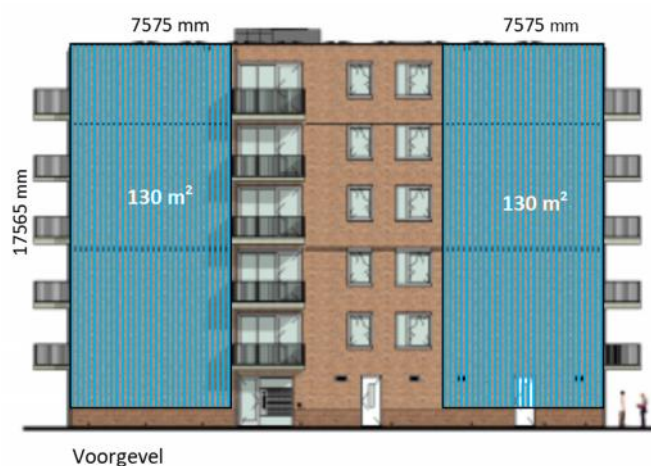
Figuur C.3: 200 panelen, 1,5m opgehoogd, met verhoogde dakrand

Gevels

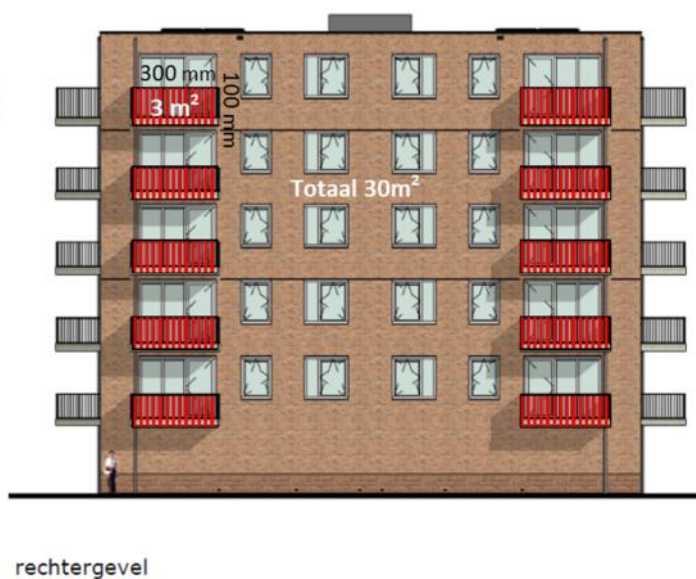
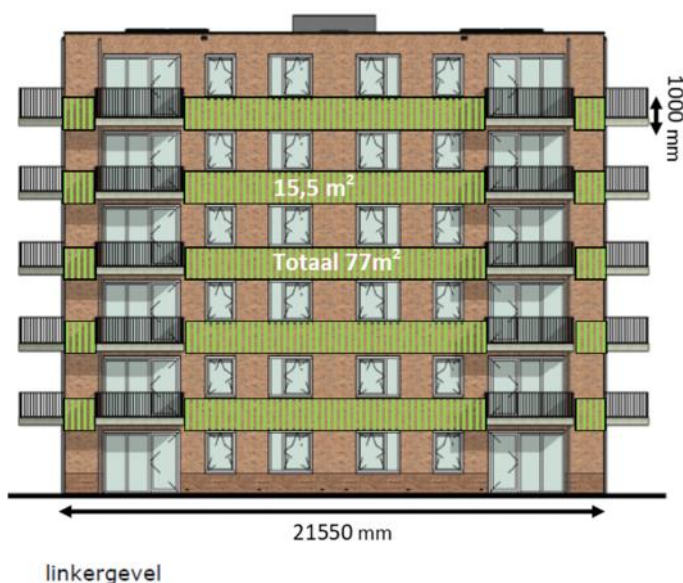
	Beschikbaar oppervlak (m ²)	
Dak	320 m ²	
	Voor-/achterkant	Linker-/rechterkant
Gevel	260 m ²	77 m ²
Balkon	15 m ²	30 m ²
Raam		112 m ²

Tabel D.1: Beschikbaar oppervlak PV(T) en zonnecollectoren

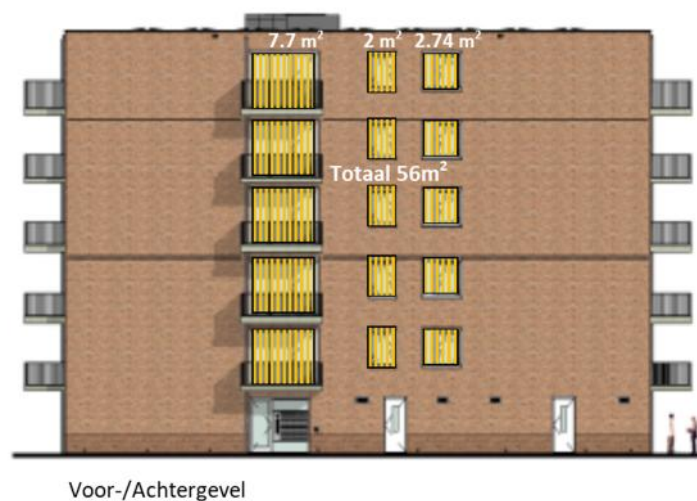
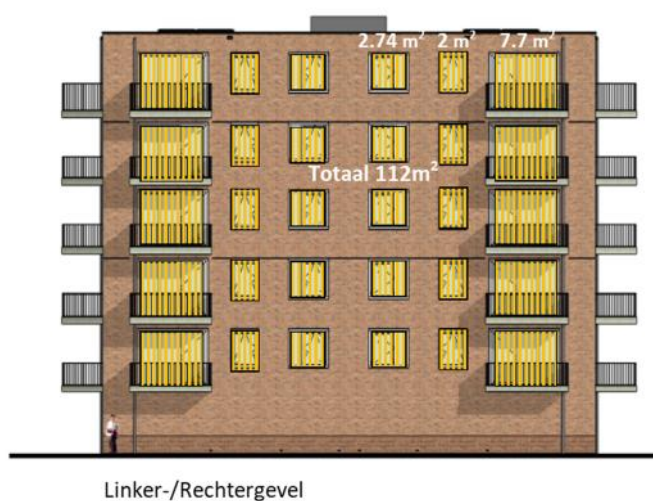
Dit is bepaald op basis van de tekeningen van de gevel, zoals te zien in Figuur C.4 t/m C.6. Zoals te zien op de tekeningen kunnen nog aanpassingen gedaan worden, in totaal is meer geveloppervlak beschikbaar maar het oppervlak beschikbaar voor zonne-energie is afhankelijk van het gebouwontwerp. Dit zou in praktijk met een architect bepaald moeten worden.



Figuur C.4: Geveloppervlak voor- en achtergevel



Figuur C.5: Geveloppervlak linker- en rechtergevel (links) en balkons (rechts)



Figuur C.6: Oppervlak ramen, uitgaande van kozijn van 10% van totaaloppervlak

Bijlage D – Uniec rapport referentiesituatie

Als uitgangspunt voor de berekeningen is het appartementengebouw gebruikt van 6 verdiepingen, met 32 appartementen van 70m². De optie all-electric BENG is als basis gebruikt, met 200 PV-panelen om aan de BENG te kunnen voldoen. In deze bijlage de in- en output uit het rekenprogramma Uniec2.

De leidinglengte is de kortste horizontale en de kortste verticale afstand opgeteld. Naar zowel badkamer als keuken is de verticale afstand 0 meter. De horizontale afstanden zijn in de plattegrond gemeten en zijn 5m (badkamer) en 8m (aanrecht).

Algemene gegevens

projectomschrijving	Centraal 6 lagen - Uitgangspunt
variant	all-electric eenvoudig BENG
straat / huisnummer / toevoeging	
postcode / plaats	Nieuwegein
eigendom	Onbekend
bouwjaar	2017
renovatiejaar	
categorie	Energieprestatie Woningbouw
woningtype	appartementengebouw
aantal woningbouw-eenheden in berekening	32
gebruiksfunctie	woonfunctie
datum	15-01-2018
opmerkingen	

Indeling gebouw

Eigenschappen rekenzones				
type rekenzone	omschrijving	interne warmtecapaciteit	Ag [m ²]	aantal wb-eenheden
verwarmde zone	Woongebouw	traditioneel, gemengd zwaar	2.599,00	32

Interne warmtecapaciteit volgens bijlage H *nee*

Infiltratie

meetwaarde voor infiltratie $q_{v,10,spec}$	<i>nee</i>
lengte van het gebouw	21,60 m
breedte van het gebouw	26,10 m
hoogte van het gebouw	21,00 m

Eigenschappen infiltratie			
rekenzone	positie	dak en/of geveltype	$q_{v,10,spec}$ [dm ³ /s per m ²]
Woongebouw	gehele gebouw	standaard geveltype	0,42 (forfaitair)

Open verbrandingstoestellen

Het gebouw bevat geen open verbrandingstoestellen.

Bouwkundige transmissiegegevens

Transmissiegegevens rekenzone Woongebouw							
constructie	A [m ²]	R _c [m ² K/W]	U [W/m ² K]	g _{gl} [-]	zonwering	beschaduwng	toelichting
voorgevel - buitenlucht, Z - 407,3 m² - 90°							
Dichte gevel	345,10	5,20				minimale belem.	
Ramen en deuren	7,70		0,99	0,60	nee	minimale belem.	
Ramen en deuren	13,70		0,99	0,60	nee	minimale belem.	
Ramen en deuren	10,00		0,99	0,60	nee	minimale belem.	
Ramen en deuren	30,80		0,99	0,60	nee	constante overstek 0,5 ≤ ho < 1,0	
gevel links - buitenlucht, W - 389,5 m² - 90°							
Dichte gevel	240,12	5,20				minimale belem.	
Ramen en deuren	72,40		0,99	0,60	nee	minimale belem.	
Ramen en deuren	77,00		0,99	0,60	nee	constante overstek 0,5 ≤ ho < 1,0	

achtergevel - buitenlucht, N - 407,3 m² - 90°

Dichte gevel	345,10	5,20				minimale belem.
Ramen en deuren	7,70		0,99	0,60	nee	minimale belem.
Ramen en deuren	13,70		0,99	0,60	nee	minimale belem.
Ramen en deuren	10,00		0,99	0,60	nee	minimale belem.
Ramen en deuren	30,80		0,99	0,60	nee	constante overstek $0,5 \leq h_o < 1,0$

gevels rechts - buitenlucht, O - 324,6 m² - 90°

Dichte gevel	200,10	5,20				minimale belem.
Ramen en deuren	62,90		0,99	0,60	nee	minimale belem.
Ramen en deuren	61,60		0,99	0,60	nee	constante overstek $0,5 \leq h_o < 1,0$

binnenwanden naar bergingen/entree - sterk geventileerd, wand - 52,0 m²

wand naar bergingen	48,00	4,50				
Ramen en deuren	4,00		0,99	0,60	nee	2 deuren

dak - buitenlucht, HOR, dak - 554,0 m² - 0°

Dak	554,00	8,00				minimale belem.
-----	--------	------	--	--	--	-----------------

vloer naar bergingen - sterk geventileerd, HOR, vloer - 355,0 m²

Vloer naar bergingen	355,00	4,50				
----------------------	--------	------	--	--	--	--

BG-vloer - vloer op/boven mv; boven kruipruimte - 145,0 m²

Vloer BG	145,00	5,00				
----------	--------	------	--	--	--	--

Lineaire transmissiegegevens rekenzone Woongebouw

constructie	l [m]	ψ [W/m²K]	omschrijving	+25%	toelichting
-------------	-------	----------------	--------------	------	-------------

voorgevel - buitenlucht, Z - 407,3 m² - 90°

kozijn	130,40	0,100	8. kozijnaansluiting		n.v.t.
balkonrand	18,00	0,150	15. galerij op vloer...		n.v.t.
dakrand	25,50	0,150	1. dakrand plat dak		n.v.t.
langsgevel-kopgevel	18,00	0,150	13. binnensp. op ge...		n.v.t.

gevel links - buitenlucht, W - 389,5 m² - 90°

kozijn	288,70	0,100	8. kozijnaansluiting		n.v.t.
balkonrand	36,00	0,150	15. galerij op vloer...		n.v.t.
dakrand	21,50	0,150	1. dakrand plat dak		n.v.t.
langsgevel-kopgevel	18,00	0,150	13. binnensp. op ge...		n.v.t.

achtergevel - buitenlucht, N - 407,3 m² - 90°

kozijn	120,30	0,100	8. kozijnaansluiting		n.v.t.
balkonrand	18,00	0,150	15. galerij op vloer...		n.v.t.
dakrand	25,50	0,150	1. dakrand plat dak		n.v.t.
dakrand	18,00	0,150	1. dakrand plat dak		n.v.t.

gevels rechts - buitenlucht, O - 324,6 m² - 90°

kozijn	240,60	0,100	8. kozijnaansluiting		n.v.t.
balkonrand	36,00	0,150	15. galerij op vloer...		n.v.t.
dakrand	21,50	0,150	1. dakrand plat dak		n.v.t.
langsgevel-kopgevel	18,00	0,150	13. binnensp. op ge...		n.v.t.

BG-vloer - vloer op/boven mv; boven kruipruimte - 145,0 m²

perimeter	58,00	0,500	perimeter		n.v.t.
-----------	-------	-------	-----------	--	--------

Overige kenmerken vloerconstructies (inclusief evt. kruipruimten en onverwarmde kelders)

BG-vloer - vloer op/boven mv; boven kruipruimte

hoogte bovenkant vloer boven maaiveld (h)	0,00 m
omtrek van het vloerveld (P)	58,00 m
grootste dikte v.d. gevels/wanden ter hoogte v.d. bk vloer ($d_{bw,v}$)	0,35 m
gem. vert. afstand tussen MV en bk kelder-, kruipruimtevloer (z_d)	1,00 m
kruipruimteventilatie (ϵ)	0,0012 m ³ /m ¹
warmteweerstand v.d. kelder-, kruipruimtwanden boven mv (R_{kw})	3,50 m ² K/W
warmteweerstand v.d. kelder-, kruipruimtwanden onder mv ($R_{bw,o}$)	2,50 m ² K/W
warmteweerstand v.d. kelder-, kruipruimtevloer (R_{bf})	0,00 m ² K/W
grootste dikte v.d. wand t.h.v. de bk kelder-, kruipruimtevloer ($d_{bw,o}$)	0,25 m

Warmtapwatersystemen

verwarming/warmtapwater 2

Opwekking

type opwekker	elektrische opwekker
toepassingsklasse (CW-klasse)	4 (CW 4, 5, 6)
toestel	elektroboiler (75%)
aantal toestellen	32
hoeveelheid energie t.b.v. warmtapwater per toestel ($Q_{W,dis,nren,an}$)	6.217 MJ
opwekkingsrendement warmtapwater - elektr. boiler ($\eta_{W,gen}$)	0,750

Kenmerken tapwatersysteem

aantal woningbouw-eenheden aangesloten op systeem	32
warmtapwatersysteem ten behoeve van	keuken en badruimte
gemiddelde leidinglengte naar badruimte	4-6 m
gemiddelde leidinglengte naar aanrecht	6-8 m
inwendige diameter leiding naar aanrecht	≤ 10 mm
afgifterendement warmtapwater ($\eta_{W,em}$)	0,798

Douchewarmteterugwinning

douchewarmteterugwinning	ja
type douchewarmtewisselaar	DSS doucheput WTW
aangesloten op	aangesloten op koudepoort douchemengkraan en inlaat toestel

Zonneboiler

zonneboiler	nee
-------------	-----

Verwarmingssystemen

verwarming/warmtapwater 1

Opwekking

type opwekker	lokale en centrale elektrische verwarming
aantal opwekkers	32
transmissieverlies verwarmingssysteem - januari (H_T)	926 W/K
warmtebehoefte verwarmingssysteem ($Q_{ht,nd,an}$)	96.856 MJ
hoeveelheid energie t.b.v. verwarming per toestel ($Q_{ht,dis,nren,an}$)	3.027 MJ
opwekkingsrendement - elektrische verwarming ($\eta_{ht,gen}$)	1,000

Kenmerken afgiftesysteem verwarming

Type warmteafgifte (in woonkamer)					
type warmteafgifte	positie	hoogte	R_c	$\theta_{em,avg}$	$\eta_{ht,em}$
radiator- en/of convectorverwarming	buitenwand	< 8 m	≥ 2,5 m ² K/W	≤ 50 °	1,00

regeling warmteafgifte aanwezig	ja
afgifterendement ($\eta_{ht,em}$)	1,000

Kenmerken distributiesysteem verwarming

buffervat buiten verwarmde ruimte aanwezig	nee
verwarmingsleidingen in onverwarmde ruimten en/of kruipruimte	nee
distributierendement ($\eta_{H,dis}$)	1,000

Hulpenergie verwarming

hoofdcirculatiepomp aanwezig	nee
aanvullende circulatiepomp aanwezig	nee

Aangesloten rekenzones

Woongebouw

Ventilatie**ventilatie 1**

ventilatiesysteem	<i>Dc. mechanische toe- en afvoer - centraal</i>
systeemvariant	<i>Brink Renavent Excellent 180, 2-zone CO2-regeling - CO2-sensor per VR</i>
luchtvolumestroomfactor voor warmte- en koudebehoefte (f_{sys})	1,00
correctiefactor regelsysteem voor warmte- en koudebehoefte (f_{reg})	0,44

Kenmerken ventilatiesysteem

werkelijk geïnstalleerde ventilatiecapaciteit bekend	nee
luchtdichtheidsklasse ventilatiekanalen	LUKA D

Passieve koeling

max. benutting geïnstal. ventilatiecapaciteit voor koudebehoefte	ja
max. benutting geïnstal. spuicapaciteit voor koudebehoefte	ja

Kenmerken warmteterugwinning

toevoerkanaal tussen buiten en WTW toestel	geïsoleerd kanaal
type isolatie toevoerkanaal tussen buiten en WTW toestel bekend	nee
lengte toevoerkanaal tussen buiten en WTW toestel (L_{bu})	5,5 m
rendement warmteterugwinning vlg. NEN 5138	0,95
rendement warmteterugwinning inclusief dissipatie	ja
fractie lucht via bypass	1

Kenmerken ventilatoren

totaal nominaal vermogen (P_{nom}) centrale ventilatie-units	2.400,00 W (32 units)
reductiefactor luchtvolumestroomregeling centrale ventilatie-units (f_{regfan})	0,364
totaal effectief vermogen (P_{eff}) van alle ventilatie-units	873,600 W

Aangesloten rekenzones

Woongebouw

Zonnestroom**Zonnestroom dak**

piekvermogen (Wp) per paneel	325 Wp/paneel
------------------------------	---------------

Zonnestroom eigenschappen

ventilatie	$\eta_{panelen}$	oriëntatie	helling [°]	beschaduwning
sterk geventileerd - vrijstaand	156	O	15	minimale belemmering
sterk geventileerd - vrijstaand	156	W	15	minimale belemmering

Resultaten

Jaarlijkse hoeveelheid primaire energie voor de energiefunctie		
verwarming (excl. hulpenergie)	$E_{H,P}$	247.951 MJ
hulpenergie		25.834 MJ
warmtapwater (excl. hulpenergie)	$E_{W,P}$	679.101 MJ
hulpenergie		0 MJ
koeling (excl. hulpenergie)	$E_{C,P}$	0 MJ
hulpenergie		0 MJ
zomercomfort	$E_{SC,P}$	54.723 MJ
ventilatoren	$E_{V,P}$	70.528 MJ
verlichting	$E_{L,P}$	119.762 MJ
geëxporteerde elektriciteit	$E_{P,exp,el}$	0 MJ
op eigen perceel opgewekte & verbruikte elektriciteit	$E_{P,pr,us,el}$	739.122 MJ
in het gebied opgewekte elektriciteit	$E_{P,pr,dei,el}$	0 MJ
Oppervlakten		
totale gebruiksoppervlakte	$A_{g,tot}$	2.599,00 m ²
totale verliesoppervlakte	A_{ls}	2.591,22 m ²
Elektriciteitsgebruik		
gebouwgebonden installaties		129.980 kWh
niet-gebouwgebonden apparatuur (stelpost)		72.855 kWh
op eigen perceel opgewekte & verbruikte elektriciteit		80.200 kWh
geëxporteerde electriciteit		0 kWh
TOTAAL		122.636 kWh
CO ₂ -emissie		
CO ₂ -emissie	m_{co2}	28.118 kg
Energieprestatie		
specifieke energieprestatie	EP	177 MJ/m ²
karakteristiek energiegebruik	$E_{P,tot}$	458.777 MJ
toelaatbaar karakteristiek energiegebruik	$E_{P,adm,tot,nb}$	578.135 MJ
energieprestatiecoëfficiënt	EPC	0,318 -
energieprestatiecoëfficiënt	EPC	0,32 -
BENG indicatoren		
energiebehoefte		17,2 kWh/m ²
primair energiegebruik		36,2 kWh/m ²
aandeel hernieuwbare energie		46 %

Het gebouw voldoet aan de eisen inzake energieprestatie uit het Bouwbesluit 2012.

Uniec 2.2 is gebaseerd op NEN7120:2011 "Energieprestatie van gebouwen" (inclusief het Nader Voorschrift) en NEN 8088-1 "Ventilatie en luchtdoorlatendheid van gebouwen" inclusief alle wettelijk van kracht zijnde correctiebladen.

Alle bovenstaande energiegebruiken zijn genormeerde energiegebruiken gebaseerd op een standaard klimaatjaar en een standaard gebruikersgedrag. Het werkelijke energiegebruik zal afwijken van het genormeerde energiegebruik. Aan de berekende energiegebruiken kunnen geen rechten ontleend worden.

Bijlage E – Uniec berekeningen

Voor de energieberekeningen van de concepten is de referentiesituatie het uitgangspunt zoals in Bijlage C, deze wordt vervolgens aangepast waar nodig. In de meeste gevallen betreft dit de installaties voor verwarming, warm tapwater en zonnestroom. Het ventilatiesysteem en de gebouwkenmerikken blijven onveranderd. De gemaakte veranderingen zijn toegelicht in deze bijlage, wanneer een systeem niet is toegelicht kan ervan uit worden gegaan dat er geen aanpassing is gedaan.

E.1 Concept Omgevingslucht

Verwarming/ Warm tapwater – Optie 1.1: buitenluchtwarmtepomp

De elektrische boiler en convectoren worden vervangen door een combi-warmtepomp op buitenlucht, voor elk appartement een, zoals onderstaand.

Opwekking

type opwekker	combi-warmtepomp
bron warmtepomp	buitenlucht
verklaring verwarming EN warmtapwater	☒ ja ☐ nee ☐ alle toestellen tonen
toestel - warmtepomp*	AWB Genia Air 5/2 met ThermoBoiler FEW 200 ME
ontwerpaanvoertemperatuur	$\theta_{sup} \leq 30^\circ$
energiefractie warmtepomp	1,000
aantal warmtepompen* 	32
type bijverwarming 	elektrisch element
bijstooktoestel geïntegreerd	☐ ja ☒ nee

De warmteafgifte gebeurt via lage temperaturen vloerverwarming. Daarbij wordt gebruik gemaakt van doucheput warmteterugwinning, zoals ook in de originele situatie.

Verwarming/ Warm tapwater – Optie 1.2: buitenluchtwarmtepomp voor verwarming in combinatie met warmtepompboiler

Bij de tweede optie wordt de verwarming van de woning geregeld via 32 buitenluchtwarmtepompen, voor elk appartement een.

Opwekking

type opwekker	warmtepomp
bron warmtepomp	buitenlucht
solo warmtepomp	☒ ja ☐ nee ☐ alle toestellen tonen
toestel - warmtepomp	AWB Genia Air 5/2
aantal warmtepompen* 	32
ontwerpaanvoertemperatuur	$\theta_{sup} \leq 30^\circ$
energiefractie warmtepomp	1,000
type bijverwarming 	elektrisch element
bijstooktoestel geïntegreerd	☐ ja ☒ nee

Het warm tapwater wordt gemaakt door een warmtepompboiler, die de warmte uit ventilatieafvoerlucht gebruikt om tapwater te verwarmen.

type opwekker	elektrische warmtepompboiler
toepassingsklasse (CW-klasse) 	4 (CW 4, 5, 6)
toestel	elektrische warmtepomp, ventilatietourlucht als bron (14 )
aantal toestellen 	32

Ook hier gebeurt de warmteafgifte via lage temperatuurs vloerverwarming. Daarbij wordt gebruik gemaakt van doucheput warmteterugwinning, zoals ook in de originele situatie.

Zonnestroom

Er komen 140 PV-panelen, in O/W-opstelling geplaatst onder een hoek van 15°. De panelen hebben een piekopbrengst van 325 Wp per paneel.

Resultaat

Warmtepomp	PV-panelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
AWB Genia air 5/2	0	17	60	19%
AWB Genia air 5/2	140	17	25	53%
AWB Genia air 5/2 & warmtepompboiler	150	17	22	50%

Tabel E.1: Resultaten Luchtwarmtepomp

E.2 Concept Zon

Beschikbaar oppervlak

Het beschikbare oppervlak voor PV(T) en zonnecollectoren is als volgt:

	Beschikbaar oppervlak (m ²)	
Dak	320 m ² (max. 200 PV-panelen)	
	<i>Voor-/achterkant</i>	<i>Linker-/rechterkant</i>
Gevel	260 m ²	77 m ²
Balkon	15 m ²	30 m ²
Raam		112 m ²

Tabel E.2: Beschikbaar oppervlak PV(T) en zonnecollectoren

Kentallen opbrengst

In de onderstaande tabel zijn de waarden weergegeven die gebruikt zijn als opbrengst van verschillende types PV-panelen en collectoren.

Techniek	Toepassing	Materiaal	Opbrengst	Leverancier
PV	Dak	Kristallijn	203 Wp/m²	Sunforce
	Gevel	Kristallijn	175 Wp/m²	Megasol
		Thin film	135 Wp/m²	EigenEnergie
		ZigZag (Kristallijn)	150 Wp/m² paneel	ZigZag Solar
	Balkon transparant	Kristallijn	140 Wp/m²	Ertex Solar
	Raam	Thin film	34 Wp/m²	Onyx Solar
Collector	Dak	Vlakkeplaat	Warmte	Nefit
PVT	Dak	Vlakkeplaat	163 Wp/m² (el.) + Warmte	Alius Energy

Tabel E.3: Opbrengst technieken zonne-energie

Test 1: PV-installaties gevel

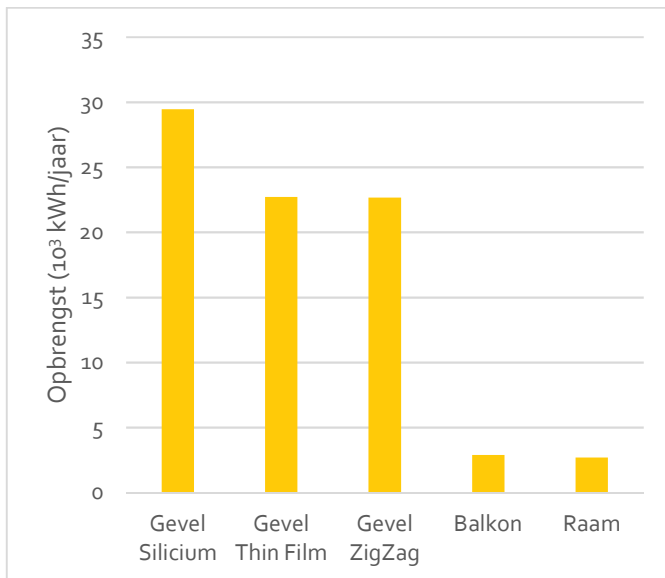
In de software is een extra 'e-installatie' toegevoegd voor PV-panelen op de gevel. Hier is uitgegaan van 1 gevel gericht op het zuiden. De panelen zijn geplaatst onder een hoek van 90° en zijn matig geventileerd (balkons en ramen sterk geventileerd). De waarden uit Tabel D.1 en D.2 zijn gebruikt.

Voor de **ZigZag** is de opbrengst van 150 Wp/m² gecorrigeerd met een factor 1,55 voor de toegenomen efficiëntie van het systeem, naar 230 Wp/m² paneel (of 125 Wp/paneel):

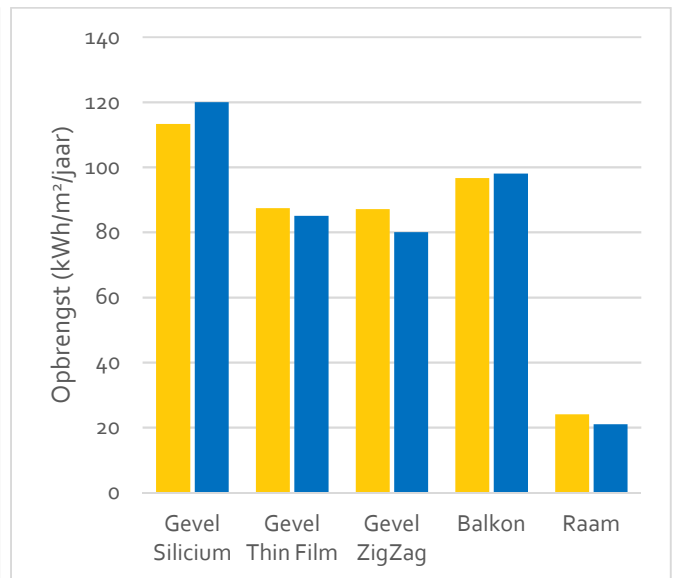
$$\text{correctiefactor} = \frac{\text{efficiëntie}_{\text{zigzag,gevel}}}{\text{efficiëntie}_{\text{standaard,gevel}}} = \frac{124\%}{80\%} = 1,55 \text{ (Valckenborg, 2017)}$$

In totaal kunnen 280 van deze panelen op de wand geplaatst worden.

De resultaten wanneer de genoemde technieken worden toegepast op de zuidgevel, zijn weergegeven in onderstaande figuren. In de linker figuur staat de totale opbrengst van 1 gevel, rechts de opbrengst/m² geveloppervlak. Ter verificatie is ook de verwachte opbrengst (blauw) opgenomen in de rechter figuur. Hier is te zien dat de resultaten uit de software minder dan 10% afwijken van de verwachte waarde gevonden in literatuur.



Figuur E.1: Opbrengst uit Uniec² van 1 gevel op zuid



Figuur E.2: Opbrengst/m² gevel op zuid uit Uniec² (groen) en verwachte opbrengst o.b.v. literatuur (blauw)

Test 2: PVT versus collectoren

De zonnecollectoren of PVT-panelen worden opgenomen in de warm tapwater installatie. Er blijft een elektrische opwekker, maar daarbij wordt water voorverwarmd door de zonneboiler of door PVT-panelen (zie onderstaande figuur). Voor de PVT-panelen is daarbij aangegeven dat sprake is van een PVT-systeem, zowel bij de verwarming als ook bij de e-installatie voor elektriciteit.

Zonneboiler

zonneboiler(combi) ten behoeve van

☒ ja ☐ nee

rekenmethode i

warmtapwater ▼

merkonafhankelijk of productspecifiek

methode b volgens NEN 7120 bijlage I ▼

warmteopslagvat

forfaitaire zonneboiler ▼

type naverwarming

in verwarmde ruimte ▼

leidingen tussen warmteopslag en collectoren

indirect met gas gestookt / 24-uurs electrisch ▼

zonnekeur i

geïsoleerd ▼

collectortype

☐ ja ☒ nee

afdekking collector

vlakke plaat ▼

spectraal selectief i

glas of kunststof ▼

PVT systeem i

☒ ja ☐ nee

thermosifon of ICS systeem i

geen PVT systeem ▼

☐ ja ☒ nee

Zonneboiler eigenschappen i

oriëntatie	helling [°]	A _{col} [m²]	V _{sla} [dm³]	V _{bu} [dm³]	P _{defrost} [W]	aantal ZB	beschaduwning
Z ▼	15 ▼	2,55	120	0	0	32	minimale belemmering ▼

De resultaten van de berekeningen zijn te vinden in onderstaande grafiek. Hier is te zien dat een oplossing met collectoren/PVT-panelen aangevuld met PV-panelen nooit de BENG zal halen en daarmee altijd gecombineerd moet worden met een andere oplossing. Opvallend is dat PVT-panelen minder goed uit de test komen dan reguliere collectoren, en ook het minimale verschil wanneer het aantal collectoren verdubbelt.

Collectoren	PVT-panelen	PV-panelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
32	0	150	17	37	48%
64	0	100	17	46	51%
0	32	168	17	39	42%
0	64	136	17	36	50%

Tabel E.4: Resultaten zonnecollectoren en PVT-panelen

Optie 2.1: BIPV

Bij het BIPV concept is getest of aan de BENG-eisen voldaan kan worden door het bedekken van 1 of meerdere gevels met kristallijn of thin-film zonnecellen. De resultaten staan in onderstaande tabel:

Gevel	Balkon	Dak	BENG 1	BENG 2	BENG 3
Kristallijn O+Z	Nee	200	17	34	48%
Kristallijn O+Z+W	Nee	192	17	25	59%
Thin-film O+Z+W	Nee	200	17	25	59%

Tabel E.5: Resultaten BIPV, ongunstige oriëntatie

Optie 2.2: Collectoren & BIPV

In de tweede optie zijn zonnecollectoren gecombineerd met BIPV. Voor elk appartement is een collector aangesloten op de warm tapwater installatie, zoals bij test 2 toegepast. Daarnaast is een oostgevel bedekt met thin-film zonnecellen, zoals bij test 1 toegepast. Hierbij is rekening gehouden met de meest ongunstige oriëntatie van het gebouw. Wanneer maximale aantal panelen op het dak ligt, is dus minimaal 145 m² geveleppervlak nodig, bij bedekken van een volledige gevel komen nog 112 PV-panelen op het dak.

PV dak	PV gevel	Collector	BENG 1	BENG 2	BENG 3
150 (max)	145	32	17	25	61%
110	260 (max)	32	17	25	61%

Tabel E.6: Resultaten Collectoren icm BIPV

E.3 Concept Bodemwarmte

Optie 3.1: individuele bodemwarmtepomp

Een combi-systeem is toegepast voor verwarming en warm tapwater, waarbij elk appartement een eigen bodemwarmtepomp krijgt aangesloten op collectieve bron. Dit is gebaseerd op de Nibe F1245-5:

Opwekking

type opwekker	elektrische warmtepomp, voldoet aan tabel 14.14 (WP-ke ▼)
toepassingsklasse (CW-klasse) ⓘ	4 (CW 4, 5 en 6) ▼
bron warmtepomp	bodem ▼
ontwerpaanvoertemperatuur	$\theta_{sup} \leq 30^\circ$ ▼
vermogen en β -factor warmtepomp* ⓘ	5,0 kW β -factor warmtepomp 6,61
aantal opwekkers* ⓘ	32
type bijverwarming ⓘ	elektrisch element ▼
bijstooktoestel geïntegreerd	☒ ja ☐ nee

Warmteafgifte geschiedt via vloerverwarming op lage temperatuur. Daarnaast zijn 156 PV-panelen geplaatst op het dak, om de BENG-eisen te kunnen behalen.

Warmtepomp	Zonnepanelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
32 x 5kW	0	17	65	18%
32 x 5kW	158	17	25	55%

Tabel E.7: Resultaten bodemwarmtepomp individueel

Optie 3.2: collectieve bodemwarmtepomp

Bij een collectief systeem, moeten verwarming en tapwater als aparte systemen ingevoerd worden. Voor verwarming zijn 6 bodemwarmtepompen van elk 10 kW ingevoerd als collectieve warmtebron:

Opwekking

type opwekker	elektrische warmtepomp, voldoet aan tabel 14.14 (WP-ke ▼)
bron warmtepomp	bodem ▼
ontwerpaanvoertemperatuur	$\theta_{sup} \leq 30^\circ$ ▼
vermogen en β -factor warmtepomp* ⓘ	10,0 kW β -factor warmtepomp 2,48
aantal opwekkers*	6
type bijverwarming ⓘ	elektrisch element ▼
bijstooktoestel geïntegreerd	☒ ja ☐ nee
opwekkingsrendement - warmtepomp ($\eta_{it,gen}$)	4,550

Warmteafgifte gebeurt via lage-temperatuur vloerverwarming.

Voor verwarming van tapwater gebruikt een boosterwarmtepomp het water afkomstig van de bodemwarmtepomp. Omdat dit systeem nog niet in de software is opgenomen, moet men daarvoor zelf de efficiëntie van het gehele proces inschatten door de rendementen van warmtepomp en booster te

combineren (Straathof, persoonlijke communicatie, 2018). Ervan uitgaande dat zowel de warmtepomp als booster het water elk 20°C opwarmen, is het aandeel van beide 50%.

$$\begin{aligned} Rendement_{tot} &= Rendement_{wp} * aandeel_{wp} + Rendement_{booster} * aandeel_{booster} \\ &= 455\% * 50\% + 90\% * 50\% = 270\% \end{aligned}$$

Het gebruikte rendement is dus 270% of 2,7.

Opwekking

warmtapwaterbereidingsysteem  indirect verwarmde warmwatervoorraadvat(en) ▼

forfaitair of productspecifiek forfaitair ▼

aantal type opwekkers 1 ▼

type opwekker kwaliteitsverklaring excl. hulpenergie - warmtepomp ▼

opwekkingsrendement* 2,700

opwekkingstoestel tevens gebruikt voor verwarming ☒ ja ☐ nee

opwekkingstoestel zonder hulpenergie  ☐ ja ☒ nee

De warmteafgifte gebeurt wederom via lage-temperatuurs vloerverwarming.

Daarbij komen er 98 PV-panelen op het dak om de BENG-eisen te behalen.

Warmtepomp	Zonnepanelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
6 x 10kW	0	17	50	31%
6 x 10kW	98	17	25	57%
32 x 5kW	158	17	25	55%

Tabel E.8: Resultaten collectieve warmtepomp (met individueel systeem ter vergelijking)

E.4 Wind

Windenergie is nog niet opgenomen in de Uniec² software, daarom is een equivalente PV-installatie ingevoerd.

Een unit van 7,2x10,8m levert 25,1 MWh per jaar (op een 10 verdiepingen hoog gebouw in Amsterdam) (Ibis Power, 2017). Corrigeren naar een gebouw van 5 verdiepingen levert een opbrengst van 24,0 MWh/jaar, in theorie kunnen er 4 dergelijke units op het gebouw. Een PV-installatie van 98,6 m² met een vermogen van 300 Wp/m² is equivalent aan een PowerNEST unit. Daarnaast wordt het dakoppervlak opgevuld met PV-panelen van 325 Wp/paneel.

PowerNEST	PV-panelen	BENG 1	BENG 2	BENG 3
1 unit	150	17	54	31%
2 units	100	17	43	40%
3 units	50	17	32	51%
4 units	0	17	21	64%

Tabel E.9: Resultaten windenergie

Wanneer de windenergie niet gecombineerd wordt met bijvoorbeeld een warmtepomp, kunnen de eisen alleen behaald worden door het volledige dak met 4 units te bedekken.

Bijlage F – Gevoeligheidsanalyse Uniec²

Om de gevoeligheid van de resultaten uit de Uniec² software testen, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Daarbij is gekeken wat er gebeurt met de BENG-3 waarden wanneer een parameter met 20% toe of afneemt. De in rood aangegeven parameters hebben een significante invloed en worden daarom besproken in Paragraaf 6.7.

Parameter	Variatie in parameter			Invloed op BENG-3		
	-20%	0	+20%	-20%	0	+20%
Gebouwkaracteristieken						
Gebouwhoogte (m)	16.8	21	25.2	104%	100%	100%
Isolatie (R _c)	4.16	5.2	6.24			
	6.4	8	9.6			
	3.6	4.5	5.4			
	4	5	6	96%	100%	104%
Elektrische boiler						
CW-klasse (-)	3.2	4		100%	100%	
Aantal toestellen (-)	25.6	32	38.4	100%	100%	100%
Leidinglengte (m)	2-4	4-6	6-8			
	4-6	6-8	8-10	113%	100%	96%
Diameter leiding (mm)	<8	<10	>10	109%	100%	91%
Ventilatie						
Lengte toevoerkanaal WTW (m)	4.4	5.5	6.6	104%	100%	100%
Zonnepanelen						
Piekvermogen (Wp)	260	325	390	74%	100%	130%
Helling (°)	12	15	18	104%	100%	100%
Ventilatie (-)	niet	matig	sterk	95%	100%	110%
Warmtepomp						
Ontwerpaanvoertemperatuur (°C)	30-35	40-45	50-55	104%	100%	98%
Volume zonneboiler (L)	96	120	144	98%		102%
beta-factor (-)	0.8	1	1.2	100%	100%	100%
Opwekkingsrendement booster (-)	2.16	2.7	3.24	84%		109%

Tabel F.1: Gevoeligheidsanalyse Uniec²

Bijlage G – Kostenberekening

Van concept 4 – Wind – zijn geen kosten beschikbaar gesteld. Daarom kunnen hiervoor de NPV en terugverdientijd niet bepaald worden.

Berekening Investeringskosten

Wat	in BTW	per	o-Ref 356 PV	1-Lucht	2-Zon	3-Bodem Ind.	3-Bodem Coll.
PV dak		panelen	200	140	110	158	98
PV Carport		panelen	156	0	0	0	0
PV gevel		m2	0	0	260	0	0
Loodgieterswerk			€ 251,680	€ 193,600	€ 193,600	€ 193,600	€ 193,600
Verwarming			€ 104,544	€ 540,870	€ 460,889	€ 710,270	€ 814,330
Ventilatie D			€ 203,280	€ 203,280	€ 203,280	€ 203,280	€ 203,280
Elektra excl. PV			€ 198,440	€ 169,400	€ 198,440	€ 169,400	€ 169,400
PV op dak	€ 484.00						€ 47,432.00
PV op 1m	€ 617.10				€ 67,881	€ 97,502	
PV op 1.5m	€ 653.40		€ 130,680	€ 91,476			
PV gevel	€ 453.75	/m2			€ 117,975		
Vervangen gevel	€ -113.00	/m2			€ -29,380		
PV Carport	€ 1,391.50	/paneel	€ 217,074				
PV Totaal			€ 347,754	€ 91,476	€ 156,476	€ 97,501	€ 47,432
Verhoogde dakrand			€ 36,300	€ 36,300	€ 36,300	€ 36,300	€ -
ISDE Luchtwarmtepomp	€ 1,800.00	/AWB pomp		€ 57,600.00			
ISDE Zonneboiler	€ 860.00	/zonneboiler			€ 27,520.00		
ISDE Bodemwarmtepomp 5kW	€ 2,800.00	/warmtepomp				€ 89,600.00	
ISDE Bodemwarmtepomp 10kW	€ 3,000.00	/warmtepomp					€ 18,000.00
Subsidie				€ 57,600.00	€ 27,520.00	€ 89,600.00	€ 18,000.00
INVESTERING			€ 1,141,998.00	€ 1,177,326.00	€ 1,221,464.88	€ 1,320,751.80	€ 1,410,042.00
EXTRA INVESTERING				€ 35,328.00	€ 79,466.88	€ 178,753.80	€ 268,044.00

Berekening periodieke kosten

Wat	in BTW	per	o-Ref 356 PV	1-Lucht	2-Zon	3-Bodem Ind.	3-Bodem Coll.
Algemeen							
Appartementen			32	32	32	32	32
Warmtepompen			0	32	0	32	6
PV dak		panelen	200	140	110	158	98
PV gevel		m2	0	0	260	0	0
PV Carport		panelen	156	0	0	0	0
Energiegebruik			111325	111143	111148	110768	111061
Verwarming							
Luchtwarmtepomp	€ 50.00	/wp/jr		€ 1,600.00			
Bodemwarmtepomp 5kW	€ 50.00	/wp/jr				€ 1,600.00	
Bodemwarmtepomp 10kW	€ 100.00	/wp/jr					€ 600.00
Zonneboiler	€ 50.00	/boiler/5jr			€ 1,600.00		
PV							
PV	€ 3.00	/paneel/5jr	€ 1,068.00	€ 420.00	€ 330.00	€ 474.00	€ 294.00
Omvormer	€ 1,000.00	/10jr	€ 1,000.00	€ 1,000.00	€ 1,000.00	€ 1,000.00	€ 1,000.00
PV gevel	€ 1.88	/m2/5jr			€ 488.80		
Subsidie SDE+ PV	€ 0.04	/kWh	€ 3,847.03	€ 1,512.88	€ 2,355.76	€ 1,707.39	€ 1,059.01
Energiekosten			€ 23,934.88	€ 23,895.75	€ 23,896.82	€ 23,815.12	€ 23,878.12
Besparing				€ 39.13	€ 38.06	€ 119.76	€ 56.76
EXTRA KOSTEN JAARLIJKS			€ 1,600	€ -	€ 1,600	€ 600	€ 1,600
EXTRA KOSTEN PER 5 JAAR			€ -648	€ 1,351	€ -594	€ -774	€ -648
EXTRA KOSTEN PER 10 JAAR			€ -	€ -	€ -	€ -	€ -

Life Cycle Costs

Van alle kasstromen is de net present value over de levensduur bepaald, gebruik makend van de volgende formule:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1 + d - i)^t}$$

R_t = inkomst/uitgave in jaar t (€)

d = disconteringsvoet (%) = 4,5%

i = inflatiefactor (%) = 1,5%

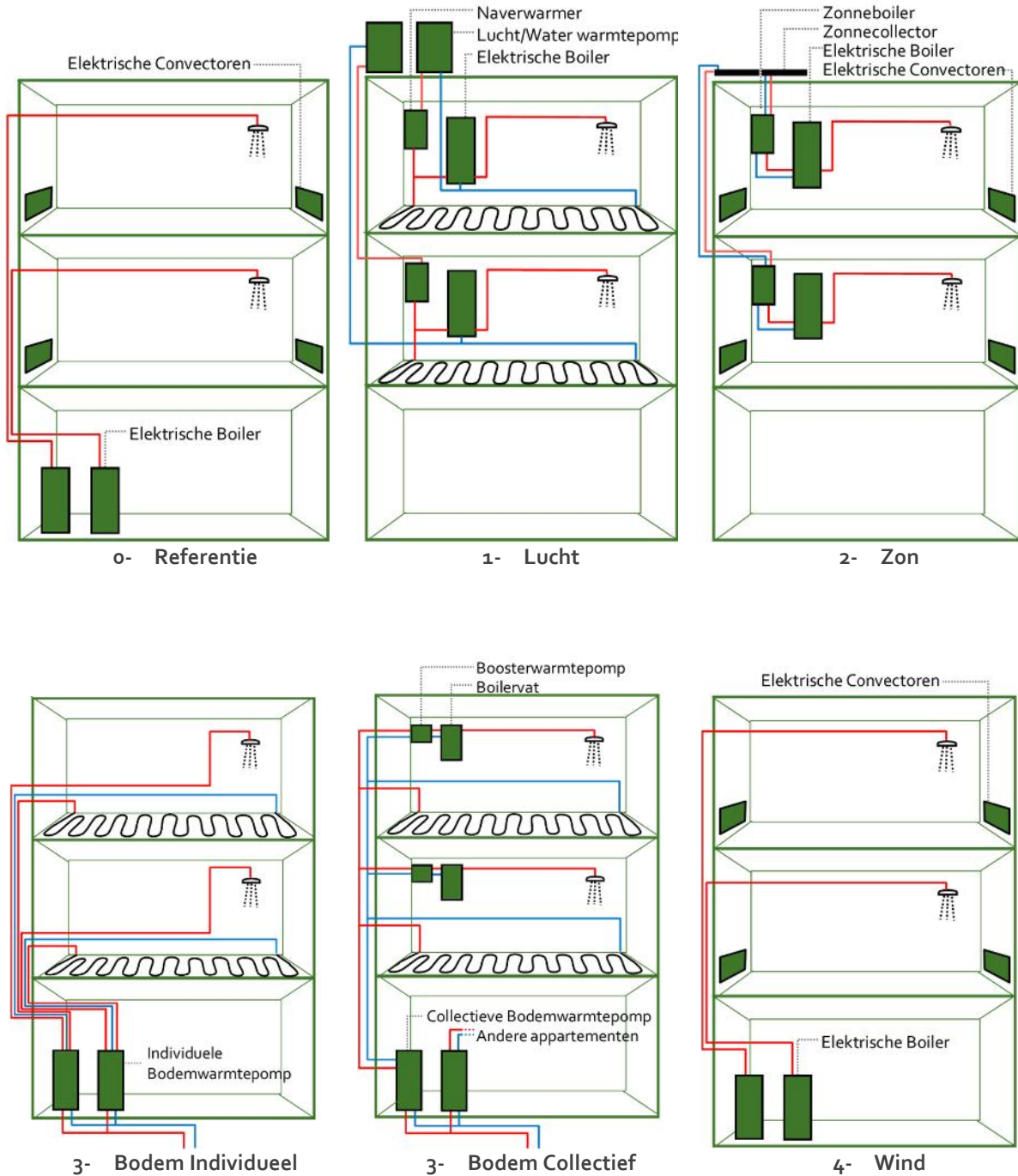
n = levensduur (jaar)

Dit leidt tot de NPV van de totale installatie. Alle bedragen zijn ten opzichte van de referentie: positieve waarden zijn dus duurder dan de referentie, negatieve waarden zijn goedkoper en leiden tot winst op de referentie.

	Concept 1	Concept 2	Concept 3 Individueel	Concept 3 Collectief
Levensduur (jaar)	22	25	27	27
Net Present Values				
Investering	€ 35,328	€ 79,467	€ 178,754	€ 268,044
Onderhoudskosten				
Jaarlijks	€ 1,600	€ -	€ 1,600	€ 600
5 jaarlijks	€ -648	€ 1,351	€ -594	€ -774
10 jaarlijks	€ -	€ -	€ -	€ -
Subsidie	€ -2,334	€ -1,491	€ -2,140	€ -2,788
Energiekosten	€ -39	€ -38	€ -120	€ -57
NPV TOTAAL	€ 30,866	€ 64,635	€ 179,674	€ 240,560

Bijlage H – Installaties

Voor elk concept is hieronder weergegeven hoe de appartementen verwarmd worden. Hierbij zijn twee boven elkaar gelegen appartementen te zien, met daaronder een berging op de begane grond.



Bijlage I – MCA

Weging Criteria

Om de weging van criteria te bepalen is het belang van verschillende actoren ingeschat. Vanuit het oogpunt van de actor zijn punten verdeeld over de criteria, vervolgens zijn deze bij elkaar opgeteld, rekening houdend met de invloed die de actoren hebben.

Actor	Architect	Bouwkundige	Installateur	Projectleider	Eigenaar	Bewoner	
Invloed	Midden	Laag	Laag	Midden	Hoog	Hoog	Totaal
Kosten	2	2	1	3	5	4	3,3
Efficiëntie	1	2	3	2	1	1	1,4
Installatie	1	4	5	1	0	0	1,1
Overlast	3	1	1	2	2	2	2,0
Esthetisch	3	1	0	2	2	3	2,2

Tabel I.1: Weging criteria

Kwalitatieve beoordeling

De kwalitatieve criteria zijn beoordeeld op basis van Paragraaf 8.3.

	1	2	3 Ind.	3 Coll.	4
<i>Warmte/Elektriciteit</i>	+	0	+	+	-
<i>Timing</i>	-	-	+	+	-
Totaal Efficiëntie	0	-	++	++	--
<i>Aantal apparaten</i>	-	-	+	0	+
<i>Leidinglengte</i>	0	0	-	0	+
<i>Temperatuur in leiding</i>	+	+	-	+	0
Totaal Installatie	0	0	-	+	++
<i>Geluid</i>	-	+	+	0	0
<i>Ruimte</i>	0	-	-	0	0
Totaal Overlast	-	0	0	0	0
<i>Uitstraling installatie</i>	-	+	0	0	+
<i>Vrijheid architect</i>	0	-	+	+	-
Totaal Esthetisch	-	0	+	+	0

Tabel I.2: Kwalitatieve beoordeling

Multi-Criteria Analyse

	Kosten	Efficiëntie	Installatie	Overlast	Esthetisch
Weging	3	1	1	2	2
Concept 1 – Lucht	€ 30.866	0	0	-	-
Concept 2 – Zon	€ 64.635	-	0	0	0
Concept 3.1 – Bodem (Ind.)	€ 179.674	++	-	0	+
Concept 3.2 – Bodem (Coll.)	€ 240.560	++	+	0	+
Concept 4 – Wind	-	--	++	0	0

Tabel I.3: Scores concepten

Normalisatie

Om de resultaten op te kunnen tellen, worden deze genormaliseerd naar een score tussen 0 en 1. De kwalitatieve waarden zijn geschaald, waarbij -- → 0,0 en 0 → 0,5 en ++ → 1,0.

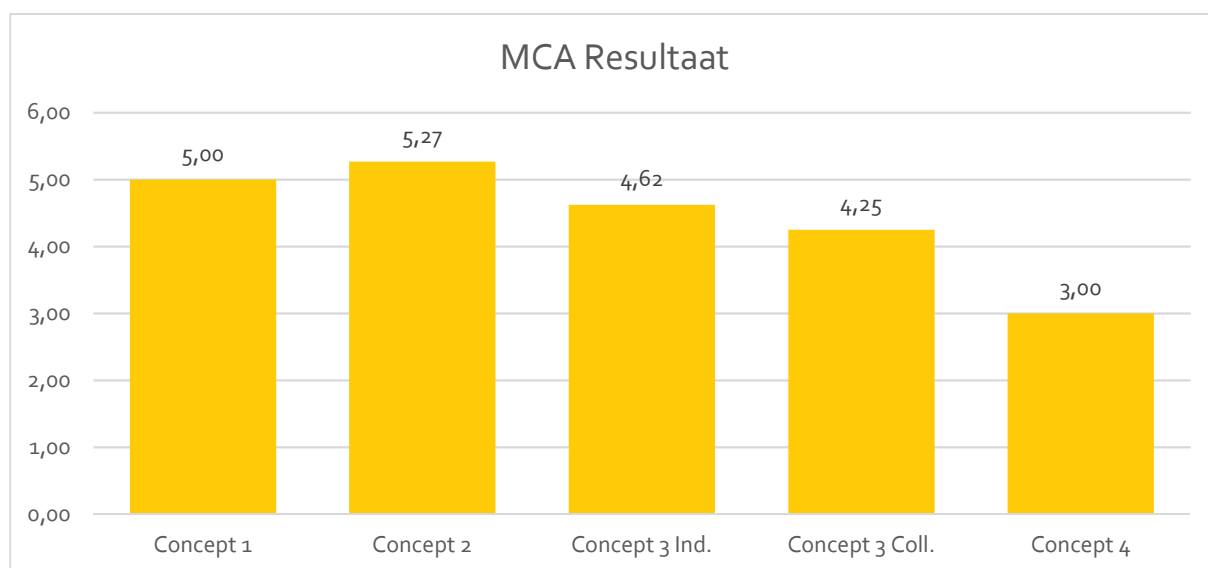
Voor de kosten is de laagste NPV op 1 gesteld, de hoogste NPV is 0. De tussenliggende waarden zijn bepaald via een lineaire functie door deze punten. Op deze manier wordt rekening gehouden met de verschillen tussen waarden. Stel bijvoorbeeld dat optie 2 slechts €5 en optie 3 €1000 goedkoper zou zijn dan optie 1, dan moeten ook optie 1 en 2 nagenoeg dezelfde waarde krijgen en optie 3 aanzienlijk lager.

Als laatste stap zijn de genormaliseerde waarden vermenigvuldigd met de weging en gesommeerd:

$$Score_{Totaal} = Score_1 * Weging_1 + \dots + Score_n * Weging_n$$

	Kosten	Efficiëntie	Installatie	Overlast	Esthetisch	
Weging	3	1	1	2	2	
						Totaal
Concept 1 – Lucht	1,00	0,50	0,50	0,25	0,25	5,00
Concept 2 – Zon	0,84	0,25	0,50	0,50	0,50	5,27
Concept 3 – Bodem (Ind.)	0,29	1,00	0,25	0,50	0,75	4,62
Concept 3 – Bodem (Coll.)	0,00	1,00	0,75	0,50	0,75	4,25
Concept 4 - Wind	0,00	0,00	1,00	0,50	0,50	3,00

Tabel I.4: Genormaliseerde scores concepten



Gevoeligheidsanalyse

Wegingen criteria	Beste concept bij die wegingen
Alle criteria weging 1	Bodem Collectief
Kosten weging 3, overige criteria weging 1	Luchtwarmtepomp
Efficiëntie weging 3, overige criteria weging 1	Bodem Collectief
Installatie weging 3, overige criteria weging 1	Bodem Collectief
Overlast weging 3, overige criteria weging 1	Bodem Collectief
Esthetisch weging 3, overige criteria weging 1	Bodem Collectief

Tabel I.5: Gevoeligheidsanalyse wegingen MCA