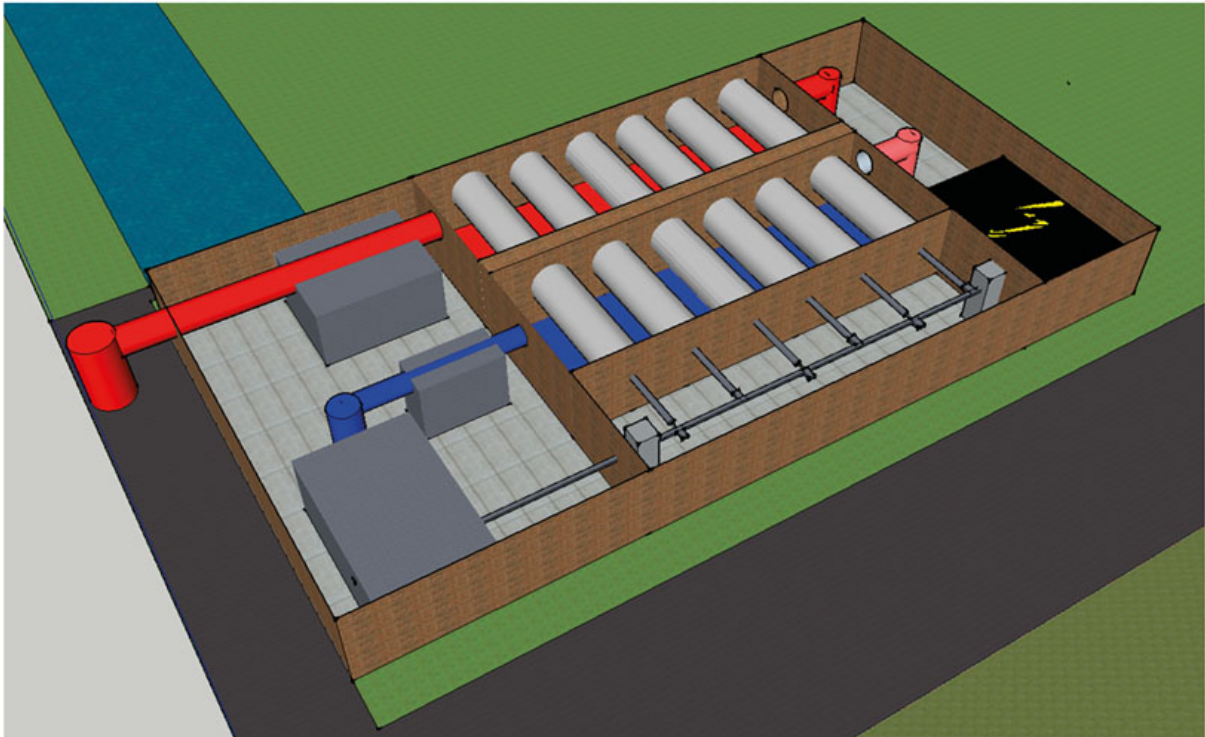


Afstudeer onderzoek naar de haalbaarheid van het Stirling gemaal



Bovenstaande foto: Voorbeeld opstelling Stirling gemaal

Naam: Jordi Romp

Studentnummer: 931214001

Datum: 02-6-2018

Versie: 1.0

Titelblad

Auteur: Jordi Romp

Studentnummer: 931214001

Titel: Afstudeeronderzoek naar de haalbaarheid van het Stirling gemaal

Afstuderen: HBO Kust- en Zeemanagement

Begeleiders VHL: Marije Busstra en Evelien Jager

Opponent: Peter Hofman

Instituut Van Hall Instituut

Plaats van uitgave: Leeuwarden

Jaar van uitgave: Juni 2018

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeeronderzoek over het Stirling gemaal. Het onderwerp is ooit gekozen naar aanleiding van een uitgeschreven prijsvraag van de vereniging van vrienden voor de Cruquius. De prijsvraag luidde destijds: 'Wat is de toekomst van Nederland als deltaland in 2020?'. Studenten konden voor deze prijsvraag ideeën inzenden. In januari 2017 heb ik hiervoor de derde prijs en de publieksprijs in ontvangst mogen nemen. Toen ik daarna kon beginnen aan mijn afstuderen ontstond vanuit de hogeschool het idee om de prijsvraag van het Stirling gemaal verder uit te werken.

Tijdens het onderzoek naar het Stirling gemaal heb ik met veel mensen mogen brainstormen over het idee. Ik heb veel steun gekregen van waterschap Rijnland bij het verder uitdenken van mijn idee. Na het uitwerken van de prijsvraag ben ik begonnen bij aannemingsmaatschappij VOBI in Vinkeveen. Hier ben ik verder gaan werken met het ontwerpen van tijdelijke gemalen en ben zo nog meer te weten gekomen over gemalen.

Ik wil mijn afstudeerbegeleiders Marije Busstra en Evelien Jager bedanken voor alle hulp en feedback die ik heb gekregen tijdens mijn onderzoek.

Het onderzoek naar het Stirling gemaal tijdens de prijsvraag en het afstudeeronderzoek heeft bij elkaar meer dan een jaar in beslag genomen waarbij ik veel heb geleerd. Ik wens iedereen veel leesplezier!

Jordi Romp, Hilversum, 07-01-2018

Summary

In the long history with water, the Netherlands have developed many ways to protect itself against water related problems. This research conducts a new way of water pumping whereby the Netherlands can make a next step in the long battle against water, the Stirling water pump. In this research, an answer will be given on the question in which way this technically and financially is achievable and in what way stakeholders can have an interest or importance in further developing a Stirling water pump. Concerning the technical feasibility the exact operation of a Stirling engine will be discussed. Besides the basic mechanism, an ideal Stirling cycle turns out to exist what positively influences the best efficiency of the motor. For building a Stirling water pump the Rhombic thermo engine from 1958 seems out to be the best engine because its proven proper functioning and efficiency of 225 kW of energy. Regarding the current capacity of water pumps though further research will be needed on the design of 1958. The goal of the Stirling water pump is to equal the capacity of current water pumps, so it will offer an interesting sustainable way of water pumping for water boards. After increasing the engine power a model with 5 Stirling engines must have a total capacity of 1800 kW, with this capacity most of water pumps in the Netherlands could be replaced by the sustainable Stirling water pump.

Regarding the financial feasibility it turns out the biggest cost item is deep geothermal doublet drilling. Research has shown a rise of investigations in the last years, what results in a bigger knowledge in aspects that influence the number of cost for a geothermal doublet drilling. With current knowledge the total cost for one doublet drilling will be approximately 10 million euro's, but a reduce in those cost can be expected after more drillings has been done. From a geothermal well, more energy could be extracted than needed for one water pump. With the reduction in electricity cost plus the yields of selling residual electricity a water board can earn over 1,5 million euro's a year. The generated energy stands equal to the emission of 4.144.000 kilogram of CO₂. The Total cost of building a Stirling water pump will be estimated around 15,5 million euro's. Herewith the investment could be recouped in 10,4 years time.

The Dutch water boards together set up the so called sustainable ambitions which they want to meet by the year of 2020. Two important ambitions of this are to minimally generate 40% of its own electricity and to reduce the CO₂ emissions by 30%. Herewith the Stirling water pump could be a good step in the direction of achieving these goals. In the realisation, water boards will be for this the most important stakeholder. Besides investor, the water boards could also play a role as client and administrator of the Stirling water pump. Since a few years the Dutch government provides several subsidies to stimulate the use geothermal energy by the: SDE+, SDE, OV-MEP en de MEP. Per project up to 6,3 million euro's can be given in support. With this the government would not only be a legislator but also investor in the Stirling water pump and become an important stakeholder as well. For realising the Stirling water pump more research is needed so research institutes will also be a stakeholder. Finally the surrounding area where the First Stirling water pump will be build will also play a role as well as environmental institutes to could offer knowledge and contribute to a positive image.

Samenvatting

Nederland heeft in zijn lange geschiedenis met het water vele vormen ontwikkeld om zich te wapenen tegen het water. In dit onderzoek is gekeken naar een nieuwe vorm van bemalen waarmee Nederland een nieuwe stap kan zetten in de strijd tegen het water, het Stirling gemaal. De vraag waar in dit onderzoek antwoord op wordt gegeven is op welke manier dit technisch en financieel haalbaar is en in welke vorm partijen interesse en belangen zullen hebben bij de verdere ontwikkeling van het Stirling gemaal. Voor de technische haalbaarheid is gekeken naar hoe de Stirlingmotor precies werkt. Naast het basisprincipe is ook naar voren gekomen dat er een ideale Stirlingcyclus bestaat die het rendement van een Stirlingmotor positief beïnvloed. Voor het bouwen van een Stirling gemaal kan het best gebruikt gemaakt worden van een eerder reeds gebouwde versie van de stirlingmotor, de Rhombic thermomotor uit 1958 vanwege de bewezen werking met een vermogen van 225kW aan energie. Gelet op de capaciteit van bestaande gemalen zal er echter wel een groter vermogen nodig zijn dan uit het ontwerp van 1958. Het doel van het Stirling gemaal is om bestaande gemalen qua capaciteit te evenaren, om zo een interessante duurzame vervanging te bieden voor bemaling door met name waterschappen. Na verder onderzoek middels verschillende omschreven methoden wordt beoogd 1800kW aan vermogen te leveren, hiermee kan het overgrote deel van de gemalen in Nederland vervangen worden door het duurzame Stirling gemaal.

Bij de financiële haalbaarheid is naar voren gekomen dat de grootste kostenpost de diepe geothermische doubletboring is. Uit vooronderzoek is gebleken dat er met name de laatste jaren veel onderzoek wordt gedaan naar geothermisch boren waardoor bekend is waarop gelet moet worden om de kosten in toom te houden. Met de huidige kennis worden de kosten voor een boring geschat op ongeveer 10 miljoen euro, maar de verwachting is dat deze kosten snel verlaagd gaan worden zodra er meer boringen worden gedaan. Uit een geothermische bron kan meer energie gewonnen worden dan er nodig is voor één gemaal. Met de besparing van de elektriciteit die gebruikt wordt voor bemaling plus de verkoop van de overige elektriciteit kan een Stirling gemaal een waterschap per jaar 1,5 miljoen euro opbrengen. De opgewekte energie staat dan gelijk aan de uitstoot van 4.144.000 kilogram CO₂. De totale kosten voor een Stirling gemaal zullen neerkomen op 15,5 miljoen euro. Hiermee kan een investering terugverdiend worden in 10,4 jaar tijd.

De Nederlandse waterschappen hebben gezamenlijk de duurzaamheidsambities opgesteld waaraan zij willen voldoen in 2020. Twee belangrijke ambities hiervan zijn om minimaal 40% eigen energie op te wekken en om 30% minder CO₂ uit te stoten. Het Stirling gemaal kan een stap in de goede richting zijn om deze ambities te behalen. Bij deze realisatie zullen de waterschappen dan ook de belangrijkste stakeholder zijn. Naast investeerder zullen de waterschappen ook opdrachtgever en de uiteindelijke beheerder kunnen worden van een Stirling gemaal. Sinds een aantal jaar verstrekt de Nederlandse overheid een aantal subsidies om het gebruik van geothermische energie te stimuleren, waaronder de SDE+, SDE, OV-MEP en de MEP. Per project kan er maximaal 6,3 miljoen euro aan subsidie ontvangen worden. Hiermee kan de overheid naast wetgever ook investeerder in het Stirling gemaal en een belangrijke stakeholder worden. Voor de realisatie is echter wel meer onderzoek nodig waarmee onderzoeksinstituten ook een belangrijke stakeholder vormen. Tot slot zal de omgeving waar het eerste Stirling gemaal wordt gebouwd een rol spelen, net als milieuorganisaties die kennis kunnen delen en kunnen bijdragen aan het imago van het Stirling gemaal.

Inhoud

Inleiding	7
2. Onderzoeksmethoden	15
2.1 Technische haalbaarheid:	15
2.2 Financiële haalbaarheid	16
2.3 Methoden om de stakeholders te onderzoeken	18
3. Resultaten	19
3.1 Technische haalbaarheid	19
3.1.1 Werking stirlingmotor	19
3.1.2 Ideale Stirlingcycle	21
3.1.3 Ontwikkeling van de stirlingmotor en bestaande voorbeelden	23
3.1.4 Vergroten vermogen stirlingmotor	24
3.1.5 Gemalen in Nederland	26
3.2 Financiële haalbaarheid	29
3.2.1 Potentiaal en kosten geothermische doubletboring	29
3.2.2 Totale kosten Stirling gemaal	30
3.2.3 Opbrengsten Stirling gemaal	31
3.2.4 Kosten baten analyse	37
3.3 Partijen met interesse en belang bij de uitvoering van het Stirling gemaal	38
3.3.1 Waterschappen	38
3.3.2 Overheid	40
3.3.3 Onderzoeksinstituten	42
3.3.4 Indirecte stakeholders	42
3.3.5 Stakeholder inventarisatie:	43
3.3.6 Samenwerking partijen bij verdere ontwikkeling en realisatie Stirling gemaal	44
Conclusie	46
Discussie	47
Aanbevelingen	48
Literatuurlijst	49
Bijlage I:	52
Bijlage II:	53

Inleiding

In de strijd tegen het water heeft Nederland gedurende de geschiedenis vele transformaties doorgemaakt. Door het constant zoeken naar nieuwe manieren heeft Nederland zich ontwikkeld tot het waterland bij uitstek. Het bouwen van sluizen als muur tegen het water tijdens hoogtij rond het jaar 1300 wordt het begin van de Nederlandse poldercultuur genoemd. Naast de sluizen werden in deze tijd ook de eerste dijken gebouwd in de vorm van lage ‘polderkades’ (Schevenhoven, 2015).

Na de uitvinding van sluizen en polderkades werd in 1408 de eerste windmolen voor bemaling gebouwd door Floris van Alkemade bij zijn kasteel Cronenstein in Zoeterwoude na een voorbeeld van een boer uit Alkmaar. Tot midden 19^e eeuw was de windmolen het enige werktuig voor polderbemaling. Rond 1530 nam het aantal windmolens snel toe waardoor turf dieper kon worden afgegraven en het gebied dat onder zee lag zich snel uitbreidde (Schevenhoven, 2015).

Na het eeuwenlange gebruik van windmolens werd aan het eind van de 18^e eeuw veel onderzoek gedaan naar het gebruik van stoommachines. Deze machines konden veel meer kracht leveren dan één enkele windmolen, waardoor het droogleggen van een groot meer mogelijk en een stuk goedkoper werd. Dit resulteerde in 1852 tot de drooglegging van de Haarlemmermeer. Voor deze drooglegging werden in totaal drie grote stoomgemalen gebouwd die in ruim drie jaar tijd 800 miljoen kubieke meter water verpompten. Eén van deze stoomgemalen bestaat tot op de dag van vandaag nog, genaamd het gemaal De Cruquius. Door de drooglegging van het Haarlemmermeer verdween bijna de gehele boezemcapaciteit van Holland en Utrecht. Dit maakte deze delen van het land bij veel neerslag kwetsbaar voor overstromingen. Als tegenprestatie voor de drooglegging investeerde waterschappen en de regering toentertijd in vele stoomgemalen die de boezemcapaciteit van de Haarlemmermeer moesten opvangen (Schevenhoven, 2015).

Later in de geschiedenis bleef Nederland zich op watergebied ontwikkelen en werden de meeste stoomgemalen vervangen door diesel of elektrische gemalen. In de meer dan duizend jaar geschiedenis van Nederland als deltaland werd meestal aan de hand van een probleem een oplossing bedacht die het land weer een aantal decennia tegen het water beschermde. Ook in de huidige geschiedenis zien we deze mentaliteit terug. Zo leidde de Zuiderzeevloed van 1916 tot de bouw van de afsluitdijk, de watersnoodramp van 1953 tot de deltawerken en de hoogwaterstand in rivieren in 1993/1995 tot het plan ruimte voor de rivier (Kok, et al., 2008).

Ook onze tijd kent nieuwe vormen van dreiging van water wat ongetwijfeld zal leiden tot nieuwe Deltaplannen die Nederland droog zullen houden. Dit afstudeeronderzoek zal gaan over een nieuwe vorm van bemaling die past in de opmars van duurzaamheid in het waterbeleid.

Probleembeschrijving

Na een lange geschiedenis met water en vele innovaties verder kan een volgende stap in de ontwikkeling tegen de strijd met het water, het Stirling gemaal zijn. De bedoeling van dit nieuwe gemaal is om de bemaling in Nederland nagenoeg energieneutraal te maken. Hiermee worden er veel kosten bespaard en levert het daarnaast ook veel voordelen op voor het milieu. Het idee van het gemaal luidt om in plaats van elektriciteit te gebruiken voor bemaling, het nu te gaan opwekken. Het nieuwe gemaal gebruikt aardwarmte als energiebron. In de bodem van Nederland bevindt zich op enkele duizenden meters diep zeer warmwater van z’n 150 graden Celsius (De groene energiemaatschappij, 2016). Momenteel wordt aardwarmte opgepompt en gebruikt voor de

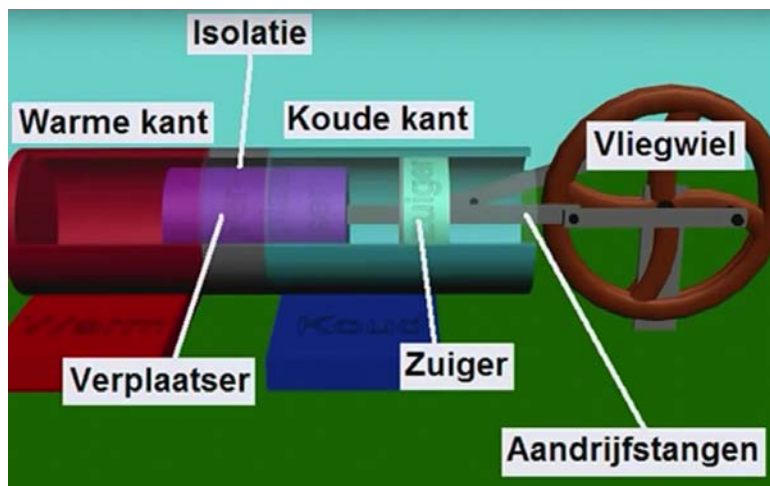
verwarming van huizen, kassen en zwembaden, echter wordt dit nu gedaan tot een diepte van maximaal 150 meter. Het idee is om dieper gelegen warmwater te gebruiken als energiebron. Het oppervlaktewater uit polders, kanalen en meren wat weggepompt moet worden heeft een veel lagere temperatuur. Daarmee bestaat een groot temperatuurverschil tussen bodem en oppervlakte waar een stirlingmotor gebruik van kan maken.

De stirlingmotor is een eeuwenoud principe en werd in 1818 al bedacht door de Schotse dominee Robert Stirling. Destijds liet hij met de stirlingmotor waterpompen aandrijven omwille van het droog houden van steengroeven. Later is het principe van de stirlingmotor gebruikt voor het aandrijven van scheepsmotoren. Het Nederlandse bedrijf Philips deelde na de watersnoodramp lampen uit die draaiden op kleine stirlingmotoren. Ook heeft Philips geprobeerd om auto's te laten rijden op stirlingmotoren. Het enige nadeel was dat stirlingmotoren niet erg geschikt zijn voor het snel accelereren en afremmen, waardoor auto's met stirlingmotoren nooit op grote schaal zijn geproduceerd (Golantec, 2016).

In figuur 1 op de volgende pagina is een principe opstelling te zien van de stirlingmotor met alle belangrijke onderdelen. De belangrijkste onderdelen van een stirlingmotor zijn:

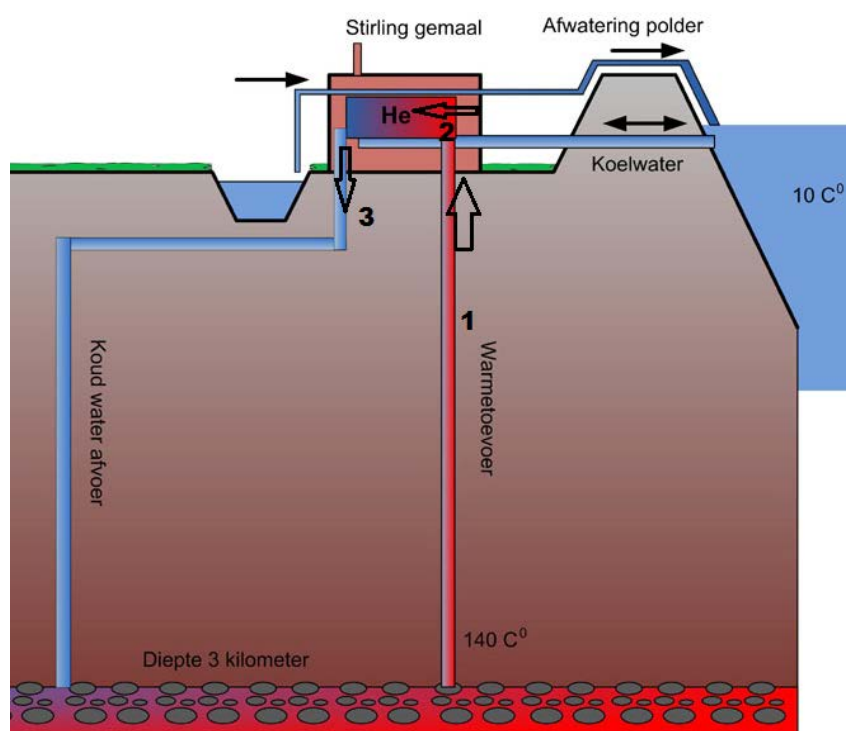
Onderdeel	Functie
Warme kant	De warme kant van de stirlingmotor is de plek waar het gas in de afgesloten cilinder wordt verwarmd door middel van een externe warmtebron. De externe warmtebron kan bijvoorbeeld een vlam zijn of zoals bij het Stirling gemaal, aardwarmte.
Koude kant	De koude kant van de stirlingmotor is de plek waar het gas in de afgesloten buis wordt afgekoeld. Dit afkoelen gebeurt door een externe koudebron buiten de gasbuis, wat bijvoorbeeld koud water kan zijn of koude lucht.
Isolatie	De isolatie is het stuk tussen de warme en de koude kant en heeft als functie om het warme en koude deel zo goed mogelijk van elkaar te isoleren om te voorkomen dat de temperatuur aan beide zijdes gelijk kan worden. In sommige uitvoeringen van een stirlingmotor kan hier nog een regenerator bij geplaatst worden om warme lucht wat toch naar de koude zijde ontsnapt terug te leiden naar de warme zijde om zo een hoger rendement te kunnen behalen.
Verplaatser	De verplaatser bevindt zich in de gasbuis en heeft een iets kleinere diameter dan de buis zelf. Hierdoor kan er gas langs de verplaatser ontsnappen en ontstaat er bij hogere druk een luchtstroom tussen de koude en warme zijde. De verplaatser is verbonden middels stangen aan de zuiger en het vliegwiel. Hierdoor bewegen de verplaatser, zuiger en het vliegwiel evenredig onder invloed van druk .
Zuiger	De zuiger fungeert als afsluiter van de gasbuis en bepaalt het volume van de gasbuis. De zuiger beweegt doordat de gasdruk toeneemt en hiermee ook het volume toeneemt. Als de druk weer afneemt omdat het gas weer is afgekoeld wordt de zuiger terug geleid onder invloed van het vliegwiel en neemt het volume van gasbuis weer af.
Vliegwiel	Het vliegwiel heeft als functie om kinetische energie tijdelijk op te slaan die is ontstaan vanuit de beweging van de zuiger. Deze energie komt vrij als de druk in gasbuis is afgenomen. Zonder het vliegwiel zal de stirlingmotor tot stilstand komen.

Tabel 1: Belangrijkste onderdelen stirlingmotor (Sterl, 2016)



Figuur 1: Animatie stirlingmotor (Sterl, 2016)

In figuur 1 is een standaard opstelling van een stirlingmotor te zien met alle belangrijke componenten van de motor. Een stirlingmotor bestaat uit een grote gasbuis met in het midden een zuiger. Aan de ene kant van de buis wordt gas verwarmd, als gevolg van de warmte zet het gas uit en komt de zuiger in beweging. De zuiger beweegt naar de koude kant. De koude kant veroorzaakt inkrimping van het gas, waardoor de zuiger met behulp van een vliegwiel weer terug beweegt naar de warme kant. (Geertsma, 2013). De beweging van de zuiger en het vliegwiel kan vervolgens gebruikt worden om een waterpomp of dynamo aan te drijven. Het doel hiervan is om water weg te pompen of elektriciteit op te wekken. Figuur 1 geeft duidelijk de warme en koude kant weer. Bij het Stirling gemaal wordt de warme kant verwarmt door aardwarmte (circa 140 graden Celsius) en de koude kant door omgevingswater (uit kanalen, rivieren of zee circa 10 graden Celsius). Hoe groter het temperatuurverschil hoe meer vermogen er uit de stirlingmotor gehaald kan worden. In hoofdstuk 3.1 wordt stap voor stap de techniek van de stirlingmotor uitgelegd.



Figuur 2 Idee Stirling gemaal schematisch (eigen afbeelding)

In figuur 2 is het idee voor het Stirling gemaal schematisch te zien. Het idee is opgebouwd uit een combinatie van een bestaande stirlingmotor, waarbij aardwarmte als energiebron fungeert en

omgevingswater (circa 10 graden Celsius) als koude element. Deze combinatie leidt tot de opstelling in figuur 2. De cyclus die de motor aandrijft werkt als volgt. Bij 1 wordt warmwater opgepompt van grote diepte (ongeveer 3 tot 5km). Dit warme water stroomt vervolgens rondom de gasbuis bij 2 zodat het gas in de buis verwarmd wordt. Ondertussen beweegt de zuiger volgens het stirlingmotor principe en koelt het warme water af, door omgevingswater met een veel lagere temperatuur. Als het warme water uit de diepe ondergrond is afgekoeld stroomt het bij 3 terug de ondergrond in. Met de energie die het Stirling gemaal opwekt wordt water uit de polder weggepompt (Geertsma, 2013).

In figuur 2 is te zien dat het hele systeem ten behoeve van het oppompen van de aardwarmte een open systeem is waarbij de gebruikte aardwarmte wordt teruggeleid naar diepere aardlagen. In bijlage II onder hoofdstuk 4: *Boren naar geothermie* en hoofdstuk 5: *Gesteente soorten in Nederland* wordt beschreven hoe het water door daarvoor geschikte gesteentelagen heen beweegt.

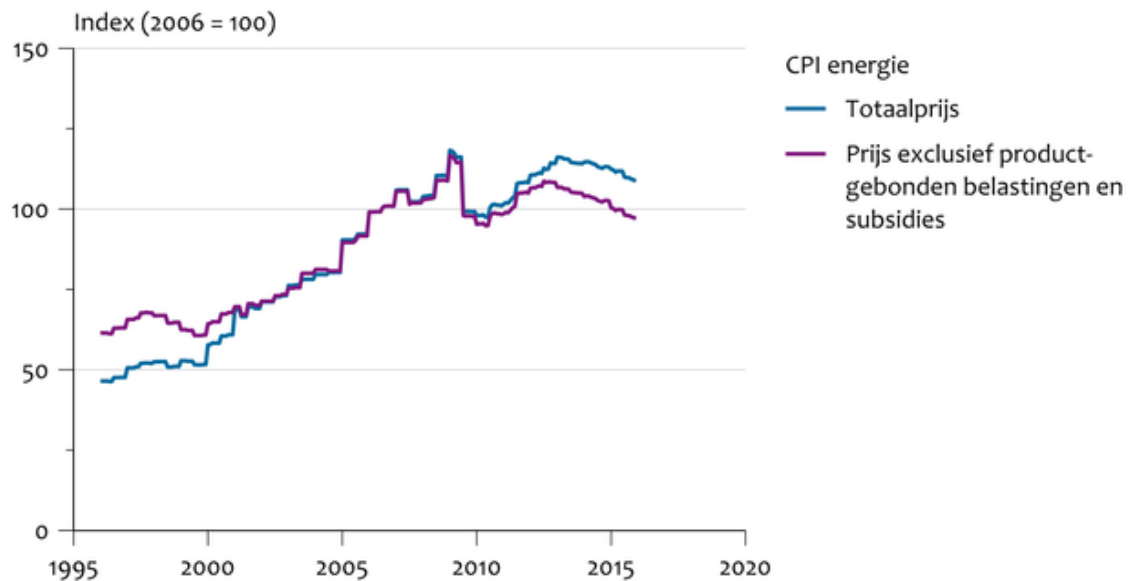
Het idee van een Stirling gemaal is bedacht om een alternatief te bieden voor bestaande gemalen en om te zorgen dat gemalen in de toekomst milieuvriendelijker en goedkoper zullen zijn. Het Stirling gemaal kan vele voordelen opleveren. Door deze manier van bemaling zijn geen fossiele brandstoffen nodig. Een aantal kansen/voordelen zijn hieronder uitgewerkt.

Energiekosten voor poldergemalen

In Nederland staan er duizenden gemalen die de polders droog moeten houden. Al deze gemalen bij elkaar hebben een enorm energieverbruik tot gevolg. Als voorbeeld kan het waterschap Zuiderzeeland worden genomen. Het waterschap Zuiderzeeland heeft op dit moment zeven grote poldergemalen draaiende die de Flevopolders droog moeten houden. Met deze zeven grote poldergemalen is het waterschap Zuiderzeeland de grootste energieverbruiker in Flevoland (Waterschap Zuiderzeeland, 2017).

De energie die wordt gebruikt voor het draaiende houden van gemalen komt voornamelijk uit elektriciteit. Elektriciteit is een vorm van energie waarbij de kostprijs jaarlijks sterk kan verschillen. Zo kan het ene jaar de energieprijs sterk toenemen en het andere jaar de energieprijs weer dalen. Dit blijkt uit de cijfers van het CLO (Compendium voor de leefomgeving):

Consumentenprijsindex (CPI) energie



Bron: CBS.

CBS/mei16
www.clo.nl/nl055408

Figuur 3 Percentuele consumentenprijsindex energie 1990-2016, (CLO, 2016)

In de grafiek van het CLO is een stijgend percentage van de consumentenprijsindex voor de energieprijzen te zien in een periode van 1995 tot ongeveer 2015. Dit laat zien dat er voor waterschappen een grote onzekerheid is in de kostprijs voor de bemaling in Nederland. Door deze onzekerheid kunnen de kosten voor de bemaling in sommige jaren duurder uitvallen. Bij het Stirling gemaal wordt geen gebruik gemaakt van elektriciteit maar van een duurzame energiebron. Aardwarmte is altijd aanwezig en daarom een zeer betrouwbare bron van energie. Een voordelig bijkomend effect is dat waterschappen geen rekening hoeven te houden met fluctuaties in de energieprijzen (CLO, 2016).

Verhoogde capaciteit benodigd voor gemalen door klimaatverandering

Naast een fluctuerende elektriciteitsprijs ondervindt bemaling ook invloed van klimaatverandering. Klimaatverandering kent meerdere effecten en gevolgen voor Nederland. Één hiervan is dat er door klimaatverandering in Nederland steeds meer regen in een kortere tijd valt. Het KNMI heeft berekend dat bij iedere graad opwarming de regenintensiteit met 12% toeneemt (KNMI, 2017). Het gevolg hiervan is dat er meer water moet worden weggepompt na een hevige regenbui. Naast neerslagtoename wordt door bodemdaling en zeespiegelstijging het hoogteverschil tussen rivieren, zee en polders ook steeds groter. Hierdoor ontstaat er een grotere zogenaamde kweldruk. Dit is een waterdrukverschil wat ontstaat door zwaartekracht, waardoor water zich in een evenwichtspositie wil begeven. Door een groter hoogteverschil zal er meer water ondergronds en in laag gelegen polders door dijken heen sijpelen. Al dit extra water zal ook weggepompt moeten worden om te zorgen dat een polder niet onderloopt. Een neveneffect in kustgebieden van kwelwater is, dat het kwelwater vaak zout is en daarmee veel economische schade kan veroorzaken aan landbouwgewassen. Als maatregel voor het zoute kwel wordt er gespoeld met zoet water, wat zorgt

voor meer bemaling. Onder invloed van klimaatverandering zullen de kosten van bemaling van polders in de komende 50 tot 100 jaar toenemen met 10% (Kok et al., 2008).

Door de gevolgen van klimaatverandering zullen waterschappen hun capaciteit voor bemaling dus moeten opschalen. De uitbreiding van de bestaande capaciteit zal leiden tot meer gemalen. Het Stirling gemaal kan hier een nieuw alternatief voor bieden. Dit alternatief is in staat om voor langere periodes stationair te kunnen draaien zonder dat daar elektriciteit voor nodig is. Kortom, een uitbreiding van het aantal gemalen in Nederland kan met het Stirling gemaal ten eerste duurzaam gebeuren en ten tweede zal het niet zorgen voor een stijging in bemalingkosten.

Duurzaamheidsambities Waterschappen

De waterschappen zijn als decentrale overheid met name de laatste jaren druk bezig met het verduurzamen van de waterschappen. De waterschappen in Nederland geven jaarlijks meer dan 2 miljard euro uit aan inkoop en aanbestedingen. Deze 2 miljard euro aan uitgaven worden volgens het zogenaamde MVI (maatschappelijk verantwoordt inkopen) principe gedaan. Dit moet resulteren in bijvoorbeeld meer hergebruik van materialen, innovatieontwikkelingen of een duurzamere inkoop van energie (UVW₁, 2017).

Om dit kracht bij te zetten zijn er de zogenaamde duurzaamheidsambities opgesteld. Deze moeten resulteren in een duurzamer energiebeleid. De duurzaamheidsambities luiden als volgt:

*De duurzaamheidsambities van de waterschappen **

- 30% energie-efficiënter en zuiniger werken tussen 2005 en 2020
- 40% zelfvoorzienend door eigen duurzame energieproductie in 2020
- 30% minder uitstoot van broeikasgas tussen 1990 en 2020
- 100% duurzame inkoop in 2015

**Bovenstaande punten zijn een direct citaat uit (UVW₂, 2014).*

Het idee van het Stirling gemaal kan een enorme bijdrage gaan leveren aan de duurzaamheidsambities van de waterschappen. Het Stirling gemaal zal een antwoord kunnen geven op de vraag hoe er 40% eigen opgewekte duurzame energie behaald kan worden. Daarnaast zal elke investering in een Stirling gemaal gaan conform het Maatschappelijk Verantwoord Inkopen principe.

Met het Stirling gemaal kan de doelstelling behaald worden om 30% minder CO₂ uit te stoten. In Nederland staan er in totaal ongeveer 5000 boezem en kleine gemalen die het land droog houden. Al deze gemalen samen gebruiken zo'n 500GWh aan elektriciteit (Eindehoven, 2014). Uitgaande van een energieprijz van 18 cent per kWh kost de energie voor bemaling de waterschappen €90 miljoen euro per jaar. Het opwekken van deze hoeveelheid energie resulteert in 177.777.776 kilogram CO₂ uitstoot per jaar (*eigen duurzame bronnen van het waterschap zijn niet meegenomen in de berekening*), (Milieucentraal, 2016). Als deze elektriciteit niet meer gebruikt zal worden voor het draaiende houden van de gemalen, kan er een enorme besparing komen in de energiekosten van gemalen. Daarnaast is er ook een aanzienlijke winst te behalen voor het milieu in de vorm van een CO₂-reductie.

Door het grote energieverbruik van de Waterschappen is er ook aandacht voor eigen duurzame energieproductie. Op dit moment wordt door de waterschappen met name gekeken naar bestaande

technieken voor het winnen van duurzame energie. Daarnaast zijn waterschappen betrokken bij investeringen in zon en windenergie en wordt er gekeken naar energiewinning uit andere bronnen. Het Stirling gemaal kan antwoord geven op de vraag hoe de duurzaamheidsambities van de waterschappen gehaald kunnen worden. Zo kan het Stirling gemaal zorgen voor meer eigen energieproductie en minder CO₂ uitstoot.

Haalbaarheidsstudie

Gemalen in Nederland hebben in de loop der tijd vele veranderingen doorstaan. Ooit begon het bemalen van polders met de welbekende windmolens, later werden dit stoomgemalen en uiteindelijk kwamen er gemalen draaiend op fossiele brandstoffen en elektriciteit. Met het Stirling gemaal kan er nu een volgende stap gezet worden in de transitie van bemaling in Nederland. Deze tijd wordt gekenmerkt door steeds meer verduurzaming. Overal in het Nederlandse landschap duiken windmolens en zonneparken op. Bij windmolens en zonneparken is alleen het probleem dat deze energiebronnen niet een constant vermogen leveren. In de nacht is er zonne-energie en op windstille dagen geen windenergie. Juist bij gemalen is het belangrijk om een constante toevoer te hebben van elektriciteit. Met het Stirling gemaal kunnen waterschappen in de toekomst versneld integreren in de zogenoemde groene revolutie. Dit alternatief voor bemaling in Nederland zorgt voor een energieneutraal gemaal, met de daarbij behorende voordelen. Aardwarmte is een stabiele duurzame energiebron die constant in dezelfde kracht aanwezig is. Waterschappen zullen geen last meer hebben van energieprijzen die kunnen fluctueren. Het Stirling gemaal kan resulteren in het meest betrouwbare gemaal, dat indien nodig dag en nacht kan pompen zonder dat dit resulteert in hoge kosten of milieuvervuiling.

Voor de toepassing van stirlingmotoren op gemalen is het principe erg geschikt, omdat gemalen vaak voor langere tijd eenzelfde toerental draaien. Het probleem is alleen dat er nog nooit een gemaal is gebouwd die werkt op een stirlingmotor. Het Stirling gemaal kan antwoord geven op veel problemen waar waterschappen momenteel en vooral in de toekomst mee te maken krijgen. Voor de verdere ontwikkeling en realisatie van het Stirling gemaal is er echter wel meer onderzoek nodig, omdat het een nog niet bestaand idee is. Er is in dit onderzoek gekeken naar de verdere haalbaarheid van het Stirling gemaal. Hierbij zal gelet worden op de technische haalbaarheid, de financiële haalbaarheid, het belang en de interesse van mogelijke stakeholders.

Probleemstelling

Het is onduidelijk of de realisatie van het Stirling gemaal zowel technisch als financieel haalbaar is en welke partijen interesse en belang hebben in de realisatie hiervan.

Doelstelling

Het onderzoek heeft een analyse opgeleverd waar zowel de technische als financiële haalbaarheid van de realisatie van het Stirling gemaal is beschreven en een overzicht van de partijen die interesse en belang hebben in de realisatie van het Stirling gemaal.

Onderzoeksvragen

Tijdens het uitvoeren van het afstudeeronderzoek vormen onderzoeksvragen een rode draad in de opbouw van het onderzoek en het uiteindelijke resultaat. Aan het eind van het onderzoek is antwoord gegeven op de hoofdonderzoeksvraag met behulp van deelvragen. In het volgende hoofdstuk is per onderzoeksvraag benoemd welke methoden hiervoor gebruikt zijn.

De hoofdonderzoeksvraag

Om de doelstelling te behalen is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

- Op welke wijze is de realisatie van het Stirling gemaal zowel technisch als financieel haalbaar en welke partijen hebben interesse en belang in de realisatie hiervan?

Deelvragen

Om antwoord te geven op de hoofdonderzoeksvraag is gebruik gemaakt van de volgende deelvragen:

- 1. Op welke wijze is de bouw van het Stirling gemaal technisch haalbaar?
- 2. Op welke wijze is de bouw van het Stirling gemaal financieel haalbaar?
- 3. Welke partijen zouden interesse en een belang kunnen hebben in de uitvoering van het Stirling gemaal?

2. Onderzoeksmethoden

In dit hoofdstuk zijn de onderzoeksmethoden van dit afstudeeronderzoek uitgewerkt.

2.1 Technische haalbaarheid:

Een belangrijk onderdeel van de haalbaarheidsstudie was om te kijken naar de technische haalbaarheid van het Stirling gemaal. Deze deelvraag was ontleed in de volgende facetten van de technische haalbaarheid:

Onderdeel	Data collectie	Data analyse	Reden
1. Werking van de Stirlingmotor	Middels filmpjes en demonstraties op internet is eerst het principe van de stirlingmotor verondersteld. Ook is gezocht naar artikelen op het internet en is gekeken naar wetenschappelijke fora waar vaak veel te vinden is over de werking van motoren.	Uit alle geraadpleegde bronnen is de werking van de stirlingmotor samengevat en verdeeld in 4 stappen, gelet op de bewegingen die een stirlingmotor maakt voor één ronde.	Om het Stirling gemaal ooit werkelijkheid te laten worden is het belangrijk om te kijken naar de opbouw en werking van de stirlingmotor. Door te snappen hoe een stirlingmotor in elkaar zit kan een begin worden gemaakt voor een later ontwerp van dit gemaal.
2. De ideale Stirling cycle	In het Internationaal Instituut voor Sociale Geschiedenis zijn boeken in te zien over de geschiedenis en opbouw van stirlingmotoren. Hierin wordt jarenlang onderzoek beschreven naar het rendement van de stirlingmotor.	Het hoofdstuk van de ideale stirling cycle is samengevat en puntsgewijs omschreven in het onderzoek.	Deze zogenaamde Stirling cycle vormt een richtlijn in de opbouw van een goed werkende stirlingmotor en verteld welke aspecten helpen om een stirlingmotor een hoger rendement laten halen.
3. Ontwikkeling van de stirlingmotor en bestaande voorbeelden	Naast de boeken in het internationaal instituut voor sociale geschiedenis is ook gekeken naar wetenschappelijke artikelen op het internet. Daarnaast is gezocht of er bedrijven zijn die zich bezighouden met het bouwen van stirlingmotoren.	Van alle gevonden voorbeelden, is gekeken naar degene waarvan de werking bewezen is en welk model het grootste vermogen heeft.	In het verleden zijn meerdere stirlingmotoren gebouwd die wat kunnen vertellen over het rendement van een stirlingmotor. Hier is ook gezocht naar eerder gebouwde typen stirlingmotoren die als referentie kunnen dienen voor het Stirling gemaal.
4. Vergroten vermogen stirlingmotor	Via wetenschappelijke fora is gekeken naar formules die de capaciteit kunnen vergroten van een stirlingmotor. Daarna is een berekening gemaakt die als voorbeeld dient.	Van alle formules en processen in de stirlingmotor is diegene gekozen die relatief eenvoudig kan zorgen voor een hoger rendement en berekend, waarbij gelet is op de meest grootte onderdelen zoals cilinders.	Tijdens vooronderzoek is al gebleken dat er geen stirlingmotor is gebouwd met capaciteit die grote gemaalpompen kan vervangen daarom is er gekeken hoe de capaciteit van bestaande motoren vergroot kan worden.
5. Gemalen in Nederland	Via internetbronnen en verslagen van waterschappen is gezocht naar de opbouw van gemalen in Nederland.	Eerst zijn de soorten gemalen samengevat en toen als voorbeeld is de Noordoostpolder uitgewerkt en berekend.	Het gemaal op zich zelf is een tweede belangrijk component van het Stirling gemaal. Daarom is onderzocht hoe gemalen in Nederland opgebouwd zijn.

Tabel 2 Omschrijving methoden technische haalbaarheid

2.2 Financiële haalbaarheid

Deze deelvraag is beantwoord door eerst te kijken naar welke aspecten van invloed zijn op de financiële haalbaarheid. Uit vooronderzoek is bekend geworden dat naast de kosten voor het Stirling gemaal ook veel kosten gemaakt zullen gaan worden met het aanboren van een geothermische bron. Per onderdeel is een kosteninschatting gemaakt. Tot slot is er gekeken naar de opbrengsten van een Stirling gemaal en kon een kosten-baten analyse opgesteld worden.

Ten eerste worden de methoden uitgewerkt van het vooronderzoek in Bijlage II:

Onderdeel	Data collectie	Data analyse	Reden
Geo-thermische bronnen in Nederland	Onderzoeksrapporten van TNO, TNO is de laatste jaren in opdracht van overheid flink bezig geweest met het uitzoeken van de manier van boren en tot welke diepte al geboord is.	In kaart gebracht hoeveel bronnen er reeds zijn uitgevoerd.	Geothermische bronnen in Nederland bestaan nog niet zo lang in Nederland, de ontwikkeling hiervan zal een rol gaan spelen in een belangrijk onderdeel van de kosten van de realisatie van het Stirling gemaal.
Duitsland	In de rapporten van TNO wordt vaak verwezen naar Duitsland. Hierbij gebruiken zij kennis die de Duitsers hebben opgedaan bij het uitvoeren van geothermische doubletboringen.	Werkwijze Duitsland gebruiken als referentie en inspiratie. Samenvatten wat het potentiaal ook in Nederland kan zijn.	Duitsland loopt voorop in Europa als gekeken wordt naar geothermische warmtewinning. De subsidies zijn dan ook een stuk hoger. Nederland kan veel leren over de technieken die de Duitsers gebruiken.
Kansen per Temperatuur gradiënt	Onderzoeksrapporten van TNO	Samenvatten welke methode per gradiënt de beste optie is naast een stirlingmotor om energie uit warmte te halen.	Uit onderzoek is gebleken dat elke methode van warmtegebruik voor energie gekoppeld is aan een bepaalde temperatuur. Voor het Stirling gemaal kan dan ook gekeken worden naar de beste kansen voor een hoog rendement uit boringen per temperatuurgradiënt.
Boren naar geothermie	Onderzoeksrapporten TNO en technieken uit de olie en gas industrie. Voorbeelden van een vermogensverwachtings curve voor een boring.	Bepalen wat de beste methode is om het potentiaal van een bron te bepalen, door stappen gas industrie te volgen.	De manier van boren zal de kosten gaan bepalen van een boring. Bij de olie en gas industrie is al veel kennis opgedaan over de meest efficiënte manier van boren op grotere diepte.
Gesteenste soorten in Nederland	Onderzoeksrapporten van TNO	In kaart brengen wat de beste gesteentelagen zijn t.b.v. geothermische energie.	In de rapporten van TNO is ook onderzoek gedaan naar welke gesteente het meest geschikt zijn voor geothermische winning. Met deze voorkennis kunnen bij voorbaat al gebieden aangewezen worden met een grote kans op een hoog rendement.
Kosten geothermische bron	Onderzoeken van kennis instituten en overheden naar de kosten van een geothermische doubletboring	Referenties vergelijken om zo een inschatting van kosten te kunnen weergeven.	Meerdere kennisinstituten hebben zich bezig gehouden met onderzoek naar de kosten van het aanboren van geothermie. Deze onderzoeken kunnen inzicht geven in de kosten, ook ten opzichte van andere duurzame energiebronnen.

Tabel 3 Methodes onderzoek uit Bijlage II

In de voorgaande tabel zijn de methoden omschreven van het vooronderzoek in Bijlage II. De kennis die is opgedaan in Bijlage II vormt een bijdrage aan het verdere onderzoek naar de kostenindicatie voor het realiseren van een Stirling gemaal. Met de informatie van het vooronderzoek is bekend geworden waar op gelet kan worden voor het uitvoeren van geothermische doubletboring om de kosten zo laag mogelijk te houden.

Onderdeel	Data collectie	Data analyse	Reden
Totale kosten Stirling gemaal	Kennis van experts en waterschappen over de kosten van overige onderdelen van een gemaal.	Alle informatie uit het onderzoek van bijlage II* bundelen tot een totaaloverzicht.	Naast de boring kosten de overige onderdelen van een gemaal ook geld. Voor het totaal plaatje mogen deze dan ook niet ontbreken.
Opbrengsten Stirling gemaal	Waterschappen ,milieuorganisaties en de EU	Analyseren wat de opbrengsten zijn uit elektriciteit door gebruik te maken van informatie van het waterschap. Hierbij is het gevonden stroomverbruik vermenigvuldigd met de stroomprijs. Daarnaast is berekend met behulp van een referentiemodel wat een CO ₂ reductie oplevert. Dit is gedaan door te kijken wat een ton CO ₂ in geld waard is en deze te vermenigvuldigen met het aantal ton CO ₂ wat niet meer uitgestoten wordt.	Om de opbrengsten te berekenen kan bij waterschappen gekeken worden naar het stroomverbruik. Met behulp van kennis van milieuorganisaties kan het stroomverbruik omgerekend worden naar geld en winst in CO ₂ reductie.
Kosten baten analyse	Alle eerdere gevonden informatie samengevat in een tabel	Alle informatie opsommen om zo een beeld te schetsen van de investering en terugverdien tijd middels berekeningen.	Hiermee kan een overzicht gemaakt worden voor alle kosten en baten van de investering voor een Stirling gemaal.

Tabel 4 Methoden financiële haalbaarheid

* Er is gekozen om de methoden van het vooronderzoek (Bijlage II) toch te noemen omdat het een wezenlijk onderdeel is van de kosten voor de realisatie van het Stirling gemaal.

2.3 Methoden om de stakeholders te onderzoeken

Voor de laatste deelvraag is een literatuuronderzoek gedaan naar de stakeholders en belanghebbende bij een realisatie van een Stirling gemaal. Voor deze deelvraag is gebruik gemaakt van een aantal criteria die bepalen welke stakeholders het meeste belang zullen hebben bij het Stirling gemaal. De criteria die gebruikt zijn om te komen tot de gevonden stakeholders zijn als volgt:

- Welke partij(en) zijn eigenaar van bestaande gemalen en zullen in de toekomst dan ook belanghebbende(n) zijn in een nieuw soort gemaal?
- Welke partij(en) zijn gemoeid met het financieren van een nieuw gemaal op zich en zullen ook bij een nieuw soort gemaal een bijdrage leveren aan in financiering?
- Welke overige partijen kunnen een bijdrage leveren in het verder ontwikkelen van het Stirling gemaal, of hebben een indirect belang bij de realisatie van een nieuw soort gemaal?

Onderdeel	Data collectie	Data analyse	Reden
Waterschappen	Beleid van waterschappen achterhaald middels informatie van Unie van Waterschappen	Uit het beleid zijn speerpunten gehaald en samengevat om de positie te bepalen van waterschappen ten opzichte van het Stirling gemaal.	Uit het beleid van de waterschappen is naar voren gekomen op welke wijze waterschappen een belang hebben bij de ontwikkeling van het Stirling gemaal.
Overheid	Beleid van overheid via website en organisaties die gaan over verdeling en evaluatie van subsidieregelingen	Het overheidsbeleid omtrent subsidies samenvatten om te analyseren wat de maximale subsidie kan zijn voor een Stirling gemaal. Hierbij is gekeken naar rekenvoorbeelden en wat de maximale subsidie bedraagt per project. Bepaald is, wat de maximale subsidie is voor het Stirling gemaal.	Het stimuleringsbeleid van de overheid voor duurzame ontwikkelingen middels subsidies kan een grote bijdragen leveren aan de financiering van het eerste Stirling gemaal.
Onderzoeks-instituten	Informatie zoeken op websites van bijvoorbeeld TNO	Samenvatten wat de rol van een onderzoeksinstituut is in de realisatie van een Stirling gemaal.	Erachter komen wat de waarde van een onderzoeksinstituut kan zijn in de verdere ontwikkeling van het Stirling gemaal.
Indirecte stakeholders	Gekeken bij soortgelijke projecten wat daar de stakeholders waren	Na onderzoek bij soortgelijke projecten gekeken naar welke stakeholders ook invloed kunnen hebben op de realisatie van het Stirling gemaal.	Om een breder gedragen plan voor een realisatie op te kunnen stellen in de toekomst om zo hindernissen of gemiste kansen te kunnen voorkomen.
Stakeholder inventarisatie	Via websites van vergelijkbare projecten en informatie van stakeholders zelf	Kijken wat de mogelijke belangen en rollen zijn per stakeholder.	Met deze informatie is gekeken of er stakeholders aan elkaar gekoppeld kunnen worden.
Samenwerking partijen	Op basis alle eerder gevonden informatie en informatie op sites stakeholders.	Analyse waarbij is gekeken naar mogelijkheden voor samenwerking tussen partijen op basis van belangen.	Hiermee is gekeken naar samenwerking van stakeholders in de toekomst om het proces in goede banen te leiden en kansen te creëren en niet mis te lopen.

Tabel 5 Methodes om stakeholders te inventariseren

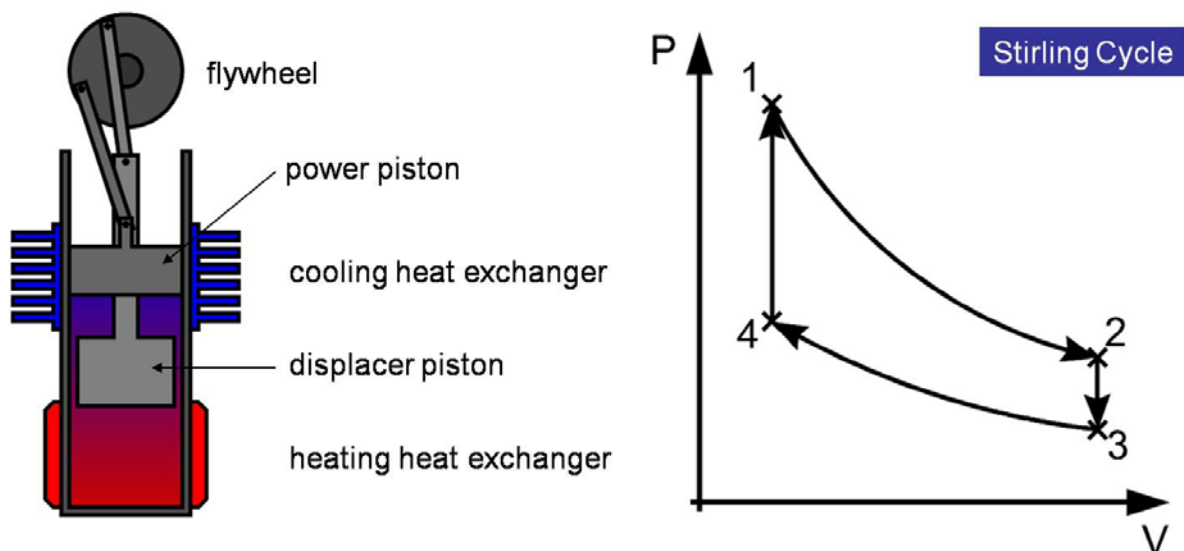
3. Resultaten

3.1 Technische haalbaarheid

Om antwoord te kunnen geven op de deelvraag: Op welke wijze is de bouw van het Stirling gemaal technisch haalbaar is er eerst gekeken naar de opbouw van een stirlingmotor die de aandrijving zal vormen van het gemaal. Eerder in het onderzoek is al verteld dat een stirlingmotor werkt op een temperatuursverschil. In dit hoofdstuk zal eerst worden gekeken naar hoe een stirlingmotor werkt, wat ideale omstandigheden zijn en de ontwikkeling van de stirlingmotor. Daarnaast zullen bestaande voorbeelden, de opbouw en de functie van gemalen in Nederland besproken worden. Tot slot wordt de combinatie van een stirlingmotor met een gemaal behandeld.

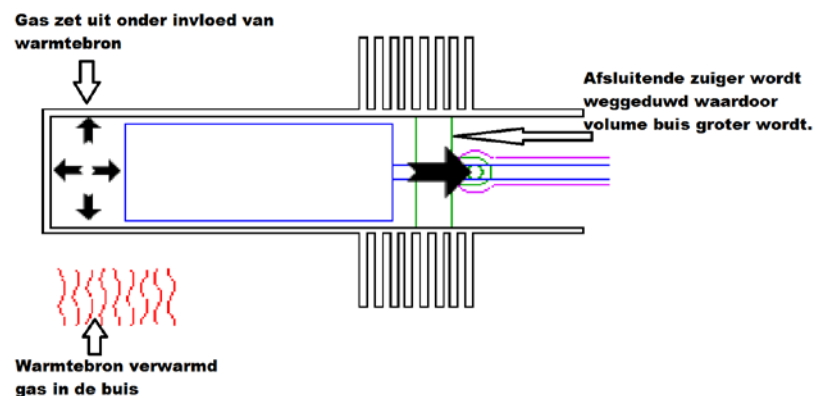
3.1.1 Werking stirlingmotor

Om de stirlingmotor aan te kunnen drijven is een warme en een koude zijde nodig. Daartussen bevindt zich de afsluitende zuiger met de verplaatser. De stirlingmotor werkt in de volgende volgorde:

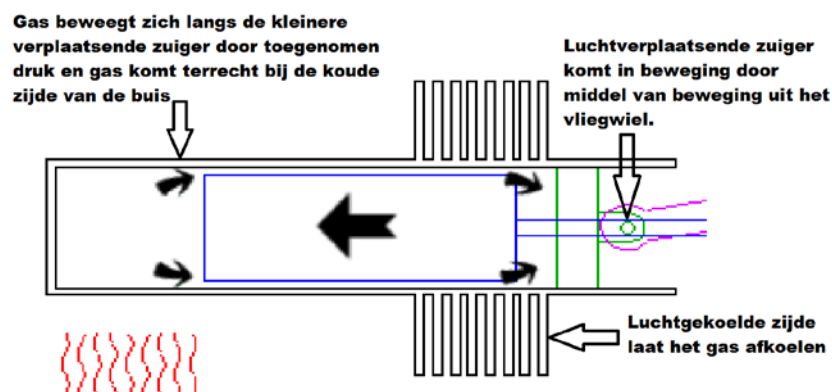


Figuur 4 Werking stirlingmotor (Sharma, 2011)

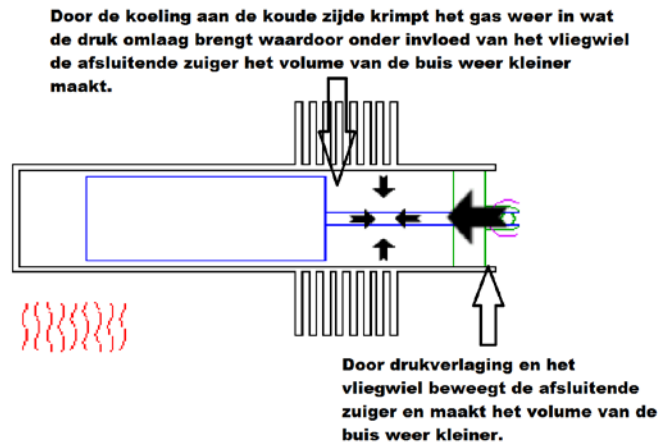
- Als eerste beweging wordt de luchtverplaatsende zuiger (blauw) zo opgesteld dat het meeste gas zich recht boven de warmtebron bevindt. Hierbij wordt het totale volume van de 'buis' zo klein mogelijk gemaakt door middel van een afsluitende zuiger. Door deze opstelling wordt de druk van het verhitte gas steeds groter. Als de druk hoog genoeg is dan wordt de luchtverplaatsende zuiger weggeduwd gevolgd door verplaatsing van de afsluitende zuiger. Beide zuigers zijn verbonden aan een vliegwiel. De functie van het vliegwiel is om tijdelijk energie op te slaan. Dit kan door middel van bewegende massa. Als bijvoorbeeld de hittebron plotseling verdwijnt dan zal de machine toch nog even doordraaien.



- Bij de tweede stap is de druk inmiddels zo hoog opgelopen dat er gas onder druk om de verplaatser heen gaat bewegen en zich langzaam meer zal gaan centreren naar het koude deel van de stirlingmotor. Het gas wordt door middel van de zuigerstang naar de andere zijde van de cilinder geleid. Door het verplaatsen van het gas naar de koude zijde zal de druk langzaam afnemen omdat het gas meer ruimte krijgt en aan de andere kant alvast begint met afkoelen.

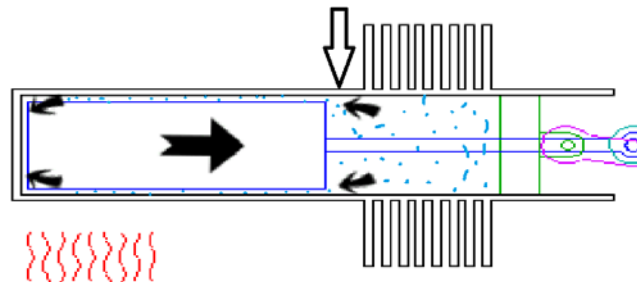


- Bij de derde stap koelt het gas af en ontstaat er een evenwichtsituatie in de motor. De druk is hierbij afgenomen tot atmosferische waarde. Zonder vliegwiel zal de motor nu stil komen te liggen. Maar dankzij het vliegwiel is er energie opgeslagen in de vorm van een bewegende massa. Deze energie komt weer vrij door de draaiende beweging van het vliegwiel en zorgt ervoor dat de afsluiter naar links beweegt en daarmee zorgt dat het volume van de buis kleiner wordt en er weer gas kan stromen naar het warme deel.



- Bij de laatste stap beweegt de afsluiter verder naar links waardoor er meer gas wordt gestuwd naar het warme deel en het totale volume in de buis afneemt. Er blijft een klein compartiment over, waardoor het gas snel kan opwarmen. Het gas zal zich hierna gaan verplaatsen onder invloed van de zuigerstang die verbonden is met het vliegwiel. Door de beweging van de zuigerstang wordt het volume voor het gas vergroot en neemt de druk ook verder toe. Hiermee is de cirkelbeweging van het vliegwiel rond en begint het proces weer vanaf stap 1 (Animatedengines, 2017).

Nadat al het gas is afgekoeld beweegt de luchtverplaatsende zuiger terug onder invloed van het vliegwiel en stroomt het koude gas terug naar de warme zijde waar het opnieuw verwarmt wordt om later weer uit te kunnen zetten.



3.1.2 Ideale Stirlingcycle

De stirlingmotor is een motor die in veel verschillende opstellingen uitgevoerd kan worden. Wel is er voor alle stirlingmotoren een zogenaamde ideale stirlingmotor cyclus. Volgens deze cyclus zal bij een stirlingmotor het hoogst mogelijke rendement behaald worden. Het doel van de ideale Stirling cyclus is om het rendement van de motor zo hoog mogelijk te laten zijn. Er wordt dan uitgegaan van de laagst haalbare weerstand waarbij bijna geen energie verloren gaat door weerstand in welke vorm dan ook.

Na jaren onderzoek is er een aantal criteria opgesteld die zorgen voor het hoogst haalbare rendement bij een stirlingmotor. Deze zijn onderverdeeld in de volgende zeven componenten (Clifford & Hargreaves, 1991):

1) De werkende substantie die wordt gebruikt om temperatuur over te dragen is een (perfect) gas. In de meeste gevallen blijkt dit ideale gas Helium te zijn. De reden hiervoor ligt in de lage dichtheid van Helium als gas. Door deze lage dichtheid is er een lagere weerstand, waardoor de motor een hoger rendement zal hebben tijdens het draaien.

2) Stromingsweerstand in overal nul, waarbij de druk in de motor gelijk is aan de buitendruk, (los van de druk in cilinders zelf).

3) Bij het overvloeien van gas uit de motor in de regenerator gaat er nul energie verloren. Hierbij wordt bedoeld dat op het moment dat de zuiger terug beweegt en het gas zou gaan afkoelen de restwarmte door een regenerator wordt opgevangen en terugvloeit naar het warme deel van de motor en andersom.

4) Nul energieverlies bij het transport van de warmtebron naar de motor.

5) Isothermische uitzetting en compressie is constant. Hier wordt mee bedoeld dat elke plek in de motor een constante temperatuur heeft. Het koude deel bijvoorbeeld constant 20 graden en het warme deel 600 graden. Het doel hiervan is dat de motor constant exact evenveel inkrimpt en uitzet.

6) Volume van de expansie en compressie ruimte lopen harmonisch gedurende een tijdseenheid sinusvormig. Er wordt bedoeld dat het volume van het warme en koude gedeelte van de motor in een sinusvormige curve worden gevuld, om zo een ideaal soepele beweging van de zuiger te genereren. Deze sinusvormige beweging is terug te vinden in een eerdere grafiek in dit hoofdstuk.

7) Mechanische frictie in de motor is nul.

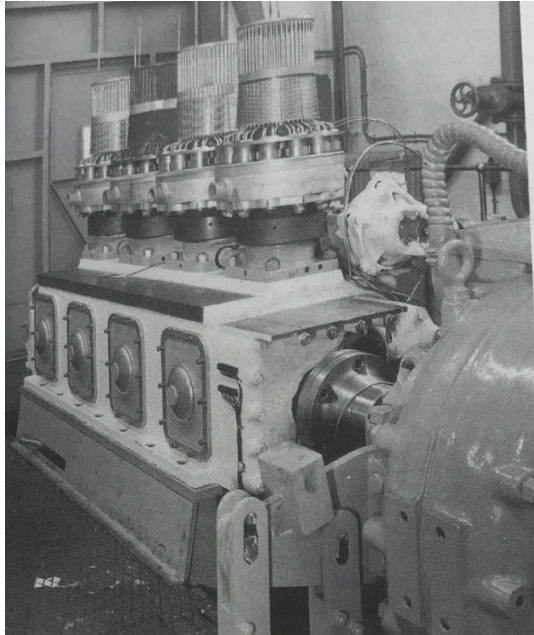
De cyclus heet niet voor niets een ideale cyclus omdat in elke motor wrijving en weerstand zal plaatsvinden. Daarbij komt dat er geen garantie gegeven kan worden voor een homogene temperatuur uit aardwarmte.

Bij het ontwikkelen van een stirlingmotor voor het Stirling gemaal kan er dus gelet worden om bovenstaande principes zoveel mogelijk te handhaven. Hiermee zal het rendement van de motor zo hoog mogelijk komen te liggen (Clifford, 1991).

Daarnaast zijn er de voordelen van een stirlingmotor (Clifford, 1991):

- Motoren starten onder alle condities
- Lange levensduur
- Motoren kunnen zonder problemen meer dan 100.000 uur aaneengesloten draaien
- Rendement is veel hoger dan bij de traditionele Ottomotor
- Temperatuur bij een stirlingmotor is veel lager dan bij een verbrandingsmotor: maximaal 700 graden Celsius bij een stirlingmotor tegenover 2000 graden Celsius bij een verbrandingsmotor. Een lagere temperatuur zorgt bijvoorbeeld voor minder NO_x emissie. Bij een normale dieselmotor wordt gemiddeld 400 tot 2000ppm uitgestoten tegenover 100 tot 200ppm bij een stirlingmotor.
- Brandstof wordt bij een atmosferische druk verbrand waardoor een hoger percentage van de brandstof daadwerkelijk wordt verbrand.

3.1.3 Ontwikkeling van de stirlingmotor en bestaande voorbeelden



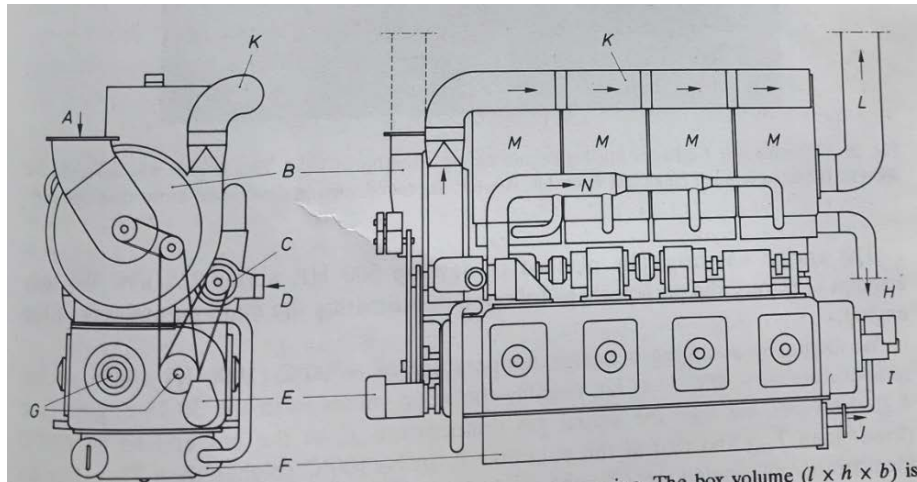
Figuur 5 Rhombic stirlingmotor (Clifford, 1991)

Na de uitvinding in 1818 is er tussen de periode van de tweede wereldoorlog en het begin van de jaren tachtig de stirlingmotor het meest in ontwikkeling geweest. Stirlingmotoren zijn ontwikkeld met verschillende uitgangspunten. De meest bekende uitvoering van de verschillende types is de thermomotor. In 1958 werd er door Philips een thermomotor ontwikkeld met een totale capaciteit van 300pk, wat resulteerde in een vermogen van 225kW. Dit vermogen werd gehaald met een veel groter temperatuurverschil dan die van het Stirling gemaal. Bij het Stirling gemaal op aardwarmte is een maximaal temperatuurverschil van 10 tot 140 graden Celsius. Bij de thermomotor die was ontwikkeld in 1958 was het verschil 30 tot 700 graden Celsius. Het temperatuurverschil (de energiebron) tussen beide motoren is bij het Stirling gemaal dus 130 graden

Celsius en bij de thermomotor was dit 670 graden Celsius (Clifford, 1991).

De thermomotor uit 1958 werd ook wel een Rhombic stirlingmotor genoemd, de bouw van de Rhombic had een maximaal vermogen van 300 tot 360 paardenkracht die in totaal 225 kW energie kon leveren bij een toerental van 1500 rpm. Dit is de stirlingmotor met het hoogste vermogen uit de 20^e eeuw. De motor op figuur 5 lijkt vrij groot, maar deze is in werkelijkheid niet heel groot en had een vermogen van 225kW. De afmetingen van de motor bedroeg 2235*1565*925mm. De grootte van de motor komt neer op een iets groter model dan een dieselmotor die nu nog in sommige gemalen wordt uitgevoerd (Clifford, 1991).

In figuur 6 is de technische opbouwtekening te zien van de Rhombic. In dit figuur is te zien dat de Rhombic is uitgerust met 4 cilinders (rond omgeving onderdeel M). Iedere cilinder heeft een vermogen van 75HP. Dit is omgerekend 55kW. De Rhombic bevat vier cilinders van 55kW wat samen zorgt voor netto 220kW (Clifford, 1991).



Figuur 6 Technische opbouw Rhombicmotor (Clifford, 1991)

3.1.4 Vergroten vermogen stirlingmotor

Om het vermogen van een stirlingmotor in de toekomst te vergroten kan er bijvoorbeeld worden gekeken naar schaalvergroting. De stirlingmotor draait op de expansie van gas in een bepaalde ruimte. Wanneer gas verwarmt wordt tot een bepaalde temperatuur zet het uit. Dit principe is terug te vinden in de algemene gaswet:

$$pV=nRT$$

Daarin zijn de grootheden:

- p de druk in Pascal (N/m²)
- V het volume in m³
- n de hoeveelheid gas in mol (= aantal moleculen gedeeld door de constante van Avogadro)
- R de gasconstante (8,314462 J·K⁻¹mol⁻¹)
- T de absolute temperatuur in Kelvin

Bron: (Natuurkunde, 2017)

Volgens deze wet is er altijd een verhouding tussen temperatuur (T) en druk (p) binnen een bepaalde afgesloten ruimte (V). Dit betekent dat als de temperatuur vergroot wordt, de druk evenredig meestijgt. Deze druk kan vervolgens weer gebruikt worden voor het aandrijven van een motor. Het verhogen van de temperatuur kan dus een manier zijn om het vermogen van de motor te verhogen.

Naast het verhogen van de temperatuur kunnen er uit de gaswet ook nog andere manieren gehaald worden om het vermogen te verhogen. Zo kan er ook voor gekozen worden om de hoeveelheid gas in mol (n) te vergroten zonder de cilinders daarbij te vergroten. Hierdoor krijgt het gas een hogere dichtheid. Door de grotere dichtheid van het gas wordt de druk in de motor opgevoerd en kan er meer vermogen behaald worden. Dit kan gedaan worden door het gas te comprimeren middels een compressor voordat het gas gebruikt wordt in de cilinders.

Table 3-4 Measurements of GPU-3 Engine Performance
by NASA-Lewis - Part I (79a)
Hydrogen Gas, 704C (1300F) Heater Gas Temperature,
15C (59F) Inlet Cooling Water Temperature

Pt	Mean Press		Engine SP		Ind. Power		Brake Power		Heat Input*		Brake Eff.*
	MPa	PSIa	HZ	RPM	KW	HP	KW	HP	KW	HP	
1	1.38	200	16.67	1000			0.39	0.52	2.46	3.30	15.6
2	1.38	200	25	1500			0.58	0.78	3.06	4.10	17.5
3	1.38	200	33.33	2000			0.71	0.55	3.69	4.95	18.1
4	1.38	200	41.67	2500			0.78	1.05	3.97	5.32	19.1
5	1.38	200	50	3000			0.82	1.10	4.51	6.05	17.2
6	1.38	200	58.33	3500			0.56	0.75	4.83	6.48	11.0
7	2.76	400	16.67	1000	1.57	2.1	1.13	1.52	4.47	6.0	24.4
8	2.76	400	25	1500	2.05	2.75	1.49	2.00	5.64	7.57	25.7
9	2.76	400	33.33	2000	2.57	3.45	1.95	2.62	7.08	9.50	27.2
10	2.76	400	41.67	2500	3.13	4.2	2.39	3.20	8.58	11.50	27.0
11	2.76	400	50	3000	3.47	4.65	2.61	3.50	9.88	13.25	25.7
12	2.76	400	58.33	3500	3.65	4.90	2.70	3.62	11.00	14.75	23.9
13	4.14	600	58.33	3500			4.47	6.0	16.18	21.70	27.0

*Based upon energy balance at cold end.

Figuur 7: Onderzoek NASA (Martini. W, 1985)

Het comprimeren van gas of het verhogen van de druk voor een hoger vermogen kent echter wel een maximum effect. Hiermee wordt bedoeld dat het rendement van de motor ook weer omlaag kan gaan als bijvoorbeeld de druk te hoog wordt opgevoerd. In figuur 7 is een tabel te zien van de NASA waarin effecten van veranderingen in de opstelling van een stirlingmotor is onderzocht. Bij de opstelling in figuur 7 is te zien dat er bij een druk van 2,76MPa het maximum rendement wordt bereikt van 27,2%. Middels verder onderzoek zal daarom gekeken moeten worden wat de juiste verhouding in de motoren van het Stirling gemaal zal moeten zijn (Martine. W, 1985).

Stel dat er een stirlingmotor gebouwd is met een cilindervolume van 0,2m³ (200liter) Helium gas. De cilinder staat onder druk van 30 bar (gelijk aan 3MPa) en heeft een temperatuur van 20 graden Celsius. Volgens de algemene gaswet ontstaat dan het volgende evenwicht:

$$30 \cdot 10^5 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 246 \cdot 8,31 \cdot 293$$

Als dit wordt vereenvoudigt naar $p \cdot V = (nR) \cdot T$ volgt:

$$30 \cdot 10^5 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 2044 \cdot 293$$

Stel dat de temperatuur nu wordt verhoogt naar 140 graden dan volgt:

$$? \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 2044 \cdot 413 > ? \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 844172$$

Dan is de druk toegenomen tot een waarde van 42,2*10⁵ dit leidt dan tot een procentuele toename van de druk in de motor met **40,7%**. Hierbij dient dan wel onderzoek gedaan te worden of er met een toename van de druk met 40,7% niet het maximale rendement is overschreden. Het maximale

rendement per motor is afhankelijk van de opbouw van een motor en dient daarom specifiek onderzocht te worden.

Aangezien druk onder de kracht van de expansie van gas de uiteindelijke aandrijving vormt bij een stirlingmotor, zal dit rekenvoorbeeld aan kunnen tonen dat middels temperatuurverhoging een hoger vermogen zal bereikt kan worden mits deze in de juiste verhouding wordt uitgevoerd. Voor de toekomst dient hier echter wel verder onderzoek naar gedaan te worden.

Een andere manier om het vermogen te vergroten is door meerdere stirlingmotoren in serie te gaan schakelen. Hierbij drijven meerdere stirlingmotoren dezelfde as aan waardoor het vermogen van meerdere stirlingmotoren bij elkaar opgeteld kan worden. Wel zal een deel van de energie verloren gaan waardoor er niet evenredig opgeteld kan worden. Bijvoorbeeld 5 motoren van 225 kW zal niet lijden tot 1125kW maar iets minder dan 1000kW door de extra weerstand. Deze techniek van serie schakelen van motoren komt voort uit de periode tussen de eerste en tweede wereldoorlog. Een



Figuur 8: Vliegtuigmotor met 18 cilinders (Airandspace, 2018).

voorbeeld van een serieschakeling is terug te vinden in vliegtuigen uit de tweede wereldoorlog. De Pratt & Whitney Double Wasp R-2800 CB16, 2-Row, Radial 18 Engine is een vliegtuigmotor met 18 cilinders die gezamenlijk een as aandrijven. Hierdoor wordt de as krachtiger aangedreven, wat weer voordelig is voor gemaal pompen. Tevens kan het toerental van de motor hierdoor hoger uitvallen (Airandspace, 2018). Door deze schakel techniek kon met deze vliegtuigmotor een maximaal vermogen bereikt worden van 3,400 hp (2,535 kW) (Aviation-history, 2015). Met verder onderzoek naar stirlingmotoren geschikt voor het Stirling gemaal wordt gemikt op een vermogen van ongeveer 1800kW per stirlingmotor. In het volgende hoofdstuk wordt hier

verder op ingegaan waarom gemikt wordt op 1800kW.

Verder kan er nog gekeken worden naar het vergroten van het volume van de cilinder zodat de oppervlakte van de zuiger ook groter kan worden en het rendement omhoog kan worden gebracht. Tot slot zal er nog gebruik gemaakt kunnen worden van een warmtewisselaar om de temperatuur van de aardwarmte hoger te laten worden voordat het bij de stirlingmotor aankomt. Ook hiervoor is extra onderzoek nodig om te kijken wat haalbaar is.

3.1.5 Gemalen in Nederland

Voor dit onderzoek is er uiteindelijk antwoord gegeven op de vraag of de stirlingmotor geschikt is om toe te passen op de Nederlandse gemalen. Daarom is er naast onderzoek naar de stirlingmotor zelf ook onderzoek nodig naar hoe gemalen momenteel zijn opgesteld en wat voor functie en specificaties deze gemalen betamen. In Nederland zijn er vele verschillende soorten gemalen, elk gemaal is gebouwd voor een bepaalde taak waarbij een geschat aantal draaiuren bijhoren. Daarnaast is de benodigde opvoerhoogte een belangrijke parameter om te bepalen wat het uiteindelijke vermogen moet zijn van pomp. Daarom wordt er eerst gekeken naar de verschillende soorten gemalen die in Nederland aanwezig zijn (STOWA, 2010).

- Boezemgemalen: deze gemalen dienen meestal om een groot achterliggend gebied droog te houden. Zo kan er bij een periode van hevige regenval in een keer het waterpeil in een groot gebied verlaagd worden om andere gemalen de kans te geven om door te gaan met lozen in de watergangen. Hierdoor hebben deze gemalen vaak een grote capaciteit en weinig draaiuren in een jaar. Boezemgemalen staan vaak aan zee in Nederland.
- Poldergemalen: deze gemalen lozen vaak op een boezem maar kunnen ook direct lozen op zee. Poldergemalen zijn bedoeld om het peil in een polder op gewenst niveau te houden. De capaciteit en draaiuren van een poldergemaal kunnen enorm verschillen van relatief klein tot heel groot. Dit is afhankelijk van de grootte van de polder en eventuele kwel in de achterliggende polder.
- Hoogwatergemalen: deze gemalen zijn meestal gelegen in de nabijheid van grote rivieren. Als de waterstand in een grote rivier erg hoog staat kan een hoogwatergemaal andere gemalen ondersteunen in de capaciteit. Dit is nodig vanwege een groter hoogteverschil. Het aantal draaiuren van een hoogwatergemaal is vaak laag en in sommige gevallen zelfs nul uur per jaar.
- Opvoergemalen: deze gemalen zijn meestal bedoeld voor iets hoger gelegen gebieden die in tijden van droogte extra water nodig hebben. Vaak gaat het om natuurgebieden waarbij beheerders natte natuur willen.
- Onderbemaling: deze gemalen zijn vaak geplaatst in zeer laag gelegen gebieden waarbij vaak ten behoeve van landbouw de waterstand extra verlaagd wordt. Dit heeft het doel om met name boeren de kans te geven te oogsten.
- Tot slot zijn er nog drie typen gemalen die meestal gebruikt worden in de verwerking van afvalwater. Dit zijn de transport, circulatie en doorspoelgemalen (STOWA, 2010).

Zoals benoemd wordt het benodigde vermogen bepaald voor een gemaal door het aantal draaiuren en het te verpompen debiet in m³. Daarnaast heeft de opvoerhoogte invloed op het benodigde vermogen. Als voorbeeld zal er worden gekeken naar de Noordoostpolder waar drie poldergemalen staan. Met deze vergelijking kan gekeken worden welk vermogen de stirlingmotor van het Stirling gemaal nodig hebben (STOWA, 2010).

Het merendeel van gemalen in Nederland draaien maar een beperkt aantal uren per jaar. Als voorbeeld wordt er gekeken naar drie grote gemalen van waterschap Zuiderzeeland, die samen het water op peil houden in de Noordoostpolder.

Gemaal	Capaciteit in m ³	Gem aantal draaiuren	Vermogen in kW
Buma	1800 (per minuut)	6500	$774 \cdot 3 = 2322$
Vissering	2320 (per minuut)	3500	$1110 \cdot 3 = 3330$
Smeenge	1200 (per minuut)	500	$600 \cdot 2 = 1200$

Bron: (Waterschap Zuiderzeeland, 2010)

Als er gekeken wordt naar de drie gemalen die samen de Noordoostpolder droog houden, kan er vanuit worden gegaan dat gemalen hier maximaal 270 en minimaal 21 dagen per jaar bemalen. Het peil in de Noordoostpolder wordt in twee zones onderverdeeld, een hoog en een laag peil. Het lage peil ligt hier op -5,7m NAP en beslaat het grootste gedeelte van de Noordoostpolder. Het hoge peil ligt op -4,5m NAP. Hiermee is de Noordoostpolder een van de laagst gelegen gebieden van Nederland en kan daarom goed dienen als referentie in dit onderzoek (Waterschap Zuiderzeeland, 2010).

De Noordoostpolder beslaat een gebied van 460,21km² (land) en heeft een inwoneraantal van 46.573. Stel dat de bemaling in dit gebied overgenomen zal worden door twee grote Stirling gemalen (Één voor het lage peil en Één voor het hoge peil) dan moeten deze gemalen gezamenlijk tenminste: $(2322 \cdot 6500) + (3330 \cdot 3500) + (1200 \cdot 500) = 27,3$ miljoen kWh moeten kunnen leveren op jaarbasis. Echter wordt er bij deze berekening vanuit gegaan dat de pompen elk draaiuur op maximaal vermogen draaien. Dit is echter zelden het geval, op basis van kennis van ervaring deskundige. Daarom wordt ervan uitgegaan dat het totale stroomverbruik in de realiteit ongeveer de helft zal zijn: 13,6 miljoen kWh per jaar. Op piekmomenten van het waterschap zal een vermogen benodigd zijn van 6852kW. Dit is dan wel voor een gebied ter grootte van de Noordoostpolder met de daarbij behorende zeer hoge opvoerhoogtes en hoge debieten.

Thermomotoren in het verleden met een Stirlingmotor principe zijn vaak op kleine schaal gebouwd en hebben een maximaal vermogen bereikt van 225kW. In een gemaal staan gemiddeld circa 3 pompen, dit komt op een totaal vermogen van 675kW. Hiermee komt het vermogen voor een Stirling gemaal ondermaats om een bestaand gemaal te vervangen. De bestaande stirlingmotoren van het type Rhomic in het Stirling gemaal zal ontoereikend zijn in het maximale vermogen als er gebruikt wordt gemaakt van bestaande stirlingmotoren.

Daarom zal er middels extra onderzoek eerst gezocht moeten worden naar manieren zoals eerder omschreven om het vermogen van stirlingmotoren te verhogen tot circa 1800kW. In de huidige opbouw en kennis van stirlingmotoren is het Stirling gemaal technisch niet haalbaar. Met verder onderzoek waarbij gelet kan worden op de benoemde mogelijkheden kan het beoogde vermogen wel behaald worden.

Een groot voordeel van geothermische energie is dat het dag en nacht, zeven dagen per week beschikbaar is. Gezien het lage aantal draaiuren van de meeste gemalen kan er als er energie wordt opgeslagen wel met groot gemak voldaan worden aan de behoeftes van de waterschappen. stirlingmotoren staan erom bekend over een langere tijd stationair te kunnen draaien.

3.2 Financiële haalbaarheid

Om te kijken of het Stirling gemaal haalbaar kan zijn, dient er naast de technische haalbaarheid ook gekeken te worden naar de financiële haalbaarheid. Vanwege het feit dat het een nieuwe uitvinding betreft zal het Stirling gemaal geen goedkoop alternatief zijn voor traditionele gemalen, maar wel een goede investering in de toekomst. Daarom is het belangrijk om te kijken wat naast de kosten van een nieuw soort gemaal ook de baten kunnen zijn op een langere termijn. Een belangrijk onderdeel van de kosten voor het werkend maken van een Stirling gemaal zullen die van het boren naar geothermische aardwarmte zijn.

3.2.1 Potentiaal en kosten geothermische doubletboring

Geothermische aardwarmte is de laatste jaren al flink in opkomst in Nederland maar blijft een relatief nieuwe bron van duurzame energie. Door TNO is afgelopen jaren al veel onderzoek gedaan naar de kansen van geothermische energie in Nederland. Hierbij wordt ook een samenwerking benoemd met de olie en gasindustrie, omdat deze tak van bedrijven al meer ervaring hebben in het boren naar grotere diepte. Het aantal diepe boringen in Nederland is terug te vinden in bijlage II onder 'geothermische bronnen in Nederland' (TNO, 2016).

Door meer onderzoek en samenwerking kunnen de kosten voor het boren naar geothermische energie flink verlaagd worden waarmee de realisatie van het Stirling gemaal ook meer in zicht komt. Hierbij kan gekeken worden naar:

- Geothermische bronnen in Duitsland (uitgewerkt in bijlage II 'Duitsland')
- Kansen per temperatuurgradiënt (uitgewerkt in bijlage II 'Kansen per temperatuurgradiënt')
- Werkwijze van geothermisch boren gecombineerd met methoden uit de olie en gasindustrie (uitgewerkt in bijlage II 'Boren naar geothermie')
- De meest geschikte gesteentelagen voor geothermische energie (uitgewerkt in bijlage II 'Gesteente soorten in Nederland')
- Kosten geothermische bron volgens verschillende experts en onderzoeken (uitgewerkt in bijlage II 'Kosten geothermische bron')

Met al deze informatie over alle aspecten die invloed hebben op de kosten van een geothermische doubletboring uit bijlage II, kan nu gekeken worden naar de totale kosten van geothermische doubletboring wat de pijler zal zijn bij de realisatie van het Stirling gemaal.

Aan de hand van de gevonden resultaten uit bijlage II kan er een samenvatting gemaakt worden voor de kosten van een geothermische doubletbron t.b.v. toepassing op Stirling gemaal:

Onderdeel	Reden	Kosten	Baten	Totaal
Onderzoek fase 1	Aanwijzen locatie aan de hand van bestaande geologische gegevens	€1000,00	€0,00	€1000,00
Onderzoek fase 2	Onderzoek proefboring	€10.000,00	€0,00	€10.000,00
Onderzoek fase 3	Ontwerpen boorkop en specifieke installatie	€30.000,00	€0,00	€30.000,00
Boringen (2x)	Uitvoeren boringen	€9.000.000,00	€0,00	€9.000.000,00
Geothermische installatie	Installatie bouwen voor pompen en omzetten aardwarmte naar energie (Volgens informatie tabel 5 bijlage II: onderzoek Paul Corzaan en Wageningen Universiteit)	€1.200.000,00	€0,00	€1.200.000,00
Ontgassingsinstallatie	Mogelijk aardgas zuiveren uit bronwater	€0,00	€0,00	€ 0,00
Aanleg warmtenet	Aanleg warmtenetwerk voor transporteren warmte	€20.000,00	€0,00	€20.000,00
Totale kosten:				€10.261.000,00

Tabel 6 Kosten geothermische doubletboring (Prijs in euro's)

*Op basis van een investering voor 30 jaar met een vermogen van 20MW geothermische energie (cijfers 20MW op basis van onderzoek TNO uit Bijlage II hoofdstuk 4 en project TRIAS Westland).

* Bij deze opsomming is gekozen om geen ontgassingsinstallatie te bouwen. De reden hiervoor is dat het erg onzeker is of er aardgas aanwezig is en zo ja hoeveel dit kan opleveren.

* Er zal geen uitgebreid warmtenetwerk worden aangelegd omdat de warmte direct naar het Stirling gemaal gepompt zal worden. De enige aansluiting zal plaatsvinden op 1 of meerdere gemalen.

3.2.2 Totale kosten Stirling gemaal

In voorgaande paragrafen is het aanleggen van een geothermische doublet boring met bijbehorende geothermische installatie besproken. Met deze gehele installatie is er dan voor 20MW aan vermogen geothermische energie beschikbaar in de vorm van heet water (circa 140 tot 170 graden). Nu zal er nog een aankoppeling gemaakt moeten worden op het te bouwen gebouw met daarin 5 stirlingmotoren van het type Rhombic. De kosten die hiervoor ooit door Philips gemaakt zijn, zijn helaas niet terug te halen. Daarom wordt er voor dit onderzoek een inschatting gemaakt. De kosten per Stirlingmotor worden geschat op 250.000 euro. Een gemaal met 5 stirlingmotoren zal dan neerkomen op een kostentotaal van 1.250.000 euro. Ervan uitgaande dat deze stirlingmotoren na verdere ontwikkeling en onderzoek gezamenlijk genoeg stroom leveren voor een totaal van 1800kW.

Ervaringsdeskundige Coen Postma van VOB Pomp uit Vinkeveen werkt al decennia aan het plaatsen van tijdelijke pompinstallaties. In kader van dit onderzoek is aan hem gevraagd wat de kosten zullen zijn voor het aanschaffen van een aantal pompen voor het te plaatsen gemaal. Uit zijn ervaring is naar voren gekomen dat een gemiddelde pomp met een relatief lage pompcapaciteit z'n 100.000 euro per pomp kost. Deze pompen zijn dan van het merk Hidrostal en hebben een capaciteit van 2200m³/h bij een opvoerhoogte van 15 meter waterkolom. Gemaal Smeenge in de

Noordoostpolder bestaat uit twee schroefpompen met een capaciteit van 2*600 m3 per minuut die aangedreven worden door twee elektromotoren met elk een vermogen van 600kW. De twee pompen van gemaal Smeenge kunnen dus 1200m3 per minuut verpompen waarvoor 1200kW aan energie benodigd is. Hierdoor zal een soortgelijke opstelling van pompen en de twee elektromotoren gebruikt gaan worden in het Stirling gemaal. De kosten hiervoor worden geschat op ongeveer 1 miljoen euro (Waterschap Zuiderzeeland, 2018).

Tot slot zal er een ombouw gemaakt moeten worden waarin alle machines geplaatst gaan worden. In dit gebouw komen dan 5 stirlingmotoren, een grote accu en een soortgelijke opstelling als in gemaal Smeenge. Daarnaast zullen er diverse aansluitingen gemaakt moeten worden op de geothermische doubletboring, watergangen en tal van besturinginstallaties. In Friesland wordt momenteel een nieuw gemaal neergezet die in zijn totaliteit 13 miljoen euro gaat kosten. Bij dit gemaal is alles inbegrepen. Om een schatting te geven hoeveel van deze 13 miljoen puur is voor het gebouw en besturingsinstallaties wordt uitgegaan van een bedrag van 3 miljoen euro (Wetterskip Fryslan, 2018).

Onderdeel	Reden	Kosten
Totaal geothermische doublet boring (20MW)	Aandrijvingsenergie van het Stirling gemaal	€ 10.261.000,00
5 Stirlingmotoren type Rhomic	Zet aardwarmte om in elektriciteit	€ 1.250.000,00
2 pompen en elektromotoren volgens principe gemaal Smeenge	Verpompt water	€ 1.000.000,00
Ombouw gemaal en besturingsinstallaties	Brengt alle onderdelen samen	€ 3.000.000,00
Totale kosten		€ 15.511.000,00

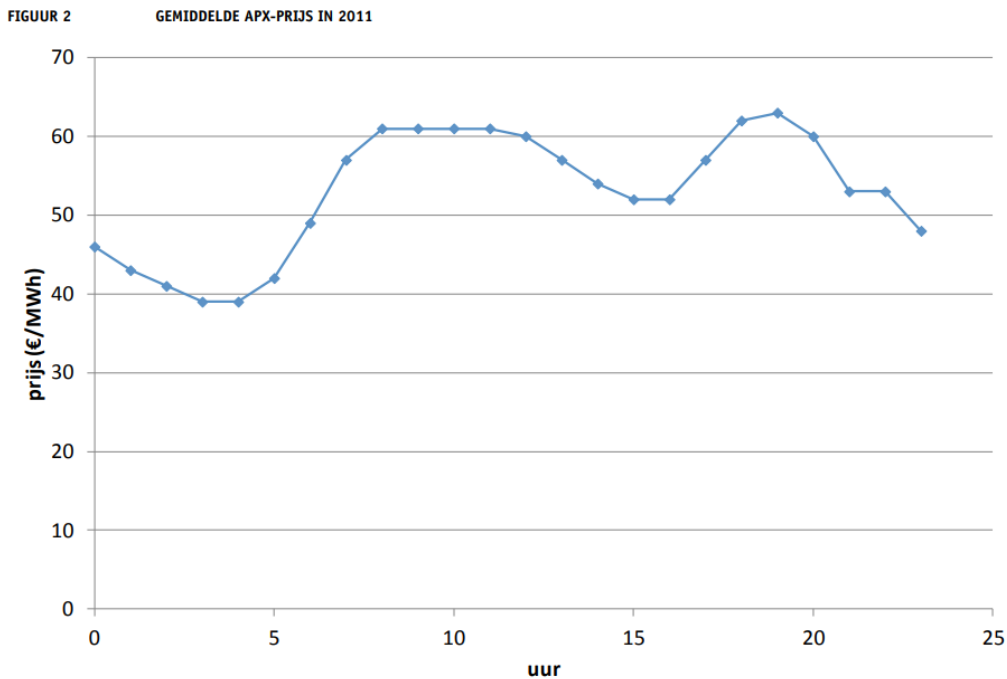
Tabel 7 Totale kosten bouw en ontwikkeling Stirling gemaal

3.2.3 Opbrengsten Stirling gemaal

Naast alle kosten die er gemaakt zullen worden voor de bouw van het Stirling gemaal zullen er na de bouw ook verschillende opbrengsten gegenereerd worden. Hierbij wordt vooral gekeken naar de besparing die er door het waterschap gemaakt kan worden in de reductie van stroomkosten en de vermeden uitstoot van CO² door het waterschap.

Opbrengsten uit winning elektriciteit:

De laatste jaren is de elektriciteitsmarkt aan het veranderen. Met name door het steeds meer één worden van Europa en het steeds groter wordende aanbod van groene stroom worden met name in West-Europa steeds meer elektriciteitsnetwerken op elkaar aangesloten. Naast het feit dat steeds meer gebieden worden verbonden wordt de prijs voor elektriciteit ook op Europees niveau verhandeld. In 1999 is hiervoor de APX-ENDEX beurs geopend in Amsterdam en ontstond uit een fusie van beurzen in Nederland, België en het Verenigd Koninkrijk. De afkorting staat voor: Amsterdam Power Exchange - European Energy Derivatives Exchange. Inmiddels telt de beurs 150 leden zoals nutsbedrijven en financiële instellingen uit meer dan 15 landen. Op de APX wordt er continu gehandeld in de prijs voor elektriciteit afhankelijk van vraag en aanbod. De prijs voor elektriciteit voor waterschappen wordt dus onder andere bepaald door de prijs op de APX. Deze prijs varieert gedurende de dag en kan hiermee sterk fluctueren. In onderstaande figuur is het verloop van de gemiddelde APX prijs te zien 2011 (APXgroup, 2018):



Figuur 9: Gemiddelde APX prijs in €/MWh in 24 uur in 2011 (STOWA, 2013)

De elektriciteitsprijs per MWh in 2018 fluctueert tussen de 30 en 70 euro per MWh (APXgroup, 2018).

De meeste waterschappen in Nederland hebben aparte contracten met leveranciers en netbeheerders van elektriciteit. Hierdoor is de prijs voor elektriciteit afhankelijk van het contract dat is afgesloten met de leverancier en netbeheerder. De prijs voor elektriciteit wordt bepaald aan de hand van factoren die voor ieder waterschap uniek zijn. De belangrijkste drie factoren die de prijs bepalen zijn:

- Gecontracteerd transportvermogen (circa 35%)
- Maximale piekbelasting (circa 20%)
- Verbruiksafhankelijke transportkosten (circa 45%)

Bron: (STOWA, 2013)

Naast deze factoren wordt de prijs voor elektriciteit aangevuld met belasting. De hoogte van belasting wordt bepaald door het totale elektriciteitsverbruik in kWh/per jaar. Hoe hoger het contractueel vastgelegde kWh/ per jaar hoe lager de belasting. Hiermee kan gesteld worden dat waterschappen met een grotere elektriciteitsafname minder energiebelasting betalen dan waterschappen met een relatief laag verbruikersaandeel. De hoogte van belasting wordt naar verbruikerstotaal ingedeeld in schijven:

Stroom per kWh	Excl. BTW	Incl. BTW
< 10.000 kWh	€ 0,1013	€ 0,1226
10.000 - 50.000 kWh	€ 0,0490	€ 0,0593
50.000 - 10 mln kWh	€ 0,0131	€ 0,0158

Figuur 10: Energiebelasting naar verbruik per uur (Energieleveranciers, 2018)

In de tabel is te zien dat naast de energiebelasting ook nog BTW betaald dient te worden over de verbruikte stroom. De BTW op energie is sinds 1 oktober 2012 verhoogd naar 21%. De meeste waterschappen vallen in de middelste categorie voor de energiebelasting. Inclusief BTW betalen waterschappen ongeveer 6 cent belasting per ingekochte kWh (Energieleveranciers, 2018).

Met het Stirling gemaal wordt voldoende elektriciteit opgewekt om het gemaal zelfvoorzienend te maken betreft het elektriciteitsverbruik. Dit zal al een behoorlijke besparing opleveren. Echter wekt het Stirling gemaal zoveel stroom op dat er een deel van de stroom terug kan worden geleverd aan het net. Daarom is het ook belangrijk om te kijken naar de verkoopprijs van duurzaam opgewekte energie. Hiervoor is in Nederland voor consumenten geregeld dat energiebedrijven verplicht zijn om tot een hoeveelheid van 5.000 kWh per jaar dezelfde prijs te rekenen als de inkoopprijs voor consumenten los van belasting, dit wordt salderen genoemd. Omdat waterschappen met een Stirling gemaal meer dan 5.000 kWh terugleveren aan het net valt dit onder een aparte regeling die is opgedeeld in twee delen. Ten eerste kan een partij wat duurzame energie opwekt en levert aan het net een lager belasting tarief krijgen wanneer zij toch elektriciteit moeten inkopen in bijvoorbeeld piekuren. Ten tweede kan een bedrag worden afgesproken met energieleveranciers voor het terugleveren van energie per kWh. Het bedrag wat hieruit komt wordt per partij bepaald en contractueel vastgelegd. Uit een onderzoek van STOWA zijn een aantal van deze afspraken bekend gemaakt (STOWA,2018) :

PRIJS TERUGLEVERING ELEKTRICITEIT (LEVERANCIERSDEEL, ANNO 2012)

Waterschap	Leverancier	Prijs teruglevering t.o.v. inkoop
Scheldestromen		100%
Waternet	Nuon	100%
Rivierenland	Nuon	100%
Schieland	HVC	n.v.t.
Rijn en IJssel	Delta	75%
Vallei en Veluwe	Nuon	100%
Hunze en Aa's	Delta	75%

Figuur 11: Prijs teruglevering elektriciteit t.o.v. inkoop (STOWA, 2018).

In figuur 11 is te zien dat waterschappen in de meeste gevallen evenveel geld krijgen voor terug geleverde elektriciteit als de inkoopprijs. Echter dient er wel rekening gehouden te worden met dat bij teruglevering geen verrekening plaatsvindt met de kosten van de netbeheerder. Hierdoor valt de verkoopprijs per kWh lager uit dan bij de inkoopprijs. Dit resulteert in het feit dat terug geleverde elektriciteit ongeveer 60% is van de inkoopprijs (STOWA, 2018).

Met de informatie over de prijs voor elektriciteit voor waterschappen kan nu gekeken worden naar de opbrengsten van eigen opgewekte energie bij het Stirling gemaal. De prijs voor elektriciteit voor waterschappen wordt gebaseerd op de volgende uitgangspunten en kunnen afwijken aan de hand van individuele contracten met energieleveranciers en netbeheerders.

- Energie belasting inclusief BTW: 6 eurocent
- Gemiddelde prijs per kWh wat wordt gerekend door energieleveranciers (afhankelijk van contract en prijs bepaald door koers APX-ENDEX: 5 cent
- Gemiddelde prijs netbeheerders voor kosten meetdiensten, vaste netwerkkosten en variabele netwerkkosten: ongeveer 30% van totaal prijs wat neer komt op 2 cent

Dit maakt een totale gemiddelde inkoopprijs van 13 cent per kWh.

Eerst wordt er gekeken naar de opbrengsten die volgen uit de besparing in de kosten voor elektriciteit. Ervan uitgaande dat deze stirlingmotoren gezamenlijk genoeg stroom leveren voor een totaal van 1800kW. Een deel van de energie kan doorverkocht worden in tijden dat de gemalen niet draaien. Aangezien de stirlingmotoren 24/7 kunnen draaien kan er een rekensom gemaakt worden voor de jaarlijkse opbrengst in stroom:

Vermogen 5 stirlingmotoren in beoogd kW * aantal uren in een jaar = totale hoeveelheid opgewekte elektriciteit in een jaar uitgedrukt in kWh

$1800 * 8760 = 15.8$ miljoen kWh > 1 kWh kost €0,13 euro > $15,8$ miljoen * 0,13 = €2.054.000 euro ofwel 2 miljoen euro.

Per jaar zullen in combinatie met geothermische energie en de stirlingmotoren voor meer dan 2 miljoen euro aan elektriciteit gegenereerd worden. Een deel van de elektriciteit zal gebruikt worden voor het aandrijven van de pompen in het gemaal.

Een klein deel van de opgewekte elektriciteit zal maar daadwerkelijk gebruikt gaan worden voor het aandrijven van het gemaal. In het hoofdstuk van de technische haalbaarheid is eerder al gebruik gemaakt van het tabel met hierin de draaiuren van de drie grote gemalen van de Noordoostpolder:

Gemaal	Capaciteit in m3	Gem. aantal draaiuren	Vermogen in kW
Buma	1800 (per minuut)	6500	$774 * 3 = 2322$
Vissering	2320 (per minuut)	3500	$1110 * 3 = 3330$
Smeenge	1200 (per minuut)	500	$600 * 2 = 1200$

Tabel 8 Vermogen en draaiuren gemalen in de Noordoostpolder, (Waterschap Zuiderzeeland, 2010).

Het grootste gemaal de Vissering heeft 3500 draaiuren gemiddeld per jaar. Als dit betrokken wordt op het Stirling gemaal volgt de volgende vergelijking:

vermogen (kW) * 3500 draaiuren = vermogen wat gebruikt wordt voor de aandrijving van de pompen uitgedrukt in kWh

$1800 * 3500 = 6,3$ miljoen kWh

$6,3$ miljoen * stroomprijs €0,13 = €819.000 euro

Bij het Stirling gemaal wordt op stroomkosten die bij een huidig gemaal (Vissering) gemaakt zullen worden €819.000 euro per jaar bespaard. Daarnaast is er jaarlijks een bedrag van 2 miljoen - €819.000 = 1,18 miljoen euro over om door te verkopen aan energiebehoeftige. Bij energie besparing wat niet van het net wordt afgenomen kan men 13 cent rekenen voor inkoopsprijs van energiebedrijven. Eerder is verondersteld dat de verkoopprijs van elektriciteit lager is bij teruglevering dan de inkoopprijs. Uiteindelijk zal de verkoopprijs neerkomen op ongeveer 6 cent.

De opbrengst van teruglevering resulteert in de volgende berekening:

	Inkoopprijs	Verkoopprijs
	13 cent	6 cent
Bedrag	€1,18 miljoen	€544.570

Per jaar wordt er €819.000 euro bespaard en wordt voor een bedrag van €544.570 terug verkocht. Hiermee wordt er per jaar €1.363.570 euro verdiend aan het Stirling gemaal.

Opbrengsten uit besparing CO₂

Naast de opbrengsten uit de winning van elektriciteit kan er ook een bedrag gehangen worden aan de reductie van CO₂-uitstoot. CO₂ is een broeikasgas wat een groot aandeel heeft in de opwarming van de aarde. Daarom is dit gas de laatste jaren meer in meer in opspraak geraakt en wordt meer geroepen om de uitstoot ervan te verminderen. In Nederland is reeds regelgeving die er op mikt dat bedrijven en huishoudens zo min mogelijk uitstoot genereren. Echter is het lastig om per inwoner of bedrijf te bepalen wat hun zogenaamde maximale ecologische voetafdruk mag zijn. Naast de Nederlandse overheid is met name de Europese Unie daarom bezig geweest met het opzetten van maatregelen om uitstoot van CO₂ in Europees verband te verminderen. De belangrijkste maatregel hierbij is dat er voor de Europese unie een Europese CO₂-emissiehandelssysteem is ingevoerd. Met dit systeem kunnen vervuilende bedrijven rechten opkopen om meer CO₂ te mogen uitstoten. Sinds de economische crisis is deze prijs helaas wat gedaald maar vanuit de EU wordt gemikt op een prijs van 30 euro per ton CO₂ (Klimaatplein, 2018).

Op de site van Milieucentraal is een verhouding te zien van het aantal kilowatt uur ten opzichte van de CO₂ uitstoot in kg. Een vaste verhouding hierbij is dat voor het opwekken van 4500 kilowatt uur aan elektriciteit doorgaans 1600 kg CO₂ wordt uitgestoten. Terugkomend op het voorbeeld van gemaal Vissering in de Noordoostpolder kan bepaald worden hoeveel CO₂ wordt uitgestoten om dit gemaal jaarlijks te laten draaien. Hiervoor moet eerst berekend worden hoeveel stroom dit gemaal verbruikt door het aantal draaiuren te vermenigvuldigen met het vermogen: 3330*3500=11,6 miljoen kWh als dit in de verhouding wordt geplaatst met een CO₂ berekeningstabel als die van Milieucentraal volgt deze tabel (Milieucentraal, 2016).:

Kilowatt uren	CO ₂ uitstoot in Kg
4.500	1.600
11.655.000	4.144.000

Tabel 9 CO₂ uitstoot voor gemaal Vissering

Vervolgens kan berekend worden hoeveel geld deze hoeveelheid CO₂ waard is in emissierechten door het aantal ton CO₂ te vermenigvuldigen met 30 euro>

4.144*30= €124.320,00 euro per jaar

Samen met de winst uit de elektriciteit besparing kan het Stirling gemaal jaarlijks>

€1,4 miljoen + €124.320,00 = circa €1,5 miljoen euro aan inkomsten genereren.

Tot slot kan er ook nog gekozen worden voor de verkoop van restwarmte, omdat bedragen hiervoor zeer specifiek zijn en afhankelijk van de restwarmte worden deze voor dit onderzoek niet verder uitgewerkt.

3.2.4 Kosten baten analyse

Met alle gevonden en berekende informatie kan nu een kosten en batenanalyse gemaakt worden:

-In het tabel zijn kosten aangeduid met een rode kleur en baten met een groene kleur.

Onderdeel	Reden	Kosten/Baten
Totaal geothermische doublet boring (20MW)	Aandrijvingsenergie van het Stirling gemaal	€ 10.261.000,00
5 Stirlingmotoren type Rhomic	Zet aardwarmte om in elektriciteit	€ 1.250.000,00
2 pompen en elektromotoren volgens principe gemaal Smeenge	Verpompt water	€ 1.000.000,00
Ombouw gemaal en besturingsinstallaties	Brengt alle onderdelen samen	€ 3.000.000,00
Totale kosten		€ 15.511.000,00
Energie besparing op jaarbasis	Energie wordt zelf opgewekt en hoeft niet ingekocht te worden	€819.000,00
Verkoop energie wat overblijft op jaarbasis	Het gemaal zelf zal maar een deel van elektriciteit gebruiken voor de aandrijving van de pompen	€544.570,00
Reductie in CO ² uitstoot uitgedrukt in vergelijking met Europese emissierechten op jaarbasis	Gemaal wordt 100% aangedreven door duurzame energie en reduceert daarmee volledig de uitstoot van een huidig gemaal	€124.320,00
Eventuele verkoop van gas uit ontgassingsinstallatie op jaarbasis <u>(optioneel)</u>	Mocht er gekozen worden voor een ontgassingsinstallatie dan kan er gekozen worden voor	€10.000,00
Verkoop restwarmte aan huishoudens en bedrijven per jaar	Als de aardwarmte afgekoeld is tot een bepaalde temperatuur zal deze niet meer bruikbaar zijn voor het opwekken van energie, wel kan deze dan doorverkocht worden. (deze optie is optioneel en dient verder uitgewerkt te worden)	€200.000,00
Totale opbrengsten na een jaar alle opties		€ 1.697.890,00
Totale opbrengsten na een jaar zoals nu opgesteld		€ 1.487.890,00
Terugverdien tijd investering zoals nu opgesteld: 15.511.000/1.487.890= 10,4 jaar		

Tabel 10 Kosten-baten analyse Stirling gemaal na een jaar

3.3 Partijen met interesse en belang bij de uitvoering van het Stirling gemaal

In het kader van de haalbaarheidsstudie naar het Stirling gemaal is het belangrijk om te kijken naar welke partijen in de toekomst interesse zouden hebben in het mede mogelijk maken en realiseren van het Stirling gemaal. Hierbij kunnen verschillende partijen op diverse manieren een belang of interesse uitoefenen op de realisatie van het Stirling gemaal. Voor dit onderzoek is er een selectie gemaakt van partijen die het meest van doen zullen krijgen met het uitvoeren en realiseren van de bouw van het Stirling gemaal. De selectie is gemaakt aan de hand van de volgende criteria:

- *Welke partij(en) zijn eigenaar van bestaande gemalen en zullen in de toekomst dan ook belanghebbende(n) zijn in een nieuw soort gemaal?*

Er is gekeken op internet naar bronnen die spraken over de eigenaren van gemalen in Nederland. Belangrijk hierbij is dat in veel bronnen, ofwel poldergemalen, ofwel rioolgemalen genoemd worden. Wat betreft rioolgemalen zijn de meeste in handen van de gemeenten in Nederland, ongeveer 13.000 stuks tegen slechts 2200 in beheer bij waterschappen (Pianoo, 2011). Rioolgemalen hebben meestal een lage capaciteit van circa 20 tot 50m³ water per uur. Hiermee zijn rioolgemalen niet relevant voor dit onderzoek en is gekeken naar poldergemalen. Poldergemalen zijn veelal in bezit van waterschappen en hebben een capaciteit tussen de 50 en 3500m³ per minuut. Als eigenaar van een nieuw Stirling gemaal is in dit onderzoek dan ook gekozen voor de Waterschappen als belangrijkste stakeholder (Pianoo, 2011).

- *Welke partij(en) zijn gemoeid met het financieren van een nieuw gemaal op zich en zullen ook bij een nieuw soort gemaal een bijdrage leveren aan de financiering?*

De financiering van een gemaal hangt meestal af van welke partij verantwoordelijk is voor een bepaald watergebied/gang. De beheerder van een watergebied is als verantwoordelijke ook vaak hoofdinvesteerder van een nieuw gemaal. Echter bij grotere gemalen wordt vaak een bijdrage geleverd vanuit de overheid. Dit kan zowel van het Rijk zelf zijn als van een provincie of gemeentebestuur. Daarnaast kan de overheid bij innovatieve gemalen een extra subsidie leveren. Wat betreft de financiering van een Stirling gemaal kan er gekeken worden naar waterschappen en de overheid. Naast waterschappen is de overheid dus ook meegenomen als belangrijke stakeholder in dit onderzoek. Naast betrokken bij de financiering is de overheid ook wetgever en handhaver van allerlei regels omtrent de bouw van een nieuw gemaal (Boerderij, 2012).

- *Welke overige partijen kunnen een bijdrage leveren in het verder ontwikkelen van het Stirling gemaal, of hebben een indirect belang bij de realisatie van een nieuw soort gemaal?*

Tot slot is er gekeken naar onderzoeksinstituten en universiteiten die een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het verder ontwikkelen van de techniek en uitwerking van het Stirling gemaal. Hierbij is TNO benoemd tot belangrijkste stakeholder gezien hun vele onderzoeken naar geothermische doubletboringen in Nederland en daarnaast hun grote onderzoekende capaciteit als groot onderzoeksinstituut. Daarnaast is Greenpeace meegenomen op basis van de beoogde milieuwinst van het Stirling gemaal. Tot slot is er gekeken naar de houding van mogelijke neven investeerders en omwonenden die een belang zullen hebben bij het realiseren van een dergelijk project.

3.3.1 Waterschappen

Zoals de naam van het haalbaarheidsonderzoek al aangeeft betreft het Stirling gemaal een nieuwe innovatie op het gebied van gemalen. In Nederland zijn gemalen voor het grootste gedeelte in handen van waterschappen. Daarnaast is een klein deel van de gemalen in handen van gemeenten en het rijk. Voor de haalbaarheid en realisatie van een nieuw soort gemaal kan dan ook vooral gekeken worden naar de waterschappen zelf. De waterschappen hebben in het algemeen een hoop duurzame ambities voor de toekomst. Hiervoor doen alle waterschappen gezamenlijk investeringen van zo'n 1344 miljoen euro. Maar liefst 47% van dit budget wordt geïnvesteerd in waterveiligheid en 27% in watersystemen. Met de Green Deal Energie van de waterschappen in 2016 is afgesproken om in 2020 100% energieneutraal te zijn. Hierbij is het de bedoeling dat 40% van deze duurzame energie zelf door de waterschappen worden opgewekt. Hiervoor zijn dus zeker investeringen nodig zoals het Stirling gemaal om deze doelen te behalen (Unie van Waterschappen, 2016).

Een belangrijk aspect van interesse voor een nieuw soort gemaal binnen de waterschappen ligt in de beoogde verduurzaming van gemalen in Nederland. Zoals eerder omschreven in de inleiding van dit onderzoek hebben de waterschappen zogenaamde duurzaamheidsambities opgesteld:

*De duurzaamheidsambities van de waterschappen **

- 30% energie-efficiënter en zuiniger werken tussen 2005 en 2020
- 40% zelfvoorzienend door eigen duurzame energieproductie in 2020
- 30% minder uitstoot van broeikasgas tussen 1990 en 2020
- 100% duurzame inkoop in 2015

**Bovenstaande punten zijn een direct citaat uit (UVW₂, 2014).*

Voor de realisatie van het Stirling gemaal zijn vooral de punten van minder broeikasgasuitstoot en eigen duurzame energie opwekking van toepassing. Het Stirling gemaal kan namelijk een of meerdere diesel of elektrisch aangedreven gemalen vervangen. Hierbij wordt, gelet op de duurzaamheidsambities gewerkt aan de eis om minder broeikasgas uit te stoten en om eigen energie op te wekken. Daarmee kan het idee interessant zijn voor waterschappen om verder uit te werken in de toekomst. Het overkoepelende orgaan van alle waterschappen, de Unie van Waterschappen heeft als doel gesteld om in 2025 volledige energieneutraliteit na te streven. Op dit moment stoten de waterschappen met al hun activiteiten samen 390 kiloton CO₂ uit. Dit staat gelijk aan de uitstoot van tenminste 57.000 huishoudens (UVW₃, 2018).

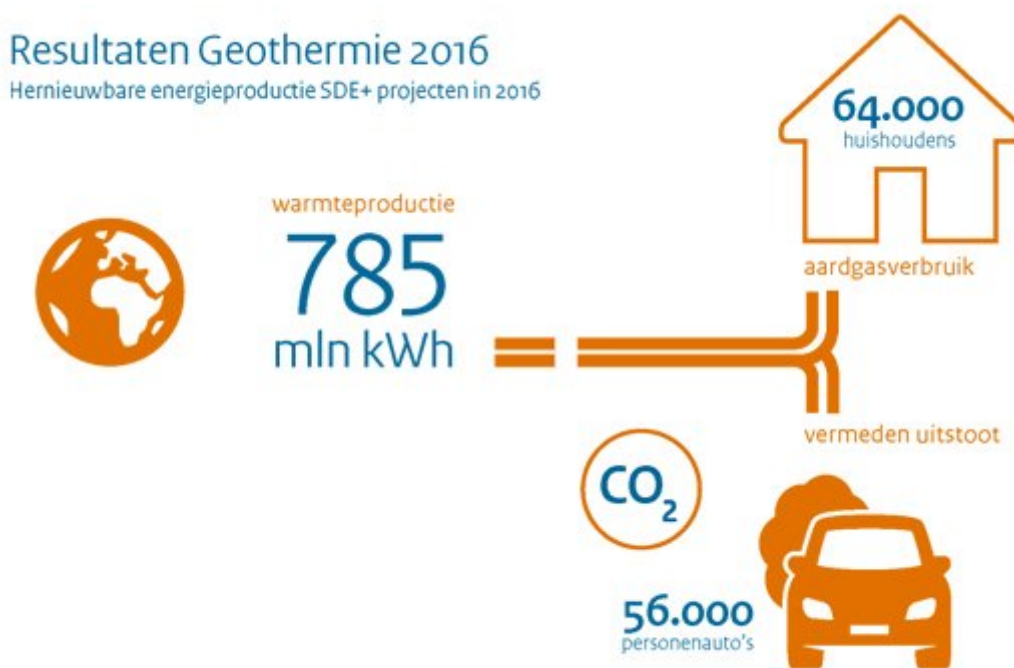
Naast het voldoen aan de duurzaamheidsambities kan het Stirling gemaal ook zorgen voor een gegarandeerde toestroom en werking van gemalen. Dit komt doordat aardwarmte altijd beschikbaar is en is daarmee als duurzame energiebron de meest constante ten opzichte van bijvoorbeeld zonne-energie of windenergie. Tot slot is een bijkomend voordeel voor waterschappen dat de energiekosten gedrukt worden en tevens niet plotseling kunnen stijgen onder invloed van externe factoren, zoals een olieprijs (UVW₂, 2018).

Mocht een waterschap kiezen voor de realisatie van een Stirling gemaal dan zal door het waterschap ook een groot gedeelte gefinancierd gaan worden. Hiermee is een waterschap naast een belanghebbende van een Stirling gemaal ook een investeerder.

3.3.2 Overheid

De Nederlandse overheid is sinds een aantal jaar actief bezig met het stimuleren van duurzame ontwikkelingen. Een belangrijk onderdeel van deze duurzame ontwikkelingen is de zogenaamde energietransitie. Dit houdt in dat Nederland langzaam maar zeker zal gaan van fossiele brandstoffen naar duurzame energiebronnen. Om dit mogelijk te maken is er naast de wetgeving die het gebruik van fossiele brandstoffen zal ontmoedigen een breed scala van subsidies opgezet die Nederland verder moet helpen in die zogenaamde energietransitie. Op het gebied van waterhuishouding houdt het ministerie van Economische zaken en Klimaat zich bezig met het faciliteren en beoordelen van nieuwe projecten die een bijdrage kunnen leveren aan de energietransitie. Dit doen zij met behulp van verschillende subsidieprogramma's: SDE+, SDE, OV-MEP en MEP (RVO, 2018).

Voor geothermie wordt vooral subsidie verleend vanuit het SDE+ programma. In 2016 werden vanuit deze regeling de volgende resultaten reeds behaald:



Figuur 7: Resultaten uit SDE+ gefinancierde projecten in 2016 (RVO, 2018).

De projecten die het ministerie hieruit financierde hadden vooral betrekking op het aanleggen van warmtepompen. Naast het financieren van warmtepompen voor huishoudens en bedrijven komt diepe geothermie wel steeds meer in beeld voor de SDE+ regeling. Om in aanmerking te komen voor een SDE+ subsidie moet een project, gebaseerd op geothermie voldoen aan een aantal criteria. Het belangrijkste criteria is dat er vooraf een berekening is gemaakt voor het nominale vermogen van de geothermische doublet. Hierbij is een eis opgesteld dat het vermogen wat wordt verwacht moet voldoen aan tenminste verwachting van PN50. Dit betekent dat met minimaal 50% zekerheid gezegd kan worden dat een bepaalde capaciteit uit een bron gehaald kan worden. Dit hele proces is eerder beschreven in het hoofdstuk over de technische haalbaarheid van het Stirling gemaal. Als hieraan voldaan is middels een onafhankelijk onderzoek dient ook voldaan te worden aan eisen die opgesteld zijn in de mijnbouwwet. Indien de aanvraag geaccordeerd wordt door de Rijksdienst voor ondernemend Nederland wordt de aanvraag onderverdeeld in een van de volgende categorieën:

- *Geothermie warmte met een diepte van minimaal 500 meter;*
- *Geothermie warmte met een diepte van minimaal 3.500 meter;*
- *Geothermie warmte met een diepte van minimaal 500 meter, waarbij voor één of beide putten van het doublet gebruik wordt gemaakt van bestaande olie- of gasputten;*
- *Geothermie warmte met een diepte van minimaal 500 meter, waarbij uitbreiding van een productie-installatie plaatsvindt met minimaal een extra put.*

Bron: (RVO, 2018)

In het geval van het Stirling gemaal zal er gebruik worden gemaakt van een nieuw aan te boren bron die een minimale diepte heeft van 2,5km. Gelet op de categorieën van de SDE+ regeling is het wellicht beter om 1000 meter dieper te boren om zo in een hogere subsidie klasse te vallen. Vanuit de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland is dan ook al een rekenvoorbeeld gemaakt hoeveel subsidie er ontvangen kan worden voor een project waarbij een Stirling gemaal aangedreven wordt geothermische aardwarmte. Hieronder is een berekening van het RVO te zien:

Maximum basisbedrag vanaf fase 1	5,7 €/kWh
Voorlopig correctiebedrag 2017	1,2 €/kWh
Voorlopige bijdrage SDE+ 2017 bij aanvraag vanaf fase 1 voor 5,7 €/kWh	$5,7 - 1,2 = 4,5 \text{ €/kWh} = 45 \text{ €/MWh}$
Maximum aantal subsidiabele vollasturen	7.000
Jaarproductie bij een installatie bestaande uit 1 doublet met een vermogen van 20 MW	$20 * 7.000 = 140.000 \text{ MWh}$
Voorlopige jaarlijkse bijdrage SDE+ 2017 bij aanvraag vanaf fase 1 voor 5,7 €/kWh	$45 * 140.000 = \text{€ } 6.300.000$

Figuur 8: Berekening SDE+ regeling voor geothermische doublet bron van 3500 meter diepte (RVO, 2018)

In bovenstaande berekening is te zien dat er een garantieprijs wordt gegeven door de overheid, waardoor duurzame energie opgewekt door geothermische warmte nooit voor een te hoge prijs verkocht moet worden. Tevens is in figuur 8 te zien dat er per project voor maximaal 6,3 miljoen euro aan subsidie kan worden toegekend.

Eerder is al benoemd dat er voor dit project gestreefd zal worden naar een geothermische doubletboring met een vermogen van 20MW. Voor een dergelijke opstelling kan dan gekeken worden naar de subsidieberekening zoals opgesteld door de Rijksdienst voor ondernemend Nederland. Een deel van de investering voor het aanleggen van de geothermische zal dan gedekt worden. Daarnaast kan de opgewekte energie per kWh met behulp van subsidie concurreren met energie welke middels fossiele brandstoffen is opgewekt (RVO, 2018).

Het ministerie van Economische zaken is hiermee een investeerder in een realisatie van het Stirling gemaal. Naast investeerders is er vanuit onder andere de Europese Unie in het energieakkoord vastgelegd dat Nederland moet voldoen aan de eis om in 2020 14% van het totale energieverbruik

uit hernieuwbare bronnen te laten komen. Het ministerie heeft dus ook de plicht en baat om bij te dragen aan de ontwikkeling van nieuwe vormen van duurzame energie. Verdere doelen vanuit het energieakkoord zijn om in 2023 16% van de energiebehoefte in Nederland uit hernieuwbare bronnen te laten komen (RVO, 2018).

3.3.3 Onderzoeksinstituten

Voor de verdere ontwikkeling van het Stirling gemaal en verdere implementatie van aardwarmte in gemalen is meer onderzoek nodig. De afgelopen jaren is er al veel onderzoek verricht naar de potentie van geothermische energie in Nederland. Verschillende onderzoeksinstituten zijn bezig om te onderzoeken op welke manier geothermische energie zo efficiënt mogelijk gebruikt kan worden met een zo hoog mogelijk rendement. Uiteindelijk is hierin dan ook de verwachting dat als er efficiënter wordt geboord en wordt gewonnen geothermische energie een duurzame energiebron zal worden waarvoor geen subsidie meer nodig is. Een belangrijke speler in onderzoek naar het gebruik van geothermische warmte in Nederland is TNO. Dit onderzoeksinstituut heeft al veel onderzoek verricht en probeert momenteel om bestaande technieken uit de olie- en gasindustrie te koppelen met de winning van geothermische energie. Naast onderzoek van onder andere TNO naar diepere aardwarmte is het belangrijk meer onderzoek te doen naar de verdere implementatie van deze gewonnen warmte. Nu wordt de warmte met name gebruikt met het doel verwarmen van kassen, bedrijventerreinen of nieuwe woonwijken (TNO₂, 2018).

Voor de toekomst zal meer onderzoek nodig zijn om ook te kijken naar andere toepassingen van aardwarmte in de Nederlandse energiecycclus. Het Stirling gemaal is hier een goed voorbeeld van. In tegenstelling tot het gebruik van geothermische energie als directe verwarming, wordt met het Stirling gemaal warmte omgezet in elektriciteit. Voor het omzetten naar elektriciteit zijn meerdere technieken mogelijk, zoals benoemd in dit onderzoek bij de financiële haalbaarheid.

Onderzoeksinstituten zouden zich kunnen richten op de verdere techniek van thermo-motoren, zoals de Rhombic die bij het Stirling gemaal gebruikt zal gaan worden.

Onderzoeksinstituten zijn dan ook een belangrijke stakeholder in de verdere ontwikkeling en realisatie van het Stirling gemaal.

3.3.4 Indirecte stakeholders.

Het poldermodel behoort tegenwoordig als vast onderdeel van de Nederlandse politiek. Hierbij worden alle partijen betrokken om vooraf een project samen te denken over wensen en kansen van een project. In een klein vol land, kan het soms lastig zijn grote projecten van de grond te krijgen zonder hierbij een overlapping te hebben met belangen van gemeenten, omwonenden, milieuorganisaties of andere partijen. Daarom zal het belangrijk zijn om bij de uitvoering van het Stirling gemaal in kaart te brengen welke overige partijen een belang kunnen hebben bij de ontwikkeling en bouw van het Stirling gemaal. Een aantal mogelijke indirecte stakeholders worden hieronder omschreven:

- **Omwonenden:** bij de aanleg van een geothermische doublet boring worden twee strengen van een aantal kilometer lang in de grond geboord. Het boren zelf zal waarschijnlijk geen grote trillingen of andere nadelige effecten met zich teweeg brengen. Toch blijft ook de winning van geothermische energie een mijnactiviteit. Het valt tenslotte onder de mijnbouwwet. Het grote verschil met bijvoorbeeld de winning van gas, is dat er bij de winning van geothermische energie niks definitief uit de grond wordt gehaald. Hierdoor is de kans op aardbevingen als gevolg van verzakkingen in de

ondergrond dan ook een stuk minder dan bij de klassieke mijnbouw. Tot nu toe zijn er slechts enkele voorbeelden van aardbevingen als gevolg van boringen naar geothermie. Zo is er een aantal jaar geleden in Basel, Zwitserland een aardwarmte project stilgelegd na het voelen van een aardshok met een kracht van 2,87 op de schaal van Richter (Milieudefensie, 2007). In Duitsland is er een keer een project stilgelegd na de winning van aardwarmte als gevolg van het ontstaan van verzakkingen en scheuren aan huizen. Echter bleek in dit geval dat het een gevolg was van een speciaal soort gesteente wat beïnvloedbaar was voor de stroming van aquiferen, waarbij het gesteente zich dan volzuigt met water. Bij het volzuigen zet het gesteente dan uit richting het oppervlak en heeft daarbij huizen ‘omhoog geduwd’. Naast deze voorbeelden zijn er in Europa geen verdere voorbeelden van aardbevingen of verzakkingen als gevolg van de winning van aardwarmte (Milieudefensie, 2007).

- **Milieubewegingen:** Het ontwikkelen en realiseren van het Stirling gemaal zal een duurzame uitvinding en vervanging kunnen worden van de oorspronkelijke gemalen in Nederland. De bedoeling van het Stirling gemaal is om in ieder geval CO² neutraal te zijn. Als huidige gemalen worden vervangen door Stirling gemalen dan zal een flinke reductie teweeg gebracht kunnen worden in de CO² uitstoot van waterschappen. Met deze gedachte is het Stirling gemaal ook interessant voor milieuorganisaties. Milieuorganisaties zoals bijvoorbeeld, Greenpeace en Milieudefensie kunnen invloed hebben op beslissingen over subsidietoekenning of over een besluit van de gemeente om een project in hun gemeente goed te keuren. Daarom is het van belang om ervoor te zorgen dat deze organisaties vroegtijdig betrokken worden in de realisatie van een project. Milieuorganisaties kunnen hulp bieden bij projecten. Greenpeace is een voorbeeld hiervan. Greenpeace heeft eigen wetenschappers in dienst en kan bereid gevonden worden om te helpen in verder onderzoek naar de uitvoering of verbetering van een project. Daarnaast heeft Greenpeace een groot netwerk, waarmee ze een lobby kunnen bieden voor een project wat verduurzaming in het vaandel heeft. Tot slot kunnen milieuorganisaties hulp bieden bij het aanvragen van subsidies en het opzetten van benodigde rapporten voor het realiseren van een project (Greenpeace, 2018).

3.3.5 Stakeholder inventarisatie:

Stakeholder	Waterschappen	Overheid	Onderzoeksinstituten, (TNO)	Omwonende	Milieuorganisaties Greenpeace	Investeerder / ontwikkelaar
Belang	Het behalen van de opgestelde duurzaamheidsambities, continu prijs elektriciteit	Behalen doelen uit energieakkoord	Uitvoeren gedegen onderzoek, als taak van bestaan	Zorgen voor beperking in eventuele overlast werkzaamheden	Verduurzaming van gemalen in Nederland om milieutechnische winst te behalen	Rendement behalen uit een duurzame investering
Motivatie	Boetedoening bij niet behalen duurzaamheidsambities	Boetedoening bij niet behalen energieakkoord door EU en kiezers	Naamsbekendheid van instituut vergroten en hoog houden	Woonplezier waarborgen	Nastreven van eigen doelen uit organisatie en vergroten bekendheid	Geld op maatschappelijk verantwoorde manier beleggen
Houding	Betrokken houding in uitvoering en uiteindelijke eigenaar van Stirling gemaal	Betrokken rol in financiering en regelgeving	Informatieve rol bij het helpen ontwikkelen en onderzoeken van efficiëntie van Stirling gemaal	Beschermende rol in het waarborgen van eigen woongenot	Beschermende rol in het nastreven van eigen doelstellingen gericht op milieu en	In het oog van een maatschappelijk kader op zoek naar verantwoorde projecten

					verduurzaming	
Efficiëntie/ macht	Grootste investeerder en eigenaar eindproduct	Keurt subsidie goed en geeft vergunningen af voor realisatie projecten	Kan invloed uitoefenen door kennis af te staan	Kan bij ontevredenheid project blokkeren of langdurig vertragen	Kan project vertragen of blokkeren, maar kan ook hulp bieden bij onderzoek en lobby voor Stirling gemeaal	Zal weinig invloed uitoefenen maar kan van grote waarde zijn bij financiering
Mandaat	Uitvoerder en opdrachtgever	Wetgever en financiering	Kennisgever, kan imago project positief of negatief beoordelen	Burgerrechten	Groot netwerk kan project positief of negatief beïnvloeden	Project kan zonder financiering stuklopen
Rol	Eigenaar uitvoerder en opdrachtgever	Financiering, objectief	Kennisgever, objectief	Bescherming rechten, subjectief	Bescherming, subjectief	Financieel winsttoegmerk

Tabel 11 Stakeholder inventarisatie voor uitvoering en ontwikkeling van Stirling gemeaal

3.3.6 Samenwerking partijen bij verdere ontwikkeling en realisatie Stirling gemeaal

Nu bekend is welke partijen een rol en belang kunnen hebben in het realiseren van het Stirling gemeaal, kan worden geanalyseerd of er overeenkomsten zijn in het belang bij een verdere ontwikkeling en uitwerking van het Stirling gemeaal.

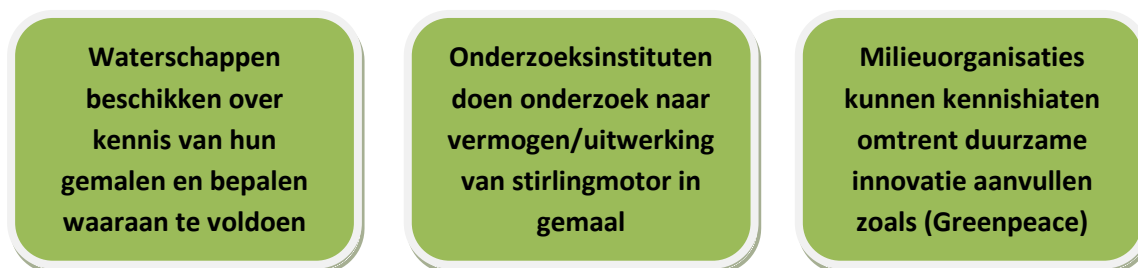
Financieel gemeenschappelijk belang:

Waterschappen zijn als beheerders van gemalen zowel verantwoordelijk voor waterveiligheid als eigenaar van gemalen. Met hun eigen opgestelde duurzaamheidsambities zullen de waterschappen hun gemalen in de toekomst deel moeten laten maken van deze verduurzaming. Hiermee worden de waterschappen investeerders in het Stirling gemeaal. Dit kan in de toekomst in samenspraak met de overheid op financieel gebied middels de subsidieregelingen. Tot slot kunnen overige investeerders een aandeel nemen in de realisatie van het Stirling gemeaal. Hieruit volgt het gemeenschappelijk financiële belang van deze drie partijen die kunnen leiden tot een financieringsconstructie van een Stirling gemeaal:



Technisch gemeenschappelijk belang:

Voor de verdere uitwerking van het Stirling gemeaal zal er op het gebied van innovatie nog een aantal aspecten van het gemeaal verder uitgewerkt en onderzocht moeten worden. Diverse partijen kunnen hieraan bijdragen en een rol in spelen. Uit de stakeholder inventarisatie is daarom gekeken welke partijen hierin samen kunnen werken om tot een eindontwerp te komen:



+

+

Het zal in de toekomst belangrijk zijn het Stirling gemaal een breed gedragen idee te laten worden dat onder invloed staat van meerder stakeholders. De overheid zal hierin de leiding kunnen nemen, om partijen aan elkaar te koppelen en waar nodig te ondersteunen.

Conclusie

In dit afstudeeronderzoek is gekeken naar de haalbaarheid van het Stirling gemaal. In de eerste deelvraag is daarbij antwoord gegeven op de vraag of het Stirling gemaal technisch haalbaar is.

Vanuit alle verschillende type stirlingmotoren is er in dit onderzoek gekozen voor de Rhombic stirlingmotor, vanwege zijn bewezen werking en hoog vermogen van 225 kW bij een toerental van 1500rpm. Gemalen in Nederland hebben echter per pomp een groter vermogen dan die van een Rhombic stirlingmotor, daarom zal er een aanpassing nodig zijn in het ontwerp van de Rhombic stirlingmotor. Hiervoor kan verder onderzoek gedaan worden op basis van principes uit de gaswet door bijvoorbeeld het aantal mol heliumgas te verhogen of door de temperatuur te verhogen. Tevens kan er gekeken worden naar het koppelen van meerdere stirlingmotoren middels een ster opstelling zoals bijvoorbeeld gedaan wordt bij vliegtuigmotoren. Immers is de bedoeling dat het Stirling gemaal in staat is een bestaand gemaal te evenaren en daarmee te kunnen vervangen. Door middel van verder onderzoek kan er naar een vermogen gestreefd worden van circa 1800kW. Met dit vermogen kunnen namelijk een groot deel van de gemalen in Nederland vervangen worden. Met de huidige opstelling van de Rhombic stirlingmotor is het Stirling gemaal technisch niet haalbaar en zal verder onderzocht moeten worden.

De tweede deelvraag in het onderzoek betreft de financiële haalbaarheid van het Stirling gemaal. Uit het onderzoek is gebleken dat ruim 60% deel van de kosten voor het realiseren van het Stirling gemaal zal bestaan uit het maken van een geothermische doubletboring. In het Triasgesteente of het Dinantien is de kans het grootst dat een boring van minstens 2500 meter slaagt en een hoog vermogen oplevert van 20MW aan warmte-energie. De totale kosten van een Stirling gemaal worden ingeschat op 15,5 miljoen euro. Echter staat hier tegenover dat er per jaar potentieel 1,5 miljoen euro per Stirling gemaal met eigen geothermische bron opgebracht kan worden uit het wegvallen van energiekosten en zelfs de verkoop van elektriciteit wat over blijft. Hiermee zal een Stirling gemaal in 10,4 jaar tijd terug verdiend kunnen worden en is het Stirling gemaal ondanks een grote investering financieel haalbaar. Als een geothermische bron minder vermogen levert dan 20MW dan is het Stirling gemaal zonder subsidie niet financieel haalbaar.

Bij de derde deelvraag is gekeken naar welke partijen interesse of belang hebben bij het realiseren en ontwikkelen van het Stirling gemaal. De belangrijkste partijen die hierbij gevonden zijn, zijn waterschappen als uitvoerende partij en toekomstig eigenaar, de overheid als wetgever en investeerder, onderzoeksinstituten die extra onderzoek zullen doen en milieuorganisaties. De overheid zal kunnen voorzien in een groot deel van de financiering van het project. Via de SDE+ regeling kan er tot een bedrag van 6,3 miljoen aan subsidie worden toegekend aan de realisatie van het Stirling gemaal.

Tot slot kan antwoord worden gegeven op de hoofdvraag: *Op welke wijze is de realisatie van het Stirling gemaal zowel technisch als financieel haalbaar en welke partijen zouden interesse en belang hebben in de realisatie hiervan?* Het Stirling gemaal is momenteel niet haalbaar en dient technisch verder onderzocht te worden om het vermogen van de beoogde Rhombic stirlingmotor naar een hoger vermogen te krijgen van circa 1800kW. Als dit vermogen bereikt wordt zal het gemaal ook financieel haalbaar zijn en een goed duurzaam alternatief voor bemaling in de toekomst bieden. Interesse vanuit waterschappen naar nieuwe technieken is groot om te kunnen voldoen aan de opgestelde duurzaamheid ambities.

Discussie

In dit hoofdstuk worden de onderzoeksmethoden en de onderzoeksresultaten geëvalueerd.

Dit onderzoek is bedoeld als haalbaarheidsonderzoek. Met het haalbaarheidsonderzoek is een opzet gemaakt voor een verder verloop in de realisatie van het Stirling gemaal in de toekomst. Hierdoor zijn de technische uitwerking van de stirlingmotor op detailniveau als aandrijving van een gemaal niet geheel uitgewerkt. De methodes voor een technische uitvoering zullen in een volgend onderzoek wel meegenomen moeten worden en verder worden uitgewerkt.

De technische informatie is deels gebaseerd op relatief oude boeken (1980 , 1991). Ondanks de leeftijd van de boeken betreft de informatie in de boeken samenvattingen van wetenschappelijk onderzoek die afkomstig is van uitgevoerde opstellingen van stirlingmotoren. Hiermee wordt de informatie uit deze boeken voldoende betrouwbaar geacht.

De financiële haalbaarheid in dit onderzoek is gebaseerd op vergelijkbare onderzoeken naar een kostenbepaling van een opzet, van zowel een stirlingmotor, als een geothermische doubletboring. Bij het gebruik van verschillende bronnen is opgevallen dat onderzoeken vaak andere componenten noemen omtrent een geothermische doubletboring. Zo kan bijvoorbeeld het aanleggen van een groot warmtenetwerk een enorme invloed hebben op de totaalkosten. Ook kan bijvoorbeeld het toepassen van een ontgassinginstallatie bij aanschaf duur zijn, maar later weer veel geld opleveren in de vorm van gasverkoop. Door de grote verschillen in de geraadpleegde bronnen zijn door de auteur bepaalde afwegingen gemaakt die invloed hebben op de financiële gegevens en daarmee op de resultaten van het onderzoek.

Zoals eerder naar voren is gekomen is het Stirling gemaal een idee waar veel verschillende factoren invloed kunnen hebben op het succes en daarmee de haalbaarheid. Een lage verkoopprijs van elektriciteit benadeelt de haalbaarheid evenals, een lage opbrengst uit een bron, hogere kosten van het aanleggen van de bron, verminderd vermogen dan vooraf ingeschat of het niet toegekend krijgen van subsidies. In het haalbaarheidsonderzoek is het daarom lastig met zekerheid te zeggen of het Stirling gemaal wel of niet haalbaar niet.

Ten opzichte van het groenlicht document is er met de eindversie van het onderzoek een hoop veranderd gaandeweg. Met name de technische uitwerking tot in detailniveau bleek te hoog gegrepen, omdat er erg weinig bekend en vooral beschikbaar is over de werking en resultaten van de stirlingmotor. De rechten van de Stirlingmotor van Philips zijn ooit overgedragen aan General Motors in Amerika en hiermee verdwenen uit de openbaarheid. Hierdoor zijn alleen relatief oude bronnen beschikbaar. De techniek van de stirlingmotor is in de 21^{ste} eeuw meerdere malen opnieuw bekeken in veel verschillende vormen. Zo zijn onder meer Saoedi-Arabië, Frankrijk en Zweden bezig met onderzoeken naar de stirlingmotor. Deze onderzoeken worden wel genoemd op het internet maar niet technisch omschreven. Informatie uit een denktanksessie met ingenieurs van hoogheemraadschap van Rijnland bracht daarnaast ook vooral financiële inzichten vanuit een waterschap gezien, maar geen echte input in een technische uitwerking van het idee. Daarom is de technische uitwerking minder ver ontwikkeld dan in eerste instantie bedacht was.

Aanbevelingen

Het Stirling gemaal betreft een nieuw idee waarbij veel aspecten een rol kunnen spelen in de haalbaarheid. Daarom zal het in de toekomst belangrijk zijn om in bepaalde thema's meer duidelijk antwoord te kunnen geven middels onderzoek. Om een richting te geven aan een verdere ontwikkeling van het Stirling gemaal wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar de volgende onderwerpen:

- Een onderzoek naar de uitwerking van schaalvergroting op de cilinders van een Stirlingmotor. Hierbij kan er een proefopstelling gemaakt worden van een Rhombic stirlingmotor volgens het bewezen model uit 1958 van Philips. Aan de hand van bouwtekeningen en dergelijke kan de machine nagebouwd worden maar dan met grotere cilinders (gaskamers). Ook kan berekend gaan worden wat de invloed is van drukverhoging in de cilinders. Tevens kan er gekeken worden naar de invloed van een hoger aantal mol helium gas in de cilinders bij hetzelfde volume waardoor deeltjes sneller botsen en daarmee het vermogen omhoog kunnen brengen.

- In dit onderzoek is al voren gekomen dat meer partijen zich de laatste jaren bezig houden met het onderzoek naar geothermische doubletboringen. Verwacht wordt dat als er meer partijen boringen gaan uitvoeren er ook een verlaging in de kosten voor een boring zal optreden. Als er een aantal jaar gewacht wordt met het uitvoeren van het Stirling gemaal kunnen de kosten voor een boring inmiddels gedaald zijn omdat er meer kennis is opgedaan en het proces is geoptimaliseerd. Daarnaast kan er onderzoek gedaan worden naar meekoppelkansen voor het Stirling gemaal. Hierbij kan gekeken worden naar de mogelijkheden van een gedeelde bron voor zowel de aandrijving van een gemaal, als verwarming van kassen, bedrijventerreinen en woningen. Hiermee zal dan meer opbrengst uit een bron gehaald kunnen worden en kunnen kosten bij een boring gedeeld worden door de gebruikers ervan.

- Na het uitvoeren van onderzoeken omtrent de technische haalbaarheid kan er opnieuw worden gekeken naar de financiële haalbaarheid van een eerste Stirling gemaal. Dit keer kan dan met netbeheerders en leveranciers overlegd worden wat de hoogte van het bedrag zal zijn, wat duurzaam opgewekte elektriciteit oplevert om meer detailleert de financiële uit te werken en daarmee aantrekkelijk te maken voor investeerders. Hieruit kan verschuiving in de financiële haalbaarheid optreden die zowel positief als negatief kan uitpakken. Mocht de verkoopprijs van de duurzaam opgewekte elektriciteit veel lager zijn dan kan er gekeken gaan worden naar wat de geothermische warmte op zichzelf waard is bij verkoop aan derden.

Om meer partijen te enthousiasmeren voor een Stirling gemaal kan het idee door de overheid gestimuleerd gaan worden. Hiermee is de kans groter dat partijen elkaar kunnen aanvullen om de realisatie een stap dichterbij te laten komen.

Literatuurlijst

Boeken:

Clifford, M. Hargreaves. (1991). *The Philips Stirling Engine*. London, Engeland: Elsevier.

Schevenhoven, P. (2015). *Canon van Rijnland*. Leiden, Nederland: Primavera Pers.

Unie van Waterschappen (2016). *Waterschapspeil 2016*. Den Haag, Nederland: Opmeer BV.

Internet:

Animatedengines. (2017). *Single Cylinder Stirling Engine*. Verkregen op 21 januari 2018, van <http://www.animatedengines.com/stirling.html>

APXgroup. (2018). *EPEX Netherlands*. Verkregen op 2 juni 2018, van <https://www.apxgroup.com/trading-clearing/apx-power-nl/>

Airandspace. (2018). *Pratt & Whitney Double Wasp R-2800 CB16, 2-Row, Radial 18 Engine*. Verkregen op 2 april 2018, van <https://airandspace.si.edu/collection-objects/pratt-whitney-double-wasp-r-2800-cb16-2-row-radial-18-engine>

Aviation-history. (2015). *Pratt and Whitney's R-2800*. Verkregen op 28 mei 2018, van <http://www.aviation-history.com/engines/pr-2800.htm>

Boederij. (2011). *Niemand wil betalen voor nieuw gemaal Lauwersoog*. Verkregen op 5 maart 2018, van <http://www.boederij.nl/Home/Blogs/2012/1/Niemand-wil-betalen-voor-nieuw-gemaal-Lauwersoog-AGD579082W/>

Compendium voor de leefomgeving (CLO). (2016). *Energieprijzen voor enkele energiedragers, 1990-2016*. Verkregen op 16 maart 2017, van <http://www.clo.nl/indicatoren/nl0554-energieprijzen-en-wereldolieprijs->

Energiesite. (2018). *Kwh prijs*, Verkregen op 2 april 2018, van <http://www.energiesite.nl/begrippen/kwh-prijs/>

Energieleveranciers. (2018). *Overheidsheffingen (energiebelasting en Opslag Duurzame Energie) op energieverbruik*. Verkregen op 2 juni 2018, van <https://www.energieleveranciers.nl/energie/energierekening/energiebelasting>

Geertsma. P. (2013). *Wat is stirlingmotor, hoe werkt een stirlingmotor en waar wordt deze toegepast?* Verkregen op 15 maart 2017, van <http://www.technischwerken.nl/kennisbank/techniek-kennis/wat-is-stirlingmotor-hoe-werkt-een-stirlingmotor-en-waar-wordt-deze-toegepast/>

Golantec. (2016). *Vinding Robert Stirling houdt gemoederen al eeuwen bezig....* Verkregen op 19 februari 2017, van <http://www.golantec.be/micro%20warmte%20kracht%20koppeling/Geschiedenis%20Stirlingmotor.pdf>

Greenpeace. (2018). *Zo werken we*. Verkregen op 28 januari 2018, van <https://secured.greenpeace.nl/about/>

Klimaatplein. (2018). *Maatschappelijke kosten van klimaatverandering*. Verkregen op 26 januari 2018, van <https://www.klimaatplein.com/de-maatschappelijke-kosten-van-klimaatverandering>

KNMI. (2017). *Regenintensiteit*. Verkregen op 15 februari 2017, van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/regenintensiteit>

Kok, M., Jonkman, B., Kanning, W., Rijcken, T., & Stijnen, J. (2008). *Toekomst voor het Nederlandse polderconcept*. Verkregen op 17 februari 2017, van <http://www.deltacommissie.com/doc/Toekomst%20voor%20het%20Nederlandse%20Polderconcept.pdf>

Milieucentraal. (2016). *Bereken je CO2 uitstoot*. Verkregen op 27 februari 2017, van <https://www.milieucentraal.nl/klimaat-en-aarde/klimaatverandering/bereken-je-co2-uitstoot/>

Milieudefensie. (2007). *Aardwarmte tegen een warme aarde* Verkregen op 28 januari 2018, van <https://milieudefensie.nl/publicaties/down-to-earth-magazine/milieudefensie-magazine-archief/2007/oktober-2007/aardwarmte-tegen-een-warme-aarde-pdf>

Natuurkunde. (2017). *Algemene gaswet*. Verkregen op 29 januari 2018, van <https://natuurkundeuitgelegd.nl/videolessen.php?video=algemenegaswet>

Pianoo. (2011). *Criteria voor duurzaam inkopen gemalen*. Verkregen op 5 maart 2018, van <https://www.pianoo.nl/sites/default/documents/documents/gemalen-okt2011.pdf>

RVO. (2018). *Hernieuwbare energieproductie 2016 SDE+*. Verkregen op 28 januari 2018, van <https://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/stimulering-duurzame-energieproductie/feiten-en-cijfers/hernieuwbare-energieproductie-2016-sde>

Sterl, F. (2016). *Zuigermotoren 3: de Stirlingmotor*. Verkregen op 1 oktober 2016, van <http://www.natuurkunde.nl/artikelen/365/zuigermotoren-3-de-stirlingmotor>

Sharma, A. (2011). *Transportation Technologies*. Verkregen op 22 januari 2018, van <http://mcensustainableenergy.pbworks.com/w/page/20638205/Transportation%20Technologies>

STOWA. (2010). *Gemalen of vermalen worden*. Verkregen op 18 december 2017, van <http://edepot.wur.nl/155899>

TNO. (2016). *Ultra-diepe geothermie:Overzicht, inzicht & to-do ondergrond*. Verkregen op 7 januari 2018, van https://www.tno.nl/media/9728/tno_udg-ondergrond_r10803.pdf

TNO₂. (2018). *3D temperatuurmodellen voor geothermisch onderzoek*. Verkregen op 28 januari 2018, van <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/energie/roadmaps/geo-energy/ccs-en-geothermie/3d-temperatuurmodellen-voor-geothermisch-onderzoek/>

UVW₁ (unie van waterschappen) . (2017). *Duurzaam inkopen*. Verkregen op 16 maart 2017, van <https://www.uvw.nl/thema/duurzaamheid/duurzaam-inkopen/>

UVW₂ (unie van waterschappen). (2014). *Waterschappen kunnen energie besparen op polergemalen*. Verkregen op 28 februari 2017, van <https://www.uvw.nl/waterschappen-kunnen-energie-besparen-op-poldergemalen/>

UVW₃ (unie van waterschappen). (2018). *Waterschappen verkleinen klimaatvoetafdruk*. Verkregen op 28 januari 2018, van <https://www.uvw.nl/waterschappen-verkleinen-klimaatvoetafdruk/>

Waterschap Zuiderzeeland. (2017). *Energie neutrale polderbemaling*. Verkregen op 2 maart 2017, van <https://www.waterinnovatieprijs.nl/project2016/energieneutrale-polderbemaling/>

Waterschap Zuiderzeeland. (2010). *Gemalenplan 2011 – 2020*. Verkregen op 20 december 2017, van <https://www.zuiderzeeland.nl/publish/pages/.../bijlagebijagendapunt10c.gemalenplan...>

Waterschap Zuiderzeeland. (2018). *Gemaal Smeenge*. Verkregen op 2 juni 2018, van https://web.archive.org/web/20130729155741/http://www.zuiderzeeland.nl/voldoende_water/gemalen_in_flevoland/gemaal_smeenge

Wetterskip Fryslan. (2018). *Bouw nieuw gemaal in zeedijk bij Marrum gestart*. Verkregen op 28 januari 2018, van <https://projectvijfhuizen.nl/project-vijfhuizen-fan-swiet-nei-salt-bouw-nieuw-gemaal-in-zeedijk-bij-marrum-gestart/>

Bijlage I:

Vergelijking 1 Pompgrafiek boezemgemaal Katwijk, Hoogheemraadschap Rijnland.



Klant: Tauw

Gemaal: PS Katwijk

Datum: 28-Sep-09

Flowserve referentie:

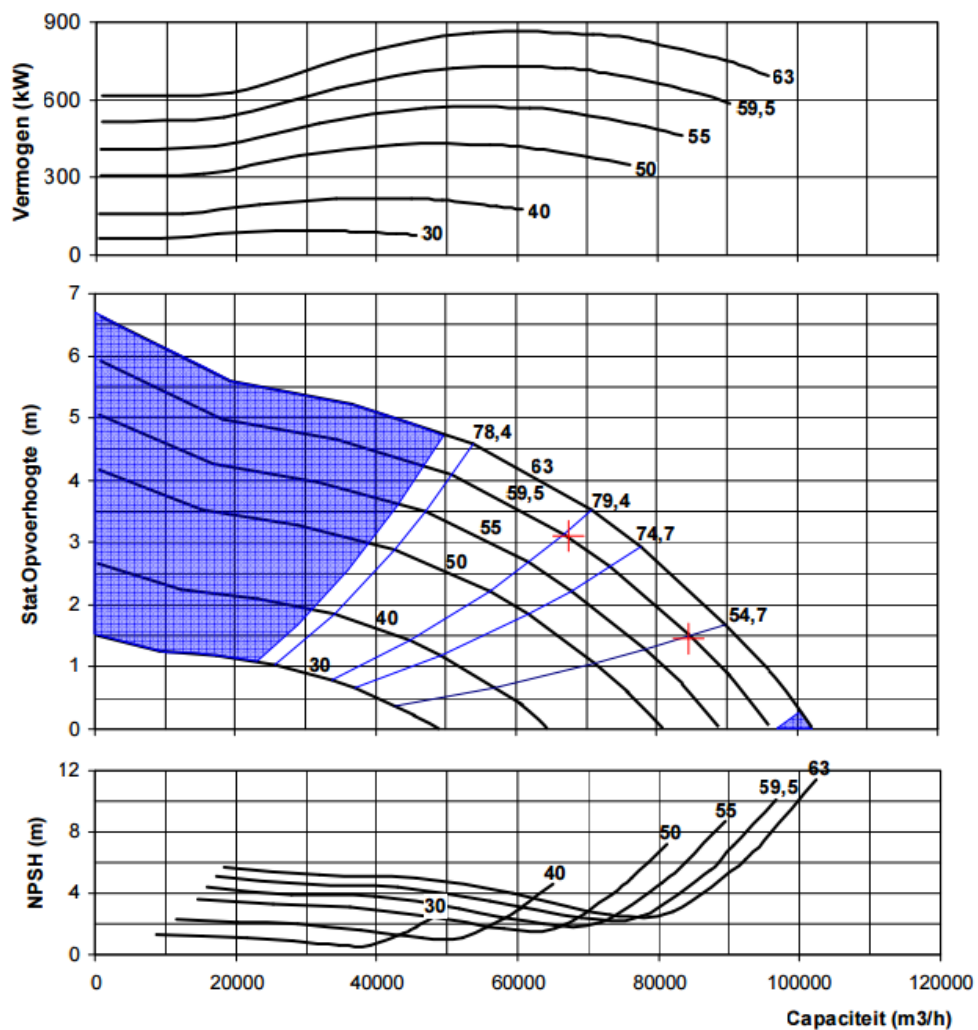
Project No. 06HY7594

Pump type BCV 350Y

Dichtheid 1000 kg/m³

Toerental 30-63 rpm

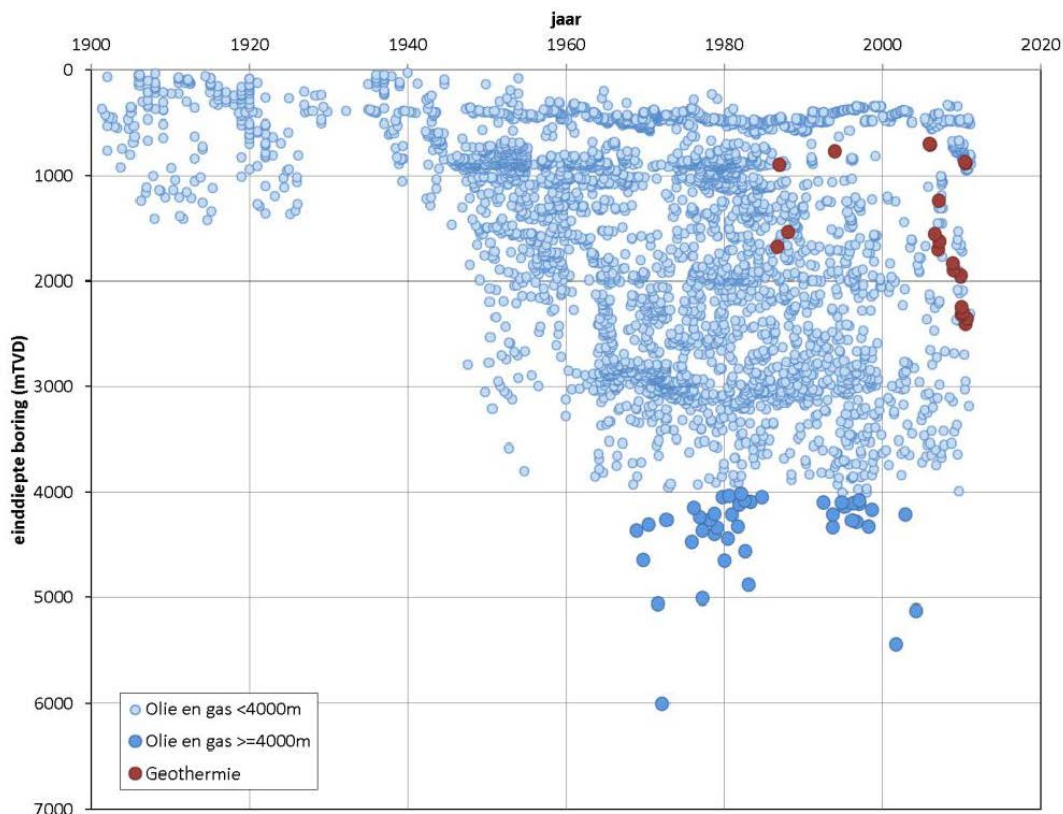
Diameter 3500 mm



Bijlage II:

1. Geothermische bronnen in Nederland

Geothermische aardwarmte is de laatste jaren in opkomst in Nederland. De ontwikkeling van de techniek voor het boren naar diepere aardwarmte is eind jaren tachtig begonnen met het boren van de eerste doubletten (*naamgeving voor een geothermische boring*). Geothermische bronnen slaan valt in Nederland samen met de mijnbouwindustrie. Vanuit de mijnbouwindustrie is er een hoop kennis opgedaan over de manier van boren en zijn technieken voor diepe boringen al flink doorontwikkelt. Ook is er door het grote aantal boringen in Nederland al veel kennis over de ondergrond en de daarbij behorende kansen daarvan (TNO, 2016).



Figuur 1 Boringen 1000>m vanaf 1900 (TNO, 2016)

Getuige hiervan is de afbeelding hierboven. Hierin zijn alle boringen opgenomen vanaf 1900 tot 2016. In totaal zijn er in Nederland al meer dan 4.000 boringen uitgevoerd die dieper zijn dan 1000m. De meeste boringen zijn uitgevoerd ten behoeve van de winning van gas en olie en gaan tot een diepte van 4000m. Vanaf 1970 zijn hier ook boringen bijgekomen die verder gaan dan 4000m in de grond. Eind jaren 80 is ook begonnen met de eerste proefboringen voor geothermische energie. Duidelijk in de afbeelding is te zien dat sinds 2008 het aantal geothermische boringen flink is toegenomen. Dit valt samen met subsidieregelingen op nationaal en Europees niveau. Eerdere boringen ten behoeve van gas en oliewinning kunnen al veel vertellen over de kansen voor geothermische energie in de bodem. De kennis hiervan kan dan ook meegenomen worden in de aanwijzing van nieuwe locaties van geothermische bronnen en de kans daarmee vergroten om een rendabele bron te slaan met een hoger rendement (TNO, 2016).

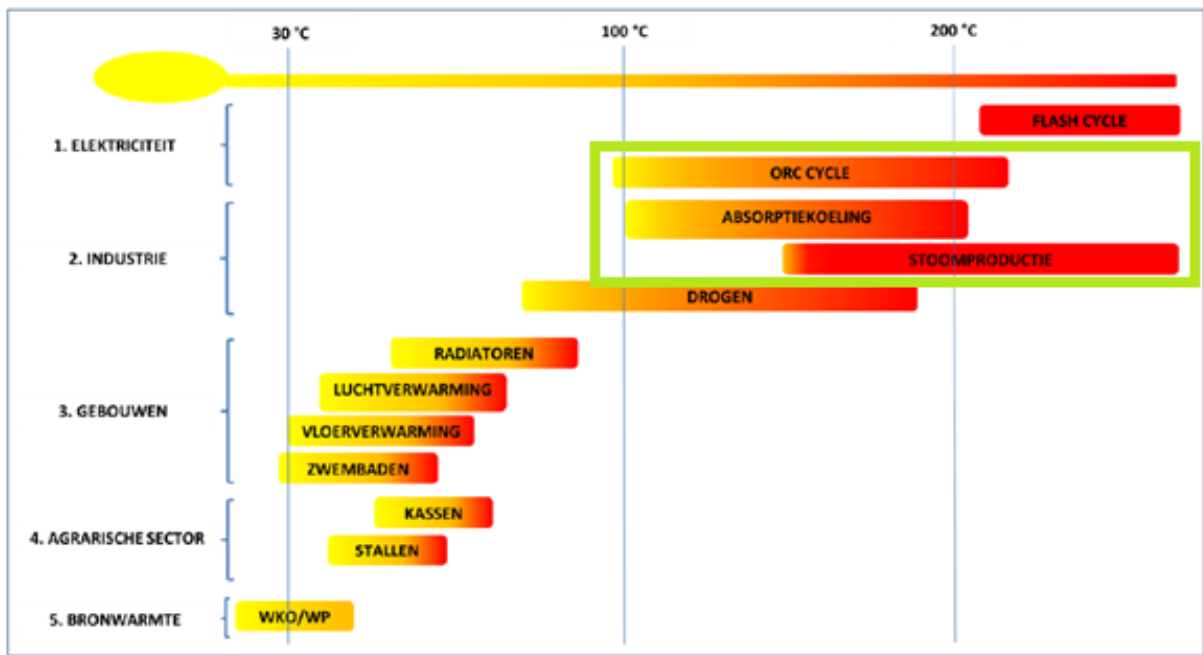
2. Duitsland

Naast de kennis over boringen in Nederland zijn de Duitsers al langer bezig met het winnen en boren van geothermische aardwarmte. De voornaamste reden hiervoor is dat in Duitsland er veel hogere subsidiebedragen worden uitgekeerd en dat deze subsidies ook sneller en eerder worden toegekend. Hierdoor zijn er in Duitsland tot oktober 2016 al 12 elektriciteitscentrales gebouwd die primair of deels op aardwarmte draaien. Naast het opwekken van elektriciteit wordt aardwarmte in Duitsland ook gebruikt voor stadsverwarming. De temperatuur van het water die deze bronnen omhooghalen variëren tussen de 124 en 165 graden Celsius. De debieten ofwel het aantal m³ warm water wat hierbij omhoog wordt gehaald varieert tussen de 250 en 500m³/h (TNO, 2016).

3. Kansen per Temperatuurgradiënt

Aardwarmte en geothermische energie hebben per temperatuurgradiënt een eigen functie. Voor dit afstudeeronderzoek is gezocht naar de hoogst mogelijke temperatuur. Dit omdat bekend is dat een Stirlingmotor zijn hoogste rendement behaalt tussen de 600 en 900 graden Celsius. Aardwarmte en geothermische energie wordt de laatste jaren vooral genoemd als duurzame vervanging voor het verwarmen van kassen, huizen, industrie en zwembaden. In figuur 2 is per onderwerp of doelgroep te zien wat de benodigde temperatuur moet zijn. Zo kunnen zwembaden al verwarmd worden met een temperatuur van 30 graden Celsius (TNO, 2016).

Voor dit onderzoek kan gekeken worden naar drie onderwerpen in figuur 2. Namelijk bij industrie: absorptiekoeling en stoomproductie. Absorptiekoeling kan namelijk gezien worden als evenwijdige techniek naast die van de werking van de stirlingmotor. Een stirlingmotor kan namelijk ook twee kanten opwerken zolang er maar een hoog genoeg temperatuursverschil aanwezig is. Hiermee kan absorptiekoeling deels als bewijs worden gezien dat de werking van een stirlingmotor gelijk staat aan een temperatuur van 100 graden Celsius of meer. De andere industriële parameter is die van stoomproductie. Echter is een stoommachine of motor niet hetzelfde als een stirlingmotor. Bij een stoommachine wordt namelijk niet de warmte als aandrijving voor de motor gebruikt maar die van de druk van het stoom. Deze machine kent dan ook een laag rendement en warmte gaat hierin verloren als energie. Tot slot kan er bij het onderwerp elektriciteit in de grafiek worden gekeken naar de ORC Cycle. De ORC cycle staat voor organische rankine cyclus. Bij deze techniek wordt een vloeibare chemische stof verwarmt tot het zijn verdampingpunt bereikt. Door de evaporatie van de vloeistof komt een luchtstroom opgang die samen wordt geperst in een pijp en zo onder druk een waaier (generator) aandrijft. Dit is een systeem die bijna gelijkwaardig is aan de werking van een stirlingmotor, alleen behoeft deze techniek een hogere temperatuur om goed te laten werken en is daarnaast nog flink in ontwikkeling (TNO, 2016).



Figuur 2 Opties gebruik aardwarmte (TNO, 2016)

Met de afbeelding hierboven kan deels aangetoond worden dat technieken die gelijkwaardig zijn aan de werking van een stirlingmotor kunnen werken bij een soortelijke temperatuurgradient. Als er dan ook geboord gaat worden naar geothermische energie met als doel: de werking en aandrijving van een stirlingmotor, dan moet worden geboord naar een aardlaag of diepte waarbij de grond tenminste 100 graden Celsius bedraagt (TNO, 2016).

4. Boren naar geothermie

Voor het boren naar geothermische energie of aardwarmte kan niet overal klakkeloos een boor de grond in en warmte naar boven gehaald worden. Belangrijke parameters voor de kans van slagen van een boring hangen bijvoorbeeld af van hoe poreus een gesteente is. Deze parameters worden omschreven in de definitie van geothermisch potentieel. Deze definitie is gebaseerd op 'temperatuur, vergelijkbare geologische omstandigheden en eigenschappen gegeven een bepaalde bovengrondse warmtevrage'. Deze definitie wordt ook gehanteerd in de olie en gasindustrie en kan de kans van slagen en het potentieel van een boring aangeven. Hiermee worden analyses uitgevoerd die risico's moeten beperken en kunnen de potentie van een boring initiëren (TNO, 2016).

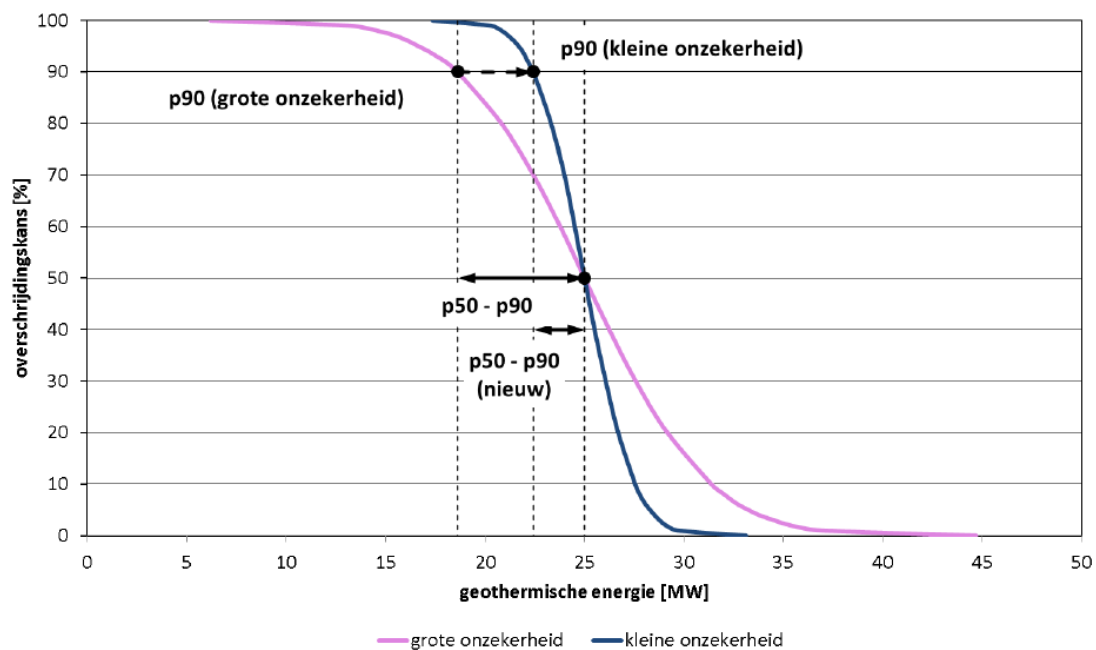
Het uitvoeren van zulke analyses is een belangrijk proces. Het proces van een boring kan namelijk behoorlijk kostbaar zijn. Later in dit hoofdstuk wordt teruggekomen op de kosten van een geothermische boring.

Bij z'n analyse wordt meestal een standaard model gebruikt die opgebouwd is uit drie fases:

- **Fase 1:** verkenning van het doelgesteente of play (hiermee wordt de plek bedoeld waar geboord zal gaan worden). Hierbij wordt alle bestaande kennis gebombineerd en gedefinieert in een eerste conceptueel model. Het doel van deze fase is om met een relatief lage inspanning en daarmee risico toch een plek voor een boring aan te kunnen wijzen (TNO, 2016).

- **Fase 2:** Bij de tweede fase zal onderzoek gedaan worden naar het soort gesteente wat zich rond de boorlocatie zich bevindt. Zo heeft ieder type gesteente z'n karakteristieke eigenschappen die van invloed kunnen zijn op het succes van een boring. Daarnaast wordt gekeken naar de verwachte temperatuur van de boorlocatie. De temperatuur is immers leidend in het succes van een boring. Op basis van het verdere onderzoek in fase 2 wordt er een zogenaamd verrijkt conceptueel referentiemodel opgesteld. Hierin worden risico's nauwkeuriger omschreven en wordt een voorzichtige schatting gemaakt naar het rendement van de locatie. Als alle resultaten positief worden beoordeeld kan er door worden gegaan naar de laatste fase (TNO,2016).

-**Fase 3:** In fase drie wordt het gehele proces van het boren doorlopen. Zo wordt bijvoorbeeld een specifieke boorkop ontworpen die past bij het soort gesteente en tevens bestand is tegen de verwachte temperatuur in de ondergrond. Als het hele proces van de boring doorlopen is en uitgedacht, wordt een vermogensverwachtingscurve voor een ultra diep geothermiek project uitgewerkt. In z'n curve wordt uitgegaan van een bepaald vermogen wat naar alle waarschijnlijkheid uit een bron gehaald kan worden. Hierbij wordt op 3 percentages vastgepind waarmee de zekerheid wordt aangegeven dat het beoogde vermogen wordt behaald. Op de volgende pagina is een voorbeeld te zien van een vermogensverwachtingscurve voor een geothermische bron (TNO, 2016).



Figuur 3 Voorbeeld vermogensverwachtingscurve (TNO, 2016)

De percentages waar op vastgepind wordt zijn 90, 50 en 10. Bij een percentage van 90 procent is er een grote kans dat het vermogen hoger zal uitvallen. Bij een percentage van 50 procent is een kleine onzekerheid dat het vermogen sterk zal afwijken van deze waarde (in dit geval 25MW). Bij een percentage van 10 procent is er een kleine kans dat het vermogen deze waarde zal halen. Met deze curve kan in dit geval geconcludeerd worden dat er een opbrengend vermogen wordt gehaald van tussen 22,5 en 25MW aan energie uit deze geothermische bron (TNO, 2016).

5. Gesteente soorten in Nederland

Zoals eerder genoemd zijn er in Nederland reeds op grote schaal diepe boringen uitgevoerd die wat vertellen over de ondergrond van Nederland. Alle resultaten van deze boringen zijn in een rapport van TNO (2016) geanalyseerd en vertellen daarbij wat eventueel geschikte locaties kunnen zijn voor het boren naar geothermische energie. In Nederland zijn vijf verschillende gesteentesoorten onderzocht. Elk soort gesteente ligt op een bepaalde diepe en heeft een eigen mate van hoe poreus die is en daarmee waterdoorlatend. Daarnaast verteld de gesteentesoort ook iets over de mogelijke aanwezigheid van aquifers (watervoerende lagen). Vanuit dit onderzoek blijkt dat de volgende gesteentesoorten de meeste kans hebben op een rendabele bron: (TNO, 2016)

	Dinantien	Rotliegend	Trias	Carboon zand	Devoon
Temperatuur	Hoog	Middel	Middel	Hoog	Hoog
Omvang play	Groot	Beperkt	Beperkt	Onbekend	Onbekend
Doorlatendheid	Mogelijk	Mogelijk	Mogelijk	Onbekend	Onbekend
Ondergrondkennis	Beperkt	Bekend	Bekend	Beperkt	Onbekend
Match warmtevraag	Breed aanwezig	Aanwezig	Aanwezig	Onbekend	Onbekend

Figuur 4 Kansen per gesteentesoort in ondergrond (TNO, 2016)

6. Kosten geothermische bron

Nu bekend is wat het potentieel is van geothermische energie in Nederland en hoe een boring uitgevoerd kan worden, kan gekeken worden naar de kosten en opbrengsten hiervan. In dit onderzoek wordt gerefereerd naar de volgende rapporten:

- *Rapport van de Rijksuniversiteit Groningen (RUG, 2014). Bij dit onderzoek zijn er onder andere interviews geweest met Rien Herber: oud adjunct directeur NAM en professor geo-energie aan de Rijksuniversiteit Groningen en Paul Corzaan, projectleider geothermie binnen de gemeente Groningen (RUG,2014).*

- *Rapport en onderzoek Wageningen universiteit in samenwerking met ministerie Economische zaken landbouw en innovatie (WUR, 2013).*

De belangrijkste kosten voor het aanboren van een geothermische bron zijn de boorkosten zelf. Daarnaast zullen er kosten gemaakt worden voor het uitvoeren van vooronderzoek (vermogensverwachtingcurve etc.) en het bouwen van een geothermische energie-installatie. Ook zijn er allerlei aanvullende kosten zoals verzekeringen, het aanleggen van een netwerk warmtetransport en overige kosten.

De kosten voor het boren naar geothermische warmte lopen bij verschillende experts flink uiteen. Daarom is er een opsommingstabel gemaakt waarin een gemiddeld beeld wordt geschetst:

<i>Onderdeel/expert</i>	Paul Corzaan	Rien Herber	Wageningen Uni.
Vooronderzoek	500.000,00	0,00	55.000,00
Boren	9.000.000,00	17.000.000,00	7.300.000,00
Ontgassingsinstallatie	1.000.000,00	-	0,00
Geothermische energie centrale	300.000,00	-	1.345.000,00
Aanleggen netwerk	9.200.000,00	-	900.000,00
Totale kosten	24.000.000,00	20.000.000,00	10.785.000,00

Tabel 5 Kosten voor geothermische doubletboring (prijzen zijn in euro's)

Zoals in de tabel is te zien is er geen samenhang te vinden in de kosten voor het bouwen en boren van een geothermische bron. Daarnaast worden door de verschillende partijen ook telkens andere kostenposten benoemd. Zo fakkelt de ene partij mogelijk aardgas af en ziet een andere partij het aardgas als kans voor extra bijverdiensten. De boorkosten liggen bij Rien Herber het hoogst, op circa 17 miljoen euro. Volgens Paul Corzaan kan dit verklaart worden door de achtergrond van Herber. Als oud directeur van de NAM ga je eerder uit van het hoogste veiligheidsscenario en daarmee stijgen de kosten voor het boren (RUG, 2014).

Kort samengevat kan geconcludeerd worden dat de kosten voor een geothermische doubletboring neer zullen komen op ongeveer 10 miljoen euro. De overige kosten bij het maken van een geothermische bron zijn zo uiteenlopend dat hieruit geen conclusie kan worden opgemaakt. Waarschijnlijk zijn de kosten zo locatie bepalend en zijn tevens de opties voor het uitvoeren van het project ook van dermate invloed op de kosten.

Naast de experts uit het tabel zijn er ook tal van andere geothermische projecten in Nederland gaande. De bekendste die momenteel wordt uitgevoerd is het project TRIAS Westland. Hier wordt een geothermische bron aangelegd van 4000m diep. Dit project zal rendabel worden vanaf 26MW aan geothermische energie en is berekend op een totale investering van 50 miljoen euro. De hoge kosten worden hierbij vooral gemaakt door de aanleg van een groot netwerk van warmtetransportbuizen en veel wetenschappelijk onderzoek tijdens de boringen. Daarnaast speelt de grote diepte een rol in de kosten (TRIAS Westland, 2014).

Tot slot is er in opdracht van de provincie Zuid-Holland voor de Wateringveldsche polder onderzocht welke duurzame energiebron van de toekomst het meest rendabel kan zijn om een lokaal industrieterrein te voorzien van duurzame energie . In dit onderzoek is ook geothermie meegenomen als optie. Naast geothermie zijn ook de bekende vormen van duurzame energieopwekking zoals zonnepanelen, bio-ketels en bio-gas meegenomen in het onderzoek. Onderzocht is de bouw van installatie met een diepte van 2500 meter. De energie die het industrieterrein nodig heeft is ondermaats aan de opbrengst van een geothermische bron. Daarom is de bedoeling dat met de restwarmte nog eens 2000 woningen verwarmd zullen worden. Hiermee verdient het project dan een deel van zijn eigen kosten terug. De uitkomsten van dit onderzoek zijn als volgt: (Blom, 2010)

Alternatief	Kosten (mln. Euro 2008)	Onderhoud (% van investering)	Afschrijvings- termijn (jaren)	Effecten op CO ₂ T.o.v. ref.
Referentie	1,3	2%	15	0%
Aardgasgestookte WKK	9,8	2%	15	32%
Bio-WKK	12,8	3%	15	58%
Houtgestookte warmteketel	4,8	3%	15	21%
Zonnecellen op 10% van de daken	10,7	0%	30	6%
Zonnecellen op 100% van de daken	107	0%	30	63%
Diepe geothermie	13,6	0%	30*	32% + reductie in 2000 woningen Wateringseveld
Business case	15	combi	combi	28%

* Voor de hulpketels is verondersteld dat deze na 15 jaar worden vervangen. De put wordt na 30 jaar opnieuw geboord.

Figuur 6 Investerings duurzame energie (Blom, 2010)

In dit onderzoek komt diepe geothermie als een van de meest voordelige duurzame alternatief uit de bus. De totale kosten voor een boring inclusief aansluitingen worden beraamd op 13,6 miljoen euro. Als opbrengst wordt minimaal 30 jaar lang de CO₂ uitstoot met 32 procent gereduceerd en worden 2000 woningen volledig verwarmd. Voor de optie van diepe geothermie is ook een kosten en batenanalyse gemaakt, waaruit het volgende resultaat volgde (Blom, 2010):

Kosten en baten van een investering in diepe geothermie, in mln €₂₀₁₀, NCW in 2010

	Kosten	Baten
Geothermie	€ 9,39	Intern € 10,29
		Externe effecten CO ₂ € 5,26
		Externe effecten lucht € 0,00
		Externe effecten voorzieningszekerheid Pm
	Totaal	€ 15,55
	Saldo	€ 6,17
	B/K	166%

Figuur 7 Kosten en baten geothermie (Blom, 2010)

Hieruit kan geconcludeerd worden dat er met een investering van 9,39 miljoen euro 15,55 miljoen terugverdiend kan worden in 30 jaar tijd. De opbrengsten bestaan uit een besparing van de energierekening en daarnaast zijn er positieve externe effecten op de CO₂ uitstoot van 5,26 miljoen euro. Na 30 jaar is dan met de investering 6,17 miljoen euro verdiend. Mocht de energieprijis 1,5x stijgen dan komt geothermie als verruit de beste optie voor een duurzaam alternatief uit de bus (Blom, 2010).

Literatuurlijst

Blom. (2010). *MKBA Wateringveldsche Polder Analyse van duurzame maatregelen*. Verkregen op januari 2018, van www.cedelft.nl/publicaties/966/mkba-duurzame-bedrijventerreinen

F. Nobel, M. Oudshoorn (RUG). (2014). *Geothermische Energie rendabel binnen tien jaar?* Verkregen op januari 2018, van http://www.astro.rug.nl/~nobels/Geothermische_energie_Nobels_Oudshoorn.pdf

TNO. (2016). *Ultra-diepe geothermie:Overzicht, inzicht & to-do ondergrond*. Verkregen op 7 januari 2018, van: https://www.tno.nl/media/9728/tno_udg-ondergrond_r10803.pdf

TRIAS Westland. (2014). *Geothermie FloraHolland*. Verkregen op januari 2018, van <https://www.triaswestland.nl/application/files/3714/2548/4783/Trias-Westland-Geothermie-juli-2014.pdf>

WUR (Wageningen Universiteit). (2013). *Innovatie Netwerk Energie Systemen glastuinbouw Oost Brabant (INES)*. Verkregen op januari 2018, van https://www.wur.nl/upload_mm/9/2/3/9809463d-dda9-4b96-b28c-834695adb3af_kostprijs%20aardwarmte%20en%20wkk%20gebruik.pdf