

Conceptuele uitwerking van een belevingscentrum rond hernieuwbare energie: “The Renewable Energy House”

Jord PEETERS
Antoon VAN DYCK

Promotor: Prof. Dr. Ir. A. Arteconi
Co-promotor: Ir. K. Van den Brande

Masterproef ingediend tot het behalen van de
graad van master of Science in de industriële
wetenschappen: *Energie*

Academiejaar 2020-2021

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot KU Leuven Campus Geel, Kleinhoefstraat 4, B-2440 Geel, +32 14 72 13 00 of via e-mail iw.geel@kuleuven.be.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

In het kader van het afronden van onze opleiding master of Science in de industriële wetenschappen: *Energie* hebben wij, Jord Peeters en Antoon Van Dyck samen een masterproef afgelegd bij de organisatie KempENergiek. De masterproef is uitgevoerd onder begeleiding van Koen Van den Brande en Jef Van Eyck. Twee Vlaamse ondernemers met een grote passie voor hernieuwbare energie. Hartelijk bedankt voor jullie steun, advies en wijze raad doorheen het academiejaar. Zonder jullie hulp hadden wij het project nooit tot een goed einde kunnen brengen.

Vervolgens willen we onze docenten bedanken voor de aangename studiesfeer en de hands-on aanpak tijdens de practica, het waren vier geweldige jaren. Vooral richting Alessia Arteconi zouden wij onze dank willen uitdrukken voor de hulp bij de realisatie van de Excel-rekentools.

Ik zou graag Antoon willen bedanken voor de fijne samenwerking en vlotte communicatie tijdens onze wekelijkse vergaderingen. Hij kwam steeds met slimme oplossingen voor moeilijke problemen en gaf altijd constructieve feedback. Een betere teamgenoot had ik niet kunnen wensen.

Langs mijn kant wil ik ook Jord bedanken voor zijn kritische blik en punctualiteit. Het werken in één document verliep vlot met de juiste afspraken. Zijn vermogen om uit het niets een schema of indeling op te stellen, heeft het overleggen enorm vereenvoudigd. Zijn heldere kijk hielp me om op een andere manier over het geleverde werk te denken.

Tenslotte willen we ook onze ouders, vrienden en medestudenten bedanken voor hun steun en raad bij het schrijven van de thesis en doorheen de afgelopen jaren. Zonder hen was het ons niet gelukt om zo'n mooi resultaat te bekomen.

Jord Peeters en Antoon Van Dyck, april 2021

Samenvatting

Deze thesis vormt een handleiding bij het realiseren van een belevingscentrum rond hernieuwbare energie, ook wel The Renewable Energy House genoemd. De werkgroep KempENERgiek van Streekplatform Kempen is opgericht met als doel het uitwerken, realiseren en uitbaten van dit belevingscentrum. Een eerste stap in dit proces is het uitwerken van het concept, dit is het doel van deze thesis.

In het eerste deel is het concept afgetoetst bij betrokkenen, bijvoorbeeld potentiële partners en de leden van KempENERgiek. Tijdens deze gesprekken is er gepolst naar hun verwachtingen en gevormde beeld. Uit de respons van deze gesprekken zijn de sterke ideeën meegenomen en is er aandacht besteed aan mogelijke risico's. Met de sterke ideeën is er een beeld gevormd van alle vereisten voor de ideale locatie. Aan de hand van dit beeld zijn mogelijke locaties beoordeeld en de gebreken geïnventariseerd. Daarnaast zijn de sterke punten en de mogelijke risico's opgenomen in de SWOT-analyse. Er is ook een Stakeholderanalyse uitgevoerd waarbij de verschillende belanghebbenden van The Renewable Energy House opgelijst staan en verwerkt zijn in een relatiematrix.

Verder volgt een inventarisatie van alle mogelijke hernieuwbare energietechnieken op de markt. Deze inventarisatie vormt een basis aan inhoudelijke informatie en zal tijdens de uitbating nog verder worden uitgediept. Dit is een continu proces aangezien hernieuwbare energietechnieken steeds evolueren. Na de inventarisatie zijn er twee rekentools uitgewerkt. Deze modellen zullen ook in het uiteindelijke belevingscentrum terechtkomen. Ze laten gebruikers toe om op een interactieve manier kennis te maken met de werking van de technologie en de invloed van verschillende parameters uit te testen. Het toont ook onze technische kennis en kunde in een eerder niet technische thesis.

Het laatste deel van de thesis gaat over de lay-out van de uiteindelijke locatie. In dit hoofdstuk is er een sjabloon opgesteld van een mogelijke indeling van de ruimtes. Ook zijn er ideeën geschetst om gebruikers op een interactieve manier te informeren over een bepaalde techniek. Deze ideeën vormen een basis voor de werkelijke lay-out en indeling, het is best mogelijk dat de uiteindelijke indeling afwijkt van het sjabloon omwille van de gekozen locatie.

Abstract

This thesis presents a guide to aid in realising an experience centre focused on renewable energy. The centre is called The Renewable Energy House. The focus-group KempENergiek, part of Streekplatform Kempen was established with the aim of developing, realising and operating this experience centre. A first step in this process is the development of the concept, which is the main goal of this project.

The first part reviews the initial idea with the stakeholders. These stakeholders are potential partners and the members of KempENergiek. During these discussions their expectations and perceptions were documented. The responses from these discussions have been used to take the strong ideas into consideration and to look at possible risks. With the strong ideas a list of all the requirements for the ideal location was formed. This list was used to assess the possibilities and shortcomings of possible locations. In addition, the strengths and possible risks were included in a SWOT analysis. Furthermore a Stakeholder Analysis of The Renewable Energy House was carried out.

Possible renewable energy technologies on the market were inventoried. This inventory forms a basis of technical information and will be further explored during operation. This is a continuous process as renewable energy techniques are constantly evolving. Two calculation tools were developed. The first tool explains the working principle of Adiabatic Compressed Air Energy Storage. This tool is based on a self-designed model to evaluate different output temperatures and pressures throughout the system. The main goal of the A-CAES calculator is to achieve a higher cycle efficiency than the conventional Diabatic CAES systems. This is only possible with the use of Thermal Energy Storage (TES). The influence of different input values on the cycle efficiency of the system has been analyzed. These results are plotted in graphs so users can see the trend line of the cycle efficiency in function of a varying input parameter. To preserve reality of the drawn conclusions, the graphs are provided with practical limitations. The calculation model about thermal energy storage allows the user to experiment with different storage and construction materials of the storage tank. The tool neglects thermal stratification in the tank. The purpose of this model allows for this small deviation as users only have to understand the functioning of the system. The model simulates both sensible and latent heat storage systems. To achieve this, the model uses an iterative algorithm. The system generates graphs showing the temperature and heat changes over a given period of time. The graphs allow the system to calculate the storage efficiency. In addition, the calculation tool computes the time needed to charge and discharge the tank with a given charge and discharge power. These models will also be used in the experience centre. They allow visitors to become acquainted with the technology in an interactive way and to test the influence of various parameters.

The last part illustrates a possible layout of The Renewable Energy House. A template of a possible layout of the rooms has been drawn up. Ideas have also been sketched for informing users about a certain technology in an interactive way. The eventual lay-out of the experience centre can differ from these templates complying with the constraints of the chosen location.

Keywords: The Renewable Energy House, A-CAES, thermal energy storage, experience centre, renewable energy

Inhoud

Voorwoord	iv
Samenvatting	v
Abstract	vi
Symbolenlijst	xii
Lijst met afkortingen	xiii
Inleiding	1
1 Streekplatform Kempen	3
1.1 <i>Kempenpact 2030</i>	3
1.2 <i>KempENERgiek</i>	4
2 Aftoetsing van het concept	5
2.1 <i>Interviews</i>	5
2.1.1 <i>Gesprekspartners</i>	5
2.1.2 <i>Resultaat</i>	6
2.2 <i>Online overleg met stad Turnhout</i>	6
Voor stad Turnhout	6
Voor KempENERgiek	7
De gestelde vragen en/of opmerkingen waren:	7
2.2.1 <i>Aandachtspunten</i>	7
3 Zoektocht vaste locaties	8
3.1 <i>Overzicht bezochte locaties</i>	9
3.1.1 <i>Zaal Den Bond</i>	9
3.1.2 <i>Kamp C</i>	9
3.1.3 <i>Wimec</i>	9
3.1.4 <i>Open Manufacturing Campus</i>	10
3.1.5 <i>Laatste stand van zaken</i>	10
4 Inventarisatie technieken	11
4.1 <i>Indeling van de technieken</i>	11
4.2 <i>Fotovoltaïsche zonnepanelen</i>	12
4.2.1 <i>Fotovoltaïsche cellen</i>	12
4.2.2 <i>Opbouw zonnepaneel</i>	13
4.2.3 <i>Omvormers</i>	13

4.2.4	Werking gehele installatie	15
4.3	<i>Zonneboiler</i>	15
4.3.1	Zonnecollectoren	16
4.4	<i>Biomassa</i>	19
4.4.1	Overzicht.....	19
4.4.2	Bewerkings- en verwerkingsmethodes.....	20
4.5	<i>Windenergie</i>	24
4.5.1	Energieproductie en voorspelling	25
4.5.2	Kleine en middelgrote windturbines.....	27
4.5.3	Grote windturbines	28
4.5.4	Lokale effecten.....	28
4.6	<i>Geothermie</i>	30
4.6.1	Diepe geothermie.....	30
4.6.2	Toepasbaarheid in België.....	33
4.7	<i>Waterkracht</i>	34
4.7.1	Riviercentrales en stuwdammen	34
4.7.2	Energieopslag met waterkracht	35
4.7.3	Golfenergie	36
4.7.4	Getijdenenergie.....	37
4.7.5	Toepasbaarheid in België.....	37
4.8	<i>Thermische energieopslag</i>	40
4.8.1	Voelbare warmteopslag	40
4.8.2	Latente warmteopslag.....	41
4.8.3	Thermochemische warmteopslag.....	44
4.8.4	Korte termijnsopslag	45
4.8.5	Lange termijnsopslag.....	45
4.8.6	Toepasbaarheid in België.....	47
4.9	<i>Elektrische energieopslag</i>	47
4.9.1	Batterijen.....	47
4.10	<i>Warmtenetten</i>	50
4.10.1	Evolutie warmtenetten	50
4.10.2	Mogelijke uitvoeringen.....	51
4.10.3	Onderdelen warmtenet	51
4.10.4	Toepasbaarheid in België	53

4.11	<i>Warmtepompen</i>	54
4.11.1	Thermodynamische werking	54
4.11.2	Verschillende types	55
4.11.3	Toepasbaarheid in België	56
4.12	<i>Waterstof</i>	57
4.12.1	Productie van waterstof	57
4.12.2	Verbruik van waterstof	58
4.12.3	Waterstofkleur	58
4.12.4	Toepasbaarheid in België	59
5	Techniek-studies	60
5.1	<i>CAES</i>	60
5.1.1	Types van CAES.....	61
5.1.2	Vergelijking met andere opslagtechnieken	62
5.1.3	Adiabatic compressed air energy storage calculator	65
5.2	<i>Thermische energieopslag</i>	77
5.2.1	Beschrijving model	77
5.2.2	Berekeningsschema van algemene werking	78
5.2.3	Temperatuursverloop opslagmateriaal	80
5.2.4	Warmteverlies Opslagtank	83
5.2.5	Iteratieve bepaling warmte-en temperatuursverloop.....	85
5.2.6	Interactie met gebruiker	87
5.2.7	Vergelijking van systemen a.d.h.v. een voorbeeld.....	90
5.2.8	Beperkingen van het model.....	95
6	Lay-out van de vaste locatie	97
6.1	<i>Initiële verdeling</i>	97
6.1.1	Hoofdruimte	97
6.1.2	Productie elektrische energie	98
6.1.3	Productie thermische energie.....	99
6.1.4	Energietransport en -verbruik.....	100
6.1.5	Energieopslag	100
6.1.6	Samenhang en toekomst	101
6.2	<i>Initieel grondplan</i>	102
7	Stakeholderanalyse partners en doelgroepen	103
7.1	<i>Indeling stakeholders</i>	103

7.2	<i>Identificatieproces</i>	104
7.2.1	Fase één: Identificatie	104
7.2.2	Fase twee: Uitdiepen interactie / Belang	104
7.2.3	Fase drie: Onderlinge relaties	105
7.2.4	Fase vier: Impact en contact	105
7.3	<i>Analysematrix</i>	105
7.3.1	Keep Informed	106
7.3.2	Meet Needs.....	106
7.3.3	Monitor.....	106
7.3.4	Watch Closely	106
7.4	<i>Besluiten stakeholderanalyse</i>	107
8	SWOT-analyse	108
8.1	<i>Sterktes</i>	108
8.1.1	Onafhankelijkheid	108
8.1.2	Volledig overzicht beschikbare technieken.....	109
8.1.3	Ontstaan uit Streekplatform Kempen	109
8.2	<i>Zwaktes</i>	109
8.2.1	Kennis en informatie	109
8.2.2	Financiële stabiliteit.....	110
8.2.3	Naamonbekendheid van TREH.....	110
8.3	<i>Opportunities</i>	110
8.3.1	Eerste beleefcentrum rond hernieuwbare energie	110
8.3.2	Ontstaan projecten voor partners	110
8.3.3	Toenemend belang van hernieuwbare energie	111
8.4	<i>Bedreigingen</i>	111
8.4.1	Snel evoluerende markt	111
8.4.2	Onzekerheid wetgeving en rendabiliteit hernieuwbare energie	111
9	Vervolgplan	112
9.1	<i>Wettelijke structuur</i>	112
9.2	<i>Reglement voor Interne Orde</i>	112
9.2.1	Adviesraad	112
9.2.2	Samenwerkingsovereenkomst professionele partners	112
	Besluit	113
	Referenties	115

10	Bibliografie	115
Bijlage A	Vragenlijst interview	A
Bijlage B	Verslagen bezochte locaties	B
Bijlage C	Indeling technieken.....	C
Bijlage D	A-CAES rekentool	D
Bijlage E	Stakeholderanalyse	E
Bijlage F	Rekentool thermische energieopslag.....	F

Symbolenlijst

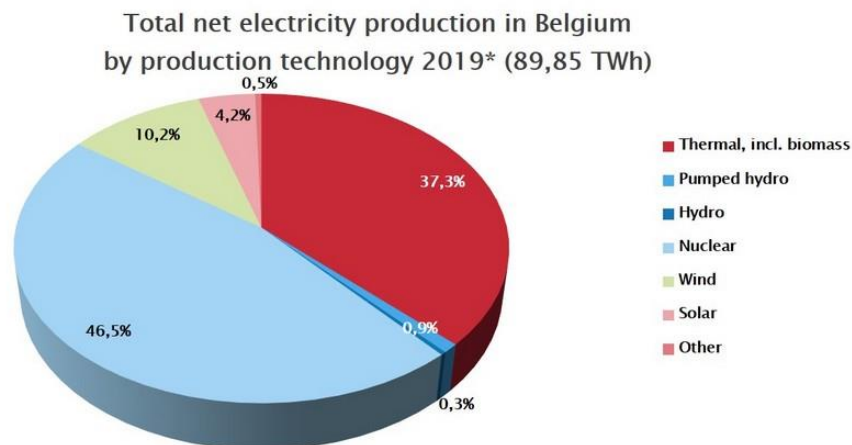
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/mK]
\dot{Q}	Warmtestroom	[kW]
$\dot{Q}_{verlies}$	Warmteverlies opslagtank	[W/°C]
C	Soortelijke warmtecapaciteit	[J/KgK]
D	Diameter	[m]
\dot{m}_{air}	Massadebiet lucht	[Kg/s]
\dot{m}	Massastroom	[Kg/s]
m	Massa	[Kg]
m_{tank}	Benodigde massa thermisch opslagmateriaal	[kg]
ρ	Dichtheid	[Kg/m ³]
G	Valversnelling	[m/s ²]
T	Temperatuur	[°C]
C_p	Soortelijke warmte bij constante druk	[J/(kg.K)]
h_1	Enthalpie in punt 1 per massa lucht	[J/kg]
\dot{W}	Vermogen geleverd door arbeid	[W]
p_1	Druk in punt 1	[Pa]
S_1	Entropie in punt 1	[J/K]
t	Tijd	[Uren]
A	Oppervlakte	[m ²]
V_{OC}	Openklem-spanning	[V]
J_{SC}	Kortsluitstroom-dichtheid	[mA/cm ²]
V_{tank}	Benodigd volume opslagtank	[m ³]
FF	Vulfactor	[%]
E_k	Kinetische energie	[J]
η_{opslag}	Opslagrendement	[%]
η_{totaal}	Totaalrendement opslagsysteem	[%]
η_{cycle}	Cycluserndement	[%]
η_{ex_1}	Efficiëntie van warmtewisselaar 1	[%]
v	Snelheid	[m/s]
P	Vermogen	[kW]

Lijst met afkortingen

SWW	Sanitair warm water
HE	Hernieuwbare energie
TREH	The Renewable Energy House
TCM	Thermochemische materialen
PCM	Phase Change Materials of faseovergangsmaterialen
KMWT	Kleine en Middelgrote Windturbines
CAES	Compressed Air Energy Storage of gecomprimeerde lucht energieopslag
D4	Octamethylcyclotetrasiloxaan
TWh	Terra wattuur
PV	Photo Voltaïc
MPP	Max Power Point
MPPT	Max Power Point Tracker
WKK	Warmte-Kracht Koppeling
COP	Coefficient Of Performance
DC	Gelijkspanning
AC	Wisselspanning
HDR	Hot Dry Rock
HWR	Hot Wet Rock
EGS	Enhanced Geothermal System
HFR	Hot Fractured Rock
SMR	Steam Methane Reforming
TES	Thermal Energy Storage
UHPC	Ultra High Performance Concrete
LDC	Low Density Concrete
PHS	Pumped Hydro Storage
TREC	The Renewable Energy Campus
SWOT	Strength Weakness Opportunity Threats

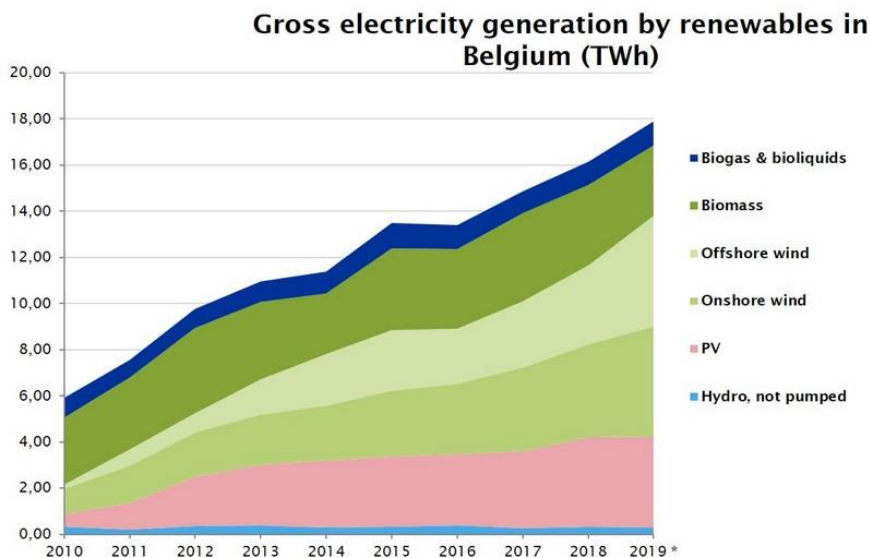
Inleiding

België draagt via het klimaatakkoord bij aan het realiseren van de wereldwijde klimaatdoelstellingen. Om deze doelstellingen te bereiken, moeten we de uitstoot van broeikasgassen terugdringen tot 0 in 2050. Het verbruik van fossiele brandstoffen in België speelt hierbij een belangrijke rol want bij de verbranding van deze brandstoffen komt een groot aandeel CO₂ vrij die de aarde doet opwarmen. Vandaar dat deze fossiele bronnen vervangen moeten worden door hernieuwbare bronnen (om zo de toekomst van het klimaat in België te verbeteren). Figuur 1 geeft de netto elektriciteitsproductie weer in België in 2019, opgesplitst per technologie. (FEBEG, 2019)



Figuur 1 Energieverdeling productie elektriciteit in België (2019)

Hieruit kunnen we afleiden dat de totale netto elektriciteitsproductie 89,85 TWh bedraagt waarvan kernenergie (46,5%) het grootste aandeel elektriciteit produceert. Het aandeel elektriciteit komende van hernieuwbare energietechnieken zoals windturbines (10,2%) en zonnepanelen (4,2%) ligt relatief laag. Figuur 2 geeft de verdeling weer van het aandeel hernieuwbare energie. (FEBEG, 2019)



Figuur 2 Productie hernieuwbare energie in België (2019)

De totale hernieuwbare energieproductie in België in 2019 komt overeen met 18 TWh. Dit is 20% van de totale elektriciteitsproductie per jaar, met andere woorden 80% van onze energie is afkomstig van een niet-hernieuwbare bron. Elektrificatie van voertuigen en het plaatsen van warmtepompen ter vervanging van klassieke ketels zorgt enerzijds voor meer tewerkstelling maar anderzijds ook voor een sterke toename in het elektriciteitsverbruik. Wetende dat de kerncentrales in België tegen 2025 dicht moeten, maakt het nog duidelijker dat we meer hernieuwbare energie moeten gaan produceren nu en in de toekomst. Omdat het landschap van hernieuwbare energietechnieken veel variaties kent, is het voor de doorsnee Belg moeilijk om een juiste keuze te maken bij een project dat energie-aspecten bevat en zal hij daarom eerder kiezen voor meer conservatieve en milieuvervuilende technieken.

Om de Belgische energieconsument te ondersteunen bij deze energietransitie werd “KempENergiek” opgericht. Een werkgroep die voortvloeit uit Streekplatform Kempen met als doel de Kempen een voortrekkersrol te laten spelen in de hernieuwbare energie van morgen. KempENergiek bedacht het concept rond The Renewable Energy House, een belevingscentrum waar professionals en particulieren terecht kunnen voor objectieve informatie en persoonlijk advies rond het gebruik van hernieuwbare energie. De conceptuele uitwerking van The Renewable Energy House vormt de basis van deze thesis.

1 STREEKPLATFORM KEMPEN

Streekplatform Kempen is een organisatie die zich toespitst op de maatschappelijke ontwikkeling van de Kempen. In deze organisatie zitten diverse partners. Zo zijn lokale besturen, provincie Antwerpen, politieke partijen, sociale partners en regionale stakeholders allemaal vertegenwoordigd in het Streekplatform, alsook personen uit ondernemingen, onderwijs, sport, cultuur, zorg, natuur, vrije beroepen, enzovoort. Zoals de naam doet vermoeden is Streekplatform Kempen actief binnen het arrondissement Turnhout met bijkomend de gemeenten Heist-Op-Den-Berg en Nijlen. Binnen het Streekplatform zijn er verschillende domeinen waarin gewerkt wordt: ondernemen, innoveren en internationaliseren, leren en werken, welzijn en zorg, ruimte om te ondernemen en mobiliteit, groene en duurzame Kempen, nucleair veilige Kempen.

1.1 Kempenpact 2030

De belangrijkste opdracht van Streekplatform Kempen is het opstellen en opvolgen van een gemeenschappelijke sociaaleconomische toekomstvisie voor de ganse Kempen. Op 25 en 26 Oktober 2019 werd daartoe het startschot gegeven op het Toekomstforum Kempen. Gedurende deze twee dagen is er in grote groep een visie ontwikkeld voor de toekomst in de Kempen. Deze toekomstvisie werd Kempenpact 2030 gedoopt, een toekomstplan waarin acties en projecten werden uitgewerkt door alle partners van het Streekplatform. Het Kempenpact 2030 bevat tweejaarlijkse acties en een tiental projecten, waarvan KempENERgiek er één is.



Figuur 3 Mindmap Toekomstforum (Kempenpact 2030, 2020)

1.2 KempENERgiek

KempENERgiek wil hernieuwbare energie promoten in de Kempen. Het doel komt voort uit twee reële problemen: bedrijven actief in hernieuwbare energie vinden geen geschoold personeel en het enorme aanbod aan hernieuwbare energietechnieken doet mensen twifelen. Om een antwoord te kunnen bieden op deze twee problemen werkt KempENERgiek aan twee onafhankelijke projecten.

De “Renewable Energy Campus” gaat extra-curriculaire activiteiten en lezingen organiseren over hernieuwbare energietechnieken. En “The Renewable Energy House” wordt een belevingscentrum rond hernieuwbare energie waarin betrouwbare, onafhankelijke informatie rond de verschillende hernieuwbare energietechnieken wordt gegeven. Onze masterproef valt onder de werkgroep KempENERgiek en zal zich toespitsen op de uitwerking van het concept voor The Renewable Energy House. Het resultaat van deze masterproef is een handleiding voor de realisatie van TREH.

De werkgroep valt onder leiding van Koen Van den Brande en Jef Van Eyck. Ze werken dagdagelijks aan deze projecten en nemen het voortouw wat betreft de ontwikkeling van de projecten. Koen is naast voortrekker van KempENERgiek ook zaakvoerder van ENKO BV, een onderneming die zich bezighoudt met een hele waaier aan groene economieprojecten: windenergie, bio-landbouw, duurzaam bouwen, zorgverlening en sociale economie. Daarnaast is hij ook nauw betrokken bij werkgeversorganisatie VOKA als bestuurder in de regio Mechelen-Kempen en Antwerpen-Waasland en voorzitter in de regio Middenkempen. Jef heeft jarenlang gewerkt bij Campina-Energie dat zich voornamelijk bezighoudt met het samenbrengen en overtuigen van burgers om te investeren in hernieuwbare energie en energiebesparing.

2 AFTOETSING VAN HET CONCEPT

Eind September 2020 zijn we gestart met het interviewen van de verschillende partners die reeds betrokken zijn bij KempENERgiek. Vanwege de Corona maatregelen gebeurde dit zowel live als virtueel (Zoom, Skype of Teams). Op die manier konden we al eens kennismaken met de leden van KempENERgiek en achterhalen wat hun verwachtingen zijn van The Renewable Energy House. Deze verwachtingen of ideeën vormen dan samen de basis voor het concept rond TREH. Daarnaast bevat dit hoofdstuk ook de verslagen van de gesprekken met potentiële partners en investeerders. Via deze gesprekken konden we het reeds bedachte concept rond TREH aftoetsen en achterhalen wat de sterktes en zwaktes zijn van TREH. De belangrijkste punten werden achteraf opgenomen in de SWOT-analyse die verder toegelicht wordt in hoofdstuk 8.

2.1 Interviews

Tijdens de gesprekken is er gebruikgemaakt van een vragenlijst die we vooraf hadden opgesteld. Dit zorgt voor een duidelijke structuur tijdens het interview. De vragenlijst werd al op voorhand doorgemailed naar de verschillende gesprekspartners zodat zij zich konden voorbereiden op het interview. In bijlage A geven we een overzicht van de verschillende vragen die werden gesteld tijdens het gesprek.

2.1.1 Gesprekspartners

Geert Demeyer	HITA	Diepe geothermie
Willem Janssens & Jef Van Eyck	Campina Energie	Burgercoöperaties hernieuwbare energie
Koen Van den Brande	ENKO	Windenergie & duurzaam bouwen
Ellen Leys	IOK	Streekontwikkelings-intercommunale
Hans Vanuffelen	Kamp C	Duurzaam bouwen
Griet Janssen & Toon Peeters	Thomas More	Kennis Centrum Energie
Michiel Sels	Boerenbond	Hernieuwbare energie in landbouw
Marleen Geysen	Innovatiesteunpunt	Hernieuwbare energie in landbouw
Hartwin Leen	Kelvin Solutions	Warmte- en koudenetten
Yves Geboers	GEBO	(ondiepe) Geothermie Warmtepompen

Tabel 1 Gesprekspartners

2.1.2 Resultaat

Half oktober waren de interviews afgerond en konden we de antwoorden met elkaar gaan vergelijken. Hieruit is af te leiden dat de ondervraagden:

- Afkomstig zijn uit de Kempen en voornamelijk Turnhout.
- Ondanks hun uiteenlopende achtergronden, ze allen dagelijks te maken hebben met hernieuwbare energie.
- Elkaar kennen via Kempenspact 2030.
- Beschikken over een groot netwerk van potentiële bedrijven en instellingen wat de realisatie van TREH kan bevorderen.
- Nog geen idee hebben waar juist The Renewable Energy House best moet komen.
- Satellietlocaties noodzakelijk zijn om technieken zoals diepte-geothermie te kunnen verduidelijken.
- Twijfelen of The Renewable Energy House economisch haalbaar is, met de nadruk gelegd op het rendabel zijn op lange termijn.
- Melden dat The Renewable Energy House een informatiecentrum moet zijn.
- Aangeven dat de gegeven informatie rond hernieuwbare energie zo objectief mogelijk moet zijn. Het mag geen handelsbeurs worden.

2.2 Online overleg met stad Turnhout

Ook met stad Turnhout hadden we een online overleg. Bij aanvang van het overleg werd het concept van TREH voorgesteld door Koen Van den Brande van KempENERgiek. Vervolgens werd er gekeken naar een mogelijke samenwerking. De aanwezige deelnemers aan het overleg waren:

Voor stad Turnhout

Luc Op de Beeck	Schepen van: Economie en werk, Zorg en gezondheid.
Francis Stijnen	Schepen van Financiën
Astrid Wittebolle	Schepen van Milieu, Energie en Duurzaamheid
Melanie Ryckaert	Beleidsadviseur Economie en Werk
Nele Jansen	Dienst ondernemen en werk
Marc Machiels	Diensthoofd milieu
Katrijn Driesen	Duurzaamheidsambtenaar
Bert Willems	Beleidsadviseur conceptzaken
Ive Van Bouwel	Coördinator projecten stedelijke ontwikkeling

Tabel 2 Aanwezigen stad Turnhout

Voor KempENERGIEK

- Jord Peeters
- Antoon Van Dyck
- Jef Van Eyck
- Koen Van den Brande

De gestelde vragen en/of opmerkingen waren:

- Wat zijn de personeelskosten? Hebben zij een grote invloed op het businessplan?
- Wie is het doelpubliek? Gaat het enkel over de professionals uit de Kempen?
- Waar gaan jullie investeerders vinden?
- Wat kan TREH betekenen voor ons (gemeente Turnhout)?
- Is TREH een duurzaam project? is het economisch verantwoord op lange termijn?
- Stel: ik ben van plan een flatgebouw van ongeveer 50 jaar oud te renoveren, kan ik dan terecht bij het House voor concreet advies? Wie geeft dan het advies?
- De informatie moet van goede kwaliteit zijn, de bron moet onafhankelijk zijn.
- Is het niet beter om eerst te starten als infocenter om daarna met voldoende ervaring over te gaan tot een adviescenter?
- Het advies moet neutraal zijn, het moet komen uit "ervaring".
- De algemene visie van TREH omtrent hernieuwbare energie (bv: warmtenetten) mag niet haaks staan op de visie van de gemeente Turnhout.

2.2.1 Aandachtspunten

- De adviezen die TREH geeft, moeten overeenkomen met het gemeentelijk energie- en/of klimaatplan van waar het project gelegen is. Hoe borgen we dat de visie van TREH niet in strijd is met de visies van de Kempische gemeenten?
- Aan welke voorwaarden moet een vraag van een overheidsinstelling aan TREH en het advies dat TREH verleent aan de overheidsinstelling voldoen om buiten de wetgeving op overheidsopdrachten te vallen?
- Hoe vermijden we dat partners van TREH wegens voorkennis niet meer mogen deelnemen aan een openbare aanbesteding als het lastenboek informatie bevat die bekomen is uit adviezen van TREH?
- Aan welke voorwaarden moeten we voldoen om te mogen benoemd worden als educatief centrum, belevingscentrum of kenniscentrum? Voor welke vorm kiezen we bij de start en/of beogen we op langere termijn?
- Waar bestaan gelijkaardige initiatieven?
- Hoe controleren we permanent de accuraatheid van de gegeven informatie en de geleverde adviezen?
- Wat is de toegevoegde waarde voor de gemeente waar TREH gevestigd is? Met andere woorden hoeveel financiële middelen gemeentes over hebben om TREH naar hun grondgebied te trekken.

3 ZOEKTOCHT VASTE LOCATIES

Dit hoofdstuk bevat de verschillende locaties die we hebben bezocht met daarbij een korte beschrijving van hun voor- en nadelen. In bijlage B ziet u de verslagen van de bezochte locaties met extra informatie en foto's. Om het vergelijken van de potentiële locaties eenvoudiger te maken zijn er op voorhand al enkele criteria opgesteld. De ideale vaste locatie voor TREH voldoet aan al deze criteria. In Figuur 4 ziet u de voorwaarden waaraan de ideale locatie moet voldoen.

Vaste locatie:	Grote ruimte(s) waarin we alle beschikbare technieken rond hernieuwbare energie in de Kempen tentoonstellen, om zo professionals te kunnen informeren en adviseren.
Voorwaarden/criteria om te voldoen aan de ideale vaste locatie:	
Grootte:	Minimum 1000 m ² (grondplan is beschikbaar).
Hoogte:	Minimum 4 à 5 m.
Vorm en indeling:	Elke ruimte moet minstens groot genoeg zijn om één techniek volledig te beschrijven.
Voorzieningen:	Eten/drinken/toilet/vestiaire.
Verwarming/koeling:	Slimme verwarming/koeling en verluchting van de ruimte(s). (Corona-proof)
Energieverbruik:	Laag energieverbruik
Beschikbaarheid:	De ruimte(s) zou(den) altijd en direct beschikbaar moeten zijn, flexibel contract.
Capaciteit:	≈ 50 personen. De ruimte(s) moet(en) voldoende groot zijn om een grote groep professionals tegelijk te ontvangen.
Bereikbaarheid:	Gemakkelijk te vinden, voldoende parking met busplaats en bushalte (trein).
Ligging:	Het House ligt in het midden/centrum van de Kempen. Omringd door partners en toekomstige investeerders/bedrijven.
Beveiliging/verzekering:	De ruimte(s) is vergrendelbaar en beveiligd, de ruimte(s) is verzekerd tegen diefstal.
Prijs:	Lage huurprijs, flexibel contract.
Overdekt	De overgang tussen de verschillende ruimtes waar we de verschillende technieken tentoonstellen moeten steeds overdekt zijn.
Laadpaal	Een laadpaal dicht bij TREH maakt het mogelijk voor professionals/bezoekers om met een E-bike te komen en deze op te laden met HE.

Figuur 4 Criteria ideale vaste locatie

3.1 Overzicht bezochte locaties

3.1.1 Zaal Den Bond

Zaal Den Bond in het centrum van Turnhout is momenteel een oud, verlaten en versleten gebouw maar er liggen plannen op de tafel om het gebouw te renoveren. Filmorganisatie MOOV is van plan om er vier kleine cinéma-zalen in onder te brengen en het café samen met de andere overige ruimtes zoals de kelder en keuken te renoveren. Enkele ruimtes die voor TREH ter beschikking kunnen gesteld worden zijn de kelder en twee bovenruimtes. Het grote voordeel van Zaal Den Bond is zijn centrale ligging in de Kempen in Turnhout. Er is een bushalte vlakbij en voorzieningen zoals eten, drinken, toilet en vestiaire zijn aanwezig. Het gebouw gaat gebruik maken van hernieuwbare energie en de huurprijs is laag. Er is wel onvoldoende ruimte om alle technieken te tonen en uitbreiding is niet mogelijk. De grootste ruimte vrijkomt is de kelder en deze heeft een laag plafond. Het parkeren is enkel mogelijk tegen betaling.

3.1.2 Kamp C

De tweede locatie is gelegen in Westerlo op de site van Kamp C. Het idee kwam ter sprake tijdens het interview met Hans Vannuffelen, partner en contactpersoon van Kamp C. Er zijn momenteel echter geen grote ruimtes ter beschikking. Maar er zijn wel de relatief kleine duurzame gebouwen die reeds voorzien zijn als demonstratie huizen. Deze duurzame gebouwen zijn te klein om één hernieuwbare energietechniek volledig te visualiseren. Een andere optie is een beschikbare ruimte in het toekomstige circulaire gebouw. Hiervan liggen de plannen al op tafel maar concrete afmetingen van de overige resterende ruimte voor TREH zijn tot heden onbekend. Het laatste voorstel is dat TREH wordt gehuisvest in het huidige infocentrum van Kamp C, dat zelf zal verhuizen naar het nieuwe circulaire gebouw. Het infocentrum biedt mooie ruimtes om opstellingen te verwezenlijken. Het grote voordeel van Kamp C is dat er veel oppervlakte beschikbaar is op de site en dat er veel interesse is langs hun kant. Ook de huurprijs ligt laag, rond de €19/m² per maand. Het grote nadeel van Kamp C is het ongewenste verband tussen hernieuwbare energie en duurzaam wonen. Hierdoor kunnen bezoekers denken dat TREH ook over (duurzaam) wonen gaat, terwijl de focus ligt op hernieuwbare energie in het algemeen. De ligging van Kamp C is niet ideaal, het ligt in het zuiden van de Kempen en niet centraal.

3.1.3 Wimec

Een deel van het Würth-gebouw aan de everdongenlaan in Turnhout is omgevormd tot een event- en congrescentrum, genaamd WIMEC. Deze telt vijf zalen, enkele kleine ruimtes en een polyvalente ruimte, goed voor 900 m². Na het mondeling overleg bij Wimec liet zaakvoerder Dominic De Gruyter echter weten dat de overige ruimtes niet beschikbaar zijn voor de uitbating van TREH. Dit komt omdat de eigenaar Würth niet akkoord ging met langlopende contracten. Dit maakt het logistiek niet interessant.

3.1.4 Open Manufacturing Campus

Een vierde mogelijke locatie voor de vestiging van de vaste opstelling bevindt zich in de Open Manufacturing Campus. Beter gekend als de “oude Phillips site” in Turnhout. Op deze site zijn reeds verschillende bedrijven uit de HE-sector gevestigd waaronder Solenco Power, producent van waterstofbatterijen. Deze bedrijven zijn op zoek naar totaaloplossingen voor het gebruik van hernieuwbare energie. Vandaar dat er wel interesse is voor een mogelijke samenwerking met The Renewable Energy House.

3.1.5 Laatste stand van zaken

Er ligt tot heden geen locatie vast voor de realisatie van The Renewable Energy House. Wimec en Zaal Den Bond zijn al wel uitgesloten en de voorkeur gaat momenteel uit naar Kamp-C en OMC. Met deze locaties lopen op het moment van schrijven volop gesprekken om de mogelijkheden te bespreken.

4 INVENTARISATIE TECHNIKEN

In dit hoofdstuk worden de meest gangbare technieken die er op de markt zijn besproken. De inventarisatie van verschillende hernieuwbare energietechnieken is de eerste stap geweest tijdens de uitwerking van het concept rond TREH. Tijdens deze inventarisatie is er gekeken naar de werking van de techniek, wat het potentieel voor België is, welke de potentiële aanbieders/leveranciers zijn en hoe de techniek zich het best presenteert in TREH.

Na deze inventarisatie kiezen we twee technieken waarmee we verder aan de slag gaan en uitgebreid analyseren. Daarbij stellen we een rekentool op die gebruikers toelaat om op een interactieve manier over de techniek te leren. deze tool zal ook in het huis worden gebruikt. Hoofdstuk 5 licht de werking van deze rekentools verder toe.

4.1 Indeling van de technieken

Hernieuwbare energie is enorm divers. De verschillende technieken kunnen op vele manieren worden ingedeeld. In dit werk zijn de technieken eerst en vooral opgedeeld in toepassingsgebieden. Vervolgens is deze opdeling verfijnd naar de functie in de energieketen en de ontwikkelingsfase waarin de techniek zich bevindt. Bijlage C bevat de indeling, opgemaakt in Excel.

Indelingen	Categorieën			
	Residentieel		Niet-residentieel	
Toepassingsgebied			Verbruik	Recuperatie
Functie	Opwekking	Opslag		
Ontwikkelingsfase	Ingeburgerd	Veelbelovend	Uniek	In onderzoek

Tabel 3 Indeling technieken

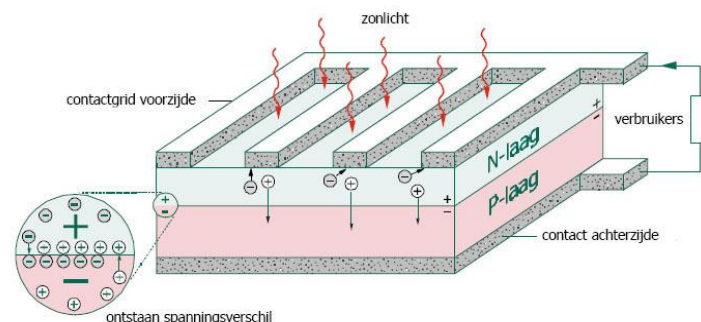
Vanwege het enorme aanbod aan hernieuwbare energietechnieken moet er onderscheid worden gemaakt naargelang de relevantie voor de bezoeker. Een gepaste indeling stelt TREH in staat om verschillende verhaallijnen te vertellen afhankelijk van het type bezoeker. Zo hoeft een particuliere bezoeker die meer wil weten over de mogelijkheden in zijn woning geen gedetailleerde info te krijgen over de mogelijkheden van diepe geothermie.

4.2 Fotovoltaïsche zonnepanelen

PV-installaties zijn opgebouwd uit zonnepanelen en omvormers. Verder wordt hun werking achtereenvolgens besproken. Om uiteindelijk tot de werking van de gehele installatie te komen.

4.2.1 Fotovoltaïsche cellen

Fotovoltaïsche cellen zijn het hart van een PV-installatie, ze wekken de elektrische energie op. In essentie komt hun opbouw overeen met deze van een diode, een combinatie van een P-gedopeerd en een N-gedopeerd materiaal waartussen een junctie ontstaat. De junctieoppervlakte wordt zo groot mogelijk ontworpen om zoveel mogelijk licht te kunnen vangen.



Figuur 5 Opbouw zonnecel (Abek Technics, 2020)

Het invallen van zonnestraling doet in de zonnecel een elektron-gat paar ontstaan. Dit elektron-gat paar kan worden voorgesteld als een negatief en een positief geladen deeltje. De junctie tussen de N en P-laag trekt de positieve helft van het elektron-gat paar aan. De negatieve helft beweegt zich via het contactgrid aan de voorzijde naar de buitenkant. De scheiding van deze deeltjes doet een spanning van 0.5-0.6V over de cel ontstaan bij een standaard instraling van 1000W/m². (Alternative Energy Tutorials, 2020)

Zonnecellen kunnen op verschillende manieren worden geproduceerd, wat resulteert in cellen met andere eigenschappen.

Enkelvoudige cellen	η (%)	A (cm ²)	V _{oc} (v)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)
Si (mono-kristallijn)	24,7	4	0,706	42,2	82,8
Si (poly-kristallijn)	19,8	1,09	0,654	38,1	79,5
Si (dunne-film)	16,6	4,017	0,645	32,8	78,2
GaAs (mono-kristallijn)	25,1	3,91	1,022	28,2	87,1
GaAs (dunne-film)	23,3	4	1,011	27,6	83,8
GaAs (poly-kristallijn)	18,2	4,011	0,994	23	79,7
InP (mono-kristallijn)	21,9	4,02	0,878	29,3	85,4
CIGS	18,4	1,04	0,669	35,7	77
CdTe	16,5	1,032	0,845	25,9	75,5
Si (nano-kristallijn)	10,1	1,199	0,539	24,4	76,6
Tandemcellen					
GaInP/GaAs	30,3	4	2,488	14,22	85,6
GaInP/GaAs/Ge	28,7	29,93	2,571	12,95	86,2

Tabel 4 Vergelijking PV cellen (Green, Emery, King, Igura, & Warta, 2002)

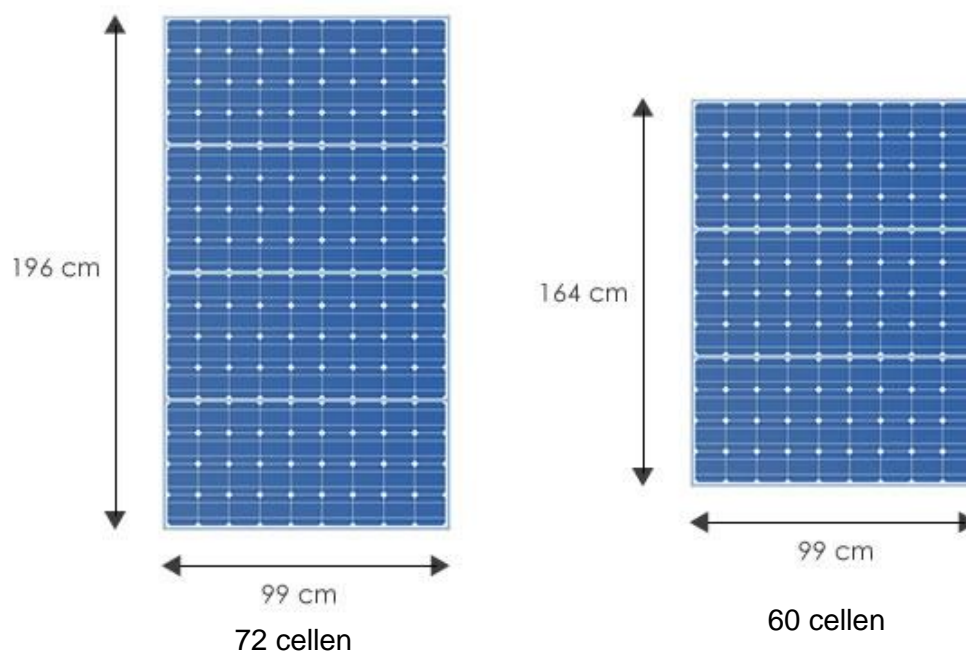
In Tabel 4 worden de meest toegepaste PV-cellen vergeleken. Deze gegevens werden bepaald onder vastgelegde testomstandigheden met een instraling van 1000W/m^2 en een temperatuur van 25°C . Het rendement werd bepaald door meting van één enkele cel, er zijn dus geen extra verliezen in rekening gebracht door een niet ideale invulling van zonnepanelen. Het werkelijk rendement zal in praktische toepassingen lager zijn dat het cel-rendement in ideale testomstandigheden.

4.2.2 Opbouw zonnepaneel

Individuele zonnecellen wekken een te kleine spanning op om nuttig te gebruiken. Er moeten dus vele cellen in serie achter elkaar worden geschakeld om tot grotere, werkbare spanningen te komen. Zonnepanelen of PV-modules bundelen een groep zonnecellen tot een grote keten in serie, een glasplaat biedt afscherming van weer en wind en een aluminium kader rondom maakt een eenvoudige manier van bevestiging.

Zonnepanelen komen voor in alle soorten en maten. Zo zijn er kleine panelen voor autonome 12-24V toepassingen zoals verkeersborden of boeien, klassieke panelen voor grote PV-installaties en nog veel meer.

De meest gekende zonnepanelen zijn deze voor toepassing in residentiële/commerciële PV-installaties. Voor deze toepassing komen er twee verschillende formaten voor: 60 of 72 cellen, afhankelijk van het aantal cellen die in het paneel zitten verwerkt. Figuur 6 toont een vergelijking tussen de twee formaten waarbij het grootste paneel is opgebouwd met 72 cellen.



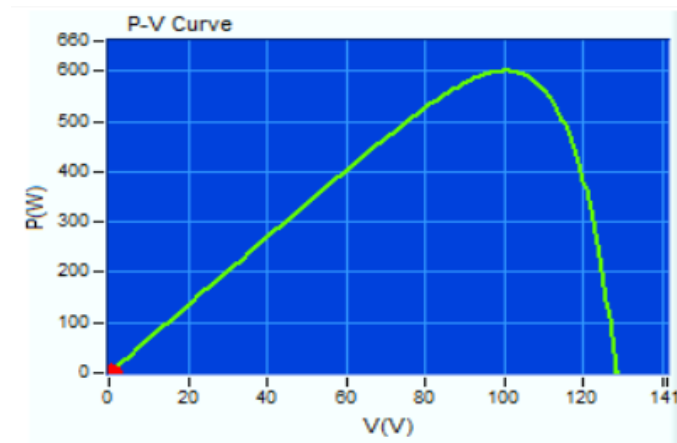
Figuur 6 Afmetingen zonnepanelen

4.2.3 Omvormers

Zonnepanelen wekken een DC-spanning op en het elektriciteitsnet gebruikt een AC-spanning. Er moet dus een omzetting gebeuren van DC naar AC en naar de juiste spanning. Hiervoor worden in een PV-installatie omvormers gebruikt.

4.2.3.1 Mpp tracking

Zonnepanelen produceren niet bij elke spanning evenveel vermogen. Het verloop van het elektrisch vermogen in functie van de spanning wordt de P-V karakteristiek genoemd. Bij een bepaalde spanning is het opgewekte vermogen maximaal. Dit punt wordt het MPP of Max Power Point genoemd. Als de invallende straling verandert, zal ook de positie van dit MPP veranderen. Een omvormer moet dus continu op zoek naar het MPP. Deze tracking wordt door een max power point tracker of MPPT uitgevoerd.

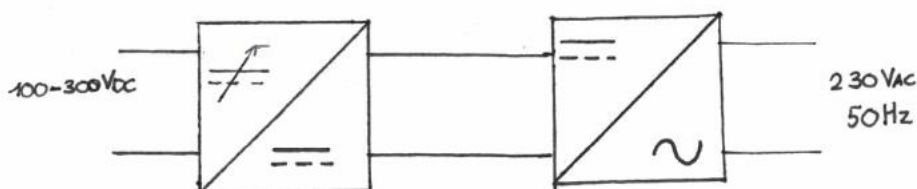


Figuur 7 P-V curve

Het zoeken van het MPP kan op verschillende manieren gebeuren. Het meest eenvoudige is het gradueel verlagen van de spanning en het meten van het vermogen. Als het vermogen stijgt bij het verlagen van de spanning bevindt de tracker zich, in de P-V curve gezien rechts van het MPP en moet hij doorgaan. Indien op een gegeven moment het vermogen afneemt als de spanning daalt is de tracker het MPP voorbij. De spanning moet dan terug worden vergroot. Zo "danst" de tracker continu over het MPP. Dit kan worden vermeden door de spanning vast in te stellen als na enkele iteraties het vermogen nagenoeg constant is. De tracker moet weer worden geactiveerd als het gemeten vermogen te fel afwijkt (enkele %) van de waarde bij het vastzetten.

4.2.3.2 Omzetting DC – AC

Zoals vermeld wekken zonnepanelen een DC-spanning op. Deze moet de omvormer nog inverteren tot een AC-spanning van de juiste grootte om de koppeling aan het elektriciteitsnet mogelijk te maken. Figuur 8 toont de principiële werking van een omvormer.

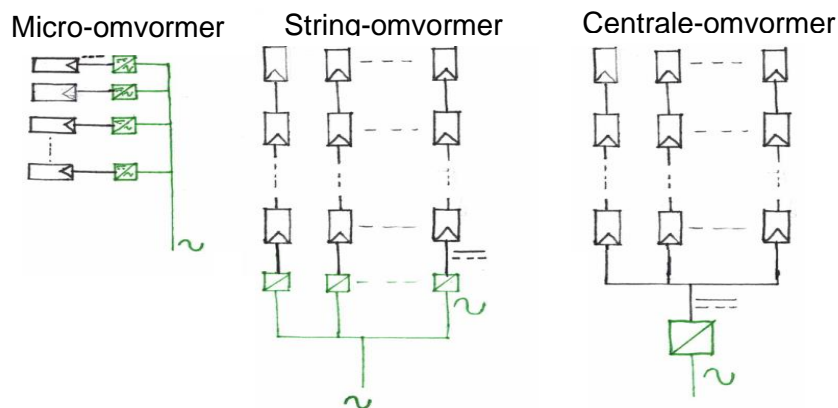


Figuur 8 Schematische opbouw omvormer

4.2.4 Werking gehele installatie

Een PV-installatie is opgebouwd uit zonnepanelen en één of meerdere omvormers, Figuur 9 toont de topologie van verschillende PV-installaties. Zonnepanelen worden in serie achter elkaar geschakeld, deze aaneenschakeling wordt een string genoemd. Zo kunnen er meerdere strings worden gevormd of één enkele lange string. Des te langer de string des te groter de spanning van de kring. De omvormer moet deze spanning kunnen verdragen, de lengte van een string is dus beperkt.

De stroom die een zonnepaneel kan opwekken hangt af van de zon-instraling, hoe groter de instraling, des te meer stroom een paneel kan leveren. In een string hangen alle panelen in serie, de stroom opgewekt door een paneel stroomt dus ook door alle anderen. Als er één paneel schaduw ondervindt, zal dit paneel minder stroom laten vloeien. Het vermogen van de hele string wordt dan beïnvloed door dit ene paneel. Het is daarom belangrijk dat alle zonnepanelen in een string op elk moment evenveel licht opvangen.



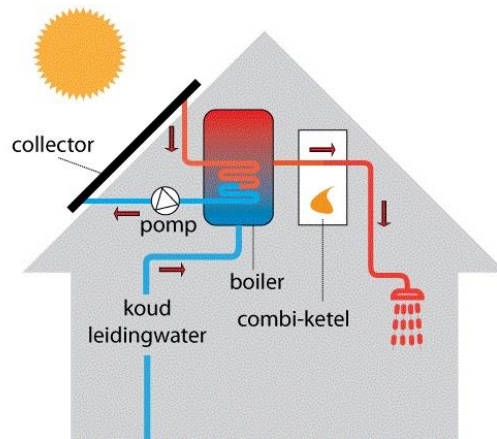
Figuur 9 Topologie verschillende PV systemen

Naarmate er meer omvormers in het systeem zijn geplaatst, kan er op een kleinere groep panelen naar het MPP worden gezocht. In het meest extreme geval heeft ieder paneel een eigen micro-omvormer. In het andere uiterste wordt de installatie uitgevoerd met één centrale omvormer.

4.3 Zonneboiler

Een zonneboiler is een systeem voor de productie van warm water. Het bestaat uit een boiler gevoed door een zonnecollector. Deze zonnecollector zet hoofdzakelijk de elektromagnetische straling van het zichtbare licht van de zon direct om in warmte. Het is dus geen zonnepaneel of PV-paneel.

Het principe van een zonneboiler is eenvoudig: als een tuinslang de hele dag in de zon ligt, warmt het water in de slang op. Zonneboilers maken gebruik van datzelfde principe. Het opgewarmde water in de buizen wordt verpompt en de warmte bewaard in een geïsoleerd voorraadvat: de boiler. Wanneer de temperatuur in de buizen hoger is dan in de boiler zet een regelenheid de pomp aan. Het koudere water afkomstig van de boiler warmt op via de zonnecollector, deze koelt hierdoor af. Het opgewarmde water uit de zonnecollector stroomt terug naar de boiler. (Wikipedia, 2020)



Figuur 10 Werking zonneboiler (Zonnepanelen weetjes, sd)

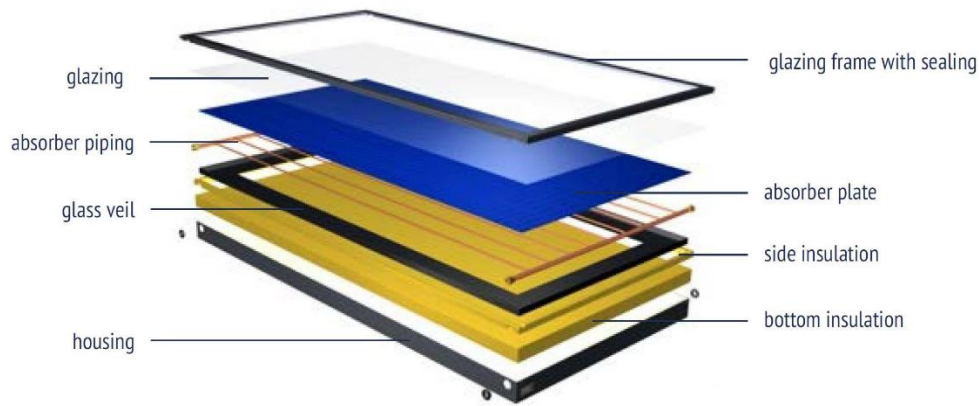
Na enige tijd, wanneer de zonnecollector en de boiler bijna dezelfde temperatuur hebben, schakelt de regelenheid de pomp uit. Op deze manier is er een hoeveelheid warmte beschikbaar om gebruikt te worden op het gewenste moment, al schijnt de zon zwak of helemaal niet. Zelfs in de winter wanneer de zon maar een paar uur per dag schijnt, kan een zonneboiler voldoende warm water produceren om te douchen, te wassen of schoon te maken. Sommige systemen leveren ook een bijdrage aan de ruimteverwarming.

4.3.1 Zonnecollectoren

Een zonnecollector is een wisselaar die direct en diffuus zonlicht omzet in warmte. Zonnecollectoren zijn er in verschillende types. Zo zijn er vlakkeplaatcollectoren en vacuümbuiscollectoren. Niet alleen het uiterlijk van de collector verschilt maar bij een vlakkeplaatcollector kan bijvoorbeeld ook het binnenwerk en verwerkte materialen verschillen. Het binnenwerk en verbindingen van collectoren kunnen onder andere het afgiftevermogen en de levensduur van de collectoren beïnvloeden. Ook kan dit de montagemogelijkheden beperken. Isolatiewaardes kunnen verschillen waardoor sommige types minder goed te beïnvloeden zijn door de buitentemperatuur als andere.

4.3.1.1 Vlakkeplaatcollectoren

De montage van de collector gebeurt meestal op een hellend of plat dak. Op een hellend dak ziet de collector eruit als een groot dakvenster. Een vlakkeplaatcollector is een ondiepe bak (\pm 10 cm), waarin de verschillende onderdelen in lagen zijn aangebracht. (VITO, Warmte uit zonlicht, de boiler, 2013)



Figuur 11 Vlakkeplaatcollector (Zonneboiler Magazijn, 2020)

Absorber

De absorber is een metalen plaat met aan de bovenzijde een warmteabsorberende laag. In de absorber is een buizenstelsel verwerkt waarin een vloeistof kan stromen. Gewoonlijk is dat water, soms aangevuld met additieven (glycol). De zon drijft de temperatuur van de absorber op, die zijn warmte afgeeft aan de vloeistof in de buizen. Om die warmte optimaal te gebruiken, moeten verliezen zo veel mogelijk beperkt worden. Een gewone zwarte absorber heeft een hoge absorptiecoëfficiënt en een even hoge emissiecoëfficiënt. De absorptiecoëfficiënt geeft aan in welke mate zonnestraling opgevangen en in warmte omgezet wordt. De emissiecoëfficiënt speelt een rol bij de warmteverliezen door straling. Een spectraal selectieve laag combineert een hoge absorptiecoëfficiënt én een lage emissiecoëfficiënt: dat zorgt voor een goede absorptie van zonlicht, met een beperkt warmteverlies door straling. Hierdoor stijgt de opbrengst in belangrijke mate.

Isolatiemateriaal

Isolatiemateriaal aan de achterzijde van de absorber beperkt de warmteverliezen. Het materiaal moet hittebestendig zijn (bv. glaswol zonder bindhars).

Afdekplaat

Aan de voorzijde van de absorber zorgt de wind voor convectie wat leidt tot warmteverlies. Dat verlies neemt toe bij koudere buitenlucht. Ook de windsnelheid speelt een belangrijke rol. Om het convectieverlies te verminderen, wordt de absorber afgedekt met een transparante glasplaat en een luchtspouw van enkele centimeter. Afdekplaten in synthetische materialen zijn minder duurzaam omdat ze lijden onder de UV-straling. Omdat glas een deel van de invallende zonnestraling weerkaatst en zelf ook een deel absorbeert, gaat de voorkeur naar ijzerarm glas met een hoge doorlaatbaarheid.

4.3.1.2 Vacuümcollectoren

Vacuüm is een perfecte isolator. Een dichting zorgt voor een blijvend vacuüm, waardoor warmteverliezen minimaal worden. Voor eenzelfde oppervlakte zijn vacuümsystemen meestal duurder, maar ze hebben een hoger rendement. Dat komt vooral tot uiting als het water aan een hoge temperatuureis moet voldoen. (VITO, Warmte uit zonlicht, de boiler, 2013)

Vlakkeplaatvacuümcollector

Dit systeem leunt sterk aan bij een gewone vlakkeplaatcollector. Door een perfecte dichting en steuntjes tussen het glas en de achterwand, kan de collector onder vacuüm werken. De prestaties zijn nog beter als het vacuüm (in werkelijkheid lucht bij zeer lage druk) vervangen is door krypton.

Heatpipe in vacuümbuis

Deze collector is opgebouwd uit een aantal naast elkaar geplaatste glazen vacuüm buizen. Daarin bevindt zich een smalle absorber verbonden aan een zogenaamde "heatpipe". Dat is een gesloten buis waarin een speciale vloeistof zit. De vloeistof verdampt onder invloed van de zon. De damp verspreidt zich over de buis en condenseert bovenaan, waar de buis in contact staat met een koelvloeistof. De condenserende damp geeft zijn warmte af aan de koelvloeistof, die in een tweede gesloten circuit circuleert. De opgewarmde koelvloeistof gaat vervolgens naar de warmtewisselaar in het voorraadvat en zo terug naar de heatpipe. In de heatpipe stroomt het condensaat naar beneden waarna de cyclus zich herhaalt.



Figuur 12 Foto vacuümbuiscollector (Janssen, 2017)

4.3.1.3 Geïntegreerde collectoren

Bij een geïntegreerd systeem zijn het voorraadvat en de collector tot één geheel verwerkt. Een pomp en een elektronische regeling zijn niet nodig en het systeem bespaart ruimte in huis. Door integratie zijn er minder componenten waardoor de aankoop prijs en de plaatsingskosten dalen. Omdat de collector zwaarder is, is extra aandacht nodig voor de draagkracht van het dak.

Nokcollector

De nokcollector is buisvormig en bevindt zich op de nok van het dak. Het bestaat uit een transparante kap met daaronder een koperen mantel met een zwarte spectraal selectieve laag die het roestvrij stalen voorraadvat omhult. De nokcollector bestaat uit twee in elkaar gemonteerde buizen. De inhoud van de binnenste buis dient als voorraadvat voor het warme water. De buitenkant van de buitenste buis absorbeert de zonnewarmte. Tussen de binnen- en buitenbuis is een vacuümruimte met gedemineraliseerd water. Door de zonnewarmte verdampt dit water. (VITO, Warmte uit zonlicht, de boiler, 2013)

4.4 Biomassa

Biomassa is organisch materiaal van plantaardige of dierlijke oorsprong. Planten zijn in staat om zonne-energie vast te leggen als chemische energie, ook wel fotosynthese genoemd. Tijdens de fotosynthese worden koolstofdioxide en water omgezet in zuurstof en organische verbindingen. De eenvoudigste reactie is de vorming van glucose. (Papa, van Leeuwen, de Geus, Entrop, & Bernard, 2020)



De omgekeerde reactie van fotosynthese is respiratie (biologisch) of verbranding (chemisch). Bij het verbranden van organische verbindingen worden koolstofdioxide en water gevormd en komt er energie vrij. Deze energie noemen we bio-energie en kan beschouwd worden als hernieuwbare energie.

4.4.1 Overzicht

Onderstaande figuur geeft een overzicht van de voornaamste soorten biomassa.

Soort biomassa	Primaire producten	Belangrijke secundaire producten (primaire en secundaire reststromen)
Bomen uit bosbouw	Hout, kurk, hars, latex	Loof, zaagsel, schors
Planten, bomen en gras uit landschapsbeheer	Hout, waterplanten, bermgras	Snoeiafval
Gewassen		
• Graan	Graankorrel, zetmeel	Stro, zemelen, kaf
• Oliehoudende gewassen	Bonen, noten, olie	Eiwitrijk schroot, snoeiafval (hout)
• Suikerbieten	Suiker	Suikerbietenpulp, melasse, bietenpunten, bietenblad
• Aardappelen	Aardappel, zetmeel	Aardappelpulp
• Oliepalm	Palmolie	Diversiteit aan grote hoeveelheden reststromen
• Groenten en fruit	Groenten en fruit	Stengels, loof, GF-resten
• Weidegras	Gras, hooi	
Microalgen, zeewieren	Olie, eiwit, hydrocolloïden	Celwandresiduen
Reststromen na gebruik door consument en dier (tertiaire reststromen)	GFT, oud papier, mest, afgewerkt vet, afgewerkte frituurolie, swill, afgedankt textiel en rioolwaterzuiveringslib	

Figuur 13 Overzicht biomassa (Biomassa voor de circulaire economie, 2019)

Brandstof	Energie-inhoud per gewicht (calorische onderwaarde, MJ/kg)	Energie-inhoud per volume (calorische onderwaarde, MJ/l)
BRANDSTOFFEN UIT BIOMASSA EN/OF BIOMASSAVERWERKING		
Biopropan	46	24
Zuivere plantaardige olie (olie die uit oliehoudende planten is verkregen door persing, extractie of vergelijkbare procedés, ruw of geraffineerd maar niet chemisch gemodificeerd)	37	34
Biodiesel – vetzuurmethylester (methylester geproduceerd uit olie uit biomassa)	37	33
Biodiesel – vetzuurethylester (ethylester geproduceerd uit olie uit biomassa)	38	34
Biogas dat kan worden gezuiverd tot de kwaliteit van aardgas	50	–
Waterstofbehandelde (thermochemisch met waterstof behandelde) olie uit biomassa, ter vervanging van diesel	44	34
Waterstofbehandelde (thermochemisch met waterstof behandelde) olie uit biomassa, ter vervanging van benzine	45	30
Waterstofbehandelde (thermochemisch met waterstof behandelde) olie uit biomassa, ter vervanging van vliegtuigbrandstof	44	34
Waterstofbehandelde (thermochemisch met waterstof behandelde) olie uit biomassa, ter vervanging van vloeibaar petroleumgas	46	24
Gelijktijdig verwerkte (in een raffinaderij gelijktijdig met fossiele brandstoffen verwerkte) olie uit al dan niet gepyrolyseerde biomassa, ter vervanging van diesel	43	36
Gelijktijdig verwerkte (in een raffinaderij gelijktijdig met fossiele brandstoffen verwerkte) olie uit al dan niet gepyrolyseerde biomassa, ter vervanging van benzine	44	32
Gelijktijdig verwerkte (in een raffinaderij gelijktijdig met fossiele brandstoffen verwerkte) olie uit al dan niet gepyrolyseerde biomassa, ter vervanging van vliegtuigbrandstof	43	33
Gelijktijdig verwerkte (in een raffinaderij gelijktijdig met fossiele brandstoffen verwerkte) olie uit al dan niet gepyrolyseerde biomassa, ter vervanging van vloeibaar petroleumgas	46	23

Figuur 14 Energie-inhoud biomassa (Energie-inhoud van brandstoffen, 2018)

4.4.2 Bewerkings- en verwerkingsmethodes

Figuur 14 geeft aan dat verschillende vormen van biomassa een aanzienlijke energie-inhoud hebben. Deze energie is enkel waardevol indien er een manier is om de aanwezige energie nuttig te gebruiken. In sommige gevallen kan dit betekenen dat de energie-inhoud van de biomassa eerst omgezet moet worden in een hanteerbare energiedrager. Bijvoorbeeld de omzetting van suikers naar ethanol. Verder zijn de meest toegepaste methodes aangehaald.

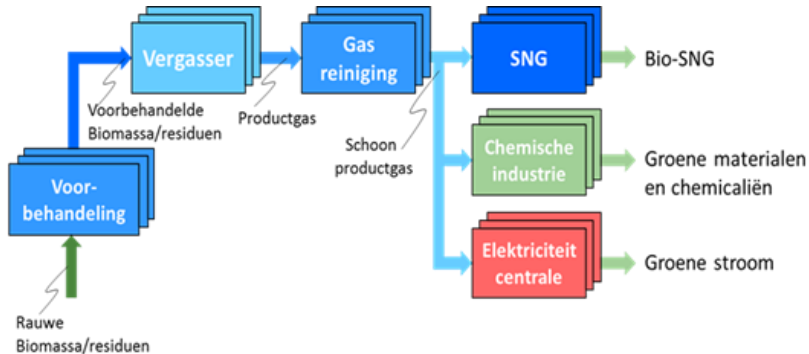
4.4.2.1 Verbranding

Bij verbranding van biomassa komt warmte vrij, waarmee water kan worden opgewarmd. Door middel van een stookinstallatie kan de warmte worden geleverd aan woningen, een zwembad, een sporthal, een verzorgingstehuis, etc. Ook kan er met warmte, door middel van de stoomtechniek, elektriciteit worden opgewekt. Een bekend voorbeeld hiervan is het meestoken van snoeihout in grote kolencentrales. Verbranding beoogt de (volledige) omzetting van een brandstof, op hoge temperatuur, met de bedoeling de chemische energie beschikbaar in de brandstof volledig vrij te stellen. Er bestaan een aantal technieken voor de energetische omzetting van biomassa in een biomassacentrale. De kwaliteit van de brandstof bepaalt grotendeels het rendement van deze centrale. Volgende technieken zijn bekend: wervelbedverbranding, roosterovens voor houtsnippers en grote stukken, inblaasverbranding voor zaagsel en stof en schroefstuwstokers voor pellets en houtsnippers. (Parker, 2019)

4.4.2.2 Vergassing

Vergassing van biomassa is een proces waarbij onder hoge temperatuur biomassa wordt ontleed in kleinere moleculen, zoals methaan. Vergassing is een technologie die momenteel nog in ontwikkeling is. Op dit moment lijkt superkritische warmtevergasning het meest kansrijk. Superkritisch water bestaat bij een temperatuur boven 374 °C en druk boven 221 bar. Superkritische vergassing vindt plaats bij temperaturen rond 600-650 °C en een druk van 300 bar. Onder deze omstandigheden is water een sterke oxidator en doet het koolstofhoudende biomassa omzetten in CO₂, H₂, CH₄ en CO.

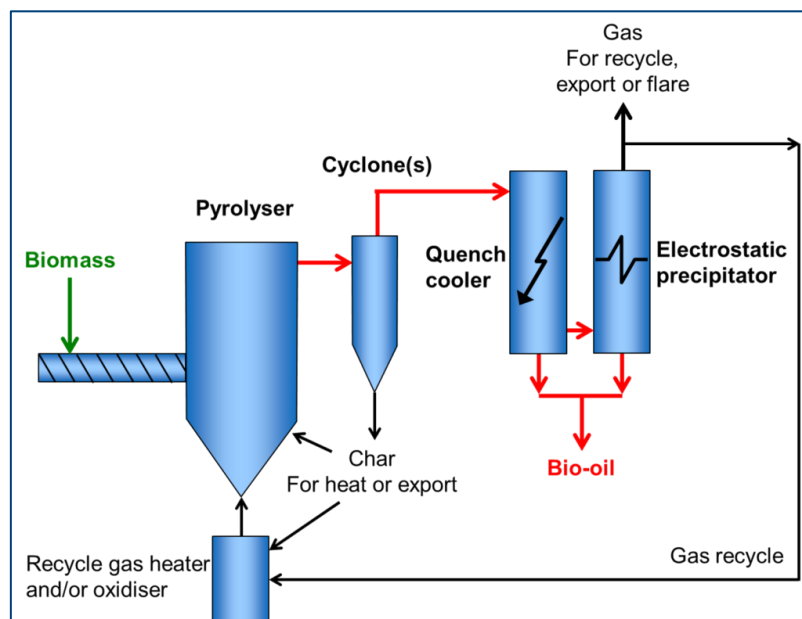
Door de temperatuur na de ontledingsreactie te laten zakken tot onder de kritische temperatuur ontstaat weer een vloeibare- en gasfase. Vooral in de gasfase bevinden zich de meest energetische componenten. Het proces is gebaseerd op een elegant principe maar omdat het hoge temperaturen en drukken vereist, is de uitvoering complex. (Papa, van Leeuwen, de Geus, Entrop, & Bernard, 2020)



Figuur 15 Vergassing van biomassa (Biomassavergassing, sd)

4.4.2.3 Pyrolyse

Pyrolyse is een endotherm proces waarbij koolstofhoudend materiaal wordt ontleed bij verhitting tot hoge temperaturen (200 - 900 °C) in afwezigheid van zuurstof. Bij deze onvolledige ontledingsreactie worden organische moleculen afgebroken tot kleinere organische moleculen. Om het proces gaande te houden moet constant warmte worden toegevoegd, er is sprake van een endotherme chemische reactie. Voorbeelden van pyrolyse zijn cokesproductie, houtskoolproductie en houtvergassing. Bij deze processen ontstaan koolwaterstoffen, in de vorm van gassen en teer als nevenproduct. Ook het kraken van aardolie is een pyrolyseproces. (Wikipedia, 2020)



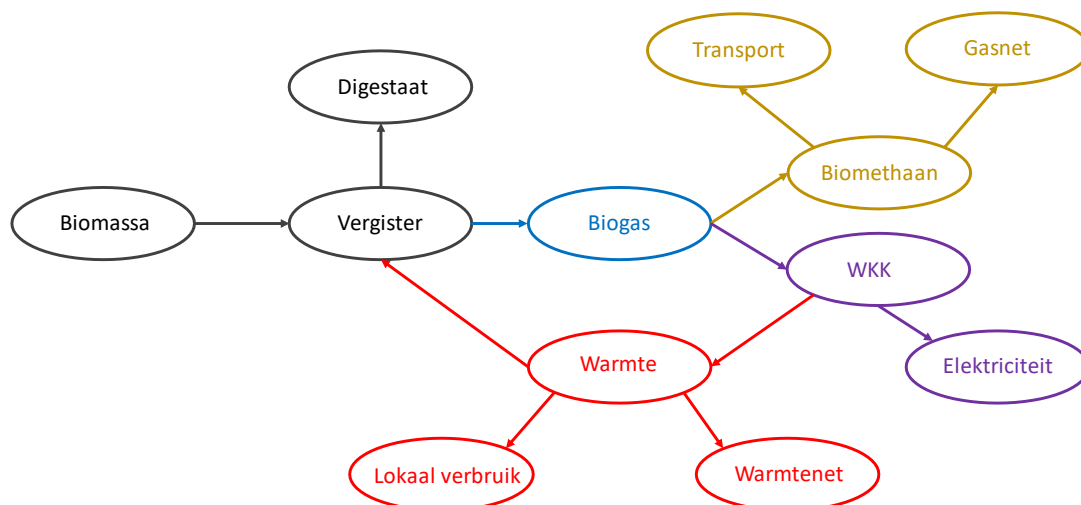
Figuur 16 Pyrolyse reactor (Task34, sd)

4.4.2.4 Vergisting

Vergisters worden uitgevoerd al naargelang hun invoerstroomben. Een vergister voor vloeibare invoerstromen zal anders zijn opgebouwd dan een vergister voor vaste invoerstromen. Broeikasgassen die normaal vrijkomen bij de opslag van de reststromen worden nu opgevangen en gevaloriseerd. Ook ondervindt de omgeving minder geurhinder aangezien de reststromen zich in de vergister bevinden. Het digestaat dat uit de vergister komt is relatief geurloos in vergelijking met de verse invoerstroomben.

Een vergister kan gekoppeld worden aan een WKK of het geproduceerde biogas kan worden opgezuiverd tot bio-methaan. Het geproduceerde biogas bevat nog 25-50V% CO₂, daardoor leent het zich niet direct tot gebruik in het openbaar gasnet. Er is dus nood aan een zuiveringsstap alvorens het gas geschikt is om te injecteren in het openbaar gasnetwerk of als energiedrager in transport kan worden gebruikt. In Vlaanderen is IOK voorlopig de enige die biogas opwaardeert tot bio-methaan.

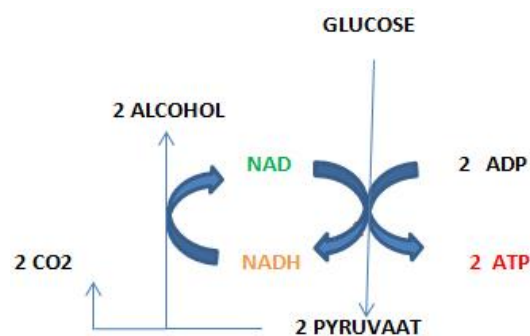
Naast opzuiveren van biogas is het ook mogelijk om het direct te verbranden in een gasmotor-WKK. Deze produceert zowel warmte als elektriciteit uit het biogas. Het merendeel van de warmte wordt gebruikt om de vergister op temperatuur te houden, aangezien het vergistingsproces stopt als de temperatuur te fel afneemt. Het overschot aan opgewekte warmte kan ter plaatse worden gebruikt voor de verwarming van gebouwen of de productie van sanitair warm water. Indien er geen behoefte is aan deze warmte-overschotten kan er ook worden aangekoppeld aan een warmtenet om de overbodige warmte te “verkopen”.



Figuur 17 Schema voor mogelijke toepassing energiestromen

4.4.2.5 Fermentatie

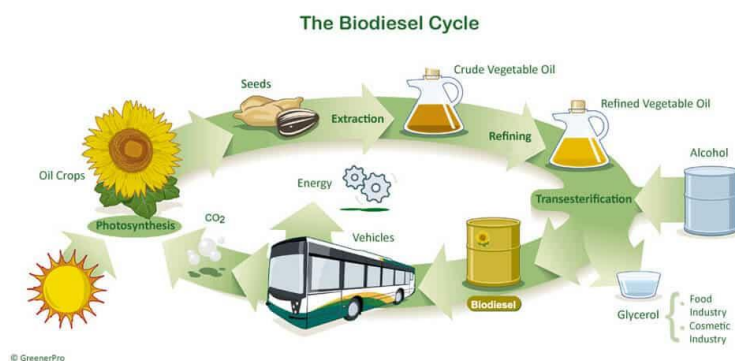
Productie van Bio-ethanol kan via fermentatie van suikers of zetmeel, gevolgd door een zuivering via distillatie. De gebruikte grondstoffen zijn suikerhoudende gewassen zoals suikerriet (vnl. in Brazilië) en suikerbiet, of zetmeelhoudende gewassen zoals maïs en tarwe. Door vergisting worden suikers omgezet tot ethanol. Zetmeel moet eerst worden omgezet tot enkelvoudige suikers. Dat gebeurt met enzymen. Cellulose en dergelijke zijn ook 'samengestelde suikers' maar langer en complexer. In principe kunnen ook reststromen van biomassa die een hoog gehalte cellulose (hout maar ook gras etc.) bevatten gebruikt worden voor de productie van ethanol. Dat zijn de zogenoemde 2^{de} generatie-technologieën. De biomassa moet daarvoor eerst worden voorbehandeld om de cellulose tot enkelvoudige suikers af te breken. Voornamelijk gebruikt men bio-ethanol als biobrandstof maar er zijn ook ontwikkelingen om bio-ethanol te benutten als grondstof voor verdere chemische producten zoals polyethyleen. (Parken, 2019)



Figuur 18 Productie van bio-ethanol (alcoholgisting, sd)

4.4.2.6 Extractie

De huidige eerste generatie biobrandstoffen worden geproduceerd op basis van bestaande technologieën, die zowel fysisch/mechanisch, chemisch of biologisch van aard kunnen zijn. Zo gebeurt de productie van pure plantaardige olie door de extractie van oliehoudende zaden of pitten (van bv. koolzaad, zonnebloem, soja, palm, ...) d.m.v. mechanische persing en/of extractie met een solvent. Wanneer deze olie vervolgens reageert met een alcohol, zoals ethanol of methanol, bekomt men biodiesel. Concreet verloopt deze chemische reactie (transesterificatie) als een discontinu proces in een grote reactor die voortdurend gemengd en verwarmd (ca. 50°C) wordt. Er vormt zich glycerol als bijproduct. (VITO, Biobrandstoffen van de eerste, de tweede en derde generatie, 2009)



Figuur 19 Productie van biodiesel (Biodiesel FAQ, 2004)

4.5 Windenergie

Windenergie is de energie gewonnen uit de omzetting van kinetische energie in de lucht naar mechanische energie. Klassiek werd deze mechanische energie gebruikt voor een directe aandrijving van machines, denk maar aan graanmolens of poldermolens in Nederland. Tegenwoordig is een windmolen gekoppeld aan een generator die de mechanische energie omzet in elektrische energie.



Figuur 20 Poldermolen M (Molendatabase, 2020) / Moderne windmolen (Installatie, 2013)

Moderne windmolens worden ingedeeld in drie categorieën, kleine, middelgrote en grote turbines.

Tabel 5 geeft de indeling weer van de verschillende categorieën. In de verdere bespreking van windturbines worden de kleine en middelgrote turbines samengenomen. Men spreekt dan van KMWT's. (Van Ackere , Van Wyngene, Van Eetvelde, & Vandeveldde, 2015)

	Maximale ashoogte (m)	Vermogensbereik (kW)
Kleine	15	0 tot 10
Middelgrote	-	10 tot 300
Grote	-	300 tot -

Tabel 5 Indeling windturbines (Van Ackere , Van Wyngene, Van Eetvelde, & Vandeveldde, 2015)

4.5.1 Energieproductie en voorspelling

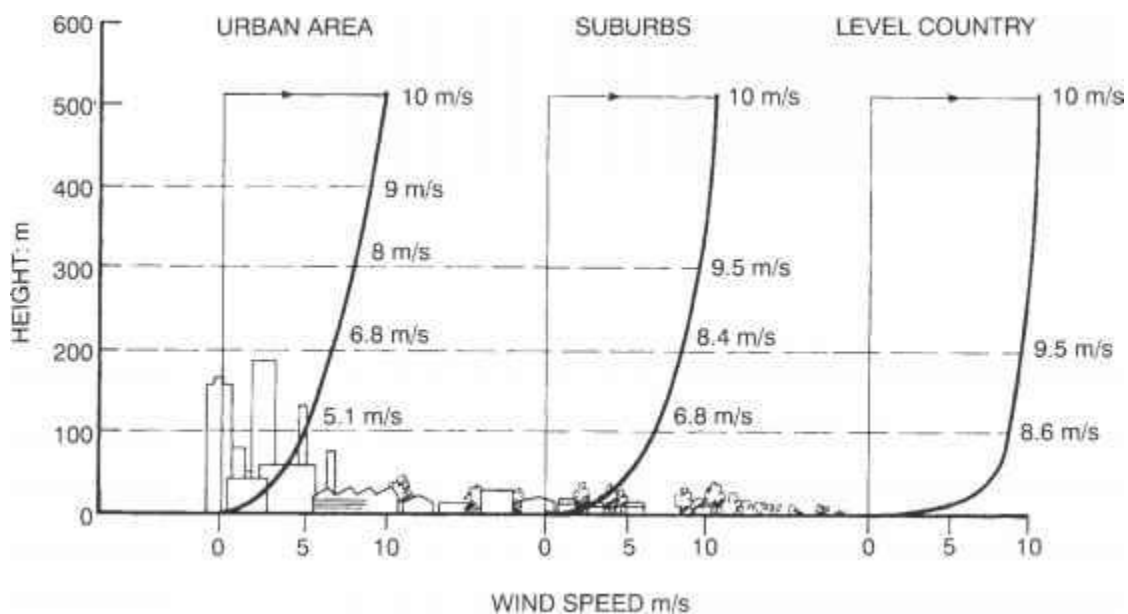
Het opgewekte vermogen van een windturbine kan exact worden bepaald uit de windsnelheid en de eigenschappen van de turbine. Hier volgt een beschrijving van de methode om de energieproductie te voorspellen. Deze voorspellingen zijn uitermate belangrijk om de investering in een windturbine te verantwoorden.

Wind bevat een hoeveelheid kinetische energie $E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$. Het windvermogen dat via de luchtstroming de turbine bereikt wordt gegeven door $P_{wind} = \frac{\dot{m} \cdot v^2}{2}$, met \dot{m} de massastroming (kg/s) doorheen de oppervlakte beslagen door de wieken. Deze massastroom kan worden uitgedrukt door de windsnelheid $\dot{m} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v \cdot \rho$ met D de diameter van de cirkel beslagen door de wieken. Het beschikbare vermogen voor een windturbine kan uiteindelijk worden geschreven als: $P_{wind} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot v^3 \cdot \rho}{6} = C_{te} \cdot v^3 \cdot D^2$. Van het beschikbare vermogen kan maximaal 59,3% worden omgezet in mechanische energie. Deze omzettingsgrens wordt de wet van Albert Betz genoemd.

(Tipperary Institute, 2007)

4.5.1.1 Snelheidsprofiel van wind

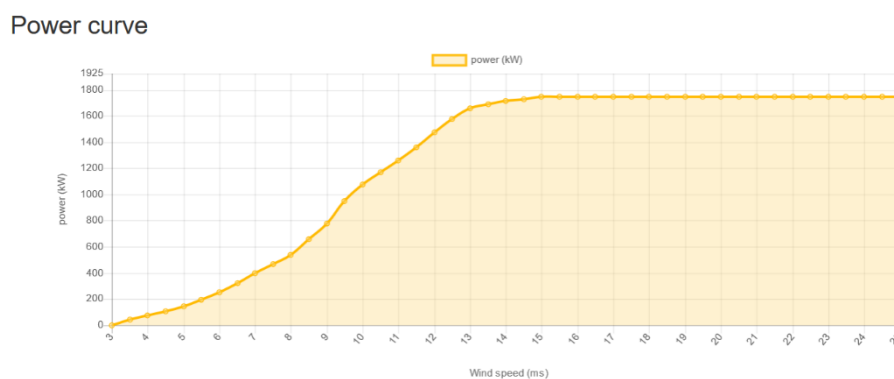
Figuur 21 toont aan hoe de windsnelheid verloopt in functie van de hoogte. Er is duidelijk te zien dat de snelheid in open landschappen sneller toeneemt tot de maximale waarde. Zo is op een hoogte van 100m in een open landschap de windsnelheid al 86% van deze op grote hoogte. Voor stedelijke landschappen zal dit maar 51% zijn op 100m hoogte. Naast een lagere snelheid bevat de wind in stedelijke gebieden veel turbulenties. Deze wervelingen resulteren in bijkomende verliezen over de windturbine.



Figuur 21 Snelheidsprofiel van wind (Williams, 2020)

4.5.1.2 Verband windsnelheid en energieproductie

Het beschikbaar vermogen is evenredig met de windsnelheid tot de derde macht. Dit verband laat toe een vermogen-curve op te stellen die het vermogen van de turbine uitdrukt in functie van de windsnelheid. Figuur 22 geeft de vermogen-curve voor een Vestas V66-1.75 turbine. De cut-in windsnelheid voor deze turbine is 4m/s, bij deze windsnelheid begint de turbine met het opwekken van elektriciteit. Voor kleinere snelheden wekt de turbine minder energie op dan nodig is voor de sturing. De turbine wekt het nominaal vermogen op bij een snelheid van 16m/s, dit wordt de ontwerpsnelheid genoemd. Vanaf deze ontwerpsnelheid blijft het vermogen constant want dit is het maximaal vermogen van de generator. Bij een snelheid van 25m/s schakelt de turbine zichzelf uit, dit is de cut-out windsnelheid. Als de turbine zichzelf niet zou uitschakelen bij deze grote snelheden kan er schade optreden, de turbine draait zich uit de wind uit veiligheidsoverwegingen.



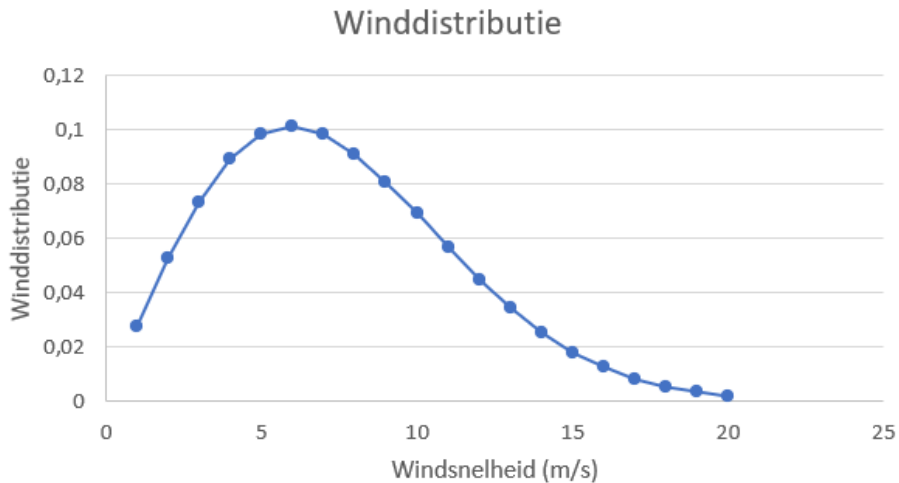
Figuur 22 Vermogenscurve Vestas V66-1.75 (wind-turbine-models.com, 2017)

4.5.1.3 Jaarlijkse energieproductie

Om een voorspelling te kunnen maken van de energieproductie van een windturbine moet de jaarlijkse windhoeveelheid op de locatie van plaatsing geweten zijn. Deze hoeveelheden zijn gegeven in een windsnelheidsverdeling. Om een exacte curve te kunnen opstellen moet gedurende enkele jaren de windsnelheid worden gemeten. Het is dus niet altijd mogelijk om een exacte windsnelheidsverdeling op te meten alvorens een turbine te plaatsen. Daarom wordt er dikwijls gebruik gemaakt van een Rayleigh-verdeling met als input de gemiddelde windsnelheid. Deze gemiddelde windsnelheid voor bijvoorbeeld Geel is 7.5m/s. Figuur 23 geeft de windsnelheids-verdelingscurve voor Geel, berekend aan de hand van de rekentool door het Vlaams Energieagentschap.

(Global Wind Atlas, 2019)

(Vlaams Energieagentschap, 2020)



Figuur 23 Windsnelheidsverdeling Geel (Energiesparen.be, 2019)

Aan de hand van de snelheidsverdeling en de vermogenscurve van de turbine kan er exact worden bepaald hoeveel energie de turbine zal produceren. De snelheidsverdeling hangt af van de gemiddelde windsnelheid op de gemeten locatie. De jaarlijkse energieproductie wordt dan soms ook benaderd door een empirische formule : $E = C * A * v_{gem}^3$ (kWh/jaar). Waarin C, de gebruiksfactor, een constante is afhankelijk van de locatie. Producenten van windturbines geven in de documentatie dikwijls een curve die de jaarlijkse opbrengst uitdrukt in functie van de gemiddelde windsnelheid op ashoogte. Het gebruik van deze curves is niet altijd correct aangezien de producent niet weet welke gebruiksfactor bij een bepaald project van toepassing is.

4.5.2 Kleine en middelgrote windturbines

De windsnelheid neemt toe met de hoogte. De hoogte van kleine windturbines is maximaal 15m en hun nominaal vermogen moet kleiner zijn dan 10kW. Door hun beperkte hoogte ondervinden ze dikwijls turbulenties van omliggende hindernissen. De luchtstroming doorheen de turbine is dus niet perfect, het rendement relatief klein. De jaarlijkse energieproductie van kleine turbines is dus klein. Met een investeringskost gelijkaardig aan die van zonnepanelen en een veel kleinere energieopbrengst zijn sommige kleine windturbines allesbehalve rendabel. Naarmate de turbines groter worden neemt ook de rendabiliteit toe. Figuur 24 geeft de installatiekosten per kWp voor verschillende kleine tot middelgrote windturbines. Er is duidelijk te zien dat de investeringskosten per kWp sterk afnemen naarmate het turbinevermogen toeneemt. (Bortolini, Gamberi, Graziani, Manzini , & Pilati, 2013)

Model	Turbine size	Building material	Labor	Engineering	Land purchase	Grid connection	Total	
	[kW]	[€/kWp]	[€/kWp]	[€/kWp]	[€/kWp]	[€/kWp]	[€/kWp]	€
Are110	2.5	1040	288	133	832	389	2682	6704
Skyline sl-30	3.0	676	240	92	286	324	1618	4854
Uge-4k	4.0	507	180	69	187	243	1186	4744
Ampair 6000 × 5.5	6.0	453	120	57	499	162	1291	7748
Fortis Alize	10.0	488	216	70	1066	97	1937	19,373
Jacobs 31-20	20.0	244	144	39	812	97	1336	26,718
Hz 30 k	30.0	155	56	21	182	67	481	14,440
Redriven 50 kw	50.0	264	58	32	354	40	748	37,386
Wes18	80.0	172	36	21	181	25	435	34,828
Wes30	200.0	91	14	11	144	10	270	54,070

Figuur 24 Installatiekost voor KMWT's (Bortolini, Gamberi, Graziani, Manzini , & Pilati, 2013)

4.5.3 Grote windturbines

4.5.3.1 On versus offshore

Grote windturbines worden zowel op het land als in zee geplaatst. Men spreekt dan van on- en offshore windturbines. Over het algemeen zijn windturbines op zee groter dan de exemplaren op het land. Dat is een direct gevolg van de afwezigheid van omwonenden. Bij turbines op het land moet er altijd rekening worden gehouden met de omliggende buurtbewoners. Daarnaast waait het ook meer en harder op zee, waardoor offshore turbines meer energie produceren dan dezelfde onshore turbines. Aan de andere kant zijn de installatiekost en operationele kosten veel groter bij offshore turbines en is het aantal bedrijfsuren doorgaans kleiner op zee. Reparaties op zee duren namelijk langer om te plannen en uit te voeren.

4.5.4 Lokale effecten

In de directe omgeving oefent een windturbine enkele negatieve effecten uit. Het is dan ook de voornaamste reden waarom de plaatsing van windmolens dikwijls met buurtprotesten en petitie's gepaard gaan.

(Clerix, 2015)

4.5.4.1 Slagschaduw

De plaats en duur van slagschaduw kan op voorhand perfect worden berekend, de Vlaamse regelgeving vereist dan ook een gedetailleerde berekening van de slagschaduw. Vroeger gold er een wettelijke limiet van 30 uren slagschaduw per jaar. Deze limiet is verstrengd in 2011, sindsdien ligt de limiet op 8 uren slagschaduw per jaar én maximaal 30 minuten per dag.

(Clerix, 2015)

4.5.4.2 Geluidsoverlast

Windmolens maken geluid, vlak bij de bron kan dit 105-107dB zijn. Een geluidsniveau van 105dB komt overeen met een pneumatische breekhamer. Op grondniveau zal er dus geluid waarneembaar zijn. Hoe verder van de bron, hoe kleiner de geluidsintensiteit. Op een afstand van 500m kan toch nog 39dB overblijven. Dit komt overeen met de intensiteit van zacht geroezemoes in een klaslokaal.

Het geluid van windturbines is dus wel degelijk waarneembaar en mogelijk hinderlijk. Des te meer omdat de wieken herhaaldelijk passeren en dus “geluidspulsen” produceren. Deze pulsen produceren een repetitief geluid dat zich circa elke seconde herhaalt. Dit herhaaldelijke karakter is hinderlijker dan een geluid van hetzelfde niveau dat constant is zoals bijvoorbeeld verkeer.

(Clerix, 2015)

4.5.4.3 Vogels en vleermuizen

Vogels ondervinden op meerdere manieren last van windmolens. Zo jaagt het geluid de vogels weg uit hun natuurlijke habitat. Indien de molens geplaatst zijn op belangrijke nest- of foerageplaatsen kan het zijn dat de vogels deze plaatsen links laten liggen. Wat dus een slechte invloed heeft op het vogelbestand in de directe omgeving. Naast deze indirecte effecten is er natuurlijk ook het directe effect dat vogels tegen de windmolens kunnen vliegen. Het effect van deze directe botsingen is echter zeer klein in vergelijking met hoogspanningslijnen, verkeer, ramen of katten.

Vleermuizen jagen op insecten. Op warme zomeravonden trekken parende insecten naar het hoogste punt in de buurt, dat kan de gondel van een windturbine zijn. Vleermuizen op zoek naar voedsel achtervolgen deze insecten tot aan de gondel en wieken. De kleine onderdruk achter de wieken is voldoende om vleermuizen een klaplong te bezorgen, waarna ze sterven. Indien kan worden vermeden dat insecten langs de mast naar boven vliegen, worden ook de vleermuizen gered.

4.5.4.4 Ruimtelijke integratie

Windmolens zijn hoge, bewegende constructies. Ze zijn van ver te zien en trekken de aandacht. De plaatsing van windmolens in natuurgebieden of historisch beschermde landschappen heeft dus wel degelijk een effect op de uitstraling van het landschap. Bij de plaatsing van windmolens moet men dus rekening houden met de omliggende landschappen.

4.6 Geothermie

Het woord geothermie stamt uit het Grieks. Het is een samentrekking van 'geo', wat 'aarde' betekent, en 'thermos', vertaald als 'warmte'. Geothermie verwijst dus naar warmte die uit de aarde komt. Een deel van deze warmte komt uit de kern van de aarde, die naar schatting nog steeds 6000°C warm is. Deze warmte stroomt geleidelijk weg naar de oppervlakte. Convectiebewegingen zorgen voor het grootste deel van de warmteafgifte vanuit de kern. De diepe warmteflux is dan ook niet homogeen verdeeld over de aarde. De 'warme' zones vallen vrijwel allemaal samen met belangrijke riftsystemen. Dat zijn doorgaans smalle, langgerekte gebieden waar de warmteflux lokaal kan oplopen tot boven 250 mW/m². Het grootste deel van het aardoppervlak is echter relatief koud, met een gemiddelde warmteflux tussen 40 en 80 mW/m². Naast de diepe flux genereert ook radioactief verval in de korst belangrijke hoeveelheden warmte. Ook deze warmte verplaatst zich naar de oppervlakte. De grootte van de ondiepe warmteflux hangt sterk af van de dikte, de samenstelling en de ouderdom van de korst. In gebieden met een geringe toevoer van warmte uit de kern, is radioactief verval vaak goed voor 30% of meer van de warmteflux gemeten aan de oppervlakte. De afkoeling van de kern en het radioactief verval zijn twee processen die traag verlopen. Naar menselijke maatstaven zijn beide warmtefluxen dan ook min of meer constant.

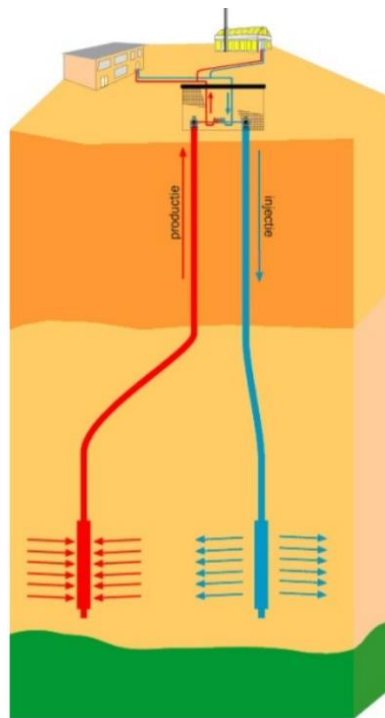
Geothermie kan opgedeeld worden in 3 categorieën, ondiepe geothermie, intermediaire geothermie en diepe geothermie. Bij ondiepe geothermie gaat men maximaal 500 m onder de grond. Men spreekt dan vooral over warmtepompen en thermische energieopslag. Tussen 500 en 1000 m spreekt men over intermediaire geothermie, zowel open als gesloten systemen. Vanaf 1000 m spreekt men van diepe geothermie. (Dreesen & Laenen, 2010)

4.6.1 Diepe geothermie

Diepe geothermie is het gebruik van aardwarmte uit diepe bronnen om bijvoorbeeld woonwijken, bedrijventerreinen of serres te verwarmen. Hoe dieper de bron, hoe hoger de temperatuur. Aardwarmte uit bronnen die heet genoeg zijn, kan worden omgezet in elektriciteit. Bij diepe geothermie onderscheiden we verschillende systemen.

4.6.1.1 Hydrothermale systemen (open systeem)

In een hydrothermaal systeem circuleert warm water in een aquifer tussen twee bronnen. Dit is een watervoerende laag in de ondergrond, een voorbeeld hiervan is zand. Er bestaan verschillende soorten aquifers. Een gesloten of begrensde aquifer heeft een waterhoudende grondlaag die ingesloten zit tussen ondoordringbare lagen of ook wel aquitards, zoals graniet of klei. Hierdoor wordt het grondwater geïmmobiliseerd. Een open of onbegrensde aquifer is aan de bovenzijde niet afgesloten door een ondoordringbaar materiaal. Gesloten aquifers bezitten soms een hoge hydrostatische druk door natuurlijke aanvulling vanuit hoger gelegen gebieden. De watertemperatuur van aquifers rond 2000 m diepte is gemiddeld 60 tot 80 °C. Dergelijke aquifers kunnen geëxploiteerd worden voor hun warmte. In tegenstelling tot het exploiteren van olievelden, herstelt de uitgeputte warmte in een aquifer zich in geologische termen gezien zeer snel. Nadat de productie van warmte is stilgelegd, warmt het hete gesteente het afgekoelde water op tot de temperatuur van het omgevende gesteente en loopt de druk weer op tot het oorspronkelijk niveau. Omdat het herstelproces quasi asymptotisch verloopt, duurt het zeer lang om 100% herstel te bereiken. Een praktisch herstel van 95% treedt echter veel eerder op. De exacte duur van de herstelperiode varieert per locatie en toepassing van de aardwarmte. In de meeste hydrothermale systemen wordt warm water uit één bron gepompt en het gekoelde water in een andere bron teruggepompt (doubletsysteem).



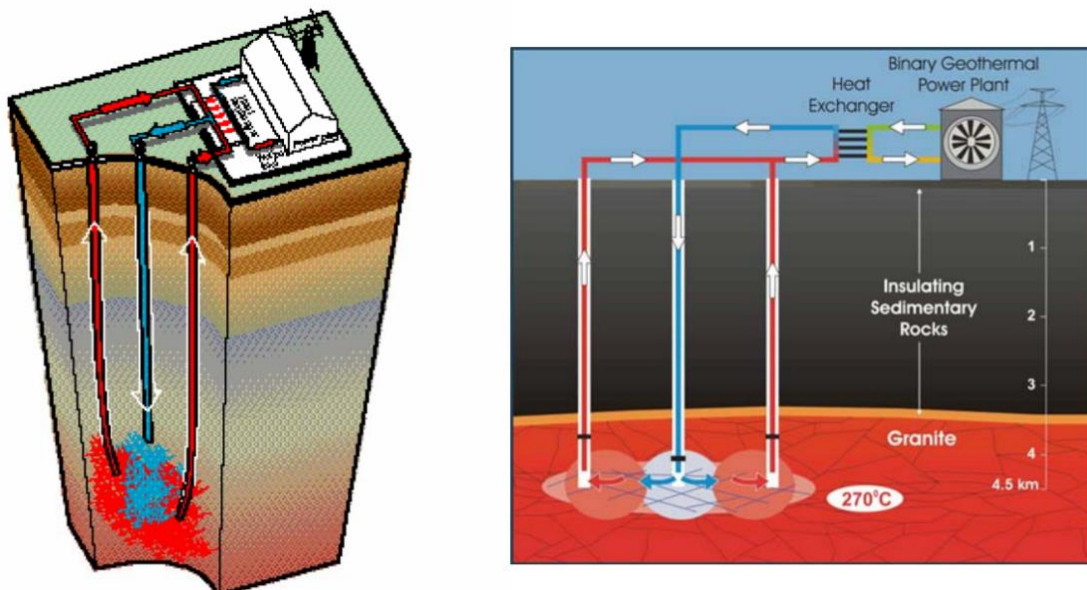
Figuur 25 Doubletsysteem (Dreesen & Laenen, 2010)

Het warmtevermogen van een doublet is niet alleen afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid warmte in de aquifer en het debiet van het geproduceerde water, maar vooral ook van het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur van het water. Hoe groter het verschil tussen productie- en injectietemperatuur, des te hoger de opbrengst aan warmte.

4.6.1.2 Hot Dry Rock of Enhanced Geothermal System (open systemen)

HDR (Hot-Dry-Rock), is een systeem waarbij met hydraulische stimuleringsmaatregelen spleten en kloven worden gemaakt in een gesteente dat hoge temperaturen bevat, maar dat te weinig poreus is om water uit te halen. Er ontstaat een kunstmatig spletenstelsel waarin het water kan circuleren tussen twee bronnen. Hydraulische stimulatie pompt water met hoge druk in het gesteente. Stroompaden worden opengeboren of al bestaande paden verbreed waardoor de doorlaatbaarheid van het gesteente vergroot. Deze handeling is noodzakelijk omdat anders het warmtewisselend oppervlak en de doorstroombaarheid te gering zouden zijn. Het zo geïnduceerde stelsel van natuurlijke en kunstmatige spleten vormt een onderaardse geothermische warmtewisselaar. Door de injectieboring wordt water in het klovenstelsel geperst, waar dit circuleert en zich opwarmt. Het opgewarmde water wordt door de tweede boring, de productieboring, weer naar de oppervlakte gepompt. De hoge temperatuur van de diepe gesteenten kan worden gebruikt voor zowel warmte als stoomopwekking. Om de warmte in deze gesteenten te kunnen gebruiken moet er een warmtedrager (water) doorstromen. Deze brengt de warmte-energie naar de oppervlakte. Het hete water kan dienen voor industriestoom, de voorziening van lokale of stadsverwarmingsnetwerken en het opwekken van elektriciteit.

De benaming Hot-Dry-Rock scheidt eigenlijk een verkeerd beeld van de realiteit. In werkelijkheid zijn bij deze temperaturen en dieptes geen kurkdroge gesteenteformaties te vinden. Om deze reden worden andere aanduidingen gebruikt zoals: Hot-Wet-Rock (HWR), Hot-Fractured-Rock (HFR) en het algemeen gebruikte Enhanced Geothermal System (EGS). Al deze termen duiden op dezelfde geothermische systemen.



Figuur 26 EGS (Dreesen & Laenen, 2010)

4.6.1.3 Diepe aardwarmtesondes (gesloten systeem)

Een diepe aardwarmtesonde (gesloten bodemwisselaar) is net als de ondiepe aardwarmtesonde een gesloten systeem waarin een warmtedragend medium circuleert, nu echter in een boring van 2 tot 3 km diep. Doordat het warmteuitwisselingsoppervlak met het omliggende gesteente zeer klein is, is de capaciteit en de rentabiliteit van een ontwikkeld gesloten systeem vele malen kleiner dan dit van een open systeem. De capaciteit van het bestaande gesloten systeem is beperkt door de ondergrondse warmtestroom. Ze leveren slechts enkele honderden kilowatt aan warmte. De voordelen zijn dat er geen filtersystemen en geen ondergronds reservoir nodig zijn en dat gebruikt weinig pompenergie. Gesloten systemen hebben ten opzichte van open systemen vooral het voordeel dat ze op vrijwel iedere locatie toepasbaar zijn. Randvoorwaarden zoals reservoir-eigenschappen, porositeit en permeabiliteit, dikte en structuur van de geologische lagen en mogelijke aanwezigheid van olie/gas zijn bij een gesloten systeem niet aan de orde. Gesloten bodemwisselaars worden dus toegepast op locaties waar te weinig kennis is over de samenstelling van de ondergrond, of waar de randvoorwaarden niet voldoen. Het toepassen van een open systeem zou hier een te groot risico op falen met zich mee brengen, of simpelweg onmogelijk zijn.

4.6.2 Toepasbaarheid in België

De geologische warmteflux aan het oppervlak schommelt in Vlaanderen rond 55 mW/m^2 . Ze is een maat voor het regeneratievermogen van geothermische reservoirs. Dit ligt in Vlaanderen tussen 50 en 100 kW/km^2 . De temperatuur in de ondergrond stijgt met de diepte. De snelheid waarmee dit gebeurt is een functie van de warmteflux en de thermische geleidbaarheid van het gesteente. In Vlaanderen ligt de drempelwaarde voor directe geothermische toepassing daardoor op een diepte van ca. 500 m. Dit beperkt het areaal waarbinnen de directe aanwending van aardwarmte met traditionele systemen mogelijk is tot het zuiden van West-Vlaanderen en de Kempen. Toepassingen die een temperatuur van 35°C of meer vergen, zijn alleen mogelijk in de Kempen. Niet traditionele toepassingen zoals Enhanced Geothermal Systems (EGS) of Hot Dry Rock (HDR) zijn in principe over heel Vlaanderen mogelijk. De investeringen die daarmee gepaard gaan, liggen wel substantieel hoger dan voor gelijkaardige traditionele toepassingen. De toepassingen van diepe geothermie kunnen in drie grote groepen opgedeeld worden: geothermische doubletten, hybride systemen en elektriciteitsproductie. Geologisch en technisch zijn alle drie toepassingen overal ter wereld en dus ook in Vlaanderen mogelijk.

De economische haalbaarheid dient echter individueel en in detail bekeken te worden. De ontwikkeling van diepe geothermie vergt vooraf grote investeringen. Vooral de kosten voor boringen wegen zwaar door. Bovendien bestaat hierbij steeds het risico op een 'dry well'. Dit is een ondoordringbare laag waardoor het geïnjecteerde water niet in de bodem opgenomen kan worden. Dit risico kan een belangrijke drempel vormen om investeringen in diepe geothermie aan te trekken. Om deze drempel te verlagen kan een regeling of verzekering in het leven geroepen worden om het initiële risico te beperken.

Geothermische doubletten hebben hun technische en economische haalbaarheid al lang bewezen. Ook in Vlaanderen werden in het verleden reeds testen uitgevoerd. Deze bewijzen de technische haalbaarheid. Om de economie van de projecten te verbeteren komt het er vooral op aan de boorkosten en de kosten voor het onderhoud en het lopen van de pompen zo laag mogelijk te houden. De voornaamste drempel voor de ontwikkeling van het potentieel zijn echter de boorrisico's en het ontbreken van garanties tegen boorrisico's of financiële steunmaatregelen zoals een groenwarmtecertificaat voor geothermische energie. (Dreesen & Laenen, 2010)

4.7 Waterkracht

Stromend water dient al sinds de oudheid als krachtbron in watermolens. Klassiek werd de energie rechtstreeks gebruikt als mechanische kracht. Tegenwoordig wordt de bekomen energie omgezet naar elektrische energie.

Water kan op twee manieren energie bevatten, potentiële en kinetische energie. In de fluidummechanica noemt men dit ook wel statische en dynamische druk. Statische druk is het gevolg van een hoogteverschil tussen twee reservoirs, de bekomen druk is evenredig met het hoogteverschil. Dynamische druk ontstaat door de stroming van het water en is kwadratisch evenredig met de snelheid.

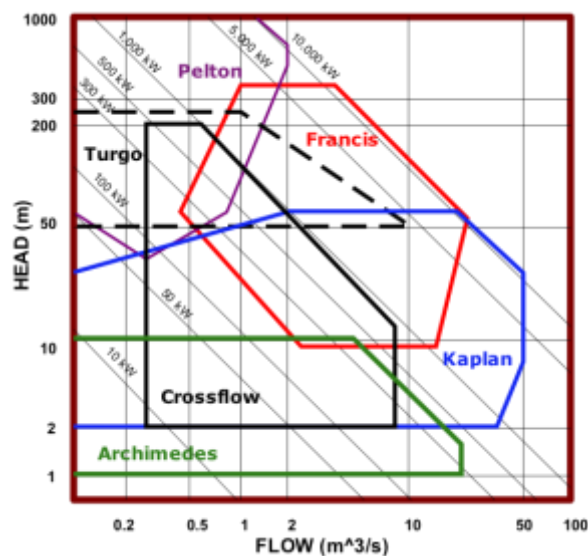
4.7.1 Riviercentrales en stuwdammen

Een riviercentrale sluit het dichtst aan bij de gekende klassieke watermolens. Ze leiden een deel van het rivierwater af door turbines om de stromingsenergie in het water te benutten. Het hoogteverschil is bij riviercentrales niet al te groot. De statische druk is beperkt, alle bekomen energie komt vanuit de kinetische stromingsenergie.

De meeste stuwdammen zijn niet gebouwd met als primair doel elektriciteitsproductie maar wel waterhuishouding. Zo worden stuwdammen geplaatst op rivieren die een risico vormen op overstroming in bewoonde gebieden. Een bekend voorbeeld hiervan is de Aswandam op de Nijl. Bijkomend produceren deze stuwdammen elektriciteit. Bij stuwdammen komt alle energie voort uit het opgebouwde hoogteverschil. Stuwdammen doen het waterniveau stijgen, zo ontstaat er een stuwmeer. Dit stuwmeer zet de directe omgeving van de rivier onder water. Stuwdammen hebben dus een grote invloed op de omgeving. Een goed voorbeeld hiervan is de Drieklovendam in China waarbij hele dorpen onder water kwamen te staan.

4.7.1.1 Toegepaste turbines

Naargelang de druk en het debiet van het beschikbare water verkrijgt een bepaalde turbine de voorkeur. Algemeen zijn er twee werkingsprincipes, actie-turbines of impuls-turbines en reactie-turbines. Impulsturbines zoals pelton-turbines werken met één of meerdere hoge snelheidsstralen. Reactieturbines zijn volledig ondergedompeld in water. De vorm van de schoepen doet een drukverschil ontstaan rond de schoepen, waardoor een koppel en dus een rotatie ontstaat. De werking is gelijkaardig aan deze van vliegtuigvleugels. Op Figuur 27 zijn de werkingsgebieden van verschillende turbines weergegeven. Daarin is duidelijk te zien dat pelton-turbines toepasbaar zijn bij grote hoogteverschillen en kleine debieten. Kaplanturbines daarentegen zijn toepasbaar bij grote debieten maar kleine hoogteverschillen. Riviercentrales zijn dan ook meestal uitgevoerd met kaplanturbines en stuwdammen met peltonturbines.



Figuur 27 Werkingsgebied turbines (GreenBugEnergy, 2020)

4.7.2 Energieopslag met waterkracht

Stuwdammen vormen een energiebuffer. De waterspiegel stijgt in het stuwmeer als er geen elektriciteit wordt geproduceerd, het water wordt opgeslagen voor later gebruik. Deze werkwijze kan worden uitgebreid naar specifiek gebouwde centrales met een hoog en laag waterreservoir, de zogenoemde pompcentrales. Bij overschot aan energie pompt de centrale water naar boven. Bij energietekorten stroomt het omlaag door de turbines. De bekendste pompcentrale in België is Coe-Trois-Ponts. Deze centrale heeft een opslagcapaciteit van 5820kWh en een turbinevermogen van 1164kW. Ze kan dus 5 uren aan vollast draaien alvorens de spaarbekkens leeg zijn. (Global energy Observatory, 2011)

Pompcentrales hebben een rendement van ongeveer 80%. Naast een hoog rendement is het ook een bewezen techniek, de eerste centrales zijn al in de jaren 60 gebouwd. Het grootste nadeel aan deze opslagmethode is de lage energiedichtheid, ongeveer 0.5-3kWh/m³. De reservoirs moeten dus zeer groot zijn om voldoende energie te kunnen opslaan én er moet een voldoende groot hoogteverschil beschikbaar zijn.

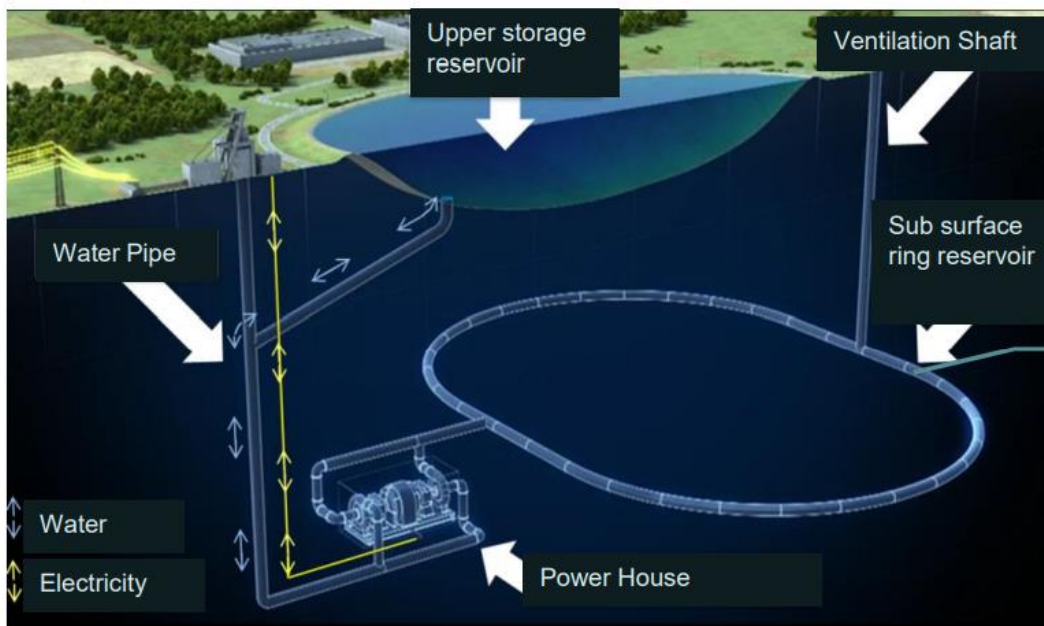
4.7.2.1 Bovengrondse pompcentrales

De pompcentrale van Coo-Trois-Ponts is een bovengrondse centrale. Zowel het hoge als het lage reservoir liggen bovengronds. Om een hoogteverschil te bekomen is één van de twee reservoirs bovenop een heuvel geplaatst. Hierdoor is de toepasbaarheid in België eerder beperkt, aangezien België over weinig hoogteverschillen beschikt. Naast de nood aan een hoogteverschil is de impact op de naaste omgeving enorm, er moeten namelijk twee grote reservoirs worden aangelegd.

4.7.2.2 Ondergrondse pompcentrales

Vanwege de beperkte toepasbaarheid van bovengrondse pompcentrales, kijken de lage landen naar een alternatieve methode: ondergrondse pompcentrales. In essentie is de werking gelijkaardig aan de klassieke bovengrondse centrales, het lage reservoir bevindt zich nu echter diep ondergronds. Het hoge reservoir blijft wel steeds aan de oppervlakte.

De implementatie van deze technologie staat nog in de kinderschoenen. In Europa lopen er enkele projecten die allemaal nog in de conceptfase zitten. De meeste van deze concepten gebruiken verlaten mijnschachten, zoutgrotten of pekelmijnen. De turbines zijn meestal ondergronds geplaatst, wat technische en logistieke hindernissen met zich meebrengt. Zo moet er in sommige gevallen een grote schacht worden voorzien om de turbines te kunnen plaatsen. (Littman & Crotagino, 2019)



Figuur 28 Opbouw ondergrondse pompcentrale (Littman & Crotagino, 2019)

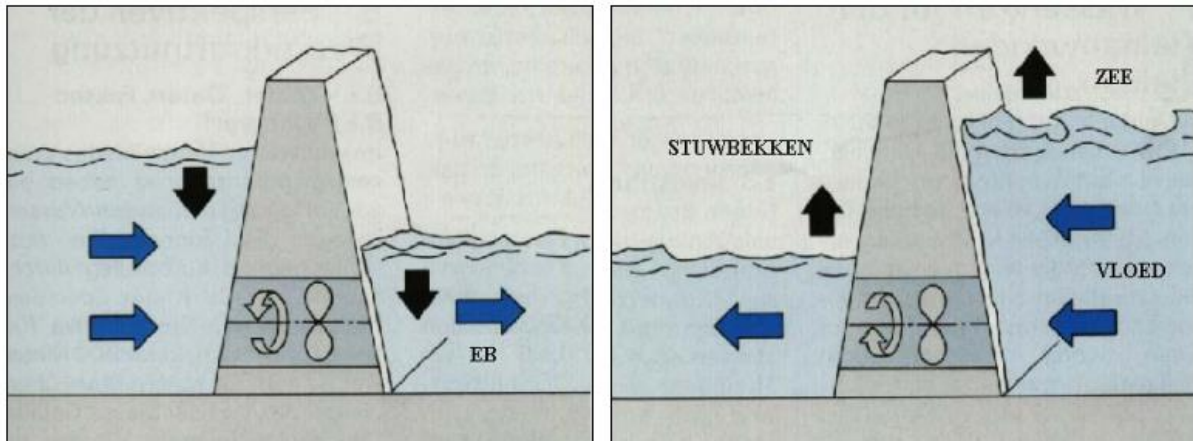
4.7.3 Golfenergie

Golven bezitten kinetische energie. Hoe groter de golven, des te meer energie een golf bevat. Het grootste potentieel bevindt zich dus in oceanen of gebieden met grote golven. Ondanks het grote wereldwijde potentieel zit de ontwikkeling van golfenergie nog in de conceptfase. De technieken zijn zeer duur en staan nog niet op punt. Er zijn nog ontwikkelingen nodig om golfenergie rendabel te benutten.

4.7.4 Getijdenenergie

De maan roteert rond de aarde en doet daarbij getijden ontstaan. Getijden herhalen zich ongeveer elke twaalf uur en zijn perfect te voorspellen. De productie van getijdenenergie is dus perfect voorspelbaar, in tegenstelling tot wind en zonne-energie.

De werking lijkt op de klassieke waterkrachtcentrales in rivieren. Een groot reservoir vult zich als het water bij vloed hoger staat dan het bassin en loopt leeg als het niveau bij eb lager staat dan in het bassin. Er kunnen per reservoir dus twee turbines worden geïnstalleerd, één voor het instromen en één voor het uitstromen. Of één omkeerbare turbine voor beide richtingen.



Figuur 29 Principe getijdenenergie (Doucé, 2002)

4.7.5 Toepasbaarheid in België

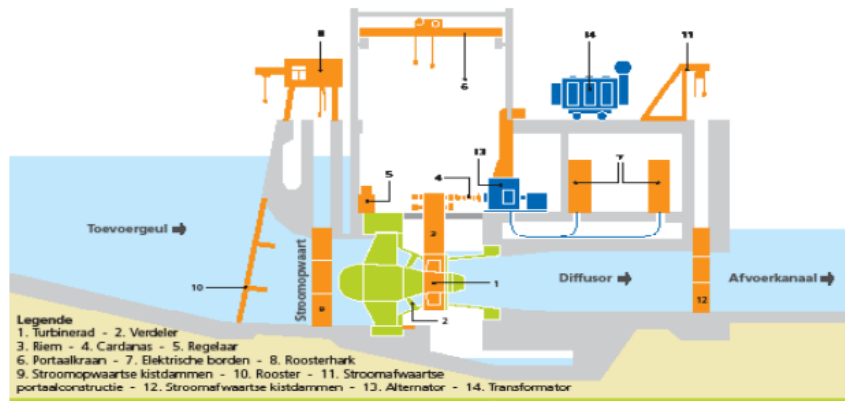
4.7.5.1 Riviercentrale

Riviercentrales zijn toepasbaar in België, echter wel op relatief kleine schaal. De grootte van de turbines hangt af van het beschikbare debiet. Voorbeelden van riviercentrales in België zijn de waterkrachtcentrales van de Vlaamse waterweg langs het Albertkanaal, Watermolen van Rotselaar en de centrale van Grands Malades.

(EDF Luminus, 2014)

(Molen Van Rotselaar, 2020)

(Vlaamse waterweg, 2018)



Grand Malades

Type turbines	Straflo met horizontale as
Aantal turbines	4 waarvan één met richtbare schoepen
Diameter rad	2,60 m
Draaisnelheid	132 t/m
Stroomopwaarts stuwpeil	78,4 m
Stroomafwaarts peil bij laagste waterstand	74,6 m
Valhoogte bij laagste waterstand	3,8 m
Debiet van de installatie	170 m ³ /s
Nominaal vermogen per turbine	1,25 MW
Totaal vermogen per centrale	5 MW
Gemiddeld rendement van een groep	88 %
Gemiddelde jaarlijkse productie	13.000.000 kWh

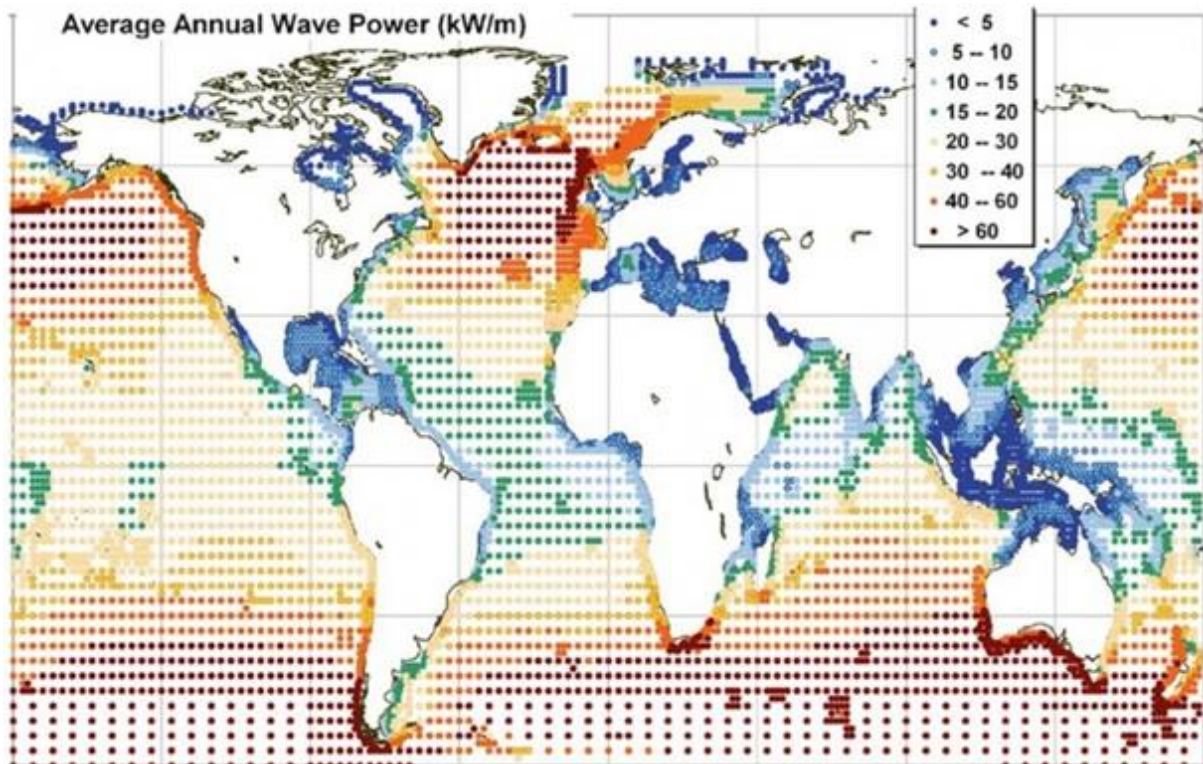
Figuur 30 Technische gegevens Grands Malades (EDF Luminus, 2014)

4.7.5.2 Stuwdam

De toepasbaarheid van stuwdammen voor elektriciteitsproductie is in België eerder beperkt. België beschikt niet over voldoende grote rivieren, hoogteverschillen en ruimte om grote stuwdammen te plaatsen. Het best gekende voorbeeld is het meer van Bütgenbach, waar elektriciteitsleverancier Engie een kleine centrale uitbaat.

4.7.5.3 Golf

Golfenergie staat nog in de kinderschoenen, de weinige installaties die geplaatst zijn dienen als testproject. Op Figuur 31 is het potentieel voor golfenergie te zien. Daaruit blijkt dat het potentieel voor België eerder beperkt is. Aan de oostkust van Schotland en Ierland is het potentieel veel groter.



Figuur 31 Potentieel golfenergie (Young Energy Reviewers Association, 2020)

4.7.5.4 Getijden

Het potentieel voor getijdenenergie in België is net zoals golfenergie beperkt. Het potentieel hangt bij getijdenenergie enorm af van het hoogteverschil tussen eb en vloed. In België is het gemiddeld hoogteverschil tussen eb en vloed 4 meter, wat te weinig is.

4.8 Thermische energieopslag

Opslagssystemen voor thermische energie of ook wel warmte-opslagsystemen kunnen worden ingedeeld naargelang hun opslagtermijn maar ook volgens de gebruikte methode. Allereerst worden de verschillende opslagmethodes besproken, daarna wordt gekeken naar opslagtermijnen.

4.8.1 Voelbare warmteopslag

De meest eenvoudige methode van warmteopslag is de letterlijke opslag van een warm medium. Dit heet voelbare warmteopslag. Deze manier van opslag wordt al lang toegepast in elektrische boilers voor sanitair warm water. Het verbruik van sanitair warm water is zeer geconcentreerd. De warmtevraag is groot tijdens het douchen of vullen van een spoelbak voor de afwas. Over een hele dag bekeken, komen deze momenten maar gedurende een kleine tijd voor. De gemiddelde warmtevraag voor productie van sanitair warm water is veel kleiner dan het piekvermogen. Om met een klein boilervermogen aan het grote piekvermogen te voldoen is er een buffer nodig. Een elektrische boiler is dus steeds voorzien van een tank met warm water.

4.8.1.1 Mogelijke opslagmedia

Verschillende materialen kunnen dienen voor de opslag van warmte. Van de meest gebruikte materialen zijn in Tabel 6 de belangrijkste grootheden weergegeven. Zoals uit de opslagcapaciteit blijkt, kan water het meeste warmte opslaan per graad temperatuursverschil in één m³. Dit verklaart waarom grotendeels water wordt toegepast als opslagmedium. Naast de grote volumetrische-opslagcapaciteit van water is het ook een gebruiksvriendelijk materiaal. Zo geeft water geen problemen rond brandgevaar en is het niet giftig.

	Dichtheid (Kg/m ³)	Warmtecapaciteit (J/kg.K)	Opslagcapaciteit(kJ/m ³ .K)
Zand (droog)	1600	0,8	1,280
Water	1000	4186	4186,000
Olie	900	2000	1800,000
Stenen	2500	750	1875,000
Lucht	1,2	1005	1,206

Tabel 6 Thermodynamische eigenschappen van meest voorkomende warmte-opslagmaterialen (Çengel & Boles, 2006)

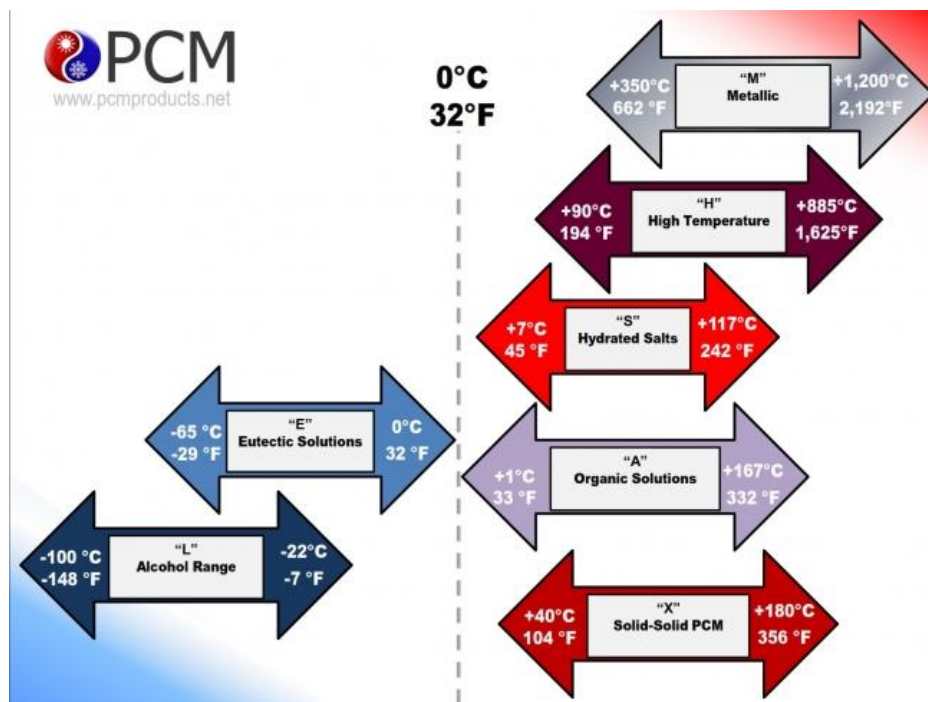
4.8.2 Latente warmteopslag

De tweede methode van warmteopslag maakt gebruik van faseovergangen in materialen. Ieder materiaal heeft een hoeveelheid energie nodig om te smelten, verdampen, condenseren of stollen. Tijdens deze faseovergangen blijft de temperatuur van het materiaal constant. Het opnemen of afgeven van warmte gebeurt zonder dat de temperatuur verandert. De materialen die specifiek voor latente warmteopslag zijn ontworpen krijgen de naam phase change materials of PCM.

4.8.2.1 Mogelijke media

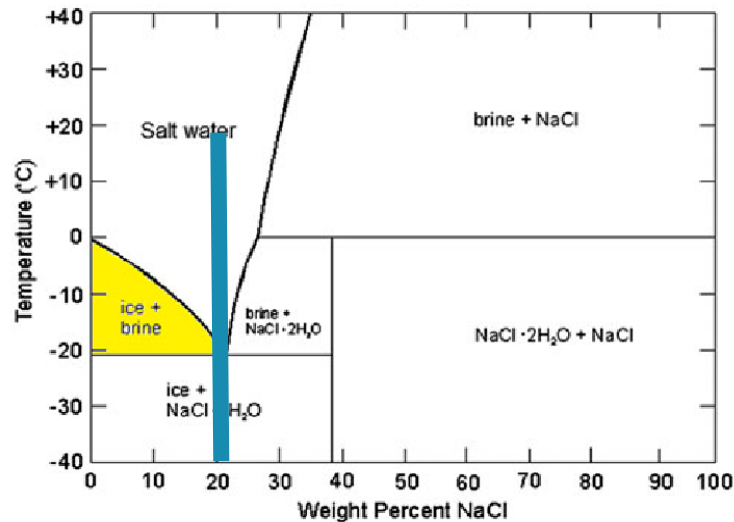
Naargelang het temperatuurbereik bestaan er verschillende soorten PCM. Het gemakkelijkste, goedkoopste en meest voor de hand liggend materiaal is water dat gebruikt wordt op de overgang tussen ijs en water. Het nadeel hierbij is dat de temperatuur 0°C bedraagt waardoor het materiaal voor veel toepassingen is uitgesloten. Figuur 32 geeft een overzicht van verschillende materialen van een fabrikant en hun temperatuurbereik.

(pcmproducts.net, 2020)



Figuur 32 Temperatuurbereik Faseovergangsmaterialen (pcmproducts.net, 2020)

Eutectische materialen zijn een combinatie van twee zuivere materialen die net in de juiste concentraties zijn vermengd zodat ze op hetzelfde moment naar een andere fase overgaan. Bij PCM komen meestal eutectische water-zout oplossingen voor waarbij de overgangstemperatuur onder 0°C ligt. In Figuur 33 geeft de blauwe lijn het eutectisch punt voor klassiek keukenzout en water aan.



Figuur 33 fase-diagram NaCl en Water (Badawy, 2015)

Zouten hebben de mogelijkheid om watermoleculen in hun kristalstructuur op te nemen. Ze worden dan gehydrateerde zouten genoemd. Deze gehydrateerde zouten hebben een smeltpunt boven 0°C. Organische phase change materials zijn meestal wassen. Het temperatuurbereik van deze materialen ligt tussen 1 en 160°C. Het meest gekende voorbeeld van zulk was is paraffine.

Sommige materialen ondergaan een overgang van één vaste toestand naar een andere. Ze worden dan vaste faseovergangsmaterialen genoemd. Aan het materiaal is dus fysisch geen onderscheid te maken tussen de verschillende toestanden. Door de vast-vast overgangen is er geen kans op lekken of contaminatie van PCM. Vaste faseovergangsmaterialen bestaan uit complexe polymeerstructuren. Figuur 34 geeft de faseovergang weer die een vast fase-overgangsmateriaal ondergaat.

(Fallahi, Guldentops, Mingjiang, Granados-Focil, & Van Dessel, 2017)

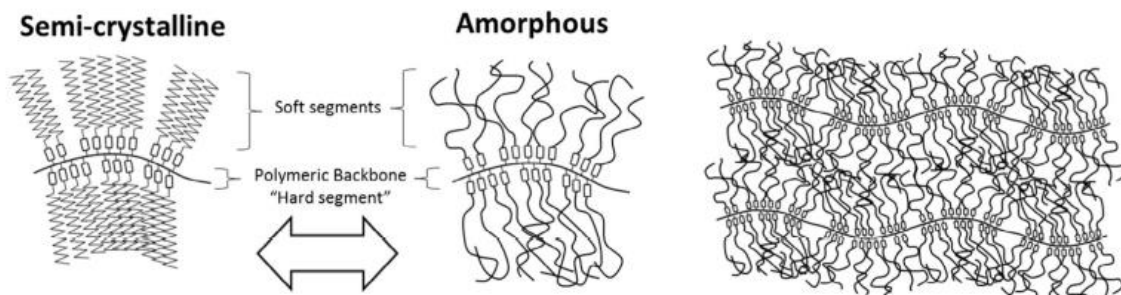


Fig. 4. Schematic representation of Polymeric Graft SS-PCMs and their phase transition.

Figuur 34 Vast fase-overgangsmateriaal (Fallahi, Guldentops, Mingjiang, Granados-Focil, & Van Dessel, 2017)

4.8.2.2 Toepassingsgebieden latente warmteopslag

De toepassing van phase change materials is enorm divers. Zo zijn PCM verwerkt in verpakkingen tot autozetels. Deze thesis beperkt zich tot de verschillende mogelijkheden rond thermische energieopslag.



Figuur 35 Buffervat met PCM (Global-E-Systems, 2020)

Toepassen van PCM in thermische buffervaten zal de capaciteit van de buffers vergroten of dezelfde warmtehoeveelheid doen passen in een kleiner volume. De eenvoudigste methode is het vullen van het buffervat met capsules gevuld met PCM zoals Figuur 35 aangeeft. De capaciteit van het buffervat kan tot een factor 4 vergroten door toepassing van phase change materials.

Naast capsules is het ook mogelijk een vat volledig te vullen met PCM. Deze methode zal de opslagcapaciteit nog meer doen toenemen maar de snelheid waarmee warmte kan gewisseld worden is kleiner. De vaste vorm van het PCM geleidt namelijk moeilijker warmte dan de vloeibare vorm. Door de volledige vulling van het vat is er enkel contact langs een spiraal. Het contactoppervlak tussen de PCM en transportmedium (water) is kleiner en dus ook het warmtevermogen dat kan gewisseld worden is kleiner. (Global-E-Systems, 2020)

Naast het toepassen in buffervaten is ook rechtstreekse verwerking in bouwmaterialen mogelijk. Om het beste comfort te bekomen moet de temperatuur in gebouwen constant blijven, meestal rond de 20°C. Phase change materials kunnen op warme momenten energie opslaan om deze later, op koude momenten weer vrij te geven. Zo blijft de temperatuur in het gebouw meer constant en zal de nood aan koeling en/of verwarming afnemen. Eenzelfde massa PCM kan vele malen meer warmte opnemen dan dezelfde massa beton. Zelfs een kleine fractie PCM in de gebruikte bouwmaterialen zal dus de warmtecapaciteit van het gebouw enorm doen toenemen.

4.8.3 Thermochemische warmteopslag

Een derde methode van warmteopslag ligt in chemische reacties. Thermochemische materialen of TCM ondergaan een omkeerbare chemische reactie waarbij in de ene richting warmte nodig is en bij de andere richting warmte vrijkomt. De reacties zijn in de ene richting endotherm en in de andere exotherm. Warmteopslag door middel van chemische reacties ondervindt weinig warmteverlies. Het rendement van deze opslagmethode is groot. Thermochemische warmteopslag wordt ook wel een warmte-batterij genoemd, naar analogie met chemische opslag van elektrische energie in batterijen.

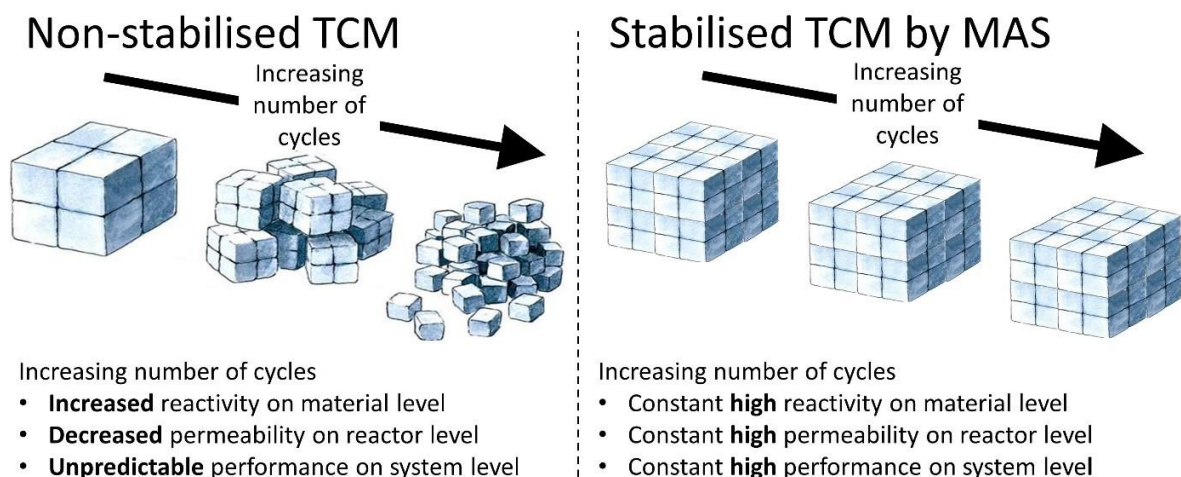
4.8.3.1 Reactiekoppels

De meest voorkomende TCM ondergaan een interactie met water. Deze interactie kan een adsorptie (adsorptiematerialen) of een chemische reactie (reactiematerialen) zijn. Voorbeelden van adsorptiematerialen zijn zeolieten en silicagel. Reactiematerialen zijn bijvoorbeeld zouthydraten zoals $\text{Na}_2\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ en $\text{MgCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.

Door toevoeging van warmte stoot een gehydrateerd zout water af. Het systeem laadt zich op. Eens het water is uitgedreven kan het systeem zijn warmte gedurende een lange periode verliesvrij opslaan, zolang er geen water in contact komt met de TCM. Om warmte te onttrekken aan het systeem moet er waterdamp over de TCM stromen, waarna de opgeslagen warmte weer vrijkomt.

In theorie zijn de chemische reacties onbeperkt herhaalbaar. Tijdens de reactie met water zal het volume van de TCM echter veranderen. Door de vele cycli die het materiaal doorloopt valt de structuur van klassieke materialen uit elkaar zoals Figuur 36 weergeeft. De warmtewisseling met het transportmedium verloopt steeds moeilijker, het systeem wordt onvoorspelbaar. Om thermochemische warmteopslagsystemen toe te passen is er dus nood aan een stabiel TCM.

(Donkers & Adan, 2020).



Figuur 36 Stabilisatie thermochemische materialen (Donkers & Adan, 2020)

4.8.4 Korte termijnsopslag

Korte termijn slaat op het verschil in warmtevraag tussen dag en nacht. Alle technieken komen hiervoor in aanmerking. Het ontwerp van een korte termijnsopslag is fundamenteel verschillend van lange termijnsopslag. Bij korte termijnsopslag is het leverbaar vermogen relatief groot ten opzichte van de capaciteit. Het systeem kan op enkele uren op- en ontladen.

4.8.5 Lange termijnsopslag

Onder lange termijnsopslag vallen de systemen die ontworpen zijn om warmte op te slaan over seizoenen heen. Ze zijn bedoeld om het overschot aan warmte tijdens de zomermaanden op te slaan voor benutting in de wintermaanden. Bij deze lange periodes speelt warmteverlies een grote rol. Indien een systeem 1% warmte verliest gedurende één dag zal er na vijf maanden nog maar 22% van de oorspronkelijke warmte beschikbaar zijn. Het rendement van het systeem is dus voornamelijk afhankelijk van de warmteverliezen.

4.8.5.1 Voelbare en latente warmteopslag

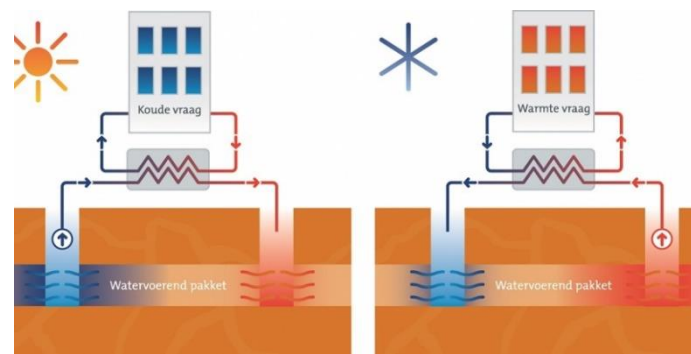
Opslagsystemen voor lange termijnsopslag op basis van voelbare en latente warmteopslag zijn technisch haalbaar maar economisch nog niet rendabel. Dat komt door het warmteverlies dat gepaard gaat met deze vorm van warmteopslag.

Door de lage energiedichtheid van de systemen zijn oplossingen voor individuele gebouwen zo groot dat er fysisch geen plaats is om deze systemen in het gebouw te plaatsen. Gedeelde systemen hebben geen fysieke beperkingen. Ze kunnen zo groot worden gedimensioneerd als nodig. Indien een hele wijk is verbonden aan een warmtenet kan een centrale warmteopslag een oplossing bieden. Een voorbeeld van zulk systeem is het Ecovat. (Ecovat, 2021)

4.8.5.2 Geothermische warmteopslag

Geothermische warmtepompen kunnen warmte en koude warmte opslaan in watervoerende lagen in de grond. Daarbij zijn twee verticale boringen nodig, een koude en een warme boring, zoals te zien op Figuur 37. Gedurende de zomermaanden onttrekt de warmtepomp koude aan de koude put en pompt ze warmte in de warme put. Tijdens de wintermaanden keert het proces om en onttrekt de warmtepomp warmte aan de warme put en stuurt koude naar de koude put.

Het opgewarmde en gekoelde grondwater mogen niet met elkaar in contact komen. De twee putten moeten daarom voldoende ver uit elkaar geplaatst zijn. De exacte afstand hangt af van de stromingssnelheid van het grondwater en de samenstelling van de bodem.

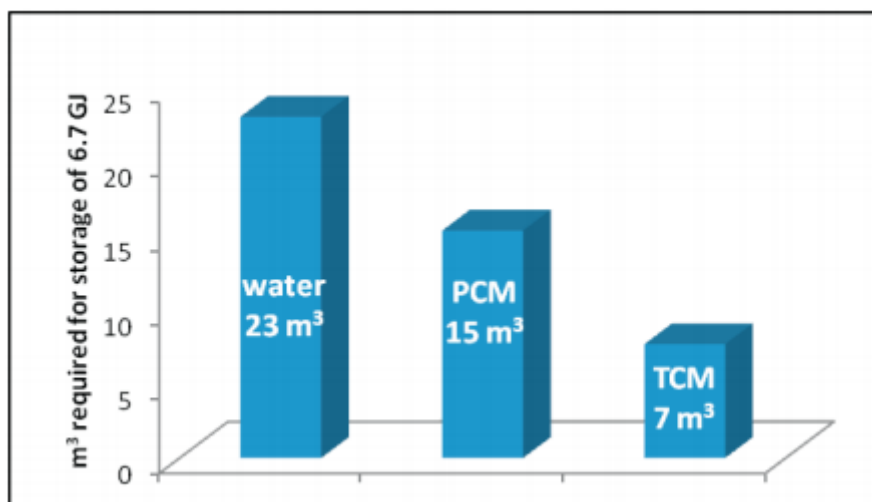


Figuur 37 Geothermische warmteopslag (Gebo, 2020)

4.8.5.3 Thermochemische warmteopslag

Thermochemische warmteopslag slaat warmte op in een chemische reactie. De materialen verliezen geen reactiviteit bij langdurig opslaan. Er treden dus geen warmteverliezen op tijdens het opslaan, ongeacht hoelang de warmte opgeslagen blijft. Bij het opladen van het systeem zullen de TCM ook opwarmen. Er treedt dus een verlies van warmte op dat net zo groot is als de opgenomen voelbare warmte in de TCM. Bij ontladen komt hetzelfde fenomeen voor. Het rendement van thermochemische energieopslag ligt daardoor rond de 90% en is identiek voor korte lange of termijnopslag. (van Egmond, van Petersen, & Loonen, 2020)

De energiedichtheid van thermochemische opslagsystemen kan tot 3GJ/m³ bedragen. Deze waarde wordt enkel behaald in ideale omstandigheden, praktische waarden liggen een stuk lager. Voor voelbare warmteopslag met water ligt de energiedichtheid rond de 0.25GJ/m³. Chemische warmteopslagsystemen kunnen dus tot 12 keer kleiner worden gedimensioneerd voor dezelfde capaciteit. De technologie bezit een groot potentieel om lange-termijn warmteopslag toepasbaar te maken in individuele gebouwen. (Trausel, de Jong, & Cuyper, 2014)



Figuur 38. Een indicatie naar het benodigde volume voor de opslag van 6.7GJ/jaar thermische energie. (Trausel, de Jong, & Cuyper, 2014)

4.8.6 Toepasbaarheid in België

Thermische energieopslag is in elk opzicht toepasbaar in België aangezien de technologie geen geografische of klimatologische eisen stelt. De technologie is eender waar toepasbaar, de implementatie zal wel verschillen voor ieder klimaat. Zo is isolatie in een koud klimaat belangrijker dan in een warm klimaat. Het rendement van eenzelfde systeem is in koudere klimaten dus kleiner. De toepassing van faseovergangsmaterialen is veelbelovend en geraakt stapsgewijs ingeburgerd maar zoals met alle technieken is er steeds ruimte voor innovatie en verbetering. Thermochemische warmteopslag daarentegen is nog niet praktisch toepasbaar. De nodige systemen en materialen zijn volop in onderzoek. Wel is thermochemische energieopslag veelbelovend omdat het de mogelijkheid biedt om warmte voor lange tijden op te slaan zonder rendementsverlies.

4.9 Elektrische energieopslag

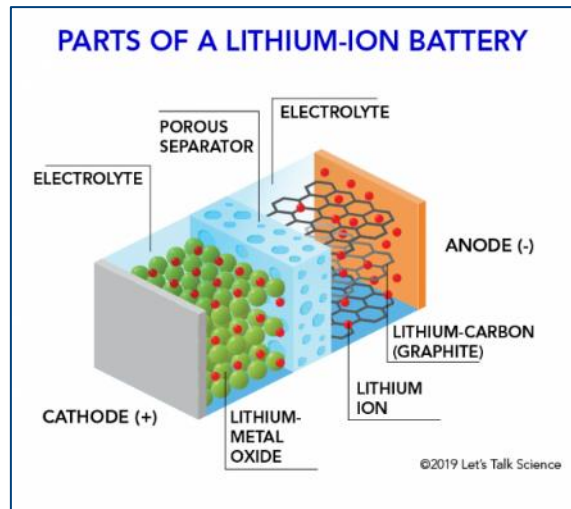
De opkomst van hernieuwbare energiebronnen zoals zonnepanelen en windturbines zorgen voor een verandering van het netgebruik. De onvoorspelbaarheid en gelijktijdigheid van hernieuwbare energieproductie zorgt voor een grotere, maar ook meer gelijktijdige piekbelasting. Door gebruik te maken van elektrochemische batterijen kan een groot deel van deze overproductie worden opgevangen. Hierdoor kan men dan de opgeslagen energie op een later tijdstip hergebruiken.

4.9.1 Batterijen

De elektrochemische batterijen kunnen opgedeeld worden in lagetemperatuurbatterijen, hogetemperatuurbatterijen en flowbatterijen. Lagetemperatuurbatterijen werken op lage temperatuurniveaus zoals bijvoorbeeld -20 tot +50°C voor loodzuur. Deze batterijtypes hebben vaak extra koeling nodig om ervoor te zorgen dat de batterijen niet te warm worden en hun optimaal werkingpunt zouden verliezen of zelfs schade zouden ondervinden (risico op brand). Hogetemperatuurbatterijen daarentegen werken op hoge temperaturen zoals bijvoorbeeld Natrium-Zwavelbatterijen die tussen 300 en 350°C werken. Deze batterijen vereisen dus bijkomende verwarming om ervoor te zorgen dat de batterijen op hun optimale werkingpunt komen. Flowbatterijen zijn elementair verschillend van klassieke batterijen. Flowbatterijen werken met verpompbare media. Hier volgt een klein overzicht van de bestaande batterijen en hun eigenschappen. (Evens, 2019)

4.9.1.1 Lithium-ion

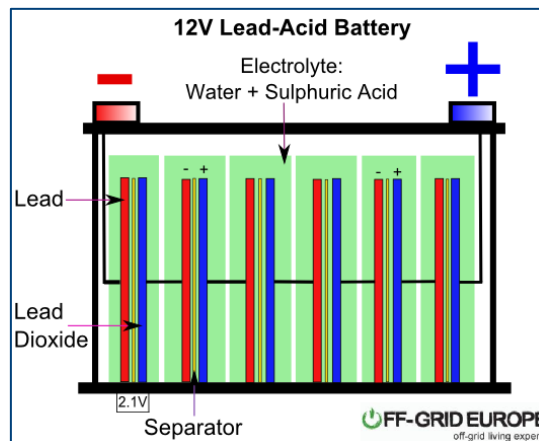
Lithium-ion is een recente batterijtechniek die bestaat uit twee elektroden. De positieve elektrode bestaat uit een lithiiummetaaloxide en de negatieve elektrode is opgebouwd uit koolstofmaterialen. Tussen deze twee elektroden is een elektrolyt aanwezig. Dit type batterij bevat niet één enkele samenstelling van materialen, maar meerdere combinaties zijn mogelijk zoals LiCO₂, LiNCA, LiNMC, LiFePO₄, LiMn₂O₄, ... Dit type batterij heeft meer dan 50% van de smartphonemarkt in handen en ook grootschalige installaties zijn vaak met dit type batterij uit gevoerd.



Figuur 39 Lithium-ion batterij (Insideevs, 2019)

4.9.1.2 Loodzuur

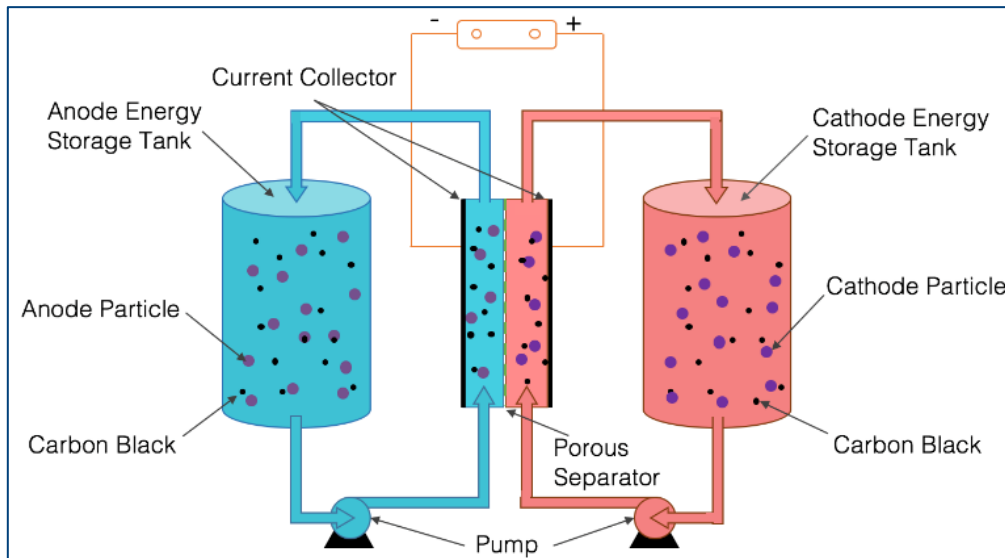
Loodzuurbatterijen bestaan uit een positieve elektrode (PbO_2) en een negatieve elektrode (Pb) die ondergedompeld zijn in een elektrolyt dat deelneemt aan de chemische reactie. Doordat loodzuurbatterijen een lage energiedensiteit hebben, zijn een groot aantal batterijen en dus groot volume nodig om een relevante hoeveelheid energie op te slaan. Hun lage kostprijs compenseert dit nadeel. Dit maakt(e) van loodzuurbatterijen dan ook een veelgebruikte opslagtechniek. Natuurlijk is er dan wel een grote ruimte nodig om deze batterijen te kunnen plaatsen. Deze techniek is de afgelopen jaren voorbijgestoken door Lithium-ion, maar wordt toch nog steeds gebruikt. (Evens, 2019)



Figuur 40 Lood batterij (ICF Storage PCE Board Meeting Presentation, 2019)

4.9.1.3 Flowbatterijen

Flowbatterijen bestaan uit een positief en negatief geladen vloeibaar elektrolyt gescheiden door een membraan. Een pomp brengt de elektrolyten in beweging. Het grote voordeel van dit type batterij is dat energie en vermogen onafhankelijk zijn van elkaar. Het juiste vermogen wordt verkregen via de dimensionering van het membraan en de pompen, terwijl de inhoud van de vloeistofvaten de energie bepaalt. (Evens, 2019)



Figuur 41 Flowbattery (Jr., 2017)

4.9.1.4 Hogetemperatuurbatterijen (NaS & NaNiCl)

Dit batterijtype omvat verschillende mogelijke uitvoeringen, maar Natrium-Zwavel en NatriumNikkel-Chloride zijn de meest voorkomende types. Doordat beide batterijen gelijkaardige eigenschappen en toekomstverwachtingen hebben, worden ze gemeenschappelijk beschouwd. Deze batterijen gebruiken twee elektroden die verwarmd moeten worden om gesmolten te blijven. Dit vereist de nodige verwarmingselementen en brengt bijbehorende operationele kosten met zich mee. (Evens, 2019)

Eigenschappen	Lithium-ion	Loodzuur	Flowbatterijen	NaS	NaNiCl
Werkings temperatuur	-20 tot +60°C	-20 tot +50°C	+15 tot +55°C	300 – 350°C	270 – 350°C
Energiedensiteit	120 – 180Wh/kg	25 – 35Wh/kg	10 – 25Wh/liter	100 – 120Wh/kg	100 – 120Wh/kg
aantal cycli	2000 – 10 000	500 – 3000	> 12 000	2000 tot 5000	4500
Levensduur	15– 20 jaar	5 – 15 jaar	10 – 20 jaar	tot 15 jaren	tot 15 jaren
Efficiëntie	90 – 98%	75 – 85%	70 – 75%	75 – 85%	85 – 95%
Prijs per W	150 – 1000€/kW	100 – 500€/kW	500 – 1300€/kW	3000 – 4000€/kW	150 – 1000€/kW
Prijs per kWh	700 – 1300€/kWh	100 – 200€/kWh	100 – 400€/kWh	400 – 600€/kWh	550 – 750€/kWh
Max. ontlading	80 – 100%	70%	100%	100%	100%
Zelfontlading	Laag	Gemiddeld	x	x	x
Recyclebaar	50%	55%	x	99%	x

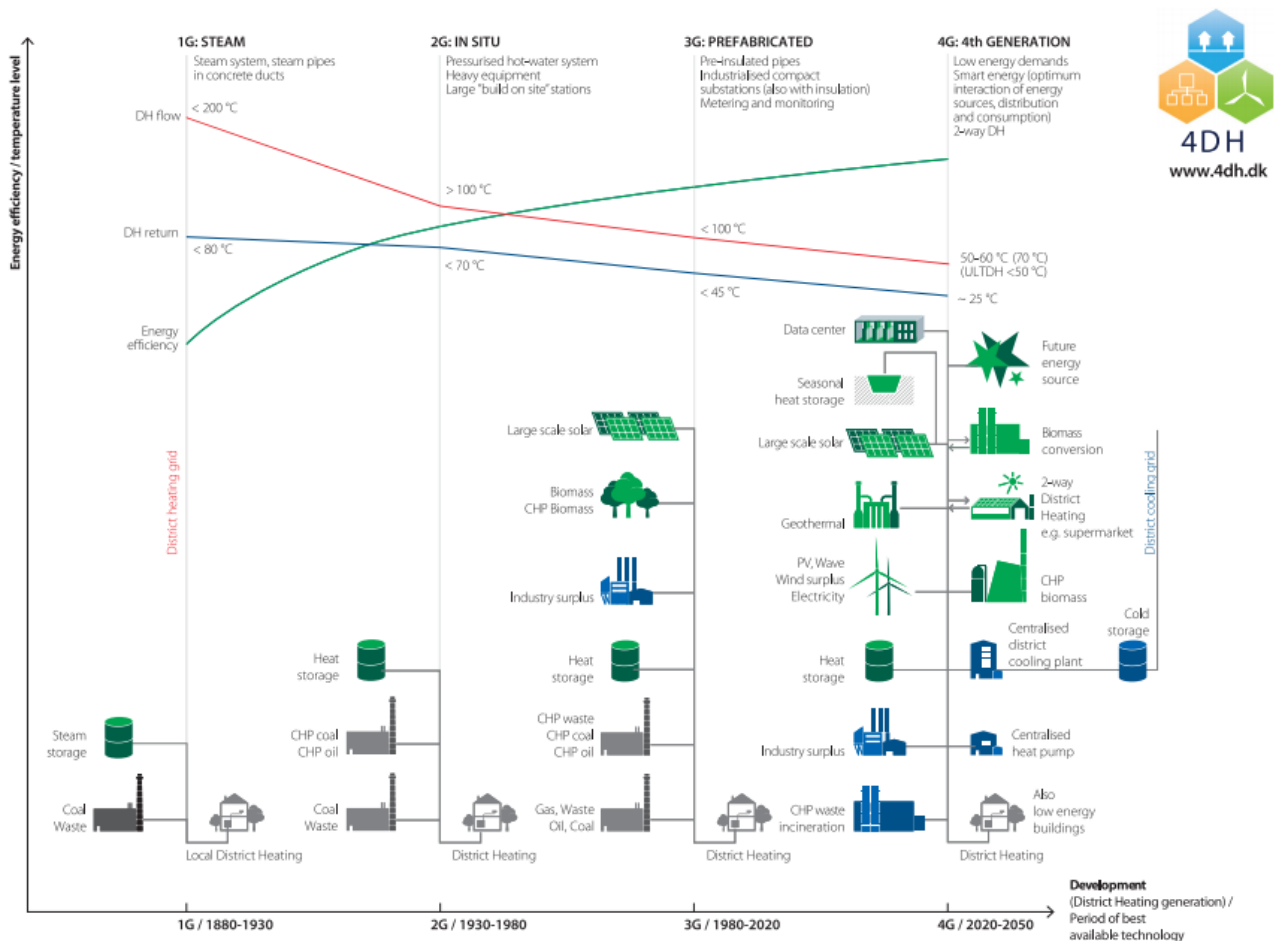
Tabel 7 Overzicht eigenschappen (Evens, 2019)

4.10 Warmtenetten

Stadsverwarming, district-heating of warmtenetten zijn geen hernieuwbare technologie op zich. Enkel en alleen het uitrollen van warmtenetten helpt dus niet om de klimaatdoelstellingen te behalen. De aanwezigheid van warmtenetten laat wel toe om hernieuwbare warmtebronnen te benutten die enkel op grote schaal rendabel zijn. Een goed voorbeeld hiervan is diepe geothermie.

4.10.1 Evolutie warmtenetten

Stadsverwarming bestaat al sinds de 19^{de} eeuw maar heeft een grote evolutie doorlopen sinds het ontstaan, zoals te zien in Figuur 42. De eerste warmtenetten gebruikten oververhitte stoom tot 200°C als transportmedium. De recentste generatie warmtenetten gebruikt water van maximaal 70°C. Doorheen de generaties is het rendement stelselmatig toegenomen. Dit is het gevolg van de lagere transporttemperaturen en toepassing van isolatie, waardoor de warmteverliezen afnamen. Deze lage temperaturen laten ook toe om meer warmtebronnen van lagere kwaliteit te benutten, bijvoorbeeld industriële restwarmte, koeling van datacenters of geothermische warmte.



Figuur 42 Evolutie warmtenetten (Lund, et al., 2018)

Naast een lagere voedingstemperatuur neemt ook de retourtemperatuur stelselmatig af. De retourtemperatuur wordt zo gekozen om voldoende warmte te kunnen transporteren met een aanvaardbaar waterdebiet. Het warmtevermogen \dot{Q} hangt af van het temperatuursverschil en massadebiet volgens volgend verband: $\dot{Q} = \dot{m} * C * \Delta T$. Uit deze formule is afleidbaar dat met een groter temperatuurverschil meer warmte wordt getransporteerd voor hetzelfde waterdebiet.

Lagere voedingstemperaturen brengen ook moeilijkheden met zich mee. Zo moeten alle aangesloten verbruikers met de lagere temperaturen verwarmd worden. Voor moderne verwarmingssystemen zoals vloerverwarming is dit geen probleem, deze systemen werken op maximaal 45°C. (WTCTB, 2016)

He is mogelijk gebouwen rechtstreeks aan te sluiten op een warmtenet. Oudere gebouwen die gebruikmaken van een centrale verwarming met radiatoren werken meestal op temperaturen van 90-70°C. Voor deze gebouwen is een rechtstreekse aansluiting niet mogelijk. Bij hun is er nood aan een boosterwarmtepomp die de warmte van het warmtenet opvoert tot de nodige temperatuur voor de centrale verwarming.

4.10.2 Mogelijke uitvoeringen

Warmtenetten kunnen op verschillende manieren worden uitgevoerd. Naast de aanlevering van energie voor ruimteverwarming is er ook de mogelijkheid om koude te voorzien tijdens de warme zomermaanden. Daarvoor is een aparte leiding nodig aangezien tijdens de zomermaanden ook warmte nodig is voor SWW. De kost van een warmtenet is evenredig met het aantal leidingen. Wanneer er een aparte koude voorziening geïnstalleerd is zal het warmtenet duurder zijn.

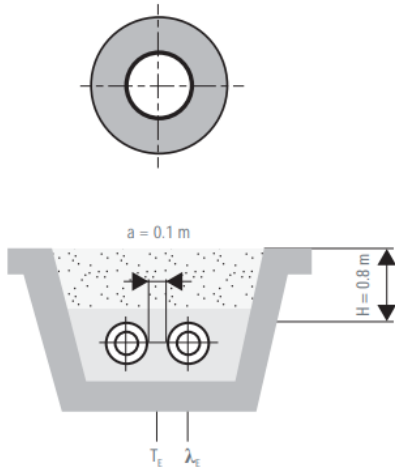
4.10.3 Onderdelen warmtenet

De opbouw van een warmtenet bestaat uit verschillende onderdelen met elk hun eigen functie. Verder volgt een korte beschrijving van elke component.

4.10.3.1 Leidingsysteem

De keuze van een correct leidingsysteem is uitermate belangrijk. De leiding bepaalt het warmtevermogen dat kan worden getransporteerd, de investeringskosten en het warmteverlies. Na een analyse van de warmtevraag en het warmteaanbod ligt vast hoeveel energie door de leidingen moet stromen op een bepaalde locatie. Met deze warmtestromen en de toegelaten drukverliezen kan er een leiding worden gekozen.

Na bepaling van de doorsnede van de leiding aan de hand van het debiet en drukverliezen kan er worden gekeken naar het warmteverlies dat in de leiding optreedt. Tabel 8 geeft een indicatie van de te verwachten energieverliezen in leidingen.



CALPEX / CALPEX PUR-KING UNO

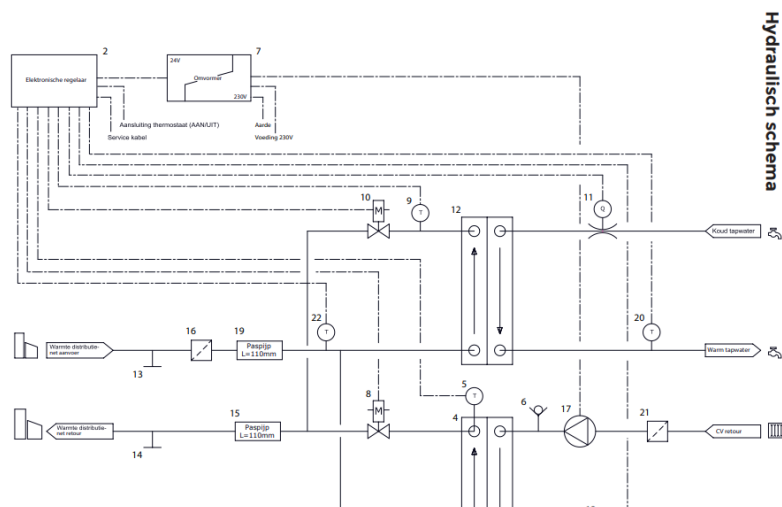
Heat losses q [W/m] for one UNO pipe

CALPEX UNO	U-value [W/mK]	Average operating temperature T_B [°C]				
		40°	50°	60°	70°	80°
25/ 76*	0.1050	3.15	4.20	5.25	6.30	7.35
25/ 91 PLUS*	0.0910	2.73	3.64	4.55	5.46	6.37
32/ 76*	0.1320	3.96	5.28	6.60	7.92	9.24
32/ 91 PLUS*	0.1110	3.33	4.44	5.55	6.66	7.77
40/ 91*	0.1380	4.14	5.52	6.90	8.28	9.66
40/111 PLUS*	0.1140	3.42	4.56	5.70	6.84	7.98
50/111*	0.1420	4.26	5.68	7.10	8.52	9.94
50/126 PLUS*	0.1260	3.78	5.04	6.30	7.56	8.82
63/126*	0.1620	4.86	6.48	8.10	9.72	11.34
63/142 PLUS*	0.1420	4.62	5.68	7.10	8.52	9.94
75/142*	0.1750	5.25	7.00	8.75	10.50	12.25
75/162 PLUS	0.1616	4.85	6.46	8.08	9.70	11.31
90/162	0.2057	6.17	8.23	10.29	12.34	14.40
90/182 PLUS	0.1747	5.24	6.99	8.74	10.48	12.23
110/162	0.2957	8.87	11.83	14.79	17.74	20.70
110/182	0.2355	7.07	9.42	11.78	14.13	16.49
110/202 PLUS	0.1992	5.98	7.97	9.96	11.95	13.94
125/182	0.3026	9.08	12.10	15.13	18.16	21.18
125/202 PLUS	0.2771	8.31	11.08	13.86	16.63	19.40

Tabel 8 Warmteverliezen CALPEX PUR-KING UNO (Brugg-pipes)

4.10.3.2 Afgiftesysteem

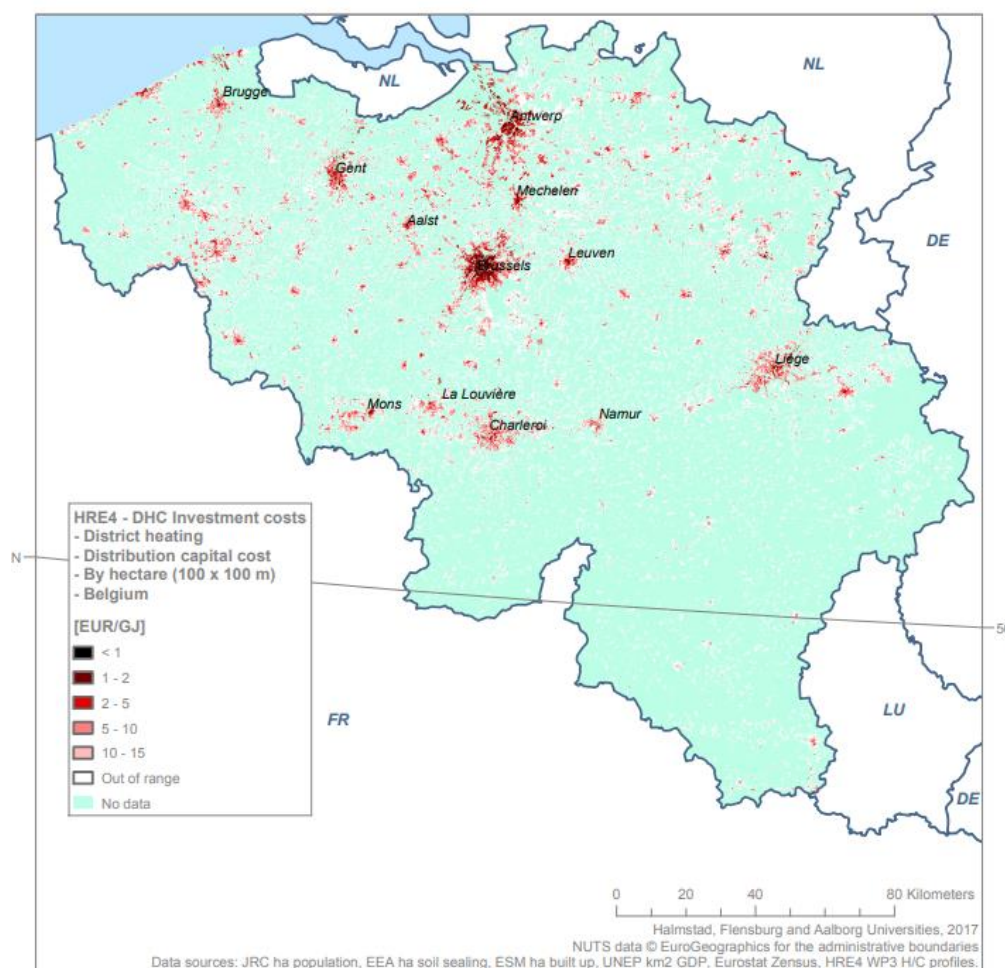
Om de getransporteerde warmte af te leveren aan gebouwen of verbruikers is er een afleverset nodig. Deze sets worden naast warmtedistributienetten ook toegepast in appartementsblokken met één centrale verwarmingsinstallatie (DHC Holland, 2014). Afgiftesystemen zijn voor iedere uitvoering van een warmtenet verschillend. Zo kunnen de afleversets voorzien zijn van een scheiding tussen de vloeistoffen in het warmtenet en het gebouw. Een aparte voorziening voor de productie van sanitair warm water en ruimteverwarming. De mogelijkheid tot koeling in warme maanden. En een uitvoering met boosterwarmtepomp voor de opvoering van de temperatuur. Figuur 43 toont het hydraulisch schema van een *HSF EcoAdvance Split*. Deze set is uitgevoerd met een gescheiden productie van sanitair warm water en ruimteverwarming. De uitgangen zijn gescheiden van de inkomende vloeistof door een warmtewisselaar.



Figuur 43 Hydraulisch schema afleverset (HSF, 2020)

4.10.4 Toepasbaarheid in België

In België zijn warmtenetten niet overal haalbaar. Plaatsen met een lage energiedichtheid vragen een relatief groot net om de nodige energie te leveren. De warmteverliezen en investeringskosten zijn daarbij te groot om een rendabele uitbating te bekomen. Figuur 44 toont een kaart met de investeringskosten voor de plaatsing van een warmtenet in België. Daaruit is duidelijk af te leiden dat de uitrol van warmtenetten in stedelijke gebieden, met een grote energiedichtheid vele malen goedkoper is dan de uitrol op het platte land. De prioriteit naar plaatsing van stadsverwarming ligt, zoals de naam al zegt vooral in stedelijke gebieden. Voor de Kempen betekent dit concreet dat: Turnhout, Herentals, Geel en Mol het grootste potentieel voor warmtenetten bezitten.



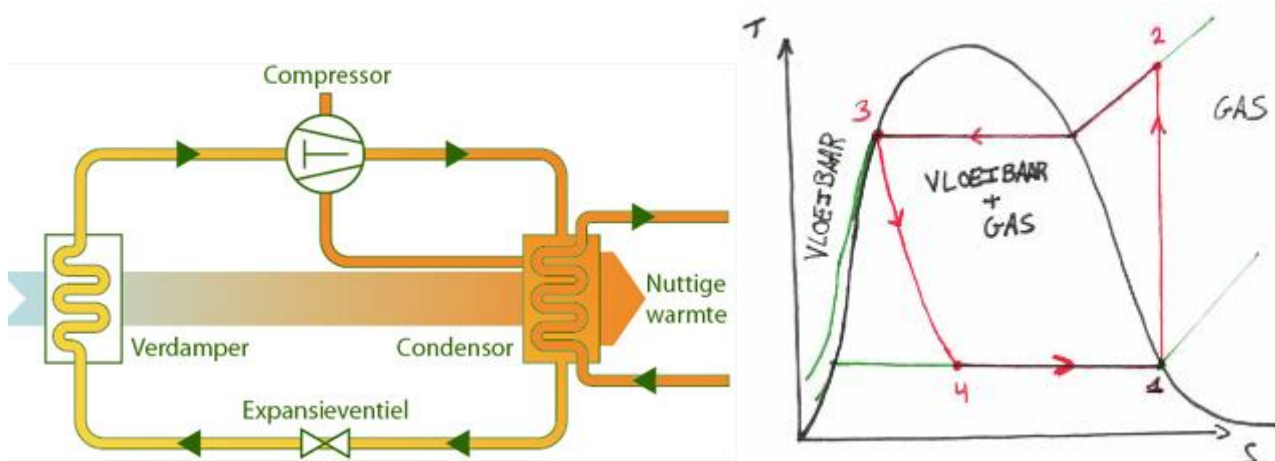
Figuur 44 Verdeling investeringskosten warmtenet (Heat Roadmap Europe, 2017)

4.11 Warmtepompen

Warmtepompen hebben als doel de warmtestroom om te keren, van lage naar hoge temperaturen. Uit zichzelf stroomt warmte altijd van hoge naar lage temperatuur. Een kop warme thee koelt af maar warmt uit zichzelf niet opnieuw op. Er bestaan vele technieken om deze omgekeerde warmtestroom te bekomen, wij bespreken hier kort de mechanische warmtepompen omdat deze nog steeds het meest voorkomen.

4.11.1 Thermodynamische werking

Het koudemiddel doorloopt continu elke fase in het thermodynamisch kringproces. Om de werking van het proces te kunnen verklaren, is het proces van een deeltje doorheen het hele systeem verklaard. Het is belangrijk om te begrijpen dat elke stap in het proces continu wordt doorlopen. Het kringproces van een warmtepomp laat zich in vier stappen indelen: compressie door de compressor, daarna condensatie door de condensor, vervolgens expansie en ten slotte verdamping van het medium.



Figuur 45 Schema werking warmtepomp (Buldit BV, 2020)

De thermodynamische cyclus en schematische opbouw is weergegeven in Figuur 45. De cyclus start voor de compressor in punt 1. Op dat moment is het koelmiddel volledig verdampt en bevindt het zich op lage druk. De compressor brengt het middel onder een hoge druk en levert het gas aan de condensor. Voor de condensor bevindt het gas zich in punt 2, het is dan gecomprimeerd tot een hoge druk en heeft een hoge temperatuur. Doorheen de condensor zal het gas condenseren, het geeft daarbij nuttige warmte af aan water of lucht. Na de condensatie komt het gas tot punt 3, net voor het expansieventiel. Het expansieventiel doet het gas expanderen tot de lage druk, zonder toevoeging van externe warmte. Hierdoor zal al een deel van het koudemiddel verdampen. Na de expansie stroomt het gas/vloeistof mengsel door de verdamper waarbij het volledig verdampt. Hierbij onttrekt het warmte aan de omgeving.

4.11.1.1 Energetisch rendement

Zoals eerder vermeld kan warmte enkel van lage naar hoge temperatuur stromen door toevoeging van externe energie. In het geval van een mechanische warmtepomp is dit mechanische compressie-energie. Deze mechanische energie komt van eender welke krachtbron. Kleine tot middelgrote systemen passen meestal een elektromotor toe.

Het rendement van een warmtepomp wordt uitgedrukt in COP of coefficient of performance. Deze waarde drukt uit hoeveel warmte er nuttig wordt geleverd voor een hoeveelheid toegevoegde arbeid.

$$COP = \frac{Q_{nuttig}}{W_{compressor}}$$

Een warmtepomp laat zich op twee manieren inzetten, voor verwarming of voor koeling. Bij beide werkingsmodi is er een COP te bepalen.

$$COP_K = \frac{Q_{verdamper}}{W_{compressor}} \quad COP_H = \frac{Q_{condensor}}{W_{compressor}}$$

Tussen de COP's voor koeling en verwarming geldt een verband aangezien de warmte opgenomen in de verdamper en de toegevoegde arbeid allebei moet worden afgegeven in de condensor. De COP voor verwarming is altijd 1 eenheid groter dan deze voor koeling van dezelfde machine.

$$COP_H = \frac{Q_{condensor}}{W_{compressor}} = \frac{Q_{verdamper} + W_{compressor}}{W_{compressor}} = 1 + \frac{Q_{verdamper}}{W_{compressor}} = 1 + COP_K$$

4.11.2 Verschillende types

De indeling van mechanische warmtepompen is afhankelijk van warmtebron en het afgiftemedium. Verder volgt een korte beschrijving van de meest toegepaste systemen.

4.11.2.1 Lucht – Lucht

Dit type warmtepomp onttrekt warmte aan de buitenlucht en geeft deze af aan de binnenlucht. Dit systeem is omkeerbaar om tijdens de zomermaanden te koelen. Het is een decentraal verwarmingssysteem, in elke ruimte hangt een binnen-unit en buiten één gezamenlijke buitenunit.

Een warmtewisselaar (verdampers) onttrekt de warmte aan de buitenlucht. Hiervoor is meestal een ventilator nodig. Door toepassing van een ventilator zal er tijdens werking van de warmtepomp geluid ontstaan. Dit is mogelijk hinderlijk en dus moet de installateur hier tijdens plaatsing rekening mee houden.

4.11.2.2 Lucht – Water

Dit type geeft de onttrokken warmte af aan water dat op zijn beurt door radiatoren of vloerverwarming stroomt. Het is dus een mogelijke vervanging voor de klassieke verwarmingsketel. Een Lucht-Water warmtepomp leent zich echter niet zomaar tot een directe vervanging, aangezien de bekomen temperatuur door een warmtepomp ($T_{\max}=65^{\circ}\text{C}$) lager is dan deze van een klassieke gas of mazoutketel ($T_{\max}=90^{\circ}\text{C}$). Als referentie zijn de productgegevens van een Daikin Altherma warmtepomp gebruikt. Het plaatsen van een Lucht-Water warmtepomp op een bestaand vloerverwarmingssysteem is wel mogelijk omdat de maximale temperaturen bij vloerverwarming rond de 40°C liggen. Deze temperaturen komen overeen met de haalbare temperatuur van een warmtepomp. (WTGB, 2016) (Daikin, 2015)

4.11.2.3 Bodem – Water

Geothermische warmtepompen halen warmte uit de bodem. Ze worden dikwijls toegepast bij nieuwbouwwoningen omdat het dan mogelijk is het ondergronds captatienet onder het gebouw te voorzien. Er bestaan twee mogelijke captatienetten, een verticale boring of een horizontaal net. De horizontale netten liggen tot enkele meters onder de grond waardoor ze nog een invloed ondervinden van de omgevingstemperatuur. Verticale boringen ondervinden weinig tot geen invloed van de omgeving. Bijkomend bieden ze ook de mogelijkheid tot seizoensopslag van warmte indien twee aparte boringen voorzien zijn, zoals aangehaald in paragraaf 4.8.5.2. De hydraulische circuits in de captatienetten kunnen niet zomaar elke vloeistof gebruiken. Er moet namelijk te alle tijden worden vermeden dat de netten dichtvriezen. Hierdoor is het niet mogelijk zuiver water toe te passen, er is een glycol oplossing nodig.

4.11.2.4 Warmtepompboiler

In essentie vallen warmtepompboilers onder de categorie Lucht – Water, maar aangezien de aflevertemperatuur hoger ligt, vallen ze onder een aparte categorie. Het hoofddoel van een warmtepompboiler is de productie van sanitair warm water. Ze bieden een rechtstreekse vervanging van de klassieke elektrische boiler. Meestal gebruiken ze binnenlucht of ventilatielucht als warmtebron maar indien de boiler aan de buitenkant van het gebouw is geplaatst kan dit ook buitenlucht zijn.

4.11.3 Toepasbaarheid in België

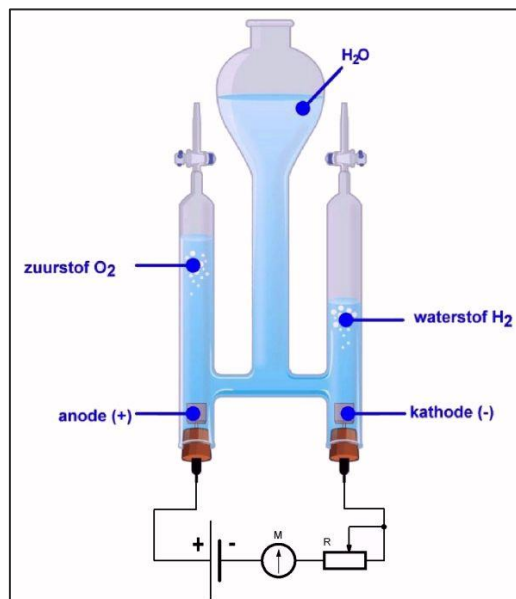
Warmtepompen stellen geen geografische of klimatologische eisen. Ze zijn dus vanzelfsprekend toepasbaar in België. In een gematigd klimaat zoals dat van België worden warmtepompen het best omkeerbaar uitgevoerd zodanig dat het systeem zowel kan koelen als verwarmen wanneer nodig. De toepasbaarheid in België wordt door de cijfers van CBS alleen maar bevestigd. In 2019 zijn er net geen 170000 nieuwe warmtepompen geïnstalleerd. Dat brengt het totaal aantal geïnstalleerde warmtepompen op 730000, goed voor een vermogen van net geen 6400MW. Samen hebben deze warmtepompen al 232miljoen ton CO_2 uitstoot vermeden. (CBS, 2020)

4.12 Waterstof

H₂, ook wel waterstofgas genoemd, komt slechts in zeer lage concentraties (0,5 ppm) in de aardatmosfeer voor. Het is bij normale druk en temperatuur een kleurloos, reukloos, smaakloos en uiterst brandbaar gas. Wegens zijn uiterst lage dichtheid ontsnapt het langzaam maar zeker naar de ruimte. Net zoals elektriciteit kan het opgewekt worden uit verschillende energiebronnen (fossiel, nucleair en hernieuwbaar) waardoor het flexibel is en transporteerbaar naar de plaats waar deze energie nuttig gebruikt kan worden. Dat maakt waterstof aantrekkelijk want net zoals bij elektriciteit, kunnen we ons minder afhankelijk maken van de import en het gebruik van eindige fossiele brandstoffen. Er is de mogelijkheid om de uitstoot aan broeikasgassen te reduceren door gebruik te maken van waterstof via kernenergie en hernieuwbare energie (biobrandstoffen, off shore wind, ...).

4.12.1 Productie van waterstof

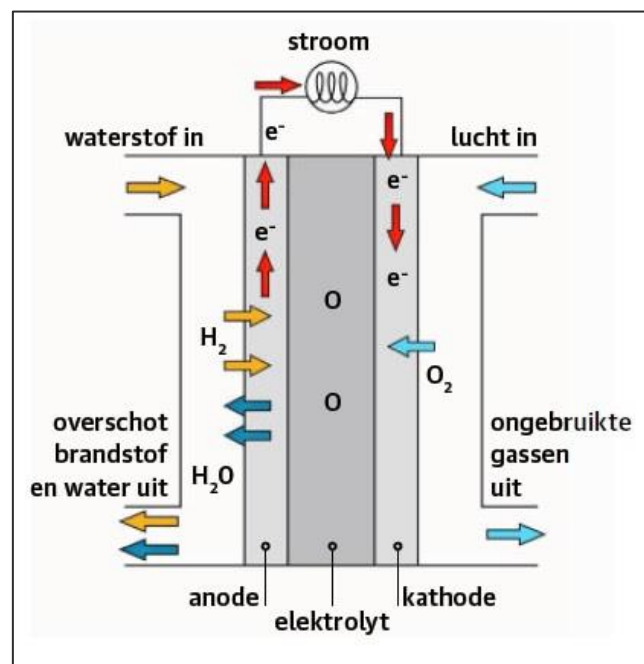
Om waterstof te gebruiken als energiedrager moet het afgescheiden zijn van de andere elementen waarmee het verbonden is in de molecule. Het kan worden geproduceerd van fossiele brandstoffen of van hernieuwbare energie. De voornaamste productieprocessen van fossiele brandstoffen zijn stoommethaanreforming (SMR), gekatalyseerde ontbinding van natuurlijk gas, partiële oxidatie van zware olie en steenkoolvergassing. De overheersende productieprocessen van hernieuwbare energie zijn water elektrolyse, thermochemische waterafbraak, fotochemische, foto-elektrochemische en fotobiologische processen. (Hydroville, sd)



Figuur 46: Elektrolyse van water (Hydroville, sd)

4.12.2 Verbruik van waterstof

Brandstofcellen gebruiken waterstof als brandstof, deze leveren elektrische energie via een elektrochemische reactie. Een brandstofcel maakt gebruik van pure waterstof of van waterstof die, door middel van een omvormer ('reformer'), bekomen wordt uit producten met een hoog waterstofgehalte, zoals methanol, aardgas of zelfs gewone benzine. Binnenin de brandstofcel wordt de waterstof via een elektrolyt gecombineerd met zuurstof uit de lucht. Wanneer de twee gasen met elkaar reageren ontstaat er waterdamp, elektriciteit en warmte. De elektriciteit kan worden gebruikt voor de voeding van een elektrisch apparaat, een elektromotor (in een voertuig) of het elektriciteitsnet. De waterdamp kan eenvoudig afgevoerd worden, bijvoorbeeld via de uitlaat van het voertuig. In een aantal toepassingen (bv. warmtekrachtkoppeling) kan de geproduceerde warmte ook benut worden. (VITO, 2008)



Figuur 47: Werking brandstofcel ((Hydroville, sd)

4.12.3 Waterstofkleur

Wegens eenvoud is er figuurlijk een 'kleur' gegeven aan het type waterstof, het gas heeft natuurlijk niet letterlijk die kleur maar de naam geeft de bron weer die is gebruikt voor het maken van de waterstof. Zo bestaat er grijze, blauwe en groene waterstof. Momenteel vindt de productie van waterstof plaats door chemische omzetting vanuit fossiele brandstoffen. Aardgas reageert met stoom. Daarbij ontstaan waterstof en koolstofdioxide. Deze waterstof draagt niet bij tot vermindering van de CO₂-uitstoot en heet daarom grijze waterstof. Blauwe waterstof heeft één verschil: de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen in lege gasvelden. Het einddoel is de productie van klimaat neutrale, groene waterstof. De productie daarvan vindt plaats door met hernieuwbare energie het water via elektrolyse te splitsen in zuurstof en waterstof.

4.12.4 Toepasbaarheid in België

Naast de reductie van broeikasgassen vervuilen waterstofvoertuigen lokaal de luchtkwaliteit niet. Waterstofvoertuigen kunnen de milieu-impact in stedelijke omgevingen grondig verbeteren doordat ze enkel waterdamp uitstoten. Waterstof is gemakkelijker op te slaan dan elektriciteit, maar wel moeilijker dan vloeibare brandstoffen, zoals benzine en diesel. Waterstof als opslagmogelijkheid kan resulteren in een economischer gebruik van hernieuwbare energie, in het bijzonder voor de opslag van energie tijdens de pieken in de elektriciteitsproductie.

Op het gebied van veiligheid, maakt waterstof metalen broos, waardoor lekken kunnen ontstaan. Waterstof is geur- en kleurloos, waardoor lekken en vlammen onzichtbaar zijn. Bovendien heeft waterstof een laag ontstekingspunt, 20 keer lager dan benzine. Bij de ontwikkeling van opslagtanks en detectiesystemen zijn bijzondere beschermingsmaatregelen nodig.

De kosten voor de productie, opslag en toepassingen (bv. brandstofcel) van waterstof zijn nog steeds zeer hoog. De prijs van brandstofcellen reduceren is één van de belangrijkste uitdagingen. De technologie moet met een factor 10 goedkoper worden, wil men competitief worden met bijvoorbeeld diesel- en benzinevoertuigen. In het bijzonder voor de transportsector, dient nog een grote vooruitgang geboekt te worden in de ontwikkeling van brandstofcellen, opslagsystemen en distributie-infrastructuur. Verscheidene technische barrières moeten overwonnen worden, zoals het gewicht van de waterstoftank in voertuigen, (François, Martens, Winkel, & Vanhoudt, 2018) de levensduur van brandstofcellen, enz. Het gebruik van waterstofverbrandingsmotoren kan de introductie van waterstof vergemakkelijken, maar deze technologie gaat gepaard met een lagere energie-efficiëntie. De uitbouw van waterstofinfrastructuren zal eveneens zeer duur en ingrijpend zijn. Om de prijs te doen dalen, is het noodzakelijk een voldoende grote schaal te bereiken. Om waterstof echter op grote schaal te kunnen maken, moet de prijs aantrekkelijk zijn. Overheidsinitiatieven zijn noodzakelijk om deze vicieuze cirkel te kunnen doorbreken. De aanvaarding door het publiek en de industrie is cruciaal. Om aanvaard te worden in de huishoudens, moet waterstof even gebruiksvriendelijk zijn als aardgas. Communicatiecampagnes zijn essentieel om het publiek met waterstof vertrouwd te maken. (François, Martens, Winkel, & Vanhoudt, 2018)



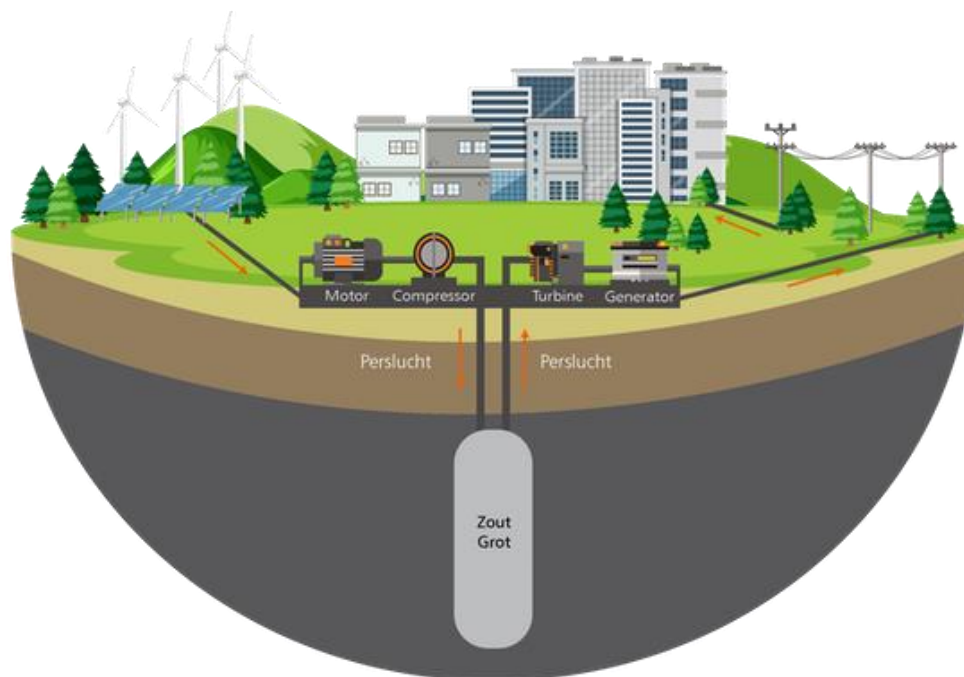
Figuur 48: Overzicht waterstofcluster (François, Martens, Winkel, & Vanhoudt, 2018)

5 TECHNIEK-STUDIES

In dit hoofdstuk bespreken we twee techniek-studies die gekozen zijn in samenspraak met onze promotor. Het opzet van deze techniek-studies is een meer technische kant te belichten in de thesis. De studies vormen de basis voor de ontwikkeling van twee rekentools toegepast in TREH. Om de rekentool gebruiksvriendelijk te maken is er gekozen om de te realiseren in Excel. De eerste rekentool gaat over Compressed Air Energy Storage ook wel CAES (Jord) genoemd. De tweede gaat dieper in op thermische energieopslag (Antoon). De uitgewerkte rekentools zijn te vinden in Bijlage D en Bijlage F.

5.1 CAES

Compressed Air Energy Storage of letterlijk vertaald gecomprimeerde lucht energieopslag is een manier om energie op te slaan in de vorm van samengedrukte lucht. De techniek wordt voornamelijk gebruikt als energiebuffer bij de balancering van het elektriciteitsnet. Wanneer de prijs van elektriciteit laag staat, wordt er een compressor aangedreven door een elektromotor en zo lucht gecomprimeerd. Daarna slaagt men deze lucht op in een ondergrondse zoutgrot. Wanneer later de elektriciteitsprijzen weer hoog staan zal de samengedrukte lucht een turbine aandrijven die op zijn beurt een generator aandrijft. Deze generator is net zoals de elektromotor gekoppeld met het elektriciteitsnet waardoor de geproduceerde energie kan hergebruikt worden naargelang vraag en aanbod. Figuur 49 geeft een vereenvoudigd beeld van dit werkingsprincipe.



Figuur 49 Werkingsprincipe van CAES (Messina, 2010)

De grootste en meest bekende installaties zijn het Huntorf-en McIntosh-project. De diabatische CAES-installatie Huntorf dateert van 1978 en heeft een vermogen van 270MW, een capaciteit van 580 MWh en een efficiëntie van 42%. Het diabatische McIntosh-project daarentegen is later gebouwd in 1991 en heeft een vermogen van 110 MW, een capaciteit van 2860 MWh en een efficiëntie van 53%. Op foto 1 is links Huntorf en rechts McIntosh te zien.

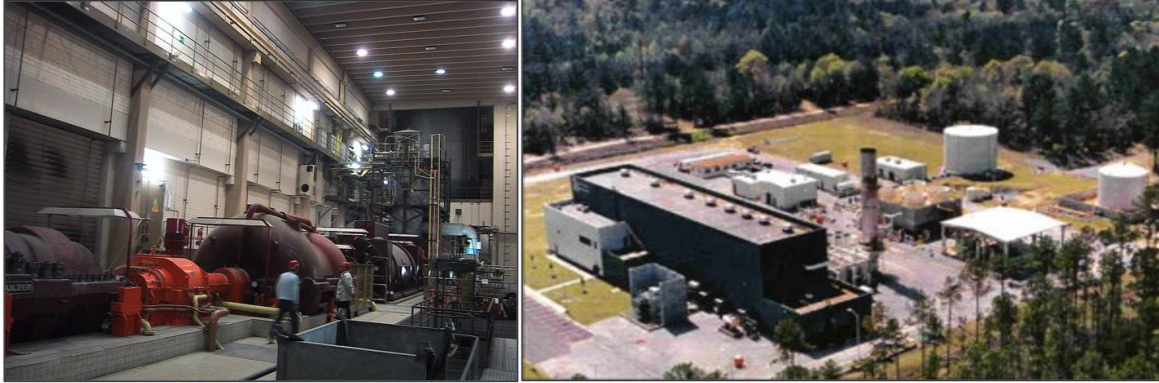


Foto 1 Installatie Huntorf en McIntosh (Budt & Wolf, 2016)

Deze installaties vangen voornamelijk overproductie van hernieuwbare energie (windturbines) op ook wel peak shaving genoemd. Beide installaties zijn nog steeds in gebruik en er liggen nieuwe plannen op tafel, voor bijvoorbeeld het ADELE-project. Deze adiabatiese installatie zal geplaatst worden in Duitsland en zou goed zijn voor een vermogen van 90MW, een capaciteit van 360MWh en een efficiëntie van 70%. Vooral de efficiëntie van deze techniek is belangrijk voor de vergelijking met andere energieopslag-technieken. (Budt & Wolf, 2016)

5.1.1 Types van CAES

Omdat compressie van lucht zorgt voor een temperatuurstijging, zal de samengedrukte lucht warmer zijn na compressie. Daarentegen zal expansie van lucht zorgen voor een temperatuurdaling. Warme lucht heeft een grotere energetische waarde dan koude lucht vandaar dat men probeert om deze warmte die vrijkomt bij compressie opnieuw te gebruiken voor expansie. De opslag van deze warmte noemen we TES, Thermal Energy Storage. CAES-installaties die gebruik maken van TES hebben over het algemeen een grotere cyclus efficiëntie. Men maakt een onderscheid tussen verschillende CAES-installaties op basis van het gebruik van deze warmte. Er bestaan 3 types van CAES: diabatisch, adiabatisch en isotherm.

5.1.1.1 D-CAES

D-CAES of Diabatic Compressed Air Energy Storage is tot nu toe de enige en vandaar ook meest gebruikte manier om energie op te slaan in de vorm van luchtdruk. Het Huntorf- en McIntoshproject zijn allebei gebaseerd op deze methode. Het diabatische proces geeft de compressiewarmte af aan de omgeving. Deze energieverstopping gaat men dan achteraf compenseren door een natuurlijk gas te verbranden samen met de samengedrukte lucht. Hierdoor warmt de lucht voor de expansie weer op met meer elektriciteitsproductie als gevolg. Verbranding van natuurlijk gas zoals methaan leidt dan weer tot toename van broeikasgassen.

5.1.1.2 A-CAES

A-CAES of Adiabatic Compressed Air Energy Storage houdt rekening met de compressiewarmte en probeert aan de hand van TES zoveel mogelijk warmte op te slaan voor hergebruik. Zoals eerder aangehaald bestaan er heden geen installaties die gebruik maken van deze methode. Het ADELE-project in Duitsland zal de eerste CAES-installatie zijn die TES toepast. Bij ADELE probeert men de warmte ondergronds op te slaan in grote geïsoleerde tunnels. Foto 2 geeft een beeld van deze opslag.



Foto 2 TES (Geissbühler, Becattini, & Zanganeh, 2018)

De tunnel heeft een hoogte van 3,1 m, een lengte van 9,9 m en breedte van 2,4 m. De wanden van de tunnel bestaan uit 1 cm UHPC (Ultra High Performance Concrete), 10 cm LDC (Low Density Concrete), 10 cm micro poreuze thermische isolatie en 25 cm gewapend beton. Dit allemaal om zoveel mogelijk warmte binnen deze muren te houden. Deze thermische energieopslag is uitsluitend bedoeld voor de recuperatie van de compressiewarmte met als doel het cyclus rendement te verhogen. (Geissbühler, Becattini, & Zanganeh, 2018)

5.1.1.3 I-CAES

I-CAES of Isothermal Compressed Air Energy Storage is theoretisch gezien de beste methode om energie op te slaan onder de vorm van luchtdruk en heeft geen TES nodig. Tot nu toe zou deze methode enkel mogelijk zijn voor installaties met kleine vermogens omdat praktische beperking zoals een maximale druk en temperatuur geen reële installaties mogelijk maken. Daarom spreekt men liever over near-isothermal compressed air energy storage. Deze cyclus probeert de temperatuur zo constant mogelijk te houden tijdens de compressie. Dit kan enkel door zeer complexe koeling. Op deze manier is een efficiëntie van 80% mogelijk. (Budt & Wolf, 2016)

5.1.2 Vergelijking met andere opslagtechnieken

In deze paragraaf maken we de vergelijking tussen CAES en andere energieopslagstechnieken zoals onder meer pompaccumulatie, waterstof en batterijen. De meeste van deze technieken zijn reeds besproken in hoofdstuk 4. Volgende figuren en tabellen uit recent onderzoek geven enkele eigenschappen en kengetallen weer.

ES Technology	Energy Density Wh/kg (Wh/l)	Power Density W/kg (W/l)	Discharge Time	Life Time (Years)	Capital Cost		Technological Maturity
					\$/KW	\$/KWh	
Mechanical Energy Storage							
PHES	0.5–1.5 (0.5–1.5)	–	1–24 h +	40–60	600–2000	5–100	Matured
CAES	30–60 (3–6)	(0.5–2.0)	1–24 h +	20–40	400–800	2–50	Developed
Flywheel	10–30	400–1500	Milliseconds– 15 min	15	250–300	500–1000	Commercial
Electrochemical Energy Storage							
Lead Acid Battery	30–50 (50–80)	75–300 (10–400)	Secs–hrs	5–15	200–300	120–150	Commercial
NiCd Battery	50–75 (60–150)	150–300	Secs–hrs	10–20	500–1500	800–1500	Commercial
Sodium Sulfur (NaS) Battery	150–240 (150–250)	150–230	Secs–hrs	10–15	1000– 3000	300–500	Commercial
Lithium Battery (Li-ion)	75–200 (200–250)	150–315	Mins–hrs	5–15	1200– 4000	300–1300	Demonstration
VRFB	10–30 (16–33)	--	Secs–10h	5–10	600–1500	150–1000	Demonstration
Electrical Energy Storage							
Double Layer Capacitor/ super Capacitor	2.5–15 (10–30)	500–5000(100,000 +)	Milliseconds–60 min	20+	100–300	300–2000	Developed
SMES	0.5–5	500–2000	Milliseconds–secs	20+	200–300	1000– 10,000	Demonstration
Chemical Energy Storage							
Hydrogen Fuel Cells	800–10,000 (500– 3000)	500+ (500+)	Secs–24h+	5–15	–	6000– 20,000	Developing
SNG	10,000(1800)	(0.2–2)	1–24 h +	10–30	–	–	Developing
Thermal Energy Storage							
CSP	(~43.05)	–	Mins–hrs	30	–	3500–7000	Developing

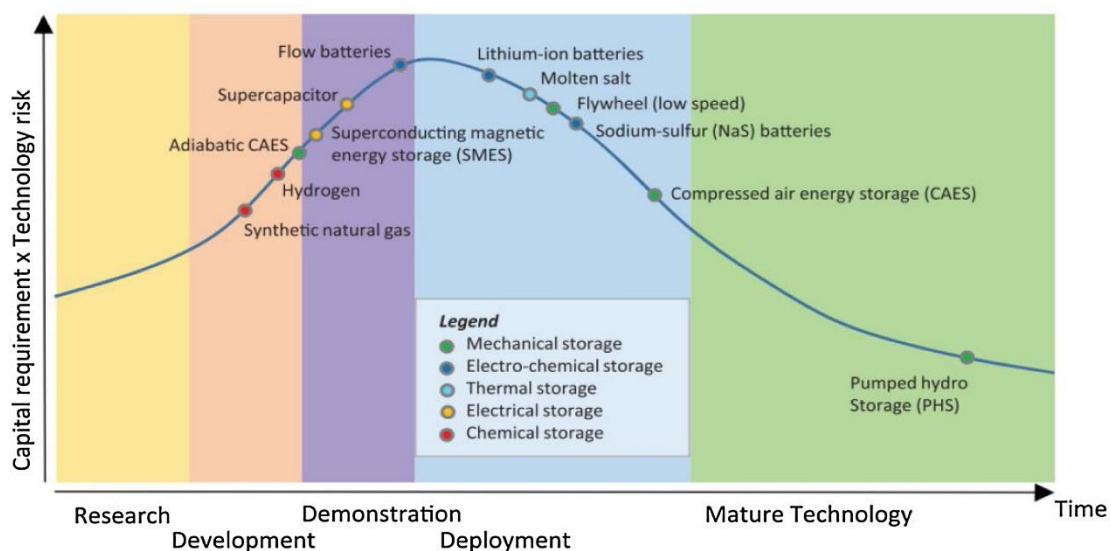
Tabel 9 Vergelijking van CAES met andere energieopslag-technieken (Kumar Rohita, Ksh. Priyalakshmi, & Rangnekara, 2017)

Uit tabel 6 blijkt dat CAES algemeen beter scoort qua energie densiteit, ontlad-tijd en levensduur in vergelijking met batterijen. De kosten om 1 kWh aan energie op te slaan via CAES liggen beduidend lager dan elke andere techniek, zeker in vergelijking met waterstofopslag. Tabel 7 geeft nog enkele parameters weer met betrekking tot energieopslag-technieken. Hier ligt de nadruk nogmaals op de efficiëntie, die beduidend lager is in vergelijking met de andere technieken, vandaar de overgang naar A-CAES zoals het ADELE-project.

ES Technology	Power Rating	Storage duration	Self Discharge Per day	Cycle Life (cycles)	Round trip Efficiency (%)	Response time	Class	Impact on Environment
Mechanical Energy Storage								
PHES	100–5000 MW	Hours–months	Very small	–	65–87%	1–2 min	Real long term	Significant, huge areas of natural landscapes are required.
CAES	5–300 MW	Hours–months	Small	–	50–89%	1–2 min	Real long term	Emissions from combustion of natural gas.
Flywheel	0–250 kW	Sec–mins	100%	–	85–95%	1–2 min	Short term	Negligible, only for production, construction.
Electrochemical Energy Storage								
Lead Acid Battery	0–20 MW	Mins–days	0.1–0.3%	500–1000	75–80%	Seconds	Long term	Lead is known to be very poisonous and contaminating for soil and water.
NiCd Battery	0–40 MW	Mins–days	0.2–0.6%	2000–2500	85–90%	Seconds	Long term	Cadmium is toxic and dangerous for health and environment.
Sodium Sulfur (NaS) battery	50 kW–8 MW	Sec–hours	20%	2500	80–90%	Seconds	Short term	Significant as the liquid sodium reacts easily with the water in the atmosphere.
Lithium Battery (Li-ion)	0–100 kW	Mins–days	0.1–0.3%	1000–10000+	85–90%	Seconds	Long term	Rather low, impact mostly through emissions in manufacturing of the cells.
VRFB	30 kW–3 MW	Hrs–months	Small	12000+	85–90%	Seconds	Real long term	Toxic remains.
Electrical Energy Storage								
Double Layer Capacitor/ super Capacitor	0–300 kW	Sec–hours	20–40%	100,000+	90–95%	Milliseconds	Short term	Negligible, no heavy metal or disposal issue.
SMES	100 kW–10 MW	Mins–hours	10–15%	100,000+	95–98%	Milliseconds	Short term	Harmful due to very strong magnetic field.
Chemical Energy Storage								
Hydrogen Fuel cell	0–50 MW	Hrs–months	Almost Zero	100+	20–50%	Sec–mins	Real Long term	Negligible, as by product is water and little amount of CO ₂ .
SNG	–	–	–	1000–10,000	30–38%	Mins	Real Long term	Very low, only for construction.
Thermal Energy Storage								
CSP	10 kW–200 MW	–	1%	–	<60%	10 min	Long term	Negligible, only for construction.

Tabel 10 CAES in vergelijking met andere energieopslag-technieken (Kumar Rohita, Ksh. Priyalakshmi, & Rangnekara, 2017)

Een laatste figuur illustreert de kapitaalsvereisten en technische risico's in functie van de status van de opslagtechniek. PHS is de enige energieopslag-techniek die over voldoende maturiteit beschikt gevolgd door CAES. Let op in onderstaande vergelijking belicht men enkel D-CAES, A-CAES zit nog steeds in de ontwikkelingsfase en is in de vergelijking niet opgenomen.

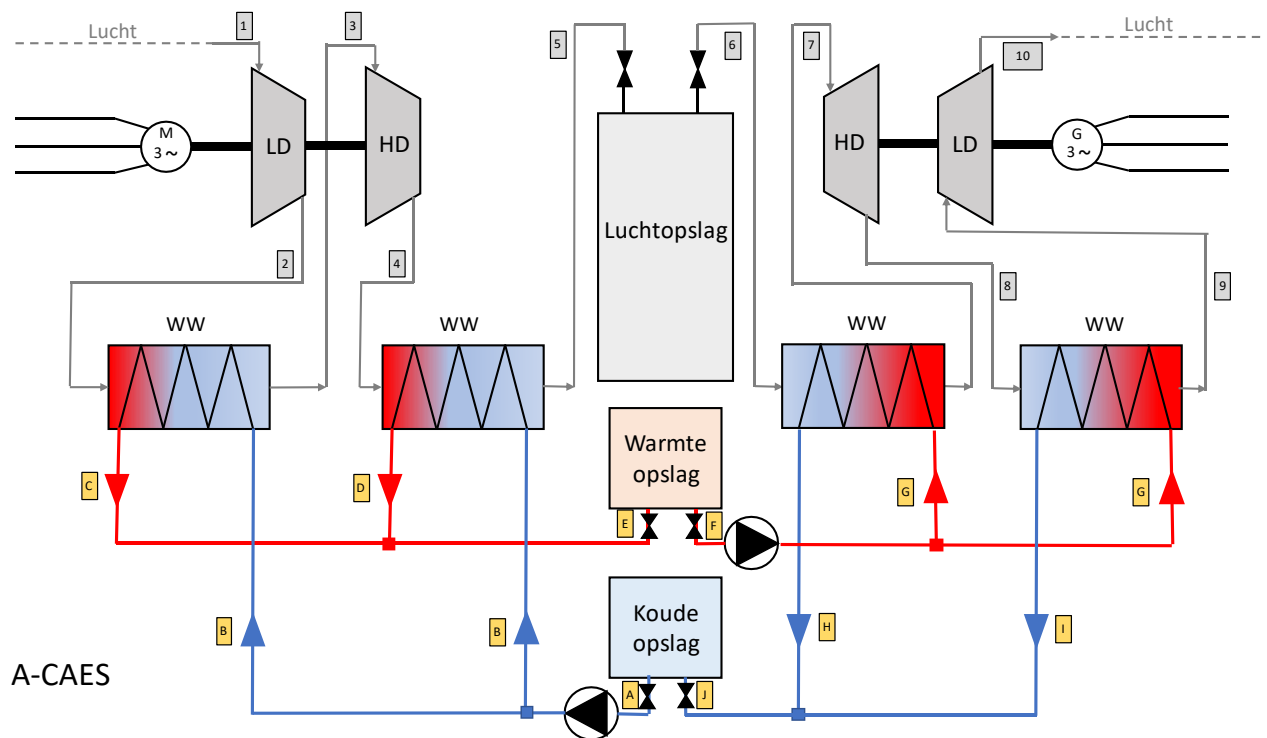


Figuur 50 Maturiteit van opslagtechnieken (Kumar Rohita, Ksh. Priyalakshmi, & Rangnekara, 2017)

5.1.3 Adiabatic compressed air energy storage calculator

We hebben doelbewust gekozen om een tool te maken voor de adiabatische vorm van energieopslag namelijk, A-CAES. Éen van de doelen is om een hoger rendement te bekomen dan bij de diabatische vorm (42 à 53%). Dit tonen we aan via een zelfontworpen rekenmodel. Het model is gebaseerd op de huidige diabatische installaties maar in plaats van natuurlijk gas te verbranden, gaan we deze warmte recupereren via thermische energieopslag. Op deze manier kan de warmte die vrijkomt bij compressie hergebruikt worden voor de expansie. Een tweede doel is om een globale analyse te maken van het geheel om zo een overzicht te krijgen van alle temperaturen en drukken in het systeem. Als laatste is de invloed van verschillende parameters op het rendement onderzocht.

5.1.3.1 Rekenmodel A-CAES

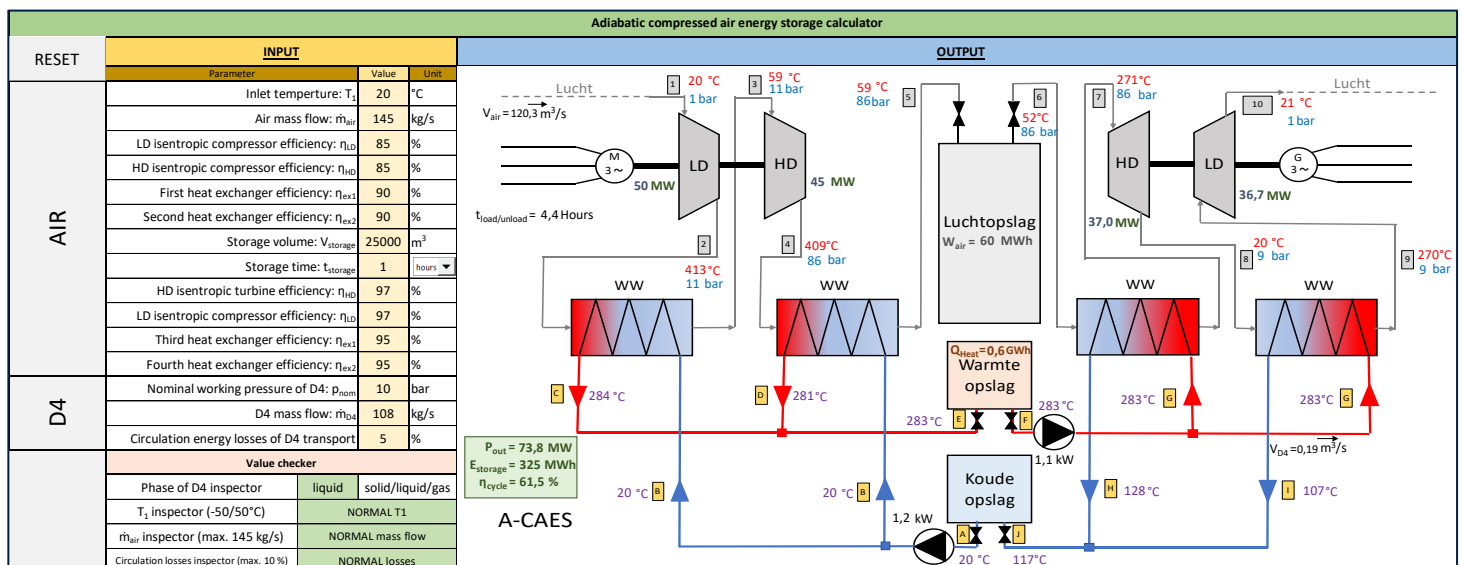


Figuur 51 Schema A-CAES

In Figuur 51 is het schema te zien, dit bevat cijfers en letters. De cijfers geven de luchttoestand aan en letters representeren het koelmiddel. Het werkingsprincipe is als volgt: een lage druk compressor aangedreven door een elektromotor zuigt omgevingslucht aan. Daarna koelt een warmtewisselaar de hete lucht af. Dit proces herhaalt zich voor de 2^{de} compressiestap met de hoge druk compressor. Een tweede warmtewisselaar koelt de hete lucht af alvorens deze opgeslagen wordt in het luchtreservoir. De opslag van de gecomprimeerde lucht gebeurt ondergronds in een vat voorzien van constante druk (isobaar). Het koelmiddel daarentegen slaan we apart op in een goed geïsoleerde ruimte. Dit model maakt gebruik van Octamethylcyclotetrasiloxaan (D4) als koelmiddel in plaats van water of olie vanwege zijn betere thermische eigenschappen. Wanneer later de vraag naar energie toeneemt zal het ventiel van het luchtreservoir openen en zal de lucht terug opgewarmd worden door het hete koelmiddel via een warmtewisselaar. De relatief koude lucht warmt op en het warme koelmiddel koelt af. De warme lucht gaat naar de hoge druk turbine voor expansie. Hierbij komt arbeid vrij en de lucht koelt af. Deze stap herhaalt zich voor de 2^{de} expansiestap met de lage druk turbine. De arbeid van beide turbines veroorzaakt een rotatie op de as van de generator die op zijn beurt weer elektriciteit op het net zal zetten.

5.1.3.2 Excel-tool

In deze paragraaf leggen we de werking uit van de Excel-tool. We verduidelijken de verschillende input parameters geven daarbij een verklaring van de ingestelde waarden. Het theoretisch model bevat enkele assumpties en praktische rendementen.



Figuur 52 CAES calculator

Figuur 52 geeft een verkleind beeld van de rekentool weer, een grotere versie is te vinden in bijlage D. In Figuur 52 zie je links de “INPUT” met de instelbare parameters en rechts de “OUTPUT” met daarin alle berekende temperaturen en drukken van zowel de lucht als het koelmiddel in elk punt. Het uitgangsvermogen en de opgeslagen energie van het systeem zijn samen met het globaal rendement van één laad- en ontlaadcyclus weergegeven in de groene rechthoek links onderaan. Bij “INPUT” staat onderaan ook nog de “Value checker”. Deze controleert de waarden van de ingestelde parameters en geeft bij foutieve of onmogelijke instellingen een foutmelding. Als bijvoorbeeld het isentropisch rendement van de lage druk compressor hoger is dan 85% zal deze cel rood kleuren. Het isentropisch rendement is een maat voor de drukverliezen die voorkomen bij reële compressoren waardoor hogere rendementen praktisch niet haalbaar zijn. Figuur 53 illustreert deze foutmelding.

INPUT		
Parameter	Value	Unit
Inlet temperature: T_1	20	°C
Air mass flow: \dot{m}_{air}	145	kg/s
LD isentropic compressor efficiency: η_{LD}	86	%
HD isentropic compressor efficiency: η_{HD}	85	%
First heat exchanger efficiency: η_{ex1}	90	%
Second heat exchanger efficiency: η_{ex2}	90	%
Storage volume: $V_{storage}$	25000	m ³
Storage time: $t_{storage}$	1	hours

Figuur 53 Foutmelding bij onjuist rendement

De “Value checker” controleert voornamelijk de fasetoestand van het koelmiddel D4 in elk punt van het systeem (aangeduid met een letter). D4 is een thermische olie die men gebruikt als transmissie olie bij raceauto’s. Vandaar dat deze steeds onder druk moet gehouden worden bij hogere temperaturen om zo gasvorming te voorkomen. Nog een belangrijke instelparameter die steeds gecontroleerd moet worden is het massadebiet van de lucht, dit debiet mag niet boven 145 kg/s komen, omwille van praktische beperkingen. Tenslotte is er nog de “RESET” knop. Bij het indrukken van deze knop zullen alle ingestelde waarden vervangen worden door hun standaardwaarden, deze waarden zijn reeds weergegeven in Figuur 52. Zo kan de gebruiker ten alle tijden terugkeren naar de referentietoestand moest er een fout optreden.

5.1.3.3 Toegepaste formules

De cyclus bestaat uit compressie, koeling, luchttopslag, warmteopslag, verwarming en expansie.

Compressie (1→2)

We passen de wet van behoud van energie toe op de compressor: (Barbour, Mignard, & Yulong, 2015)

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

Verdere uitwerking geeft:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = c_p T_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{\eta_c k}} - 1 \right)$$

De uitgangstemperatuur na compressie van de lucht kan dan berekend worden via volgende formule:

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\left(\frac{k-1}{\eta_c k}\right)}$$

Hierin is $k = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4$ en $\eta_c \approx 0,85$. (Steen & Toretam, 2018)

Vervolgens kan via onderstaande formule h_2 gevonden worden door:

$$\eta_c = \frac{h_2 - h_1}{\frac{\dot{W}}{\dot{m}}}$$

Nu liggen er twee grootheden vast zodanig dat de overeenkomstige druk en entropie bepaald kunnen worden.

$$p_2 = f(T_2, h_2)$$

$$s_2 = f(T_2, p_2)$$

Air	1	Isentropic compression		2	Unit
T	293	ΔT	393,1	686	K
P	101325	P_2/P_1	11,2	1131215	Pa
S	3863	η_c (%)	85	4043	J/K
H	419254			824934	J/kg

Figuur 54 Compressie van 1 naar 2

Expansie (7→8)

Analoog zoals bij compressie passen we de wet van behoud van energie toe, enkel de betekenis van het rendement verandert:

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\left(\frac{\eta_t(k-1)}{k}\right)}$$

In deze formule is $k \approx 1,4$, $\eta_t \approx 0,97$ en de drukverhouding $\frac{p_2}{p_1}$ zo gekozen dat deze voor beide turbines het maximaal vermogen oplevert. (Steen & Toretam, 2018)

Analoog kan via onderstaande formule h_2 gevonden worden door:

$$\eta_t = \frac{\frac{\dot{W}}{\dot{m}}}{h_2 - h_1}$$

Nu liggen er twee grootheden vast zodanig dat de overeenkomstige druk en entropie bepaald kunnen worden.

$$p_2 = f(T_2, h_2)$$

$$s_2 = f(T_2, p_2)$$

Air	7	Isentropic expansion		8	Unit
T	544	ΔT	251	293	K
P	8638053	P_7/P_8	9,3	929411	Pa
S	3204	η_T (%)	97	3222	J/K
H	673095			417637	J/kg

Figuur 55 Expansie van 7 naar 8

Koeling (2→3)

Een eerste tegenstroomwarmtewisselaar koelt de hete lucht onder constante druk af door zijn warmte vrij te geven aan het koelmiddel D4. Het warmtetransport bevat ook enkele verliezen die in rekening gebracht zijn via η_{ex1} in volgende formules. Een typische waarde voor de efficiëntie van zeer grote warmtewisselaars komt overeen met ongeveer 90%. Het werkingsprincipe daarentegen is analoog met de lucht-water warmtepomp die eerder aangehaald werd in hoofdstuk 4.11 waarbij het water vervangen wordt door D4.

$$\eta_{ex1} = \frac{\dot{Q}}{Q_{th}} \approx 0,9$$

$$Q_{th} = \dot{m}_{D4} c_{D4} (T_{air\ in} - T_{D4\ in})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{air} c_{air} (T_{air\ in} - T_{air\ out})$$

$$p_3 = p_2 \text{ (isobaar)}$$

Nu T_3 en p_3 gekend zijn kan hieruit de enthalpie en entropie in punt 3 berekend worden:

$$h_3 = f(T_3, p_3)$$

$$s_3 = f(T_3, p_3)$$

Air	2	Heat exchange (isobaric)		3	Unit
T	686	ΔT	354	332	K
P	1131215	P3=P2		1131215	Pa
S	4043	$\eta_{exchanger}$ (%)	90	3292	J/K
H	824934			456997	J/kg

Figuur 56 Koeling van 2 naar 3

Verwarming (6→7)

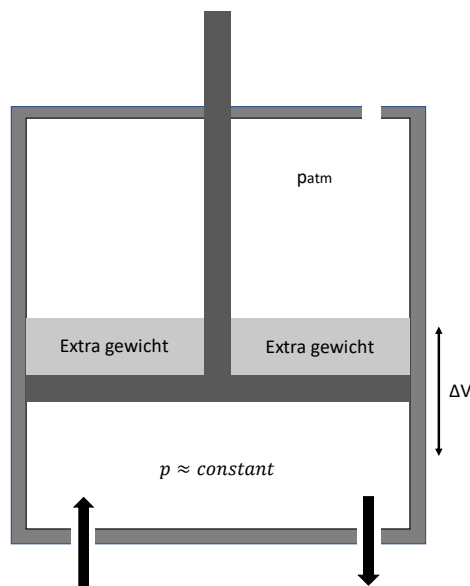
Analoog met koeling. Het warme koelmiddel staat zijn warmte af aan de gecomprimeerde lucht, hierdoor stijgt de energetische waarde van de lucht en verhoogt het turbinevermogen.

Air	6	Heat exchange (isobaric)		7	Unit
T	325	ΔT	219	544	K
P	8638053	P7=P6		8638053	Pa
S	2649	$\eta_{\text{exchanger}}$ (%)	95	3204	J/K
H	437410			673095	J/kg

Figuur 57 Verwarming van 6 naar 7

Luchtopslag (5→6)

Eerder in de thesis is vermeld dat gecomprimeerde lucht ondergronds opgeslagen wordt in een opslagtank. Om complexe berekeningen te vermijden is er gekozen voor een opslagvat met variabel volume en constante druk. Figuur 58 illustreert het werkingsprincipe.



Figuur 58 Werking luchtreservoir

Het extra gewicht op de zuiger zorgt ervoor dat de druk steeds constant blijft. Indien er lucht wordt bijgepompt zal de zuiger naar boven gaan en gecomprimeerde lucht wordt opgeslagen. De druk in de opslagtank kan bepaald worden door volgende formule:

$$p_{\text{tank}} = \frac{m_{\text{gewicht}} G}{A_{\text{zuiger}}}$$

Er treedt ook een klein volumeverlies op ten gevolge van warmteverlies met de omgeving. De lucht is geïsoleerd met 10 cm beton en de omgeving is vastgelegd op 15°C.

Dit geeft volgend warmteverlies per seconde:

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{\lambda_{beton}}{wanddikte} A_{cil} (T_5 - T_{omgeving})$$

Het totale warmteverlies wordt dan:

$$Q_{loss} = \dot{Q}_{loss} \times t_{opslag}$$

De uitgangstemperatuur kan berekend worden via:

$$Q_{stored} = m_{stored} c_{air} \Delta T$$

$$Q_{out} = Q_{stored} - Q_{loss}$$

$$Q_{out} = m_{air} c_{air} (T_6 - T_{omgeving})$$

Air	5	Compressed Air Storage		6	Unit
T	332	Average temperture loss through concrete		325	K
P	8638053	p = constant		8638053	Pa
S	2671	T _{loss} (%)	= f(time, ...)	2649	J/K
H	444587			437410	J/kg

Figuur 59 Luchtopslag van 5 naar 6

Warmteopslag (E→F)

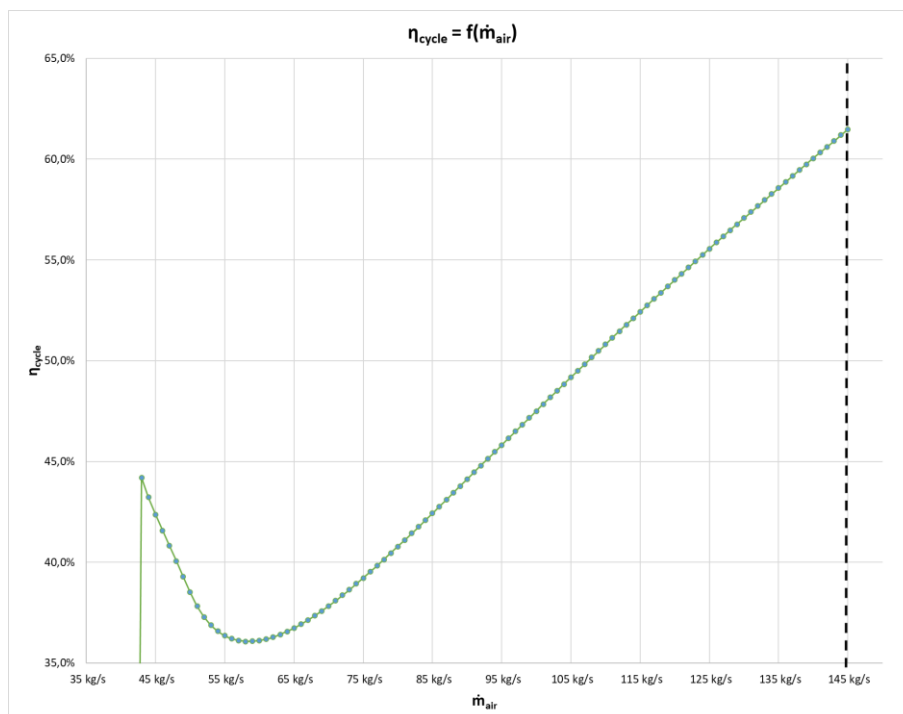
Dit is analoog met luchtopslag, enkel wordt de olie opgeslagen in een goed geïsoleerde opslagtank. Deze is voorzien van lage dichtheidsbeton als isolatie met een dikte van 25 cm. Vanwege de goede isolatie is er bijna geen sprake van warmteverliezen. Vandaar dat de toestand van D4 bijna niet veranderd bij 1 uur opslagtijd.

D4	E	Heat storage		F	Unit
T	556	Average temperture loss through LDC		556	K
P	1013250	p = constant		1013250	Pa
m _{D4}	216	T _{loss} (%)	= f(time, ...)	216	kg/s
Phase	liquid			liquid	solid/liquid/gas

Figuur 60 Warmteopslag van E naar F

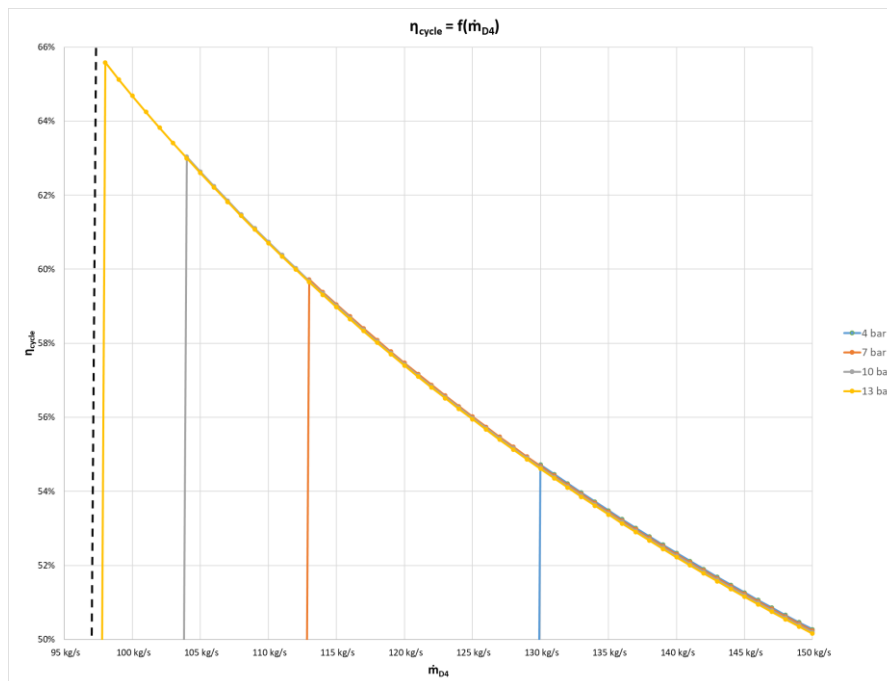
5.1.3.4 Resultaten

Dit gedeelte bespreekt enkele interessante grafieken die het verloop van het rendement weergeven in functie van één variërende parameter. Op deze manier kan achteraf de invloed van de verschillende grootheden met elkaar vergeleken worden. Steeds werd er gebruik gemaakt van de referentietoestand met standaardwaarden (RESET-knop). In de meeste grafieken is er ook verticale zwarte stippellijn te zien zijn, dit stelt de grenswaarde voor van die grootheid. Bijvoorbeeld in Figuur 61 is het massadebiet lucht van de compressor gelimiteerd op 145 kg/s. Dit is noodzakelijk wanneer we realistische waarden voor het rendement willen bekomen. Als eerste laten we het massadebiet van de lucht variëren van 35 kg/s tot 145 kg/s. Al gauw blijkt dat deze variabele een sterke invloed heeft op het rendement van de cyclus. Ook een hoger luchtdebiet resulteert in een hoger rendement. Als het massadebiet onder de 45 kg/s gaat bij referentietoestand zien we een snelle daling van het rendement. Dit is een rechtstreeks gevolg van gasvorming van het koelmiddel, wat uiteraard niet gewenst is zoals eerder al aangehaald werd in de thesis.



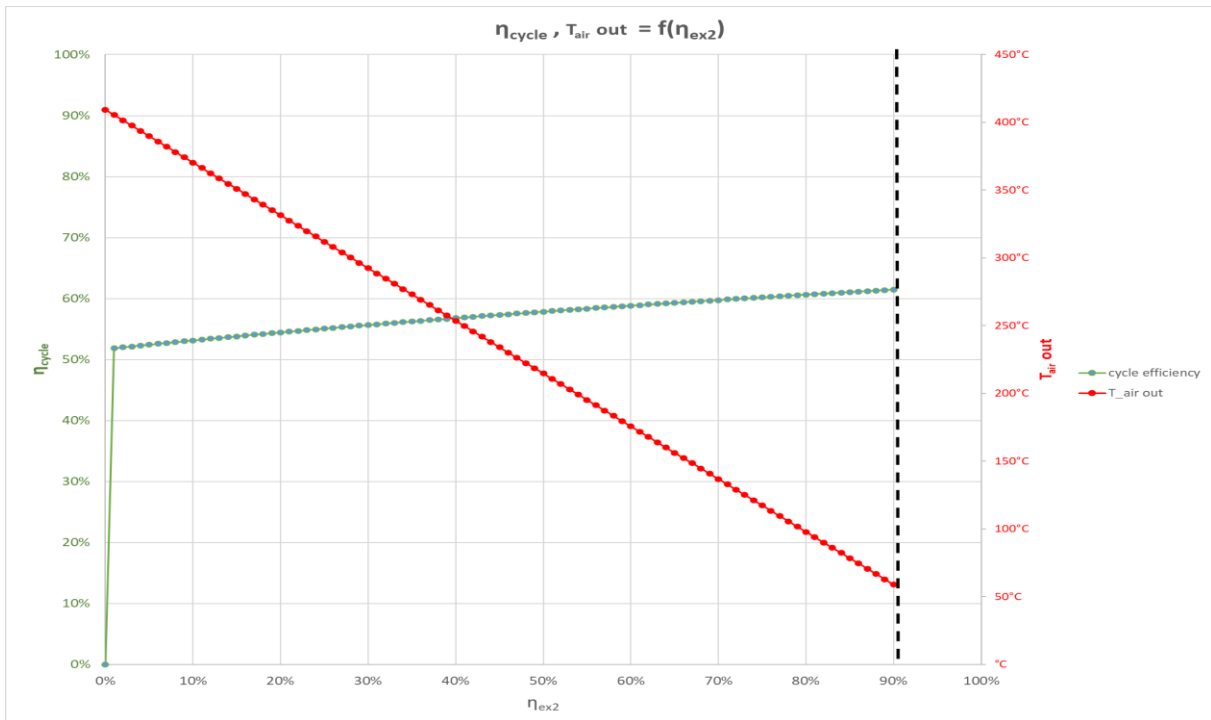
Figuur 61 Rendement in functie van het massadebiet lucht

Figuur 62 beschrijft het verloop van het rendement in functie van het koelmiddeldebiet. Dit werd gedaan bij verschillende werkdrukken, namelijk bij 4, 7, 10 en 13 bar. Hogere werkdrukken voorkomen dat het koelmiddel zal verdampen tot in de gasfase bij hogere temperaturen. Ook hier zijn er praktische beperkingen want bij zeer hoge werkdrukken en temperaturen zal het koelmiddel in een kritieke toestand terecht komen. Vandaar dat de werkdruk begrensd is op 13 bar bij zulke hoge temperaturen. De grafiek toont dat het koelmiddeldebiet een grote invloed heeft op het cyclus rendement. Het rendement stijgt bij hogere werkdruk en vooral bij lagere massadebieten van het koelmiddel. Dit is logisch want de lucht krijgt bij tragere snelheden meer kans om af te koelen en zijn energie af te staan aan het koelmiddel.



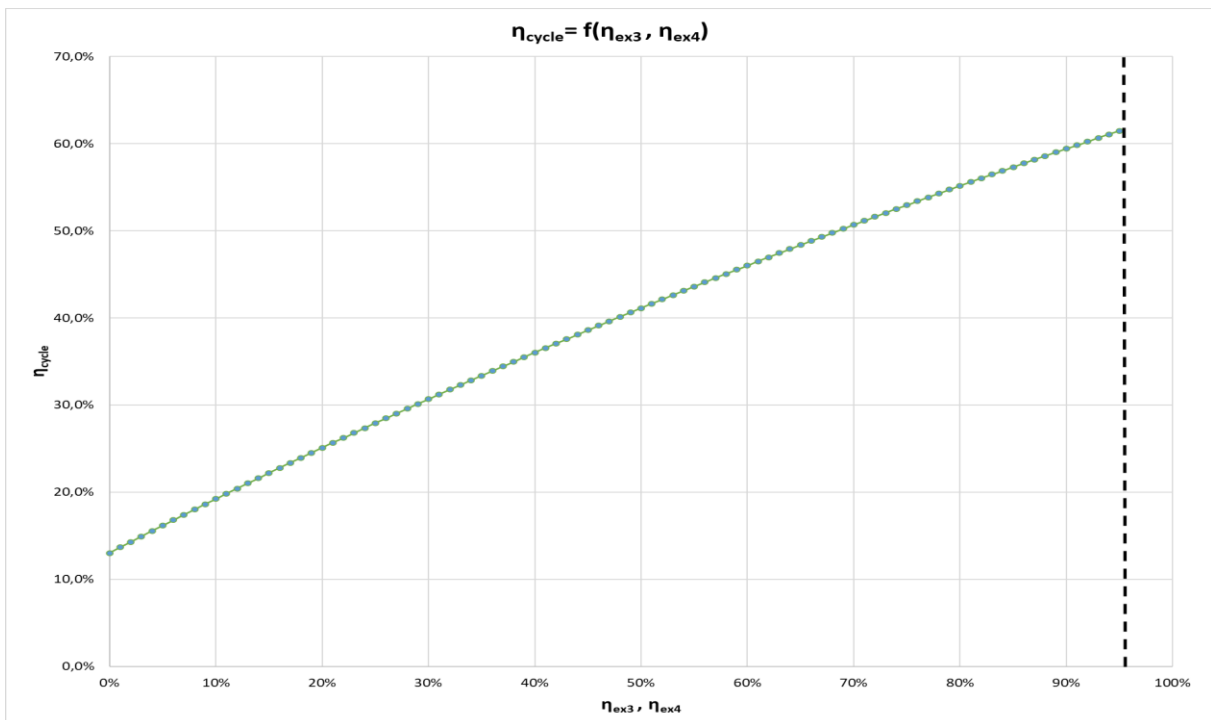
Figuur 62 Rendement in functie van het koelmiddeldebiet bij verschillende werkdrukken

Figuur 63 geeft links het rendement weer in functie van de efficiëntie van de tweede warmtewisselaar en rechts de uitgangstemperatuur van de lucht na koeling. De efficiëntie van de tweede warmtewisselaar heeft een relatief kleine invloed op het totaal rendement. Daarentegen beïnvloedt de warmtewisselaar wel sterk de uittredetemperatuur van de lucht. Naarmate de efficiëntie toeneemt zal het rendement toenemen en de uittredetemperatuur afnemen. Dit laatste is belangrijk bij het ontwerp van de compressor, want hogere temperaturen doen de levensduur van de machine dalen of met andere woorden zal men bij hogere temperaturen meer rekening moeten houden met de thermische belastbaarheid.



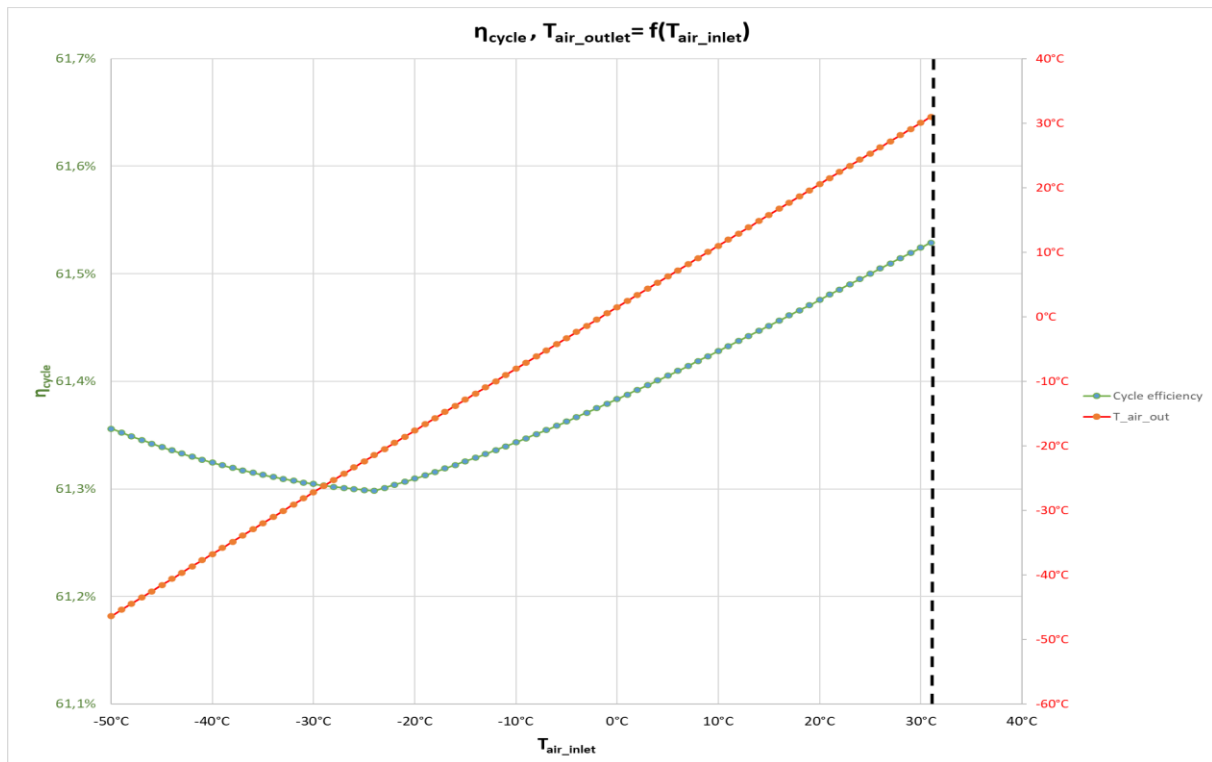
Figuur 63 Rendement en uittredetemperatuur van de lucht in functie van de efficiëntie van de tweede warmtewisselaar

Vervolgens analyseren we het verloop van het rendement in functie van een variërende efficiëntie van de derde en vierde warmtewisselaar. Deze warmtewisselaars hebben als doel de koude lucht afkomstig van de opslagtank en van de turbine terug op te warmen. Figuur 64 laat zien dat het rendement sterk afhankelijk is van deze efficiëntie. Het rendement van de cyclus neemt toe als de efficiëntie toeneemt. Ook hier is de variabele gelimiteerd, namelijk op 97%.



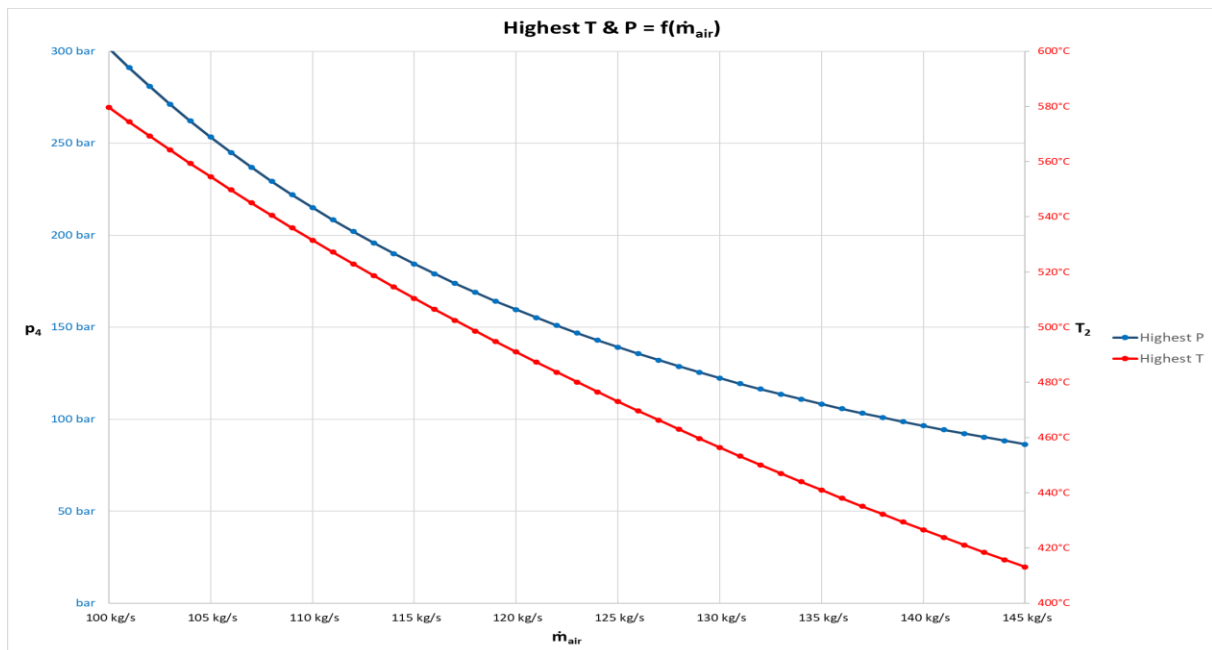
Figuur 64 Rendement in functie van de efficiëntie van de derde en vierde warmtewisselaar

Nog een interessant verloop is het rendement in functie van de omgevingstemperatuur. Ook analyseren we de invloed van de omgevingstemperatuur op de uitgangstemperatuur na de laatste expansietrap. Opmerking, de schaal van het rendement is sterk uitvergroot omdat deze variabele weinig invloed heeft. De zwarte stippelijijn begrensd de ingangstemperatuur op 31 °C omdat vanaf dit het koelmiddel overgaat in de gasfase. Het rendement kent een minima in zijn verloop. Dit komt omdat bij koudere lucht het massadebiet groter is dan bij warme lucht stijgt het rendement. Omgekeerd zal het rendement vanaf -23°C weer toenemen omdat de enthalpie groter is bij toenemende temperatuur. De uitgangstemperatuur neemt lineair toe met de ingangstemperatuur.



Figuur 65 Rendement en uitgangstemperatuur in functie van de ingangstemperatuur

Als laatste bespreken we het verloop van de hoogste temperaturen en drukken die voorkomen in de cyclus in functie van het massadebiet lucht. Eerder werd al aangehaald dat lagere temperaturen beter zijn voor de levensduur van compressoren. Dit geldt ook voor hoge drukken, installaties die steeds in bedrijf zijn bij hoge temperaturen en drukken vragen meer onderhoud of strengere over-dimensionering. De hoogste temperatuur die voorkomt in een cyclus bevindt zich in toestand 2, dit is de luchttoestand na de eerste compressie. De hoogste druk daarentegen treedt op in toestand 4. Dit is uiteraard de luchttoestand na de 2^{de} compressiestap. Uit Figuur 66 lijkt de temperatuur lineair toe te nemen met een dalend massadebiet. Het drukniveau neemt bijna exponentieel toe met een dalend massadebiet.

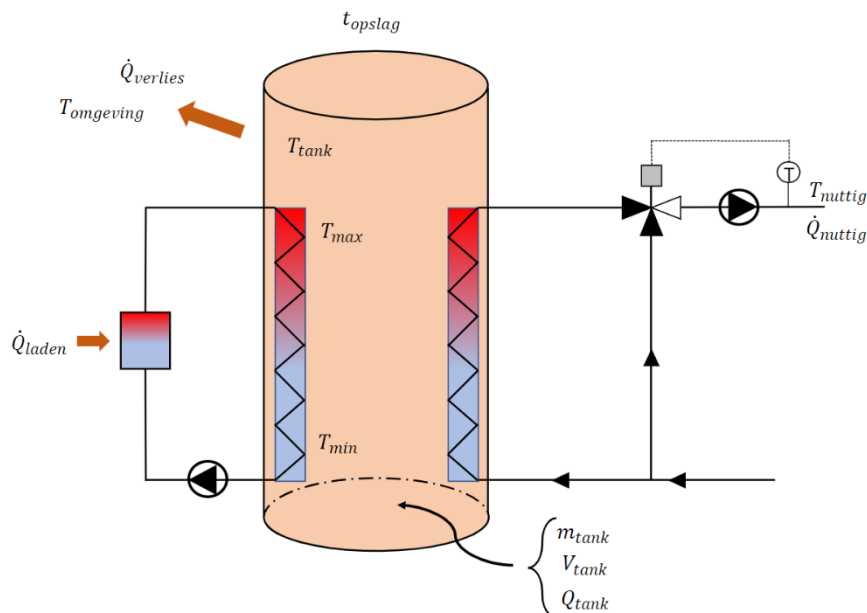


Figuur 66 Hoogste temperaturen en drukken van het systeem bij variërende luchtdebieten

5.2 Thermische energieopslag

Een tweede rekentool die we ontwikkeld hebben is deze voor thermische energieopslag. De rekentool simuleert het temperatuur-en warmteverloop van een thermisch opslagsysteem. De gebruiker kan keuzes maken rond bijvoorbeeld: het gebruikte materiaal, de capaciteit en constructie van de tank. Zo leert de gebruiker de invloed van verschillende parameters kennen en krijgt hij een idee van de beperkingen en/of voordelen van bepaalde ontwerpkeuzes. Het doel van dit rekenmodel is de gebruiker vertrouwd te maken met de verschillende manieren van thermische energieopslag. Het model zal dan ook in TREH worden geïmplementeerd zodat bezoekers hiermee kunnen experimenteren. In Bijlage F is een afdruk van de rekentool te vinden.

5.2.1 Beschrijving model

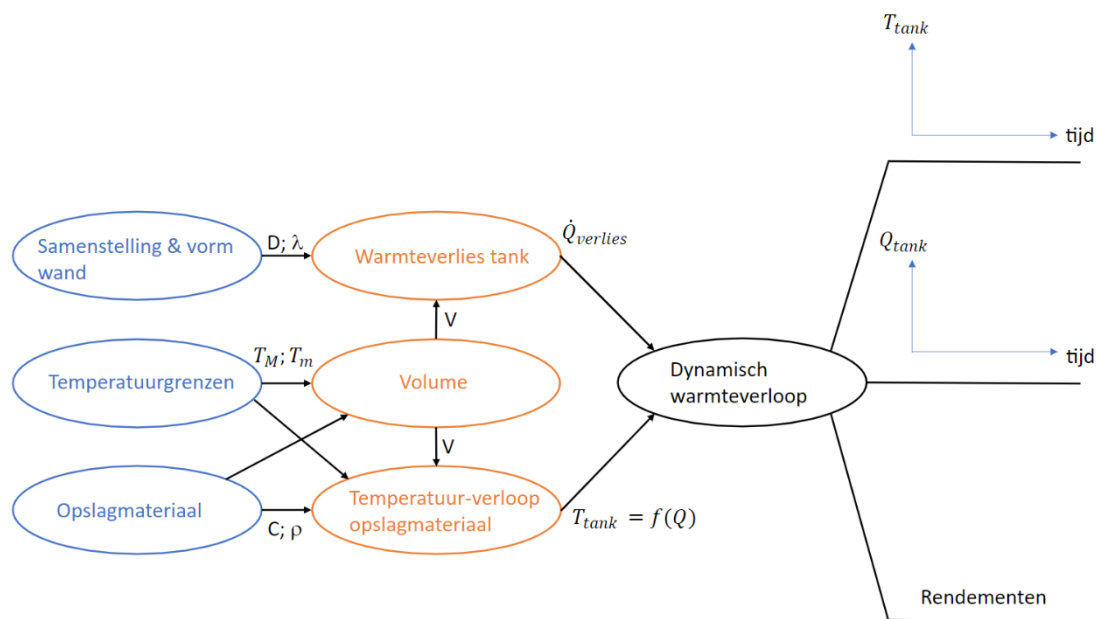


Figuur 67 Schematische voorstelling model

Figuur 67 geeft het model weer dat in de rekentool is beschreven, het bestaat uit een cilindrische tank met warmtewisselaars voor het laad-en ontlad-proces. Het ontladproces verloopt met een constant vermogen en op de temperatuur T_{min} . De wand van de tank heeft een uniforme samenstelling over alle vlakken, zowel bovenkant, onderkant en mantel zijn uit dezelfde materialen opgebouwd. De aansluitleidingen voor het laden en ontladen van de tank zijn ideaal aanschouwd, er zijn geen warmteverliezen in rekening gebracht voor deze leidingen.

5.2.2 Berekeningsschema van algemene werking

De eerste stap bij het uitwerken van een rekentool is het bepalen van de algemene werking. Om een beeld te krijgen van de algemene werking is er een berekeningsschema opgesteld (Figuur 68), waarin verschillende blokken te onderscheiden zijn. De interactie tussen de verschillende blokken geeft aan welke gegevens er doorstromen. Het berekeningsschema biedt tijdens het uitwerken een overzicht om het groter beeld niet uit het oog te verliezen.



Figuur 68 Berekeningsschema Thermische Energie- Opslag

5.2.2.1 Samenstelling & vorm wand

In deze blok kan de gebruiker de samenstelling van de tank opgeven. Het laat de gebruiker toe om verschillende materialen en diktes te simuleren. Naast de samenstelling is het ook mogelijk de vormverhouding van de tank te wijzigen.

5.2.2.2 Temperatuurgrenzen

Temperatuurgrenzen legt de thermische grenzen van het systeem vast. De gebruiker moet hier opgeven welke maximale en minimale temperaturen hij wil toepassen in het systeem. Naast thermische grenzen moet de gebruiker hier ook de omgevingstemperatuur ingeven.

5.2.2.3 Opslagmateriaal

Het blok "opslagmateriaal" geeft aan de gebruiker de keuze tussen verschillende thermische opslagmedia. Het geeft de gebruiker de mogelijkheid om verschillende media te vergelijken in éénzelfde systeem. De eigenschappen van de media zijn automatisch gelinkt aan de naam van dit medium zodat gebruikers geen kennis hoeven te hebben van de eigenschappen.

5.2.2.4 Warmteverlies tank

Na het opgeven van alle parameters berekent het blok “Warmteverlies tank” de warmteverliezen per graad temperatuursverschil. Dit warmteverlies per graad temperatuursverschil stelt het systeem in staat om het temperatuursverloop van de tank doorheen de tijd te berekenen.

5.2.2.5 Volume

Om de warmteverliezen van de opslagtank te berekenen moet er geweten zijn hoe groot de tank is. Het benodigd volume aan opslagmateriaal wordt berekend in het blok “Volume”. Temperatuurgrens en eigenschappen van het materiaal leggen het benodigd volume van de tank vast.

5.2.2.6 Temperatuursverloop opslagmateriaal

Om het temperatuursverloop doorheen de tijd te kunnen berekenen moet er geweten zijn welke hoeveelheid warmte overeenkomt met een bepaalde temperatuur in de tank. Het blok “Temperatuursverloop opslagmateriaal” geeft een formule voor de temperatuur wanneer een warmtehoeveelheid is opgegeven.

5.2.2.7 Dynamisch warmteverloop

Het blok “Dynamisch warmteverloop” berekent de temperatuursveranderingen doorheen de tijd. Daarvoor gaat het een interactie aan met de blokken “Warmteverlies tank” en “Temperatuursverloop materiaal”. Het blok berekent periodisch de aanwezige hoeveelheid warmte en bepaalt welke temperatuur hiermee overeenstemt. Deze periodische berekeningen worden dan uitgezet in een grafiek zodat de gebruiker een duidelijk beeld verkrijgt van het warmte-en temperatuursverloop.

5.2.3 Temperatuursverloop opslagmateriaal

Zoals aangehaald in paragraaf 5.2.2.6 legt het blok "Temperatuursverloop materiaal" het verband tussen de temperatuur van het materiaal en de hoeveelheid opgeslagen energie. Dit verband maakt het mogelijk om de temperatuur van het systeem te bepalen wanneer de energiehoeveelheid gekend is. Om dit verband op te stellen moeten de thermische eigenschappen van de gebruikte materialen gekend zijn. Verder is de materiaalkeuze en het verband tussen warmte-inhoud en temperatuur toegelicht, alsook de implementatie in Excel.

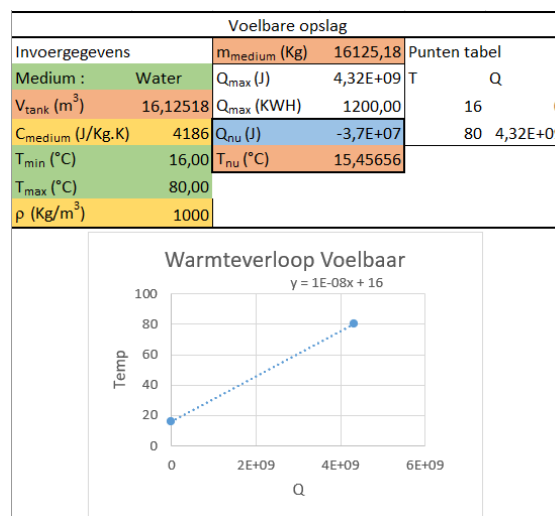
5.2.3.1 Voelbare warmteopslag

De meest eenvoudige vorm van thermische energieopslag is deze door middel van voelbare warmteopslag. Voelbare warmteopslag is niets meer dan het opwarmen van een materiaal. Eens de materiaaleigenschappen gekend zijn, is het verband tussen temperatuur en warmte-inhoud vastgelegd volgens: $Q = m * C * (T - T_{min})$ waarin C de warmtecapaciteit in J/Kg.K is. In de werkelijkheid is de warmtecapaciteit van een materiaal afhankelijk van de temperatuur. De warmte-inhoud moet dan iteratief of door middel van enthalpiën worden bepaald. In dit rekenmodel is er geen rekening gehouden met de veranderende eigenschappen van materialen doorheen het temperatuurs-bereik. Het model is dus een benadering van de realiteit. De eigenschappen van de gebruikte materialen komen uit: "An overview of thermal energy storage systems (Guruprasad , Yaxue, & Guiyin , 2018)".

Figuur 69 geeft de implementatie in Excel weer. De cel: "Q_{nu}(J)" vraagt een warmtehoeveelheid op in Joule, waarna cel: "T_{nu}(°C)" de overeenkomstige temperatuur weergeeft. Onderstaande formule geeft het verband tussen temperatuur en warmte-inhoud weer. In de groepering invoergegevens zijn de thermische eigenschappen van het gekozen materiaal en de grenzen van het opslagsysteem te vinden. Deze waardes zijn gebruikt in de bepaling van het benodigd volume volgens onderstaande formule. Het volume en massadichtheid leggen vast hoeveel massa er in de tank zit.

$$V_{tank} = \frac{Q_{max}}{\rho * C * (T_{max} - T_{min})}$$

$$T_{tank} = T_{min} + \frac{Q_{tank}}{m * C}$$



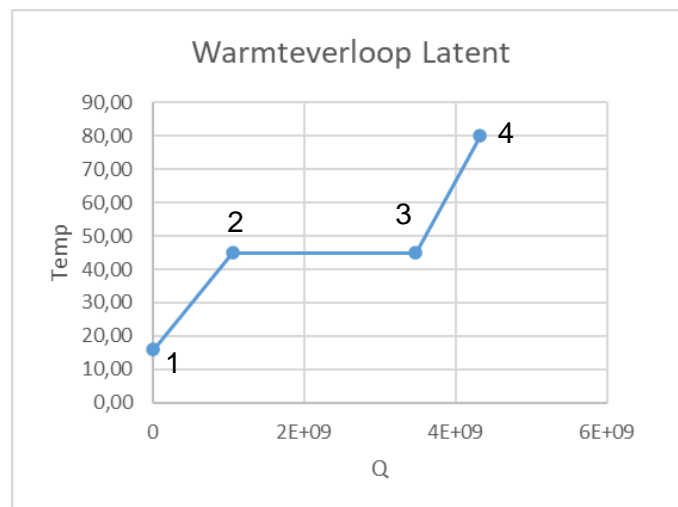
Figuur 69 Temperatuursverloop voelbare opslag

5.2.3.2 Latente warmteopslag

Latente warmteopslag is de opslag van warmte in een faseovergang. Het proces is daardoor moeilijker in één formule te beschrijven dan bij voelbare warmteopslag aangezien het materiaal in zowel vaste, gesmolten of de overgangstoestand kan zijn. Afhankelijk van de toestand gelden er andere verbanden tussen warmte-inhoud en temperatuur. Deze verschillende verbanden zijn in Tabel 11 gegeven. De faseovergang verloopt in werkelijkheid bij sommige materialen over een temperatuurs-bereik, ook wel het smelttraject genoemd. In dit model is er geen rekening gehouden met het smelttraject en zijn er vaste smeltemperatures gebruikt. De gebruikte materiaaleigenschappen komen uit: “*Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review* (da Cunha & Eames, 2016)”. Wanneer dit document een bereik opgaf voor een materiaaleigenschap is het gemiddelde van dit bereik overgenomen.

segment	1 → 2	2 → 3	3 → 4
T_{tank}	$T_{min} \rightarrow T_{smelt}$	$T_{smelt} \rightarrow T_{smelt}$	$T_{min} \rightarrow T_{max}$
Q_{tank}	$0 \rightarrow Q_{vast}$	$Q_{vast} \rightarrow Q_{vloeibaar}$	$Q_{vloeibaar} \rightarrow Q_{max}$
Verband	$Q_{tank} = m * C_{vast} * (T_{tank} - T_{amb})$	$\forall Q_{tank} \in [Q_{vast}; Q_{vloeibaar}] \Rightarrow T_{tank} = T_{smelt}$	$Q_{tank} = Q_{vloeibaar} + m * C_{vloeibaar} * (T_{tank} - T_{smelt})$

Tabel 11 Verband temperatuur en warmte-inhoud latente materialen



Figuur 70 Visuele voorstelling verband temperatuur en warmte-inhoud latente materialen

De cel “ $Q_{nu}(j)$ ” in Figuur 71 vraagt een warmtehoeveelheid op, waarna de overeenkomstige temperatuur verschijnt in cel “ $T_{nu}(^{\circ}C)$ “. Het bepalen van de toestand gebeurt door een vergelijking van de warmte-inhoud met deze in de knikpunten van de grafiek in Figuur 70. Vervolgens bepaalt het systeem de overeenkomstige formule en de temperatuur van de tank. Het systeem berekent het nodige volume faseovergangsmateriaal volgens onderstaande formule.

$$V_{tank} = \frac{Q_{max}}{\rho * [C_{vast} * (T_{smelt} - T_{min}) + C_{smelt} + C_{vl} * (T_{max} - T_{smelt})]}$$

Latente opslag			
Invoergegevens		Punten tabel	
Medium :	Paraffin wax	T	Q (KJ)
$V_{tank} (m^3)$	13,44537815	16,00	0
$C_{vast} (J/Kg.K)$	3000,00	45,00	1052773109
$C_{vloeibaar} (J/Kg.K)$	2000,00	45,00	3472941176
$C_{smelt}(J/K)$	200000,00	80,00	4320000000
$T_{min} (^{\circ}C)$	16,00		
$T_{max} (^{\circ}C)$	80,00	$Q_{nu} (J)$	-21247471,4
$T_{smelt} (^{\circ}C)$	45,00	$T_{nu} (^{\circ}C)$	16
$\rho (Kg/m^3)$	900,00		
$m_{medium} (Kg)$	12100,84034		

Figuur 71 Temperatuursverloop latente opslag

5.2.3.3 Chemisch

Bij chemische warmteopslag speelt de toestand waarin de chemische reactie plaatsvindt een grote rol in het verloop van de reactie, voornamelijk de temperatuur en druk die heersen tijdens de reactie zijn bepalend. Eenzelfde chemisch opslagmateriaal kan totaal andere resultaten geven indien de reacties onder verschillende drukken plaatsvinden.

Het opslagproces bij chemische warmteopslag verloopt anders dan bij latente of voelbare opslagsystemen. De warmte zit bevat in een chemische reactie, zolang er geen waterdamp aan het materiaal wordt aangevoerd blijft de warmte opgeslagen. Het systeem kan dus theoretisch warmte voor lange periodes opslaan zonder verliezen.

Het proces van chemische warmteopslag is moeilijk te modelleren in Excel en aangezien de rekentool is opgebouwd rond warmteverliezen door een temperatuursverschil tussen de tank en omgeving is de implementatie van chemische warmteopslag niet vanzelfsprekend. Het chemisch systeem moet door een apart model worden voorgesteld waarbij de gebruiker kan kiezen tussen de twee modellen afhankelijk van de gewenste methode van warmteopslag. Aangezien chemische warmteopslag een apart model vereist, is het niet opgenomen in de rekentool.

5.2.4 Warmteverlies Opslagtank

Het warmteverlies van de opslagtank hangt af van de samenstelling van de wand en de vorm van de tank. Om een zo correct mogelijk beeld te bekomen is er een warmteverlies-berekening opgesteld die het warmteverlies berekent afhankelijk van de opgegeven tank-parameters. De warmteverliezen zijn berekend volgens: “ prNBN B 62-002 “. Deze norm legt een methode op voor de warmteverliezen van gebouwen en is niet helemaal correct voor opslagtanks aangezien de temperatuur in de tank groter is dan deze in een woning. De warmteverliezen zijn dus niet helemaal correct maar de invloed van isolatie en vorm klopt wel met de realiteit, voor het doel van deze rekentool is het volgen van deze norm voldoende.

5.2.4.1 Bovengronds of ondergronds

In het rekenmodel heeft de gebruiker de keuze tussen een bovengrondse en ondergrondse opstelling van de tank. De keuze schakelt tussen de resultaten van de twee berekeningen. Om de keuze te geven aan de gebruiker zijn er dus twee berekeningen nodig. Het warmteverlies van de tank is de som van het verlies langs: het dak, de mantel en de bodem van de tank.

Vanuit de samenstelling van de wand is de totale warmteweerstand van de wand berekend. Dit resultaat is zowel bij de bovengrondse als de ondergrondse opstelling vereist. In Figuur 72 is de berekening van deze weerstand te zien, het is de som van de individuele warmteweerstanden van de wand.

Algemene warmteweerstand wand				
		D (m)	λ (W/m.K)	R_{laag} (m ² .K/W)
V_{medium} (m ³)	13,44537815	1	0,05	0,0285
β (L/R)	1,1	2	0,02	31,75
L_{binnen} (m)	1,730085393	3	0,02	0,7
R_{binnen} (m)	1,572804903	4	0	10
R_{buiten} (m)	1,662804903	5	0	10
L_{buiten} (m)	1,820085393			
			R_{totaal} (m ² .K/W)	1,783587315

Figuur 72 Warmteweerstand wand

Het dak van de tank ligt zowel bij de boven als ondergrondse opstelling aan de open lucht. De berekeningen van de warmteverliezen langs het dak zijn dus voor beide opstellingen gelijk. Figuur 73 geeft de berekening weer van het warmteverlies langs het dak. De warmteweerstand tussen het buitenoppervlak en de omgeving (R_{se}) is steeds $0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, ongeacht de richting van de warmtestroom. De warmteverliezen langs de mantel zijn berekend op dezelfde wijze als deze langs het dak. Bij de mantel moet er wel onderscheid worden gemaakt tussen boven en ondergrondse opstelling omdat de oppervlakte die boven de grond uitsteekt verschilt.

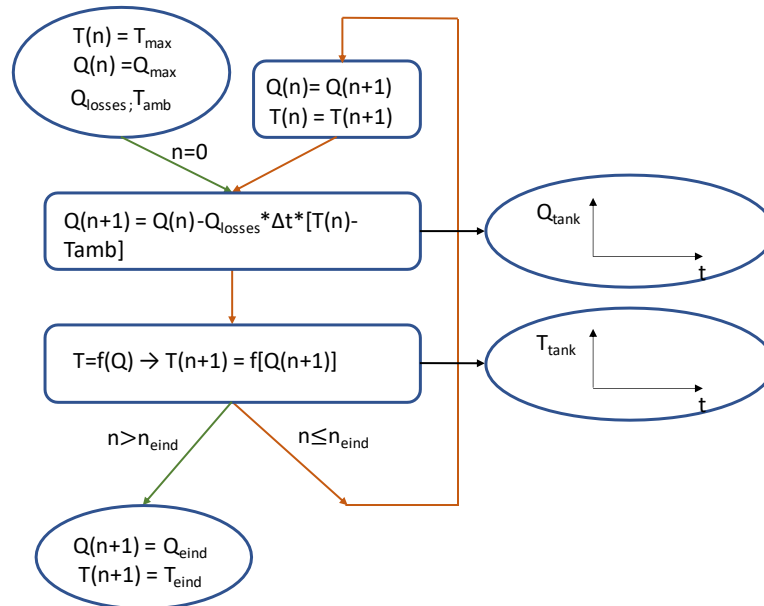
Dak	
$R_{\text{dak}} \text{ (m}^2 \cdot \text{K}/\text{W)}$	2,272727273
$R_{\text{se}} \text{ (m}^2 \cdot \text{K}/\text{W)}$	0,04
$U_{\text{dak}} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$	0,432389937
$A_{\text{dak}} \text{ (m}^2)$	8,273370912
$H_{\text{dak}} \text{ (W/K)}$	3,577322329

Figuur 73 Warmteverlies dak

De warmteverliezen langs de grond zijn voor beide opstellingen op een andere wijze berekend. Het gevulde stappenplan voor de bovengrondse opstelling staat beschreven in: "16.3 Niet ingegraven onderste vloeren van het BV in direct contact met de grond" in de norm. Voor de ondergrondse opstelling staat de berekeningsmethode beschreven in: "16.4 Ingegraven vloeren en muren van het BV in direct contact met de grond". Bij de bovengrondse opstelling is er gerekend zonder randisolatie. Wel is er in beide gevallen aangenomen dat de samenstelling van de bodem van de tank identiek is aan deze van de mantel en dak. De R_i/R_{bf} waarden in de berekeningen komen dus overeen met R_{totaal} van de wand.

5.2.5 Iteratieve bepaling warmte-en temperatuursverloop

Omdat de temperatuur van de tank verandert doorheen het opladen, opslaan en ontladen van het reservoir, zullen ook de warmteverliezen veranderen. De warmte-inhoud van de tank is dus niet noodzakelijk recht-evenredig met de tijd. Dit wijzigend karakter laat zich enkel modelleren door een algoritme dat zich per tijdsinterval herhaalt. Een kleiner tijdsinterval resulteert in nauwkeurigere resultaten maar vereist een langere berekeningstijd. In dit rekenmodel is gekozen voor een tijdsinterval van één uur. Aangezien het systeem traag is (opslagtijden van enkele dagen) en de temperatuur maar minimaal wijzigt over één uur, benaderen de bekomen resultaten het werkelijk verloop.

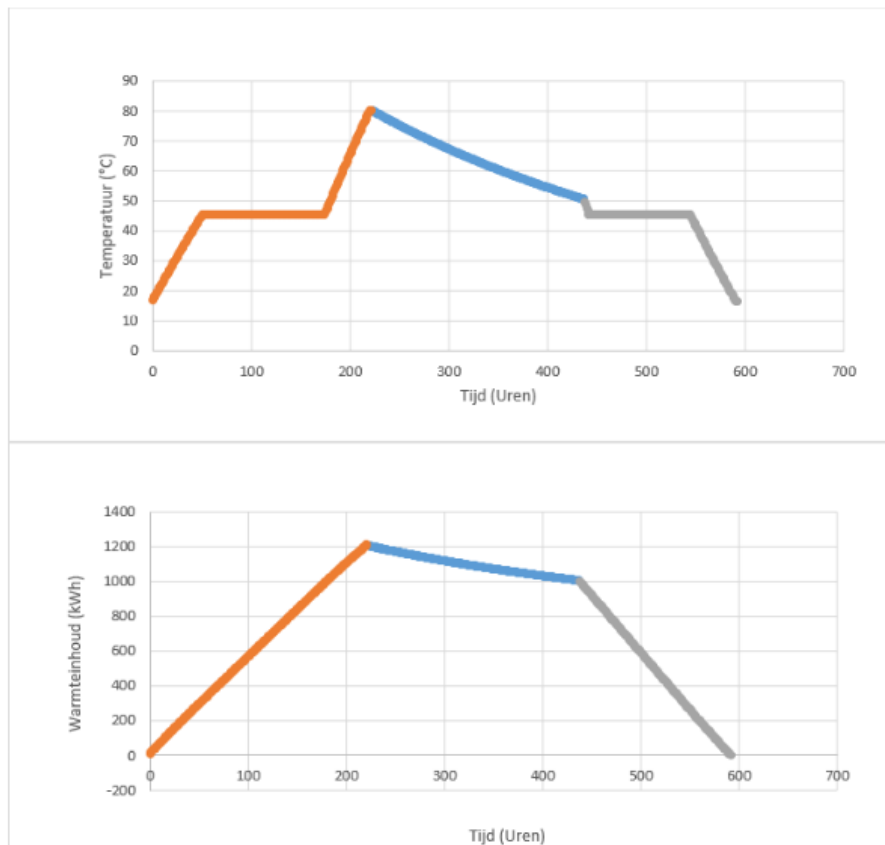


Figuur 74 Algoritme voor warmte-en temperatuursverloop

Figuur 74 geeft het gebruikte algoritme en ingevoerde randvoorwaarden voor het temperatuur en warmte-verloop tijdens opslag. De startgegevens zijn in dit geval een opgeladen tank: Q_{max} en T_{max} , verder is het warmteverlies per graad temperatuursverschil en de omgevingstemperatuur vereist. Deze startgegevens berekenen de eerste tijdsprong volgens volgende formule: $Q(1) = Q(0) - Q_{losses} * (T(0) - T_{amb}) * \Delta t$ met $\Delta t = 3600$ aangezien de tijdsstap één uur is. Nadien bepaalt het systeem de temperatuur overeenkomstig aan deze warmte-inhoud door middel van de verbanden beschreven in paragraaf 5.2.3. Het algoritme zal dan ook interageren met de cellen die het verband tussen temperatuur en warmte-inhoud geven om de temperatuur te bepalen.

Na bepaling van temperatuur en warmte-inhoud in de volgende tijdsstap schuiven de waarden door en berekent het algoritme opnieuw de toestand van een volgende stap. Na iedere stap volgt een vergelijking om te controleren of het systeem de eindtijd heeft bereikt. Wanneer het systeem de eindtijd heeft bereikt, schrijft het de laatste toestand onder de naam: "eind". Deze toestand bevat de startparameters voor het ontladproces en laat toe om het opslagrendement te berekenen volgens: $\eta_{opslag} = \frac{Q_{eind}}{Q_{max}}$.

Tijdens iedere iteratie schrijft het algoritme de toestand van de volgende stap weg in een tabel. De toestanden worden uitgezet in een grafiek zodanig dat de gebruiker een overzichtelijk beeld krijgt van het toestandsverloop van het systeem doorheen de tijd. Figuur 75 geeft een voorbeeld van de grafieken die het toestandsverloop weergeven. Deze grafieken zijn opgesteld met paraffine als faseovergangsmateriaal. De oranje curve geeft het laadproces van de tank weer, de blauwe curve is het verloop tijdens de opslagtermijn en de grijze curve geeft het ontladproces weer.



Figuur 75 Grafieken met toestandsverloop voor latente materialen

5.2.6 Interactie met gebruiker

In de voorgaande paragrafen is de nadruk gelegd op de technische achtergrond van het model. Om het model zo laagdrempelig mogelijk te maken, is er voornamelijk gewerkt met keuzemenu's zodanig dat gebruikers enkel voorgeprogrammeerde waardes kunnen instellen. Er zijn controlemechanismen ingebouwd die de geldigheid van ingevulde waardes controleren en mogelijke fouten aanduiden. Algemeen zijn de cellen waar de gebruiker iets kan invullen/aanpassen in het groen aangeduid. Terugggekoppelde resultaten zijn in oranje cellen weergegeven.

5.2.6.1 Keuze opslagmedium

In dit menu kan de gebruiker kiezen uit een breed gamma aan opslagmaterialen. Om te beginnen kiest de gebruiker of het systeem moet rekenen met een latent of een voelbaar materiaal. Nadien kiest hij het gebruikte materiaal. Indien een latent systeem is gekozen houdt de simulatie geen rekening met aanpassingen in het voelbare deel en omgekeerd. Wanneer de gebruiker wenst te werken met een latent materiaal moet ook steeds het type worden opgegeven. Ook hier geldt weer de regel dat de simulatie enkel rekening houdt met de gekozen categorie. De eigenschappen van de geselecteerde materialen zijn terugggekoppeld aan de gebruiker. Zo kan de gebruiker zonder voorkennis van de materialen toch een logische simulatie maken en controleren waar eventuele fouten uit voortkomen.

Voelbaar of Latent systeem ?		Latent
Materiaal voor warmteopslag:		
Voelbaar		Latent
Medium	Water	Type
		Organisch
ρ	1000 Kg/m ³	Paraffin wax
T_{max}	100 °C	Eutectisch
T_{min}	0 °C	Zout-Hydraten
C	4186 J/Kg.K	Sodium sulphate decahydrate
		T_{smelt}
		45,00 °C
		C_{smelt}
		200000,00 J/Kg
		C_{vast}
		3000,00 J/KgK
		$C_{vloeibaar}$
		2000,00 J/KgK
		ρ
		900,00 Kg/m ³

Figuur 76 Keuzemenu opslagmaterialen

5.2.6.2 Samenstelling en vormverhouding tank

De tank heeft steeds een cilindrische vorm. De verhouding tussen straal en hoogte van de tank is instelbaar via de vormverhouding. Dit laat toe om het effect van de tankvorm op het warmte-verloop te bekijken. Het menu biedt de gebruiker ook de mogelijkheid om te kiezen tussen een boven- of ondergrondse plaatsing. Wanneer ondergrondse plaatsing is geselecteerd heeft de gebruiker de vrijheid om ook de ingraafdiepte in te geven. Zoals aangehaald in paragraaf 5.2.4 moet de bovenkant van de tank steeds aan het oppervlak blijven. De ingraafdiepte mag dus niet groter zijn dan de hoogte van de tank.

In de menu "samenstelling wand" heeft de gebruiker de mogelijkheid om de samenstelling van de wand te selecteren. Meer specifiek kan in de eerste kolom een materiaal worden geselecteerd en vervolgens in de tweede kolom de dikte van deze laag. Het model laat toe om tot maximaal vijf lagen te simuleren. Om de gebruiker een beter beeld te geven van de thermische eigenschappen van de materialen zijn de geleidbaarheid en dichtheid teruggekoppeld.

Tank			
Plaatsing	Bovengronds		
Vormverhouding	1,1 β		
Totale hoogte tank	1,82008539 m		
Ingraafdiepte	0,01 m		
Samenstelling Wand			
Naam	D_{laag} (cm)	λ_{laag} (W/m.K)	ρ (Kg/m ³)
Polyurethane	5	0,0285	95
Staal	2	31,75	2570
Baksteen	2	0,7	1600
		#N/B	#N/B
		#N/B	#N/B

Figuur 77 Parameters tank

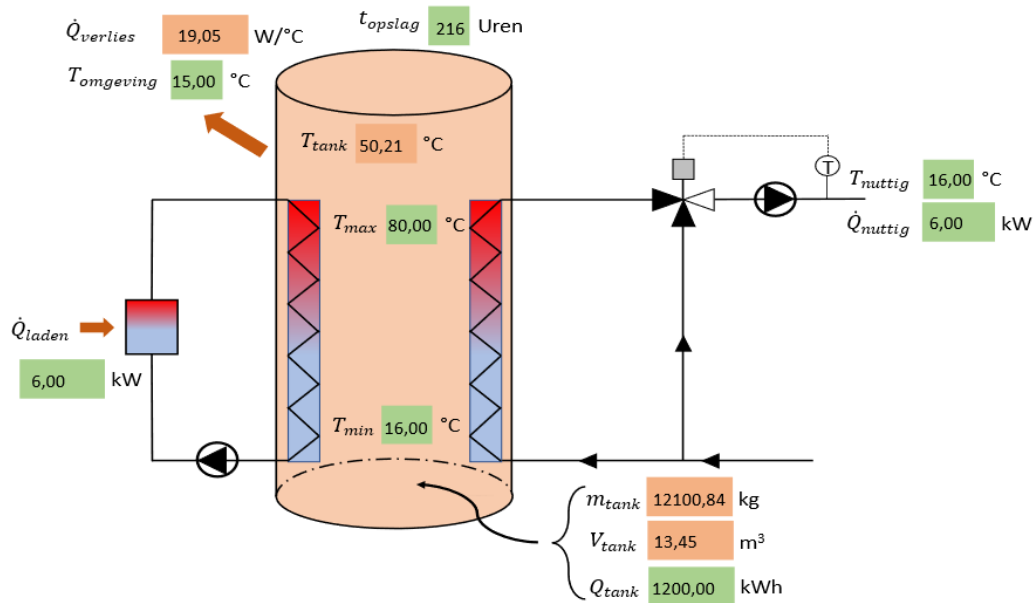
5.2.6.3 Thermische grenzen systeem

Het menu thermische grenzen laat toe om de temperatuurs-grenzen van het systeem en de omgevingstemperatuur in te stellen. Naast deze temperaturen laat het menu ook toe de capaciteit en de laad-en ontladvermogens in te stellen. Bij latente systemen zijn de laad-en ontladvermogens beperkt aangezien faseovergangsmaterialen moeilijk warmte transporteren in hun vaste toestand. Deze beperking is in het model vast ingesteld op 0.5% van de totale capaciteit van de tank. Bij latente systemen duurt het laadproces dus minimaal 200 uren indien er geen warmteverliezen optreden. Voelbare opslagsystemen vereisen geen beperking van laad en ontladvermogen. In de invoercellen zijn gepaste controles ingebouwd, het systeem geeft aan wanneer er een waarde is ingevuld die praktisch niet mogelijk is of niet klopt met het vooropgestelde model. Zo is er bijvoorbeeld een controle ingebouwd bij T_{max} , deze moet steeds kleiner zijn dan de maximale temperatuur van het materiaal én groter dan T_{min} .

Thermische invoergegevens	
Limiet Laad/Ontladvermogen	6 kW
Laadvermogen	6,00 kW
Opslagcapaciteit	1200,00 kWh
Ontladvermogen	6,00 kW
T_{omgeving}	15,00 °C
T_{min}	16,00 °C
T_{max}	80,00 °C
Opslagtijd	216 Uren

Figuur 78 Thermische grenzen systeem

Figuur 79 geeft een visuele voorstelling van de ingestelde thermische eigenschappen. Deze visuele voorstelling verduidelijkt de ingestelde parameters en geeft ook de thermische prestatie van het systeem aan. Zo is de temperatuur op het einde van de opslagtermijn en het warmteverlies per graad temperatuursverschil af te lezen.



Figuur 79 Visualisatie parameters op model

5.2.7 Vergelijking van systemen a.d.h.v. een voorbeeld

Om de werking van het model te illustreren is in deze paragraaf een vergelijking gemaakt tussen drie verschillende thermische opslagsystemen. Onderling verschillen de systemen enkel in gebruikte opslagmaterialen en temperatuurgrenzen. De constructie van tank en laad- en ontladvermogens zijn voor alle drie de simulaties gelijk. Zo kan het gedrag van de gebruikte materialen worden vergeleken.

5.2.7.1 Gemeenschappelijke eigenschappen

De gesimuleerde tank heeft een samenstelling volgens Figuur 80. De gebruikte tank is niet ingegraven en heeft een vormverhouding van 2. Dit wil zeggen dat de hoogte van de tank dubbel zo groot is als de straal van het grondoppervlak. De hoogte is dus gelijk aan de diameter. Verder is een wandsamenstelling gekozen die de realiteit simuleert, een inox opslagvat met rotswol als isolatiemateriaal omhuld door een afwerklaag van beton.

Tank				
Plaatsing	Bovengronds			
Vormverhouding	2 β			
Totale hoogte tank	3,801903973 m			
Ingraafdiepte	0 m			
Samenstelling Wand				
Naam	D _{laag} (cm)	λ_{laag} (W/m.K)	ρ (Kg/m ³)	
Licht beton	10	0,12	551	
Rotswol	5	0,037	120	
Staal (Inox)	0,5	8,09	2550	
			#N/B	#N/B
			#N/B	#N/B

Figuur 80 Constructie opslagtank

Naast een gemeenschappelijke tankconstructie zijn ook dezelfde thermische vereisten toegepast voor ieder systeem. Figuur 81 geeft een overzicht van de gestelde eisen. Ieder systeem werd gedimensioneerd op een capaciteit van 3000kWh met laad/ontladvermogens van 6kW. Daarnaast is nog gesteld dat het systeem de warmte voor 600 uren moet opslaan alvorens te kunnen ontladen. De omgevingstemperatuur is ingesteld op 10°C.

Thermische invoergegevens	
Limiet Laad/Ontladvermogen	15 kW
Laadvermogen	6,00 kW
Opslagcapaciteit	3000,00 kWh
Ontladvermogen	6,00 kW
T _{omgeving}	10,00 °C
T _{min}	30,00 °C
T _{max}	80,00 °C
Opslagtijd	600 Uren

Figuur 81 Thermische vereisten

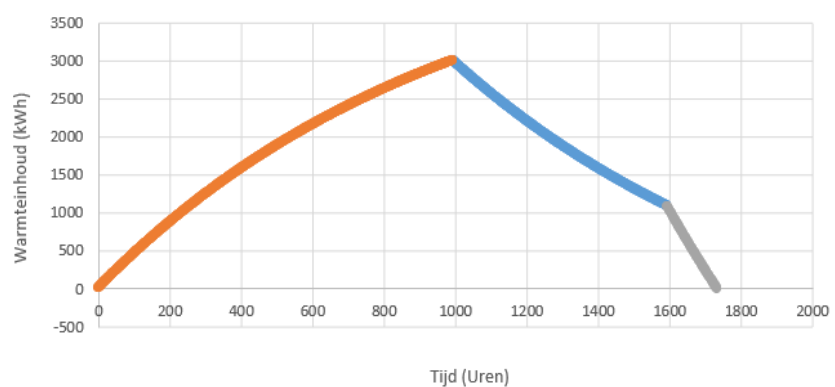
5.2.7.2 Simulatie één : Voelbaar

Als voelbaar materiaal is er gekozen voor: “Xceltherm600”, Figuur 82 geeft de eigenschappen van deze olie weer. De temperatuurgrenzen zijn echter ingesteld van 30°C tot 80°C om een vergelijkbaar temperatuurbereik te bekomen met de volgende simulaties.

Voelbaar		
Medium	Xceltherm600 (olie)	
ρ		736 Kg/m ³
T_{max}		301 °C
T_{min}		0 °C
C		2643 J/Kg.K

Figuur 82 Eigenschappen Xceltherm600

Resultaten	
$Q_{verlies}$ (W/K)	60,71
V_{medium} (m ³)	111,04
T_{eind} (°C)	48,13
Q_{eind} (kWh)	1088,01
η_{opslag} (%)	36,27
m_{medium} (Kg)	81725,31
t_{laden} (Uren)	994,00
η_{laden} (%)	50,30
$t_{ontlaad}$ (Uren)	141,00
η_{totaal} (%)	14,19



Figuur 83 Resultaten simulatie één

Aangezien er bij voelbare warmteopslag een lineair verband heerst tussen de temperatuur en de warmte-inhoud, is enkel het verloop van de warmte-inhoud weergegeven. Het verloop van de temperatuur volgt dezelfde curve maar dan op een andere schaal.

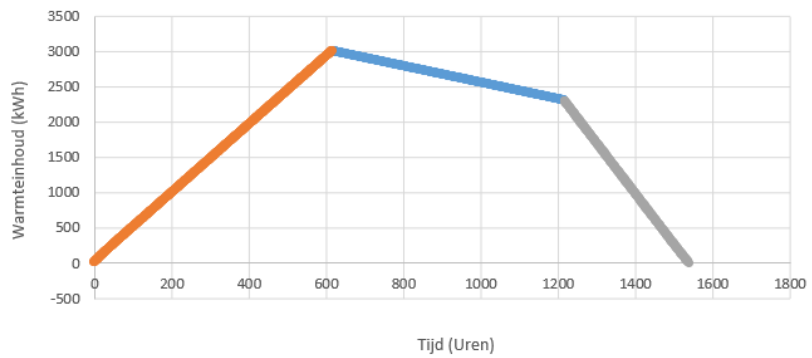
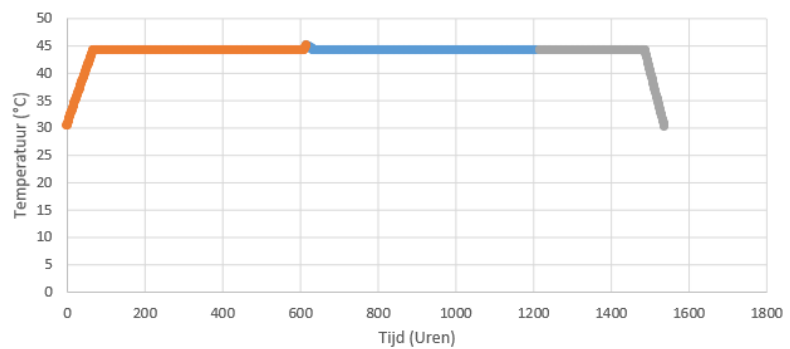
5.2.7.3 Simulatie twee : Latent met nauwe grenzen

De tweede simulatie is uitgevoerd met een latent opslagmateriaal met nauwe grenzen. Dit betekent dat de minimale en maximale temperatuur bijna overeenkomen met de smelttemperatuur van het materiaal. Als faseovergangsmateriaal is er gekozen voor:” Lauric acid” of ook wel laurinezuur. Deze stof is een verzadigd vetzuur dat voorkomt in kokosolie. De smelttemperatuur van 44°C ligt in de buurt van de nuttige temperatuur van 30°C voor dit systeem. In Figuur 84 geeft de eigenschappen van laurinezuur weer. De temperatuurgrenzen zijn ingesteld op 30°C en 45°C. Verder zijn er geen parameters gewijzigd t.o.v. de voelbare simulatie. (Wikipedia, 2018)

Latent	
Type	Organisch
Organisch	Lauric acid
Eutectisch	HCOONa-HCOOK
Zout-Hydraten	Sodium sulphate decahydrate
T_{smelt}	44,00 °C
C_{smelt}	212000,00 J/Kg
C_{vast}	2020,00 J/KgK
$C_{vloeibaar}$	2150,00 J/KgK
ρ	1007,00 Kg/m ³

Figuur 84 Eigenschappen Lauric acid

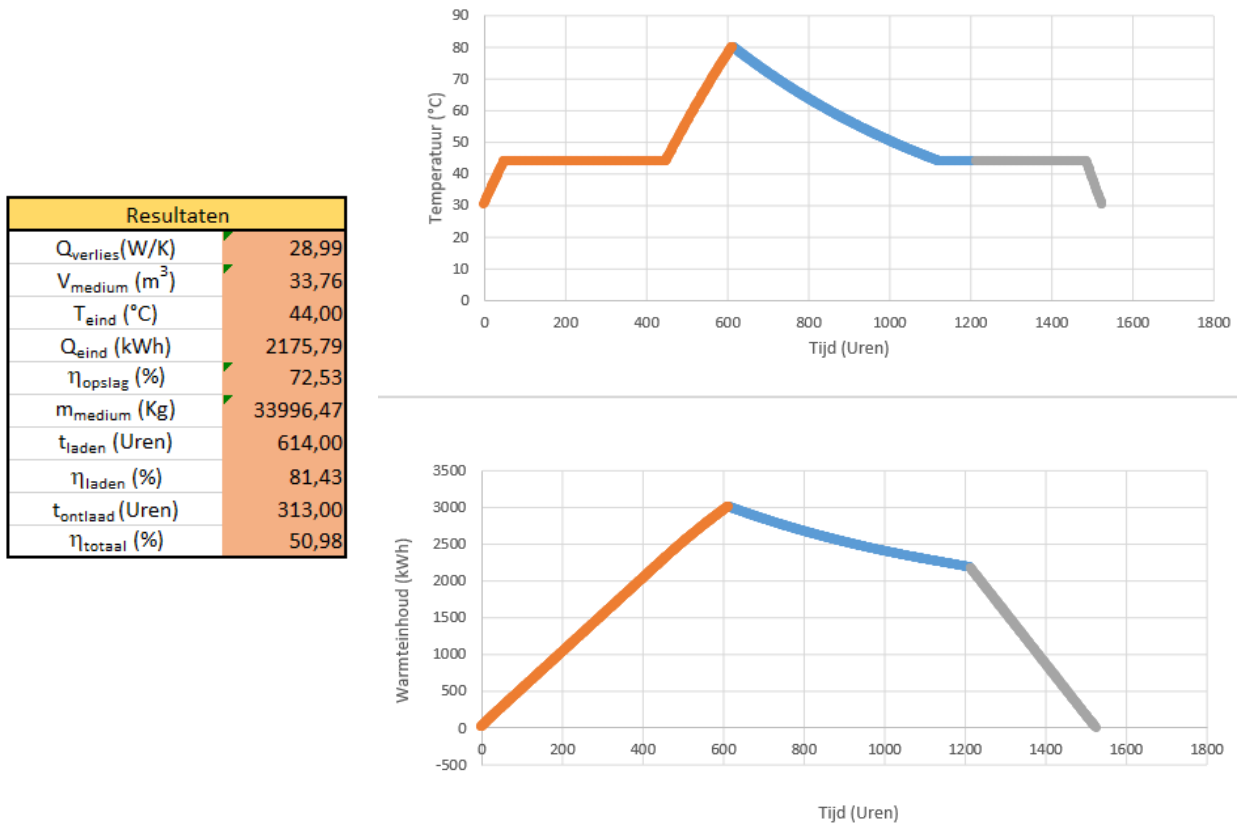
Resultaten	
$Q_{verlies}$ (W/K)	34,24
V_{medium} (m ³)	44,24
T_{eind} (°C)	44,00
Q_{eind} (kWh)	2301,02
η_{opslag} (%)	76,70
m_{medium} (Kg)	44548,94
t_{laden} (Uren)	617,00
η_{laden} (%)	81,04
$t_{ontlaad}$ (Uren)	323,00
η_{totaal} (%)	52,35



Figuur 85 Resultaten simulatie twee

5.2.7.4 Systeem drie : Latent met brede grenzen

De laatste simulatie is opnieuw uitgevoerd met het faseovergangsmateriaal laurinezuur. De maximale temperatuur is in deze simulatie echter 80°C , net zoals in simulatie één. Het is een combinatie van een zuiver latent en voelbaar systeem.



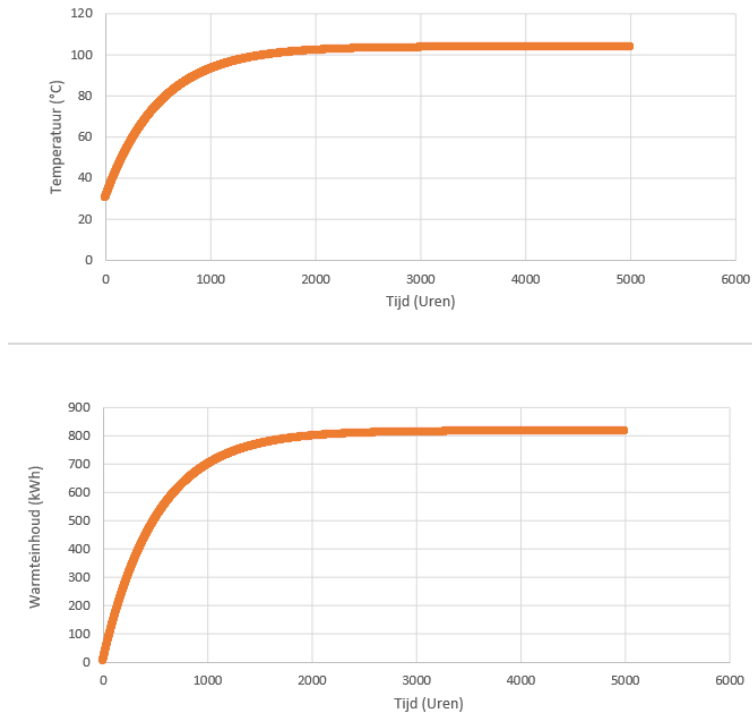
Figuur 86 Resultaten simulatie drie

5.2.7.5 Bespreking resultaten

Het grootste totale rendement werd bekomen bij de tweede simulatie. Dit is het gevolg van de lagere temperaturen in het systeem aangezien de tank zich bijna altijd op de smeltemperatuur bevond. Een lagere tanktemperatuur resulteert in kleinere warmteverliezen naar de omgeving en dus is het totale rendement van het systeem groter. Daarnaast is het benodigd volume bij een latent systeem kleiner dan dit bij een voelbaar systeem, in de simulaties 44m³ t.o.v. 111m³. Een kleinere tank heeft minder buitenoppervlak en zal dus ook minder warmte verliezen per graad temperatuurverschil met de omgeving. Dit is ook rechtstreeks uit de resultaten af te leiden.

Wanneer de grootte van de opslagtank de beperkende factor is bij de capaciteit van een thermisch opslagsysteem is het ook mogelijk een latent systeem met brede temperatuurgrenzen te nemen, dit is in simulatie drie nagebootst. Het benodigd volume in de derde simulatie is kleiner dan dit in de tweede simulatie: 33.8m³ t.o.v. 44m³. Ondanks het kleinere volume is ook het bekomen rendement kleiner dan in simulatie twee. Dit is het resultaat van de hogere temperaturen in het systeem.

Bij het voelbaar systeem is duidelijk een buiging te zien in het warmte-verloop tijdens het oplaadproces. Naarmate de temperatuur in de tank stijgt nemen de warmteverliezen van de tank toe. Steeds meer van het aangevoerde laadvermogen gaat onmiddellijk verloren als warmteverlies. In het meest extreme geval is het warmteverlies gelijk aan het laadvermogen. De temperatuur van de tank kan in dat geval niet meer toenemen. Figuur 87 geeft een illustratie van deze maximale temperatuur en warmte-inhoud. Bij latente systemen is dit fenomeen veel minder of zelfs niet waar te nemen. De temperatuur van de tank blijft bij latente systemen tijdens het smeltproces constant, de warmteverliezen dus ook. Als gevolg is het warmteverloop lineair.



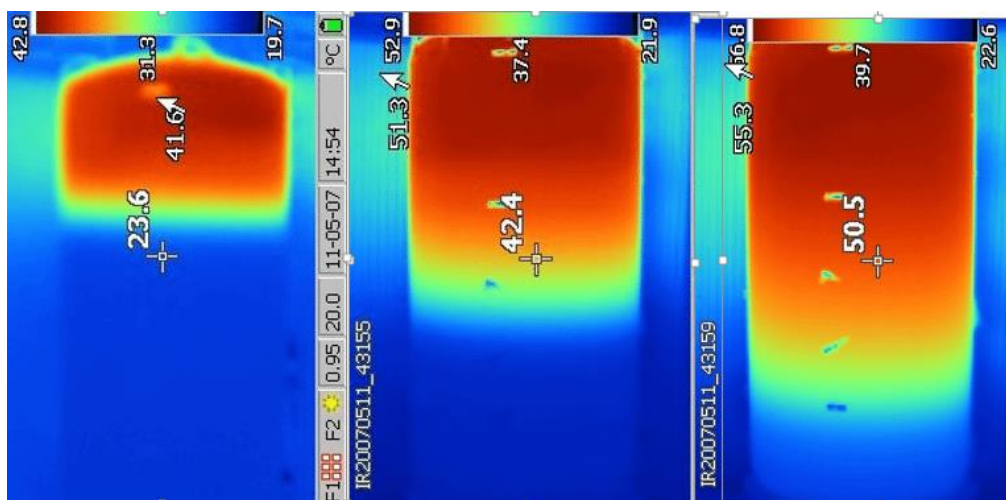
Figuur 87 Maximale eindtoestand voelbaar systeem

5.2.8 Beperkingen van het model

Bij het opstellen van het model zijn er bepaalde aannames gedaan die afwijken van het gedrag in de realiteit. Hier volgt een overzicht van de belangrijkste aannames en hun gevolgen. Het systeem is een benadering van de realiteit, voor een technische dimensionering van een thermisch opslagsysteem voldoet het opgestelde model niet. Om gebruikers meer inzicht te geven in de werking en principes van een thermisch opslagsysteem voldoet het model wel.

5.2.8.1 Verwaarlozing stratificatie

In werkelijkheid is de temperatuur in een thermisch buffervat niet op elke plaats gelijk. De temperatuur van het fluïdum volgt een stijgend verloop naarmate het zich hoger in de tank bevindt. Deze stratificatie is het gevolg van een dichtheidsverandering tussen de koude en warme vloeistof. Wanneer een fluïdum opwarmt neemt de dichtheid af, de warmere vloeistof drijft op de koelere, “zwaardere” vloeistof. Figuur 88 geeft de stratificatie in een buffervat duidelijk weer. Het verloop van de temperatuurgradiënt door stratificatie is moeilijk te modelleren, het zou een grote berekening vereisen in Excel. Om het rekenmodel niet onnodig te vertragen is er besloten om geen rekening te houden met de thermische gelaagdheid in de tank. Het model beschouwt de tank dus steeds op een uniforme temperatuur. Het is alsof de tank voortdurend ideaal gemengd is.



Figuur 88 Stratificatie thermisch buffervat

5.2.8.2 Constant laad-en ontladvermogen

In het model verloopt het laden en ontladen van de tank met een constant vermogen. In de realiteit zullen deze vermogens niet constant zijn maar veranderen naarmate er meer thermische energie beschikbaar is om de tank te laden of er meer warmtevraag is. Zonnecollectoren zijn bijvoorbeeld een warmtebron die geen constant warmtevermogen leveren. Het verbruik van sanitair warm water is erg verspreid in de tijd, het is allesbehalve een constant vermogen.

5.2.8.3 Verwaarlozing warmteverliezen aansluitingen van tank

Om een warmtevermogen uit te wisselen met het systeem, zijn er aansluitingen aan de tank nodig. Deze aansluitingen perforeren de isolatielagen van het buffervat, ze vormen een imperfectie in de isolatie. Langs deze aansluitingen zal dus een extra warmteverlies optreden. In het model is geen rekening gehouden met de effecten van deze aansluitingen aan de tank.

5.2.8.4 Eigenschappen materiaal constant over temperatuurs-bereik

Zoals in paragraaf 5.2.3.1 aangehaald is er geen rekening gehouden met de verandering van thermische eigenschappen bij een wijzigende temperatuur. Om een correct model te bekomen moet er van de opslag- en isolatiematerialen geweten zijn welke de eigenschappen zijn bij iedere temperatuur. Zo zou er een tabel kunnen worden opgesteld waarbij het dynamische algoritme bij iedere cyclus de materiaaleigenschappen opzoekt en vervolgens de berekeningen pas uitvoert. Aangezien materiaaleigenschappen slechts weinig wijzigen en het toevoegen van deze stappen het model enorm vertraagt is de stap achterwege gelaten. Het doel van dit rekenmodel laat deze kleine fouten toe, er is dus geen nood aan deze uitbreiding.

5.2.8.5 Laad-en ontladbeperkingen latent systeem

Zoals aangehaald in paragraaf 0 is voor latente materialen een beperking van de laad-en ontladvermogens ingesteld. Deze beperking is vereist aangezien latente materialen in hun vaste toestand moeilijker warmte transporteren dan in de vloeibare toestand. Het vermogen waarmee de materialen warmte wisselen is dus begrensd. Deze begrenzing is voor ieder materiaal verschillend en hangt daarnaast ook nog eens af van de geometrie en opstelling van de warmtewisselaar. Zo zullen faseovergangsmaterialen ingekapseld in bollen die ingebracht zijn in een tank gevuld met transportvloeistof sneller warmte kunnen wisselen dan een tank volledig gevuld met faseovergangsmateriaal en een spiraal als warmtewisselaar. Omdat de eigenschappen niet voor ieder materiaal gekend zijn is er een globale beperking van 0.5% van de capaciteit ingesteld.

6 LAY-OUT VAN DE VASTE LOCATIE

Dit hoofdstuk gaat over de vormgeving en de indeling van de verschillende hernieuwbare energietechnieken. We bespreken de presentatie van de technieken en proberen aan de hand van schetsen een beeld te scheppen van de vaste locatie. Dit resulteert in een mogelijk grondplan van TREH. De plannen kunnen later dienen als visuele ondersteuning om potentiële partners te betrekken bij het project. Naast een visuele ondersteuning is het ook een bron van inspiratie voor de inkleding van de uiteindelijke vaste locatie

6.1 Initiële verdeling

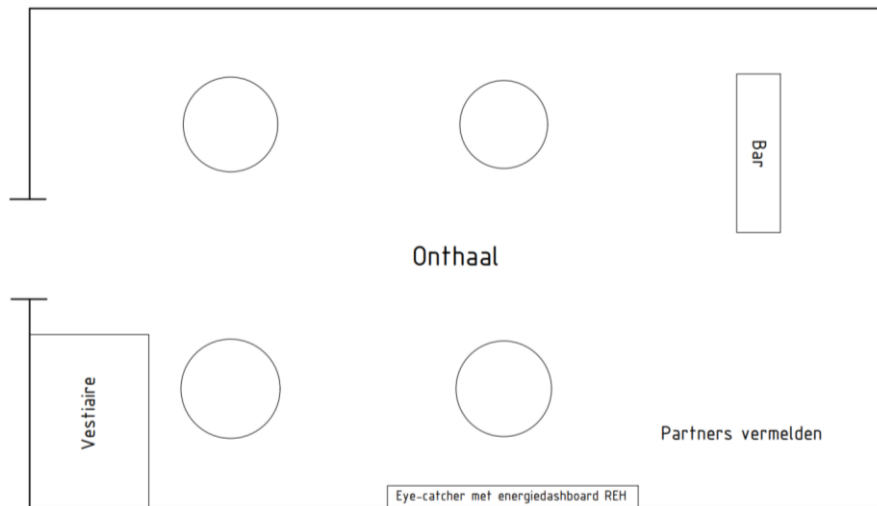
In een eerste fase zijn de technieken ingedeeld in vijf hoofdgroepen met elk hun belangrijke aspecten. Deze vijf groepen vertegenwoordigen telkens een aparte ruimte. Tabel 12 geeft een overzicht. Ter illustratie zijn er ook enkele Inventor tekeningen gemaakt.

Hoofdrimte	Groep 1: Productie elektrische energie	Groep 2: Productie thermische energie	Groep 3: Energie-transport en -verbruik	Groep 4: Energieopslag	Groep 5: Samenhang en toekomst
Bar	PV	Zonneboiler	Warmtenet	Thermische energieopslag	Energietransitie
Vestiaire en toilet	Wind	Geothermie	Transportgang	Elektrische energieopslag	Beeld van morgen
Statafels	Waterkracht	Biomassa		Waterstof	

Tabel 12 Groepering ruimtes

6.1.1 Hoofdrimte

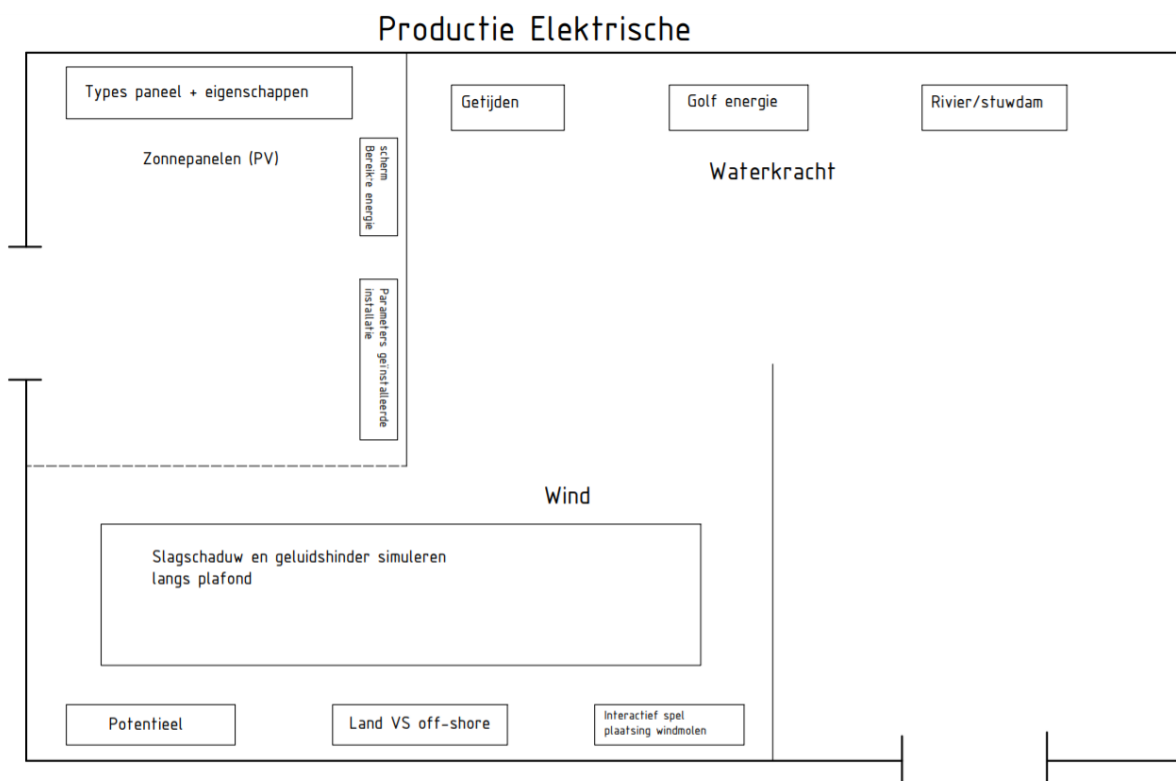
De eerste ruimte die men betreedt is de hoofdrimte, enerzijds gebruikt om bezoekers professioneel te ontvangen en anderzijds geeft deze ruimte de kans om na rondgang te overleggen. De ruimte is voorzien van een bar, enkele statafels en een vestiaire. De hoofdrimte geeft een eerste impressie van TREH en moet dus een goede indruk nalaten. Hier krijgen de bezoekers een korte inleiding en start de rondgang. Partners en investeerders staan vermeld op een scherm aan de zijkant van de ruimte. Als laatste is ook een energie-dashboard van TREH voorzien als eye-catcher. Aan de hand van het dashboard krijgen bezoekers het energieverbruik en de energieproductie van TREH te zien. Deze energieproductie is bijvoorbeeld afkomstig van zonnepanelen op het dak.



Figuur 89 Hoofdrimte

6.1.2 Productie elektrische energie

De bezoekers krijgen in deze ruimte te zien welke technieken er allemaal bestaan om op een hernieuwbare wijze elektriciteit op te wekken. De hernieuwbare technieken die zorgen voor elektrische energieproductie zijn voornamelijk PV-panelen, windturbines en waterkracht.



Figuur 90 Elektrische energieproductie

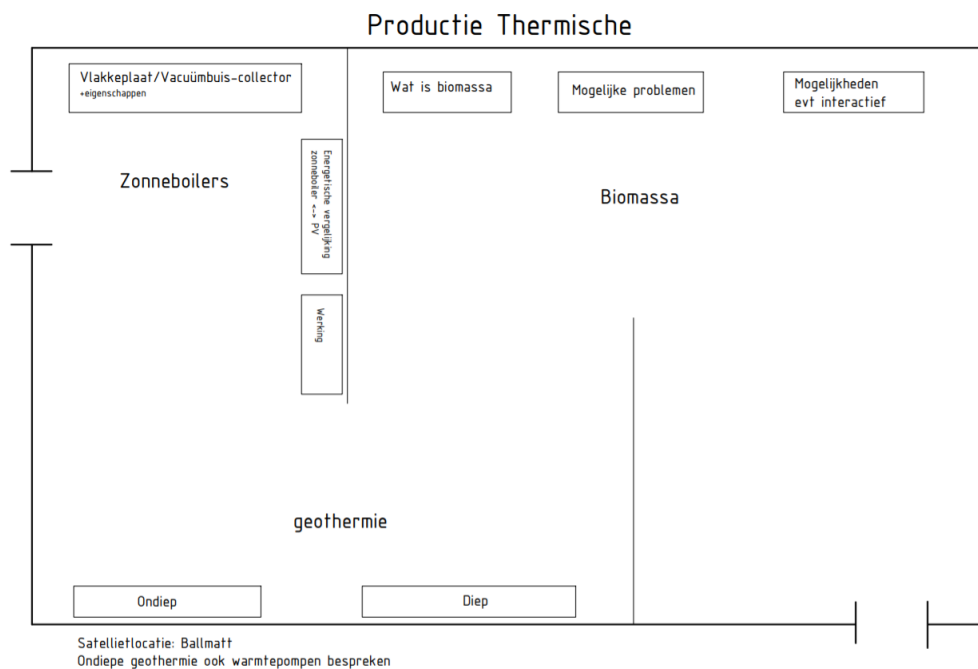
Het segment PV toont de verschillende types van zonnepanelen, bijvoorbeeld poly- en monokristallijne panelen, amorf, bi-faciale en flexibele panelen. Ook leren de gebruikers hier het effect van schaduw op de PV-installatie.

Vervolgens maken de bezoekers kennis met de verschillende types windturbines met elk hun eigenschappen en potentieel. Ook de vergelijking tussen on- en offshore windturbines komt aan bod. Het effect van slagschaduw en geluidhinder wordt gesimuleerd door middel van een LED-rider en gepaste speakers in het plafond.

Een ander deel van de ruimte is voorbehouden voor waterkrachtcentrales, stuwdammen, getijdenenergie en golfenergie. De uitleg van deze technieken kan met een maquette en digitale ondersteuning via Tv-schermen.

6.1.3 Productie thermische energie

Een volgende ruimte laat zonneboilers, geothermie en biomassa.



Figuur 91 Thermische energieproductie

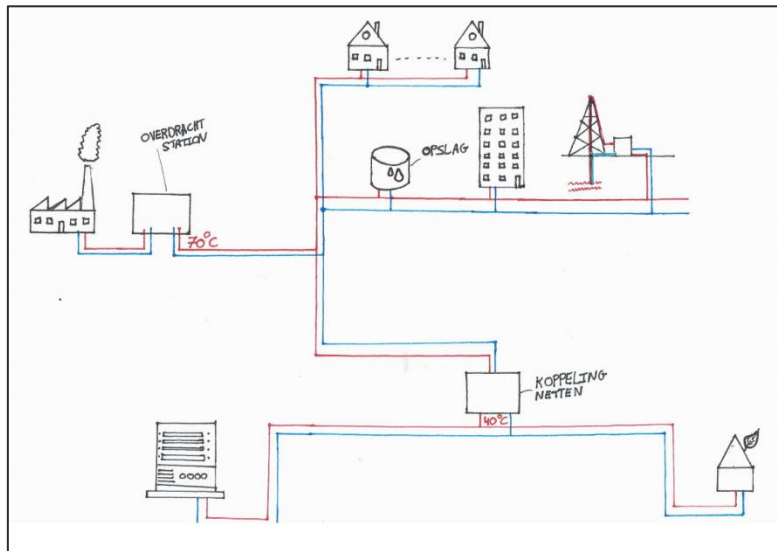
De bezoeker ontvangt hier informatie over de werking van verschillende types zonneboilers, zoals vlakkeplaat- en vacuümbuiscollector. Daarnaast is er ook een energetische vergelijking tussen PV-panelen en zonnecollectoren te zien.

Geothermie is opgedeeld in diep en ondiepe geothermie. De twee soorten worden individueel besproken. Voor beide systemen kan een virtual reality model waarbij de bezoeker een waterdeeltje volgt van begin tot einde worden opgesteld. Aangezien bij diepe geothermie het plaatsen van een werkende installatie onhaalbaar is, verwijzen we geïnteresseerde bezoekers door naar de Balmatt site in Mol.

Als laatste krijgen bezoekers nog informatie over biomassa. De definitie van biomassa en de voornaamste omvormtechnieken komen aan bod. Dit gaat over technieken zoals fermentatie, pyrolyse, verbranding en vergassing. Deze informatie wordt getoond aan de hand van Tv-schermen en projecties.

6.1.4 Energietransport en -verbruik

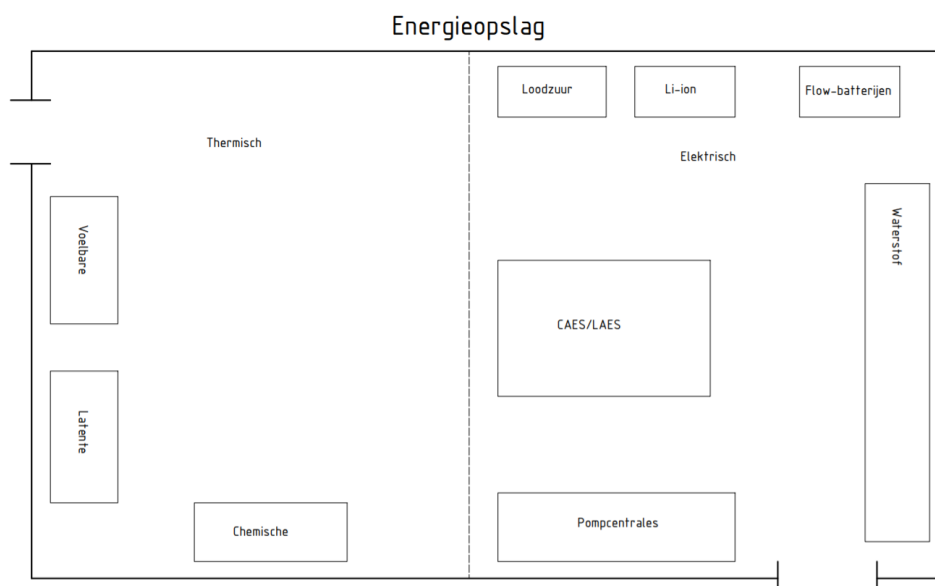
Deze ruimte illustreert de verschillende manieren om energie te transporteren, hierbij gaat het enerzijds over het elektriciteitsnet en anderzijds over warmtenetten. Op de vloer in de ruimte wordt een vereenvoudigd warmte-en elektriciteitsnet getekend. In deze tekening komt op de plaats van de belangrijkste componenten een Tv-scherm met uitleg over deze component. Figuur 92 geeft een mogelijke tekening op de vloer. Op deze manier krijgen bezoekers op een overzichtelijke manier informatie over complexe netten.



Figuur 92 Toepassing van warmtenetten

6.1.5 Energieopslag

Deze ruimte demonstreert verschillende manieren om hernieuwbare energie op te slaan. Dit zowel voor elektrische energie als voor thermische energie.



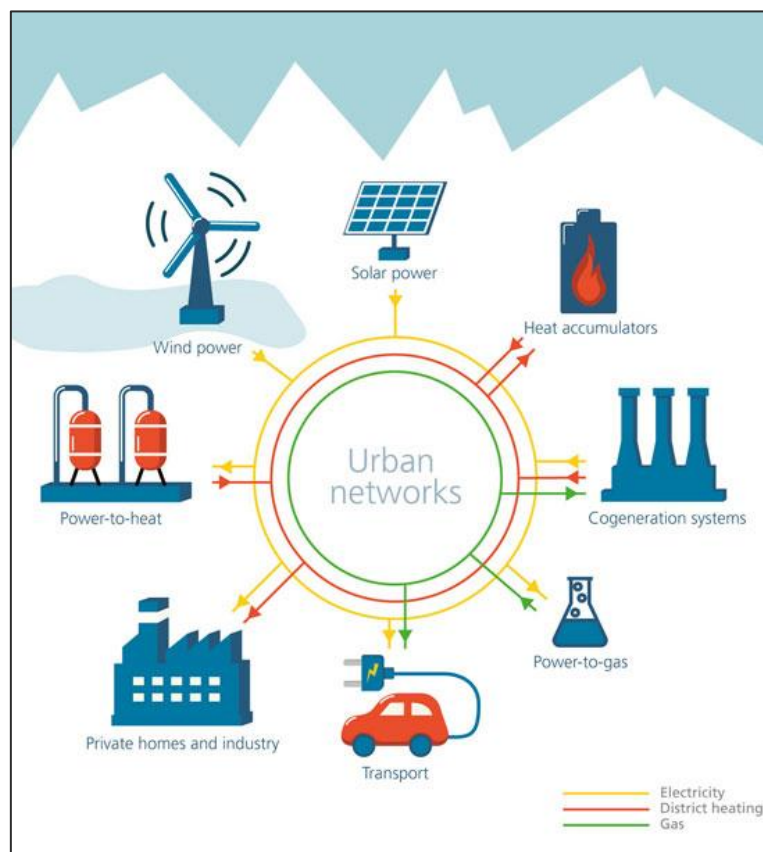
Figuur 93: Energieopslag

Opslag van elektrische energie gebeurt door batterijen zoals: Li-ion en loodzuurbatterijen. Illustratie van deze energieopslag-techniek kan via een flexibel scherm dat zich voordeet als de behuizing van de batterij. Hieraan zijn zogenoemd enkele verbruikers gekoppeld waardoor de bezoeker op een interactieve manier kan waarnemen welke batterij het meeste energie kan opslaan. Een andere manier om elektrische energie op te slaan is waterstof. Dit illustreren we aan de hand van een brandstofcel en een electrolyzer met bijhorend reservoir. Daarnaast zijn er nog pompcentrales en CAES om elektriciteit op te slaan. Voor pompcentrales gebeurt de uitleg via een maquette en bijhorend Tv-scherm. CAES wordt uitgelegd via de rekentool opgesteld in hoofdstuk 5. Zo kunnen bezoekers op een interactieve manier de werking van een CAES-installatie leren kennen.

Voor de opslag van warmte wordt het model van thermische energieopslag gebruikt. Het model leert bezoekers de effecten van opslagmedia, type materiaal, constructie en vorm van tank en opslagtermijn. Chemische warmteopslag leggen we uit aan de hand van Tv-schermen.

6.1.6 Samenhang en toekomst

Deze ruimte legt het verband tussen de verschillende technieken en schetst een toekomstbeeld van de Kempen. De focus ligt hierbij op de samenhang van hernieuwbare energietechnieken, het concept rond Power To Gas en Power To Heat.

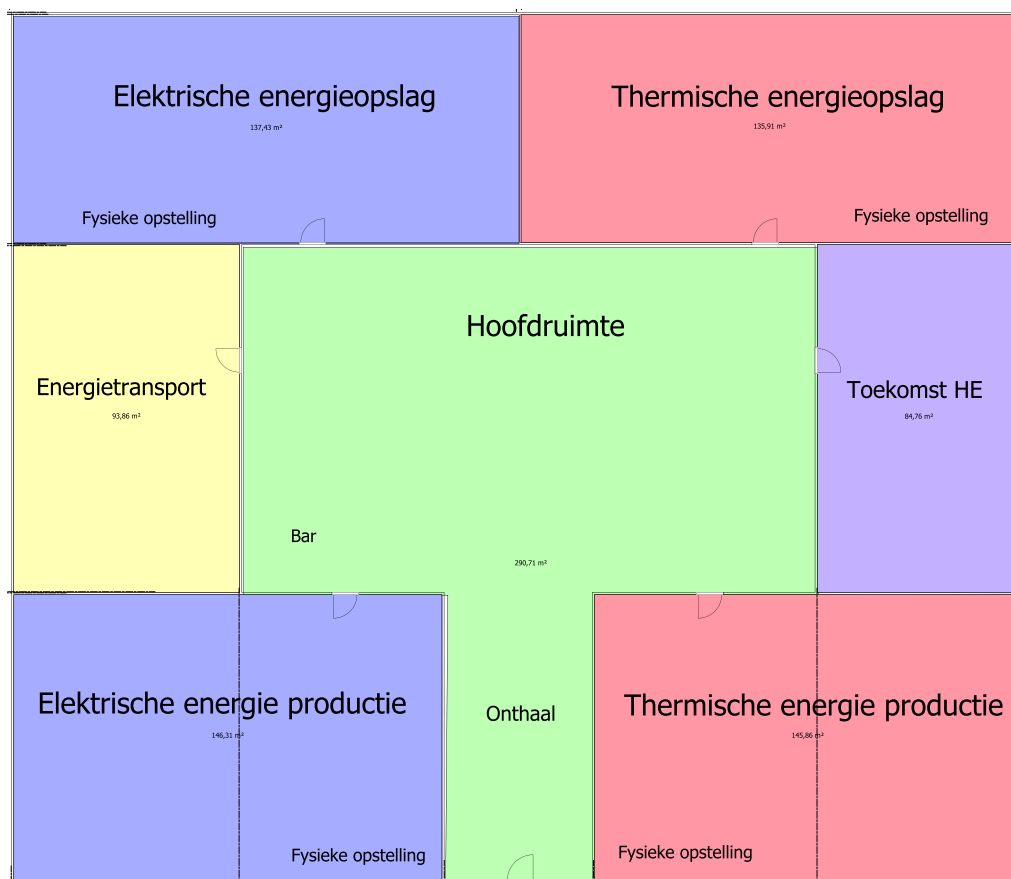


Figuur 94 Samenhang technieken (SCAI, 2020)

6.2 Initieel grondplan

Nadat alle ruimtes zijn verdeeld werd er een eerste grondplan getekend van The Renewable Energie House. Daarvoor is gebruik gemaakt van de gratis software Sweet Home 3D. Hierbij werd er gelet op de belangrijke aspecten van de vaste locatie alsook het beschikbare grondoppervlak van maximaal 1200 m² zoals besproken in hoofdstuk 3. Figuur 95 geeft het grondplan weer van de vaste locatie. Voor de verduidelijking werd er gebruik gemaakt van kleuren om de verdeling beter weer te geven. Als later dan de werkelijke afmetingen bekend zijn van TREH kan er een definitief grondplan gemaakt worden.

In de schets zijn alle ruimtes volgens een octopus-model ingedeeld. Op deze manier kunnen bezoekers de ruimtes binnenwandelen die ze het meest interesseren. In tegenstelling tot een slang-model hoeven bezoekers niet elke ruimte te doorlopen. Het laat ook toe om tijdens het napraten in de hoofdruimte nog even terug te keren naar een interessant of overgeslagen stuk.



Figuur 95 Schets initieel grondplan

7 STAKEHOLDERANALYSE PARTNERS EN DOELGROEPEN

Om meer inzicht te bekomen in de relaties met belanghebbenden is er een stakeholderanalyse uitgewerkt. Stakeholders zijn groepen die op een bepaalde manier met TREH zijn verbonden, bijvoorbeeld: bezoekers, investeerders, concurrenten en lokale overheden. Elke stakeholder is op een andere, unieke manier verbonden aan TREH. Een stakeholderanalyse geeft een duidelijk beeld over de positie en relatie van de belanghebbenden met TREH. Dit hoofdstuk geeft het proces weer waarin de analyse is opgesteld. Als uitgangspunt is: “*Instrument voor het uitvoeren van een stakeholderanalyse voor het project ‘Buren helpen buren’*” (Van Goethem, et al., 2017) gebruikt. De stakeholderanalyse in: “*Buren voor buren*” schetst een werkwijze voor de analyse van specifieke personen en/of organisaties. De analyse uitgevoerd in dit werk is uitgewerkt met algemene stakeholdergroepen. Voor sommige stappen is er dus afgeweken van de werkwijze beschreven in (Van Goethem, et al., 2017). De uitgewerkte stakeholderanalyse is te vinden in Bijlage E.

7.1 Indeling stakeholders

Aangezien het doel van deze masterproef het uitwerken van het concept rond TREH is en niet de realisatie van TREH zijn er geen specifieke partners gecontacteerd en zijn er (nog) geen samenwerkingen gestart. De stakeholderanalyse is opgesteld vanuit een algemeen inzicht: welk soort samenwerking een bepaald type organisaties en/of personen aangaat. Een voorbeeld van zulke type organisaties zijn: bedrijven actief binnen HE, scholen, kenniscentra en lokale overheden.

Om een beeld te bekomen van de verschillende interacties zijn de stakeholders ingedeeld in hoofdgroepen naargelang de vorm van de interactie met TREH. Eenzelfde stakeholdergroep kan op verschillende manieren met TREH in contact komen, zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat bedrijven actief in hernieuwbare energie op bezoek komen maar ook dat ze investeren in TREH. Door de dualiteit zijn sommige stakeholders ingedeeld bij verschillende hoofdgroepen. Verder zijn deze hoofdgroepen opgedeeld in primaire en secundaire stakeholders, zoals te zien in Figuur 96. Primaire stakeholders gaan een rechtstreekse interactie aan met TREH, bijvoorbeeld bezoekers of investeerders. Secundaire stakeholders ondervinden een onrechtstreekse invloed van TREH, ze gaan geen rechtstreekse interactie aan met TREH, bijvoorbeeld concurrenten en de media.

7.2 Identificatieproces

Het verloop van het identificatieproces is te zien in Figuur 96. In dit proces zijn vier verschillende fases te onderscheiden. Elke fase verbreedt het inzicht in interacties met de stakeholdergroep. Om de werkwijze te verduidelijken is het proces van één stakeholder: “Bedrijf actief in HE” als aandeelhouder/investeerder doorheen de analyse gevolgd en verklaard.

		Fase 1			Fase 2			Fase 3	Fase 4		
Hoofdgroep		Stakeholder	Commentaar	Doel	Type	Belang aan TREH	commentaar	Steun	Onderlinge relaties	Contact	Impact op TREH
Primair	Bezoekers										
	Aandeelhouders/investeerders (financiële middelen)										
	Oprichters										
	Partners (algemene samenwerking)										
	Werknemers										
Secundair	Activisten										
	Gemeenschappen										
	Overheden										
	Publiek										
	Media										
	Sociale media										
	Gelijkaardige initiatieven										

Figuur 96 Werkwijze Stakeholderanalyse

7.2.1 Fase één: Identificatie

In de eerste fase zijn de stakeholdergroepen bepaald: “welke groepen kunnen op een bepaalde manier een interactie aangaan met TREH? ” Er is ook gekeken naar het doel waarmee de groep een bepaalde interactie aangaat. Bedrijven actief in HE kunnen zowel als: bezoeker, aandeelhouder/investeerder en partner optreden. Zoals aangegeven is de interactie als aandeelhouder/investeerder besproken. Het doel van bedrijven actief in HE als aandeelhouder is het bekomen van positieve publiciteit en het (indirect) genereren van economische activiteit.

7.2.2 Fase twee: Uitdiepen interactie / Belang

Na de doelen van stakeholders is er gekeken naar het type stakeholder, dit kon zijn: economisch, sociaal en politiek. Voor bedrijven actief in HE-sector is het type economisch, enerzijds omdat ze direct economische middelen verschaffen aan TREH als aandeelhouder en anderzijds omdat ze als doel hebben om (indirect) economische activiteit te genereren.

Naast het bepalen van het type is er ook gekeken naar het belang dat de groepen aan TREH hechten. Het belang is ingedeeld in een gradatie van: zeer belangrijk tot eerder beperkt. Aandeelhouders hechten vanzelfsprekend veel belang aan TREH aangezien ze financiële middelen verschaffen. Verder is er gekeken naar de steun die de stakeholdergroepen aan TREH bieden. Deze steun is ingedeeld in positief, neutraal en negatief. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat een bedrijf actief in HE veel belang hecht aan TREH omdat hij financiële middelen verschaft of omdat TREH een indirecte concurrent is. Beide groepen hechten veel belang maar de ene groep staat positief opgesteld en de andere negatief.

7.2.3 Fase drie: Onderlinge relaties

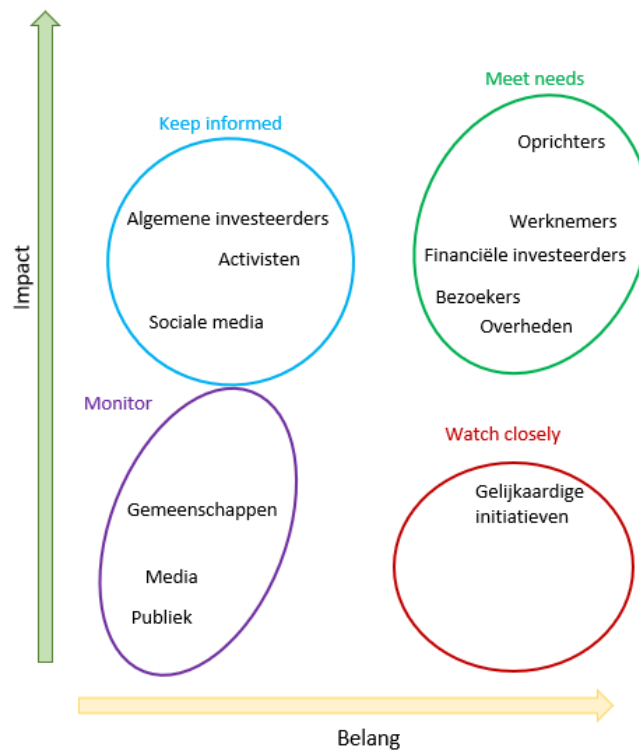
In de relatiematrix is er verder gekeken naar de onderlinge relaties tussen stakeholdergroepen. Deze matrix is te vinden in Bijlage E. Aangezien de stakeholderanalyse een algemeen beeld schept geeft de relatiematrix geen definitieve uitsluitende relaties tussen groepen weer maar mogelijke knelpunten en samenwerkingen. Of deze knelpunten werkelijk een probleem kunnen vormen moet blijken uit de analyse van specifieke partners. Een voorbeeld van een mogelijke goede invloed is de onderlinge relatie tussen The Renewable Energy Campus en bedrijven actief in HE. TREC heeft als doel om mensen te scholen in HE, ze leveren werknemers aan bedrijven actief in HE. Wanneer aandeelhouders weten dat TREH en TREC nauw samenwerken, zijn ze mogelijk geneigd om meer financiële middelen te verschaffen of de samenwerking met TREH te versterken.

7.2.4 Fase vier: Impact en contact

Tijdens de laatste fase is er bepaald hoe een specifieke groep bereikbaar is. Voor Bedrijven actief in HE is dit via mail en vakbladen. Daarnaast is er nagegaan hoeveel invloed de stakeholder heeft op TREH, ingedeeld van ++ tot 0. Bedrijven actief in HE hebben zoals alle aandeelhouders een grote impact op TREH.

7.3 Analysematrix

Met de resultaten uit het identificatieproces is een analysematrix opgesteld. Deze matrix is weergegeven in Figuur 97 en geeft duidelijk de situering van verschillende Hoofdgroepen weer. De groepen zijn gesitueerd naargelang het belang dat ze hechten aan TREH en de impact die ze uitoefenen. De verschillende hoofdgroepen laten zich op deze manier samennemen in vier categorieën. Verder is de betekenis van deze categorieën besproken.



Figuur 97 Analysematrix

7.3.1 Keep Informed

In de categorie Keep Informed zitten de hoofdgroepen die veel impact uitoefenen maar zelf weinig belang hechten aan TREH. Deze hoofdgroepen moeten steeds op de hoogte worden gehouden van de ontwikkelingen en activiteiten binnen TREH.

7.3.2 Meet Needs

De hoofdgroepen die veel impact hebben op TREH en zelf veel belang hechten aan TREH vallen onder de categorie Meet Needs. Dit zijn de belangrijkste stakeholders en TREH moet zorgen dat hun verwachtingen worden ingelost.

7.3.3 Monitor

Onder deze categorie vallen de hoofdgroepen die weinig invloed hebben en weinig belang hechten aan TREH. Er moet niet actief worden gekeken naar hun mening en/of ontwikkelingen rond TREH. Indien er een werkpunt opborrelt uit deze categorie dient er vanzelfsprekend wel aan de slag te worden gegaan met dit werkpunt.

7.3.4 Watch Closely

De stakeholders die veel belang hechten aan TREH maar relatief weinig impact uitoefenen vallen onder de categorie Watch Closely. Deze stakeholders moeten actief in de gaten worden gehouden.

7.4 Besluiten stakeholderanalyse

Eerder is al aangehaald dat de stakeholderanalyse is opgesteld uit een algemeen beeld van stakeholders. Om tot dit algemeen beeld te komen zijn er aannames gedaan. De werkelijke stakeholders van TREH kunnen van dit algemeen beeld afwijken. Het is dus zeker mogelijk dat er tussen stakeholders een onderlinge wroefel aanwezig is waar de algemene analyse geen problemen aanwijst. Anderzijds is het ook mogelijk dat stakeholders zich afwijkend situeren in de analysematrix.

Samenwerkingen veranderen doorheen de tijd, zodus ook de stakeholderanalyse. Wanneer TREH van start gaat en er een voortdurende in-en uitstroom is van stakeholders en partners zal ook de stakeholderanalyse voortdurend wijzigen. De algemene analyse geeft dus een momentopname waarin geen rekening is gehouden met het dynamisch karakter van een samenwerking.

8 SWOT-ANALYSE

Om een duidelijk overzicht te bekomen van de sterke en zwakke punten van TREH is er een SWOT-analyse uitgewerkt. SWOT staat voor Strengths, Weaknesses, Opportunities en Threats. Deze analyse geeft een duidelijk overzicht van de sterktes en zwaktes maar ook van de kansen en bedreigingen in de markt. De resultaten maken het mogelijk om gericht aan de slag te gaan met de zwakke punten en in te zetten op de sterktes van het project. Verder in dit hoofdstuk volgt een toelichting van de SWOT-analyse.

S.W.O.T. - Analyse	The Renewable Energy House
Sterktes	Zwaktes
Onafhankelijke, eerlijke informatie	Geen expertise in alle technieken
Volledig beeld van beschikbare technieken	Geen hoofdactiviteit van organisatoren
Goed imago, HE is "hip"	Financieel afhankelijk van partners, sponsors en subsidies
Deel van Streekplatform Kempen: steun vanuit vele hoeken	HE-technieken zijn duur, praktische opstelling niet altijd mogelijk
Mogelijkheid tot adviseren	TREH is momenteel onbekend bij brede publiek
Beschikbaar voor een breed publiek	Betrokkenheid partners ondermijnt "onafhankelijke" informatie
Steeds up-to-date dankzij de partners die in de praktijk staan	Geen vast inkomen bemoeilijkt het uitbaten
Ketenoplossingen	De informatie die wordt gegeven aan de bezoeker moet steeds recent en juist zijn.
	Complexiteit van kluwen aan HE-technieken
	Naam doet vermoeden dat het doelpubliek residentieel is.
Opportunities (markt)	Bedreigingen (markt)
Eerste HE-belevingscentrum in Kempen	Zitten professionals wel te wachten op een REH ?
Wetgeving rond CO ₂ -uitstoot wordt strenger, belang HE neemt toe	Snel evoluerende markt, veroudering HE technologie
Stimuleren van de Kempische industrie om HE te gebruiken	Geen garantie dat HE de energie wordt van de toekomst
Meer studenten kunnen overtuigen om te kiezen voor de richting Energie	Geen garantie dat HE goedkoper wordt in de toekomst
Stimuleren van de Kempische particulieren om HE te gebruiken	HE is mogelijks duurder dan fossiele energie, dit bemoeilijkt het overtuigen
Nieuwe business genereren tussen partner van TREH	
Onderwijs, Overheid en Ondernemers dichterbij elkaar brengen rond HE	Onzekerheid over toekomstige wetgevingen
HE wordt belangrijker in de toekomst	De Kempen is een klein speelveld

Figuur 98 SWOT-Analyse The Renewable Energy House

8.1 Sterktes

8.1.1 Onafhankelijkheid

De grootste sterkte van TREH ligt in de onafhankelijkheid. Anders dan producenten en installateurs van hernieuwbare energietechnologieën mikt TREH niet op de verkoop van producten of installaties. Bedrijven zijn eerder geneigd potentiële klanten een positief beeld voor te houden van hun technologie en meer nadruk te leggen op de mogelijkheden en voordelen van hun product. De informatie die een potentiële klant dan krijgt is eerder subjectief en mogelijks niet volledig. TREH daarentegen streeft naar onafhankelijke en objectieve informatie. Zo kunnen bezoekers met correcte en realistische verwachtingen op zoek naar een installateur.

8.1.2 Volledig overzicht beschikbare technieken

Het doelpubliek van TREH is divers, het is gericht op zowel particuliere als professionele bezoekers en scholen. Ieder doelpubliek heeft een andere voorkennis, de weergegeven informatie moet dus verschillende kennisniveaus aanbieden. Naast verschillende niveaus van voorkennis zijn de verschillende doelgroepen geïnteresseerd in andere toepassingsgebieden. Zo zijn particulieren meer geïnteresseerd in de mogelijkheden voor residentiële toepassingen en scholen meer gebaat bij een algemene kennismaking met hernieuwbare energie. TREH moet dus een uitgebreide kennis van alle toepassingsgebieden rond hernieuwbare energie aanbieden. Dankzij een digitalisering van de informatie is het mogelijk om voor iedere doelgroep een aparte verhaallijn te ontwikkelen.

8.1.3 Ontstaan uit Streekplatform Kempen

KempENERGIEK en zijn projecten zijn ontstaan uit Streekplatform Kempen en hoopt bijgevolg blijvend steun te ontvangen uit die hoek. Hun breed netwerk staat positief tegenover The Renewable Energy House. Hun partners zijn onrechtstreeks verbonden aan TREH op het moment dat ze zich bij het Streekplatform voegden.

8.2 Zwaktes

8.2.1 Kennis en informatie

TREH heeft op zichzelf geen diepgaande expertise in iedere techniek. Om voldoende en correcte informatie te bieden aan bezoekers is een diepgaande expertise noodzakelijk. TREH is dus afhankelijk van zijn partners om correcte en actuele informatie te bieden aan bezoekers. Deze afhankelijkheid mag niet doorsijpelen in de getoonde informatie. Een adviesraad kan de nodige scheiding waarborgen. De verdere definitie van deze adviesraad staat beschreven in hoofdstuk 9.

8.2.2 Financiële stabiliteit

Financiële inkomsten van TREH kunnen vanuit verschillende partijen komen. Zo zijn er: de bezoekers die inkomgeld betalen, financiële partners die een samenwerking aangaan met TREH en subsidies vanuit (lokale) overheden. Indien het merendeel van de financiële middelen van professionele partners komt, dreigt het gevaar dat partners zich mengen in de uitbating van TREH. De financiële afhankelijkheid van partners staat dus loodrecht op het onafhankelijke karakter van TREH. Financiële steun afkomstig van professionele partners en investeerders dient dus nauwkeurig te worden vastgelegd in een samenwerkingsovereenkomst. Een verdere toelichting van deze overeenkomst is in hoofdstuk 9 te vinden.

8.2.3 Naambekendheid van TREH

Als eerste informatie-en belevingscentrum rond hernieuwbare energie is het concept en de naam The Renewable Energy House bij het brede publiek onbekend. Onbekendheid brengt het gevaar mee dat het publiek de weg niet vindt naar TREH. Om bezoekers over de vloer te krijgen moet er voldoende aandacht worden besteed aan naambekendheid en publiciteit. Hierin is sociale media een krachtig medium, het laat toe met beperkte middelen een grote doelgroep te bereiken.

8.3 Opportuniteiten

8.3.1 Eerste beleefcentrum rond hernieuwbare energie

Eerder is al aangehaald dat TREH het eerste initiatief is in zijn soort. Dit biedt een groot potentieel. Als het er in slaagt om aan de hand van een slim, gevarieerd en gefaseerd communicatieplan een breed publiek te bereiken zullen geïnteresseerden, aangezien er geen gelijkaardige initiatieven zijn in Vlaanderen, vanzelf bij TREH terechtkomen. Om deze positie te behouden moet er voortdurend worden gesleuteld aan de inhoud en voorstelling van de technieken. De visualisatie moet steeds op een unieke, aantrekkelijke manier worden geüpdatet.

8.3.2 Ontstaan projecten voor partners

De steun van professionele partners heeft geen rechtstreeks effect op de activiteiten van partners maar wel op de hele sector. Het doel van TREH is het promoten van hernieuwbare energie in de Kempen. Dit doel wordt nagestreefd door het onafhankelijk informeren van geïnteresseerden. Wanneer zij in de toekomst kiezen voor hernieuwbare energie in hun projecten, heeft TREH een indirecte impact op de hernieuwbare energiesector. Het floreren van TREH bezorgt de partners indirect economische activiteit.

8.3.3 Toenemend belang van hernieuwbare energie

De klimaatopwarming verplicht de mensheid om over te schakelen op hernieuwbare energiebronnen. Deze verplichting is verder opgelegd door zowel internationale, nationale als lokale overheden. Hernieuwbare energie zal in de toekomst dus enkel aan belang winnen. Het doel van TREH om onafhankelijke informatie te verschaffen, wordt hierdoor steeds belangrijker.

8.4 Bedreigingen

8.4.1 Snel evoluerende markt

Hernieuwbare energietechnieken ontwikkelen zich razendsnel. TREH dient ten alle tijden up-to-date te blijven met deze evoluerende markt. Continu vernieuwen van fysieke opstellingen brengt grote kosten met zich mee. Om vernieuwingskosten te kunnen ontwijken, werkt TREH voor een groot deel met interactieve digitale opstellingen, deze zijn aanpasbaar voor een fractie van de kost van fysieke opstellingen. Digitale opstellingen bieden een grote flexibiliteit, wat dus van belang is in een razendsnel evoluerende sector. Naast de kost voor aanpassingen moet TREH ook voortdurend nieuwe kennis vergaren over de nieuwste innovaties. Om steeds de nodige kennis te verkrijgen rekent het op zijn professionele en academische partners.

8.4.2 Onzekerheid wetgeving en rendabiliteit hernieuwbare energie

Gemeentelijke, provinciale en Europese steunmaatregelen rond hernieuwbare energie veranderen voortdurend. Veranderingen doen investeerders twijfelen over de economische rendabiliteit van hernieuwbare energieprojecten op lange termijn. Voorlopig is hernieuwbare energie in sommige gevallen duurder dan klassieke fossiele energiebronnen. Het duurder zijn van hernieuwbare energie en de onzekerheid over steunmaatregelen maakt het moeilijk om potentiële investeerders te overtuigen voor hernieuwbare energie te kiezen.

9 VERVOLGPLAN

Het realiseren van TREH is een langdurig proces dat over meerdere jaren loopt. De eerste stap, het uitwerken van het concept, is gezet. De uiteindelijke realisatie van TREH is nog niet gestart. Dit hoofdstuk geeft aan welke aspecten nog moet worden gewerkt.

9.1 Wettelijke structuur

Bij de uitbating van TREH is een wettelijke structuur nodig. Aangezien TREH geen winst nastreeft is de logische keuze een VZW. Het uitwerken en opstellen van deze VZW en de bijbehorende statuten valt buiten de scope van deze thesis. Het opstellen van de VZW is de taak van de bestuursleden van KempENergiek.

9.2 Reglement voor Interne Orde

In het reglement voor interne orde zijn alle zaken opgenomen die de dagdagelijkse werking van TREH vastleggen. In deze paragraaf volgen twee aspecten die met zekerheid in het reglement thuishoren. De verdere invulling van het reglement kan pas gebeuren wanneer de wettelijke structuur is opgesteld.

9.2.1 Adviesraad

Bij het vernieuwen van de inhoud in TREH moet steeds de onafhankelijkheid worden gegarandeerd. Hiervoor is een beoordeling nodig door personen die geen voorafgaande commerciële band hebben met de leverancier(s) van de betreffende technologie. De groep die deze beoordelingen uitvoert heet de adviesraad.

In de adviesraad zetelen mensen vanuit niet-commerciële organisaties. Een voorbeeld van zulke organisaties zijn: KU-Leuven, VITO/EnergyVille, WTCB, IOK en Kamp-C. Van de adviesraad wordt verwacht dat ze onafhankelijke besluiten nemen over een specifieke technologie of toepassing. De raad zal samenzitten over een bepaalde technologie of toepassingen en besluit of ze werkelijk hernieuwbaar is en/of de toepassing werkt zoals de producent beweert. Na goedkeuring kan TREH de techniek opnemen. Deze manier van werken garandeert de onafhankelijkheid van informatie naar de bezoekers toe.

9.2.2 Samenwerkingsovereenkomst professionele partners

Zoals al enkele malen aangehaald moet de invloed van partners op getoonde informatie in TREH worden beperkt. Deze beperkingen zijn opgenomen in een samenwerkingsovereenkomst. Een goede en volledige overeenkomst geeft de deelnemende partijen duidelijkheid over de verwachtingen van elkaar en zichzelf. Het vormt een houvast om elkaar te wijzen op het niet nakomen van gemaakte afspraken. De exacte inhoud van een samenwerkingsovereenkomst is voor iedere partner uniek.

Besluit

Er is een enorm onaangeroerd potentieel aanwezig voor een belevingscentrum rond hernieuwbare energie. Wanneer het brede publiek de weg naar TREH vindt, heeft het centrum de kracht om een doeltreffende katalysator te worden. Met een doeltreffende uitbating van TREH neemt de Kempen het voortouw in het realiseren en stimuleren van de energietransitie. Het initiatief heeft het potentieel om een doorslaggevende rol te spelen bij het behalen van het Klimaatplan 2050 in de Kempen. Deze masterproef richtte zich op de ontwikkelingsfase in het realiseren van TREH. Alle hernieuwbare energietechnieken zijn opgelijst en deze krijgen een plaats in de demonstratieruimtes. De rekentool rond CAES uitgewerkt door Jord en de rekentool rond thermische energieopslag uitgewerkt door Antoon. Zijn klaar voor gebruik door de bezoekers. Naast een schets van de mogelijke indeling van de bezoekersruimte is ook een stakeholder- en SWOT-analyse uitgevoerd. Vol verwachting kijken we uit naar de effectieve realisatie van TREH. We zijn trots meegewerkt te hebben aan de ontwikkelingsfase van het concept.

Referenties

10 BIBLIOGRAFIE

- da Cunha, J. P., & Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications. *Applied Energy*, 227-238.
- Van Ackere, S., Van Wyngene, K., Van Eetvelde, G., & Vandevelde, L. (2015). *JERTS-studie rond kleine en middelgrote windturbines*. Vrijdagmarkt 10/301, 9000 Gent: Universiteit Gent.
- Van Goethem, J., Gouwy, D., Mertens, L., Waerniers, R., Geysmans, R., & Hustinx, L. (2017). *INSTRUMENT VOOR HET UITVOEREN VAN EEN STAKEHOLDERSANALYSE VOOR HET PROJECT 'BUREN HELPEN BUREN'*. Gent.
- Abek Technics. (2020, December 6). *Fotovoltaïsche panelen*. Opgehaald van Abek Technics: http://www.abek-technics.be/html/ftv_panelen.html
- alcoholgisting*. (sd). Opgehaald van microbiologie.info: <https://www.microbiologie.info/alcoholgisting.html>
- Alternative Energy Tutorials. (2020, November). *Solar Photovoltaic Panel*. Opgehaald van Alternative Energy Tutorials: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/pv-panel.html>
- Badawy, S. M. (2015, Mei). Laboratory freezing desalination of seawater. *Desalination and Water Treatment* 57(24):11040–11047(57(24)), 11040-11047. doi:10.1080/19443994.2015.1041163
- Barbour, E., Mignard, D., & Yulong, D. (2015, Juli 3). Adiabatic compressed air energy storage with packed bed thermal energy storage. UK.
- Biodiesel FAQ*. (2004, juli 30). Opgehaald van metaefficient.com: <https://metaefficient.com/uncategorized/biodiesel-faq.html>
- Biomassa voor de circulaire economie*. (2019, Mei). Opgehaald van biobasedeconomy.nl: <https://biobasedeconomy.nl/wp-content/uploads/2019/05/190425-Biomassa-voor-de-circulaire-economie.pdf>
- Biomassavergassing*. (sd). Opgehaald van regiohollandbovenamsterdam: <https://regiohollandbovenamsterdam.nl/verhalen/biomassavergassing>
- Bortolini, M., Gamberi, M., Graziani, A., Manzini, R., & Pilati, F. (2013). Performance and viability analysis of small wind turbines in the. *Renewable Energy*, 629-639.
- Brugg-pipes. (sd). *CALPEX PUR-KING*. Opgeroepen op November 26, 2020, van Brugg Pipes: <https://www.bruggpipes.com/en/local-and-district-heating/calpex-pur-king/>
- Budt, M., & Wolf, M. (2016). *A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones en recent developments*. Elsevier.

- Buldit BV. (2020). *De werking van een warmtepomp*. Opgehaald van Warmtepompadvies.be: <https://warmtepompenadvies.be/warmtepomp-werking/>
- CBS. (2020, 12 16). *Warmtepompen; aantallen, thermisch vermogen en energiestromen*. Opgehaald van CBS: <https://www.infowarmtepomp.be/nieuws/>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). *Thermodynamics: an Engineering Approach*.
- Clerix, K. (2015, Oktober 1). *Zijn de Vlaamse normen voor windmolens strenger dan elders?* Opgehaald van Monidaal Nieuws: <https://www.mo.be/analyse/zijn-de-vlaamse-normen-voor-windmolens-strenger-dan-elders>
- Daikin. (2015, Augustus). *Daikin Altherma Lucht/water warmtepomp lage temperatuur*. Opgeroepen op December 8, 2020, van Daikin: https://www.daikin.be/nl_be/productgroepen/lucht-water-warmtepompen-lt.html
- DHC Holland. (2014, November 5). *Overzicht afleversets voor*. Utrecht, Nederland.
- Donkers, P., & Adan, O. (2020, November 24). *Thermochemische materialen voor langdurige en verliesvrije warmteopslag*. Opgeroepen op 2020, van TNO: <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/industrie/expertisegroepen/materials-solutions/thermochemische-materialen/>
- Doucé, F. (2002). *Waterkracht*. Limburg, België.
- Dreesen, R., & Laenen, B. (2010). *Technology watch: geothermie en het potentieel in Vlaanderen*. Mol: ALBON.
- Ecovat. (2021, februari 13). *Ecovat Productinformatie*. Opgehaald van Ecovat: <https://www.ecovat.eu/productinformatie/>
- EDF Luminus. (2014). *Waterkrachtcentrales*. Opgehaald van EDF Luminus: <https://www.luminus.be/nl/corporate/energieproductie/de-nummer-1-in-waterkracht/>
- Energie-inhoud van brandstoffen*. (2018). Opgehaald van navigator.emis.vito.be.
- Energiesparen.be. (2019, November 19). *Cal KWT's rekenmethode berekeningsexcel*. Opgeroepen op December 14, 2020, van Energiesparen.be: <https://www.energiesparen.be/aanvraagformulier-call-windturbines>
- Evens, M. (2019). *Batterijopslag als bron van flexibiliteit in het distributienet*. Geel.
- Fallahi, A., Guldentops, G., Mingjiang, T., Granados-Focil, S., & Van Dessel, S. (2017). Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. *applied thermal engineering*, 1427-1441.
- FEBEG. (2019). *Statistieken elektriciteit*. Opgehaald van Febeg.be: <https://www.febeg.be/statistieken-elektriciteit>
- François, I., Martens, A., Winkel, T., & Vanhoudt, W. (2018). *Het potentieel voor groene waterstof in Vlaanderen*. Vlaanderen: Waterstofnet.
- Gebo. (2020, Februari 20). *Koude- en warmteopslag*. Opgehaald van Geo Energie Systemen: <https://www.gebo.be/koude-en-warmteopslag>
- Geissbühler, L., Becattini, V., & Zanganeh, G. (2018, Juni). *Journal of energy storage*. Opgehaald van Siencedirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17305546>

- Global energy Observatory. (2011, Juni 4). *Coo-Trois-Ponts*. Opgehaald van Global Energy Observatory: <http://globalenergyobservatory.org/geoid/41951>
- Global Wind Atlas. (2019). Opgeroepen op December 14, 2020, van Global Wind Atlas: <https://globalwindatlas.info/>
- Global-E-Systems. (2020, December 1). *Gaia energy storage bal*. Opgehaald van Global-E-Systems: <https://www.global-e-systems.com/nl/producten/gaia-pcm-thermal-energy-storage-ball/>
- Green, M. A., Emery, K., King, D. L., Igura, S., & Warta, W. (2002). Solar Cell Efficiency Tables. *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, 355-360.
- GreenBugEnergy. (2020, November 29). *types of turbines*. Opgehaald van GreenBugenergyINC: <https://greenbugenergy.com/get-educated-knowledge/types-of-turbines>
- Guruprasad , A., Yaxue, L., & Guiyin , F. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*(144), 341-378.
- Heat Roadmap Europe. (2017). 2015 Final Heating & Cooling demand Belgium. België. Opgehaald van <https://heatroadmap.eu/>
- HSF. (2020, November 29). *Docplayer*. Opgehaald van <https://docplayer.nl/53327948-Hsf-ecoadvance-split-hsf-ecoadvance-split-montage-instructie-gebruikshandleiding-bewaar-deze-handleiding-bij-de-afleverset.html>
- Hydroville. (sd). *Hoe maak je waterstof*. Opgehaald van Hydroville: <http://www.hydroville.be/waterstof/hoe-maak-je-waterstof/#:~:text=Elektrolyse,wind%2D%20en%20zonne%2Denergie>
- Hydroville. (sd). *Waterstof*. Opgehaald van Hydroville: <http://www.hydroville.be/waterstof/hoe-maak-je-waterstof/#:~:text=Elektrolyse,wind%2D%20en%20zonne%2Denergie>.
- ICF Storage PCE Board Meeting Presentation*. (2019, January 24). Opgehaald van Peninsula Clean Energy: www.peninsulacleanenergy.com
- Insideevs*. (2019, Oktober 11). Opgehaald van Insideevsforum: <https://www.insideevsforum.com/community/index.php?threads/worldwide-recall-according-to-this-11-oct-news-item.9728/>
- Installatie, R. (2013, September 23). *Stukje windmolen kopen*. Opgehaald van installatie: <https://www.installatie.nl/nieuws/stukje-windmolen-kopen/>
- Janssen, E. (2017, November). *Instal 2020*. Opgehaald van Conceptfiche 4: Zonneboilers: https://www.instal2020.be/wp-content/uploads/2017/12/Conceptfiche-4-zonne-energie_nov2017_V1Temp.pdf
- Jr., Z. Q. (2017, Juli 1). *Flow battery systems with solid electroactive materials*. Opgehaald van AVS: avs.scitation.org
- Kempenpact 2030*. (2020, November 29). Opgehaald van Streekplatform Kempen: <http://streekplatformkempen.be/kempenpact-2030/>
- Kumar Rohita, A., Ksh. Priyalakshmi, D., & Rangnekara, S. (2017, Juni 16). *An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector*. Opgehaald van

- Elsevier: <https://www.sciencedirect-com.kuleuven.ezproxy.kuleuven.be/science/article/pii/S2352152X17300488>
- Littman, W., & Crotagino, F. (2019, November 7-8). *Underground Pumped Hydro Storage*. Opgehaald van Erneo: <https://erneo.de/energy-storage/underground-pumped-storage.html>
- Lund, H., Alberg Østergaard, P., Chang, M., Werner, S., Svendsen, S., Sorknæs, P., . . . Moller, B. (2018). The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy* 164, 147-159.
- Messina, J. (2010, Maart 17). *Compressed air energy storage: Renewable energy*. Opgehaald van phys.org: phys.org/news/2010-03-compressed-air-energy-storage-renewable.html
- Molen Van Rotselaar. (2020, December 1). *Waterkrachtcentrale*. Opgehaald van Molen Van Rotselaar: <https://www.molenvanrotselaar.be/waterkrachtcentrale>
- Molendatabase. (2020, mei 11). *Zuidschermer, Noord-Holland*. Opgehaald van Molendatabase: <https://www.molendatabase.nl/nederland/molen.php?nummer=728>
- Papa, T., van Leeuwen, R., de Geus, J., Entrop, B., & Bernard, J. (2020). *Duurzame energietechniek*. Boom.
- Parken, E. C. (2019). *ECP TF Verbranding*. Opgehaald van ecp-biomass.eu: https://ecp-biomass.eu/sites/ecp-biomass.eu/files/books/ECP%20TF%20Verbranding_LG_HP_2nd.pdf
- pcmproducts.net. (2020, November 24). *PCM products general*. Opgehaald van pcmproducts: <https://www.pcmproducts.net/>
- SCAI, F. (2020). *An schematic rendering of sector coupling across urban infrastructure*. Opgehaald van <https://www.sonnenseite.com/>: <https://www.sonnenseite.com/en/science/fraunhofer-connects-energy-production-and-storage/>
- Steen, E., & Torestan, M. (2018). *Compressed air energy storage*. Stockholm, Zweden.
- Task34. (sd). *pyrolysis-reactors*. Opgehaald van Task 34: <https://task34.ieabioenergy.com/pyrolysis-reactors/>
- Tipperary Institute. (2007). *ELREN Renewable Energy Training Manual*. Ierland: Carlow LEADER and Tipperary Institute.
- Trausel, F., de Jong, A.-J., & Cuyper, R. (2014). *A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage*. Elsevier Ltd.
- van Egmond, R. J., van Petersen, D., & Loonen, P. (2020, November 24). *TKI urban energy kennisdossier warmteopslag*. Opgehaald van topsectorenergie: <https://www.topsectorenergie.nl/tki-urban-energy/kennisdossiers/warmteopslag>
- VITO. (2008). *doss 17 Waterstofeconomie*. Opgehaald van Vito: https://ist.vito.be/nl/pdf/dossiers/doss17_waterstofeconomie.pdf
- VITO. (2009). *Biobrandstoffen van de eerste, de tweede en derde generatie*. Brussel: Instituut Samenleving & Technologie.
- VITO. (2013, Januari). *Warmte uit zonlicht, de boiler*. Opgehaald van VITO: emis.vito.be

- Vlaams Energieagentschap. (2020, Februari 19). Handleiding steunregeling kleine en middelgrote windturbines. Vlaanderen: Vlaams energieagentschap. Opgehaald van <https://www.energiesparen.be/aanvraagformulier-call-windturbines>
- Vlaamse waterweg. (2018). *Pompinstallaties en Waterkrachtcentrales*. Opgehaald van Vlaamse Waterweg: <https://www.vlaamsewaterweg.be/pompinstallaties-en-waterkrachtcentrales>
- Wikipedia. (2018, 12 22). *Laurinezuur*. Opgehaald van Wikipedia: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Laurinezuur>
- Wikipedia. (2020, December 7). *Pyrolyse*. Opgehaald van Wikipedia: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse>
- Wikipedia. (2020, September 7). *Zonnecollector*. Opgehaald van Wikipedia: nl.wikipedia.org
- Williams, B. (2020, Oktober 16). *Measurement*. Opgehaald van BriangWilliams: <https://www.briangwilliams.us/climates-weather/measurement-1.html>
- wind-turbine-models.com. (2017, Juli 3). *Vestas V66-1.75*. Opgeroepen op December 14, 2020, van [wind-turbine-models.com](https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1292-vestas-v66-1.75): <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1292-vestas-v66-1.75>
- WTCB. (2016). *Dimensionering van vloerverwarmingssystemen met warmwaterbuizen*. WTCB.
- Young Energy Reviewers Association. (2020, November 30). *is er een toekomst voor energie uit de oceaan ?* . Opgehaald van YERA: <http://www.yera.be/project/is-er-een-toekomst-voor-energie-uit-de-oceaan/>
- Zonneboiler Magazijn. (2020). *Zonneboilers*. Opgehaald van Zonneboilermagazijn.nl: <https://zonneboilermagazijn.nl/wat-is-een-zonneboiler>
- Zonnepanelen weetjes. (sd). *Werking zonneboiler*. Opgehaald van Zonnepanelen weetjes: www.zonnepanelen-weetjes.nl

Bijlagen

Bijlage A	Vragenlijst interview
Bijlage B	Verslagen bezochte locaties
Bijlage C	Indeling technieken
Bijlage D	A-CAES calculator
Bijlage E	Stakeholderanalyse
Bijlage F	Rekentool thermische energieopslag

Bijlage A VRAGENLIJST INTERVIEW

Wie zijn wij?	
Naam	Jord Peeters Antoon Van dyck
Woonplaats	Olen en Geel
Opleiding	Industrieel Ingenieur Energie
Masterproef(concept)	Het concept uitwerken van The Renewable Energy House

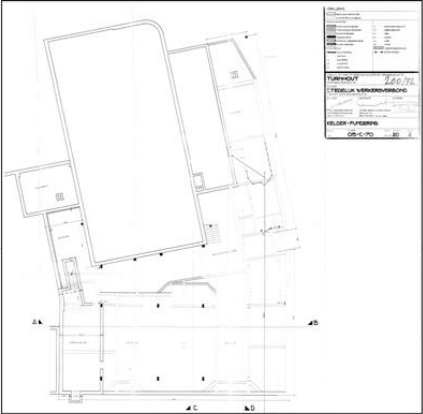
Wie bent u?	
Naam?	
Woonplaats?	
Opleiding?	
Wat houdt uw werk in?	
Persoonlijke doelen?	

Wat is uw betrokkenheid tot Kempenergiek ? Toegevoegde waarde?	
Hoe bent u terechtgekomen bij KempENERgiek?	
Kent u de andere betrokken, zo ja vanwaar?	
Hoe kan uw kennis/expertise en deze van uw organisatie The Renewable Energy House helpen verder te ontplooiën?	

Interessante vragen:	
Heeft u een voorstel voor de locatie van The Renewable Energy House?	
Heeft u ideeën voor satellietlocaties van de vaste locatie?	
Denkt u aan minder voor de hand liggende technieken die zeker mee opgenomen moeten worden?	
Naast maquettes, videobeelden en VR-installaties, denkt u aan nog andere opstellingswijzen voor de technieken?	
We hebben een lijst van te contacteren potentiële partners die actief zijn in de hernieuwbare energie. Kent u bedrijven of instellingen die we hier nog aan toe moeten voegen?	
Hebt u tips voor de werving van partners?	
Hebt u tips voor de werving van klanten?	
In welk opzicht werkt u in het dagdagelijks leven rond hernieuwbare energie?	
Kent u nog andere, externe personen die kennis hebben op het vlak van hernieuwbare energie?	
Heeft u nog vragen voor ons of wilt u nog iets toevoegen aan dit gesprek?	



Bijlage B VERSLAGEN BEZOCHTE LOCATIES

Zaal Den Bond

Beschrijving ruimte(s), voldoet deze aan de		Momenteel een oud verlaten en versleten gebouw. Er liggen wel al plannen op tafel om het gebouw te renoveren. Men is van plan om 4 kleine cinéma-zalen te plaatsen, het café samen met de andere overige ruimtes zoals de kelder en keuken te renoveren. Enkele ruimtes die voor het House ter beschikken kunnen gesteld worden zijn de kelder en 2 of meer boven ruimtes.		Foto's en/of grondplan:	
Criteria: <ul style="list-style-type: none"> - Grootte: - Hoogte: - Vorm en indeling: - Voorzieningen: - Verwarming/koeling: - Energieverbruik: - Beschikbaarheid: - Capaciteit: - Bereikbaarheid: - Ligging: - Beveiliging/verzekering: - Prijs: 					
Gegevens eigenaar/contactpersoon:		Naam:	Marc Boonen		
		Firma/bedrijf:	Mooov		
		Mail:	marc.boonen@mooov.be		
		Gsm/telefoon:	+32 476 80 38 **		
Locatie/adres:		Korte Begijnenstraat 26, 2300 Turnhout			
Link Google Maps:		https://goo.gl/maps/Gz3sVRNo7qK6Pm9b6			
Voordelen:	Mogelijkheid eten/drinken/toilet/vestiaire	Nadelen:	Te klein qua totaaloppervlakte		
	Bushalte is vlakbij		Plafond in de kelder is niet hoog genoeg		
	Goede ligging		Betalend parkeren		
	Het gebouw gaat zelf gebruik maken van HE		Kleine capaciteit		
			Afhankelijk van Den Bond		



Kamp C

Beschrijving ruimte(s), voldoet deze aan de	Uit de gesprekken met Hans Vannuffelen van Kamp C kunnen we afleiden dat er momenteel geen grote ruimtes ter beschikking zijn. Wat wel zijn de relatief kleine duurzame gebouwen die reeds voorzien zijn als demonstratie huizen. Deze duurzame gebouwen zijn te klein om 1 HE techniek volledig te visualiseren. Een 2de optie zou een beschikbare ruimte zijn in het toekomstige circulair gebouw. Hiervan liggen de plannen al wel op tafel maar concrete afmetingen van de overige beschikbare ruimte voor het REH zijn tot heden onbekend. Als laatste is er spake geweest over zelf een gebouw/ruimte te zetten op de site van Kamp C. Dit laatste voorstel brengt uiteraard extra kosten met zich mee maar deze optie biedt ook heel wat mogelijkheden. Aangezien alle gebouwen op Kamp C duurzaam zijn, zou dit gebouw ook kunnen voorzien worden van HE en kunnen we TREH zelf gebruiken als satellietlocatie. Het grote voordeel van Kamp C is dat er nog steeds veel oppervlakte beschikbaar is op de site. De huurprijs bedraagt zo'n €1000 per maand .		Foto's en/of grondplan:	Laadpaal
Criteria: - Grootte: - Hoogte: - Vorm en indeling: - Voorzieningen: - Verwarming/koeling: - Energieverbruik: - Beschikbaarheid: - Capaciteit: - Bereikbaarheid: - Ligging: - Beveiliging/verzekering: - Prijs:				
Gegevens eigenaar/contactpersoon:	Naam:	Hans Vannuffelen		
	Firma/bedrijf:	Kamp C		
	Mail:	hans.vannuffelen@kampc.be		
	Gsm/telefoon:	014/ 27 96 **		
Locatie/adres:	Britselaan 20, 2260 Westerlo			
Link Google Maps:	https://goo.gl/maps/aDXi5Figrrk9Mjr58			
Voordelen:	Het gebouw maakt gebruik van HE	Nadelen:	Afgelegen	
	alle voorzieningen zijn aanwezig		Ongewenst verband tussen HE en duurzaam wonen	
	Kamp C toont veel interesse, wellicht lagere kostprijs.		Geen concrete afmetingen in het circulair gebouw	
	Mogelijkheid om een zelf een gebouw te plaatsen		Afhankelijk van Kamp C	
	flexibel huurcontract is mogelijk		Paden zijn niet overdekt	
	Laadpaal E-bikes		Niet geschikt voor rolstoelgebruikers	
				

Circulair gebouw

Foto's en/of grondplan:

10 x 6 m



10 x 10 m



11 x 20 m



10 x 8 m



5 x 5 m



8 x 18 m



5 x 5 m



Wimec

Beschrijving ruimte(s), voldoet deze aan de	<p>Een deel van het bekende gebouw Würth in Turnhout is omgevormd tot hét event- en congressentrum van de regio. WIMEC telt vijf zalen, enkele kleine ruimtes en een polyvalente ruimte. Goed voor 900 m². Na het mondeling overleg bij Wimec liet Dominic echter weten dat de overige ruimtes niet beschikbaar zijn voor de uitbating van TREH. Dit komt omdat de eigenaar Würth enkel akkoord ging met dagcontracten. Dit maakt het organisatorisch onmogelijk.</p>			Foto's en/of grondplan:
Criteria: - Grootte: - Hoogte: - Vorm en indeling: - Voorzieningen: - Verwarming/koeling: - Energieverbruik: - Beschikbaarheid: - Capaciteit: - Bereikbaarheid: - Ligging: - Beveiliging/verzekering: - Prijs:				
Gegevens eigenaar/contactpersoon:	Naam:	Dominic De Gruyter		
	Firma/bedrijf:	Wimec		
	Mail:	dominic@pfl.be		
	Gsm/telefoon:	/		
Locatie/adres:	Everdongenlaan 29, 2300 Turnhout			
Link Google Maps:	https://goo.gl/maps/SksDvZxxvwHP2wCj6			
Voordelen:	Goede ligging	Nadelen:	Niet beschikbaar	
	Voldoende ruimte			
	Gemakkelijk bereikbaar			
	Wifi			
	Openbaar vervoer is mogelijk			
	Goed imago			



OMC

Beschrijving ruimte(s), voldoet deze aan de		Een mogelijke locatie voor de vestiging van de vaste opstelling bevindt zich in de Open Manufacturing Campus. Beter gekend als de "oude Phillips site" in Turnhout. Op deze site zijn verschillende bedrijven uit de HE-sector reeds gevestigd onder andere BePowered, Leclanché en Solenco Power met hun waterstofbatterij. Deze bedrijven zijn op zoek naar een totaaloplossing voor het gebruik van hernieuwbare energie voor morgen. Vandaar dat er wel interesse is voor een mogelijke samenwerking met The Renewable Energy House.		Foto's en/of grondplan:	
Criteria: - Grootte: - Hoogte: - Vorm en indeling: - Voorzieningen: - Verwarming/koeling: - Energieverbruik: - Beschikbaarheid: - Capaciteit: - Bereikbaarheid: - Ligging: - Beveiliging/verzekering: - Prijs:					
Gegevens eigenaar/contactpersoon:		Naam:	Leo Oelbrandt		
		Firma/bedrijf:	OMC		
		Mail:	Leo.Oelbrandt@openmanufacturingcampus.com		
		Gsm/telefoon:	0489 60 57 **		
Locatie/adres:		Slachthuisstraat 96, 2300 Turnhout			
Link Google Maps:		https://goo.gl/maps/PdkSjgocMcbGgzdh8			
Voordelen:	Goed imago	Nadelen:	Moeilijk toegankelijk vanwege strenge controles		
	Veel potentiële partners in de buurt				
	Toont interesse in TREH				
	Bereikbaar via openbaar vervoer				

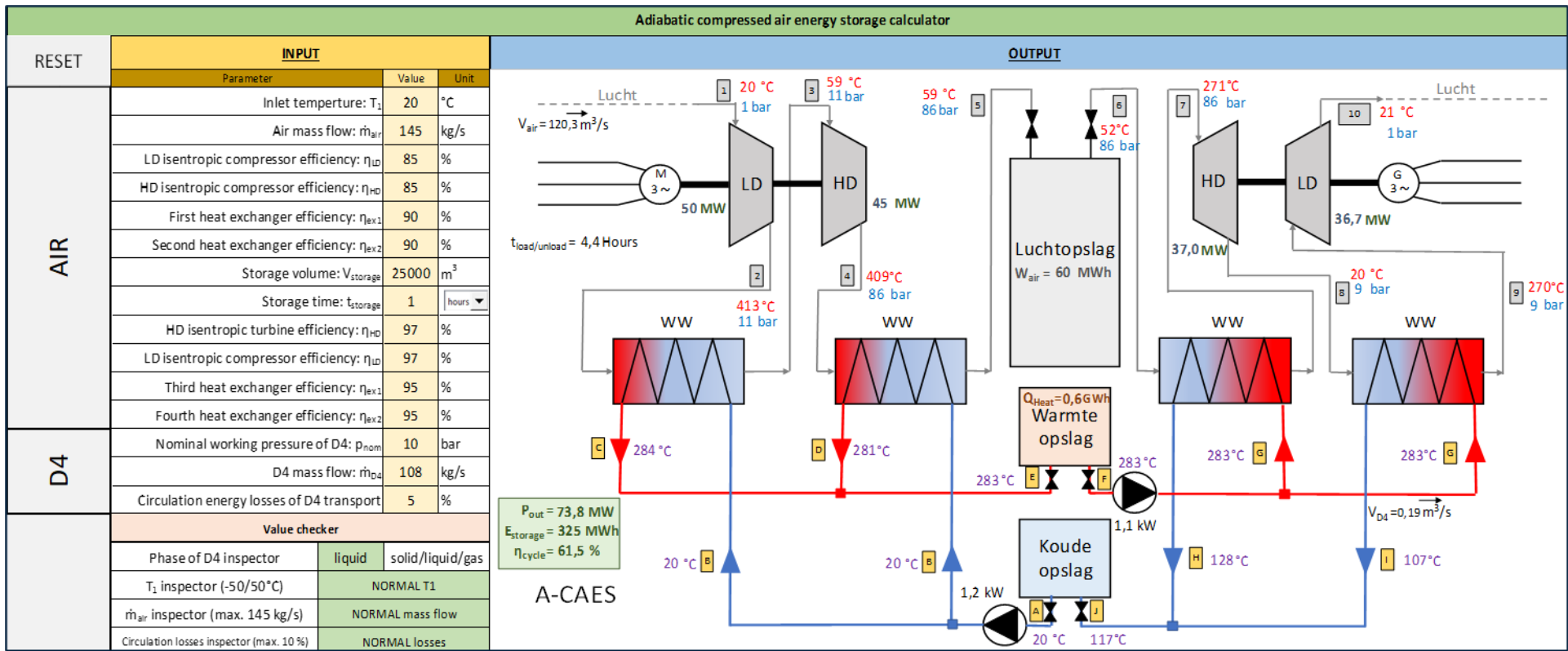


Bijlage C INDELING TECHNIEKEN

					Ingeburgerd	Veelbelovend	Uniek	In onderzoek	
Residentieel	Productie	Straling	Zonnepanelen (PV)						
			Monokristallijn	X					
			Polykristallijn	X					
			Amorf	X					
			Zonneboiler	X					
		Wind	(micro) windturbine			X			
			Biomassa						
			Biologisch afval verbranden			X			
		Geothermie	geothermische warmtepomp	X					
			Waterstof	Brandstofcel				X	
		Opslag		Elektrisch	Batterijen (vele aanbieders : V2H : Vehicle to house)			X	
			Chemisch		Waterstoftank				X
	Thermisch			Ondergronds buffervat (Ecovat)				X	
			Verbruik	Elektrisch	Alle gekoppelde elektrische verbruikers				
	Slimme meter uitlezen						X		
	Waterstof			Verbruik brandstofcel					
		Thermisch		Algemeen warmteverlies					
	Recuperatie			Rookgassen			X		
		Afvalwater		Douche met warmteterugwinning	X				

Niet residentieel						
Productie	Straling	PV-installatie				
		Dak	X			
		Floating PV (spaarbekkens)		X		
		Bi-facial		X		
		PV-carport	X			
		Solar Organic Rankine Cyclus				
		Zonneboiler	X			
	Windenergie	X				
	Getijdenenergie			X		
	Geothermie	Diepe geothermie (Balmatt Mol)			X	
		geothermische warmtepomp	X			
	Biomassa	Vergistingsinstallatie		X		
		WKK				
	WKK	Koppeling aan warmtenet mogelijk		X		
		Voedende energie				
		Aardgas	X			
	Hydro	Biogas uit vergister		X		
		Waterkrachtcentrales				
	Hydro	Langs albertkanaal		X		
		Getijdenenergie				
		Opslag				
	Warmtenetten	Buffering en handel warmte		X		
		Brandstofcel				
		lange termijnsopslag			X	
		Batterijen	Loodzuur	X		
			Zoutwater		X	
			Lithium	X		
mechanisch		Pumped Hydro bovengronds	X			
		Pumped Hydro ondergronds			X	
		Vliegwielen		X		
Fysisch		Compressed Air Energy Storage			X	
Verbruik						
Elektrisch						
	Thermisch					
Thermisch	Warmtepompboiler	X				
Recuperatie						
Restwarmte	Ruimtelucht					
	Twincoil	X				
	Warmtewiel	X				
	KruisstroomWW	X				
	Sanitair warm water					
	Douche met warmteterugwinning	X				
	Warmteterugwinning uit afvalwater			X		
Restwarmte Riolering				X		

Bijlage D A-CAES REKENTOOL

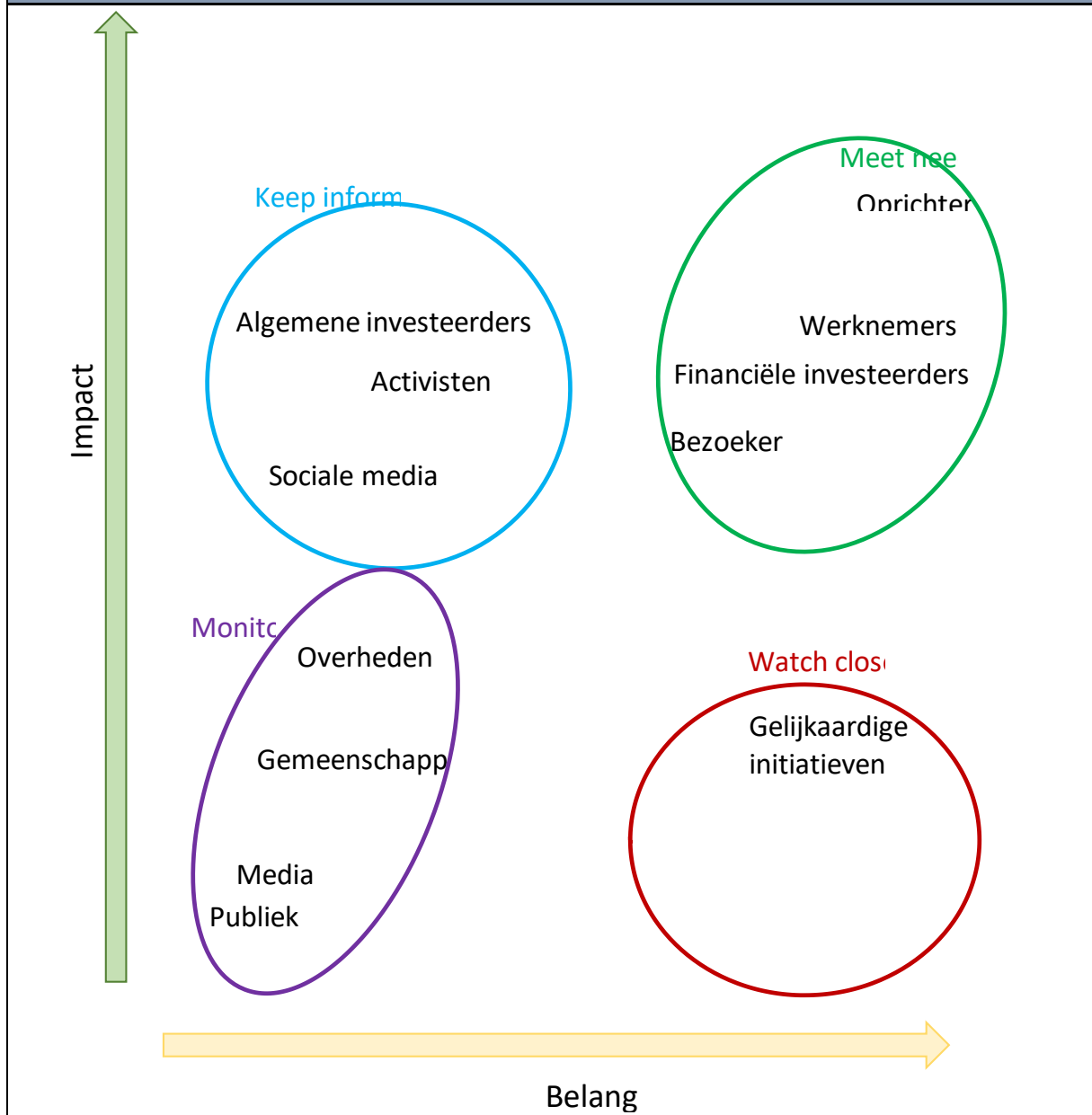


Bijlage E STAKEHOLDERANALYSE

Fase 1				Fase 2				Fase 3	Fase 4	Fase 5			
TREH	Hoofdgroep	Stakeholder	Commentaar	Doel	Type	Belang aan REH	commentaar	Steun	Onderlinge relaties	Contact	Impact op REH		
Primaire stakeholders	Bezoekers	Professionals uit de HE-sector		Info en advies verkrijgen over HE	Economisch	Belangrijk	Bedrijven die HE te	+	Zie relatie matrix	Mail, vakbladen	+		
		Professionals uit de Kempen		Gerichte informatie verkrijgen	Economisch	Zeer belangrijk	Professionals met i	+		Mail	+		
		Particulieren:			Algemene informatie HE	Economisch	Zeer belangrijk	Bezoek uit interess		+	Sociale media, Reclame TV	+	
			Overtuigd publiek		Informeren over HE	Economisch	Belangrijk	Mensen die geïnter		+	Sociale media, Reclame TV	+	
			Geen Klimaatmening		Nieuwsgierigheid, informatie opdoen HE	Economisch	Matig	Mensen die geen o		0	Sociale media, Reclame TV	++	
			Ontkennd publiek		Geen concreet doel	Economisch	Eerder weinig	Mensen die een or		-	Sociale media, Reclame TV	0	
		Doe het zelfers		Deze doelgroep wil e	Algemeen advies HE	Economisch	Belangrijk	Informeren over di		+	Sociale media, Reclame TV	+	
		Scholen		Studenten stimuleren	Kennismaking met HE en interesse wekken	Economisch / Sociaal	Belangrijk	Informeren en sen		+	Mail	0	
		Volwassenenonderwijs (TREC)			Bijscholing	Economisch	Zeer belangrijk	Tijdens de activitei		+	Dezelfde organisatoren	++	
		Aandeelhouders/investeers (financiële middelen)	Bedrijf uit HE-sector			Reclame, aantrekken van klanten	Economisch	Zeer belangrijk		Bedrijven die inven	+	Mail, vakbladen	++
	KempENergiek				Doelstellingen halen Kempenpact 2030	Economisch	Zeer belangrijk	Als oprichter van T		+	Mail	++	
	Gemeentes			ook concrete project	Publiciteit en goed imago	Economisch	Belangrijk	Indien een gemeen		+	Mail	++	
	Kenniscentra			ook informatie verst	Informeren	Economisch	Belangrijk	Kenniscentra doen		+	Mail, vakbladen	++	
	Regionale overheden (IOK, Streekplatform)				Promoten HE in regio Kempen	Economisch	Belangrijk	Lokale overheden i		+	Mail	++	
	Oprichters	KempENergiek			Projectdoelstellingen halen	Sociaal	Zeer belangrijk	Als oprichter is Ken		+	Mail	++	
		Masterstudenten			Masterproef	Sociaal	Belangrijk	De studenten zijn h		+	Mail	++	
	Partners (algemene samenwerking)	Bedrijven uit de HE-sector			Reclame, aantrekken van klanten	Economisch	Belangrijk	Als bedrijf actief in		+	Mail	+	
		Universiteiten		ook informatie verst	Maatschappelijke rol en imago	Economisch	Matig	Universiteiten bezi		+	Mail	+	
		Kenniscentra			Informatie delen	Economisch	Matig	Kenniscentra doen		+	Mail	+	
	Werknemers	Verenigingen			Informeren en animeren van leden	Sociaal	Matig	Verenigingen zijn n		+	Mail	+	
		Personeel TREH			Passie omzetten in daden	Economisch	Zeer belangrijk	Als personeel staar		+	Vacature	+	
		Vrijwilligers			Uit interesse en engagement	Sociaal	Belangrijk	Vrijwilligers die on		+	Sociale media	+	
	Secundaire stakeholders	Activisten	Klimaatactivisten		Gelijkaardige belangen	Sociaal	Belangrijk	Door gelijkaardige		+	Zie relatie matrix	Sociale media	+
		Gemeenschappen	Lokale gemeenschappen		Meer gebruik van HE	Sociaal	Matig	De lokale gemeens		0		Sociale media	0
Overheden		Lokale overheden			Meer gebruik van HE	Politiek	Matig	Indien de lokale ov	0	Mail		+	
		Regionale overheden			Meer gebruik van HE	Politiek	Matig	Voor regionale ove	0	Mail		0	
Publiek		Kempenaren			Meer gebruik van HE	Sociaal	Eerder weinig	De individuele Kem	0	Sociale media		-	
Media		TV, regionale televisie		ook wel informatie v	Kijkcijfers	Economisch	Eerder weinig	Organisaties die ge	+	Mail		0	
		Nieuws		ook wel informatie v	Kijkcijfers	Economisch	Eerder weinig	Organisaties die ge	+	Mail		0	
		Pers		ook wel informatie v	Kijkcijfers	Economisch	Eerder weinig	Organisaties die ge	+	Mail		0	
Sociale media		Internet: FB, LinkedIn, ...		ik twijfel eraan om d	Mening verkondigen	Sociaal	Eerder weinig	Op sociale media k	+	Sociale media		+	
			Believers		Ontkenners overtuigen	Sociaal	Belangrijk	Believers hechten \	+	Sociale media		+	
			Ontkenners		Believers ontcrachten	Sociaal	Eerder beperkt	Ontkenners hechte	-	Sociale media		++	
Gelijkaardige initiatieven		Kenniscentra			Informeren HE	Economisch	Belangrijk	Als kenniscentra is	-	Mail		+	
		Beurzen			Verkopen HE	Economisch	Zeer belangrijk	Beurzen hebben al	-	Mail		+	

Stap 4:

Stakeholderanalyse matrix



Bijlage F REKENTOOL THERMISCHE ENERGIEOPSLAG

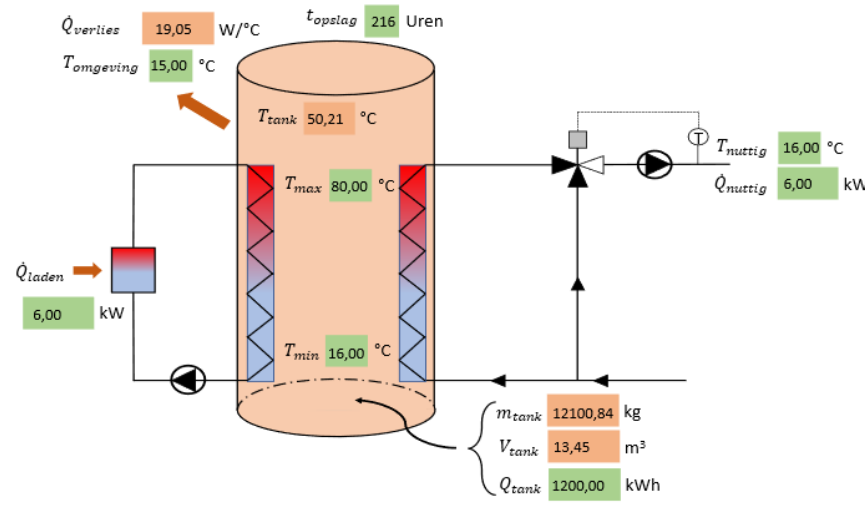
Bereken

Thermische invoergegevens	
Limiet Laad/Onlaadvermogen	6 kW
Laadvermogen	6,00 kW
Opslagcapaciteit	1200,00 kWh
Onlaadvermogen	6,00 kW
$T_{omgeving}$	15,00 °C
T_{min}	16,00 °C
T_{max}	80,00 °C
Opslagtijd	216 Uren

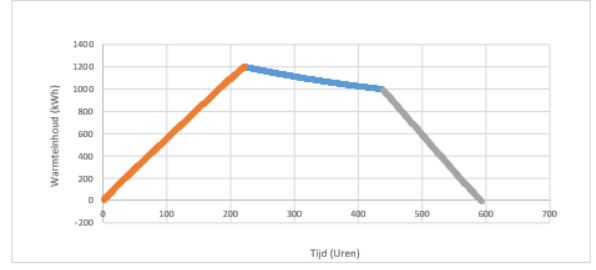
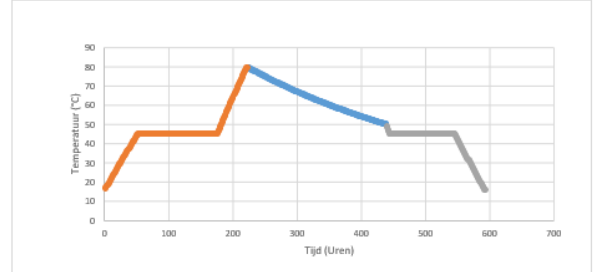
Tank	
Plaatsing	Bovengronds
Vormverhouding	1,1 β
Totale hoogte tank	1,8200854 m
Ingraafdiepte	0,01 m

Samenstelling wand			
Naam	D_{is23} (cm)	λ_{is23} (W/m.K)	ρ (Kg/m ³)
Polyurethaar	5	0,0285	95
Staal	2	31,75	2570
Baksteen	2	0,7	1600
		#N/B	#N/B
		#N/B	#N/B

Materiaal voor warmteopslag:				
Voelbaar		Latent		
Medium	Water	Type	Organisch	
ρ	1000 Kg/m ³	Organisch	Paraffin wax	
T_{max}	100 °C	Euteotisch	HCOONa-HCOOK	
T_{min}	0 °C	Zout-Hydrate	Sodium sulphate decahydrate	
C	4186 JKg.K	T_{melt}	45,00 °C	
		C_{melt}	200000,00 JKg	
		C_{vast}	3000,00 JKgK	
		$C_{vloeibaar}$	2000,00 JKgK	
		ρ	300,00 Kg/m ³	



Resultaten	
$Q_{verlies}$ (W/K)	19,05
V_{medium} (m ³)	13,45
T_{eind} (°C)	50,21
Q_{eind} (kWh)	999,73
η_{opslag} (%)	83,31
m_{medium} (Kg)	12100,84
η_{laden} (%)	222,00
η_{onload} (%)	90,09
t_{onload} (Uren)	155,00
η_{total} (%)	69,82



FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
CAMPUS GEEL
Kleinhoefstraat 4
2440 GEEL, België
tel. + 32 14 72 13 00
iiw.geel@kuleuven.be
www.iiw.kuleuven.be

