

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: nucleaire
technologie

Masterthesis

Levenscyclusanalyse op eenvoudige diepegeothermietechnieken

Valérie Willems

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: nucleaire technologie,
afstudeerrichting milieu

PROMOTOR :

Prof. dr. Wouter SCHROEYERS

PROMOTOR :

Dr. Ben LAENEN

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: nucleaire
technologie

Masterthesis

Levenscyclusanalyse op eenvoudige diepegeothermietechnieken

Valérie Willems

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: nucleaire technologie,
afstudeerrichting milieu

PROMOTOR :

Prof. dr. Wouter SCHROEYERS

PROMOTOR :

Dr. Ben LAENEN



KU LEUVEN

Woord vooraf

De keuze van dit masterproefonderwerp is voortgekomen uit mijn persoonlijke interesse en de wensen van de opdrachtgever VITO. Ik heb een grote passie voor duurzaamheid en het concept van geothermie kan hierin een grote rol spelen volgens mij. Met deze ingesteldheid ben ik in dialoog gegaan met VITO waaruit het voorstel van een LCA kwam. Dit type analyse was mij onbekend, maar in de loop van deze masterproef heb ik hierin veel inzichten verworven. Intussen zie ik het belang van dergelijke analyses in de zoektocht naar volledige duurzaamheid. Het schept namelijk een totaalbeeld van de impact van het onderwerp over zijn volledige levensduur en over zeer verschillende categorieën. Niet enkel bijvoorbeeld de populaire *global warming potential* (GWP) maar ook carcinogene effecten, landgebruik, eutrofiëring en veel meer. Het is een fascinerende en enorm verweven analyse, die volgens mij nog veel potentieel biedt.

Het was echter geen eenvoudige uitwerking. LCA zelf is ondertussen uitgegroeid tot een meer universele analysemethode, waarvoor er intussen dus veel richtlijnen werden gecreëerd. Specifiek over geothermie is er echter nog maar weinig literatuur te vinden. Hierdoor was het verzamelen van informatie niet altijd even vanzelfsprekend en werd vaak gebruik gemaakt van gelijkaardige bronnen. Verder zorgde de theoretische aard van de installaties die geanalyseerd werden in deze thesis voor onvolledige en verspreide data. Er werden veel aannames gedaan en gegevens werden gegenereerd door simulaties en verzameld uit beschikbare literatuur. Hierdoor zouden dus afwijkingen kunnen voorkomen voor praktische installaties in de toekomst.

De verwezenlijking van deze masterproef is mogelijk gemaakt door Dr. Ben Laenen van het Vlaams instituut voor technologisch onderzoek in Mol als mijn externe promotor en Prof. Dr. Wouter Schroeyers die me bijstond als mijn interne promotor van de opleiding industriële ingenieurswetenschappen te Diepenbeek. Aan deze promotoren uit ik mijn dankbaarheid voor de betekenisvolle begeleiding en het vertrouwen in mij om dit project tot een goed einde te brengen. Verder bedank ik mijn vader, ing. Robert Willems, als mijn bron van inspiratie voor deze opleiding en als mijn klankbord in de uitwerking van deze masterproef. Ook mijn moeder, Hilde Daemen, wil ik bedanken voor de ondersteuning en algemene aanmoediging. Tot slot wil ik mijn partner, familie en vrienden bedanken voor de steun en interesse.

Inhoud

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren	7
Afkortingen	9
Abstract.....	11
Abstract in English	13
1 Inleiding.....	15
2 Life cycle assessment (LCA).....	17
2.1 Inleiding tot LCA	17
2.2 Doel en domein	17
2.2.1 Doel	17
2.2.2 Domein	18
2.2.3 Functionele eenheid.....	18
2.3 Inventarisanalyse.....	19
2.4 Impactanalyse.....	19
2.5 Interpretatie	20
3 Geothermie	21
3.1 Geothermie in Europa	22
3.2 Diepe geothermie in België	22
3.3 Diepe geothermie in Duitsland.....	24
3.4 Geothermie met enkelvoudige boringen	25
3.4.1 Open-loop.....	26
3.4.2 Closed-loop.....	27
3.4.3 Semi-open-loop	27
4 LCA op geothermische installaties	29
4.1 GEOENVI: LCA-richtlijnen	29
4.1.1 GEOENVI: doel en domein.....	30
4.1.2 GEOENVI: LCI en LCIA	31
4.2 Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies: LCA-richtlijnen 31	
4.2.1 Environmental Assessment: doel en domein	32
4.2.2 Environmental Assessment: LCI en LCIA.....	32
4.3 LCA voorbeelden	33

4.3.1	Balmatt project	33
4.3.2	The United Downs Deep Geothermal Power project	35
4.3.3	ECW geo Andijk project	36
5	Materialen en Methoden	39
5.1	Doel en domein van de studie	39
5.1.1	Doel van de studie	39
5.1.2	Domein van de studie	39
5.2	LCI van de studie	41
5.2.1	Open-loop scenario	43
5.2.2	Semi-open-loop scenario	44
5.2.3	Closed-loop scenario	45
6	Resultaten van de LCA	47
6.1	LCIA resultaten	47
6.1.1	Open-loop resultaten	47
6.1.2	Semi-open-loop resultaten	48
6.1.3	Closed-loop resultaten	49
6.1.4	Vergelijking van de resultaten	50
6.2	LCA interpretatie	52
7	Conclusie	55
	Referentielijst	57
	Bijlagenlijst	59

Lijst van tabellen

Tabel 1: Geo-technische parameters van de drie onderzochte scenario's (S1,2 en 3) voor de Belgische kalksteenreservoirs.....	34
Tabel 2: Resultaten van de LCA voor de drie scenario's van de Belgische kalksteenreservoirs	34
Tabel 3: Algemene geotechnische parameters van het UDDGP project	35
Tabel 4: Scenariospecifieke parameters voor het UDDGP project	35
Tabel 5: Geo-technische parameters voor de installatie in Andijk	37
Tabel 6: Resultaten van de LCA op het Andijk doublet.....	38
Tabel 7: Elektriciteit mix België 2022.....	41
Tabel 8: Aannames voor stimulatie van de semi-open-loop installatie.....	45
Tabel 9: Open-loop LCIA resultaten	47
Tabel 10: Semi-open-loop LCIA resultaten	48
Tabel 11: Closed-loop LCIA resultaten	49
Tabel 12: LCA resultaten voor warmtenet in Vancouver	53

Lijst van figuren

Figuur 1: SDG overzicht	15
Figuur 2: Schematische voorstelling voor een LCA.....	17
Figuur 3: Kaart van België met de bovenste kalkhoudende bassins en de diepe Dinantse reservoirs .	24
Figuur 4: Duitse geothermische locaties met temperatuurgradiënt.....	25
Figuur 5: Voorbeeld van een open loop single well installatie.....	26
Figuur 6: Voorbeeld van een closed loop single well installatie.....	27
Figuur 7: Voorbeeld van een semi-open loop single well installatie.....	28
Figuur 8: Volledig systeem voor een geothermische installatie met de afbakening van het domein...	30
Figuur 9: LCI inhoudt volgens Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies.....	32
Figuur 10: Genormaliseerde resultaten van de LCA voor het UDDGP project vergeleken met andere energiebronnen.....	36
Figuur 11: Bijdrage van impact categorieën op eindpunt resultaten Andijk.....	37
Figuur 12: Domein van de LCA	39
Figuur 13: Gehanteerd open-loop model voor LCA	43
Figuur 14: Gehanteerd semi-open-loop model voor LCA.....	44
Figuur 15: Gehanteerd closed-loop model voor LCA	45
Figuur 16: Vergelijking van de drie scenario's voor CML-IA	50
Figuur 17: Vergelijking van de drie scenario's voor USEtox.....	51
Figuur 18: Vergelijking van de drie scenario's voor CED	51

Afkortingen

Life Cycle Assessment LCA

De Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek VITO

Joint Research Centre JRC

Sustainable Development Goals SDG

Internationale Organisatie voor Standaardisatie ISO

Life Cycle Inventory LCI

Life Cycle Impact Assessment LCIA

Terawattuur elektrisch TWh_{el}

Terawattuur thermisch TWh_{th}

End Of Life EOL

Abstract

De Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) onderzoekt diepe geothermische installaties als hernieuwbare energiebron in de evolutie naar meer duurzaamheid. In het kader van kostenefficiëntie worden er tegenwoordig geothermische installaties ontwikkeld waarbij maar één boring nodig is. Er is echter nog maar weinig onderzoek uitgevoerd naar de milieutechnische impact van dergelijke installaties. Daarom onderzoekt deze thesis dit thema voor een open-loop, semi-open-loop en closed-loop geothermische warmtecentrale.

De milieutechnische impact werd onderzocht door middel van een *Life Cycle Assessment* (LCA) op basis van het *cradle-to-grave*-principe. Het domein van deze LCA omvatte drie fasen: de constructie, de operationele fase en de End-of-Life van de drie installaties. De impact werd geëvalueerd op basis van negen impactcategorieën met hoge prioriteit voor geothermische installaties volgens het JRC. De analyse werd uitgevoerd met het programma SimaPro, waarbij gegevens verzameld werden uit de literatuur, gesimuleerde installaties van VITO en de ecoinvent-databank.

De LCA toont aan dat de open-loop installatie de laagste impact heeft op basis van de geselecteerde impactcategorieën. Verder blijkt dat de impact van de closed-loop installatie minstens dubbel zo groot is als deze van de andere installaties. Samenvattend toont deze studie aan dat open-loop, semi-open-loop en closed-loop geothermische installaties goede alternatieven kunnen zijn voor klassieke warmtebronnen met de open-loop als beste kandidaat.

Abstract in English

The Flemish Institute for Technological Research (VITO) is investigating deep geothermal installations as a renewable energy source in the transition towards better sustainability. In the pursuit of cost efficiency, geothermal installations that require only one well are currently being developed. However, there has been little research into the environmental impact of such installations. Therefore, this paper examines this impact for open-loop, semi-open-loop, and closed-loop geothermal heating systems.

The environmental impact was assessed using a Life Cycle Assessment (LCA) based on the cradle-to-grave principle. The scope of this LCA included three phases: construction, operation, and End-of-Life of the three installations. The impact was evaluated based on nine high-priority impact categories for geothermal installations, as defined by the JRC. The LCA was conducted using the SimaPro software, with data collected from literature, simulated installations by VITO, and the ecoinvent database.

The LCA shows that the open-loop plant has the lowest impact based on the selected impact categories. It further shows that the impact of the closed-loop plant is at least double the size of the impact of the other plants. In summary, this study shows that open-loop, semi-open-loop and closed-loop geothermal plants can be good alternatives to conventional heat sources with the open-loop being the best candidate.

1 Inleiding

Hernieuwbare energiebronnen, zoals geothermische centrales, winnen steeds meer aan populariteit en relevantie in de zoektocht naar duurzaamheid. Dit is in lijn met de *sustainable development goals* (SDG's) die zijn opgesteld door de Verenigde Naties (VN) in 2015 in het kader van duurzame ontwikkeling wereldwijd. In totaal zijn er 17 SDG's vastgelegd, zoals te zien is in Figuur 1.



Figuur 1: SDG overzicht [1]

De ontwikkeling van geothermische centrales draagt bij aan minstens zes SDG's, namelijk nummers 7, 9, 11, 12, 13 en 17. Het produceert groene energie, bevordert innovatie en infrastructuur in de industrie, voorziet steden en gemeenschappen van duurzame energie en warmte en draagt in het algemeen bij aan duurzaamheid [2].

Om de voordelen van geothermische installaties te vergelijken met die van conventionele energie- en warmtecentrales, evenals met andere hernieuwbare bronnen en om hun impact op mens en omgeving te analyseren, wordt gebruik gemaakt van een levenscyclusanalyse (LCA). Een LCA analyseert de impact van producten, diensten en processen gedurende hun hele levensduur op basis van geselecteerde impactcategorieën. Hierop wordt nader ingegaan in hoofdstuk 2.4 Impactanalyse.

De interesse in de ontwikkeling van geothermische installaties is de laatste jaren toegenomen en daardoor ook de interesse in de ontwikkeling van installaties met de hoogste efficiëntie en laagste kosten. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van een nieuw type installatie dat in deze scriptie verder zal worden onderzocht: het nieuwe type omvat installaties die slechts één boring nodig hebben, in tegenstelling tot klassieke installaties met minstens één productie- en één injectieput.

Het gebruik van een enkelvoudige boring verlaagt de kost van de installatie, waardoor deze toegankelijker wordt voor een breder publiek. Deze scriptie voert een LCA uit op drie types theoretische installaties met een enkelvoudige boring: een open-loop, een closed-loop en een semi-open-loop installatie. De keuze van het type installatie hangt af van de geologische omstandigheden waarin de installatie zal worden gebouwd. Door een LCA uit te voeren op deze drie types installaties, kan een vergelijking worden gemaakt van hun milieutechnische impact en kan deze technologie ook worden vergeleken met andere warmtebronnen, zoals gas- en olieverbranding.

Deze scriptie heeft als doel om de milieutechnische impact van geothermische installaties met enkelvoudige boring te onderzoeken en te vergelijken met die van conventionele installaties en andere hernieuwbare energiebronnen. Het onderzoek zal zich richten op de volgende aspecten:

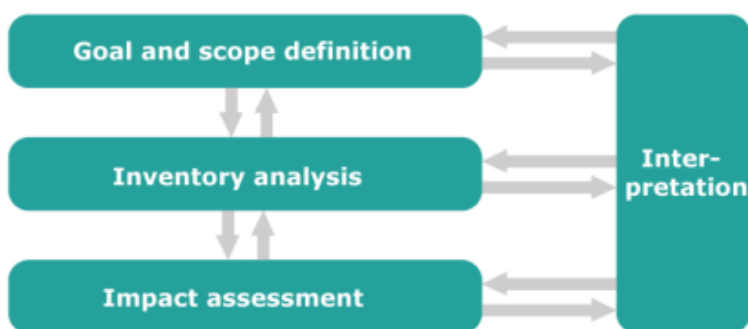
- Hoe onderscheiden de LCA's van de drie types installaties zich van elkaar?
- Wat is het verschil tussen deze LCA en een LCA uitgevoerd op andere energiebronnen?

In hoofdstukken 2, 3 en 4 volgt respectievelijk een uitgebreide literatuurstudie die ingaat op de theorie achter een LCA, uitlegt wat geothermie inhoudt en hoe LCA's uitgevoerd worden op geothermische centrales. In hoofdstuk 4 worden enkele voorbeelden aangehaald. Hoofdstuk 5 omschrijft uitgebreid de uitgevoerde LCA. Vervolgens overloopt hoofdstuk 6 de resultaten van de LCA en de scriptie wordt afgesloten door de conclusie in hoofdstuk 7.

2 Life cycle assessment (LCA)

2.1 Inleiding tot LCA

Een *life cycle assessment* (LCA), of ook een levenscyclusanalyse, is een methode om de impact van producten, processen en diensten op de aarde in te schatten over de volledige levenscyclus. Het is een veelzijdige en goed uitgewerkte, internationaal gestandaardiseerde methode, die vastgelegd is in onder andere de ISO 14040 2006. In grote lijnen is een LCA altijd opgesplitst in 4 fasen, weergegeven in figuur 2 [3].



Figuur 2: Schematische voorstelling voor een LCA [3]

In een LCA ligt de focus volledig op de impact van het product, de processen of de dienst gedurende een normale levensduur of werking. Ongelukken worden niet mee in rekening gebracht in deze analyse omdat dit buiten de randvoorwaarden valt. Deze zullen eerder meegenomen worden in een risicoanalyse.

2.2 Doel en domein

2.2.1 Doel

Er zijn verschillende doelen mogelijk voor een LCA en deze hangen allemaal af van de wensen en vereisten van de opdrachtgever voor de LCA. Zo kan een LCA opgesteld worden met als doel om producten met eenzelfde functie met elkaar te vergelijken. Ook kunnen producten, processen of diensten aan externe partijen voorgesteld worden aan de hand van een LCA. Een LCA kan ook als basis dienen voor het verbeteren van een ecodesign, waarbij milieugerichte productontwikkeling dan centraal staat. Bij het definiëren van het doel moet er altijd gekeken worden naar drie vragen: Waarom wordt de LCA uitgevoerd? Wat is gewenst om te bereiken met de studie? Waarvoor zullen de resultaten gebruikt worden? [3].

Het doel van een LCA, net zoals de hele analyse, is iteratief, het is een levend en altijd evoluerend organisme gedurende de uitvoering. Het doel kan dus in een later stadium van de analyse nog veranderen [3].

2.2.2 Domein

De volgende fase is het afbakenen van het domein van de studie. Hierin is het belangrijk om duidelijk en volledig te zijn in de gebruikte standaard en in de elementen die opgenomen worden in de studie. Er zijn drie levenscyclusmodellen die worden ingezet voor de afbakening van de delen van een proces die worden meegenomen in de analyse:

- Cradle-to-gate: de analyse start hier bij het ontginnen van de ruwe materialen en stopt bij het verlaten van een afgewerkt product door de poorten van de fabriek.
- Cradle-to-grave: dit omvat een volledige levenscyclus van een product.
- Cradle-to-cradle: deze nog relatief nieuwe methode steunt op het werken in een gesloten systeem of ook wel op recyclage en hergebruik.

Naast het gekozen model wordt er in deze fase ook een functionele eenheid gedefinieerd. Het volledige systeem wordt besproken aan de hand van de grenzen volgens het gekozen model, de eventuele limitaties en veronderstellingen. Verder selecteert deze fase ook de impactcategorieën waar de LCA zich op toespitst. Het vormt de basis en het kader voor het verdere verloop van het onderzoek maar is evenmin als het doel statisch. Ook zorgt een duidelijk domein voor een begrijpelijke analyse voor het doelpubliek [3].

2.2.3 Functionele eenheid

De definitie van de functionele eenheid is een belangrijke stap in het opstellen van een LCA. Het geeft namelijk eenduidig weer ten opzichte van wat de analyse zal worden uitgevoerd. De volledige datacollectie en verwerking zal ten opzichte van deze eenheid gebeuren. Ook de rapportering maakt gebruik van deze eenheid. Het zorgt ervoor dat de resultaten kunnen worden gebruikt voor vergelijking tussen gelijkaardige producten of biedt de mogelijkheid om potentiële vooruitgang in een product te vinden. Het vormt dus de referentie waarnaar de volledige input en output van het systeem wordt genormaliseerd [3].

Voor multifunctionele systemen is het kiezen van een goede functionele eenheid nog belangrijker. Een multifunctioneel systeem duidt op een systeem dat niet één enkele, nuttige uitstroom produceert maar meerdere. Een voorbeeld van een multifunctioneel systeem is een afvalverwerkingsinstallatie waarin zowel energie kan worden geproduceerd als compost of bemesting. Bij multifunctionele systemen kan het moeilijk worden om de impact van één eindproduct juist in te schatten want het blijft een subjectieve inschatting. Zo kan de impact verdeeld worden volgens economische waarde, massa, ... waarbij een verschillende verdeling kan leiden tot een ander eindresultaat voor de impactanalyse. Er moet dus gewerkt worden met een correcte en relevante functionele eenheid voor beide eindproducten om te vermijden dat er fouten optreden [3].

2.3 Inventarisanalyse

Zodra er een duidelijk doel en domein is bepaald, volgt het opstellen en de analyse van de inventaris. Deze inventaris is een samenvatting van alle processen die het product zal doorlopen. Voor elk proces zal er worden gekeken naar de uitstoten in de omgeving, waarbij bodem, water en lucht onder de loep worden genomen. Life cycle inventory (LCI) verwijst naar het eindresultaat van deze fase en ligt aan de basis van de life cycle impact assessment (LCIA) uit fase drie. In de huidige fase gebeurt veel dataverzameling voor het volledige proces van het product. Er kunnen honderd tot duizend processen voor een product terechtkomen in de LCI waardoor het de grootste en meest complexe stap is van een LCA. Naast het verzamelen van data om de impact in kaart te brengen, kan in deze fase ook een herziening gebeuren van het vooropgestelde domein via de nieuw verkregen informatie. Er kunnen stadia, subsystemen of materiaalstromen verwijderd worden mits er bewezen kan worden dat deze geen degelijke impact toevoegen. Ook het toevoegen van processen die een significante impact blijken te hebben, is mogelijk. Dit proces is inherent aan de iteratieve aard van een LCA. Tot slot zal hierin ook een duidelijke verklaring worden gegeven omtrent de toedeling van impact voor complexe systemen met meerdere uitgangproducten [3].

2.4 Impactanalyse

Fase drie van een LCA voert de LCIA uit. Het biedt een overzicht van de impact die het product, het proces of de dienst uitoefent op de omgeving en het milieu. Deze fase omvat vier grote elementen: categorie definiëring, classificatie, karakterisering en als laatste waardering en reflectie. Bij het definiëren van de categorieën wordt een terugkoppeling gemaakt naar de eerste fase, er wordt gekeken naar de doelen en op basis hiervan wordt een selectie gemaakt van vaak al bestaande impactcategorieën die nu geëvalueerd zullen worden. De selectie houdt rekening met enkele elementen: de volledigheid van de studie, een praktische hoeveelheid aan categorieën en de onafhankelijkheid van de geselecteerde categorieën. Verder moet er een verband zijn tussen de impactcategorieën en de karakteriseringsmethode. Hieronder zijn de impactcategorieën opgelijst volgens ISO. Naast deze reeks zijn er nog tal van andere reeksen die gebruikt kunnen worden [3].

- Abiotische grondstoffen
- Biotische grondstoffen
- Landgebruik
- Opwarming van de aarde
- Stratosferische ozonuitputting
- Ecotoxicologische impact
- Menselijke toxicologische impact
- Fotochemische oxidantenproductie
- Verzuring
- Eutrofiëring
- Werkomgeving

Nadat de selectie van de categorieën is uitgevoerd, volgt de kwalitatieve classificatie van de inventaris. De classificatie zorgt voor het toekennen van de invoer en uitvoer uit de inventaris aan de verschillende geselecteerde categorieën en dit op basis van wetenschappelijke analyses die relevant zijn voor deze processen. De verschillende categorieën kunnen nog verder onderverdeeld worden op basis van ruimtelijke impact. Zo kom je tot globale, regionale en lokale impacts [3].

Na de indeling van de inventaris in verschillende impactcategorieën, volgt de karakterisering van de processen in functie van hun relatieve impact per categorie. Deze stap is een kwantitatieve stap en steunt opnieuw op wetenschappelijke analyse van de relevante processen [3].

In de laatste stap van waardering en afweging worden de verschillende impactcategorieën ten opzichte van elkaar afgewogen. Deze stap streeft naar het rangschikken van de categorieën volgens hun relatieve belang qua impact. Dit proces gebeurt subjectief omdat de categorieën elk zeer verschillend zijn waardoor ze niet rechtstreeks te vergelijken zijn. Het kan echter wel nog steeds kwantitatief en kwalitatief gebeuren [3].

2.5 Interpretatie

De laatste fase van de LCA is de interpretatie. In deze fase wordt enerzijds toegewerkt naar het identificeren van significante milieutechnische aspecten, de evaluatie van de uitgevoerde LCA en het vormen van een conclusie en potentiële aanbevelingen. Anderzijds wordt er ook verwacht dat de limitaties van de studie in deze fase besproken worden. Hoewel het vaak vernoemd wordt als de laatste fase van een LCA, loopt deze fase parallel met het volledige verloop van de LCA. Het zorgt ervoor dat er met een kritisch oog gekeken wordt naar tussentijdse resultaten waardoor er tijdig bijsturing van de LCA kan gebeuren. Om die reden is dit de belangrijkste stap van een LCA om tot een betrouwbaar en representatief resultaat te komen [3] [4].

3 Geothermie

De databank ondergrond Vlaanderen biedt de volgende definitie voor geothermie: “Geothermie of aardwarmte is energie die in de vorm van warmte in de bodem zit opgeslagen” [5]. Deze warmte die opgeslagen zit in de bodem, kan voor verschillende toepassingen gebruikt worden. De mogelijke toepassingen voor de aardwarmte hangen af van verschillende parameters zoals bodemtemperatuur, geologische samenstelling en de noden van de mensen die deze geothermie willen benutten. Zo kan het gebruikt worden voor toepassingen van baden in natuurlijke thermale baden, tot koken, verwarmen van ruimtes of gemeenschappen en zelfs het produceren van elektriciteit [6].

De warmte in de ondergrond wordt voor het grootste deel gecreëerd vanuit twee oorsprongen, het verval van kalium, thorium en uranium als de meest voorkomende radioactieve elementen in de aardkorst en warmte die vrijkwam tijdens de vorming van de aarde. Deze warmte werd gecreëerd toen verschillende kleinere hemellichamen op elkaar insloegen tot één massa en uiteindelijk de aarde creëerden. Het is een energiebron die in een bepaalde vorm beschikbaar is over de hele wereld. Naar schatting kan er 1.4×10^6 TWh aan energie per jaar gerecupereerd worden van geothermie alleen. Dit komt neer op drie keer de totale energieconsumptie van de mens per jaar [6].

De beschikbare energie van de aarde is echter niet altijd even makkelijk voor omzetting naar bruikbare energie voor de mens. Zo zijn er bijvoorbeeld maar enkele specifieke locaties op de aarde waar de temperatuurgradiënt voldoende hoog is voor omzetting naar elektriciteit. Deze locaties moeten één of meerdere van volgende eigenschappen bezitten om in aanmerking te komen voor elektriciteitsproductie. Ze moeten gelegen zijn in de buurt van recente vulkanische activiteit zoals bijvoorbeeld het geval is in de Cerro Pabellón installatie in Chili, de locatie moet boven of in de buurt van tektonische plaat grenzen liggen zoals in IJsland of er moet een radioactieve hotspot zijn in de aardkorst zoals op bepaalde locaties in België [7] [6].

Naast de elektriciteitsproductie wordt geothermie gebruikt in geothermische warmtepompen voor het verwarmen van huizen, steden, industrieparken of serres. Ook kan het zelfs in bepaalde gevallen gebruikt worden voor verkoeling in de zomer. Het is een techniek waarvoor de vereisten soepeler zijn dan voor de elektriciteitsproductie waardoor het wereldwijd meer toegepast kan worden [6].

Geothermie kan ingedeeld worden in drie categorieën op basis van de diepte van de installaties. Oppervlakte geothermie bevindt zich in de eerste 5 m van de aardkorst, het is terug te vinden in thermale baden of wordt gebruikt voor koken in IJsland. Vervolgens is er de ondiepe geothermie, dit zijn installaties die warmte onttrekken op een diepte van 50-500 m in de aardkorst volgens het Vlaamse Energie en Milieu-InformatieSysteem (EMIS). Deze vorm van geothermie wordt hoofdzakelijk gebruikt voor het verwarmen van beperkte oppervlaktes zoals huizen of kantoorgebouwen. Diepe geothermie is het laatste type installatie, deze gaan dieper dan 1 km en vaak zitten ze zelfs rond de 2-5 km diep. Het is het type dat de grootste hoeveelheid energie produceert en kan ingezet worden voor het verwarmen van grote oppervlaktes zoals industriegebieden, kantoorgebouwen of delen van

steden of dorpen. Naast verwarming kan diepe geothermie dus ook ingezet worden voor elektriciteitsproductie indien de warmteflux voldoende hoog is.

3.1 Geothermie in Europa

In 2015 werd het akkoord van Parijs opgesteld waarin het doel vastgelegd werd om de opwarming van de aarde te beperken tot maximaal 2°C. Hierdoor groeit ook in Europa de interesse in geothermische centrales voor de vergroening van warmte- en elektriciteitsproductie. Zo werd er tussen 2014 en 2018 al 90 miljoen euro geïnvesteerd in R&D door het Horizon 2020 programma van de Europese Unie. Een deel van deze investering is onder andere gegaan naar het GEOENVI-project dat later nog aan bod komt. Ook de opvolger van het Horizon 2020 project, Horizon Europe blijft geld beschikbaar stellen voor geothermische ontwikkeling. Zij hebben een schatting gemaakt dat er 1,6 miljard euro aan investeringen zullen volgen in R&D in heel Europa door zowel staatsinvesteringen als privé investering in de loop naar klimaatneutraliteit tegen 2050 [8]. Volgens een onderzoek uit 2020, gepubliceerd in het tijdschrift Energy, wordt verwacht dat geothermie tegen 2050 4%-7% van de totale geproduceerde electriciteitsmix in Europa opneemt, dit zou neerkomen op 100-210 TWh_{el}/jaar. Naast de verwachtingen rond electriciteitsproductie hebben ze ook de warmtegeneratie onderzocht. Hier verwachten ze een productie van 880-1050 TWh_{th}/jaar. Ook voorspellen ze in dit onderzoek een marktwaarde van 160-210 miljard US dollar per jaar voor de geothermiesector in Europa. Het is dus een markt waar nog veel verwachtingen voor zijn en waarin veel onderzoek zal plaatsvinden in Europa [9].

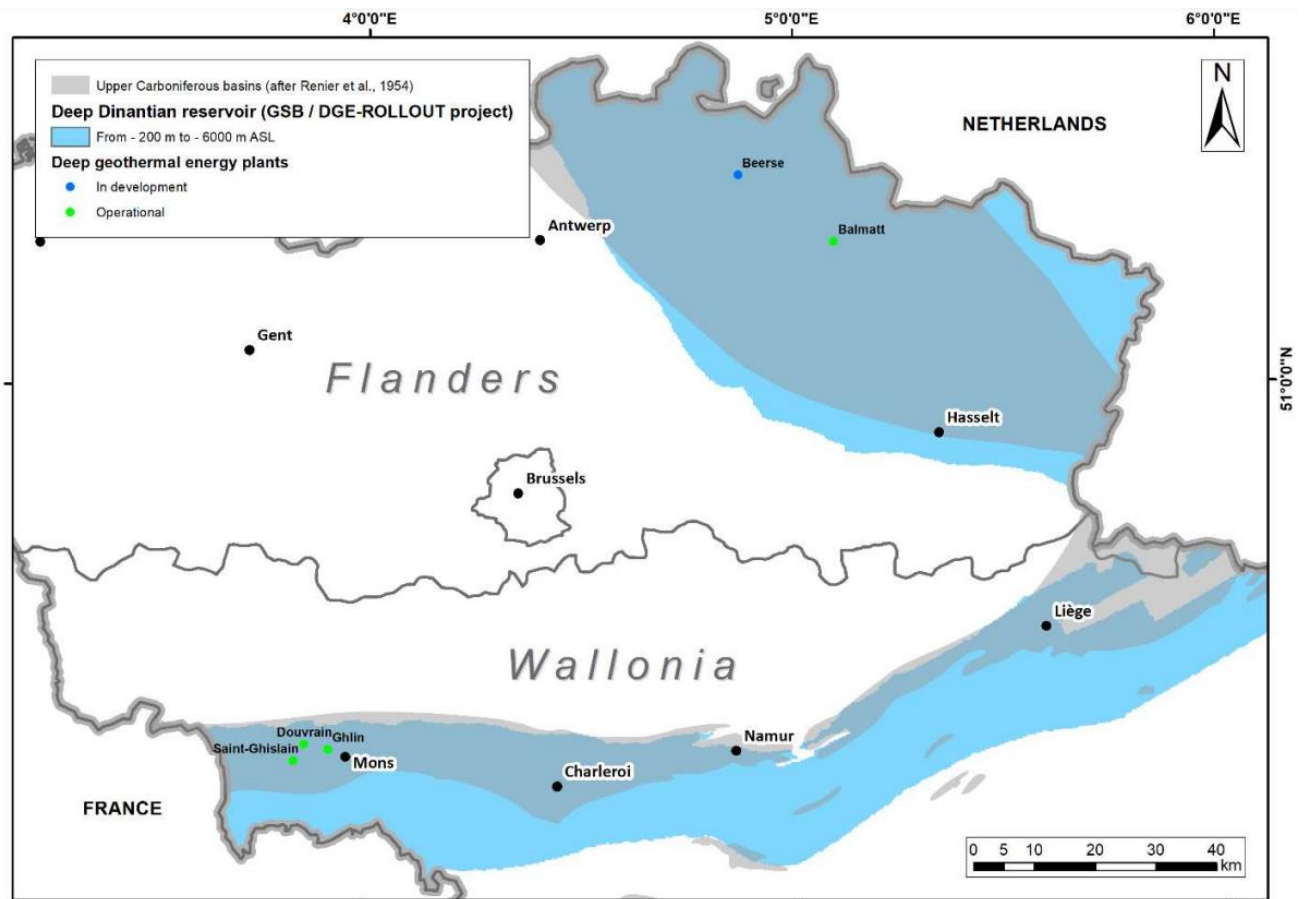
3.2 Diepe geothermie in België

In België neemt het verwarmen van huizen, serres, industrie, ... 48% van het volledige energieverbruik op [10]. Van deze warmte, wordt nog steeds 94% geproduceerd door de verbranding van fossiele brandstoffen. Hier is dit hoofdzakelijk aardgas en stookolie. Maar 6% is dus afkomstig van groene energiebronnen. Met het oog op het verminderen van onze klimaatimpact wil Vlaanderen dit percentage zo snel mogelijk laten toenemen [11]. Hierin kan geothermie een deel van de oplossing bieden.

De geothermie in België is afkomstig van radioactieve hotspots in de aardkorst. Dit in combinatie met waterhoudende lagen in de Kolenkalk Groep in het noorden van België maken het mogelijk om ook hier geothermische centrales te ontwikkelen. In Vlaanderen bestaat er al sinds de jaren 50' interesse in geothermie als energiebron en dit dankzij de ontdekking van een geothermisch reservoir op een diepte van 2 225 m bij een boring in Turnhout. Deze ontdekking werd opgevolgd door meerdere projecten, zoals een boring in Meer in de jaren 70. Hoewel deze boring geen bruikbare informatie opleverde, was dit wel het geval met de volgende boring in Merksplas-Beerse in 1983, die leverde een zee aan informatie op over hydraulische, chemische en radiologische aspecten van deze

projecten. Na deze boring viel de interesse in geothermie in België stil, ondermeer omwille van financiële aspecten. Vito legde zich 20 jaar later opnieuw toe op deze ontwikkeling met het Balmatt project in Mol in 2009 en heeft sindsdien drie boringen uitgevoerd op deze locatie waarbij vooral gefocust wordt op onderzoek. Verder werden in 2020 nog twee putten geboord in Beerse bij Johnson & Johnson. Zij gebruiken sinds 2022 deze putten om zelfvoorzienend te zijn in hun warmtebehoefte. Ze gebruiken dit warmtenet op industriële schaal voor zowel verwarming van de gebouwen als voor de warmte nodig in bepaalde productieprocessen. De temperatuur van het water dat hier wordt opgepompt bereikt 85°C. Enkel het gebruik van deze installatie zorgde bij Johnson & Johnson al voor een daling van 30% in hun CO₂-uitstoot in België, een teken dat deze technologie een goede stap is in de richting van een betere duurzaamheid in onze maatschappij. Op dit moment zijn er een aantal commerciële projecten met diepe geothermie lopende in België. Bij al deze projecten wordt er gewerkt op basis van een doublet: het steunt op het maken van twee putten in hetzelfde reservoir. Eén put wordt gebruikt als de productieput van waaruit het warme water omhooggepompt wordt en een andere put wordt gebruikt voor het injecteren van het afgekoelde water [12] [13].

Daarnaast is er in België ook een bedrijf, genaamd HITA, dat sinds 2020 bezig is met de ontwikkeling van drie geothermische installaties in het Kempisch Bekken. Concreet zullen de installaties gebouwd worden in Turnhout, Lommel en Herentals. Ook zijn ze onderzoek aan het doen naar een potentieel vierde locatie bij Merksplas maar hiervoor moet de ondergrond eerst verder in kaart gebracht worden [14]. Op deze locaties zullen de installaties gebouwd worden met dieptes variërend tussen 1 000 m en 2 500 m [10]. Tot slot zet het Belgische bedrijf Kelvin Solutions ook in op duurzame warmte en koude op basis van diepe geothermie voor grootschalige projecten. Figuur 3 toont een kaart van België met hierop de belangrijkste bekkens voor geothermische toepassingen.



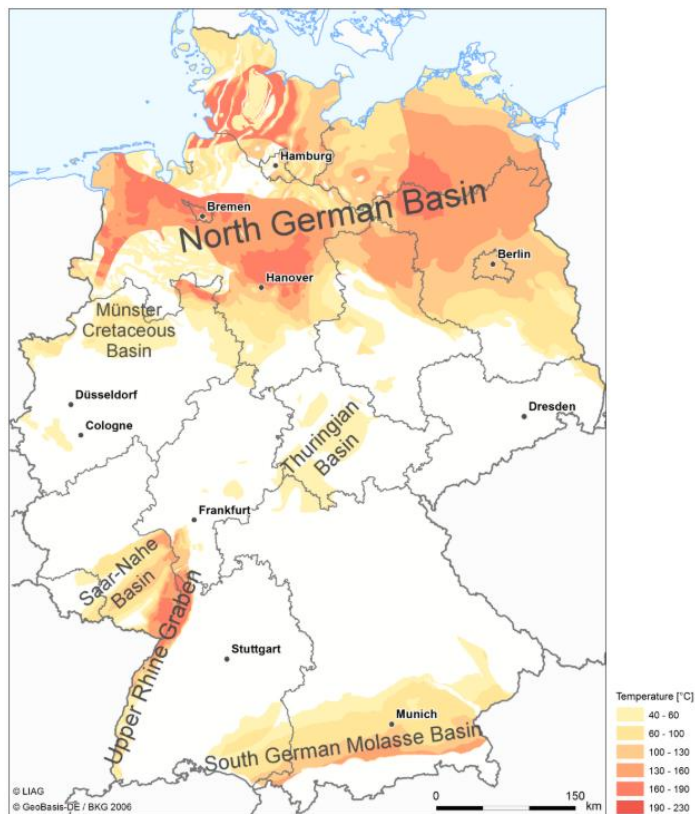
Figuur 3: Kaart van België met de bovenste kalkhoudende bassins en de diepe Dinantse reservoirs [10]

Figuur 3 toont de locatie van de Balmatt site van VITO en de locatie van de site van Johnson & Johnson in Beerse. Ook is op deze kaart te zien dat er in Wallonië, nabij Mons, ook geothermische sites operationeel zijn. De installaties in Henegouwen zijn echter aan het verouderen. Dit heeft er wel voor gezorgd dat onder andere de universiteit van Mons zich opnieuw bezighoudt met het beter in kaart brengen van de geologie in de omgeving met oog op de ontwikkeling van nieuwe installaties. Naast een groeiende interesse in het maken van volledig nieuwe geothermische installaties, stijgt ook de interesse in het hergebruiken van oude en verlaten mijnen in de omgeving. Dit is ontstaan uit beloftevolle resultaten van studies, uitgevoerd in Nederland te Heerlen. Specifiek zou het in Henegouwen gaan over het gebruik van de verlaten koolmijnen in de omgeving [10].

3.3 Diepe geothermie in Duitsland

Na de sluiting van de nucleaire kerncentrales in Duitsland, moest ingezet worden op de ontwikkeling van andere energiebronnen met een lage CO₂-uitstoot. Eén van deze energiebronnen is geothermie. De geothermische bronnen, aanwezig in Duitsland, hebben een lage tot middelhoge enthalpie waarde, dit gaat over bodemtemperaturen van > 150°C tot > 200°C. Deze worden vooral gebruikt voor geothermische baden, verwarming van residenties en industrie en elektriciteitsproductie. De ontwikkeling van geothermische installaties wordt ook ondersteund door de Duitse regering. In 2014

waren in Duitsland al 200 geothermische installaties in gebruik of onder constructie. Deze installaties leverden toen al 530 GWh_{th} en 36 GWh_{el} per jaar. Zowel de thermische productie als de elektriciteitsproductie is in 2021 gestegen naar ongeveer 1800 GWh_{th} en 207,72 GWh_{el} volgens GeotIS, het geothermische informatiesysteem van Duitsland [15]. De temperatuur van de werkvloeistoffen in Duitsland ligt onder de 180°C en de belangrijkste geologische locaties voor geothermie in Duitsland zijn het diepe Mesozoïcum sediment in het Noord-Duitse bekken, de Boven-Rijngraben gelegen onder de Boven-Rijnse Laagvlakte en het Zuid-Duitse Molasse bekken in het zuiden van Duitsland. Figuur 4 toont de geologische locaties op een kaart van Duitsland [16].



Figuur 4: Duitse geothermische locaties met temperatuurgradiënt [16]

3.4 Geothermie met enkelvoudige boringen

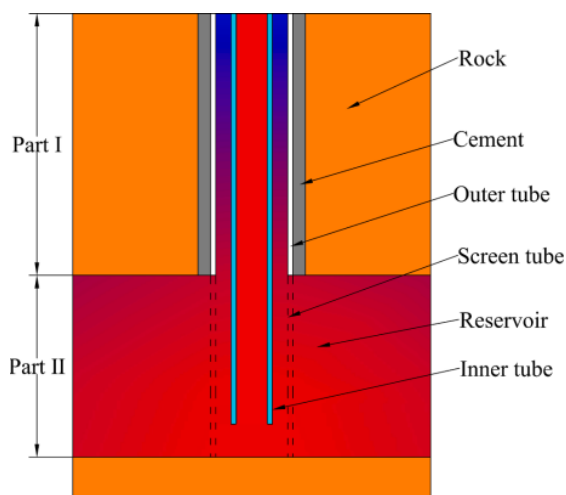
Naast projecten met doubletten zoals besproken in 3.2, bestaan er ook ontwerpen die uitgaan van een enkelvoudige boring. Het is een relatief nieuwe techniek waarnaar nog volop onderzoek wordt gedaan in onder meer Duitsland, China en België [17] [18] [19]. Het concept steunt op het produceren van warmte via een enkele boring waarin zowel het warme als het koude water zal circuleren. Op deze manier kan de kost van geothermische installaties aanzienlijk gedrukt worden. In doubletsystemen maken boorkosten 50-70% van de totale investering uit [19].

Op basis van de output van de Horstberg testputten in het Noord-Duitse bekken is in 2009 in Duitsland het GeneSys project opgestart. Dit project zou de toepassing van installaties met een enkelvoudige boring testen in Hannover. De installatie die hier getest werd, komt overeen met een semi-open loop installatie die in 3.4.3 semi-open loop verder wordt besproken. In de testfase werd meer dan 1 MW_{th} opgewekt waardoor de conclusie gemaakt werd dat het concept efficiënt genoeg zou zijn voor de verwarming van kantoorgebouwen. Het project in Hannover werd met deze informatie gestart. De put werd tot op een diepte van 3660 m geboord, waar een temperatuur van 160°C heerste. De geïnduceerde breuk in de geologische formatie rond de put bedroeg een oppervlakte van 1 km². Dit project werd echter na ongeveer 1,5 jaar in werking, afgebroken wegens te hoge zoutconcentraties, die voor verstoppingen zorgden. Dit project biedt echter wel een goede basis voor informatie voor nieuwe projecten [17] [20].

Het type installatie dat gebruikt kan worden voor deze enkelvoudige boringen is afhankelijk van de geologie ter plaatse. Er zijn drie grote types van installaties voor enkelvoudige boringen. Een open loop installatie, een closed loop installatie en een semi-open loop installatie. Deze zullen hierna verder in detail worden besproken.

3.4.1 Open-loop

Een open-loop installatie wordt ontwikkeld in geologische lagen waar zich waterhoudende reservoirs bevinden. In dit concept stroomt het gebruikte water vrij weg in de waterhoudende laag en kan er elke keer opnieuw vers warm water opgepompt worden. Figuur 5 toont een voorbeeld van hoe zo een open-loop circuit er kan uitzien.



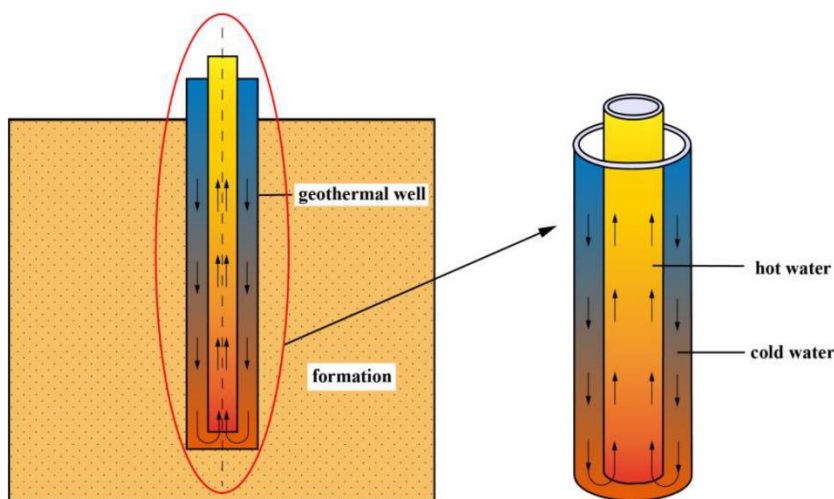
Figuur 5: Voorbeeld van een open-loop single well installatie [18]

Figuur 5 toont een coaxiale buis die volledig omkapseld is met cement tot deze het waterhoudend reservoir bereikt heeft. Zodra de buis het reservoir bereikt, blijft enkel de binnenste buis over. De

druk in het waterreservoir stuwt het warme water via de binnenste buis naar de oppervlakte terwijl de buitenste buis het koude water terug in het reservoir laat stromen. Gezien het water vrij kan vloeien tussen de buitenste ring, het volledige reservoir en de binnenste ring, wordt dit beschouwd als een open loop systeem [18].

3.4.2 Closed-loop

Een closed-loop installatie wordt gebouwd op locaties waar er zich geen waterhoudende lagen bevinden. Het systeem werkt op het onttrekken van warmte uit de omliggende hot dry rock, een type gesteente dat zeer veel warmte bevat. In figuur 6 is een voorbeeld van zulke closed-loop installaties te zien, het is gebaseerd op bestaande systemen in Noord-China.

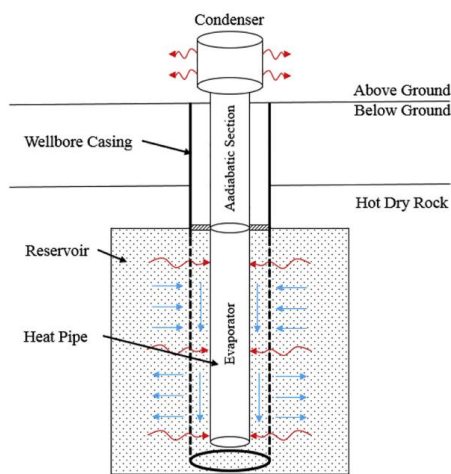


Figuur 6: Voorbeeld van een closed-loop single well installatie [21]

Figuur 6 toont hoe de enkelvoudige boring ook hier opgevuld wordt met een coaxiale buis. De buitenste buis vervoert ook hier het teruggepompte koude water terwijl de binnenste buis het verwarmde water terug naar de oppervlakte pompt. In tegenstelling tot het open-loop systeem, recycleert het water in deze buis constant. Het teruggepompte water warmt op naarmate deze lager komt in de buis en meer warmte op neemt van de wanden en dus het omliggende gesteente. Eens deze het einde van de buis bereikt, wordt het terug omhooggepompt voor gebruik. In dit geval wordt het water in de buis dus de hele tijd hergebruikt [21].

3.4.3 Semi-open-loop

Het semi-open-loop systeem ontstaat wanneer de locatie van de boring een gesteente bevat dat een beperkte permeabiliteit bezit maar waar toch water aanwezig is, dit kan in de vorm van kleine reservoirs zijn of in de barsten in het gesteente. Ook worden voor deze systemen soms extra barsten of reservoirs in het gesteente gecreëerd voor het verbeteren van de efficiëntie van de installatie, zoals bij het project in Hannover uit 3.4 Geothermie met enkelvoudige boringen het geval was. Hier werd een grote hydraulische fracking operatie opgezet om het waterreservoir in het gesteente te creëren [20]. Fracking werkt op basis van hydraulische druk, er wordt een grote hoeveelheid frackvloeistof onder hoge druk in de put gepompt om op deze manier breuken te creëren die gebruikt kunnen worden voor de ontginning van aardgas of olie maar dus ook voor het creëren van een waterreservoir voor geothermie [22]. Een voorbeeld van semi-open-loop installaties is te zien in figuur 7.



Figuur 7: Voorbeeld van een semi-open-loop single well installatie [23]

Dit systeem maakt gebruik van de hot dry rock omringend een klein waterreservoir. Binnen dit waterreservoir kan het gebruikte water vrij bewegen en de warmte van het omliggende gesteente opnemen. De werkvloeistof komt in het reservoir via de buitenste ring van de buis en kan terug opgewarmd worden alvorens het via de binnenste buis naar boven gepompt wordt.

Elk van de enkelvoudige diepegeothermieinstallaties heeft een eigen efficiëntie, maar door de aard van de geologische lagen, is er vaak geen ruimte om te kiezen tussen de systemen en is de projectontwikkelaar verplicht om met een specifiek systeem verder te gaan.

4 LCA op geothermische installaties

ISO 14040-14044 biedt een standaard richtlijn voor LCA. Dit is echter een zeer brede richtlijn door het grote doelpubliek van deze analyse. Dit is dus niet techniek specifiek waardoor er veel keuzevrijheid is voor de onderzoekers die deze standaard willen gebruiken. Om te garanderen dat LCA's uitgevoerd op geothermische installaties toch onderling vergeleken kunnen worden, bieden verschillende organisaties vergelijkbare richtlijnen aan. Deze richtlijnen zijn zeer gelijkaardig voor geothermische installaties waardoor de vergelijking van de uitgevoerde LCA's vlot kan verlopen. Enkele van de richtlijnen zullen hier worden besproken. Ook zullen er enkele voorbeelden van LCA's, uitgevoerd op geothermische installaties aan bod komen.

4.1 GEOENVI: LCA-richtlijnen

GEOENVI is een Europees project, ontwikkeld voor het analyseren van milieutechnische aspecten en mogelijke risico's voor geothermische energie. Als onderdeel van dit project biedt GEOENVI ook een richtlijn aan voor het uitvoeren van LCA's voor geothermische centrales. Hierin verduidelijken ze wel dat dit enkel van toepassing is op diepe geothermische installaties. Indien er dus gewenst is om een LCA uit te voeren op oppervlakkige installaties, zal de richtlijn aangepast moeten worden [24].

De methode aangeboden door GEOENVI overkoepelt een normale werking van de installatie en sluit defecten uit voor de uitvoering van de LCA. Het omvat de drie stadia van de levenscyclus van een geothermische installatie: de projectontwikkeling, de operationele fase en de afbraak of end-of-life (EOL). De bekomen resultaten van een LCA volgens deze richtlijnen bieden een beoordeling van de duurzaamheid van de onderzochte installatie maar moeten altijd kritisch bekeken worden. Om een volledig beeld te vormen van de impact van een installatie, is het aan te raden om de LCA te vervolledigen met analyses van aspecten die niet mee opgenomen waren. Dit kan gaan over seismische activiteit of bijvoorbeeld geluidsoverlast. Een LCA biedt dus een goed beeld van de impact maar is zeker niet volledig [24].

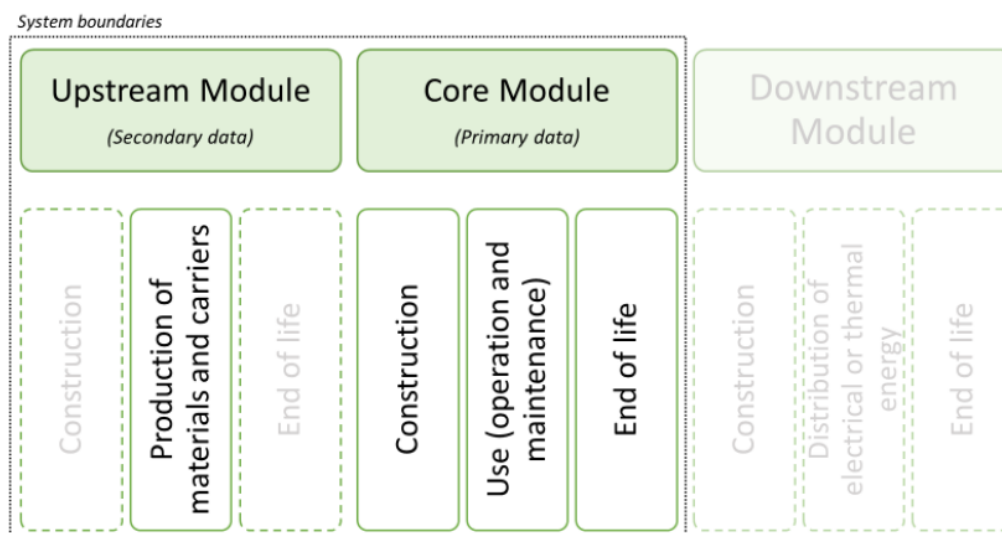
Voor het uitvoeren van een LCA op geothermische installaties, is aangeraden om de impact te analyseren volgens directe emissie, indirecte emissie en landgebruik. Indirecte emissie is afkomstig van de productie van materiaal en elektriciteit van het net. Directe emissie overkoepelt de rest zoals generatoren, emissie van gassen uit het reservoir... Naast de emissies is het belangrijk dat aspecten zoals bron type, productietechnologie en installatie specifieke operationele parameters mee in rekening worden gebracht voor de analyse [24].

4.1.1 GEOENVI: doel en domein

Vervolgens zal ook hier een doel en domein afgebakend moeten worden.

Voor geothermische installaties zijn er drie categorieën van doelen die elk een eigen aanpak vereisen voor de rest van de studie. Dit zijn de retrospectieve *attributional* LCA, de prospectieve LCA of ook toekomstige attributional LCA en de gevolgen LCA. Een retrospectieve LCA baseert zich op reeds bestaande installaties en kan gebruikt worden voor het vergelijken van gelijkaardige installaties. Een prospectieve LCA wordt opgesteld op basis van toekomstige installaties en maakt dus vaak gebruik van simulaties en informatie uit literatuur. Tot slot wordt een gevolgen LCA opgesteld voor de beoordeling van gevolgen indien de bijdrage van geothermische elektriciteit in het net zou verhogen. Naast het doel wordt hier ook de functionele eenheid vastgelegd, dit kan voor geothermische installaties $1 \text{ kWh}_{\text{el}}$ of $1 \text{ kWh}_{\text{th}}$ zijn. Wanneer er gewerkt wordt met geothermische installaties die zowel elektriciteit als warmte gebruiken, is het hier belangrijk om de impact te verdelen door correcte toewijzingen uit te voeren per functionele eenheid [24].

Voor het domein wordt gewerkt met de constructie fase, de operationele fase en de EOL, zoals eerder vermeld. Figuur 8 stelt het volledige systeem van een geothermische installatie voor met ook hierop de afbakening van het domein.



Figuur 8: Volledig systeem voor een geothermische installatie met de afbakening van het domein [24]

Het domein, te zien in figuur 8, omvat de productie van de gebruikte materialen in de stroomopwaartse module en de constructie, het gebruik en de EOL in de hoofd module. De stroomafwaartse module omvat wat er gebeurt met de geproduceerde elektriciteit en warmte eens deze de installatie verlaat maar dit wordt buiten het domein van de studies gezien [24].

Voor de levensduur van de installatie en dus de operationele fase wordt hier 30 jaar gebruikt, dit is de periode waarin de thermische output van de installatie relatief stabiel blijft mits een respectabel gebruik. Geothermische installaties kunnen in principe langer operationeel zijn maar dan kan de efficiëntie dalen of zou er bijvoorbeeld een nieuwe productieput geboord moeten worden. Er wordt hier ook een geschatte levensduur van 15 jaar gezet op de warmtewisselaar zodat deze twee keer meegenomen moet worden in de analyse. Door deze doelen en domeinen gelijk te houden over verschillende studies, kan gegarandeerd worden dat ze onderling vergeleken kunnen worden [24].

4.1.2 GEOENVI: LCI en LCIA

De richtlijn van GEOENVI geeft geen aanbevelingen op het vlak van databanken die gebruikt kunnen worden voor het opstellen van de LCI. Ze halen wel aan dat er kritisch nagedacht moet worden over deze keuze aangezien dit gebruikt zal worden voor het aanvullen van gegevens die niet verzameld kunnen worden voor de specifieke installatie. Het is verder ook belangrijk om kritisch te kijken naar alle verzamelde data, zowel data afkomstig van de installatie (primaire data) als data uit databanken (secundaire data). De richtlijn biedt ook aanvullende primaire data aan in hun bijlage. Deze data zijn gemiddelden van GEOENVI-casestudies en kunnen gebruikt worden ter aanvulling [24].

Het is bij het gebruik van deze richtlijn wel belangrijk om duidelijk het domein rond de EOL van de installatie te bespreken. Dit omvat namelijk enkel het vullen van de put, de verwerking van afval uit de constructiefase, de reiniging van de afzettingen in leidingen en andere ontstane residuen. Hier wordt dan ook de afbraak, de ontmanteling en de recyclage van de installatie en apparatuur in uitgesloten. Ze worden toegewezen aan volgende levenscycli en volgen dus het cut-off principe van het Ecoinvent model [24].

4.2 Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies: LCA-richtlijnen

Het boek 'Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies' is geschreven om de lezer een totaalbeeld te bieden van milieutechnische analyses voor zowel hernieuwbare energiebronnen als fossiele brandstoffen. Hierin zijn ook geothermische centrales opgenomen. In hoofdstuk 8 biedt het boek een richtlijn aan voor het uitvoeren van een LCA op geothermische installaties. Deze richtlijn wordt in dit hoofdstuk overlopen en vergeleken met de richtlijn afkomstig van het GEOENVI-project [25].

4.2.1 Environmental Assessment: doel en domein

In het definiëren van het doel is het zeer belangrijk om een duidelijk antwoord te bieden op de twee volgende vragen: Wat doet deze studie? Waarom wordt de studie uitgevoerd? De antwoorden op deze vragen beïnvloeden meteen het perspectief dat de studie omvat. Dit kan een retrospectief of een prospectief perspectief zijn met meestal een attributional benadering bij geothermische centrales. Deze perspectieven komen fundamenteel overeen met deze besproken in GEOENVI [25, p. 191].

De functionele eenheid die wordt aangeraden volgens [25] is voor geothermische centrales die elektriciteit produceren ook 1 kWh_{el} , zij halen echter niet specifiek aan welke functionele eenheid gebruikt moet worden voor centrales die enkel aan warmteproductie doen. Er wordt wel een functionele eenheid aangeboden voor centrales die een combinatie van warmte en elektriciteit produceren. Deze komt overeen met de hoeveelheid elektriciteit en warmte die de centrale in eenzelfde tijdspanne produceert, bijvoorbeeld in 1 sec. Indien dit gebruikt wordt, is het belangrijk om de correcte toewijzingen uit te voeren [25, p. 192].

Het domein van de studie moet volgens [25] bestaan uit drie dezelfde modules als binnen GEOENVI, namelijk de stroomopwaartse module, de stroomafwaartse module en de hoofdmodule. De inhoud van deze modules volgt dezelfde richtlijnen als aangehaald bij GEOENVI. De stroomafwaartse module wordt in LCA's zeer vaak buiten beschouwing gelaten omdat deze een zeer beperkte invloed heeft op het resultaat en omdat deze module voor elk type van warmte of elektriciteit gelijk blijft [25, p. 192].

4.2.2 Environmental Assessment: LCI en LCIA

Figuur 9 toont het overzicht dat volgens het boek *Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies* thuishoort in de LCI van geothermische centrales.



Figuur 9: LCI inhoud volgens *Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies* [25]

In de constructiefase van geothermische centrales zijn er enkele elementen die een grote impact hebben op de uiteindelijke impact van deze fase. Dit zijn de directe en indirecte emissies van de generatoren, gebruikt voor het boren van de put, en de indirecte emissies afkomstig van de productie van het gebruikte staal. Het puthoofd heeft daarentegen een zeer beperkte invloed waardoor vaste waardes hiervoor gebruikt kunnen worden. Er wordt aangeraden om de gegevens van [26] te gebruiken voor het aanvullen van elementen zoals het puthoofd, de pijpleidingen ... Binnen de operationele fase is de impact van de elektriciteit, die nodig is voor het verpompen van de vloeistoffen, niet te verwaarlozen. Deze kan oplopen tot 0.5-2.5 kW/m³h. De stimulatie komt neer op het creëren van hydraulische druk voor fractionering in het gesteente. Dit doel kan ook bereikt worden door middel van chemische stimulatie. Beide methodes van stimulatie leiden tot een grotere impact van de installatie. Verder is het belangrijk om directe uitstoot van *non-condensable gasses* (NCG's) te vermijden. Dit zijn opgeloste gassen zoals CO₂, CH₄, SO₂ en H₂S. In het onderhoud van de centrales moeten vooral de vervangen installaties worden opgenomen en indien er een vervangput geboord moet worden, moet dit zeker mee worden opgenomen in de analyse. Voor de EOL worden vaak modellen opgesteld die de verwerking van de bovengrondse installaties en de opvulling van de putten in kaart brengen. De putten worden vaak gevuld met een combinatie van grind en cement en afgesloten met een betonnen deksel. Voor de indirecte emissies van deze materialen raden ze het gebruik van de ecoinvent database aan [25].

Er zijn twee grote LCIA-methodes besproken in deze richtlijn. De LCIA-methode gecreëerd aan het centrum voor milieuwetenschappen van de universiteit van Leiden (CML) en deze gecreëerd door het Joint Research Centre (JRC) van de Europese Commissie. De door het JRC ontwikkelde methode is in Europa de meest gebruikte methode, terwijl deze van de CML wereldwijd meer gebruikt wordt [25].

4.3 LCA voorbeelden

4.3.1 Balmatt project

Het Balmatt project, ontwikkeld door VITO in Mol, omvat een diepe geothermische warmtecentrale met een deel elektriciteitsproductie. Het bestaat uit een productieput van 3.6 km verticale diepte en een injectieput van 3.8 km verticale diepte. Van deze installatie is in 2022 een LCA opgesteld voor drie scenario's. De scenario's zijn gebaseerd op de huidige werking van de installatie, een scenario waarin 100% van de geothermische vloeistof wordt ingezet voor warmtegeneratie op de Balmatt-site, hierdoor verdubbelt de warmteproductie ten opzichte van scenario 1, en onderzoek uitgevoerd door HITA in de streek van Turnhout, ook deze installatie zou enkel instaan voor warmteproductie en het reservoir zou zich minder diep in de ondergrond bevinden. De installaties zijn gericht op de ondergrondse kalksteenreservoirs in het noorden van België. Tabel 1 toont de gegevens voor de drie onderzochte scenario's [27] [28].

Tabel 1: Geotechnische parameters van de drie onderzochte scenario's (S1,2 en 3) voor de Belgische kalksteenreservoirs [28]

Parameter	Units	S1	S2	S3
Type of energy		Heat/Electricity	Heat	Heat
Well number		2	2	2
Total borehole length	M	8285	8285	6200
Production temperature	°C	124	124	87
Reinjection temperature	°C	65	65	60
Production flowrate	kg/s	30	30	60
Installed thermal capacity	MW _{th}	6.6	6.6	6.3
Lifetime	Years	30	30	30
Annual Operating Hours	Hours	8000	8000	6000
Annual Electricity Production	MWh _{el}	3000	N.A.	N.A.
Annual Heat Production	MWh _{th}	30000	60000	39000
Annual electricity needs	MWh	6300	6300	1200

Er werden in deze studie 12 impactcategorieën onderzocht waarvan negen hoge prioriteit en drie gemiddelde prioriteit. De negen categorieën met hoge prioriteit zijn dezelfde die in deze studie onderzocht worden en zijn terug te vinden in 5.1.2 Domein van de studie. De andere drie impactcategorieën zijn: aantasting van de ozonlaag (OD), fotochemische ozonvorming (POC) en eutrofiëring (EP). De functionele eenheid in deze analyse is 1 MWh_{th}. Tabel 2 toont de resultaten van de LCA op deze geothermische installatie met een doublet [28].

Tabel 2: Resultaten van de LCA voor de drie scenario's van de Belgische kalksteenreservoirs [28]

	Impact		
	S1	S2	S3
GW (kg CO _{2-eq} /MWh _{th})	27.1	20.7	11.0
OD (mg CFC-11 _{eq} /MWh _{th})	9.14	8.12	2.97
HT _c (CTU _h /MWh _{th})*10 ⁶	3.01	1.67	1.60
HT _{nc} (CTU _h /MWh _{th})*10 ⁶	7.99	5.26	3.82
FWEC (CTU _e /MWh _{th})	198395	127906	93940
AD (mg Sb _{eq} /MWh _{th} h)	181	98.4	111
POC (g NMVOC _{eq} /MWh _{th})	63.8	44.9	29.0
AC (mol H + _{eq} /MWh _{th})	0.098	0.067	0.046
EP (g PO ₄ ³⁺ /MWh _{th})	30.4	19.3	15.3
CED _f (MJ/MWh _{th})	383	311	145
CED _{nuc} (MJ/MWh _{th})	767	708	230
CED _{ren} (MJ/MWh _{th})	6873	3469	3244

In de resultaten van deze LCA is te zien dat aanpassingen aan installaties al meteen een duidelijk verschil kunnen teweegbrengen in een LCA. Zo is het resultaat van scenario drie van de impactcategorie voor klimaatveranderingen maar 41% van deze van scenario één. Deze resultaten duiden op het belang van het kritisch uitvoeren van LCA's gezien de verandering van slechts enkele parameters al een beduidende impact kan hebben op de eindresultaten. Ook hier komt de iteratieve aard van de LCA naar boven en is het belangrijk om gedurende de volledige analyse correcte interpretaties uit te voeren.

4.3.2 The United Downs Deep Geothermal Power project

The United Downs Deep Geothermal Power (UDDGP) project is de eerste geothermische elektriciteitscentrale van Engeland en wordt verwacht operationeel te zijn tegen eind 2024. De LCA uitgevoerd op deze installatie is dan ook prospectief en minder gebaseerd op primaire data. Dit is een installatie die volledig gebruikt zal worden voor elektriciteitsproductie en dus geen warmte. Hier is de functionele eenheid 1 kWh_{el}. Tabel 3 toont de parameters van de installatie [29].

Tabel 3: Algemene geotechnische parameters van het UDDGP project [29]

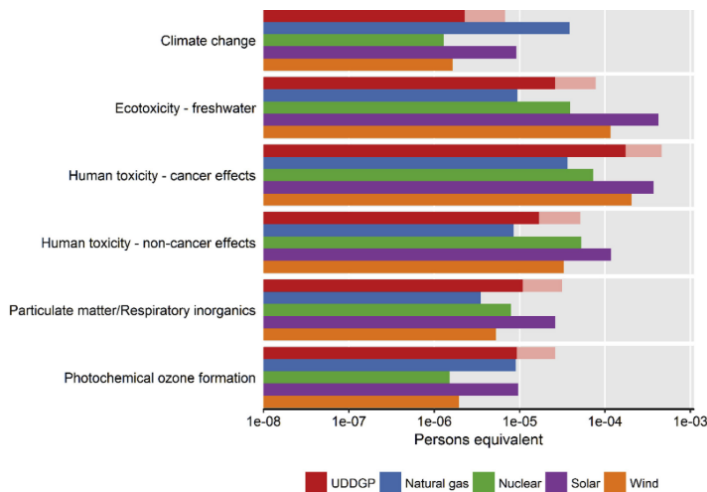
PARAMETER	VALUE	
Geothermal wells length		
Exploratory	2x 200	m
Injection	3000	m
Production	5050	m
Power plant		
Inlet temperature	175	°C
Outlet temperature	90	°C
ORC efficiency	13	%
Auxiliary power	20	%
Working fluid: Perfluoropentane	300	kg/MW
Technical life time	30	years
Collection pipelines	25	m/well
Load factor	0.9	—

Ook in deze studie worden meerdere scenario's onderzocht: het standaardscenario waarbij geen stimulatie nodig is rond de put, een scenario met chemische stimulatie, een scenario met fracking en een scenario waarbij beide simulatietechnieken worden toegepast. Tabel 4 toont de resterende scenariospecifieke parameters [29].

Tabel 4: Scenariospecifieke parameters voor het UDDGP project [29]

PARAMETER	UNIT	SCENARIOS				
		Base case	St_C	St_C_2 L	St_C_H	St_C_2 L_H
Geo-fluid flow rate	kg/s	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1
Chemical stimulation ¹	m ³ of water	0	6000	6000	6000	6000
Hydraulic stimulation ¹	m ³ of water	0	0	0	20000	20000
2nd-leg	m drilled	0	0	2550	0	2550
Downhole pump ²	kW	128	128	128	128	128
Reinjection pump ²	kW	0	0	0	0	0
Net plant output	MJ/s	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Total heat production	MJ/s	0	0	0	0	0

Deze studie is gefocust op 6 impactcategorieën die genormaliseerd worden. De minimum en maximum resultaten van deze LCA zijn vergeleken met andere energiebronnen. Figuur 10 toont de resultaten van deze analyse ten opzichte van de andere energiebronnen.



Figuur 10: Genormaliseerde resultaten van de LCA voor het UDDGP project vergeleken met andere energiebronnen [29]

De resultaten van deze LCA variëren per impactcategorie. In het slechtste geval is de impact van deze centrale zelfs het grootste binnen de categorieën fotochemische ozonvorming, menselijke carcinogene effecten en anorganische zwevende deeltjes in de lucht. In het beste geval scoort de LCA tweede voor zoetwater ecotoxiciteit en menselijke niet-carcinogene effecten. De resultaten, bekomen in deze studie, komen overeen met andere LCA-studies uitgevoerd voor gelijkaardige installaties [29].

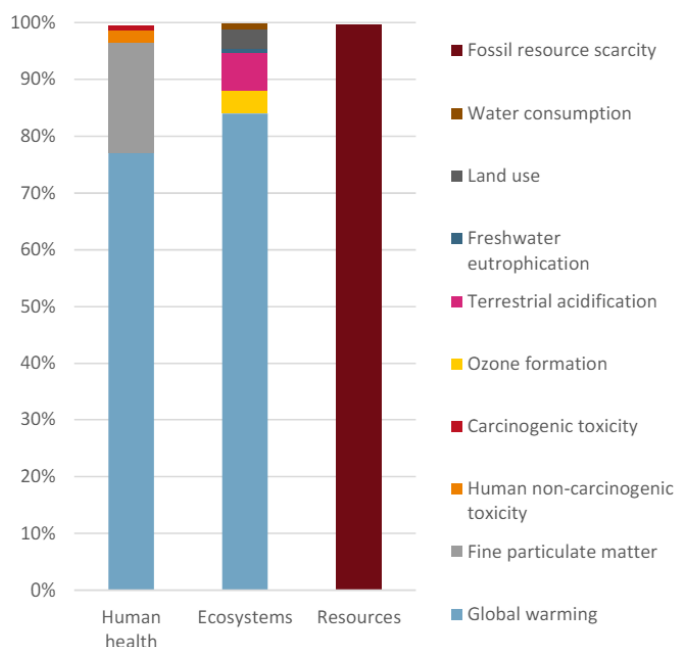
4.3.3 ECW geo Andijk project

De laatste voorbeeld LCA is toegepast op een geothermisch doublet van ECW in het serregebied Het Grootslag Andijk. Deze installatie focust zich op warmteproductie voor de omliggende serres. Ze produceert warmte met het geothermische water maar ook met de verbranding van het formatiegas. Deze studie gaat uit van een worst-case scenario aangezien hier alle gebruikte elektriciteit van het net wordt gehaald terwijl er bij dit soort installaties vaak een CHP unit gebruikt wordt voor elektriciteitsproductie. De functionele eenheid voor deze studie is 1 MWh_{th} gezien er uitsluitend warmte geproduceerd wordt. De data van de onderzochte installatie zijn te zien in tabel 5 [30].

Tabel 5: Geotechnische parameters voor de installatie in Andijk [30]

General data		Unit
Installed capacity	40	MW
Hours full load (per year)	8760	h
Hours running (per year)	8760	h
Energy production (per year)	350400	MWh/year
Formation gas production	0,4	m3/m3 water
Energy from formation gas	16423,73	MWh/year
Total energy produced	366823,7	MWh/year
Lifetime	35	years
Number of doublets	2	
Number of boreholes	4	
Depth of the well	2000	m
Flow rate (for 2 producer wells)	700	m3/h

Voor de ontwikkeling van deze LCA wordt het programma SimaPro 2020 gebruikt met de ecoinvent database 3.6 voor aanvullende informatie. De resultaten van deze studie worden gedocumenteerd op twee niveaus, op een eindpunt en een middelpunt. Het eindpunt omvat drie grote categorieën waarin de onderzochte impact categorieën worden opgedeeld, namelijk menselijke gezondheid, ecosysteem en middelen. Figuur 11 toont de bijdrage van 10 impactcategorieën op de drie eindpuntcategorieën [30].



Figuur 11: Bijdrage van impactcategorieën op eindpunt resultaten Andijk [30]

De opwarming van de aarde speelt hier duidelijk een grote rol bij de menselijke gezondheid en het ecosysteem. Enkel de fossiele middelen worden opgenomen in de eindpunt categorie middelen

waardoor deze 100% van de bijdrage veroorzaakt. Tabel 6 toont de resultaten van de vijf belangrijkste impactcategorieën meer in detail [30].

Tabel 6: Resultaten van de LCA op het Andijk doublet [30]

Impactcategorie	Waarde	Eenheid
Klimaatverandering	37	kg CO ₂ -eq/MWh _{th}
Fijnstofproductie	0.0135	kg PM2.5-eq/MWh _{th}
Verzuring	0.0375	kg SO ₂ -eq/MWh _{th}
Ozonvorming	0.038	kg NO _x -eq/MWh _{th}
Landgebruik	0.47	m ² a crop-eq/MWh _{th}

Bij elk van deze impactcategorieën is het grootste aandeel afkomstig van de gebruiksfase van de installatie. Deze wordt gevolgd door de constructie. De EOL heeft een zeer beperkte impact. Indien de resultaten van bijvoorbeeld de klimaatverandering vergeleken worden met deze van de Balmatt-site, is te zien dat de Balmatt-site met maximaal 27.1 kg CO₂-eq/MWh_{th} toch enigermate onder deze van Andijk blijft met 37 kg CO₂-eq/MWh_{th}. Dit toont aan dat de resultaten van LCA's van geothermische centrales zeer installatie-specifiek zijn.

5 Materialen en Methoden

Deze studie volgt het vaste verloop van een LCA-studie. Beginnende met een doel- en domeinafbakening, gevolgd door het inventaris opstellen en de inventarisanalyse. Deze methode wordt gevolgd voor de drie types van geothermische installaties op basis van één boring, beginnende met de open-loop installatie, gevolgd door de semi-open-loop en tot slot de closed-loop.

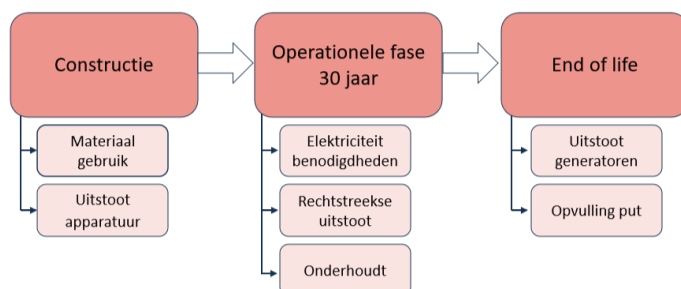
5.1 Doel en domein van de studie

5.1.1 Doel van de studie

In deze studie wordt toegewerkt naar een analyse van de innovatieve geothermische techniek op basis van één enkele boring. Het doel hiervan is om vergelijkingen mogelijk te maken tussen de geothermische installaties en meer conventionele installaties op basis van minstens twee boringen of ook wel doubletten genoemd. Er is gekozen voor een analyse van geothermische centrales met enkelvoudige boring vanwege het ontbreken van studies in de literatuur hierover. Bovendien is de opdrachtgever, VITO, bezig met de verdere ontwikkeling van onder andere een open-loop installatie en een analyse van de milieutechnische impact vormt hiervoor een goede aanvulling. De analyse wordt uitgevoerd op installaties die uitsluitend warmte genereren en dus geen elektriciteit produceren. Op deze manier is er geen noodzaak om toewijzingen te maken in de LCA. De drie installaties die onderzocht worden, zijn fictief en worden ontworpen op basis van de Balmatt-site van VITO en installatiespecifieke literatuur. Vanwege de fictieve aard van de onderzochte installaties valt deze studie onder een prospectieve LCA. De studie zou in de toekomst een bouwsteen kunnen zijn voor gelijkaardige analyses binnen de geothermie.

5.1.2 Domein van de studie

Figuur 12 toont het afgebakende domein van deze LCA. Dit domein wordt geprojecteerd op de drie te onderzoeken geothermische warmtecentrales.



Figuur 12: Domein van de LCA

Er zijn drie grote fases in het domein van deze LCA. De eerste fase is de constructie van de installatie. Voor de constructie van de installatie wordt verwacht dat de gebruikte materialen, zoals staal en beton, en de uitstoot van de apparatuur gebruikt voor de boringen de grootste impact hebben. Voor de impact van het gebruikte materiaal zal de database ecoinvent gebruikt worden terwijl het grootste deel van de uitstoot, afkomstig van generatoren voor de constructie, gehaald kan worden uit installatie specifieke informatie en simulaties. De tweede fase in het domein van deze LCA is de operationele fase van de installatie. Er is hier gekozen voor een levensduur van 30 jaar voor de geothermische centrales. Deze levensduur is geselecteerd op basis van de literatuur. De werkelijke levensduur van een installatie kan langer zijn maar op deze manier is vergelijking met andere geothermische centrales mogelijk. In het geval van enkelvoudige diepegeothermietechnieken stagneert de efficiëntie van de installaties zelfs na 20-25 jaar in werking en deze kan stabiel blijven tot lang na de hier aangenomen levensduur van 30 jaar. Tot slot volgt de EOL-fase. Deze fase omvat enkel het opvullen van de put na de ontmanteling van de installatie. De ontmanteling van de volledige installatie en de aansluiting op het warmtenet worden buiten beschouwing gelaten. De impacts in de EOL-fase zijn dus afkomstig van het materiaal dat nodig is voor de opvulling van de put, dit is een combinatie van grind en beton en de uitstoot van de generatoren die gebruikt worden tijdens de opvulling [24].

Het model voor deze LCA volgt het cradle-to-grave principe met enkele uitsluitingen. De secundaire data, die grotendeels verzameld worden uit de ecoinvent database, omvatten het productieproces en de emissies voor het materiaal dat gebruikt wordt in de boring [24].

De functionele eenheid voor geothermische centrales is 1kWh_{th} indien er enkel warmteproductie plaatsvindt. Dit is dus ook de functionele eenheid in deze LCA. Er worden in deze studie negen impactcategorieën onderzocht voor elke installatie. Dit zijn de negen meest voorkomende impact categorieën in de literatuur en worden gezien als de categorieën van hoogste belang volgens de GEOENVI-richtlijnen gebaseerd op het Joint Research Centre (JRC) [24]:

- Klimaatverandering: op basis van *global warming potential* (GWP)
- Verzuring: op basis van mol H^+ equivalent (AC)
- Uitputting van abiotische bronnen (mineralen en metalen): op basis van kg Sb equivalent (AD)
- Menselijke carcinogene toxiciteit: op basis van de *comparative toxic unit* (CTU_h) voor mensen (HT_c)
- Menselijke niet-carcinogene toxiciteit: op basis van de CTU_h voor mensen (HT_{nc})
- Zoetwater ecotoxiciteit: op basis van de comparative toxic unit (CTU_e) voor ecosystemen (FWEC)
- Cumulatieve energiebehoefte: op basis van verbruik in MJ fossiele, nucleaire en hernieuwbare energie ($\text{CED}_{\text{F/Nuc/Ren}}$)

De laatste drie impact categorieën, de cumulatieve energiebehoefte, worden soms samengenomen in één impactcategorie die de drie energiecategorieën overkoepelt [24] terwijl deze in andere

bronnen worden opgesplitst per herkomst van de energie [28]. Hier zijn dit de fossiele, nucleaire of hernieuwbare herkomst. In deze analyse zullen de drie categorieën individueel worden opgenomen. Voor het uitvoeren van de impactanalyse wordt de software van SimaPro 9.4.0 gehanteerd. In SimaPro wordt gebruik gemaakt van drie impactbeoordelingsmethodes om elk van de impactcategorieën zo correct mogelijk te evalueren. Voor de impactcategorieën: klimaatverandering, verzuring en uitputting van abiotische bronnen wordt gebruik gemaakt van de Europees erkende CML-IA methode, reeds eerder aangehaald in 4.2.2 Environmental Assessment LCI en LCIA. Voor de menselijke en zoetwater toxiciteit wordt de gespecificeerde USEtox methode gebruikt, hierin wordt de geschatte toename in gevallen over de totale menselijke populatie per kWh weergegeven en de potentieel aangetaste fractie van soorten. Deze weergaven zijn in overeenstemming met de definitie van CTU_h en CTU_e [31]. Tot slot wordt de *Cumulative Energy Demand* (CED) methode gebruikt voor de drie cumulatieve energiebehoefte impactcategorieën. Door de combinatie van deze drie methodes te gebruiken, worden de negen impactcategorieën zo efficiënt en correct mogelijk geanalyseerd. De gehanteerde database in SimaPro is deze van ecoinvent 3.6.

Indien beschikbaar in de database, wordt er altijd geopteerd voor data met een zo volledig mogelijk proces gekoppeld aan de grondstoffen. Op deze manier is het bekomen resultaat representatiever voor wat de totale impact betreft. Er wordt hier niet toegewerkt naar een LCA die elk productieproces van de eindproducten mee in rekening brengt omdat er vanuit wordt gegaan dat de impact van het produceren van de ruwe grondstoffen groter is dan de bijdrage van het productieproces tot het eindmateriaal.

5.2 LCI van de studie

Voor de drie types installaties wordt het elektrische net van België gehanteerd voor de elektriciteitsconsumptie. Tabel 7 toont de verdeling van de herkomst van elektriciteit in het Belgische net in 2022 [32].

Tabel 7: Elektriciteit mix België 2022 [32]

Energiebron	Aandeel (%)
Kool	2,4
Olie	0,2
Aardgas	23,4
Biobrandstoffen	3,9
Afvalverbranding	2
Kernenergie	46,1
Waterkrachtcentrales	1,7
Zonnepanelen	7,4
Wind	12,6
Andere	0,4

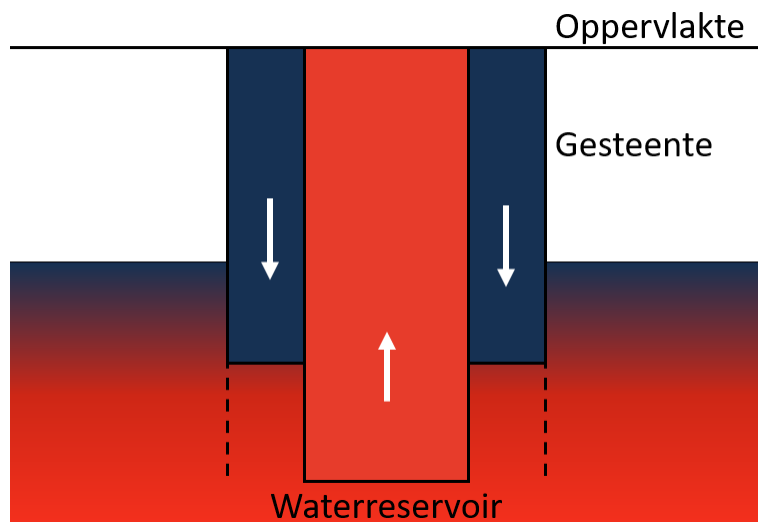
Verder in dit hoofdstuk zullen de verschillende scenario's toegelicht worden. Er wordt aangehaald waar ze verschillen ten opzichte van elkaar. Eerst worden hier nog enkele parameters besproken die voor de verschillende installaties gelijk blijven. Deze parameters zijn gebaseerd op [28] en op informatie, bezorgd door de opdrachtgever VITO.

Alvorens de constructie van de installatie kan plaatsvinden, wordt een boorvloer van 3870 m² gebouwd. Het materiaal dat hiervoor gebruikt wordt, is te zien in tabel A.1. De boring zelf wordt ondersteund via het Belgische elektriciteitsnet met de samenstelling te zien in tabel 7. Er wordt een boorvloeistof op basis van water en andere chemicaliën gebruikt, de samenstelling van deze boorvloeistof is te vinden in tabel A.2. Voor de boormantel wordt staal en cement gebruikt. Voor de interne buis wordt het composiet DOWNSTRONG fiberglass casing and tubing gebruikt, dit composiet heeft een thermische geleidbaarheid van 0.35 W/m*K. Hierdoor is het een geschikte isolator voor de twee coaxiale buizen. In Simapro is gebruik gemaakt van een composiet bestaande uit vezels en hars, ook wel *glass fibre reinforced plastic* (GRP) genoemd. Deze is een goede benadering van DOWNSTRONG. De boring gaat tot een diepte van 3600 m en er heerst een temperatuurgradiënt van 0,03 °C/m in de bodem.

De warmtewisselaar en pomp bevinden zich bovengronds en er wordt gebruik gemaakt van een vloeistof-vloeistof platenwarmtewisselaar met een maximaal debiet van 10 m³/u. Er wordt een vaste lengte van 100 m buis gerekend voor de aan- en afvoer van het thermale water naar de warmtewisselaar. Deze buizen worden geïsoleerd met behulp van minerale wol, hiervoor wordt rotswol geselecteerd in SimaPro. Het gebruik van warmtewisselaars in geothermie is de standaard wegens de chemische eigenschappen van de geothermische vloeistof. Door gebruik te maken van de warmtewisselaar komt deze vloeistof in contact met een beperkte hoeveelheid materiaal. Voor de benodigde plastics wordt de verdeling van 60% polyethyleen (PE) en 40% polyvinylchloride (PVC) gebruikt op basis van [26]. Voor de pomp volstaat een 0,4 kW centrifugaalpomp met een levensduur van gemiddeld 10 jaar, deze wordt dus twee keer vervangen in de levensduur van deze installaties. Er is hiervoor een beschikbaar model uitecoinvent gebruikt.

5.2.1 Open-loop scenario

De open-loop installatie wordt als eerste in detail geanalyseerd. Figuur 13 toont de schematische voorstelling voor de installatie. Hierop is de analyse gebaseerd.



Figuur 13: Gehanteerd open-loop model voor LCA

Het waterreservoir voor deze installatie bevindt zich in een goed doorlatende geologie. Hierdoor is het gebruik van stimulatie of fracking niet nodig en is een boring tot in het reservoir voldoende. De doorstroom in de leiding volgt de aangegeven richting op figuur 13 en gaat van de buitenste naar de binnenste buis. Alvorens de installatie in de productie/operationele fase komt, wordt de installatie eerst onderworpen aan een test. In deze test wordt er een volume van ca. vier keer het putvolume rond gepompt om de volledige installatie te controleren.

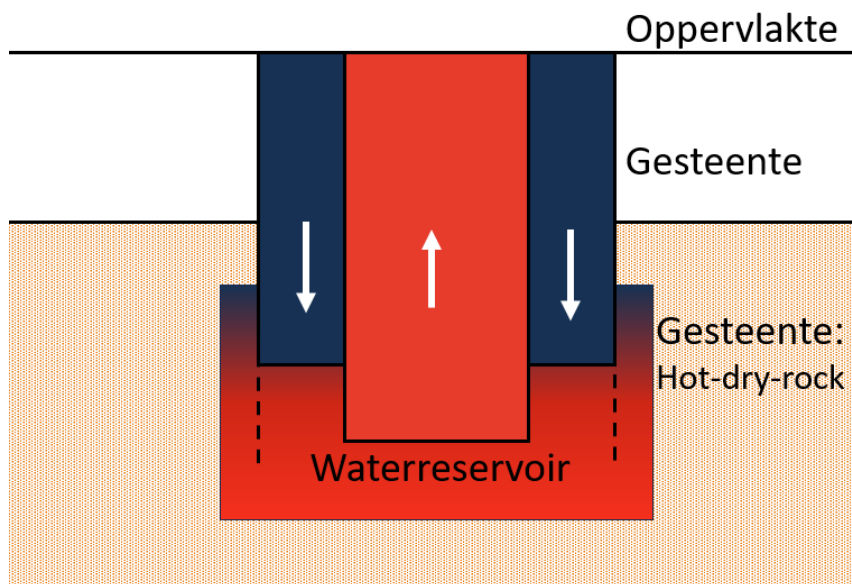
De installatie pompt formatiewater uit het reservoir omhoog. In dit water zijn verschillende gassen opgelost onder de hoge druk die heerst in het reservoir. Door dit naar de oppervlakte te pompen, kunnen er gasbellen ontstaan in de leidingen. Deze gasbellen worden verwijderd door middel van ontgassing, hetgeen een bijkomende uitstoot veroorzaakt. Er is hier uitgegaan van de samenstelling van het water in de reservoirs van de Balmatt-site. De gassamenstelling bestaat voor 75 - 80 % uit CO₂, voor 8 - 11 % uit methaan, voor 2 - 4 % uit stikstof en voor 11 % uit waterstof. Er bevindt zich 2,5 Nm³ gas per m³ formatiewater [34].

Deze installatie bereikt een jaarlijkse thermische productie van 6520 MWh. Over de volledige levensduur zal dit neerkomen op een productie van ongeveer 195,6 GWh. Deze thermische productie wordt bereikt met een productietemperatuur van 65 °C en een injectietemperatuur 24,2 °C. Er heerst een druk van 5 bar in de volledige installatie en een debiet van 4,19 l/s wordt aangehouden. De resterende data voor deze installatie zijn te vinden in tabel B.1.

Er is hier uitgegaan van een beperkte impact door eventuele vervangingen van pijpleidingen in de levensduur van de installatie en dit is dus niet mee opgenomen in de analyse. Echter is het wel belangrijk om aan te halen dat er in deze studie geen rekening is gehouden met scaling in de leidingen. De verwerking van deze scaling zou extra impact kunnen veroorzaken wegens de potentieel complexe chemische en radiologische samenstelling ervan.

5.2.2 Semi-open-loop scenario

Het grootste verschil tussen de open-loop installaties en de semi-open-loop installaties is het gebruik van stimulatie in het gesteente. Door deze stimulatie kan de rest van het systeem analoog functioneren aan de open-loop installaties. Figuur 14 toont het model van een semi-open-loop installatie.



Figuur 14: Gehanteerd semi-open-loop model voor LCA

De stimulatie in de semi-open-loop is nodig vanwege de veronderstelling dat de installatie zich bevindt in een slecht doorlatend waterreservoir. Door middel van de stimulatie verhoogt de efficiëntie van de installatie door het vergroten van het beschikbare waterreservoir. Voor de stimulatie zijn twee scenario's vergeleken met elkaar. In scenario één is gebruik gemaakt van thermische stimulatie waarbij een hoeveelheid koud water in het reservoir gepompt wordt, het koude water creëert vervolgens scheurtjes in het gesteente. De thermische stimulatie is verwerkt in de analyse door middel van het elektriciteitsverbruik. Scenario twee maakt gebruik van chemische stimulatie op basis van een HCl-oplossing. Deze oplossing creëert een grotere porositeit in het omliggende gesteente waardoor opnieuw het bruikbare waterreservoir vergroot. Tabel 8 toont de gegevens van de stimulatie voor beide scenario's. Naast deze gegevens wordt verder het open-loop scenario gevolgd, dat besproken werd in de voorgaande paragraaf. Door gebruik te maken van een

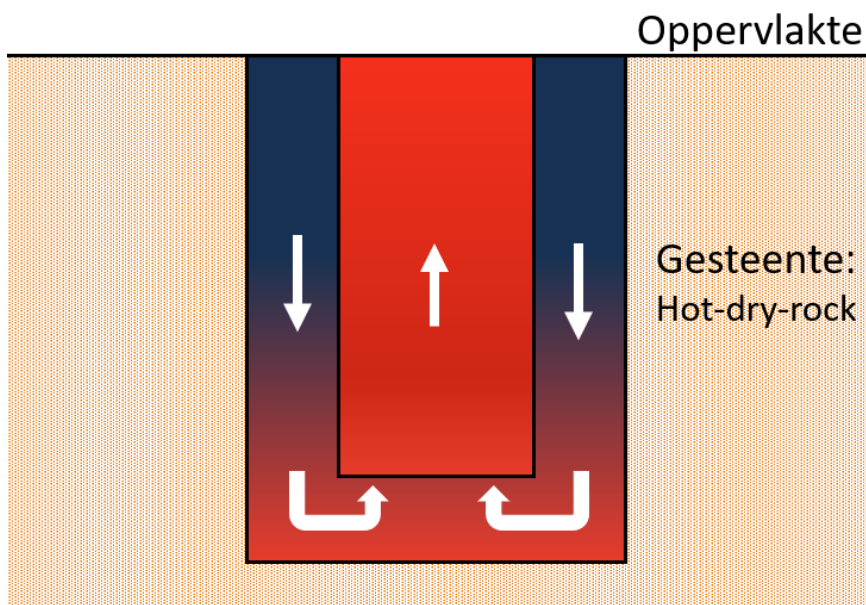
semi-open-loop installatie daalt de thermische output van de installatie licht naar 4255 MWh_{th} jaarlijks voor beide scenario's. In tabel B.2 en tabel B.3 zijn de volledige gegevens van respectievelijk scenario een en scenario twee opgenomen.

Tabel 8: Aannames voor simulatie van de semi-open-loop installatie [28]

Middel	Waarde	Eenheid
<i>Scenario 1</i>		
Elektriciteit	4,74	MWh
<i>Scenario 2</i>		
Chemicaliën (HCl)	9724	kg
Elektriciteit	24,2	MWh

5.2.3 Closed-loop scenario

Tot slot toont figuur 15 het gehanteerde model van het closed-loop systeem voor deze LCA.



Figuur 15: Gehanteerd closed-loop model voor LCA

Gezien de aard van het systeem wordt de aanname gemaakt dat er geen stimulatie of productietesten uitgevoerd worden voor deze boring. De interne buis heeft een diameter van 10,8 cm terwijl de externe buis een diameter van 34 cm heeft. De werkingsvloeistof komt in de warmtewisselaar aan met een temperatuur van 75 °C en wordt weer weggepompt met een temperatuur van 20 °C. Er heerst een constante druk van 2,1 bar in het systeem en de installatie heeft een thermisch vermogen van 2595 MWh_{th} per jaar met een debiet van 1,5 l/s. Deze installatie wordt

gesimuleerd voor een zeer laag doorlaatbaar gesteente. De resterende data voor deze installatie zijn te vinden in tabel B.4.

Bij een closed-loop installatie, die water als werkingsvloeistof hanteert, hebben de componenten een lange levensduur. Er wordt uitgegaan van een scenario waarin er minimale vervangingen nodig zullen zijn in de 30 jaar lange levensduur van de installatie. Hierdoor is de impact van de vervanging verwaarloosbaar voor deze LCA. Verder zorgt de combinatie van de kleine circulatiepomp en de selectie van de werkingsvloeistof ervoor dat er minimale gebruiksmiddelen nodig zullen zijn in vergelijking met de klassieke doubletten zoals geanalyseerd in [28], deze zullen dus ook uitgesloten worden in de LCA.

6 Resultaten van de LCA

6.1 LCIA resultaten

6.1.1 Open-loop resultaten

Tabel 9 toont de resultaten bekomen voor de open-loop installatie zoals beschreven in 5.2.1 weergegeven per gebruikte methode en impactcategorie.

Tabel 9: Open-loop LCIA resultaten

CML-IA	Eenheid	Resultaat
Klimaatverandering	g CO ₂ -eq / kWh _{th}	16,8
Verzuring	g SO ₂ -eq / kWh _{th}	0,0603
Uitputting van abiotische bronnen	mg Sb eq / kWh _{th}	0,243
USEtox		
Zoetwater ecotoxiciteit	CTU _e	370
Menselijke niet-carcinogene effecten	CTU _h	6,37*10 ⁻⁹
Menselijke carcinogene effecten	CTU _h	4,69*10 ⁻⁹
CED		
Fossiele energiebehoefte	MJ	0,208
Nucleaire energiebehoefte	MJ	0,167
Hernieuwbare energiebehoefte	MJ	0,0282

Deze resultaten werden bekomen door de impact van de verschillende materialen en processen te relateren ten opzichte van de totale thermische output van de installatie gedurende de volledige levensduur van 30 jaar.

6.1.2 Semi-open-loop resultaten

Tabel 10 toont de LCIA resultaten voor beide scenario's die onderzocht werden.

Tabel 10: Semi-open-loop LCIA resultaten

CML-IA	Eenheid	Resultaat scenario 1	Resultaat scenario 2
Klimaatverandering	g CO ₂ -eq / kWh _{th}	23,2	23,3
Verzuring	g SO ₂ -eq / kWh _{th}	0,087	0,087
Uitputting van abiotische bronnen	mg Sb eq / kWh _{th}	0,351	0,354
USEtox			
Zoetwater ecotoxiciteit	CTU _e	544	547
Menselijke niet-carcinogene effecten	CTU _h	9,43*10 ⁻⁹	9,46*10 ⁻⁹
Menselijke carcinogene effecten	CTU _h	7,07*10 ⁻⁹	7,08*10 ⁻⁹
CED			
Fossiele energiebehoefte	MJ	0,287	0,288
Nucleaire energiebehoefte	MJ	0,201	0,202
Hernieuwbare energiebehoefte	MJ	0,0355	0,0358

De verschillen te zien in tabel 10, zijn verwaarloosbaar klein maar scenario één met thermische stimulatie is over de hele lijn wel enkele procenten lager dan scenario twee met chemische stimulatie. Dit resultaat is te verwachten gezien er meer middelen nodig zijn in scenario twee.

6.1.3 Closed-loop resultaten

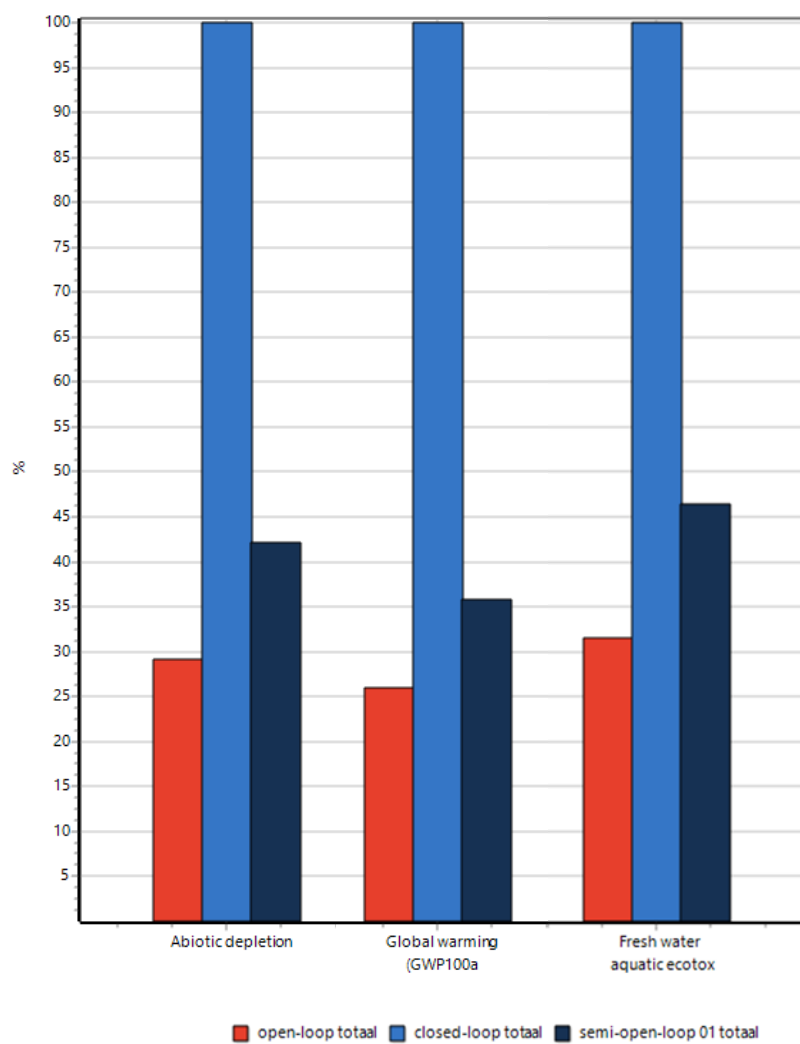
Tabel 11 toont de resultaten van de LCA voor de closed-loop installatie per methode en impactcategorie.

Tabel 11: Closed-loop LCIA resultaten

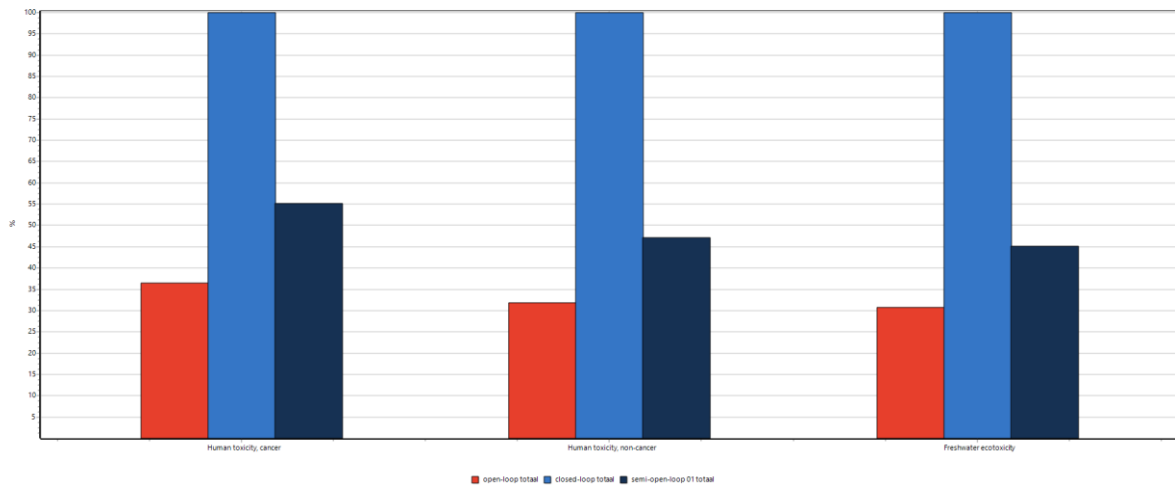
CML-IA	Eenheid	Resultaat
Klimaatverandering	g CO ₂ -eq / kWh _{th}	64,8
Verzuring	g SO ₂ -eq / kWh _{th}	0,183
Uitputting van abiotische bronnen	mg Sb eq / kWh _{th}	0,833
USEtox		
Zoetwater ecotoxiciteit	CTU _e	1,19*10 ³
Menselijke niet-carcinogene effecten	CTU _h	2*10 ⁻⁸
Menselijke carcinogene effecten	CTU _h	1,28*10 ⁻⁸
CED		
Fossiele energiebehoefte	MJ	0,882
Nucleaire energiebehoefte	MJ	1,2
Hernieuwbare energiebehoefte	MJ	0,329

6.1.4 Vergelijking van de resultaten

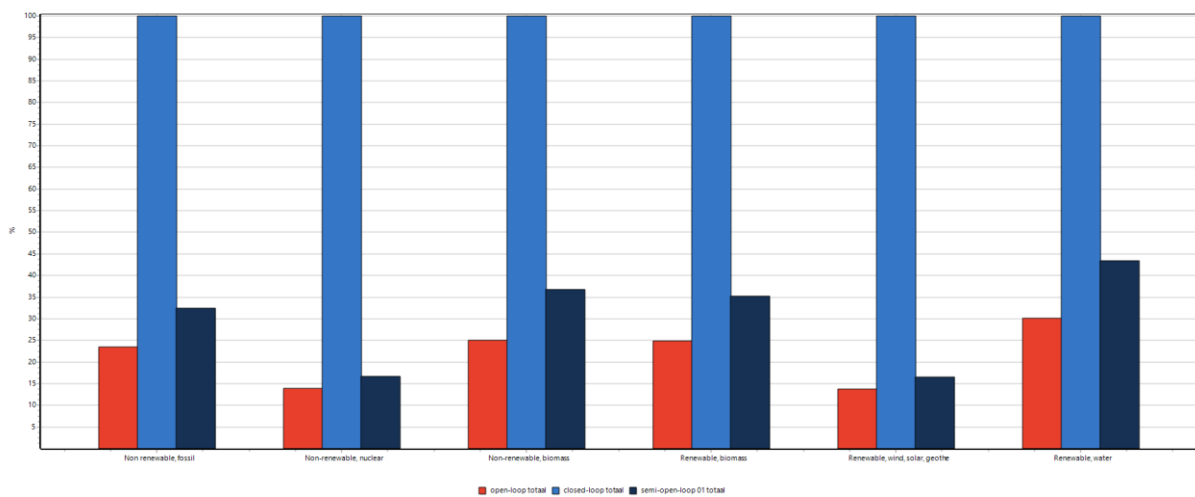
Het doel van deze LCA is het vinden van het type geothermische centrale met één boring met de laagste milieutechnische impact op basis van de geselecteerde impactcategorieën. Om dit te vinden, werden bovenstaande resultaten naast elkaar gezet. De resultaten hiervan zijn te vinden in figuur 16, 17 en 18 met respectievelijk de impactcategorieën voor CML-IA, USEtox en CED.



Figuur 16: Vergelijking van de drie scenario's voor CML-IA



Figuur 17: Vergelijking van de drie scenario's voor USEtox



Figuur 18: Vergelijking van de drie scenario's voor CED

In de drie grafieken is duidelijk te zien dat de closed-loop installatie de hoogste impact heeft voor alle impactcategorieën die hier onderzocht werden. De open-loop installatie heeft over de hele lijn de laagste impact, kort gevolgd door de semi-open-loop installatie volgens scenario één. Verder valt op dat er een verschil heerst van minstens 50% tussen de closed-loop installatie en de andere. Enkel de semi-open-loop installatie voor de impactcategorie menselijke carcinogene effecten overstijgt deze 50 % tot 55 %.

6.2 LCA interpretatie

De resultaten getoond in 6.1 geven duidelijk aan dat de closed-loop installatie een beduidend hogere impact heeft voor de negen onderzochte impactcategorieën. Dit resultaat kan verklaard worden door de lagere thermische generatie van dit type installatie ten opzichte van de andere twee. De functionele eenheid is hier namelijk $1 \text{ kWh}_{\text{th}}$, dus een hogere thermische productie gedurende de levensduur resulteert in betere resultaten in functie van de functionele eenheid.

Voor de semi-open-loop installatie blijkt het gebruik van stimulatie wel een toename in de impact te veroorzaken. Het type van stimulatie is echter weinig relevant voor de impact gezien de verwaarloosbare verschillen in de resultaten. Dit mag geen veralgemening worden en moet zeker gecontroleerd worden binnen specifieke projecten alvorens een stimulatie methode toe te passen indien de impact belangrijk wordt geacht.

Dit resultaat is een richtlijn voor de drie types van installaties omdat dit gebaseerd is op modellen. Het is dus belangrijk om voor ogen te houden dat deze resultaten kunnen afwijken van een LCA uitgevoerd op werkende installaties. Zo zou het kunnen dat de impact van onderhoud of gebruiksmiddelen niet te verwaarlozen blijkt. Een andere mogelijkheid zou kunnen zijn dat de gebruikte materialen en processen afwijkingen hebben in praktische voorbeelden.

Naast een onderlinge vergelijking, was het doel van deze LCA ook om te controleren of en in welke mate deze types van installaties zouden opwegen tegen andere warmtebronnen zoals het geothermisch doublet van de Balmatt-site en anderen.

Door de resultaten van deze LCA te vergelijken met de LCA uitgevoerd op de Balmatt-site, waarvan de resultaten te zien zijn in tabel 2 in 4.3.1, en rekening te houden met het verschil in functionele eenheid, namelijk MWh_{th} voor Balmatt en kWh_{th} voor deze studie, is te zien dat de impact van enkelvoudige diepegeothermietechnieken zich in een zelfde grootteorde bevindt als deze van doubletten voor de meeste impactcategorieën. Wel is op te merken dat de closed-loop installatie over de hele lijn een hogere impact heeft. Voor de andere installaties gaan de verschillen op en af, enkele categorieën hebben een lagere impact voor de enkelvoudige boringen, zoals toxiciteit, en enkele hebben een hogere impact voor deze installaties, zoals de uitputting van abiotische bronnen. De verschillen tussen deze installaties kunnen worden verklaard door verschillende aspecten. Zo wordt er toewijzing gebruikt bij de Balmatt-site waardoor de impact verdeeld wordt, ook is er een hogere thermische productie voor de doubletten. Tot slot kan het gebruik van verschillende materialen als mantel of andere veronderstellingen binnen de LCA leiden tot deze resultaten.

Wel kan het aanpassen van de geselecteerde levensduur effect hebben op de impact van de doubletten, de warmteproductie van deze installaties daalt namelijk meer dan deze van enkelvoudige boringen. Er zou dus een mogelijkheid kunnen zijn dat de impact van de doubletten toch de impact van de enkelvoudige closed-loop installatie zal overstijgen.

Ook de klimaatverandering en verzuring voor het ECW geo Aadijk project besproken in 4.3.3 kan vergeleken worden met de resultaten van deze studie. De klimaatverandering van in Aadijk bedraagt 37 kg CO₂-eq/MWh_{th}, dit is hoger dan de impact van de open-loop en de semi-open-loop installaties maar ook hier heeft de closed-loop de hoogste impact. Voor de verzuring scoort Aadijk met 0.0375 kg SO₂-eq/MWh_{th} beter dan de drie enkelvoudige geothermietechnieken.

Naast vergelijkingen met andere geothermische installaties is het ook interessant om deze technologie te vergelijken met meer klassieke vormen van warmteproductie. Hiervoor wordt een studie, uitgevoerd door de universiteit van Brits-Columbia, geanalyseerd. Zij voerden een LCA uit voor verschillende concepten van warmtegeneratie voor een warmtenet in Vancouver. De vier onderzochte concepten waren aardgas, houten pellets, rioolwarmte en geothermische warmte op 150 m diepte. Tabel 12 toont de resultaten van deze studie [35].

Tabel 12: LCA resultaten voor warmtenet in Vancouver [35]

Midpoint category	Unit	Natural gas	Wood pellets	Sewer	Geothermal
Carcinogens ^a	kg _{eq} C ₂ H ₃ Cl	0.384	0.278	0.0808	0.0288
Non-carcinogens ^a	kg _{eq} C ₂ H ₃ Cl	5.76	0.219	0.267	0.359
Respiratory inorganics	kg _{eq} PM _{2.5}	0.256	0.292	0.0165	0.0222
Respiratory organics	kg _{eq} ethylene	0.0345	0.0223	0.000102	0.000102
Ozone layer depletion	kg _{eq} CFC-11	1.25E-08	0.0000187	0.00122	0.00183
Aquatic ecotoxicity	kg _{eq} TEG ^b water	36,000	515	1,530	2,390
Terrestrial ecotoxicity	kg _{eq} TEG ^b soil	7.45	43.9	15.2	24.8
Terrestrial acid./nutri. ^c	kg _{eq} SO ₂	4.68	7.07	0.44	0.59
Aquatic acidification	kg _{eq} SO ₂	2.72	0.998	0.149	0.201
Aquatic eutrophication	kg _{eq} PO ₄ ³⁻	0.00258	0.000101	0.000151	0.000227
Global warming	kg _{eq} CO ₂	240	39.4	15.8	24.6
Non-renewable energy	MJ primary	4,390	208	21.1	29.8
Mineral extraction	kg _{eq} iron	0.0271	0.0275	0.0501	0.0528

De studie maakt gebruik van een functionele eenheid gelijk aan 1 MWh_{th}. Niet alle impactcategorieën kunnen vergeleken worden met de resultaten uit deze studie door het gebruik van andere eenheden, zoals bij de toxiciteit. Uit de vergelijking van overeenkomende impactcategorieën is te zien dat de installaties een lagere impact hebben dan aardgas en houten pellets, de klimaatverandering voor closed-loop is wel hoger dan deze van hout pellets.

De betere resultaten van de geothermische installaties ten opzichte van aardgas is een veelbelovend feit. De Belgen verwarmden in 2019 voor 68 % hun woning met aardgas volgens Vlaanderen.be. Dit is een grote meerderheid. Het gebruik van geothermie kan hier een lagere impactoptie bieden.

7 Conclusie

Het hoofddoel van dit onderzoek, namelijk het opstellen van drie LCA's voor de verschillende types van enkelvoudige diepegeothermietechnieken, is behaald. Uit deze LCA's kan geconcludeerd worden dat de open-loop installaties vanwege hun hoog thermisch rendement de laagste milieutechnische impact hebben in de negen geselecteerde categorieën. De closed-loop installatie heeft de grootste impact. Voor de meeste impactcategorieën is de impact van de closed-loop installatie zelfs minstens twee keer zo groot als die van de semi-open-loop installatie en tot zeven keer groter dan de impact van de open-loop installatie.

Het gebruik van enkelvoudige diepegeothermietechnieken kan een lagere impact hebben dan het gebruik van installaties met minstens een doublet. Dit is echter niet gegarandeerd en installatie specifiek. Zo is in dit geval bijvoorbeeld de closed-loop installatie de minder goede optie in vergelijking met de Balmatt-site. Voor mensen die een kostenefficiënte oplossing zoeken voor het plaatsen van een geothermische installatie blijven de onderzochte installaties echter interessant omdat ze binnen dezelfde grootteorde van impact blijven als de klassieke technieken.

Ook als alternatief voor klassieke verwarmingstechnieken zoals aardgas en houten pellets zijn de drie installaties interessant en bieden ze voordelen op het vlak van milieutechnische impact. Het plaatsen van diepe geothermische installaties is echter financieel en geologisch niet altijd een optie. De geologie op een locatie zal de grootste factor zijn voor de uiteindelijke opties voor geothermische centrales.

Het analyseren van een praktisch voorbeeld van de in deze thesis onderzochte installaties kan extra inzichten bieden in de toekomst. Het kan gebruikt worden voor zowel een vergelijking van resultaten als voor aanvulling in de literatuur. Verder zou het effect van bepaalde materiaalkeuzes en productieprocessen geanalyseerd kunnen worden door de LCA's te hernemen met aangepaste parameters. Ook kan er een samenwerking worden aangegaan met de ontwikkelaars van het tool, voor vereenvoudigde geothermie LCA's, binnen het GEOENVI-project om ook een optie te ontwikkelen voor enkelvoudige diepegeothermietechnieken. Dit vereenvoudigt vervolgonderzoek.

Enkelvoudige diepegeothermietechnieken zijn een goede aanvulling van het assortiment van hernieuwbare energiebronnen en hebben veel potentieel in toepassingen voor warmtenetten van steden of industrie.

Referentielijst

[1]	„Sustainable Development Goals,” JCI Belgium, [Online]. Beschikbaar: https://www.jci.be/nl/projecten/sustainable-development-goals-sdg/ . [Geopend 22/04/2024].
[2]	„SDG's,” sgd's.be, [Online]. Beschikbaar: https://www.sdgs.be/nl . [Geopend 22/04/2024].
[3]	A. A. Jensen, L. Hoffman, T. B. S. Moller, K. Chirstiansen, J. Elkington en F. van Dijk, „Life cycle assessment A guide to approaches, experiences and information sources,” European environment agency, nr. 6, 1997.
[4]	M. Finkbeiner, A. Inaba, R. Tan, K. Christiansen en H.-J. Klüppel, „The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044,” <i>The International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 11, pp. 80-85, 25/01/2006.
[5]	„Geothermie,” Databank Ondergrond Vlaanderen, [Online]. Beschikbaar: https://www.dov.vlaanderen.be/themas/geothermie . [Geopend 14/03/2024].
[6]	W. J. Lund, „Geothermal energy,” Britannica, 22/03/2024. [Online]. Beschikbaar: https://www.britannica.com/science/geothermal-energy . [Geopend 24/03/2024].
[7]	„Natural Displays of Geothermal Energy,” Enel, [Online]. Beschikbaar: https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/geothermal-energy/natural-displays-of-geothermal-energy . [Geopend 24/03/2024].
[8]	L. Lundmark, M. Huebner en H.-G. Schwarz, „Draft proposal for a European Partnership under Horizon Europe Clean Energy Transition,” Horizon Europe, Europa, 2020.
[9]	D. F. Longa, P. L. Nogueira, J. Limberger, J.-D. van Waas en B. van der Zwaan, „Scenarios for geothermal energy deployment in Europe,” <i>Energy</i> , vol. 206, 10/06/2020.
[10]	N. Dupont, E. Petitclerc, M. Broothaers en O. Kaufmann, „Geothermal Energy Use, Country Update for Belgium,” European Geothermal Congress, Berlijn, Duitsland, 2022.
[11]	VVSG; VEKA, „Warmtetransitie in Vlaanderen, vandaag en morgen,” in <i>#Warmtegids Praktisch naar succesvolle toekomstgerichte projecten</i> , Koning Albert II-laan 20 bus 17 1000 Brussel, Vlaamse Energie- en Klimaat-agentschap, 2022, pp. 7-9.
[12]	„Geothermie: ecologische innovatie,” Janssen, [Online]. Beschikbaar: https://www.janssen.com/belgium/nl/geothermie#:~:text=In%20oktober%202022%20hebben%20we,schaal%20toepast%20voor%20eigen%20energiebehoefte.. [Geopend 26/03/2024].
[13]	M. Broothaers, D. Lagrou, B. Laenen, V. Harcouët-Menou en D. Vos, „Deep geothermal energy in the Lower Carboniferous carbonates of the Campine Basin, northern Belgium: An overview from the 1950's to 2020,” <i>Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften</i> , vol. 172, nr. 3, pp. 211-225, 27/12/2021.
[14]	„GEO@Merksplas,” HITA, [Online]. Beschikbaar: https://www.hita.be/projecten/geomerksplas/ . [Geopend 15/04/2024].
[15]	„Statistics on geothermal energy,” GeotIS , [Online]. Beschikbaar: https://www.geotis.de/homepage/statistics . [Geopend 26/04/2024].
[16]	T. Agemar, J. Weber en R. Schulz, „Deep Geothermal Energy Production in Germany,” <i>Energies</i> , vol. 7, pp. 4397-4416, 9/07/2014.
[17]	T. Tischner, H. Evers, H. Hauswirth, R. Jatho, M. Kosinowski en H. Sulzbacher, „New Concepts for Extracting Geothermal Energy from One Well: The GeneSys-Project,” in <i>World Geothermal Congress 2010</i> , Bali, Indonesië, vol. 1, 2010.

[18]	K. Jiang en X. Bu, „Simulation analysis of a single well geothermal system with,” <i>Geothermics</i> , vol. 100, 28/12/2021.
[19]	S. Erol, V. Harcouët-Menou, B. Laenen en B. P. , „Efficiency of single-well geothermal systems with multi-lateral drills,” <i>Geothermics</i> , vol. 89, 29/07/2020.
[20]	M. Haris, Z. M. Hou, W. Feng, F. Mehmood en b. A. Saleem, „A regenerative Enhanced Geothermal System for heat and electricity,” <i>Renewable Energy</i> , vol. 197, pp. 342-358, 31/07/2022.
[21]	B. Feng, H. Ren, Y. Yang, Z. Cui en J. Zhao, „Comparative Analysis of Heating Efficiency of a Single-Well Geothermal System in the Cold Region of Northeast China,” <i>Energies</i> , vol. 16, nr. 4, 14/03/2023.
[22]	„Fracking,” Staatstoezicht op de Mijnen: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, [Online]. Beschikbaar: https://www.sodm.nl/onderwerpen/fracking#:~:text=Fracking%20is%20een%20techniek%20om,er%20kleine%20scheurtjes%20in%20ontstaan.. [Geopend 27/04/2024].
[23]	W. Huang, W. Cao en F. Jiang, „A novel single-well geothermal system for hot dry rock geothermal energy exploitation,” <i>Energy</i> , vol. 162, pp. 630-644, 16/08/2018.
[24]	I. Blanc, L. Damen, M. Douziech, D. Fiaschi, V. Harcouët-Menou, G. Manfrida, B. Mendecka, L. M. Parisi, P. Perez Lopez, G. Ravier en L. Tosti, „First version of harmonized guidelines to perform environmental assessment for geothermal systems based on LCA and non LCA impact indicators: LCA Guidelines for Geothermal Installations,” <i>Geoenvi</i> , 27/05/2020.
[25]	A. P. Fokaides, A. Kylili en P.-z. Georgali, „Life cycle assessment of geothermal power technologies,” in <i>Environmental Assessment of Renewable Energy Conversion Technologies</i> , Elsevier, 2022, pp. 181-207.
[26]	R. M. Karlsdóttir, P. Ó. Pálsson, H. Pálsson en L. Maya-Drysdale, „Life cycle inventory of a flash geothermal combined heat and power plant located in Iceland,” <i>The International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 20, pp. 503-519, 22/01/2015.
[27]	J. Pauwels, S. Salah, M. Vasile, B. Laenen en V. Cappuyns, „Characterization of scaling material obtained from the geothermal power plant of the Balmatt site, Mol,” <i>Geothermics</i> , vol. 94, 12/03/2021.
[28]	S. Gkousis, V. Harcouët-Menou, L. Damen, K. Welkenhuysen, B. Laenen en T. Compennolle, „Life cycle assessment of geothermal plants targeting the lower carboniferous limestone reservoir in northern Belgium,” <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 376, 20/11/2022.
[29]	A. Paulillo, L. Cotton, R. Law, A. Striolo en P. Lettieri, „Geothermal energy in the UK: The life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project,” <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 249, 10/03/2020.
[30]	L. De Simon, D. Dinkelman, G. Bizarro, Diana en H. Dijkstra, „Screening LCA for a geothermal doublet,” TNO, Utrecht, 2021.
[31]	S. Erhart en K. Erhart, „Environmental ranking of European industrial facilities by toxicity and global warming potentials,” <i>Scientific Reports</i> , 31/01/2023.
[32]	„Where does Belgium get its electricity?,” iea 50, 2022. [Online]. Beschikbaar: https://www.iea.org/countries/belgium/electricity . [Geopend 2/05/2024].
[33]	S. Bos en B. Laenen, „Development of the first deep geothermal doublet in the Campine Basin of Belgium,” <i>European Geologist</i> , vol. 43, pp. 16-20, 8/05/2017.
[34]	S. Ghafghazi, T. Sowlati, S. Sokhansanj, X. Bi en S. Melin, „Life cycle assessment of base-load heat sources for district heating system options,” <i>The International Journal of Life Cycle Assessment</i> , vol. 16, pp. 212-223, 22/02/2011.

Bijlagenlijst

Bijlage A: Gebruikte gegevens uit [28].....	p. 61
Bijlage B: Installatie specifieke gegevens.....	p. 63

Bijlage A: Gebruikte gegevens uit [28]

Tabel A. 1: Materialen voor het boorplatform

Boorplatform	Eenheid	Waarde
Beton	m ³	800
Koolstofstaal	kg	24520
Diesel	l	4300
Afgraving	m ³	800

Tabel A. 2: Samenstelling van de boorvloeistof

Boorvloeistof samenstelling	Volume per meter boring		massadichtheid	
bentoniet	0,134691	m ³ /m	593	kg/m ³
HCl	0,005559	m ³ /m	1,6423	kg/m ³
KCl	0,29061	m ³ /m	1984	kg/m ³
water	0,050035	m ³ /m	997	kg/m ³
CaCO ₃	0,095017	m ³ /m	2711	kg/m ³

Bijlage B: Installatie specifieke gegevens

Tabel B. 1: Gegevens voor de open-loop installatie

Open-loop parameters	Proces	Eenheid	Waarde (gemiddeld)
Diepte	Algemeen	m	3600
Elektriciteit verbruik	Boring	MWh	3004,72
Brandstofverbruik	Boring	l	28037,62
Brandstofverbruik	Exploratie	l	20000
Brandstofverbruik	Afsluiting	l	25000
Staal	Boring	kg	438054
Cement	Boring	m ³	306,14
Cement	Afsluiting	m ³	15
Epoxy versterkte glasvezel	Tubing	kg	14973
Boorvloeistof	Boring	m ³	553,3
Boorgruis	Boring	m ³	738,1
Elektriciteit verbruik	Stimulatie	MWh	0
HCl	Stimulatie	kg	0
volume water	Testing	m ³	1000
Elektriciteit verbruik	Testing	MWh	1,34
CO2	Testing	kg	3691,99
CH4	Testing	kg	117,92
N2	Testing	kg	33,996
grind	Afsluiting	kg/m	51,1
Open-loop resultaten			
Put nummer	Algemeen		1
Jaarlijkse thermische energie	Algemeen	MWh	6520
Roestvrijstaal	Constructie	kg	2515,6
Koolstofstaal	Constructie	kg	26994,4
Aluminium	Constructie	kg	1015,9
Koper	Constructie	kg	125,58
Minerale wol isolatie	Constructie	kg	1599,1
Plastiek	Constructie	kg	1465,1
Beton	Constructie	kg	56854,01
Massa geothermaal water	Productie	kg	134865548
Massa geothermaal water voor jaarlijkse warmteproductie	Productie	kg	134865548
Gemiddeld productie debiet	Productie	l/s	4,19
Drawdown	Productie	%	117,38
Productietemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	65
Productiedruk geothermische vloeistof	Productie	bar	5

Productie-enthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	267,2
Eindtemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	24,2
Einddruk geothermische vloeistof	Productie	bar	5
Eindenthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	84
Dichtheid	Productie	kg/m ³	1103
Elektriciteit verbruik	Productie	MWh	66,37
CO2	Productie	kg	9725,2
CH4	Productie	kg	566,68
N2	Productie	kg	75,15

Tabel B. 2: Gegevens voor scenario een van de semi-open-loop installatie

Semi-open-loop parameters 01	Proces	Eenheid	Waarde (gemiddeld)
Diepte	Algemeen	m	3600
Elektriciteit verbruik	Boring	MWh	3004,72
Brandstofverbruik	Boring	l	28037,62
Brandstofverbruik	Exploratie	l	20000
Brandstofverbruik	Afsluiting	l	25000
Staal	Boring	kg	438054
Cement	Boring	m ³	306,14
Cement	Afsluiting	m ³	15
Epoxy versterkte glasvezel	Tubing	kg	14973
Boorvloeistof	Boring	m ³	553,3
Boorgruis	Boring	m ³	738,1
Elektriciteit verbruik	Stimulatie	MWh	4,737
HCl	Stimulatie	kg	0
volume water	Testing	m ³	400
Elektriciteit verbruik	Testing	MWh	0,5928
CO2	Testing	kg	1476,8
CH4	Testing	kg	47,167
N2	Testing	kg	13,597
grind	Afsluiting	kg/m	51,1
Semi-open-loop resultaten 01			
Put nummer	Algemeen		1
Jaarlijkse thermische energie	Algemeen	MWh	4255
Roestvrijstaal	Constructie	kg	1640,6
Koolstofstaal	Constructie	kg	23981
Aluminium	Constructie	kg	852,13
Koper	Constructie	kg	81,9
Minerale wol isolatie	Constructie	kg	1425,5
Plastiek	Constructie	kg	955,5
Beton	Constructie	kg	37067,81
Massa geothermaal water	Productie	kg	88014249,6
Massa geothermaal water voor jaarlijkse warmteproductie	Productie	kg	88014249,6
Gemiddeld productie debiet	Productie	l/s	2,74
Drawdown	Productie	%	79,42
Productietemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	65
Productiedruk geothermische vloeistof	Productie	bar	5
Productie-enthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	267,2
Eindtemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	24,2
Einddruk geothermische vloeistof	Productie	bar	5
Eindenthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	84

Dichtheid	Productie	kg/m ³	1103
Elektriciteit verbruik	Productie	MWh	29,306
CO2	Productie	kg	1269,35
CH4	Productie	kg	73,96
N2	Productie	kg	9,81

Tabel B. 3: Gegevens voor scenario twee van de semi-open-loop installatie

Semi-open-loop parameters 02	Proces	Eenheid	Waarde (gemiddeld)
Diepte	Algemeen	m	3600
Elektriciteit verbruik	Boring	MWh	3004,72
Brandstofverbruik	Boring	l	28037,62
Brandstofverbruik	Exploratie	l	20000
Brandstofverbruik	Afsluiting	l	25000
Staal	Boring	kg	438054
Cement	Boring	m ³	306,14
Cement	Afsluiting	m ³	15
Epoxy versterkte glasvezel	Tubing	kg	14973
Boorvloeistof	Boring	m ³	553,3
Boorgruis	Boring	m ³	738,1
Elektriciteit verbruik	Stimulatie	MWh	24,209
HCl	Stimulatie	kg	9723,882
volume water	Testing	m ³	400
Elektriciteit verbruik	Testing	MWh	0,5928
CO2	Testing	kg	1476,8
CH4	Testing	kg	47,167
N2	Testing	kg	13,597
grind	Afsluiting	kg/m	51,1
Semi-open-loop resultaten 02			
Put nummer	Algemeen		1
Jaarlijkse thermische energie	Algemeen	MWh	4255
Roestvrijstaal	Constructie	kg	1640,6
Koolstofstaal	Constructie	kg	23981
Aluminium	Constructie	kg	852,13
Koper	Constructie	kg	81,9
Minerale wol isolatie	Constructie	kg	1425,5
Plastiek	Constructie	kg	955,5
Beton	Constructie	kg	37067,81
Massa geothermaal water	Productie	kg	88014249,6
Massa geothermaal water voor jaarlijkse warmteproductie	Productie	kg	88014249,6
Gemiddeld productie debiet	Productie	l/s	2,74
Drawdown	Productie	%	79,42
Productietemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	65
Productiedruk geothermische vloeistof	Productie	bar	5
Productie-enthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	267,2
Eindtemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	24,2
Einddruk geothermische vloeistof	Productie	bar	5
Eindenthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	84

Dichtheid	Productie	kg/m ³	1103
Elektriciteit verbruik	Productie	MWh	29,306
CO2	Productie	kg	1269,35
CH4	Productie	kg	73,96
N2	Productie	kg	9,81

Tabel B. 4: Gegevens voor de closed-loop installatie

Closed-loop parameters	Proces	Eenheid	Waarde (gemiddeld)
Diepte	Algemeen	m	3600
Elektriciteit verbruik	Boring	MWh	3004,72
Brandstofverbruik	Boring	l	28037,62
Brandstofverbruik	Exploratie	l	20000
Brandstofverbruik	Afsluiting	l	25000
Staal	Boring	kg	465430
Cement	Boring	m ³	306,14
Cement	Afsluiting	m ³	15
Epoxy versterkte glasvezel	Tubing	kg	14973
Boorvloeistof	Boring	m ³	553,3
Boorgruis	Boring	m ³	738,1
Closed-loop resultaten			
Put nummer	Algemeen		1
Jaarlijkse thermische energie	Algemeen	MWh	2595
Roestvrijstaal	Constructie	kg	1093,8
Koolstofstaal	Constructie	kg	22129,5
Aluminium	Constructie	kg	749,8
Koper	Constructie	kg	54,6
Minerale wol isolatie	Constructie	kg	1317
Plastiek	Constructie	kg	637
Beton	Constructie	kg	24741,3
Massa geothermaal water	Productie	kg	42736567
Massa geothermaal water voor jaarlijkse warmteproductie	Productie	kg	42736567
Gemiddeld productie debiet	Productie	l/s	1,5
Drawdown	Productie	%	0,207
Productietemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	75
Productiedruk geothermische vloeistof	Productie	bar	2,1
Productie-enthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	314
Eindtemperatuur geothermische vloeistof	Productie	°C	20
Einddruk geothermische vloeistof	Productie	bar	2,1
Eindenthalpie geothermische vloeistof	Productie	kJ/kg	84
Dichtheid	Productie	kg/m ³	977
Jaarlijks elektriciteit verbruik	Productie	MWh	0,377