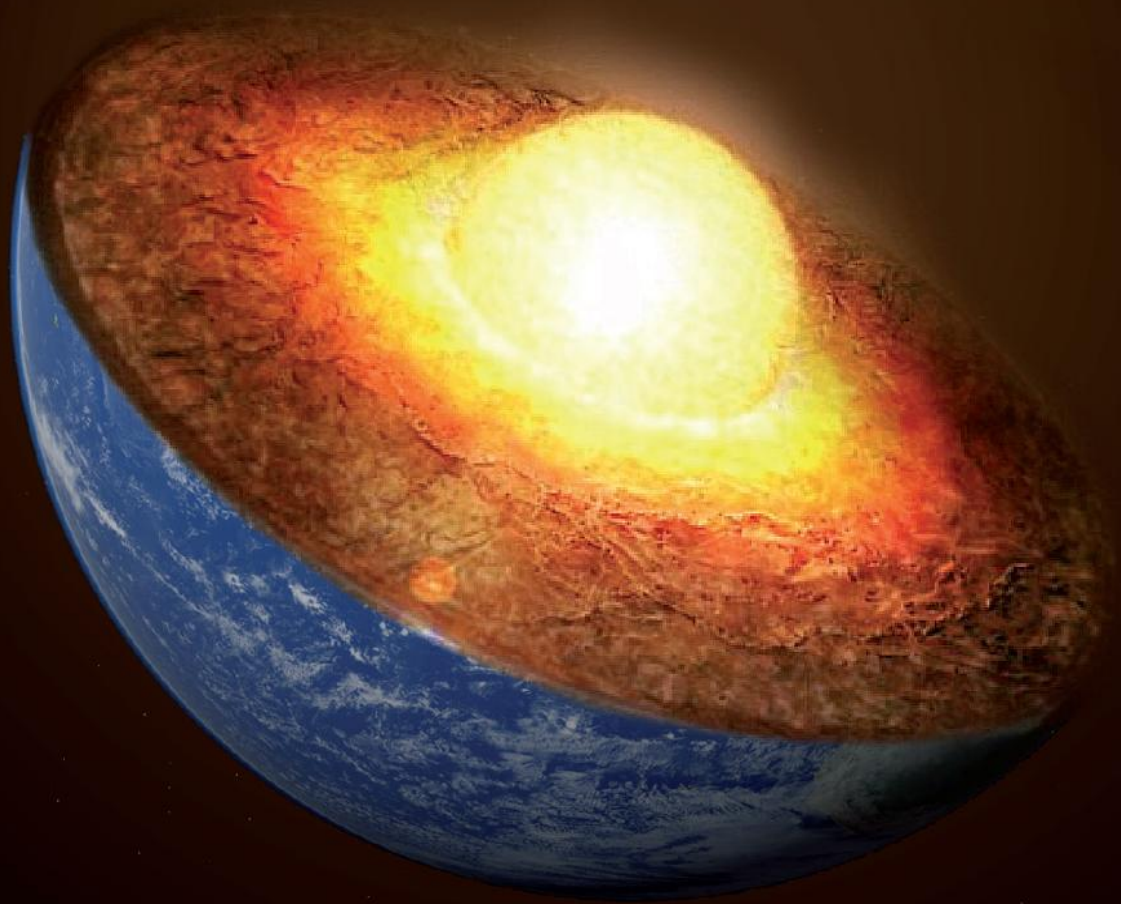


AARDWARMTE

De duurzaamheid van geothermie



Larissa Gonzalez

Aardwarmte

De duurzaamheid van geothermie

Afstudeerscriptie

Larissa Gonzalez

09058605

Climate & Management

Haagse Hogeschool

Opdrachtgever:

Platform Geothermie

Afstudeerstage

September 2012 – januari 2013

In samenwerking met:

Green Well Westland

Vormgeving omslag:

Martijn Barnhoorn

Disclaimer

Dit onderzoek heeft plaatsgevonden van september 2012 t/m december 2012. Het onderzoeksbedrijf, Green Well Westland, overweegt om in de toekomst op verscheidene manieren het vermogen van hun geothermiebron nog verder te verhogen. Deze mogelijkheden zijn niet meegenomen in dit onderzoek.

Dit betekent dat de 'maximale' opwekking en besparing zoals gevonden in dit rapport, in de toekomst nog kunnen veranderen.

De maximale resultaten uit dit rapport kunnen dan ook niet zonder meer worden aangenomen als de resultaten die Green Well Westland in de toekomst zal behalen.

Voorwoord

Na een half jaar lang stage te hebben gelopen bij het Platform Geothermie, is mijn onderzoek naar de duurzaamheid van geothermie nu klaar. Dit zou mij niet gelukt zijn zonder de hulp en steun van een aantal mensen:

Ten eerste wil ik graag het Platform Geothermie bedanken, in het bijzonder mijn begeleider Victor van Heekeren. Hij heeft mij een stageplek gegeven en begeleid bij het oplossen van alle grote en kleine problemen die ik onderweg tegenkwam. Daarnaast beschikt hij over een goede dosis humor wat bijgedragen heeft aan mijn plezier op deze stageplek!

Ook mijn begeleiders vanuit school, Sander Brinkman en Cees Kieboom, wil ik bedanken voor hun inhoudelijke feedback. Daarnaast heeft Sander mij procesmatig geholpen, niet alleen tijdens mijn afstudeerstage, maar ook al hiervoor tijdens mijn studiejaren bij Climate & Management. Hij heeft mij stappen laten zetten in mijn persoonlijke ontwikkeling; ook hiervoor veel dank.

Verder ben ik het project Green Well Westland en de mensen achter deze naam heel veel dank verschuldigd. Zonder jullie medewerking zou het onderzoek niet hebben kunnen plaatsvinden! In het bijzonder wil ik hierbij graag noemen: Ted Zwinkels, bij wie het allemaal begon toen het onderzoek bij Aardwarmte Den Haag niet door kon gaan; Jos Scheffers, voor de informatieverstrekking en gastvrijheid bij zijn Kwekerij Zeurniet; en Stef Scheffers voor zijn eindeloze maandelijkse geduld achter de computer om alle benodigde gegevens hier voor mij uit te halen.

Ten slotte wil ik ook alle andere mensen die mij geholpen hebben bij het verkrijgen van gegevens of mij op een andere manier informatie hebben verstrekt heel hartelijk danken voor hun medewerking. Ook zonder de kleine factoren in mijn scriptie zou het onderzoek niet zijn geslaagd!

Larissa Gonzalez

Samenvatting

Aardwarmte, ofwel geothermie, is een energiebron die in Nederland nog in de kinderschoenen staat. Ten tijde van dit onderzoek waren in totaal een tiental projecten gerealiseerd of in aanbouw.

Vanwege de hoge realisatiekosten in geld en energie, wilde het Platform Geothermie graag weten hoe duurzaam een geothermiebron precies is, zodat dit gebruikt kan worden in de voorlichting over geothermie. Om dit te onderzoeken hebben de tuinders van Green Well Westland de data van hun geothermiebron van augustus t/m december 2012 beschikbaar gesteld. Met de resultaten van het onderzoek kan Green Well Westland inschatten wat de verdere mogelijkheden van de geothermiebron zijn; tijdens de onderzoeksperiode kon meer warmte opgepompt worden dan de kassen van GWW nodig hadden. Aan het eind van de periode (december 2012) zijn al twee nieuwe bedrijven aangesloten en er spelen ideeën om dit nog verder uit te breiden.

In het onderzoek is bepaald dat het geothermische systeem van Green Well Westland erg duurzaam is. Hierbij is 'duurzaam' afgebakend in termen van CO₂-uitstoot en fossiel energiegebruik ten opzichte van een situatie waar aardgas gebruikt wordt in plaats van aardwarmte.

Als eerste is hiervoor bepaald hoeveel energie er bij de kassen gebruikt is.

De kassen hebben elke maand een andere warmtevraag; in de winter is bijvoorbeeld meer warmte nodig dan in de zomer. Bovendien heeft GWW tijdens het onderzoek niet voluit gedraaid omdat de geothermiebron meer warmte kon leveren dan GWW op dat moment nodig had.

Er is echter bepaald dat de maand oktober overeenkomt met een gemiddelde maand in een jaar. Dit houdt in dat in de onderzoeksperiode gemiddeld per maand ongeveer 15.700 GJ werd gebruikt. Dit komt overeen met gemiddeld ongeveer 188.400 GJ per jaar.

Bij transport van de warmte van de geothermiebron naar de kassen treden verliezen op. Over het algemeen geldt dat de verliezen toenemen wanneer het verschil met de omgevingstemperatuur toeneemt zoals in de herfst en winter wanneer het buiten kouder wordt. Relatief gezien neemt het verlies echter af aangezien de warmtevraag (en dus transport) ook toeneemt. Voor GWW was het verlies per maand, zowel absoluut als relatief, erg variabel. Hierdoor konden er lastig conclusies aan gebonden worden. Het gemiddelde leek echter rond de 3% te liggen.

Het vergelijken van dit percentage met het verlies van andere systemen was ook lastig omdat er een grote verscheidenheid aan distributiesystemen bestaat. De waarden van deze andere distributiesystemen liggen echter allen tussen de 10 en 30%. Vergeleken bij het verlies van GWW is dit 3 tot 10 keer zo veel.

Daarnaast is de warmte die bij GWW verloren gaat hernieuwbaar. Er gaat dus geen primaire energie verloren, wat het verlies minder ernstig voor het milieu maakt.

Het 3% distributieverlies van GWW kan dan ook beschouwd worden als een goed en duurzaam resultaat.

De hoeveelheid netto energie die in de vorm van aardwarmte bij de kassen is gebruikt, komt overeen met de bespaarde hoeveelheid energie in de vorm van aardgas die zou zijn gebruikt zonder geothermie. Het verbranden van dit aardgas zou ook CO₂-emissies met zich meegebracht hebben. Het gebruik van aardwarmte levert dus maandelijks een besparing op in aardgas en CO₂-uitstoot.

In de onderzoeksperiode werd in een gemiddelde maand ongeveer 14.900 GJ bespaard. Dit betekent 472.000 m³ aardgas en 840.000 kg CO₂. Dit is ongeveer 179.000 GJ, 5.700.000 m³ aardgas en 10.100.000 kg CO₂ per jaar, gerekend met de gemiddelde waarden uit de onderzoeksperiode. Deze hoeveelheid bespaarde aardgas en CO₂ komt al ongeveer overeen met de voorspelde hoeveelheid besparing aan de hand van de P90 waarden vóór de boring.

De bespaarde hoeveelheid aardgas komt verder overeen met het energieverbruik per jaar van:

- 3.550 huishoudens; of
- 3.650 auto's; of
- Eén auto die 1.825 rondjes om de aarde rijdt

De bespaarde hoeveelheid CO₂ komt overeen met:

- de jaarlijkse productie van 1.200 huishoudens; of
- de jaarlijkse productie van 3.450 auto's; of
- de compensatie van 1.920 voetbalvelden vol tropische bomen die een jaar lang groeien

De energetische efficiency van GWW, ofwel de COP, lag gemiddeld in de onderzoeksperiode rond de 40. Dit is een erg goed resultaat, zowel vergeleken met de verwachtingen vooraf (ongeveer 2 maal zo hoog) als met andere vergelijkbare systemen (ongeveer 10 keer zo hoog).

De COP blijkt het hoogst te zijn wanneer de pompen zo laag mogelijk draaien. Wanneer de pompen maximaal draaien zal de COP ongeveer 30 zijn.

Aangezien GWW in de onderzoeksperiode niet maximaal heeft gedraaid, zal de gemiddelde COP in de toekomst dalen wanneer meer bedrijven worden aangesloten, de warmtevraag stijgt en GWW harder zal gaan draaien.

Wanneer GWW voluit draait, is het vermogen van de bron 9,7 MW. Jaarlijks zou GWW hiermee ongeveer 245.700 GJ aan energie op kunnen pompen. De hoeveelheid energie die in de onderzoeksperiode is opgepompt is 78,6% van deze hoeveelheid.

Voluit draaiend zou GWW hiermee een jaarlijkse netto besparing kunnen realiseren van:

- 229.500 GJ aan energie;
- 7.250.000 m³ aardgas; en
- 12.880.000 kg CO₂

Voor het realiseren van de bron zijn grote hoeveelheden staal, cement en elektriciteit nodig geweest. Het produceren van deze benodigdheden kostte in totaal 27.672 GJ aan energie en veroorzaakte 1.735 ton aan CO₂-emissie.

Na aanvang van de energieproductie uit de geothermiebron, is deze hoeveelheid gebruikte energie en uitgestoten CO₂ terugverdiend. Wanneer vanaf augustus gerekend wordt, is de hoeveelheid energie die nodig was voor het realiseren van de bron in oktober terugverdiend. De uitgestoten CO₂ was begin november vereffend.

Naar aanleiding van het onderzoek naar de terugverdientijd van de investering in energie en CO₂ bij de realisatie van de bron, is een sheet gemaakt die huidige en toekomstige operators kunnen invullen voor hun bron; hierop kunnen zij dan aflezen in hoeveel maanden hun investering is terugverdiend.

Aangezien het onderzoek naar de duurzaamheid van GWW snel na het opstarten van de bron heeft plaatsgevonden waardoor de onderzoeksperiode erg kort was, er nog onnauwkeurigheden in de data zaten en er nog niet voluit gedraaid werd, is het verstandig om in de toekomst, wanneer GWW voluit en stabiel draait, nogmaals te onderzoeken hoe duurzaam het systeem is.

Ook kan nog onderzocht worden hoeveel nieuwe bedrijven en/of woningen aangesloten kunnen worden met de hoeveelheid energie die nog (extra) beschikbaar is.

Naast het staal, het cement en de elektriciteit die nodig waren voor het realiseren van de bron, zouden in een vervolgonderzoek ook nog andere materialen en/of investeringskosten meegenomen kunnen worden in de energie en CO₂-analyse. Hierbij kan gedacht worden aan de transportkosten die nodig zijn voor het vervoeren van de materialen.

Voor het verder vergelijken van bijvoorbeeld het distributiesysteem, kan gezocht worden naar systemen die meer overeenkomen met dat van GWW. Ook kan gewacht worden op de realisatie van meer bronnen in Nederland zodat er meer vergelijkingsmateriaal is.

Wanneer meer bronnen in Nederland zijn gerealiseerd, kan ook onderzocht worden wat de duurzaamheid van geothermiebronnen in Nederland in het algemeen is, in plaats van één specifieke bron zoals in dit onderzoek.

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Samenvatting.....	7
1. Inleiding	13
2. Onderzoeksomschrijving	15
3. Geothermie	23
4. Green Well Westland	31
5. Energie.....	37
6. Elektriciteit	43
7. Besparing	47
8. Verdere mogelijkheden	51
9. Well to warmth.....	57
10. Conclusies.....	61
11. Aanbevelingen.....	63
Literatuurlijst	65
Bijlagen	71/i

1. Inleiding

In de 21^{ste} eeuw zal er veel verandering plaats gaan vinden op het gebied van de energievoorziening van de huidige maatschappij. Zo zorgt het gebruik van fossiele brandstoffen door de uitstoot van broeikasgassen voor een versterking van het broeikaseffect. Bovendien zullen deze brandstoffen, waar de huidige samenleving op is gebaseerd, geleidelijk opraken. Er wordt dan ook gezocht naar alternatieve, duurzame energiebronnen om fossiele brandstoffen te kunnen vervangen.

Eén van deze alternatieve energiebronnen is geothermie, aardwarmte, ofwel warmte afkomstig uit het binnenste van de aarde. Ten tijde van dit onderzoek, waren in Nederland slechts enkele geothermiebronnen operationeel. Hierdoor was het (nog) onduidelijk hoe duurzaam deze energiebron precies is. Het realiseren en opstarten van een geothermiebron is een grootschalige operatie die veel geld en energie kost. Het Platform Geothermie wist, gevoelsmatig, dat de energie die een geothermiebron uiteindelijk levert, opweegt tegen de energetische kosten vooraf, maar kon dit niet met cijfers onderbouwen. Het Platform wilde dan ook graag weten hoe deze verhoudingen precies liggen.

Dit rapport bevat de resultaten van het onderzoek naar de duurzaamheid van het geothermische systeem van Green Well Westland, een samenwerking van vijf tuinders die hun kassen op een geothermiebron hebben aangesloten. Het onderzoek is uitgevoerd als afstudeeropdracht van een studente van de studie Climate & Management aan de Haagse Hogeschool, en heeft plaatsgevonden van september 2012 tot januari 2013. De opdrachtgever van het onderzoek was het Platform Geothermie en het is uitgevoerd in samenwerking met de tuinders van Green Well Westland, die hun data beschikbaar hebben gesteld voor het onderzoek.

De hoofdvraag die in het onderzoek is beantwoord luidt:

Hoe duurzaam is het geothermische systeem van Green Well Westland?

Deze vraag is beantwoord in termen van energie en CO₂ met behulp van een aantal deelvragen. Deze deelvragen, de afbakening van het onderzoek, de aanleiding en de gebruikte methodes zijn terug te vinden in hoofdstuk 2.

In hoofdstuk 3 wordt vervolgens ingegaan op wat geothermie precies is, waarna in hoofdstuk 4 het project van Green Well Westland wordt beschreven.

Hoofdstuk 5 richt zich op de hoeveelheid energie die de bron in de onderzoeksperiode heeft geleverd en hoeveel hiervan door de kassen is gebruikt. De verliezen worden hierbij ook bekeken en vergeleken met andere distributiesystemen ter illustratie.

In hoofdstuk 6 komt de COP (Coefficient of Performance) van GWW aan bod waarmee gekeken wordt naar de energetische efficiency van het systeem.

Hoeveel besparing het gebruik van aardwarmte in de onderzoeksperiode heeft opgeleverd, wordt besproken in hoofdstuk 7. Hierbij wordt gekeken naar de besparing in aardgas en CO₂-uitstoot, die vervolgens vergeleken wordt met andere verbruiksposten ter illustratie.

Hoofdstuk 8 gaat in op wat de verdere mogelijkheden van de geothermiebron van GWW zijn, wanneer deze beter benut wordt. 'Beter' wordt hierbij bekeken als de maximale efficiency die mogelijk is (beste COP) en de maximale hoeveelheid warmte die opgepompt kan worden, berekend

op basis van het vermogen van de bron. Deze maximale hoeveelheid energie wordt ook omgerekend in de (extra) besparing die dit op zou leveren.

In hoofdstuk 9 worden de productiekosten (in energie en CO₂) van de belangrijkste benodigdheden voor het realiseren van de geothermiebron berekend. Deze benodigdheden zijn afgebakend tot het staal van de transportleidingen, het staal van de casings in de putten, het cement tussen deze casings en de benodigde elektriciteit voor de boring. Deze productiekosten worden vervolgens vergeleken met de besparing in de onderzoeksperiode en bij maximale energieproductie, waarna wordt berekend in hoeveel maanden de investering in energie en CO₂ weer is 'terugverdiend'.

Ten slotte staan in hoofdstuk 10 de conclusies van het onderzoek met in hoofdstuk 11 de aanbevelingen die hieruit volgden.

2. Onderzoeksomschrijving

2.1 Aanleiding

Dit onderzoek is tot stand gekomen in samenwerking met de opdrachtgever, het Platform Geothermie. De aanleiding van het onderzoek staat hieronder bij 'Platform Geothermie' beschreven. Na het in hoofdlijnen opzetten van een onderzoeksvoorstel, is Green Well Westland benaderd of zij interesse hadden om aan het onderzoek mee te werken. Hun motivatie waardoor zij hierop in zijn gegaan, staat onder het kopje 'Green Well Westland'.

Platform Geothermie

Het Platform Geothermie is een non-profit organisatie die de toepassing van geothermie in Nederland wil bevorderen. Dit wordt onder andere gedaan door kennis te verspreiden over deze energiebron. (Platform Geothermie, 2012j) Geothermie wordt nog niet zo lang toegepast in Nederland; in totaal zijn nu een tiental projecten in Nederland gerealiseerd of in aanbouw. Het is dan ook een dynamisch werkveld waar tegenslagen en nieuwe ontdekkingen frequent voorkomen. Doordat de branche in Nederland nog zo jong is, zijn er veel aanleidingen tot de probleemstelling en doelstelling van dit onderzoek. Zo werd voorafgaand aan de projecten in Nederland bijvoorbeeld gedacht, dat de Coefficient of Performance (COP, een maat voor efficiëntie en duurzaamheid, zie ook hoofdstuk 6) van een geothermiebron zo rond de 30 zou liggen, wat relatief hoog is vergeleken met bijvoorbeeld een warmtepomp (COP van 4, zie ook hoofdstuk 6). (Platform Geothermie, 2012g) Vanwege problemen bij het terugpompen van water in de diepe ondergrond (ook wel injectiviteitsproblemen genoemd), kan de COP echter substantieel lager uitvallen, namelijk rond de 10 à 15. Dit is nog steeds relatief hoog vergeleken met een warmtepomp, maar zeker doordat de realisatiekosten in geld en energie van een bron ook erg hoog zijn (zie hoofdstuk 3 en 9), is het van belang om te weten hoe duurzaam geothermie nu werkelijk is.

Meer algemeen bestaat er discussie over de duurzaamheid van hernieuwbare energiebronnen. Vaak wordt gedacht dat deze 100% duurzaam zijn, wat niet waar is; voordat bronnen in werking genomen kunnen worden, kost het soms veel energie om deze te realiseren en op te starten. Zo moet voor geothermie eerst een bron geboord worden, wat de nodige energiekosten met zich meebrengt, voordat er warmte uit de diepe ondergrond gewonnen kan worden. Verder moeten de pompen van een geothermie bron draaiend gehouden worden; dit kost ook energie.

Aan de andere kant is het vaak onduidelijk hoe hoog deze kosten nu eigenlijk zijn. Door de onbekendheid zijn er ook mensen die deze aspecten gebruiken als een argument dat duurzame energiebronnen, zo ook geothermie, niet nuttig zijn als duurzame bron.

Hierdoor is het van belang dat er duidelijkheid komt over de mate van duurzaamheid.

(Platform Geothermie, 2012g)

Green Well Westland

Voor de eigenaren van Green Well Westland geldt dat ze gevraagd zijn of zij mee wilden werken aan dit onderzoek. GWW heeft duurzaamheid hoog in het vaandel staan; de eigenaren willen graag hun steentje bijdragen aan het gebruiken van duurzame energie, en zijn blij met hun geothermiebron

waarbij ze dit hebben gerealiseerd op een manier die ook financieel aantrekkelijk voor hen is. Zo is er sprake van een combinatie van maatschappelijk en eigen belang.

Vanuit hun duurzaamheidsovertuiging hebben ze dan ook ingestemd met het leveren van data ten behoeve van dit onderzoek, waarbij ze zelf ook interessante informatie zullen krijgen over de duurzaamheid van hun project. Er spelen bovendien ideeën om meer bedrijven en wellicht ook woningen aan te sluiten op hun geothermiebron. Met het oog op deze ontwikkelingen zijn ze ook geïnteresseerd in de uitkomsten van het onderzoek waarbij duidelijk zal worden wat de verdere mogelijkheden van hun geothermiebron zijn.

2.2 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek is duidelijkheid scheppen in de duurzaamheid van een geothermisch systeem, op het gebied van energiegebruik en CO₂-emissies.

Daarnaast hebben de twee betrokken partijen ook elk een eigen doelstelling wat betreft dit onderzoek. Deze worden hieronder besproken.

Platform Geothermie

Zoals in de aanleiding al werd aangegeven, is het doel van het Platform het bevorderen van de toepassing van geothermie in Nederland. Dit gebeurt onder andere door middel van het verspreiden van kennis. Het Platform wil graag onduidelijkheden rond geothermie ophelderen en zo open mogelijk communiceren over alle voor- en nadelen. Het Platform heeft geen belang bij het rooskleuriger voorstellen van feiten dan ze zijn: het is een non-profit organisatie die veel verschillende groepen vertegenwoordigt.

Voor het Platform is het doel van dit onderzoek dan ook de hieruit verkregen informatie gebruiken in de communicatie en verspreiding van kennis.

Green Well Westland

Zoals gezegd vindt Green Well Westland duurzaamheid erg interessant. De eigenaren hebben dan ook als doelstelling het verbreden van hun kennis op dit gebied en het creëren van draagvlak voor geothermie. Daarnaast zouden ze het ook kunnen gebruiken voor eventuele verbeteringen of het verder uitwerken van hun ideeën om eventueel nog meer bedrijven en woningen aan te sluiten op hun geothermienetwerk (zie ook paragraaf 2.1).

2.3 Probleemstelling

In deze paragraaf worden de hoofd- en deelvragen gegeven die centraal staan in het onderzoek. De verschillende termen die gebruikt zijn, worden in de volgende paragrafen ‘definities’ en ‘beperkingen en randvoorwaarden’ nader toegelicht en afgebakend.

Hoofdvraag:

Hoe duurzaam is het geothermische systeem van Green Well Westland?

Deelvragen:

Kassen

- Hoeveel energie wordt gebruikt bij de verwarming van de kassen?
- Welke besparingen (kwantitatief en kwalitatief) van aardgas en CO₂-emissies komen tot stand door het gebruik van aardwarmte in plaats van aardgas?

Verliezen

- Wat zijn de warmteverliezen door distributie van de warmte naar de bedrijven?
- Hoe significant zijn deze verliezen?

Energetische efficiency

- Wat is het energieverbruik van de pompen vergeleken met de geleverde energie van de bron? (Ofwel de COP, kwantitatief en kwalitatief?)

Verdere mogelijkheden

- Hoeveel warmte kan in totaal maximaal gewonnen worden uit de bron?
- Hoeveel (extra) besparing van aardgas en CO₂-emissies zou dit opleveren?

Opstarten (eenmalig)

- Wat is de 'well to warmth' efficiency?

2.4 Definities

- Het geothermische systeem:

Tot dit systeem behoort de gehele geothermische bron (inclusief aanleg en pompen e.d.), de leidingen waardoor de warmte getransporteerd wordt en de warmtevraag en -gebruik van de kassen.

- Het gebruik van aardgas:

Als referentie wordt in het onderzoek vergeleken met een situatie waarin de gebruikte warmte wordt opgewekt met behulp van aardgas.

- 'Well to warmth' efficiency:

Het begrip 'well to warmth' is voor dit onderzoek afgeleid van het bestaande begrip 'well to wheel' waarin voor een vervoermiddel niet alleen gekeken wordt naar brandstofverbruik en CO₂-uitstoot, maar ook naar de productie van de brandstof of energiedrager. (Groenopweg, 2012) Voor het onderzoek betekent dit dat ook bekeken zal worden hoeveel energie voor de boring nodig was, en hoeveel CO₂ tijdens de boring is uitgestoten.

2.5 Beperkingen en randvoorwaarden

Het onderzoek liep van september tot januari en heeft 17 weken in beslag genomen. Hierin is er fulltime aan gewerkt onder begeleiding van de Haagse Hogeschool en het Platform Geothermie. Deze twee partijen hebben gedurende het onderzoek feedback gegeven.

In de hoofd- en deelvragen wordt een aantal begrippen genoemd die nadere afbakening behoeften. Hieronder staan deze omschreven.

Begrippen uit hoofd- en deelvragen

- Duurzaam:

De beoordelingscriteria voor de 'duurzaamheid' van het systeem bestonden uit het bepalen van de reductie van CO₂(-uitstoot) en fossiel energie (gebruik) ten opzichte van de referentiesituatie, dus bij het gebruik van aardgas in plaats van aardwarmte. Naast deze kwantitatieve bepalingen, zijn de resultaten ook kwalitatief omschreven door te vergelijken met andere situaties. Hierbij was het niet de intentie om uitputtend te zijn, maar om een beeld te schetsen van de situatie zodat het in perspectief geplaatst kon worden.

- Significantie van de verliezen in het warmtenet:

Aangezien aardwarmte een hernieuwbare energiebron is, wordt geen fossiele energie verspild zoals bij aardgas. Daarom is met deze deelvraag onderzocht hoeveel procent van de warmte verloren gaat (kwantitatief) en hoe belangrijk dit deel is (kwalitatief). Ook hierbij geldt dat vergeleken is met andere situaties (niet uitputtend) zodat het resultaat in perspectief geplaatst kon worden.

- Energetische efficiency:

Ook bij het bepalen van de COP zal het resultaat (niet uitputtend) in perspectief geplaatst worden.

- Verdere mogelijkheden

Tijdens het grootste deel van de onderzoeksperiode heeft GWW niet voluit gedraaid; de warmtevraag was kleiner dan wat de geothermiebron zou kunnen leveren. Bij deze deelvraag is onderzocht wat de bron maximaal zou kunnen produceren en hoeveel (extra) besparing dit zou opleveren.

- 'Well to warmth':

Bij deze berekening is de boring van de geothermie bron bekeken. Om te voorkomen dat het uitdiepen van dit onderwerp zou stranden in een vrijwel onuitputtelijke reeks van (energie)productiekosten, is de 'well to warmth' analyse, in overleg met het Platform Geothermie, afgebakend tot de vier meest relevante onderdelen:

De energiekosten voor

- het realiseren van de bron zelf;
- het produceren van de casings van staal in de boorput;

- het produceren van de leidingen waardoor de warmte getransporteerd zal worden, en
- het produceren van het cement voor tussen de casings.

In hoofdstuk 9. Well to warmth, zal de keuze voor deze materialen verder worden toegelicht.

Bij het beantwoorden van deze vraag zal ook berekend worden wat de 'terugverdientijd' is van de benodigde energie en uitgestoten CO₂, ofwel hoe lang het duurt totdat er evenveel energie en CO₂-uitstoot bespaard is als er is gebruikt en uitgestoten bij het realiseren van de bron. Dit zal gedaan worden voor de huidige besparing en voor de maximale besparing zoals bepaald bij 'verdere mogelijkheden'.

- Energiekosten:

De term 'kosten' of 'energiekosten' is regelmatig voorbij gekomen in het onderzoek, en daardoor ook in dit document. Hiermee worden de energetische kosten bedoeld en niet de kosten uitgedrukt in geld, tenzij expliciet anders aangegeven.

Verdere afbakening

Naast de afbakening van de begrippen uit de hoofd- en deelvragen, zijn er ook andere onderwerpen en onderdelen die afbakening of verduidelijking behoeften. Daarnaast zijn er een aantal zaken naar voren gekomen gedurende de onderzoeksperiode die het onderzoek op één of meerdere manieren beïnvloedden. Deze zijn hieronder omschreven.

Green Well Westland is in 2012 begonnen met het produceren van warmte uit hun geothermie bron. Deze productie was niet vanaf het begin optimaal; er moest eerst een testfase doorlopen worden waarna de productie geleidelijk werd uitgebreid (zie hoofdstuk 5 en 6). Dit had een aantal gevolgen voor het onderzoek:

- Vanuit Green Well Westland en hun adviseur Agro AdviesBuro is het verzoek gekomen om het onderzoek en bijbehorende resultaten niet te publiceren. Green Well Westland zit nog in het beginstadium van het productieproces, en zij vinden dat het stadium van openbaring van de resultaten nog niet is bereikt.
Naar aanleiding hiervan is dan ook afgesproken dat dit document niet openbaar gemaakt zal worden. Na afronding van de afstudeerfase zal in overleg met de verschillende partijen besloten worden welke delen wel en niet openbaar gemaakt kunnen worden.
- Daarnaast geeft Agro AdviesBuro aan dat de data die gebruikt is voor het onderzoek (zie o.a. bijlage B en D) nog meeton nauwkeurigheden bevat; in bijlage D wordt hier dieper op ingegaan. Voor het onderzoek had dit tot gevolg dat de resultaten goede inschattingen zijn geworden, maar wel enigszins kunnen afwijken van de werkelijkheid. Hier zal in de aanbevelingen op terug gekomen worden.
- Besloten is om de data per maand te analyseren aangezien maandelijkse periodes gebruikelijk zijn bij het bekijken van energiegerelateerde onderwerpen. Bovendien zijn zo bepaalde onnauwkeurigheden, zoals vertragingen in het systeem op dagelijkse schaal, eruit

gefilterd. Ook zijn de verbruiken bij de kassen onderhevig aan fluctuaties. Deze zijn niet meegenomen vanwege vertrouwelijkheid (zie hieronder).

Op maandelijkse schaal zijn al deze variaties niet meer van belang.

Bij het analyseren van de data per maand moest wel met een aantal dingen rekening worden gehouden:

- In de maand juni is begonnen met het testdraaien van de bron, waarbij in eerste instantie onregelmatig gedraaid werd en veel dingen werden uitgeprobeerd. Door de onregelmatigheid waren de maanden juni en juli niet bruikbaar voor het onderzoek; deze zijn dan ook niet meegenomen.
 - In augustus werd al wat regelmatig gedraaid, met voortzetting in september. De pompen zijn nog wel vaak uitgezet, vooral 's nachts, maar er werd al wel flink gedraaid. Deze twee maanden worden dan ook wel meegenomen in het onderzoek, maar beschouwd als 'testmaanden'.
 - Vanaf oktober werden de pompen vrijwel nooit meer uitgezet en is er continu gedraaid. Oktober, november en december zijn dan ook meegenomen als volledig draaiende maanden.
Zoals eerder al gezegd, werd ook in deze maanden echter nog niet voluit gedraaid, aangezien er meer warmte beschikbaar was dan GWW nodig had. In (onder andere) hoofdstuk 8 en bijlage D wordt hier verder op ingegaan.
 - Halverwege december zijn nog twee andere bedrijven aangesloten op GWW (zie hoofdstuk 4). Aangezien dit zo laat in de onderzoeksperiode gebeurde, konden deze bedrijven en hun aansluitingen niet meer meegenomen worden in het onderzoek. De warmte die ze gebruikt hebben in de tweede helft van december is wel meegenomen, aangezien deze niet gescheiden kon worden gezien van de rest van het systeem.
- Er is met GWW afgesproken geen gegevens op te nemen van de individuele kassen; het onderzoek zou alleen betrekking hebben op het systeem GWW als geheel. Dit is gedaan om de privacy van de individuele kassen te waarborgen.
 - Voor de vergelijking met aardgas, zou in eerste instantie data gebruikt worden van het verbruik van de kassen in voorgaande jaren. Om verscheidene redenen, waaronder dus vertrouwelijkheid, heeft dit geen doorgang kunnen vinden. In plaats daarvan is gekeken hoeveel aardgas het zou hebben gekost om de warmte die nu is verkregen met geothermie op te wekken met behulp van aardgas. Dit geeft ook een beter resultaat dan vergelijken met voorgaande jaren, omdat zo de invloed van buitenaf die steeds wisselt (temperatuur e.d.) buiten beschouwing wordt gelaten.
 - Bij het verwerken en analyseren van de data moest ook rekening gehouden worden met de beperkingen van de data en de aannames die de gebruikte methode met zich meebracht. Deze zijn beschreven in bijlage D.

In de hoofdstukken conclusies en aanbevelingen wordt ingegaan op wat het onderzoek voor resultaten heeft opgeleverd. Hier zal ook worden ingegaan op wat de gevolgen zijn geweest van bovenstaande afbakeningen op de resultaten.

2.6 Methode van onderzoek

Voor het onderzoek zijn verschillende methodes gebruikt, zowel kwantitatief als kwalitatief. Zo moesten voor alle deelvragen berekeningen uitgevoerd worden waarvoor data is verzameld (kwantitatief). Om de resultaten van de berekeningen in perspectief te kunnen plaatsen, zijn deze echter ook (kwalitatief) vergeleken met andere situaties (bijvoorbeeld andere verbruiksposten) om een beeld te kunnen schetsen van hoe veel of weinig het resultaat was. Hierbij was het niet de intentie om uitputtend te vergelijken met alle verschillende situaties, maar slechts een (kwalitatieve) indicatie van de resultaten te geven.

Daarnaast is zowel deskresearch als fieldresearch toegepast: er is immers gewerkt met nieuwe gegevens uit het veld die geanalyseerd zijn, maar er is ook gezocht naar al bestaande gegevens om de resultaten uit het onderzoek mee te kunnen vergelijken.

Hieronder volgt een opsomming van de verschillende methoden die zijn toegepast.

- **Gesprekken:**
In de loop van het onderzoek hebben fysieke gesprekken met verscheidene partijen (experts) plaatsgevonden. Deze gesprekken waren niet-geleid: er is van te voren bedacht welke informatie verkregen moest worden, waarna de gesprekken die kant zijn opgestuurd zonder leidraad van interviewvragen. Het voornaamste doel van de gesprekken was echter (achtergrond)informatie over bepaalde onderwerpen vergaren, waardoor een bredere basiskennis ontstond en besloten kon worden welke informatie relevant was om op te nemen in het onderzoek.
Zo is bijvoorbeeld meer achtergrond verkregen over (het ontstaan van) Green Well Westland, maar zijn ook specifieke gegevens achterhaald die nodig waren voor de data-analyse (zie hieronder). Voorbeelden van partijen waarmee gesprekken hebben plaatsgevonden zijn Green Well Westland zelf, T&A Survey en Agro AdviesBuro.
- **Data-analyse:**
De data die via GWW kon worden verkregen moest eerst geselecteerd worden op relevantie voor het onderzoek. Hierna is de data geanalyseerd. Welke keuzes hierbij gemaakt zijn en hoe de analyse precies heeft plaatsgevonden staat beschreven in bijlage D. De belangrijkste conclusies hieruit staan ook beschreven in hoofdstuk 5.
- **Contacten leggen:**
Naast de data van GWW was nog meer informatie en data nodig om de probleemstelling te onderzoeken, bijvoorbeeld gegevens voor de 'well to warmth'. Hiervoor is contact gezocht (zowel via e-mail als telefonisch) met bedrijven die materiaal hebben geleverd aan Green Well Westland.

- Literatuur- en bronnenonderzoek:

Naast het verzamelen en verwerken van data, is ook literatuur- en bronnenonderzoek gedaan. Dit was nodig om de resultaten kwalitatief te kunnen vergelijken en om meer algemene (basis)informatie te vinden, bijvoorbeeld voor hoofdstuk 3. Geothermie.

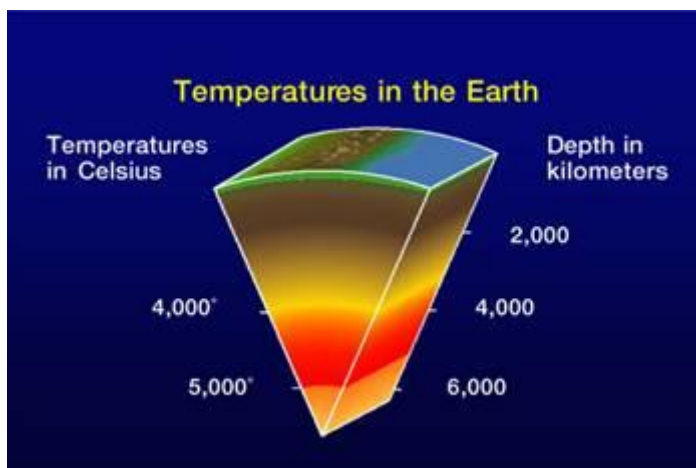
De benodigde informatie is op verschillende manieren gevonden, zoals met behulp van zoekmachines op verscheidene websites, boeken en brochures, maar ook in wetenschappelijke artikelen of statistische instellingen als het CBS.

3. Geothermie

Geothermie, ofwel aardwarmte, is warmte afkomstig uit het binnenste van de aarde. Deze warmte is voornamelijk een product van natuurlijke nucleaire vervalprocessen in de kern. (Platform Geothermie, 2012 a) Hierdoor is het zo'n 5.000°C in de kern, die zich op ongeveer 6.000 kilometer van de aardkorst bevindt (zie afbeelding 3.1). (Geothermal Energy Association, 2009)

De warmte uit de diepe ondergrond kan gebruikt worden als energiebron en wordt beschouwd als duurzaam (zie 3.5). 'Diep' betekent in de mijnbouwwet dieper dan 500 meter; in de praktijk komt het bij geothermie echter altijd neer op meer dan 1.500 meter vanwege de daar beschikbare temperaturen (zie 3.1). Wanneer de warmte van diep genoeg komt, kan ze ook voor de opwekking van elektriciteit gebruikt worden, maar dit zal hier buiten beschouwing gelaten worden aangezien het niet van belang is voor het onderzoek. Hetzelfde geldt voor ondiepe geothermie, waarbij warmte op lagere temperatuur beschikbaar is; deze warmte moet eerst nog opgewaardeerd worden met bijvoorbeeld een warmtepomp, wat 'indirect use' wordt genoemd. In dit onderzoek is alleen sprake van 'direct use' zonder opwaardering door middel van warmtepompen.

Bovenstaande toepassingen worden niet meegenomen in het onderzoek omdat Green Well Westland alleen de (directe) warmte van de geothermiebron gebruikt en hier geen elektriciteit van maakt. In dit hoofdstuk zal dan ook alleen ingegaan worden op diepe geothermie als energiebron voor warmte.



Afbeelding 3.1 – Temperatuurverloop in de aarde (Geothermal Energy Association, 2009)

3.1 Potentieel

In Nederland zorgt de warmte in de aarde voor een warmtestroom van ongeveer 0,063 W/m² aan het oppervlak de atmosfeer in. Jaarlijks betekent dit dat er in Nederland zo'n 100 PJ (Peta Joule, ofwel 100*10¹⁵J) aan warmte 'uitgestraald' wordt door de aarde. Wanneer er echter geboord wordt naar warmte en deze op diepte gewonnen wordt in plaats van aan het oppervlak, is de hoeveelheid te winnen warmte nog veel groter. In Nederland geldt bijvoorbeeld dat voor elke 100 meter vanaf het aardoppervlak richting de kern van de aarde, de temperatuur zo'n 3 tot 4°C toeneemt. (Lokhorst et al., 2007) Dit betekent dat de kwaliteit van de energie (exergie) toeneemt met de diepte, waardoor er meer toepassingsmogelijkheden zijn voor de gewonnen energie.

Het economisch winbare potentieel in de Nederlandse ondergrond tot 4 kilometer, is in 2011 door TNO ingeschat op ongeveer 85.000 PJ. Ter vergelijking, 1 PJ komt overeen met het jaarverbruik van 25.000 bestaande of 40.000 energiezuinige woningen. (Platform Geothermie, 2012 a,b)

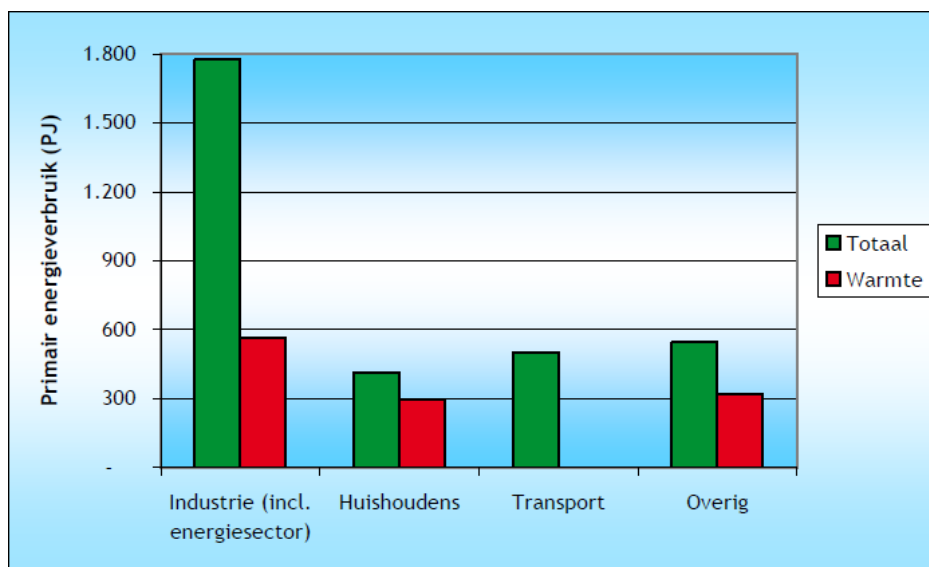
De totale hoeveelheid warmte die in Nederland jaarlijks gebruikt wordt, is ongeveer 1.200 PJ.

(Schepers, 2010) Hiervan wordt ongeveer 300 PJ gebruikt door huishoudens (zie afbeelding 3.2).

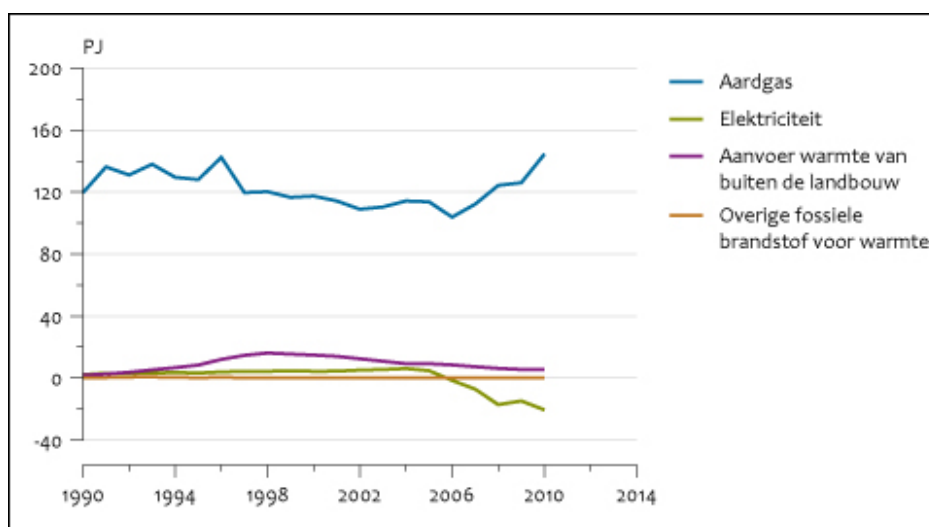
Voor glastuinbouwers geldt dat ze rond de 130 PJ aan energie gebruiken. Een deel hiervan wordt echter gebruikt voor het opwekken van elektriciteit door middel van Warmtekrachtkoppeling (WKK) die ze ook weer gedeeltelijk verkopen. LEI en CBS zeggen in hun rapport uit 2011 dat in 2008 114 PJ werd gebruikt voor eigen gebruik. Afbeelding 3.3 ondersteunt dit beeld: de elektriciteit is negatief vanaf 2006, wat betekent dat er meer geproduceerd (en verkocht) wordt dan gebruikt. Wanneer dit van het aardgas afgehaald wordt, ligt het verbruik inderdaad rond de 114 PJ, wat voor het grootste deel uit warmte bestaat.

Het gasverbruik voor het opwekken van elektriciteit (WKK) wordt niet meegenomen in dit onderzoek.

De hoeveelheid energie die alleen voor het verwarmen van de kassen wordt gebruikt ligt volgens Green Deal rond de 90 PJ.



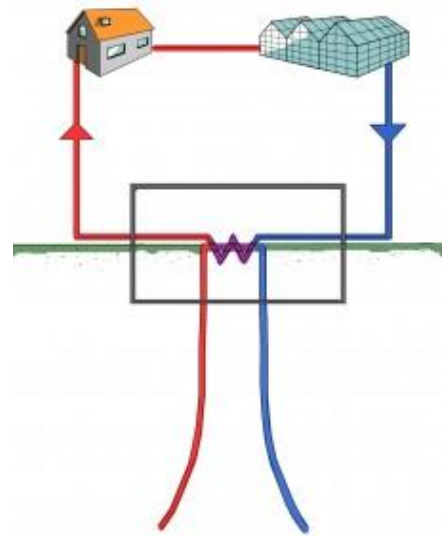
Afbeelding 3.2 – Aandeel van warmte in het energieverbruik per sector (Schepers, 2010)



Afbeelding 3.3–Energieverbruik glastuinbouw, grotendeels warmte (Compendium voor de Leefomgeving, 2012a)

3.2 Techniek

Om de aardwarmte te gebruiken voor het verwarmen van ruimten zoals kassen en huizen, moet deze warmte eerst omhoog gehaald worden uit de diepe ondergrond. Dit gebeurt door middel van twee putten: een productieput en een injectieput, die samen een doublet genoemd worden. In de productieput wordt water opgepompt van dieptes vanaf 1,5 km; vanaf die diepte is het water warm genoeg om direct gebruikt te kunnen worden voor het verwarmen van ruimtes, zonder het gebruik van warmtepompen. De warmte wordt door middel van een warmtewisselaar overgezet op een ander watercircuit dat richting de te verwarmen ruimtes gepompt wordt. Het afgekoelde 'aardwater' wordt vervolgens weer geïnjecteerd in de diepe ondergrond, in dezelfde laag als waar het vandaan kwam. Zo blijft de druk in de ondergrond gelijk en bovendien is het water te zout om op het oppervlaktewater te kunnen lozen. Zie afbeelding 3.4. (Platform Geothermie, 2012 d)

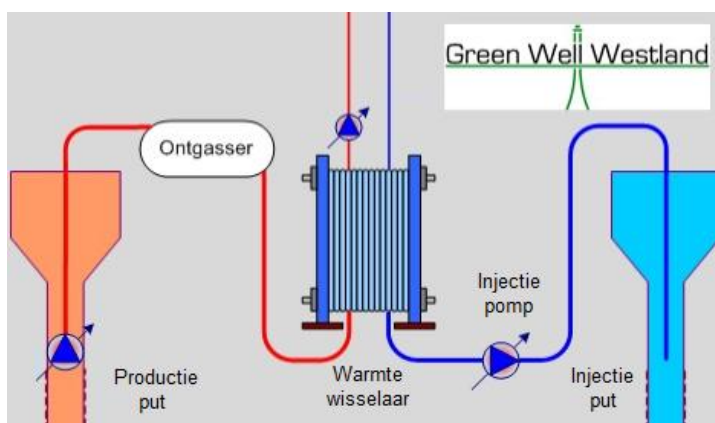


Afbeelding 3.4 – Vereenvoudigde afbeelding van een geothermisch systeem (Platform Geothermie, 2012 c)

Een gedeelte van het systeem op afbeelding 3.4 is omlijnd met een zwart kader. Dit gedeelte is op afbeelding 3.5 wat gedetailleerder systematisch weergegeven. De afbeelding is een vereenvoudigde weergave van het systeem van Green Well Westland (zie ook hoofdstuk 4 en bijlage B). Grofweg heeft elk geothermisch systeem een dergelijke opbouw:

Het water wordt omhoog gepompt door middel van een pomp in de productieput. Vervolgens gaat het water richting de ontgasser om eventueel meegekomen gas te verwijderen; dit wordt, indien mogelijk, gebruikt voor andere doeleinden. Hierna gaat het water naar een warmtewisselaar waar de warmte overgezet wordt op het watercircuit dat richting de te verwarmen ruimtes gaat. Vanuit de warmtewisselaar gaat het water uit het eerste circuit weer richting de injectieput waar het met behulp van een injectiepomp de diepe ondergrond ingepompt wordt. Voor elk onderdeel in afbeelding 3.5 geldt dat er meer van kunnen voorkomen in één geothermisch systeem. Zo heeft Green Well Westland bijvoorbeeld drie warmtewisselaars en twee injectiepompen, maar er zijn systemen die ook uit meerdere productie- en injectieputten bestaan.

In hoofdstuk 4 wordt nog dieper ingegaan op het systeem van Green Well Westland.



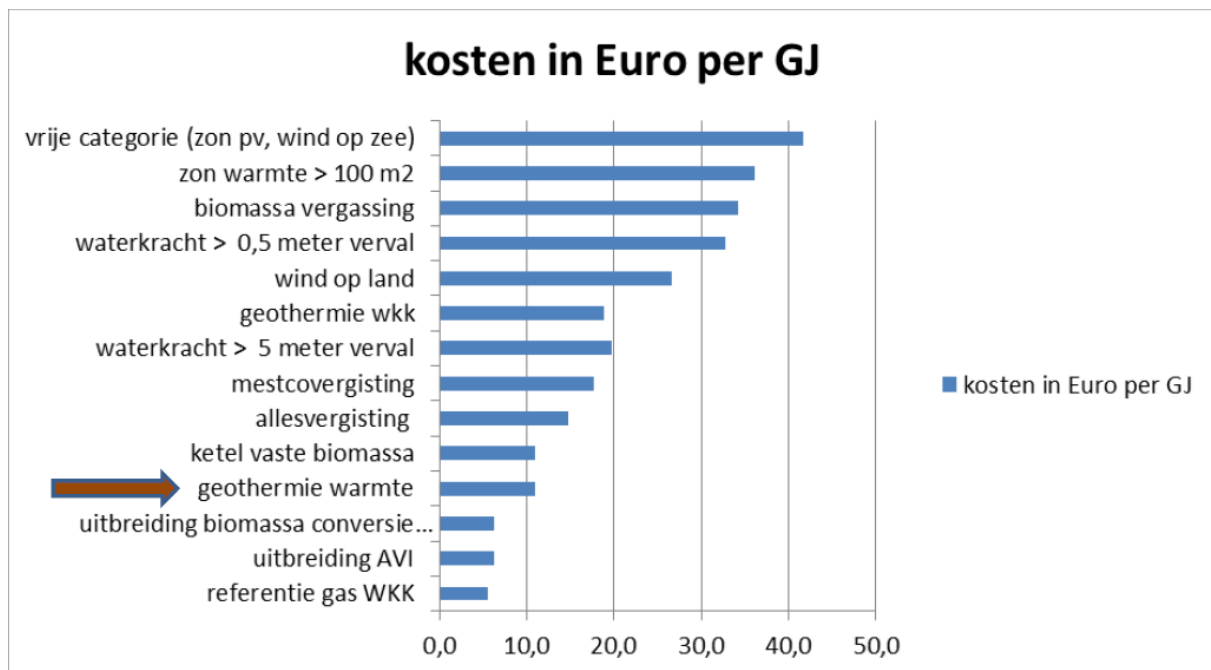
Afbeelding 3.5 – versimpelde weergave van het systeem van GWW (bewerkte afbeelding van bijlage B)

3.3 Voordelen

Het gebruik van geothermie brengt een aantal voordelen met zich mee.

Om te beginnen is het een duurzame energiebron (zie paragraaf 3.5) die nauwelijks CO₂ uitstoot. Ook zorgt de bron voor weinig geluidsoverlast wanneer de boring is afgerond, neemt nauwelijks plek in, waardoor er ook vrijwel geen visuele hinder optreedt en produceert geen ander afval. (Platform Geothermie, 2012 c,e)

Bovendien is geothermie vergeleken met andere hernieuwbare energiebronnen één van de goedkoopste in Euro per GJ opgewekte energie. Dit is gebleken uit een studie van ECN en KEMA in 2011; het Platform heeft deze gegevens vervolgens overzichtelijk in een grafiek geplaatst (zie afbeelding 3.6). Ook de kosten in Euro per vermeden kg CO₂ blijken voor Geothermie vaak het laagst te zijn. Volgens het Platform (2012 e) tonen vergelijkende studies dit keer op keer aan. Daarnaast is geothermie in verschillende opzichten zeer stabiel. Zo is de warmtelevering, in tegenstelling tot andere hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie, regelbaar en geheel onafhankelijk van seizoenen, en zijn de kosten in euro voor lange tijd stabiel en voorspelbaar.



Afbeelding 3.6 – Vergelijking kosten van hernieuwbare energiebronnen in €/GJ (Platform Geothermie, 2012 f)

3.4 Nadelen

Een nadeel van geothermie, is de hoge kosten in Euro die de boring en installatie van het systeem met zich meebrengt. Vóór de bron klaar is om energie te leveren, heb je al 70% van alle kosten uitgegeven die de geothermiebron in totaal met zich mee zal brengen. (Platform Geothermie, 2012 e) Daarbij komt dat er onzekerheid bestaat over wat de bron zal opleveren. Van tevoren wordt er geologisch onderzoek uitgevoerd om te bepalen waar het beste geboord kan worden. Dit verkleint de kans op een zogenaamde 'misboring' waarbij de capaciteit van de bron lager uitvalt dan verwacht. (Platform Geothermie, 2012 c) Er is echter pas zekerheid over wat de bron op zal leveren wanneer deze daadwerkelijk geboord is. (ADEME, 2012)

Verder zal zich bij de uitgang van de injectiebron in de diepe ondergrond een koude gebied gaan ontwikkelen. Deze koude zal zich verder gaan verspreiden en uiteindelijk (door onder andere de zuigende werking aan de productie kant) na verloop van tijd de productieput bereiken, waardoor het rendement van de geothermische bron zal dalen. Wanneer de temperatuurdaling 5% is, wordt er gesproken van een 'doorbraak' van het koudere water bij de productieput. Om deze doorbraaktijd zo lang mogelijk te maken, worden de twee putten schuin uit elkaar geboord, zodat de onderlinge afstand in de diepe ondergrond ongeveer 1,5 km is. Het geïnjecteerde water krijgt zo de kans om weer opgewarmd te worden door de omgeving voordat het de productieput bereikt. Over het algemeen wordt aangenomen dat na ongeveer 30 jaar de temperatuur van het water bij de productieput zal gaan dalen. (Platform Geothermie, 2012 c) Dit betekent niet dat de put meteen onbruikbaar is, maar dat het rendement steeds lager zal worden; 30 jaar wordt vaak aangehouden als criterium en ondergrens bij het ontwerp. Uiteindelijk zal het rendement te laag worden, waarna naar alternatieven gezocht moet worden. Een oplossing is bijvoorbeeld vanuit dezelfde (bovengrondse) locatie een andere richting op te boren en zo dus een nieuwe productieput te realiseren. Na tientallen jaren (ruim 100 jaar als grove schatting) zal de oude bron weer voldoende op temperatuur zijn gekomen om opnieuw gebruikt te kunnen worden. Zowel de doorbraaktijd van 30 jaar als de regeneratietijd, zijn afhankelijk van verschillende factoren en daardoor lastig exact te voorspellen. Zo zal het aantal jaren dat een bron gebruikt kan worden aanzienlijk meer zijn, wanneer de productie- en injectieput verder uit elkaar liggen. Bij een grotere afstand is er echter wel weer meer pompkracht nodig en het boren zelf wordt ook duurder. Er wordt dan ook geprobeerd om een optimum te vinden van levensduur, kosten in geld, risico en elektriciteitsgebruik. (Platform Geothermie, 2012 c, g)

3.5 Duurzaamheid

Door de uitkoeling kan gezegd worden dat geothermie niet 100% hernieuwbaar is; de bron koelt immers af en is na verloop van tijd niet bruikbaar meer. Wanneer de regeneratietijd echter vergeleken wordt met die van aardolie, is geothermie beduidend hernieuwbaarder: aardolie heeft minimaal enkele miljoenen jaren nodig om te ontstaan tegenover de ± 100 jaar die een geothermiebron nodig heeft om weer opgewarmd te worden. (Marschall-Wesselingh, 2003) Ook Rybach (2003) geeft aan dat de regeneratietijd van een geothermiebron dezelfde orde van grootte heeft als zijn operationele tijd, op een tijdschaal van technologische en sociale systemen. En hoewel de temperatuurdaling gezien vanaf het oppervlak van de aarde prominent aanwezig is, is deze voor de ondergrond zelf verwaarloosbaar: de hoeveelheid energie die in de ondergrond zit is veel groter. (Platform Geothermie, 2012 a) De Geothermal Energy Association (2009) geeft aan dat de voorraad energie voor ons als onuitputtelijk beschouwd kan worden: de totale warmtestroom vanuit de kern naar het aardoppervlak wordt geschat op 42 miljoen MW en de verwachting is dat dit nog voor miljarden jaren zo zal blijven. Geothermie als energiebron wordt dan ook gezien als duurzaam.

3.6 Beleid

Om te voldoen aan de Europese eis om in 2020 14% van de benodigde energie duurzaam op te wekken, moet er voor methodes gekozen worden die een flinke bijdrage kunnen leveren.

Geothermie is hiervoor een goede optie omdat het veel warmte oplevert tegenover lage kosten (zie afbeelding 3.6). Volgens het Actieplan Aardwarmte (Ministerie van EL&I, 2011) is een bijdrage van 11 PJ door aardwarmte in 2020 niet ondenkbaar. Zoals in paragraaf 4 genoemd, is het opzetten van een geothermiebron echter wel een grote investering. Deze kosten zijn afhankelijk van zeer veel variabelen en de kosten hiervoor kunnen dan ook alleen (zeer) grof geschat worden. Op een diepte van 1.600 – 3.200 meter (wat overeenkomt met een vermogen van ongeveer 6 MWth – 20 MWth) zou dan gezegd kunnen worden dat de kosten grofweg € 1,5 miljoen per MWth zijn. (Platform Geothermie, 2012g) Om deze investering aantrekkelijker te maken, zijn er een aantal subsidies en regelingen die aangesproken kunnen worden.

Sinds 2012 kan bijvoorbeeld de SDE+ regeling (Stimulering Duurzame Energie) ook voor geothermische warmte aangevraagd worden. Dit is een vergoeding per geproduceerde GJ. In de folder 'Maak kennis met de SDE+ 2012' staat te lezen hoe de vergoeding tot stand komt.

(AgentschapNL, 2012b) Uit deze folder is af te leiden dat voor een geothermie referentieproject met een vermogen van 7,2 MWth (waarvan de kosten grofweg $(1,5 * 7,2 =)$ € 10,8 miljoen bedragen) een maximale subsidie van ongeveer € 1.000.000 per jaar is aan te vragen. Dit bedrag is erg variabel en neemt in de tijd ook in waarde af doordat er met nominale bedragen gerekend wordt. Voor meer uitleg over de herkomst en waarde van het bedrag zie bijlage A.

Om het risico van een misboring te ondervangen bestaat er de garantie van geologisch risico, ofwel de SEI Aardwarmte regeling. Deze geldt wanneer de capaciteit van de bron lager uitvalt dan onderzoek heeft voorspeld. Het werkt als een verzekering: van te voren wordt een premie betaald (van 7% van het te verzekeren bedrag) en wanneer het resultaat van de boring tegenvalt (minder dan 75% van het verwachte vermogen) wordt een geldbedrag uitgekeerd. Voor de periode 2011-2012 waarin ingeschreven kon worden op deze regeling was een budget van € 43,35 miljoen beschikbaar. Per project gold hierbij een maximum ondersteuning van 85% tot een maximum van € 7.225.000. (AgentschapNL, 2012a)

Wanneer de boring voltooid is en de geothermie bron in werking genomen wordt, ligt het opnieuw aan vele factoren wat de terugverdientijd zal zijn; ook hiervoor kan slechts een grove schatting gedaan worden. Deze schatting geeft aan dat het 5-10 jaar zal duren voordat de kosten zijn terugverdiend. (Platform Geothermie, 2012g)

Geothermie als energiebron is een techniek die, zeker in Nederland, nog in de kinderschoenen staat. Wereldwijd wordt er in 79 landen warmte geproduceerd met behulp van geothermie met een totaal vermogen van 43.000 MW. (ADEME, 2012) Op dit moment zijn in Nederland pas een tiental projecten gerealiseerd of in aanbouw, waarvan de eerste in 2007 werd afgerond. (Platform Geothermie, 2012h) Een vergunning voor opsporing en winning van geothermie wordt verstrekt door het ministerie van EL&I op grond van de mijnbouwwet. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) is toezichthouder. (Platform Geothermie, 2012c)

Doordat geothermie hier zo 'nieuw' is, is het een dynamisch werkveld waar veel ontwikkelingen plaatsvinden. Dit heeft als gevolg dat ook het beleid voor geothermie nog in ontwikkeling is. Natuurlijk kan er, naast het realiseren van eigen beleid, ook geleerd worden van buitenlandse

praktijken. Vaak verschilt de ondergrond in andere landen echter in dermate dat deze praktijken in Nederland anders uitgevoerd dienen te worden.

Eén van de ontwikkelingen op dit moment, zijn de werkzaamheden voor een Veiligheid- en Gezondheidszorgsysteem die voor nieuwe 'operators' als handleiding kan dienen; hiermee hoeft niet iedere operator opnieuw uit te vinden welke stappen doorlopen moeten worden bij het realiseren van een geothermiebron. Ook wordt gewerkt aan een structuurvisie voor de ondergrond. Aangezien het steeds drukker wordt in de Nederlandse ondergrond met tunnels, kabels, ondergronds bouwen en nu ook geothermie, is er behoefte aan duidelijkheid over de bestemming van de ondergrond. De te ontwikkelen structuurvisie zal hierop inspelen en duidelijkheid geven over de afwegingskaders die gehanteerd kunnen worden bij de indeling van de ondergrond.

4. Green Well Westland

Het Green Well Westland project is een initiatief van de tuinbouwbedrijven Zwingrow, Kwekerij JCM Mulder, Kwekerij T. Valstar (Shadowplant), Kwekerij Verkade en Kwekerij Zeurniet (zie afbeelding 4.1). Zij hebben voor de realisatie gezorgd van een geothermiebron bij Honselersdijk, tussen Naaldwijk en Den Haag. Met behulp van de warmte uit deze bron verwarmen de vijf bedrijven hun kassen. (Green Well Westland, 2012a) (Platform Geothermie, 2012i)



Afbeelding 4.1 - Het team van Green Well Westland, van links naar rechts: Ted Zwinkels, Sjon Mulder, Gert-Jan Verkade, Jos Scheffers, Teun Valstar (Green Well Westland, 2012b)

Tegen het einde van dit onderzoek, halverwege december, is Green Well Westland uitgebreid met nog twee bedrijven: ten Have en Endhoven. In het laatste deel van 2012 werd hier nog als test gedraaid; pas vanaf januari 2013 zullen ze echt officieel meedraaien. Ook zal dan nog een bedrijf worden aangesloten, namelijk Van Velden. (Scheffers, 2012)

Deze nieuwe bedrijven zijn wel meegenomen in de berekeningen rond het energiegebruik in december (zie hoofdstuk 5), maar zijn verder niet meegenomen in het onderzoek, aangezien ze zo laat in de onderzoeksperiode zijn aangesloten.

4.1 Ontstaan

Het idee voor Green Well Westland is ontstaan bij Jos Scheffers van Kwekerij Zeurniet.

In het begin van de jaren '80, toen geothermie in Nederland nog niet in zicht was, was de NAM naar olie en gas aan het boren bij de strandopgang in Monster (tussen Den Haag en Hoek van Holland). Jos Scheffers vond dit erg interessant en ging regelmatig bij de boortoren kijken. De mensen met wie hij daar sprak, zeiden toen al dat ze niet snapt dat er in het Westland zoveel olie en gas verstookt werd, terwijl er onder het Westland water van 80°C zit waar de kassen mee verwarmd zouden

kunnen worden. Scheffers had toen nog geen beeld bij hoe hij hier gebruik van zou kunnen maken, maar het idee is blijven hangen.

In 2007 begon Rik van den Bosch met de aanleg van de eerste geothermiebron in Nederland voor zijn kassen in Bleiswijk. Scheffers heeft het boorproces daar in de gaten gehouden en is, geïnspireerd door zijn voorbeeld, ook gaan inventariseren wat de mogelijkheden voor aardwarmte voor hem waren. Uiteindelijk heeft hij een vergunning aangevraagd en is met de vijf partijen (zie afbeelding 4.1) Green Well Westland begonnen.

(Scheffers, 2012) (T&A Survey, 2012a)

4.2 Motivatie

De belangrijkste motivatie achter GWW is de combinatie van kostenbesparing en verduurzaming. Alle leden van het GWW-team zijn bewust bezig met hoe we de wereld achterlaten voor de generaties na ons, en vinden duurzaamheid dan ook erg belangrijk. Daarnaast zijn het echter ondernemers die ervoor moeten zorgen dat ze geen verlies draaien; hierbij brengt geothermie ook voordelen met zich mee qua kosten, zoals genoemd in paragraaf 3.3. Bovendien zijn banken eerder geneigd financiering te verlenen aan tuinders wanneer de kostprijs van warmte stabiel is, wat het geval is bij aardwarmte. Een bank wil graag risico's vermijden en vindt het plezierig wanneer de kostprijs van warmte niet afhankelijk is van de gasprijs die erg kan variëren: de bank ziet liever een vast bedrag dat misschien iets hoger is, dan een lager bedrag waarvan niet zeker is of het zo laag zal blijven.

Dit alles scheelt aanzienlijk in kosten en zekerheid, waardoor de grote investering die het boren van een geothermiebron met zich meebrengt (zie paragraaf 3.4) overweegbaar werd voor de deelnemers van GWW.

Verder heeft geothermie ook voordelen op marketinggebied; er kan immers gezegd worden dat de producten duurzaam worden geteeld, wat goed is voor de verkoop.

(Scheffers, 2012) (T&A Survey, 2012a)

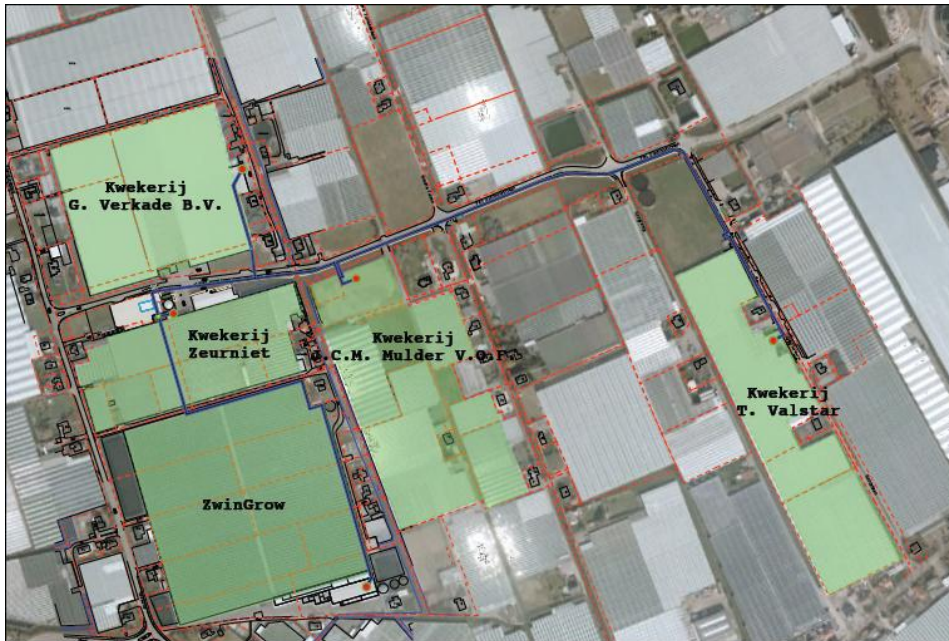
4.3 Locatie

De geothermiebron van Green Well Westland bevindt zich aan de Van Ockenburchlaan 25 in Honselersdijk, onder Den Haag (zie afbeelding 4.2). (Green Well Westland, 2012b)



Afbeelding 4.2 – Locatie Honselersdijk (bewerking van Google Maps, 2012)

De boring heeft plaatsgevonden bij Kwekerij Zeurniet van Jos Scheffers. Van daaruit is een leidingnetwerk aangelegd die de warmte naar de vier andere bedrijven transporteert. Op afbeelding 4.3 is te zien hoe de vijf oorspronkelijke kwekerijen liggen ten opzichte van elkaar, en hoe het leidingnetwerk loopt. De totale lengte van de transportleidingen is ongeveer 2.350 meter. (Bruijne, 2012) (Green Well Westland, 2012a)



Afbeelding 4.3 – Plattegrond Green Well Westland (Green Well Westland, 2012b)

Afbeelding 4.4 is een overzichtsfoto van het bovengrondse deel van de geothermiebron bij Kwekerij Zeurniet. Van links naar rechts is hier te zien:

- De injectieput
- De productieput
- De ontgasser (blauw)
- De leidingen tussen de putten en de warmtewisselaars
- De warmtewisselaars (bevinden zich in de bebouwing rechts)



Afbeelding 4.4 – Bovengrondse deel van de geothermiebron van GWW (Green Well Westland, 2012b)

In het hoofdstuk 'Geothermie' was op afbeelding 3.5 al een schematische weergave te zien van het systeem van Green Well Westland. In bijlage B is het oorspronkelijke complete overzicht te vinden. Hierin zijn de onderdelen zoals te zien op 4.4 schematisch terug te vinden. De werking van het geheel is hetzelfde als besproken in hoofdstuk 3.

4.4 Boring

Nadat de financiering en voorafgaande onderzoeken en dergelijke rond waren, kon eind 2011 begonnen worden met het realiseren van de geothermiebron. Dit is als volgt verlopen (T&A Survey, 2012a):

- Oktober 2011: voorbereidingen voor de boring, zoals het gereedmaken van het terrein
- December 2011: start boring productieput
- Februari 2012: voltooiing van de productieput (na wat tegenslag, zie verderop)
- Maart 2012: start boring injectieput
- April 2012: voltooiing injectieput
- Mei 2012: afronding van het geheel
- Juni – augustus 2012: testdraaien van de bron
- Vanaf september 2012: voltooiing en echt draaien van de bron
- Vanaf december 2012: aansluiten nieuwe afnemers

Het uiteindelijke resultaat is geschetst in bijlage C (afbeelding C.1). Met ongeveer 2.850 meter (verticale diepte), is de geothermiebron van GWW de diepste aardwarmteboring tot 2013. (Green Well Westland, 2012b) Op afbeelding C.1 is goed te zien dat er schuin geboord is, zoals beschreven in hoofdstuk 3 (paragraaf 3.4). Hierdoor zijn de boorputten zelf langer dan 2.850 meter: de uiteinden van de putten liggen zo'n 2 km uit elkaar (elk ongeveer 1 km van de beginpositie). Vanaf ± 1.300 meter diepte gaan de putten uit elkaar, elk met 32° uit het midden. Dit zorgt ervoor dat de totale lengte van respectievelijk de injectie- en productieput zo'n 2.900 en 3.100 meter is (afgeleid uit C.1). Te zien is dat de productieput wat dieper is gegaan dan de injectieput. Dit kwam doordat van tevoren onderzocht was dat de Pijnacker zandsteen (op zo'n 3 km diepte, zie bijlage C, afbeelding C.2) de beste laag zou zijn om naar te boren. Tijdens de eerste boring bleek echter dat dit waarschijnlijk niet het geval was; een laag iets boven de Pijnacker zandsteen, de Delft zandsteen, bleek productiever. Om deze reden, en doordat de tweede boring schuiner wegliep dan de bedoeling was, is bij de injectieput op 2.700 meter gestopt met boren.

Ook zijn tijdens de eerste boring materiaaldelen te vroeg in de boorput blijven steken, waardoor de oorspronkelijke eerste put niet afgemaakt kon worden. Dit is opgelost door het onbruikbare laatste deel van de put af te sluiten, en erboven een 'sidetrack' te boren. Door deze problemen is er enige vertraging ontstaan, maar uiteindelijk zijn de problemen met behulp van de sidetrack geheel opgelost.

(T&A Survey, 2012a)

4.5 Partijen

Bij het realiseren van GWW zijn verschillende partijen betrokken geweest. Hieronder volgen de belangrijkste:

- Westland Agenda: financiële ondersteuning;
Samenwerking van de Gemeente Westland en de Rabobank
- PanTerra: geologisch onderzoek
- T&A Survey: boormanagement en putontwerp
- Drilltec: uitvoeren van de boring
- Agro AdviesBuro: Proces engineering en project management

Verder is voor het project een MEI subsidie en een SDE+ bijdrage toegekend. Ook heeft GWW gebruik gemaakt van de SEI regeling (rijksgarantie op geologisch risico) met een aanvullende garantie door de Westland Agenda, zodat tegenvallende resultaten waren ondervangen. (Platform Geothermie, 2012i)

4.6 Kenmerken Green Well Westland

Aan de hand van de (geologische) onderzoeken zijn voorspellingen gedaan over wat de geothermische bron zou opleveren. Deze zijn vertaald naar de 'P-kansen' zoals weergegeven in tabel 4.1. Voorspeld werd dat de kans 90% was dat minimaal die waarden werden behaald die onder P90 staan. Bij P50 is de kans 50% en bij P10 10%. De tabel laat ook zien wat de uiteindelijk gerealiseerde waarden zijn. Jos Scheffers heeft aangegeven erg tevreden te zijn met deze resultaten. Doordat het vermogen iets hoger ligt dan de mediaan (P50), konden ook de nieuwe bedrijven aangesloten worden.

Honselersdijk	P90	P50	P10	Gerealiseerd
Delft en Pijnacker Zandsteen				
Temperatuur tot aquifer (°C)	85	90	95	85
Debiet in m ³ per uur	124	160	217	180
Warmte productie doublet in MW	6,9	9	12,9	10
Benodigd pompvermogen in kW	236	218	297	250
Totale pompdruk in bar	40	30	30	16
Coëfficiënt of performance (COP)	29	42	45	40
Gaswinning in m ³ /h	-	-	-	180

Tabel 4.1 – Voorspelde en gerealiseerde waarden (Green Well Westland, 2012b)

Vooraf is berekend dat bij P90 de aardgas besparing ongeveer 5,8 miljoen m³ per jaar zou zijn, met een CO₂-besparing van 10.300 ton per jaar. (Platform Geothermie, 2012i) In hoofdstuk 7 wordt besproken wat er nu daadwerkelijk aan gas en CO₂ bespaard wordt. In hoofdstuk 8 zal ter sprake komen wat de verdere mogelijkheden voor GWW zijn.

5. Energie

De warmte afkomstig uit de Geothermiebron in Honselersdijk, wordt gebruikt voor het verwarmen van de kassen van Green Well Westland. Deze warmte wordt opgepompt en gedistribueerd zoals besproken in de hoofdstukken 3 en 4. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoeveel energie naar boven wordt gehaald bij de bron, hoeveel gebruikt wordt bij de kassen, en hoeveel energie verloren gaat tijdens de distributie van de bron naar de kassen.

Om deze gegevens te achterhalen zijn berekeningen uitgevoerd met behulp van data van Green Well Westland. In bijlage B is te zien wat er allemaal aan data bijgehouden wordt in het systeem en op welke plekken. Al deze data worden per 5 minuten opgeslagen op de centrale computer van GWW, waar ze zijn op te zoeken. Voor dit onderzoek zijn keuzes gemaakt over welke data relevant waren voor het onderzoek en daarom gebruikt zouden gaan worden. Ook zijn aannames gedaan waardoor de berekeningen sneller verliepen zonder dat de kwaliteit van het onderzoek significant afnam. De keuzes, aannames en argumentatie erachter zijn beschreven in bijlage D, net als de complete berekening. In dit hoofdstuk worden de hoofdlijnen en conclusies besproken.

5.1 Berekening

Om erachter te komen hoeveel energie er opgewekt wordt, hoeveel gebruikt wordt bij verwarming van de kassen, en hoeveel energie verloren gaat, is de volgende formule toegepast, afgeleid uit Taal (2005), zoals toegelicht in bijlage D:

$$E = Q * C_p * \Delta T * \rho * t$$

Hierin is:

E = energie [J]

Q = debiet [m³/s]

C_p = soortelijke warmte [J/kgK]

ΔT = verandering in temperatuur [K]

ρ = dichtheid [kg/m³]

t = verstreken tijd [s]

De berekening is uitgevoerd op plek I en IV in het systeem, wat overeenkomt met de energiegegevens vlak na het oppompen van het 'aardwater', ofwel brine, (plek I) en bij afgifte aan de kassen (plek IV), waar het warmtemedium 'gewoon' leidingwater is. In bijlage B is aangegeven waar deze plekken zich in het systeem bevinden. Zie verder bijlage D voor argumentatie, consequenties en verdere uitleg over de keuze van deze plekken.

De benodigde data voor de formule is verkregen of afgeleid van de data van GWW:

Q en ΔT zijn data die per 5 minuten (t = 300 seconden) worden bijgehouden door GWW. C_p en ρ moesten afgeleid worden uit deze data, en waren afhankelijk van het soort medium dat de warmte transporteerde, de temperatuur van de vloeistof en de druk waaronder het staat. Uiteindelijk is bij de kassen (plek IV) de dichtheid vastgesteld op 985,5 kg/m³ en de soortelijke warmte op 4.180 J/kgK,

en bij plek I de dichtheid op 1.071 kg/m^3 en soortelijke warmte op 3.641 J/kgK . In bijlage D is beschreven op welke gronden deze aanname is gedaan.

Na het invoeren van de gegevens, zijn de uitkomsten van de berekeningen (per 5 minuten) per maand bij elkaar opgeteld. Dit leverde de resultaten die in tabel 5.1 zijn samengevat.

	Energie vóór WW* [GJ] (plek I)	Energie gebruikt bij kassen [GJ] (plek IV)
Augustus	5.300	5.022
September	9.983	9.615
Oktober	16.086	15.673
November	16.495	16.318
December	20.551	18.708 (plek III; zie bijlage D)

Tabel 5.1 – resultaten van de energieberekening van GWW per maand

* WW: warmtewisselaars, zie bijlage D

Uit de tabel blijkt dat de maanden augustus en september afwijken van de overige maanden. Zoals beschreven in paragraaf 2.5, beperkingen en randvoorwaarden, komt dit omdat augustus en september nog testmaanden waren, en er pas vanaf oktober echt gedraaid werd. De toename vanaf oktober komt doordat het kouder werd en de warmtevraag hierdoor steeds groter. Het was mogelijk om aan deze steeds grotere warmtevraag te voldoen, omdat GWW nog niet voluit draaide; de capaciteit was groter dan de vraag, waardoor de pompen niet maximaal hoefden te draaien. In oktober stonden de pompen zo laag mogelijk waarna in november en december dit is uitgebreid naar aanleiding van de warmtevraag. In hoofdstuk 6 wordt hier verder op ingegaan. Daarnaast is in december een grotere toename te zien ten opzichte van november, dan in november ten opzichte van oktober. Dit komt doordat in december ook de nieuwe bedrijven zijn aangesloten, zoals beschreven in hoofdstuk 4, waardoor de warmtevraag nog verder toenam.

Voor het onderzoek naar de duurzaamheid van GWW, was het noodzakelijk te bepalen wat de gemiddelde maandopwekking en -verbruik van GWW was. Hiermee is bijvoorbeeld berekend wat GWW in een jaar zou kunnen produceren en besparen. In de hoofdstukken 6, 7 en 8 komt dit verder aan de orde. Voor nu wordt verwezen naar bijlage K, waar bepaald is dat de gemiddelde maand in een jaar overeenkomt met oktober.

Dit betekent dat GWW in de onderzoeksperiode gemiddeld per maand (afgerond) 16.100 GJ oppompt waarvan 15.700 GJ bij de kassen wordt gebruikt.

Na aansluiting van de nieuwe bedrijven zal dit uiteraard meer kunnen worden aangezien GWW in de onderzoeksperiode nog niet voluit heeft gedraaid. In hoofdstuk 8 wordt dieper ingegaan op wat mogelijk is voor GWW.

5.2 Verliezen kwantitatief

Uit paragraaf 5.1 kunnen nu de verliezen berekend worden. Deze zijn per maand bepaald door de berekening I – IV. De uitkomsten per maand staan in tabel 5.2. De verliezen zijn hier weergegeven in GJ en als percentage van de energie bij plek I.

	[GJ]	%
Augustus	278	5,25
September	367	3,68
Oktober	414	2,57
November	177	1,07
December	1.843	8,97

Tabel 5.2 – verliezen van de bron naar de kassen van GWW per maand in GJ en %

Wanneer het verlies van een warmtenetwerk bekeken wordt, geldt over het algemeen dat de verliezen toenemen wanneer het verschil met de omgevingstemperatuur toeneemt, bijvoorbeeld wanneer het kouder wordt buiten in de herfst en winter. Relatief gezien nemen de verliezen dan echter af, aangezien de aangesloten bedrijven dan meer warmte nodig hebben waardoor de hoeveelheid getransporteerde warmte toeneemt. (Platform Geothermie, 2012g)

Ook bij GWW is dit terug te zien (tabel 5.2). Over het algemeen is een toename te zien van augustus tot december in de hoeveelheid verloren GJ. Alleen in november is weer een daling te zien; in dit onderzoek is niet duidelijk geworden wat deze daling veroorzaakt heeft. Een mogelijke verklaring voor de grote toename in december is dat de nieuwe bedrijven toen aangesloten zijn; voor deze bedrijven zijn nieuwe leidingen gelegd wat het tracé langer maakt en de verliezen groter. Wellicht zijn er nog andere verklaringen, maar in dit onderzoek was er geen gelegenheid dit verder te onderzoeken.

Wat betreft het percentage is ook duidelijk een daling te zien van augustus tot november. December is hierin opnieuw afwijkend vanwege het aansluiten van de nieuwe bedrijven. Van augustus tot oktober wordt de daling ook veroorzaakt door de toenemende hoeveelheid warmte die gebruikt wordt in de overgang uit de testperiode.

Wanneer bovenstaande argumenten meegenomen worden ligt het gemiddelde verlies rond de 3%. Hierbij is december niet meegenomen vanwege het aansluiten van de nieuwe bedrijven en augustus en september minder zwaar vanwege de grotere verliezen in deze testmaanden. Zoals in paragraaf 5.1 is aangegeven, komt oktober overeen met een gemiddelde maand in een jaar. Het verlies van oktober (2,7%) komt dicht in de buurt van het gemiddelde verlies van 3%. Hiermee wordt aangenomen dat het gemiddelde van rond de 3% het gemiddelde maandverlies in een jaar is.

5.3 Verliezen kwalitatief

Na het bepalen van de verliezen is gezocht naar gegevens en studies waarmee dit verlies vergeleken kon worden. Zo kon onderzocht worden wat de waarde is van de uitkomsten, waardoor niet alleen een kwantitatief maar ook een kwalitatief beeld zou ontstaan.

Voor deze vergelijking is gekeken naar geothermische systemen in Nederland die zoveel mogelijk overeen komen met GWW. Dit was echter op het moment dat dit onderzoek plaatsvond (eind 2012) niet mogelijk, aangezien er onvoldoende geothermische systemen in Nederland zijn die als vergelijkingsmateriaal kunnen dienen (zie ook hoofdstuk 3). Zo zijn slechts enkele van deze systemen in een vergelijkbare (of verdere) operationele situatie als GWW; de overige zijn minder ver gevorderd. Bovendien geldt dat voor de paar systemen die qua operationele status wel vergelijkbaar zijn, het afgiftesysteem niet overeen komt: bij deze geothermiebronnen wordt de warmte direct geleverd aan de kas zonder dat er gebruik wordt gemaakt van een distributienetwerk; er zijn dus geen distributieverliezen zoals bij GWW. (Platform Geothermie, 2012g)

Hierna is verder gekeken naar geothermische systemen in andere landen. Het probleem hierbij was echter dat de systemen in het buitenland zo anders in elkaar zitten dat vergelijken lastig wordt. Zo zijn er vaak meerdere bronnen die warmte leveren, is de afstand waarover de warmte getransporteerd moet worden groter en wordt er geleverd aan woningen in plaats van kassen. In bijlage E wordt zo'n buitenlands systeem, het Afyon geothermal district heating system in Turkije, vergeleken met Green Well Westland.

De conclusie die hieruit getrokken kan worden, is dat de verliezen bij GWW veel kleiner zijn dan bij Afyon: rond de 3% tegenover 25,7%.

Naast specifieke onderzoeken zoals bij Afyon, zijn ook modellen ontworpen die het energieverloop van thermische distributie systemen analyseren. Hierbij is de bron van warmte niet gespecificeerd, maar gaat het om het distributiesysteem zelf. Poredos et al. (2002) heeft bijvoorbeeld met behulp van zulke modellen de distributieverliezen ingeschat rond de 8-10%.

Voor stadsverwarmingnetten, met als bron bijvoorbeeld restwarmte uit fabrieken, wordt het verlies ingeschat op tussen de 10 tot 30%. (de Jong, 2012)

Lastig bij het vergelijken van distributieverliezen is dat de verliezen afhankelijk zijn van vele factoren. Een aantal zijn hierboven al genoemd, zoals de lengte van de leidingen van het distributiesysteem; Kondili et al. (2006) heeft hierover aangetoond dat hoe langer de leidingen, hoe groter de verliezen zullen zijn.

Daarnaast is de noorderbreedte van de locatie van belang. Hongwei et al. (2012) heeft bijvoorbeeld aangetoond dat hoe warmer een locatie is, hoe hoger het percentage verliezen. Bij gelijke distributiesystemen zullen de verliezen vrijwel gelijk blijven bij verschillende buitentemperaturen, maar zal de afname van de warmte niet gelijk zijn; hoe hoger de buitentemperatuur, hoe minder warmte afgenomen wordt, hoe groter het aandeel van de verliezen zal zijn. Relatief gezien gaat er bij een hogere buitentemperatuur dus meer warmte verloren.

Een andere grote invloed op het verlies, is de eindbestemming van de warmte. Bij kassen kan één grote leiding richting de kas gelegd worden; bij woonwijken zal voor elke woning, die veel minder

energie nodig heeft dan een grote kas, een aparte aftakking aangelegd moeten worden. Deze kleinere, zogenaamde 'capillaire' leidingen zorgen voor een relatief groter oppervlak van de leidingen, waardoor ook meer warmte verloren kan gaan. Het vergelijken van distributiesystemen richting woningen met systemen voor kassen is dus niet erg redelijk. (Platform Geothermie, 2012g)

Naast al deze, vrij technische, factoren, kan ook de discussie gevoerd worden over hoe ernstig het nu is dat (een deel van de) warmte verloren gaat:

In principe is alle warmte afkomstig uit een geothermiebron hernieuwbaar, zoals besproken in hoofdstuk 3. De warmte die verloren gaat in de leidingen is dus ook hernieuwbare warmte. Vanuit dat oogpunt is de verloren warmte in mindere mate 'verspilling' dan verloren warmte die is opgewekt met behulp van fossiele brandstoffen.

Dit kan vergeleken worden met fotovoltaïsche zonnecellen, die zonlicht opvangen en omzetten in elektriciteit. Bij het opvangen van het licht gaat minimaal 55% 'verloren'. (EERE, 2012) Aangezien zonlicht echter een hernieuwbare energiebron is, wordt dit over het algemeen niet beschouwd als 'verlies'. Alle elektriciteit die op deze manier opgewekt wordt, is immers beter dan elektriciteit opgewekt met behulp van primaire energiebronnen zoals gas, en vanuit dat oogpunt gezien op zichzelf al besparing. Wanneer je dan 'verlies van besparing' hebt, moet dit uiteraard vanuit het oogpunt van duurzaamheid en efficiency tot het minimum worden beperkt, maar is dit geen verlies van primaire energie, en dus minder ernstig voor het milieu.

5.4 Conclusie

Uit het onderzoek is gebleken dat GWW in de onderzoeksperiode een gemiddelde warmte opwekking per maand heeft van 16.100 GJ, met een gemiddeld verbruik van 15.700 GJ. Het verlies dat hierbij hoort was lastig te bepalen aangezien er veel fluctuatie waargenomen is. Uiteindelijk is besloten dat het gemiddelde verlies ongeveer 3% is.

Het vergelijken van de verliezen van GWW met andere distributiesystemen was ook lastig, aangezien er een grote verscheidenheid aan distributiesystemen bestaat. De gevonden waarden bij Green Well Westland zijn echter wel veel lager vergeleken bij deze distributiesystemen; deze verliezen varieerden van ongeveer 8 tot 30%, wat 3 tot 10 keer zo hoog is als bij GWW.

Ook is de warmte gewonnen uit een geothermiebron hernieuwbaar, waardoor eventuele verliezen in mindere mate verspilling zijn dan verliezen van primaire energie.

De conclusie die hieruit getrokken kan worden, is dat de 3% verlies van Green Well Westland een erg goed resultaat is.

6. Elektriciteit

Om het systeem van Green Well Westland draaiende te houden, is elektriciteit nodig. Voor dit onderzoek naar de duurzaamheid van GWW, is het van belang te weten hoeveel energie nodig is vergeleken met hoeveel energie het oplevert. Hiervoor wordt de COP berekend; in paragraaf 6.2 wordt dit begrip nader toegelicht. In paragraaf 6.1 wordt eerst omschreven waardoor het elektriciteitsverbruik bepaald wordt.

6.1 Verbruik

Het elektriciteitsverbruik van GWW wordt bijgehouden met een meter die het gehele verbruik meet. Dit houdt in alle verbruiken van de bron tot aan de kassen, plus het verbruik van de GWW computers en lichten en dergelijke. Het verbruik bij de kassen valt onder het verbruik van de tuinders zelf, en wordt niet meegenomen op de GWW meter. (Hanemaaijer, 2012) De belangrijkste bijdrage aan het elektriciteitsverbruik is afkomstig van de pompen die het brinewater omhoog pompen en weer in de aarde injecteren. De analyse die tot deze conclusie heeft geleid is terug te vinden in bijlage F. Voor meer informatie over de pompen, zie bijlage G. In bijlage F staan ook de grafieken die bij de maandverbruiken van GWW horen met toelichting.

6.2 COP kwantitatief

Om te onderzoeken wat het elektriciteitsverbruik van GWW is, ten opzichte van hoeveel energie het oplevert, wordt de 'COP' berekend, ofwel, de coefficient of performance. Dit is een getal dat (in dit geval) de verhouding weergeeft tussen de energie die bij de kassen gebruikt kan worden (E_{netto}), en de energie die het kost om GWW draaiende te houden (E_{offers}), ofwel hoeveel energie het systeem levert ten opzichte van wat het kost. Dit geeft (Taal, 2005c):

$$COP = \frac{E_{netto}}{E_{offers}}$$

Deze COP gaat over het hele systeem van GWW. De COP-waarde kan ook alleen van de pompen berekend worden, door de verhouding tussen E_{netto} en E_{offers} van de pompen te nemen. In geothermische systemen is dit een gebruikelijke vorm van het bepalen van de COP (Platform Geothermie, 2012g). Bij GWW is echter gekozen voor een toepassing over het hele systeem; dit is gedaan om de volgende redenen:

- In dit onderzoek wordt gekeken naar de duurzaamheid van het hele systeem van GWW. Daarom is gekozen om ook de COP over het hele systeem te nemen;
- Het totale elektriciteitsverbruik wordt gedomineerd door het verbruik van de pompen; een scheiding aanbrengen tussen de verschillende verbruiken zou waarschijnlijk weinig verschil maken;
- De elektriciteitsverbruiken worden niet apart bijgehouden, maar gezamenlijk op één meter, zoals hierboven aangegeven; een scheiding aanhouden is dus praktisch gezien niet haalbaar.

In tabel 6.1 zijn elektriciteitsverbruiken per maand opgeteld en omgerekend naar GJ. Hiernaast zijn de resultaten geplaatst uit hoofdstuk 5. Deze waarden zijn met behulp van bovenstaande vergelijking omgerekend naar een COP per maand. Uit de tabel blijkt dat de COP van het hele systeem van Green Well Westland in de eerste maanden boven de 40 ligt, en bij de hogere productie van de laatste maanden rond de 30.

	Elektra verbruik		Energie gebruikt bij kassen	COP
	kWh	GJ	GJ	
Augustus	31.747	114	5.022	43,9
September	64.456	232	9.615	41,4
Oktober	104.176	375	15.673	41,8
November	136.332	491	16.318	33,2
December	178.961	644	18.708	29,0

Tabel 6.1 – Energiekosten vs. opbrengsten: COP

6.3 COP kwalitatief

In hoofdstuk 2 is genoemd dat de verwachting voor de COP van een geothermiebron in Nederland, vóór de realisatie van de huidige projecten, rond de 30 lag. Ook is in dit hoofdstuk aangegeven dat door tegenslagen deze zelfs rond de 10 à 15 uit kan vallen. De uitkomst van een COP van 40 is daarbij beduidend hoger dan eerst werd verwacht. Green Well Westland heeft in de onderzoeksperiode geen problemen gehad (met bijvoorbeeld de injectiviteit), maar zelfs dan ligt de COP van rond de 30 in november en december meer in de lijn der verwachting. Zoals benoemd in hoofdstuk 5 en beargumenteerd in bijlage K, kan oktober beschouwd worden als een gemiddelde maand. De COP van ongeveer 40 (met een verbruik van ongeveer 400 GJ) zou dan ook als gemiddelde gesteld kunnen worden voor de onderzoeksperiode. Dit zal echter nog veranderen wanneer meer voluit gedraaid zal worden na het aansluiten van de andere bedrijven; tabel 6.1 laat een dalende trend zien bij toenemend elektriciteitsverbruik. Dit verband wordt verder besproken in paragraaf 8.1.

De COP kan ook vergeleken worden met die van andere min of meer vergelijkbare processen en systemen, zoals elektrische warmtepompen. Huidige warmtepompen voor ruimteverwarming hebben bijvoorbeeld een COP van 3,5 tot 5. (AgentschapNL, 2012c) Een COP-waarde van 30-40 is hierbij vergeleken bijna een factor 10 beter.

6.4 Conclusie

Het gemiddelde elektriciteitsverbruik van GWW was in de onderzoeksperiode ongeveer 400 GJ per maand met een gemiddelde COP van ongeveer 40.

Vergeleken met zowel de verwachting voor geothermiebronnen in Nederland als met vergelijkbare processen en systemen, is een COP van 40 hoog, namelijk ongeveer 2 maal zo hoog als de verwachting vooraf en ongeveer 10 maal zo hoog als met andere vergelijkbare systemen. Hierbij komt wel dat GWW tot nu toe nog niet voluit gedraaid heeft. Dit zal wel gaan gebeuren wanneer

meer bedrijven aangesloten worden. Het effect dat het harder laten draaien van de pompen zal hebben, is waarschijnlijk een daling in de COP; dit wordt verder besproken in paragraaf 8.1. De conclusie die hieruit getrokken kan worden, is dat een gemiddelde COP van rond de 40 erg goed is, dat de COP wellicht in de toekomst nog zal dalen, maar dat een wat lagere COP ook nog steeds hoog is; hoe hoog de COP bij voluit draaien zou kunnen zijn wordt ook besproken in hoofdstuk 8.

7. Besparing

Voordat de geothermiebron van Green Well Westland is aangelegd, werden de kassen verwarmd met de warmte die vrijkomt bij het verbranden van aardgas. In dit hoofdstuk komt aan de orde hoeveel aardgas GWW bespaart door de overstap op aardwarmte en hoeveel CO₂-uitstoot hierdoor vermeden wordt.

7.1 Aardgas

In de hoofdstukken energie en elektriciteit is berekend hoeveel energie aan warmte uit de geothermie bron is gewonnen, en hoeveel elektriciteit nodig was om het warme water naar boven te pompen. De hoeveelheid omhoog gepompte warmte is energie die is bespaard ten opzichte van de oude situatie, maar de gebruikte elektriciteit is een extra post die bij het gebruik van aardgas nog niet nodig was. Om goed te kunnen vergelijken moet de elektriciteitspost dus nog worden afgetrokken van de hoeveelheid gewonnen energie.

Om deze berekening uit te kunnen voeren, is eerst bepaald hoeveel aardgas nodig zou zijn geweest om dezelfde hoeveelheid warmte te produceren als is opgepompt. Dit is gebeurd met behulp van de energetische (onder)waarde van aardgas, 31,65 MJ/m³ (zie bijlage H.1). (Energieleveranciers.nl, 2012) (Harmelen, 2006) Vervolgens is gekeken naar hoeveel aardgas nodig zou zijn geweest om de hoeveelheid elektriciteit op te wekken die is gebruikt om de warmte omhoog te pompen. Hierbij is gerekend met een rendement van 50,5% (zie bijlage J.3). (Afgeleid uit Harmelink, 2012) Deze hoeveelheden zijn ten slotte van elkaar afgetrokken waarmee de netto bespaarde hoeveelheid aardgas is verkregen. In bijlage H is de berekening compleet weergegeven (tabel H.1). Tabel 7.1 geeft de samenvatting van de resultaten.

	Bruto bespaarde hoeveelheid aardgas [1.000 m ³]	Aardgas nodig voor productie van elektra [1.000 m ³]	Netto bespaarde hoeveelheid aardgas [1.000 m ³]
Augustus	158,67	7,13	151,54
September	303,79	14,52	289,28
Oktober	495,20	23,46	471,74
November	515,58	30,72	484,86
December	591,09	40,29	550,80

Tabel 7.1 – resultaten omrekening energie van GWW naar bespaarde hoeveelheid aardgas in 1.000 m³ per maand

Wanneer weer wordt uitgegaan van oktober als gemiddelde maand, is de netto gebruikte hoeveelheid energie in de onderzoeksperiode gemiddeld ongeveer 14.900 GJ per maand (zie bijlage H). De bespaarde hoeveelheid aardgas is gemiddeld ongeveer 472.000 m³ per maand.

7.2 CO₂

De berekening zoals in paragraaf 7.1 uitgevoerd voor aardgas, kan ook uitgevoerd worden om te bepalen hoeveel CO₂-uitstoot is vermeden. Daarvoor is eerst gekeken hoeveel (bruto) CO₂-uitstoot er is vermeden door het gebruik van aardwarmte in plaats van aardgas. Hierbij is gerekend met een CO₂-emissiefactor voor aardgas van 56,6 kg/GJ (zie bijlage H). (AgentschapNL, 2010) Vervolgens is gekeken naar hoeveel CO₂ er is uitgestoten bij de productie van de elektriciteit die nodig was voor het omhoogpompen van de warmte. De factor die hiervoor is aangehouden, is 0,45 kg CO₂/kWh (zie bijlage J) ofwel 125 kg CO₂/GJ. (Afgeleid uit Harmelink, 2012) Deze hoeveelheden zijn ten slotte weer van elkaar afgetrokken voor het verkrijgen van de netto bespaarde hoeveelheid CO₂-uitstoot. Bijlage H geeft de berekening compleet weer en in tabel 7.2 zijn de resultaten samengevat.

	Vermeden CO ₂ -emissie [1.000 kg]	CO ₂ -emissie bij opwekking van gebruikte elektra [1.000 kg]	Netto bespaarde hoeveelheid CO ₂ [1.000 kg]
Augustus	284,25	14,25	270,00
September	544,21	29,00	515,21
Oktober	887,09	46,88	840,22
November	923,60	61,38	862,22
December	1.058,87	80,50	978,37

Tabel 7.2 – Bespaarde CO₂-emissie door GWW

Wanneer weer wordt uitgegaan van oktober als gemiddelde maand, is de bespaarde hoeveelheid CO₂-uitstoot in de onderzoeksperiode gemiddeld ongeveer 840.000 kg per maand.

7.3 Kwalitatief

In eerste instantie zou gekeken worden naar het aardgas verbruik van GWW in voorgaande jaren, toen de geothermiebron er nog niet was. In paragraaf 2.5 is echter al aangegeven dat dit om verschillende redenen geen doorgang kon vinden. Om toch een kwalitatief beeld te kunnen vormen, worden hieronder een aantal andere verbruiksposten in Nederland geschetst waarmee de besparing van GWW vervolgens vergeleken is. Hiervoor is de gemiddelde maandelijkse aardgas en CO₂-uitstoot besparing genomen zoals bepaald in paragraaf 1 en 2. Er is hierbij gerekend met afgeronde getallen, aangezien de uitkomsten indicaties zijn van de besparingen; een exacte waarde als resultaat zou impliceren dat de berekening daadwerkelijk exact is. Dit is echter niet zo, aangezien ze is gebaseerd op aannames (bijvoorbeeld dat oktober een gemiddelde maand is). Deze besparing is bovendien gebaseerd op de onderzoeksperiode en is (nog) niet maximaal; zoals in eerdere hoofdstukken al genoemd, heeft GWW in de onderzoeksperiode nog niet voluit gedraaid, waardoor de besparing bij

aansluiting van de nieuwe bedrijven verder toe zal kunnen nemen. Hier wordt in hoofdstuk 8 dieper op ingegaan.

Huishoudens

In Nederland verbruikt een gemiddeld huishouden (2,2 personen) 1.600 m³ gas per jaar. (Milieucentraal, 2012b) De gemiddelde jaarlijkse besparing van Green Well Westland kan bepaald worden door de gemiddelde maandelijkse besparing zoals bepaald in paragraaf 1 te vermenigvuldigen met 12. Dit wordt $12 \cdot 472.000 =$ ongeveer 5.700.000 m³ aardgas. Dit betekent dat GWW evenveel aardgas bespaart als $5.700.000 / 1.600 =$ ongeveer 3.550 huishoudens verbruiken.

De CO₂-uitstoot van een gemiddeld huishouden is ongeveer 8,4 ton per jaar. In deze uitstoot zijn alle broeikasgassen opgenomen die uitgestoten worden door het gebruik van vervoer, gas en elektriciteit, omgerekend naar CO₂-equivalenten. (Milieucentraal, 2012a) De gemiddelde besparing in CO₂-uitstoot door GWW is ongeveer 840 ton per maand. Per jaar is dit een besparing van $840 \cdot 12 =$ 10.100 ton CO₂. Dit betekent dat GWW evenveel bespaart als $10.100 / 8,4 =$ ongeveer 1.200 huishoudens aan CO₂-uitstoot veroorzaken.

Milieucentraal (2012a) geeft hierbij ook aan dat om de jaarlijkse huishoudelijke CO₂-uitstoot van 8,4 ton te compenseren, ruim 400 bomen in de tropen een jaar lang zouden moeten groeien. Om met bomen hetzelfde besparingseffect te bereiken als GWW nu met geothermie doet, zijn er dus $400 \cdot 1.200 =$ ruim 480.000 tropische bomen nodig die een jaar lang groeien. Volgens kennislink staan op één hectare ongeveer 500 bomen. Dit geeft $480.000 / 500 =$ 960 hectare. Aangezien een hectare even groot is als twee voetbalvelden, zijn dus ongeveer $2 \cdot 960 =$ 1.920 voetbalvelden nodig vol tropische bomen die een jaar lang groeien voor hetzelfde besparingseffect

Vervoer

Een belangrijk vervoermiddel in Nederland is de auto. Jaarlijks wordt er door Nederlanders gemiddeld 20.000 km mee afgelegd. (Gemiddeld Gezien, 2013) Volgens Hermans (2009) kost dit gemiddeld 1.400 liter benzine; hij geeft hierbij aan dat benzine een energie-inhoud heeft van 35 MJ/liter, waardoor het totale verbruik op $35 \cdot 1.400 =$ 49.000 MJ per jaar komt. Het gemiddelde (netto) maandverbruik van GWW is ongeveer 14.900 GJ, wat de totale besparing $14.900 \cdot 12 =$ ongeveer 179.000 GJ maakt. Green Well Westland bespaart dus in een jaar evenveel als $179.000 / 49 =$ ongeveer 3.650 auto's aan benzine gebruiken.

Een andere vergelijking kan gemaakt worden door te kijken naar het totaal aantal kilometers dat één auto kan rijden met de hoeveelheid energie die GWW bespaart. Uit de berekening hierboven blijkt dat dit ongeveer $3.650 \cdot 20.000 =$ 73.000.000 km is. De omtrek van de aarde is ongeveer 40.000 km (Hermans, 2009). Met de hoeveelheid energie die GWW in een jaar bespaart, kunnen dus met één auto $73.000.000 / 40.000 =$ 1.825 rondjes om de aarde gereden worden.

De hoeveelheid CO₂ die een nieuwe auto uitstoot, is de afgelopen jaren steeds verder afgenomen. (Compendium voor de Leefomgeving, 2012b) Volgens de ANWB (2011) is de gemiddelde auto in Nederland ongeveer 3,5 jaar geleden gefabriceerd. Dit betekent dat de gemiddelde auto in 2012 uit

2009 komt. Volgens het Compendium voor de Leefomgeving (2012b) is de CO₂-emissie van een auto uit 2009 gemiddeld 147 g/km. Dit betekent dat Nederlanders gemiddeld $0,147 \cdot 20.000 = 2.940$ kg CO₂ per jaar uitstoten door het rijden in hun auto.

Zoals hierboven berekend bespaart GWW jaarlijks een CO₂-uitstoot van 10.100.000 kg. Dit komt overeen met de CO₂-uitstoot van $10.100.000 / 2.940 =$ ongeveer 3.450 auto's.

7.4 Vergelijking

In hoofdstuk 4 is in paragraaf 6 besproken wat de voorspelde waarden van de geothermische bron van GWW waren. Hier werd al genoemd dat de gerealiseerde waarden iets hoger liggen dan de mediaan (P50). Voor de waarden die met 90% zekerheid gehaald zouden worden (P90) is ook voorspeld wat de besparing in CO₂ en aardgas per jaar zou gaan zijn. In tabel 7.3 zijn deze waarden nog een keer weergegeven, met daaronder de waarden die uit dit onderzoek blijken. Te zien is dat de besparing van GWW in de onderzoeksperiode vrijwel overeenkomt met wat werd verwacht.

	Aardgas [1.000 m ³]	CO ₂ [1.000 kg]
Voorspeld bij P90	5.800	10.300
Behaald in de onderzoeksperiode	5.700	10.100

Tabel 7.3 – Voorspelde en gerealiseerde besparing in m³ aardgas en kg CO₂

7.5 Conclusie

Uit het onderzoek naar de besparing van Green Well Westland blijkt dat, door het gebruik van geothermie in plaats van aardgas, gemiddeld ongeveer 14.900 GJ aan (netto) energie per maand bespaard wordt. Omgerekend naar aardgas is dit 472.000 m³, wat op jaarbasis een besparing van 5.700.000 m³ aardgas oplevert.

Dit komt overeen met het energieverbruik van ongeveer 3.550 huishoudens, 3.650 auto's, of het verbruik van één auto die 1.825 rondjes om de aarde rijdt.

Daarnaast wordt de uitstoot van gemiddeld 840.000 kg CO₂ vermeden, wat op jaarbasis 10.100.000 kg CO₂ is. Deze uitstoot staat gelijk aan de CO₂-productie van ongeveer 1.200 huishoudens of 3.450 auto's per jaar. Op een andere manier bekeken, zouden 1.920 voetbalvelden vol tropische bomen nodig zijn die een jaar lang groeien om dezelfde besparing te bereiken als Green Well Westland in een jaar.

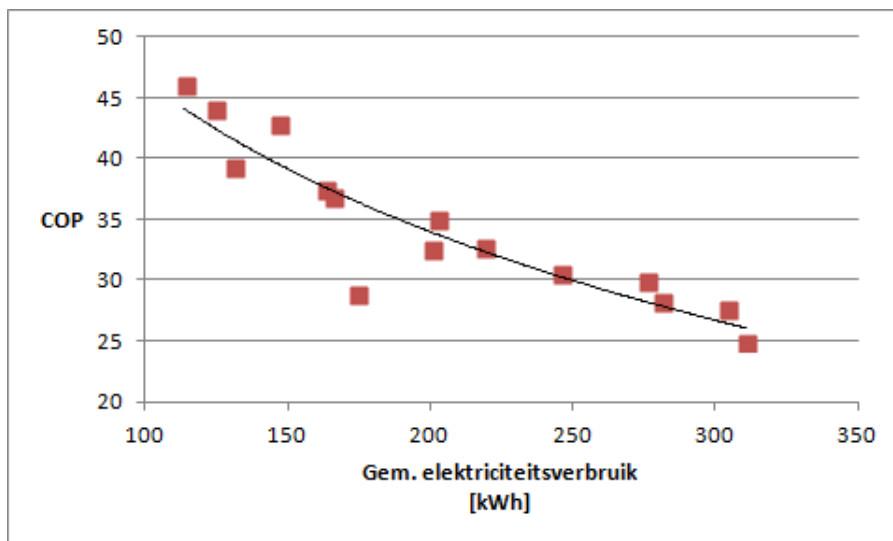
Deze besparingen in aardgas en CO₂-uitstoot in de onderzoeksperiode komen nu al vrijwel overeen met de voorspellingen voor de P90 bij de realisatie van de bron. Aangezien GWW nog niet voluit heeft gedraaid, kunnen deze besparingen nog meer worden. Hier wordt in hoofdstuk 8 dieper op ingegaan.

8. Verdere mogelijkheden

In de periode dat het onderzoek naar de duurzaamheid van Green Well Westland plaatsvond, draaide Green Well Westland nog niet voluit (hoofdstuk 2 en 4). In dit hoofdstuk wordt bekeken wat het energiegebruik en bijbehorende besparingen in de toekomst zouden kunnen zijn wanneer de bron beter benut wordt. 'Beter' zal hierbij van twee kanten bekeken worden: de maximale COP, ofwel de beste efficiency van het systeem; en de maximale hoeveelheid warmte die opgepompt kan worden, wat leidt tot de maximale hoeveel besparing die gerealiseerd kan worden.

8.1 COP

In een situatie waarin de COP maximaal is, is de verhouding tussen het elektriciteitsverbruik van de pompen en de gewonnen warmte – en dus de efficiency van het systeem – optimaal. Uit onderzoek blijkt dat de COP het hoogst is wanneer de pompen zo laag mogelijk draaien. In bijlage I is te lezen hoe dit is onderzocht. Afbeelding 8.1 geeft hiervan het resultaat.



Afbeelding 8.1 – afnemende COP met toenemend elektriciteitsverbruik van de pompen van GWW

Aangezien de pompen niet lager kunnen draaien dan ongeveer 100 m³/h (Scheffers, 2012), en dit overeenkomt met de laagste waarden in de grafiek (rond de 120 kWh), zal de COP hierbij het hoogst zijn.

Gezien vanuit de COP waarden zouden de pompen dus zo laag mogelijk moeten draaien. Praktisch gezien is dit echter niet erg efficiënt, of duurzaam: het systeem is ontworpen om zoveel mogelijk warmte uit de grond te halen, zodat de bedrijven deze warmte kunnen gebruiken (hoofdstuk 4). Het gaat tegen de principes van Green Well Westland in om de bron zo minimaal mogelijk te gebruiken, zoals te lezen in hoofdstuk 2 en 4: de bedrijven van GWW wilden verduurzamen en aardwarmte in plaats van gas gaan gebruiken voor het verwarmen van hun kassen. Bij minimaal gebruik van de bron moet niet alleen op zeer koude dagen bij gestookt worden met gas, maar al bij middelgrote warmtevraag, wat minder duurzaam is. Daarnaast is het ook financieel gezien slechter om de pompen lager te zetten voor een hogere COP waarde: Greenwell gaf aan dat gas bijkopen relatief meer geld kost dan het wat harder laten draaien van de pompen. GWW zal dit financiële argument

ook mee laten tellen bij de afweging hoe hard de pompen gezet worden. In dit onderzoek wordt echter niet naar financiën gekeken (zie afbakening in hoofdstuk 2); daarom wordt in dit onderzoek niet verder op dit aspect ingegaan.

Uit het onderzoek naar de daling van de COP met toenemend elektriciteitsverbruik, en de beschouwing hiervan uit het oogpunt van GWW, blijkt de COP geen goede maatstaf te zijn voor het 'beter' benutten van de geothermische bron.

8.2 Hoeveelheid opgepompte warmte

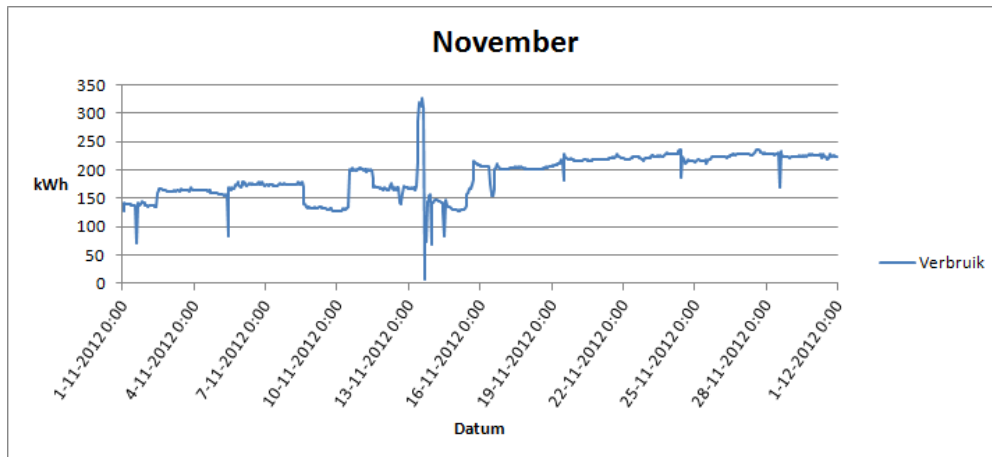
Om een maximale hoeveelheid aan warmte over een bepaalde periode te winnen, moet zowel de uitkoeling (delta T) als het debiet maximaal zijn; dit zijn de twee variabelen in de energieformule $E = Q * C_p * \Delta T * \rho * t$ zoals besproken in hoofdstuk 5. (Zie voor uitleg van de termen hoofdstuk 5 en bijlage D.) Door deze variabelen te beïnvloeden zal de hoeveelheid gewonnen warmte variëren. Hieronder worden de twee variabelen besproken.

Uitkoeling

De uitkoeling, ofwel het verschil tussen de aanvoer- en retourtemperatuur, is variabel maar slechts tot op zekere hoogte te beïnvloeden: de aanvoertemperatuur ligt altijd rond de 85°C (zie bijlage D) en is niet beïnvloedbaar. De retourtemperatuur is afhankelijk van hoeveel warmte door de kassen nodig is en dus gebruikt wordt. Dit kan erg variëren en is bijvoorbeeld seizoensafhankelijk. Voor dit onderzoek wordt een retourtemperatuur van 35°C aangenomen; dit betekent dat de uitkoeling 50°C is. Er is gekozen voor 35°C als retourtemperatuur, aangezien dit het streven van GWW is. (Green Well Westland, 2012c) De tuinders kunnen deze temperatuur beïnvloeden door te proberen zo veel mogelijk van de aangevoerde warmte te gebruiken. Dit betekent ook dat wanneer er een overschot aan warmte is, de pompen zachter gezet kunnen worden; er is op dat moment geen behoefte aan meer warmte, dus hoeft deze ook niet omhoog gepompt te worden. Dit is bijvoorbeeld in de zomer het geval; hier wordt verderop nog op teruggekomen.

Debiet

Het maximale debiet wordt bepaald door hoe hard de pompen kunnen draaien. Tijdens de onderzoeksperiode is slechts enkele keren het maximum benaderd. Op 13 november heeft GWW bijvoorbeeld uitgeprobeerd hoe hard er gedraaid kan worden; gedurende 6 uur zijn de pompen harder gezet wat een elektriciteitsverbruik van meer dan 300 kWh per uur opleverde (zie afbeelding 8.2, afkomstig uit bijlage F). Het maximale debiet dat deze dag bereikt is, was 177 m³/h. In hoofdstuk 4 (tabel 4.1) is aangegeven dat GWW een debiet van 180 m³/h kan halen. De test laat zien dat dit inderdaad realistisch is; de hoeveelheid warmte die dit opleverde was echter te veel voor de toen aangesloten bedrijven, waardoor de pompen vrijwel direct weer zachter zijn gezet. Voor het onderzoek naar de maximale hoeveelheid te winnen warmte, kan hierdoor echter wel uitgaan worden van 180 m³/h.



Afbeelding 8.2 – Elektriciteitsverbruik GWW in november

Vermogen

In de formule voor energie, zoals gebruikt in hoofdstuk 5, staan, naast de twee variabelen (Delta T en debiet) ook nog 3 constanten. Eén van deze constanten is de factor tijd. Wanneer de grootte energie [J] per seconde bekeken wordt, wordt dit de grootte vermogen in Joule per seconde [J/s] = Watt [W]. Het vermogen is een vaak gebruikte grootte wanneer over energie gesproken wordt, zo ook door GWW (tabel 4.1). In deze tabel staat dat het vermogen van GWW 10 MW is. Dit is in dit onderzoek nagerekend door het invullen van de gegevens in de formule voor vermogen, zoals hierboven bepaald, en de constanten zoals bepaald in bijlage D voor deel I van het systeem:

$$P = Q * C_p * \Delta T * \rho$$

$$Q = 180 \text{ m}^3/\text{h} = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_p = 3.641 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta T = 50 \text{ K}$$

$$\rho = 1.071 \text{ kg/m}^3$$

Dit geeft (gedeeld door 1.000.000 voor de omrekening van [W] naar [MW]):

$$P = \frac{0,05 * 3.641 * 50 * 1.071}{1.000.000} = 9,7 \text{ MW}$$

Dit komt vrijwel overeen met het vermogen van 10 MW zoals aangegeven door GWW.

Hoeveelheid warmte per jaar

Het vermogen geeft het maximum energie per seconde aan wat de bron kan leveren. Om te berekenen hoeveel de bron per jaar zal leveren, kan dit getal echter niet zomaar vermenigvuldigd worden met het aantal seconden in een jaar. Dit komt omdat de bron niet het hele jaar op vol vermogen zal draaien: in de zomer is minder warmte nodig dan in de winter, waardoor het niet nodig is in beide seizoenen evenveel warmte op te pompen: de pompen zullen in de zomer zachter gezet worden. Ook worden ze soms uitgezet wanneer er onderhoud aan het systeem nodig is.

Wanneer de pompen op vol vermogen draaien, wordt een uur ook wel één vollastuur genoemd. Is dit niet het geval en draaien de pompen minder hard, dan zal het langer dan één uur duren voordat dezelfde hoeveelheid energie is verkregen als in één vollastuur. Dit betekent dat, wanneer de pompen continu doordraaien, maar niet altijd op maximaal niveau, het aantal uren dat er warmte geproduceerd wordt, uitgedrukt kan worden in het aantal vollasturen waarmee dezelfde hoeveelheid warmte zou zijn geleverd.

In dit onderzoek wordt aangenomen dat een project als GWW 7.000 vollasturen in een jaar draait. (Platform Geothermie, 2012g) Ter referentie: in een jaar zitten $365 \times 24 = 8.760$ 'gewone' uren. Er wordt zo dus aangenomen dat de gedraaide tijd (in principe fulltime) overeenkomt met $7.000/8.760 =$ ongeveer 80% van de tijd 'voluit' draaien.

Het aantal van 7.000 vollasturen wordt vaker gebruikt voor het rekenen aan projecten zoals Green Well Westland; zo is bijvoorbeeld de berekening voor de SDE+ subsidie van 2012 gebaseerd op dit aantal. (AgentschapNL, 2012b) Daarom is in dit onderzoek ook voor dit aantal uren gekozen.

Ingevuld in de formule voor energie (met de factor tijd) geeft dit:

$$E = \frac{0,05 * 3.641 * 50 * 1.071 * (7.000 * 3.600)}{1.000.000.000} = 245.669 \text{ GJ}$$

In bijlage K is bepaald dat de cijfers van oktober beschouwd kunnen worden als maandgemiddelden in een jaar. In hoofdstuk 5 is berekend dat in totaal 16.086 GJ aan warmte is opgepompt in oktober van de onderzoeksperiode. Wanneer dit genomen wordt als maandgemiddelde voor een jaar, betekent dit dat GWW $12 \times 16.086 \text{ GJ} = 193.032 \text{ GJ}$ per jaar zou produceren wanneer het even hard zou draaien als in de onderzoeksperiode. Hiermee zou GWW op $193.032/245.669 = 78,6\%$ draaien van wat (maximaal) zou kunnen. Meer warmte hadden de bedrijven in de onderzoeksperiode echter niet nodig; wanneer meer bedrijven aangesloten worden, kan eventueel wel gebruik gemaakt gaan worden van deze extra warmte door de pompen harder te laten draaien.

8.3 Besparing

Het harder laten draaien van de pompen om meer warmte te verkrijgen, kost wel relatief meer elektriciteit; dit bleek uit de COP die dan omlaag gaat (hoofdstuk 6 en paragraaf 8.1). Om erachter te komen wat het elektriciteit verbruik is wanneer de pompen maximaal draaien, is gekeken naar afbeelding 8.2: op 13 november toen de maximale waarde van $177 \text{ m}^3/\text{h}$ werd bereikt, was het verbruik bijna 325 kWh per uur. Voor dit onderzoek wordt uitgegaan dat het pompen met $180 \text{ m}^3/\text{h}$, waarmee hierboven is gerekend, inderdaad 325 kWh per uur kost. Dit komt overeen met 1,17 GJ. Voor de 7.000 uur, zoals hierboven beredeneerd, is dus $7.000 \times 1,17 = 8.190 \text{ GJ}$ aan elektriciteit nodig. Opgewekt met een rendement van 50,5% (zie bijlage J) is hier 16.218 GJ energie voor nodig geweest. Dit betekent dat er netto $245.669 - 16.218 = 229.451 \text{ GJ}$ aan energie bespaard wordt, dus zo'n 229.500 GJ. Dit komt overeen met $7.250.000 \text{ m}^3$ aardgas en $12.880.000 \text{ kg CO}_2$, berekend zoals beschreven in hoofdstuk 7.

In tabel 8.1 is samengevat wat bij realisatie van de bron gedacht werd dat per jaar bespaard zou worden (bepaald naar aanleiding van de P90 schatting, zie hoofdstuk 4), hoeveel tijdens dit

onderzoek bespaard is, en hoeveel per jaar bespaard zou kunnen worden wanneer de pompen maximaal draaien.

Besparing per jaar	Aardgas [1.000 m ³]	CO ₂ [1.000 kg]
Voorspeld bij P90	5.800	10.300
Behaald in de onderzoeksperiode	5.700	10.100
Maximaal	7.250	12.880

Tabel 8.1 voorspelde, behaalde en maximale besparing per jaar in aardgas en CO₂

De gemiddelde COP die bereikt wordt bij het maximaal laten draaien van het systeem is $245.669 / 8.190 =$ ongeveer 30.

8.4 Conclusie

Aangezien de COP daalt bij toenemend elektriciteitsverbruik en het tegen de principes van GWW ingaat om zo laag mogelijk te draaien, is de COP geen goede maatstaaf voor het ‘beter’ benutten van de geothermiebron.

Ondanks dat GWW in de onderzoeksperiode nog niet maximaal gedraaid heeft, is de besparing die van te voren is berekend op basis van de P90 voorspelling dan al wel bijna bereikt. Wanneer in de toekomst meer bedrijven op Green Well Westland aangesloten worden en een grotere warmtevraag zal ontstaan, kan een nog betere besparing gerealiseerd worden door de pompen harder te zetten op het maximum wat het systeem kan draaien: 325 kWh per uur, wat overeenkomt met 180 m³/h. Hiermee kan de hoeveelheid opgewekte energie van 78,6% omhoog gaan naar 100% waardoor in totaal gemiddeld zo’n 229.500 GJ aan energie bespaard worden. Dit komt overeen met een besparing van ongeveer 7.250.000 m³ aardgas en 12.880.000 kg CO₂.

Wanneer de pompen maximaal staan, is de COP van het systeem ongeveer 30.

9. Well to warmth

Bij het bepalen van de duurzaamheid van het geothermische systeem van Green Well Westland, wordt ook de boring van de geothermiebron meegenomen (zie hoofdstuk 2). Dit houdt in dat de energiekosten met bijbehorende CO₂-uitstoot van het boren zelf meegenomen worden, evenals van het produceren van de materialen die zijn gebruikt. Zo kan de hoeveelheid energie die het kostte om het geothermische systeem op te zetten, vergeleken worden met wat het nu oplevert, waardoor de efficiency duidelijk wordt. In dit onderzoek wordt dit aangeduid met het begrip 'Well to warmth', dat in paragraaf 2.4 nader is toegelicht:

Het begrip 'well to warmth' is voor dit onderzoek afgeleid van het bestaande begrip 'well to wheel' waarin voor een vervoermiddel niet alleen gekeken wordt naar brandstofverbruik en CO₂-uitstoot, maar ook naar de productie van de brandstof of energiedrager. (Groenopweg, 2012)

In dit hoofdstuk worden eerst de materialen besproken en vervolgens de elektriciteit die nodig was voor de boring. Ten slotte wordt de conclusie getrokken wat dit betekent voor de efficiency van het systeem en in hoeveel maanden de investering in energie en CO₂ is terugverdiend. De gegevens die gebruikt worden zijn in bijlage J bepaald en onderbouwd.

9.1 Materialen

Bij het bepalen van de randvoorwaarden voor dit onderzoek, is in overleg met het Platform Geothermie besloten om alleen de productiekosten van de volgende materialen mee te nemen (zie paragraaf 2.5):

- Casings (staal)
- Transportleidingen (staal)
- Cement

Naast deze materialen zijn nog meer onderdelen van belang geweest bij het tot stand komen van het Green Well Westland project (bijvoorbeeld de pompen). De bovenstaande drie onderdelen zijn echter geselecteerd op de impact die ze op het project hebben qua productiekosten en CO₂-uitstoot. Voor de bronnen was immers kilometers staal nodig, evenals voor de transportleidingen, waardoor het een dominant materiaal is voor GWW wat betreft productiekosten en CO₂-uitstoot. Hierbij komt ook dat het staal dat bijvoorbeeld voor de pompen wordt gebruikt, recyclebaar is; het staal voor de injectie- en productieput zal niet hergebruikt kunnen worden, maar de pompen kunnen omgesmolten worden en zo nog andere doelen dienen. Bovendien is de gebruikte hoeveelheid staal voor de pompen veel minder vergeleken met de leidingen.

Hoewel cement niet in zulke grote hoeveelheden nodig was, is het maken van cement wel een zeer energie-intensief proces waarbij veel CO₂ uitgestoten wordt. Daarom is cement ook meegenomen in de analyse.

Op de well sketch in bijlage C is te zien hoe de casings in de bron zitten en dat deze uit verschillende delen bestaan. Deze delen worden na elkaar geplaatst; de overgangen tussen de casing delen worden aan elkaar bevestigd met behulp van cement. (T&A Survey, 2012a)

Staal

De hoeveelheid staal die voor de casings in de productie- en injectieput is gebruikt, is ongeveer 373 ton. De transportleidingen van GWW bestaan uit ongeveer 50 ton staal.

In totaal is dus 423 ton staal gebruikt.

In bijlage J is bepaald dat voor de productie van staal 40,1 MJ/kg aan energie nodig is en dat hierbij 2,15 ton CO₂ per ton staal uitgestoten wordt.

Dit betekent:

Energie: $(40,1/1.000)\text{GJ/kg} * 423.000 \text{ kg} = \mathbf{16.962 \text{ GJ}}$

CO₂: $2,15 \text{ ton/ton} * 423 \text{ ton} = \mathbf{909 \text{ ton CO}_2}$

Cement

Voor het vast cementeren van de casings is ongeveer 280 ton cement gebruikt.

In bijlage J is bepaald dat voor de productie van cement 4,5 GJ per ton cement aan energie nodig is en dat hierbij 820 kg CO₂ per ton cement uitgestoten wordt.

Dit betekent:

Energie: $4,5 \text{ GJ/ton} * 280 \text{ ton} = \mathbf{1.260 \text{ GJ}}$

CO₂: $(820/1.000) \text{ ton/ton} * 280 \text{ ton} = \mathbf{230 \text{ ton CO}_2}$

9.2 Elektriciteit voor de boring

Voor het boren van de productie- en injectieput was 1.325,3 MWh elektriciteit nodig, ofwel 4.771 GJ. Bij het opwekken van deze elektriciteit gold echter een rendement van 50,5% ofwel; voor elke kWh is 7,13 MJ aan primaire energie nodig. Voor de CO₂-emissiefactor voor het produceren van elektriciteit is 0,45 kg CO₂/kWh genomen. (Zie bijlage J.)

Dit betekent:

Energie: $(7,13 / 1.000) \text{ GJprim/kWh} * (1.325,3 * 1.000) \text{ kWh} = \mathbf{9.449 \text{ GJ}}$

CO₂: $(0,45 / 1.000) \text{ ton/kWh} * (1.325,3 * 1.000) \text{ kWh} = \mathbf{596 \text{ ton CO}_2}$

9.3 Conclusie

In tabel 9.1 zijn de bovenstaande resultaten samengevat.

Productie	CO ₂ -uitstoot [ton]	Energie [GJ]
Staal	909	16.962
Cement	230	1.260
Elektriciteit	596	9.449
Totaal	1.735	27.672

Tabel 9.1 – Totale CO₂-uitstoot en benodigde energie wat betreft de boring van GWW

In hoofdstuk 7 is bepaald hoeveel aardwarmte gemiddeld per maand in de onderzoeksperiode door de kassen gebruikt wordt en hiermee in energie en CO₂-uitstoot bespaard wordt. In hoofdstuk 8 is bepaald hoeveel deze besparing maximaal kan zijn per jaar. In tabel 9.2 wordt dit samengevat en zijn de waarden uit hoofdstuk 8 (de maximale besparing) teruggerekend naar waarden per maand. Vervolgens is gekeken hoeveel maanden het duurt voordat de hoeveelheid uitgestoten CO₂ en gebruikte energie bij de realisatie van de bron weer bespaard is door het gebruik van aardwarmte; ofwel, na hoeveel maanden de investering in energie en CO₂ is terugverdiend.

	CO ₂ -uitstoot [ton]	Energie [GJ]
Kosten bij realisatie van bron	1.735	27.672
Bespaard in onderzoeksperiode per maand	840	14.930
Terugverdientijd in gemiddelde maanden	2,1 maanden	1,9 maanden
Maximale besparing per maand	1.073	19.121
Terugverdientijd in gemiddelde maanden	1,6 maanden	1,4 maanden

Tabel 9.2 – terugverdientijd van de CO₂-uitstoot en het energiegebruik van het realiseren van de bron

De CO₂ die tijdens de boring is uitgestoten is in 2,1 maanden terugverdiend wanneer gerekend wordt met gemiddelde maanden tijdens de onderzoeksperiode. Wanneer GWW maximaal draait zou dit zelfs in 1,6 maanden terugverdiend zijn. Wat betreft het energiegebruik geldt dat in 1,9 maanden de hoeveelheid is terugverdiend die bij de boring nodig was, gerekend met gemiddelde maanden uit de onderzoeksperiode. Wanneer GWW maximaal draait zou dit 1,4 maanden zijn.

In totaal is er van augustus tot december data gebruikt voor dit onderzoek. In tabel 9.3 staat hoeveel CO₂ en energie er in totaal per maand bespaard is. Hieruit valt af te leiden dat in de maanden augustus, september en oktober in totaal 28.882 GJ energie is gebruikt. Dit betekent dat de

hoeveelheid energie die nodig was voor het realiseren van de bron al in oktober is terugverdiend. Wat betreft de CO₂-uitstoot was hier ook nog een deel van november voor nodig: na oktober was er 1.625,43 ton CO₂ bespaard, na november was dit 2.487,65 ton.

	Netto energie gebruikt bij kassen [GJ]	Bespaarde CO ₂ - emissie [1.000 kg]
Augustus	4.796	270,00
September	9.156	515,21
Oktober	14.930	840,22
November	15.346	862,22
December	17.433	978,37

Tabel 9.3 – Bespaarde CO₂-emissie door GWW

De berekeningen zoals uitgevoerd in dit onderzoek, met name dit hoofdstuk, zijn samengevat op een Excel sheet (zie bijlage L). Deze sheet is voor elke willekeurige geothermie bron in te vullen en is dus onafhankelijk van de gegevens van GWW. Hiermee kan elke operator berekenen hoe snel de energiekosten en CO₂-uitstoot van de realisatie van de geothermie bron zijn terugverdiend.

10. Conclusies

In dit onderzoek is een beeld geschetst van de duurzaamheid van Green Well Westland. Dit beeld is tot stand gekomen door het beantwoorden van de deelvragen die in hoofdstuk 2 zijn benoemd.

Hieronder volgen de belangrijkste conclusies die hierbij naar voren zijn gekomen.

- In de onderzoeksperiode was de gemiddelde hoeveelheid energie die bij de kassen gebruikt werd ongeveer 15.700 GJ.
- De verliezen over het transport van de warmte van GWW waren erg variabel, maar gemiddeld ongeveer 3%
 - o Andere distributiesystemen hadden 3 tot 10 keer zo hoge verliezen
 - o Het verlies van warmte bij GWW is hernieuwbare warmte; er gaat geen primaire energie verloren, waardoor het in mindere mate verspilling kan worden genoemd.
- In de onderzoeksperiode werd al ongeveer evenveel bespaard als door de P90 waarden van de geothermiebron voorspeld is.
- De netto besparing in energie in de onderzoeksperiode was ongeveer 14.900 GJ per gemiddelde maand, ofwel ongeveer 179.000 GJ per jaar.
- Er is in de onderzoeksperiode 472.000 m³ aardgas per gemiddelde maand bespaard, ofwel gemiddeld 5.700.000 m³ aardgas per jaar. Dit komt overeen met het jaarlijkse energieverbruik van:
 - o 3.550 huishoudens ; of
 - o 3.650 auto's; of
 - o Eén auto die 1.825 rondjes om de aarde rijdt
- Er is in de onderzoeksperiode 840.000 kg per gemiddelde maand aan CO₂-uitstoot bespaard, ofwel gemiddeld 10.100.000 kg CO₂ per jaar. Dit komt overeen met:
 - o de jaarlijkse productie van 1.200 huishoudens; of
 - o de jaarlijkse productie van 3.450 auto's; of
 - o de compensatie van 1.920 voetbalvelden vol tropische bomen die een jaar lang groeien
- De COP was gemiddeld ongeveer 40; dit was 2 maal zo hoog als de verwachting vooraf, en ongeveer 10 maal zo hoog als andere vergelijkbare systemen.
- Green Well Westland heeft in de onderzoeksperiode nog niet voluit gedraaid. Gemiddeld is 78,6% van de warmte opgepompt die naar boven gehaald had kunnen worden.
- Wanneer GWW voluit zou draaien zou de COP ongeveer 30 zijn.
- Het vermogen van de geothermiebron is 9,7 MW.

- Bij voluit draaien zou ongeveer 245.700 GJ per jaar aan warmte opgepompt kunnen worden. Dit geeft een jaarlijkse netto besparing van ongeveer:
 - 229.500 GJ aan energie;
 - 7.250.000 m³ aardgas; en
 - 12.880.000 kg CO₂
- Het produceren van de belangrijkste benodigdheden voor het realiseren van de bron, kostte in totaal 27.672 GJ aan energie en veroorzaakte 1.735 ton aan CO₂-emissie.
- Wanneer vanaf augustus gerekend wordt, is de hoeveelheid energie die nodig was voor het realiseren van de bron in oktober terugverdiend. De uitgestoten CO₂ was begin november vereffend.
- De berekeningen in dit onderzoek zijn gebaseerd op de data van GWW. Deze data bevatten in de onderzoeksperiode nog meeton nauwkeurigheden waardoor de resultaten kunnen afwijken van de werkelijkheid.

De algemene conclusie die uit het onderzoek volgt, is dat het geothermische systeem van Green Well Westland erg duurzaam is. Het gebruik van aardwarmte in plaats van aardgas levert veel besparing op in zowel energie, aardgas als CO₂-uitstoot. Bovendien is de investering in energie en CO₂-uitstoot, die nodig is voor het realiseren van de geothermiebron, binnen enkele maanden terugverdiend.

11. Aanbevelingen

Het onderzoek naar de duurzaamheid van Green Well Westland heeft in een zeer vroeg stadium van het bestaan van GWW plaatsgevonden. Nu het onderzoek is afgerond, blijkt het verstandig (delen van) het onderzoek in de toekomst nog een keer te herhalen. Hieronder wordt dit toegelicht:

- De onderzoeksperiode liep van augustus t/m december. Hiervan waren augustus en september 'testmaanden'. Ook werden halverwege december twee nieuwe bedrijven aangesloten. Hierdoor waren drie van de vijf maanden minder bruikbaar. De conclusies van dit onderzoek zijn voornamelijk gebaseerd op de maand oktober, aangezien deze overeenkomt met een gemiddelde maand in een jaar en er in deze maand goed doorgedraaid is zonder bijzonderheden. Het baseren van een heel jaar op één maand is echter niet erg nauwkeurig. Het zou beter zijn wanneer in de toekomst dit onderzoek plaats kan vinden voor een heel jaar waarin GWW voluit gedraaid heeft, waarna van hieruit het gemiddelde voor een jaar bepaald wordt.

Dit geldt specifiek voor de verliezen van het systeem van GWW in de onderzoeksperiode, die erg fluctueerden: het was hierdoor lastig goede conclusies aan de resultaten te verbinden. Wanneer een langere periode wordt uitgetrokken voor dit onderzoek waarin GWW voluit en stabiel draait, zullen deze conclusies waarschijnlijk duidelijker en beter zijn.

- Doordat de geothermiebron in de onderzoeksperiode meer warmte kon leveren dan GWW nodig had, zijn de resultaten wat betreft de besparing in de onderzoeksperiode minder goed dan ze hadden kunnen zijn. In hoofdstuk 8 wordt hier wel verder op ingegaan door te kijken naar wat de bron zou kunnen leveren, maar dit zijn voorspellingen op basis van de huidige productie. Om te bepalen wat GWW daadwerkelijk bespaart wanneer voluit gedraaid wordt, zal de analyse van het verbruik van GWW opnieuw gedaan moeten worden wanneer ook daadwerkelijk voluit gedraaid wordt.
- Verder bevatte de data van GWW in de onderzoeksperiode nog onnauwkeurigheden. Zo waren er fluctuaties waarneembaar die onverklaarbaar waren gezien vanuit de wetten van energie. Zo is in bijlage D besproken dat er ná een warmtewisselaar soms meer energie in het systeem zat dan ervoor; het gaat tegen de wetten van energie in dat er zomaar uit het 'niets' energie kan ontstaan. Tijdens het onderzoek is gezocht naar de oorzaken van deze onnauwkeurigheden en deze zullen worden opgelost. Wanneer dit is gebeurd, en alle data kloppend is, zouden de berekeningen nog een keer uitgevoerd moeten worden.

Een andere aanbeveling is om hoofdstuk 8, het onderzoek naar de verdere mogelijkheden, uit te breiden met een onderzoek naar hoeveel nieuwe bedrijven en/of woningen precies aangesloten kunnen worden. In dit onderzoek is berekend hoeveel energie er nog beschikbaar is; voor GWW is het ook handig om te weten wat precies met deze energie gedaan kan worden.

De 'well to warmth' berekeningen zijn in dit onderzoek afgebakend tot de (productie)kosten in energie en CO₂ van het benodigde staal, cement en elektriciteit voor het realiseren van de bron.

Hoewel deze, zoals beargumenteerd, het grootste deel van de investering vormen, zou in een vervolgonderzoek verder gekeken kunnen worden naar eventuele andere investeringskosten en/of materialen, of een uitbreiding van de huidige analyse door bijvoorbeeld transportkosten mee te nemen. Dit vereist echter een goede afbakening aangezien er vele transporten van materialen plaatsvinden die niet allemaal (geheel) te achterhalen zijn.

In het onderzoek zijn bepaalde resultaten een aantal keer vergeleken met verschillende situaties om een beeld te kunnen vormen van wat het resultaat zegt, zonder de intentie om hierbij uitputtend te zijn (zie hoofdstuk 2). Bij sommige onderdelen, zoals de vergelijking met verschillende distributiesystemen, is het echter niet gelukt om goed vergelijkingsmateriaal te vinden. Om het geschetste beeld scherper te krijgen, kan verder gekeken worden naar systemen die wel goed vergelijkbaar zijn. Ook kan het onderzoek in de toekomst opnieuw worden uitgevoerd, wanneer er meer geothermiebronnen zijn gerealiseerd in Nederland en er dus meer vergelijkingsmateriaal is.

Het wachten op de realisatie van meerdere geothermiebronnen in Nederland is ook verstandig, gezien het feit dat dit onderzoek zich op één specifieke bron heeft gericht. Om de duurzaamheid van geothermie goed te kunnen bepalen, zouden meerdere bronnen onderzocht moeten worden, waarna de conclusie getrokken kan worden hoe duurzaam geothermie in Nederland in het algemeen is.

Voor nu wordt huidige en komende operators aangeraden om de Excel sheet in te vullen die aan de hand van hoofdstuk 9 is ontwikkeld (bijlage L). Hierin kunnen de brongegevens en gegevens over de benodigheden voor het realiseren van de bron worden ingevuld; aan de hand hiervan rekent de sheet uit hoe snel de energiekosten en CO₂-uitstoot van de realisatie van de geothermie bron zijn terugverdiend. De sheet is onafhankelijk van de gegevens van GWW en dus geschikt voor elke operator.

Literatuurlijst

ADEME – French Environment and Energy Management Agency, 2012, *French know-how in the field of Geothermal Energy – District heating and electricity generation systems*

AgentschapNL

- a. *Regeling SEI Risico's dekken voor Aardwarmte* <http://www.agentschapnl.nl/programmas-regelingen/regeling-sei-risicos-dekken-voor-aardwarmte> geraadpleegd op 08-10-2012
- b. *Maak kennis met de SDE+ 2012*
<http://www.agentschapnl.nl/sites/default/files/bijlagen/Maak%20kennis%20met%20de%20SDE%202012.pdf>
- c. *Warmtepompen*
<http://www.agentschapnl.nl/sites/default/files/bijlagen/Warmtepompen%20-%20Infoblad.pdf> geraadpleegd op 06-12-2012

AgentschapNL, 2010, *Berekening van de standaard CO₂-emissiefactor aardgas t.b.v. kalender jaar 2010 en emissiehandel 2011*

<http://www.broeikasgassen.nl/docs/Zijlema%202010%20Berekening%20CO2-emissiefactor%20aardgas%20jaar%202010.pdf>

ANWB, *De resultaten van de ANWB auto enquête*

<http://www.anwb.nl/auto/nieuws/2011/april/enquete-autorijden> verschenen op 11 april 2011

ArcelorMittal, *Corporate responsibility – Climate change*

<http://www.arcelormittal.com/corp/corporate-responsibility/environment/climate-change>

Geraadpleegd op 07-12-2012

Bruijne, de, M., (VB Group B.V.) e-mails met informatie op 05-11-2012 en ..-11-2012

Buik, N., (IF Technology), 2012

- a. e-mail op 16-10-2012
- b. telefoongesprek op 15-11-2012

Compendium voor de Leefomgeving

- a. *Energieverbruik in de land- en tuinbouw, 1990-2010*
<http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0013-Energieverbruik-door-de-land--en-tuinbouw.html?i=6-40> geraadpleegd op 02-10-2012
- b. *CO₂-emissie per voertuigkilometer van nieuwe personenauto's, 1998-2011*
<http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl/indicatoren/nl0134-Koolstofdioxide-emissie-per-voertuigkilometer-voor-personenauto%27s.html?i=5-20> geraadpleegd op 28-12-2012

DWA, *CO₂-monitoring*

<http://www.co2-monitoring.nl/news/30/57/Wijziging-CO2-uitstoot-van-elektriciteitsproductie>
geraadpleegd op 24-09-2012

EERE, *Energy Basics – Renewable Energy*

http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/pv_cell_conversion_efficiency.html

Website geraadpleegd op 06-12-2012

Energieleveranciers.nl - calorische waarde, bovenwaarde en onderwaarde

<http://www.energieleveranciers.nl/energie/begrippen/calorische-waarde>

Website geraadpleegd op 19-12-2012

The Full Wiki, *Submersible pump: Wikis*, http://www.thefullwiki.org/Submersible_pump

Website geraadpleegd op 03-12-2012

Gemiddeld Gezien, Gemiddeld aantal kilometers per jaar <http://gemiddeldgezien.nl/meer-gemiddelden/184-gemiddeld-aantal-kilometers-per-jaar> geraadpleegd op 04-01-2013

Geothermal Energy Association, 2009, *Geothermal 101: Basics of Geothermal Energy Production and Use*, Washington, D.C.

Ook beschikbaar op http://smu.edu/smunews/geothermal/Geo101_Final_Feb_15.pdf

Gevonden via <http://geo-energy.org/basics.aspx>

Google Maps, www.google.nl/maps

Website geraadpleegd op 30-10-2012

Green Well Westland, 2012

- a. Website <http://www.green-well-westland.nl/index.php/greenwell-westland> geraadpleegd op 04-09-2012
- b. Presentatie Iustrum Platform Geothermie, 24-10-2012
- c. Zwinkels, T., Mulder, S., gesprekken, 2012

Groenopweg, *Woordenlijst – Well-to-wheel*

<http://www.groenopweg.nl/woorduitleg/231/Well-to-wheel>

Website geraadpleegd op 05-09-2012

Hanemaaijer, B., (Agro AdviesBuro,) e-mails en overleg, november-december 2012

Harmelen, A.K. van, Heslinga, D.C., 2006, *Vaststellingsmethodieken voor CO₂-emissiefactoren van aardgas in Nederland*, Apeldoorn, TNO

<http://www.broeikassgassen.nl/docs/Harmelen%202006-A-R0079-B%20rapport.pdf>

Harmelink, M., Bosselaar, L., Gerdes, J., Segers, R., Verdonk, M., 2012, *Berekening van de CO₂-emissies, het primair fossiel energiegebruik en het rendement van elektriciteit in Nederland*, Agentschap NL, CBS, ECN, Planbureau voor de Leefomgeving

HeidelbergCement, *Table of emissions from production*,
http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/2DC9907E-30C9-4B17-9B97-B2A6F5433882/0/Table_emissions_from_production.pdf
Website geraadpleegd op 12-12-2012

Hermans, J., 2009, *Energie survival gids (inzicht in energie en uitzicht voor de toekomst)*, tweede druk, Bergen, BetaText

Hongwei, L., Svendsen, S., 2012, Energy and exergy analysis of low temperature district heating network, *Energy*, Volume 45, p237-246

Jong, K. de, telefoongesprek op 30-11-2012

Vries, G. de, *Kennislink.nl, Aflaatbomen tegen CO₂-uitstoot*,
<http://www.kennislink.nl/publicaties/aflaatbomen-tegen-co2-uitstoot> geraadpleegd op 09-01-2013

Keçebas, A., 2013, Energetic, exergetic, economic and environmental evaluations of geothermal district heating systems: An application, *Energy Conversion and Management*, Volume 65, p546-556

Khurana, S., Banerjee, R., Gaitonde, U., 2002, Energy balance and cogeneration for a cement plant, *Applied Thermal Engineering*, Volume 22, p485-494

Kondili, E., Kaldellis, J. K., 2006, Optimal design of geothermal-solar greenhouses for the minimisation of fossil fuel consumption, *Applied Thermal Engineering*, Volume 26, p905-915

LEI en CBS, 2011, *Land- en tuinbouwcijfers 2011*, Wageningen UR

Lenzen, M., Dey, C., 2000, Truncation error in embodied energy analyses of basic iron and steel products, *Energy*, Volume 25, p577-585

Lokhorst, A., Wong, Th.E., 2007, *Geology of the Netherlands - Geothermal energy*, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, p341-346
http://geothermie.nl/fileadmin/user_upload/documents/bestanden/Engels/Geology_of_The_Netherlands.pdf

Marschall-Wesselingh, A.G., 2003, De oorsprong van Aardolie, *gea*, december 2003, nummer 4, p103-106
http://www.gea-geologie.nl/informatie/tijdschrift/Gea/pdf/2003_04_Marschall-Wesselingh_aardolie.pdf

Milieucentraal

- a. *Rekentool voor CO₂-uitstoot* <http://www.milieucentraal.nl/thema's/thema-1/klimaat-en-milieu Problemen/klimaatverandering/klimaatcompensatie/bereken-uw-co2-uitstoot> geraadpleegd op 24-09-2012
- b. *Gemiddeld energieverbruik* <http://www.milieucentraal.nl/campagnes/week-van-de-energierekening/> geraadpleegd op 28-12-2012

Ministerie van EL&I - Economische Zaken, Landbouw en Innovatie, 2011 *Actieplan Aardwarmte* http://geothermie.nl/fileadmin/user_upload/documents/bestanden/wetgeving_en_beleid_oud/actieplan_aardwarmte_EL_I.pdf

Union of Concerned Scientists, *Clean energy – How Geothermal Energy works*, http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/how-geothermal-energy-works.html

Laatst aangepast op 16-12-2009

Platform Geothermie

- a. *De bron van de energie en de energie van de bronnen* <http://geothermie.nl/geothermie/de-bron-van-de-energie/> geraadpleegd op 17-09-2012
- b. *Potentieel* <http://geothermie.nl/geothermie/de-bron-van-de-energie/potentieel-nl/>
- c. *Handboek Geothermie in de Gebouwde Omgeving*, 2012
- d. *Principe van de bron* <http://geothermie.nl/geothermie/de-bron-van-de-energie/principe-van-de-bron/> geraadpleegd op 17-09-2012
- e. *Waarom geothermie* <http://geothermie.nl/geothermie-aardwarmte/waarom-aardwarmte/> geraadpleegd op 25-09-2012
- f. *Vergelijking kosten per hernieuwbare energiebron in Euro per GJ* http://geothermie.nl/fileadmin/user_upload/documents/bestanden/wetgeving_en_beleid_oud/SDE_kosten_vergelijking_2.pdf
- g. *Toelichting Victor van Heekeren*, september-december 2012
- h. *Projecten* <http://geothermie.nl/geothermie/projecten/> geraadpleegd op 08-10-2012
- i. *Green Well Westland* <http://geothermie.nl/geothermie-aardwarmte/projecten/greenwell-westland/> geraadpleegd op 04-09-2012
- j. *Het Platform* <http://geothermie.nl/het-platform/> geraadpleegd op 04-09-2012

Poredoš, A., Kitanovski, A., 2002, Exergy loss as a basis for the price of thermal energy, *Energy Conversion and Management*, Volume 43, p2163-2173

Rybach, L., 2003, Geothermal energy: sustainability and the environment, *Geothermics*, 32, p463-470

Scheffers, J., (Green Well Westland) gesprek op 05-11-2012

Schepers, B., Benner, J., Bennink, D., 2010, *200-200 in 2020 - Overzicht van het warmtepotentieel in Nederland*, CE Delft

Taal, A.C., 2005, *Toegepaste Energieleer – warmte- en stromingsleer*, Sdu Uitgevers bv, Den Haag

- a. Tabel B2.4
- b. § 3.2
- c. § 4.4

T&A Survey

- a. De Bruin, G., Vrouwe, B., gesprek op 05-10-2012
- b. Vrouwe, B., e-mail op 17-10-2012
- c. Visee, J., e-mail met informatie op 19-10-2012

Weerverleden.nl, jaaroverzicht 2012

<http://weerverleden.nl/2012>

Website geraadpleegd op 14-01-2013

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Ozawa Meida, L., 2001, Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry, *Annual review of energy and the environment*, Volume 26, p303-329

Worrell, E., e-mail met informatie, 10-12-2012

Bijlagen

Inhoudsopgave

Bijlage A – SDE+ berekening	v
Bijlage B – Overzicht systeem Green Well Westland	vii
Bijlage C – Boortekeningen	xi
Bijlage D – Methode en aannname verantwoording	xiii
Bijlage E – Distributiesysteem in Afyon	xxix
Bijlage F – Elektriciteitsverbruik GWW	xxxi
Bijlage G – Pompen GWW	xxxv
Bijlage H – Aardgas factoren	xxxvii
Bijlage I – Verdere mogelijkheden	xxxix
Bijlage J – Well to warmth	xli
Bijlage K – Gemiddeld maandverbruik in een jaar	xlvi
Bijlage L – Terugverdiëntijd realisatiekosten	xlvi

Bijlage A – SDE+ berekening

Het berekenen van het exacte bedrag dat een operator voor zijn geothermie project zou kunnen ontvangen via SDE+, is erg lastig en eigenlijk pas met zekerheid vast te stellen op het moment dat hij het bedrag daadwerkelijk ontvangt. De reden hiervoor is dat het bedrag erg afhankelijk is van verscheidene uiteenlopende factoren. Zo kunnen de ‘knoppen’ die bij de SDE+ horen elk jaar anders ingesteld worden. Hieronder staan een aantal factoren die een belangrijke rol spelen. In de folder ‘Maak kennis met de SDE+ 2012’ is hier meer over te lezen. (Agentschap NL, 2012b)

- Het maximale aantal vollasturen die meegenomen kunnen worden kan variëren, dit was voor 2012 7.000
- Van te voren wordt uitgegaan van een schatting van de gasprijs. De bijdrage wordt bepaald door een basisbedrag (in 2012 10,9 €/GJ) en een correctiebedrag. Achteraf vindt een herberekening plaats op basis van de werkelijk gerealiseerde gasprijs. Hierbij kan het correctiebedrag nog aangepast worden. Voorlopig staat het correctiebedrag over 2012 op 5,5 €/GJ, maar de uiteindelijke subsidie kan dus nog aangepast worden naar een ander bedrag tussen de 0 en 6,8 €/GJ.

Naast de knoppen die aangedraaid kunnen worden zitten er ook nog wat nadelen aan de regeling waardoor het onzeker wordt wat het bedrag is dat ontvangen zal worden:

- Wanneer de productie tegenvalt en een operator niet of nauwelijks GJ's produceert (om welke reden dan ook), krijgt hij hier ook geen geldbedrag voor: het aantal GJ dat geproduceerd wordt is de leidraad.
- De SDE+ regeling heeft een looptijd van maximaal 15 jaar waarbij een bedrag van X € per jaar ontvangen wordt. Het bedrag X staat echter niet vast (zie correctiebedrag voor de gasprijs hierboven) en bovendien wordt de contante waarde van het bedrag steeds minder waard naarmate het moment van betaling later valt. (Ofwel, bedrag X is in jaar 1 meer waard dan in jaar 15.)

Al deze argumenten moeten meegenomen worden wanneer de SDE+-regeling besproken wordt. Voor nu zal er een voorbeeldberekening volgen waarin alle standaardwaarden voor 2012 aangenomen worden.

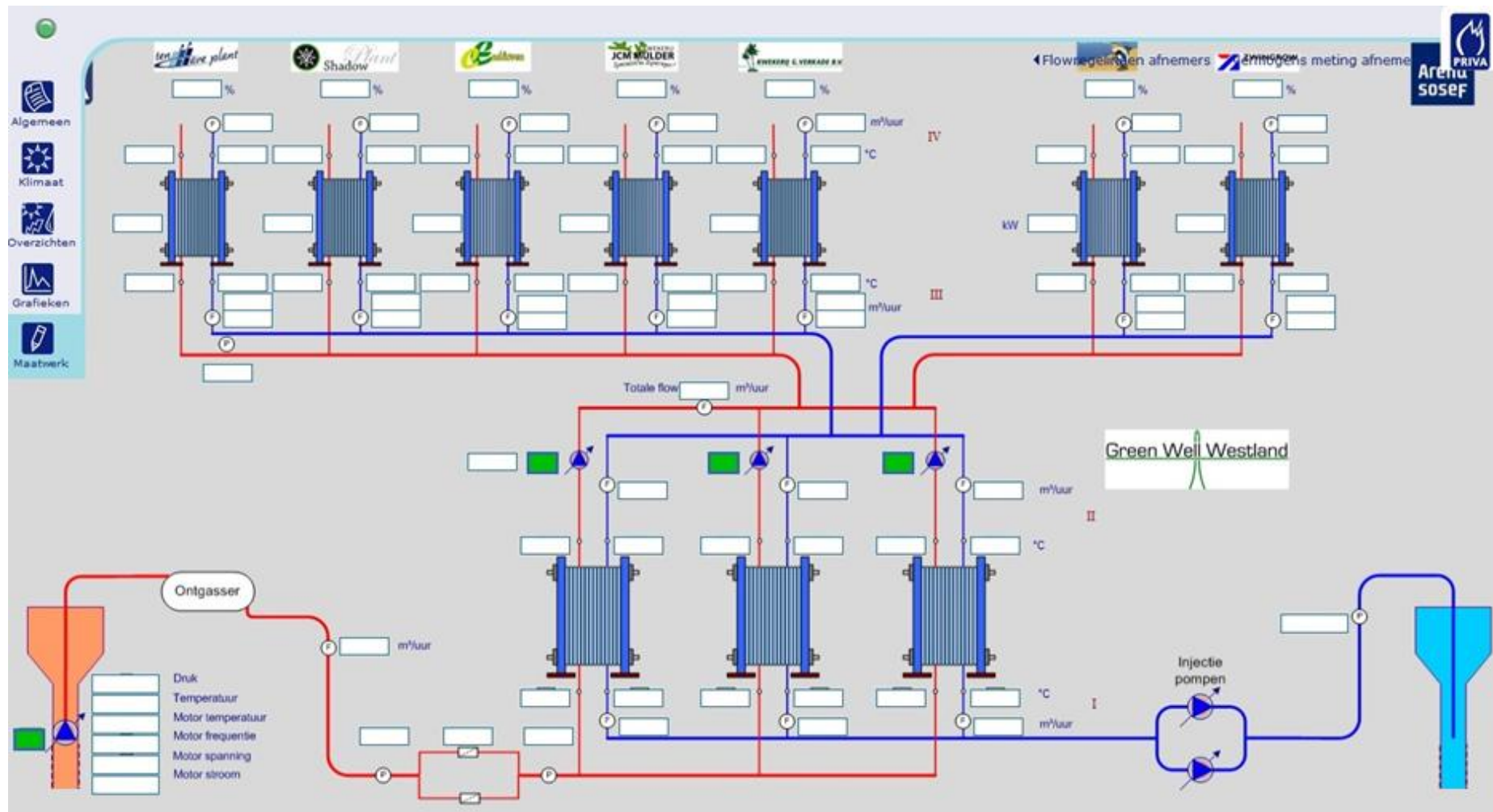
Wanneer uitgegaan wordt van een referentieproject van 7,2 MWth met onderstaande criteria voor 2012, is het voorlopige bedrag dat ontvangen kan worden ongeveer € 1.000.000 per jaar:

Basisbedrag: 10,9 €/GJ
Correctiebedrag over 2012: 5,5 €/GJ
Maximaal aantal vollasturen: 7.000
(AgentschapNL, 2012b)

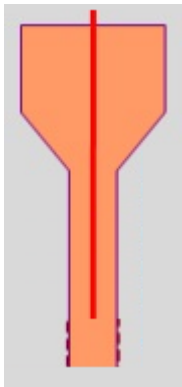
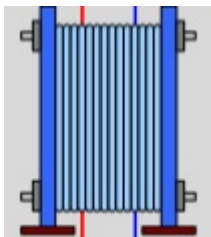
Voorlopige SDE-bijdrage 2012: $10,9 - 5,5 = 5,4 \text{ €/GJ}$
Maximale subsidiabele jaarproductie: $7,2 \text{ MW} * 7.000 = 50.400 \text{ MWh}$

$50.400 \text{ MWh} = 50.400 * 1.000.000 \text{ J/s} * 3.600\text{s} = 181.440.000.000.000 \text{ J} = 181.440 \text{ GJ}$
(Voorlopige) SDE-bijdrage 2012 totaal: $5,4 \text{ €/GJ} * 504.000 \text{ GJ} = \underline{\underline{€ 979.776}}$

Bijlage B – Overzicht systeem Green Well Westland

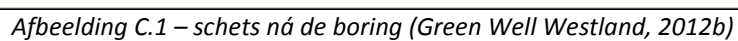


Het schema op de vorige pagina is een 'printscreen' van het computersysteem van Green Well Westland. Met dit systeem wordt allerlei data verzameld zoals de temperatuur in °C en flow in m³/uur. De belangrijkste onderdelen van het overzicht worden in onderstaande tabel uitgelegd. De werking van het systeem is hetzelfde als is beschreven in hoofdstuk 3 bij afbeelding 3.5.

	Productieput		Injectieput
	Warmtewisselaar		Pomp
	Warm water (aanvoer)		Koud water (retour)
	Data Op deze plekken worden in het systeem metingen gedaan		Metingen over: Druk Flow Temperatuur

De Romeinse cijfers I t/m IV verwijzen naar de plaatsen waar metingen zijn gedaan ten behoeve van dit onderzoek. Meer uitleg hierover is te vinden in bijlage D.

C.1 Boorconfiguratie Green Well Westland



C.2 Well Sketch vooraf

Well		HON Producer GT1		Company: T&A Survey									
Project		GWW - Honsellersdijk											
Start Drilling		15-11-2011											
Measured depth (m)	Geological period	Group / Formation	Anticipated lithostratigraphy (members)	KW zone possible	Water zone	Pressure gradient	Temperature gradient	Drilling parameter	Design	Geologie	Pan Terra Geo Consultants B.V.	15-9-2011	
								Drilling Planning	TB K. GOLLOB GmbH				
								Casing Parameter	Cementation	Drilling Fluid			
	TERTIARY/QT	Northsea:		according Panterra Geo consulting non predicted		hydrostatic	normal Gradient 3,1 °C / 100 m	16" Drill bit	20" (18 5/8") stove pipe to 100 m	9 5/8" Anchor Casing 53.5 lbs/ft L-80 TSH Blue			
500			Upper										12 1/4" Drill bit BHA for vertical well section single shot / MWD or Gyro
			Middle										
		Lower											
	CRETACEOUS	Chalk		according Panterra Geo consulting non predicted		hydrostatic	normal Gradient 3,1 °C / 100 m	MD 1110 m	Liner Hanger @ 1060 m				
1000			Texel Marl										Possible losses !!!
			Rijnland: Holland Fm.		according Panterra Geo consulting non predicted		hydrostatic	normal Gradient 3,1 °C / 100 m	8 1/2" Drill bit blind BHA for vertical well section MWD	7" Intermediate Liner 29 lb/ft L-80 VAGT			
1500									Kick off point 1500 m; DLS max. 3 ° Incl to max. 40 ° at 1900 m Tagent section to TD constant Azimut 325°				
2000			Rijnland: Vlieland Fm.	De Lier Sandstone						Possible additional screens over Delft and Rijswijk formation in case production demands opening this formations by perforation			
2500				Rijswijk Sandstone						Liner Hanger @ 2.720 m			
	JURASSIC	Schieland: Nieuwerkerk Fm.	Delft Sandstone	according Panterra Geo consulting several possible		hydrostatic	normal Gradient 3,1 °C / 100 m	MD 2780 m	7" Casing Shoe @ 2.777m				
3000			Pijnacker Sandstone					6 1/8" Drill bit	5 1/2" Screens in Reservoir Section 4 1/2 base pipe 12.6 lb/ft L-80 BTC				
								Tangent section Blind BHA					
								TD at 3245 m					

Afbeelding C.2 – Schets vóór de boring (T&A Survey, 2012b)

Bijlage D – Methode en aanname verantwoording

Voor het beantwoorden van een aantal deelvragen, was een analyse nodig van data afkomstig van Green Well Westland. Op de centrale computer van Green Well Westland worden allerlei metingen uit het geothermische systeem (zie bijlage B) per 5 minuten opgeslagen. Deze data kunnen geëxporteerd worden naar Excel, waarna ze bewerkt en/of geanalyseerd kunnen worden. Hoe dit voor dit onderzoek is aangepakt is te lezen in deze bijlage.

Voor dit onderzoek was niet alle data nodig, maar is een selectie gemaakt. Waar de keuze om bepaalde data wel of niet mee te nemen op gebaseerd is, wordt hieronder toegelicht in paragraaf D.1.

In paragraaf D.2 wordt besproken waar in het systeem van GWW de analyse is uitgevoerd en waarom.

Welke berekeningen zijn gedaan en hoe dit in Excel is verwerkt, gaat paragraaf D.3 nader op in; dit is gebeurd aan de hand van de formule zoals besproken in D.1.

Paragraaf D.4 gaat verder in op een specifiek deel van D.3, namelijk welke debieten wel en niet meegenomen worden in de berekeningen.

Ten slotte gaat paragraaf D.5 dieper in op hoe de soortelijke warmte en dichtheid zijn bepaald waarmee is gerekend.

D.1 Selectie

Bij het bepalen welke data belangrijk was voor het onderzoek, is eerst bekeken voor welke deelvragen de data nodig was. Dit waren de volgende:

- Hoeveel energie wordt gebruikt bij de verwarming van de kassen?
- Wat zijn de warmteverliezen door distributie van de warmte naar de bedrijven?

Deze vragen konden beantwoord worden met de volgende formule:

$$E = Q * C_p * \Delta T * \rho * t$$

Hierin is:

E = energie [J]

Q = debiet [m³/s]

C_p = soortelijke warmte [J/kgK]

ΔT = verandering in temperatuur [K]

ρ = dichtheid [kg/m³]

t = verstreken tijd [s]

In het kader op de volgende pagina staat beschreven hoe deze formule is afgeleid.

De formule voor Energie (warmte) is afgeleid uit de volgende formule uit Taal (2005):

$$E = m * C_p * \Delta T$$

De massa 'm' is gelijk aan het volume*dichtheid, ofwel $V * \rho$:

$$E = V * \rho * C_p * \Delta T$$

Wanneer het volume per tijdseenheid bekeken wordt, krijg je een hoeveelheid volume per seconde. Om de eenheid van 'E' op Joule te houden, moet de formule wel weer vermenigvuldigd worden met de tijd 't':

$$E = \frac{V}{t} * \rho * C_p * \Delta T * t$$

Hierbij is V/t gelijk aan de volumestroom, ofwel het debiet 'Q':

$$E = Q * C_p * \Delta T * \rho * t$$

Kader D.1 – Afleiding energieformule

Uit de data van GWW waren de volgende onderdelen te halen:

- Debiet
- De aanvoertemperatuur en de retourtemperatuur; uit deze twee kon de ΔT bepaald worden.
- De verstreken tijd

In dit onderzoek is de energie per regel in Excel (dus per 5 minuten) bepaald en vervolgens opgeteld. De verstreken tijd in seconden was dus steeds $5 * 60 = 300$ seconden.

In paragraaf D.3 wordt uitgelegd hoe de onderdelen van de formule uit de data zijn gehaald en hoe ze bewerkt zijn tot geschikte invoer voor de energieformule

In paragraaf D.5 wordt toegelicht hoe is omgegaan met het bepalen van de te gebruiken soortelijke warmte en dichtheid, die afhankelijk zijn van de temperatuur.

Eerst wordt nu besproken welke meetplaatsen in het systeem geanalyseerd konden worden, voor welke plaatsen uiteindelijk gekozen is en waarom deze keuze gemaakt is.

D.2 Plaatsbepaling

Om de deelvragen te beantwoorden kon de energieberekening op verschillende plekken in het systeem uitgevoerd worden. In bijlage B zijn deze aangegeven met de Romeinse cijfers I t/m IV (zie ook bijlage B voor visualisatie):

- I. Vóór de drie warmtewisselaars (primair): na het oppompen van het warme water, en voor het injecteren van het afgekoelde water. Deze berekening laat zien wat de totale hoeveelheid energie is die uit de bodem zou kunnen worden benut.

- II. Ná de drie warmtewisselaars (secundair): de warmte uit de bron is hier overgezet op een ander circuit.
- III. Na transport, vóór de warmtewisselaars bij de kassen (primair): het warme water heeft hier iets aan energie verloren door het transport.
- IV. Bij de kassen, ná de warmtewisselaars (secundair): het water is opnieuw overgezet op andere circuits. De berekeningen hier geven aan hoeveel energie er daadwerkelijk door de kassen gebruikt wordt

In hoofdstuk 5 wordt I vergeleken met IV; de berekening I – IV geeft de verliezen weer. Hierdoor wordt duidelijk hoeveel energie er verloren gaat van beginpunt tot gebruikpunt.

Er is overwogen om niet I en IV met elkaar te vergelijken maar II en III. Dit vanwege het feit dat overheden op deze plaatsen meten en het wellicht handig zou zijn dit onderzoek gelijk te trekken met die berekeningen. Er is echter besloten dit niet te doen, omdat het begin- en eindeel van het systeem ook belangrijk zijn voor het berekenen van de complete duurzaamheid van het systeem zoals in dit onderzoek. (De verschillen zijn overigens relatief gering, zoals hierna zal blijken.)

Een ander argument om voor II te kiezen in plaats van I, is vanwege het feit dat bij I 'aardwater' ofwel brine door het circuit stroomt, wat veel zouter is dan 'normaal' water en andere eigenschappen heeft. Berekeningen op deze plek zijn dan ook lastiger dan bij II, waar de warmte overgezet is op een ander, zoet, circuit met de eigenschappen van gewoon water. Na onderzoek bleek het echter wel mogelijk de berekening bij I uit te voeren. Daarom, en vanwege het argument dat hierboven is genoemd, is uiteindelijk besloten om toch I aan te houden. De berekeningen rondom het brine worden toegelicht in paragraaf D.5.

Verder leek het interessant om niet de keuze te maken tussen II-III of I-IV, maar ze alle vier mee te nemen en met elkaar te vergelijken, zodat het verlies in stappen duidelijk zou worden gemaakt. Om toen nog onduidelijke redenen bleek echter dat er soms meer energie in het systeem zit na de warmtewisselaars dan ervoor (van I naar II en van III naar IV). Dit was, gezien de wetten van energie, een bijzondere ontdekking; de wet van behoud van energie geeft immers aan dat er bij overzetting op een ander circuit niet opeens meer energie in een systeem kan zitten dan ervoor. In principe zou daar alleen verlies op kunnen treden, tenzij een soort 'upgrade' van de warmte plaatsvindt in de warmtewisselaars, zoals het extra verwarmen van het water. Na overleg met Green Well Westland bleek dit niet het geval te zijn; de conclusie die hieruit getrokken werd, is dat het verschijnsel veroorzaakt wordt door onnauwkeurigheden in de meetapparatuur, ook omdat het verschil soms per 5 minuten, schijnbaar willekeurig, omdraait. In een gesprek met Bram Hanemaaijer van Agro AdviesBuro is uiteindelijk bevestigd dat het inderdaad om meetonnauwkeurigheden gaat; er wordt momenteel gewerkt aan het verbeteren van de meetapparatuur.

Voor het onderzoek betekenden deze afwijkingen alleen dat het in kaart brengen van de vier stappen in het systeem met bijbehorend verlies niet relevant was; de schijnbare verliezen van I-II en van III-IV zijn ongeveer even groot als de onnauwkeurigheden in de metingen op deze plaatsen. Het gaat om relatief kleine verschillen vergeleken met de grotere verliezen die optreden over het transport van plek II naar plek III: rond de 0,2-1% verlies van plek I naar II en III naar IV, tegenover 2-5% verlies van plek II naar III.

Na overweging van de bovenstaande argumenten is uiteindelijk besloten om voor het onderzoek alleen naar het verschil tussen I en IV te kijken, en het verlies (of winst) bij de warmtewisselaars als verwaarloosbaar te beschouwen. De onnauwkeurigheden in de metingen hebben geen (grote) invloed op deze berekeningen. Het betekent alleen wel, zoals in hoofdstuk 2 is genoemd, dat de resultaten enige afwijking kunnen vertonen met de werkelijkheid.

In hoofdstuk 4 is besproken dat in december twee nieuwe bedrijven aan GWW zijn toegevoegd. Tijdens deze werkzaamheden is het meetsysteem van GWW aangepast, waardoor de gegevens op plek IV niet meer te verkrijgen waren. Om deze reden is voor december naar plek III gekeken in plaats van IV. Hierboven is uitgelegd dat dit geen waarneembare gevolgen heeft voor het onderzoek.

D.3 Berekeningen

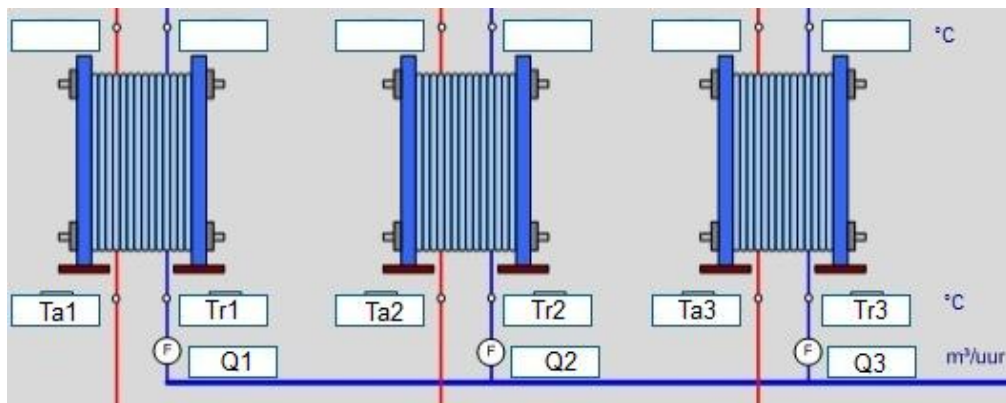
In deze paragraaf wordt ingegaan op hoe de data geschikt is gemaakt voor invoer in de energieformule en hoe de energieberekening uiteindelijk tot stand is gekomen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van printscreens van de Excel bestanden die zijn gemaakt met behulp van de data van Green Well Westland.

In principe zal de toelichting betrekking hebben op de berekeningen bij plek I; het principe is namelijk hetzelfde als bij plaats IV bij de kassen, wat het overbodig maakt deze toelichting ook voor de kassen uiteen te zetten. Hieronder zal eerst worden uitgelegd waar de verschillen tussen I en IV zitten, en hoe de berekeningen hierdoor verschillen. Vervolgens zal ingegaan worden op de berekeningen in Excel bij plek I.

Plek I – Plek IV

Zoals te zien is in bijlage B (en in meer detail op afbeelding D.1 op de volgende pagina), zijn er op plek I drie warmtewisselaars. Het berekenen van de totale hoeveelheid energie die op plek I in het systeem zit, kan op twee manieren, die beide hetzelfde resultaat geven:

1. Voor elke warmtewisselaar apart, met behulp van drie keer de energieformule, waarna de drie hoeveelheden energie bij elkaar opgeteld worden.
2. Voor de drie warmtewisselaars bij elkaar, met behulp van één keer de energieformule. Hiervoor moet wel eerst de invoer van de energieformule bepaald worden uit de gegevens van de drie warmtewisselaars; er is dus één debiet nodig (de drie debieten bij elkaar opgeteld), één T aanvoer en één T retour.



Afbeelding D.1 – De drie warmtewisselaars (uit bijlage B)

Om voor de tweede manier de aanvoer en retourtemperatuur van de drie flows bij elkaar te krijgen, moest van elke temperatuurmeting bepaald worden welke ‘bijdrage’ ze had aan het geheel. Dit is als volgt gedaan:

$$Q \text{ totaal} = Q1 + Q2 + Q3$$

$$T \text{ aanvoer (gemiddeld)} = (Ta1 * Q1 + Ta2 * Q2 + Ta3 * Q3) / Q \text{ totaal}$$

$$T \text{ retour (gemiddeld)} = (Tr1 * Q1 + Tr2 * Q2 + Tr3 * Q3) / Q \text{ totaal}$$

Aangezien de tweede manier gemakkelijker te verwerken was, is bij plek I voor deze manier gekozen. Bij de kassen was er echter sprake van onderlinge temperatuurverschillen in de retour; de kassen hadden elk een andere energiebehoefte. Het was daardoor niet verstandig om deze temperaturen te middelen, maar de hoeveelheid energie voor elke kas apart te berekenen en vervolgens bij elkaar op te tellen. Bij de kassen is dan ook voor manier 1 gekozen.

Dit houdt in dat onderstaande uitleg (bij ‘Excel’) in principe ook voor de kassen geldt, behalve dat de berekening voor elke kas apart is gedaan en deze naast elkaar zijn gezet in het tabblad van die maand. Uiteraard hoefden hier geen debieten en temperaturen samengevoegd te worden; alleen de uiteindelijke hoeveelheid energie is bij elkaar opgeteld om het totaal bij de kassen te bepalen. Dit totaal is wel het enige resultaat dat terug te vinden is in dit rapport; vanwege de vertrouwelijkheid zullen de resultaten van de individuele kassen niet genoemd worden.

Excel

In Excel zijn de berekeningen als volgt uitgevoerd:

Aan de linkerkant (verticale as) stond de datum en tijd, per 5 minuten. Aan de bovenkant (horizontale as) stonden de verschillende onderdelen die nodig waren voor de berekening. In de eerste kolommen (B T/m L) werd de data gezet die uit het systeem van GWW is gehaald (zie afbeelding D.2abc).

	A	B	C	D
1		aanv pri	aanv pri	aanv pri
2		AUT.OPN 1 OPN 1 WW 1	AUT.OPN 1 OPN 5 WW 2	AUT.OPN 1 OPN 9 WW 3
3		Â°C	Â°C	Â°C
4	1-10-2012 0:00	84,8	84,7	84,5
5	1-10-2012 0:05	84,8	84,7	84,4
6	1-10-2012 0:10	84,8	84,7	84,5
7	1-10-2012 0:15	84,8	84,7	84,5
8	1-10-2012 0:20	84,8	84,7	84,4

Afbeelding D.2a – Aanvoertemperaturen bij plek I

	A	F	G	H
1		ret pri	ret pri	ret pri
2		AUT.OPN 1 OPN 2 WW 1	AUT.OPN 1 OPN 6 WW 2	AUT.OPN 1 OPN 10 WW 3
3		Â°C	Â°C	Â°C
4	1-10-2012 0:00	35,6	38,7	40,5
5	1-10-2012 0:05	35,7	38,6	40,5
6	1-10-2012 0:10	35,6	39,08	40,98
7	1-10-2012 0:15	35,7	39,39	41,58
8	1-10-2012 0:20	35,8	39,69	41,89

Afbeelding D.2b – Retourtemperaturen bij plek I

	A	J	K	L
1		actueel	actueel	actueel
2		PULSM 1 WW 1 flow pri	PULSM 3 WW 2 flow pri	PULSM 5 WW 3 flow pri
3		eenh/uur	eenh/uur	eenh/uur
4	1-10-2012 0:00	35	38	38,04
5	1-10-2012 0:05	35	38	38
6	1-10-2012 0:10	35	38	38,96
7	1-10-2012 0:15	35	38	39
8	1-10-2012 0:20	35	38	38,04

Afbeelding D.2c – Debieten bij plek I

In totaal zijn er vier Excel bestanden gemaakt; één voor elke plek in het systeem (I t/m IV). In elk bestand zijn tabbladen gemaakt per maand (zie afbeelding D.3); er is dus voor elke plek per maand uitgerekend wat de totale hoeveelheid energie op dat moment was in dat deel van het systeem. Hiervan zijn, zoals besproken in hoofdstuk 2, de maanden juni en juli niet meegenomen; de maanden augustus en september werden beschouwd als testmaanden en de maanden oktober t/m december zijn meegenomen als volledig draaiende maanden.

►	Juni	Juli	Augustus	September	Oktober	November	December	Constanten

Afbeelding D.3 – Tabbladen van alle maanden die berekend zijn, plus een tabblad met gebruikte constanten

Nadat de data in kolommen B t/m L is gezet, werd in de kolommen O t/m V de verkregen data verwerkt tot invoer voor de algemene Energieformule. Dit is te zien in afbeelding D.4.

De formules om deze gegevens te bepalen werden ingevoerd in de eerste regel, waarna ze doorgetrokken werden tot de onderste regel (de laatste 5 minuten van die maand).

	A	O	P	Q	R	S	T	U	V
1									
2		Gem T aanv	Gem T ret	Delta T	Delta T	Gem T		Tot. flow	Tot. flow
3					>0			m3/h	per s
4	1-10-2012 0:00	84,66	38,34	46,32	46,32	61,50		111,04	0,03
5	1-10-2012 0:05	84,63	38,34	46,29	46,29	61,48		111,00	0,03
6	1-10-2012 0:10	84,66	38,65	46,01	46,01	61,66		111,96	0,03
7	1-10-2012 0:15	84,66	39,00	45,66	45,66	61,83		112,00	0,03

Afbeelding D.4 – Verwerking van data van temperaturen en debieten (B t/m L)

Hieronder volgt de uitleg hoe deze data tot stand is gekomen en welke aannames hierbij zijn gedaan. Dit zal worden uitgelegd door de eerste regel van de Excel berekeningen als voorbeeld te nemen; dit is regel 4 die oranje is in bovenstaande afbeeldingen.

- De gemiddelde temperaturen voor zowel aanvang als retour zijn bepaald op de manier zoals eerder in deze paragraaf beschreven. Hierbij is voor de volledigheid ingebouwd dat wanneer de debieten (J-L) opgeteld '0' zijn (en er dus gedeeld wordt door '0'), er geen foutmelding wordt gegeven. Dit is als volgt gedaan:
 Gem T aanv: =ALS((J4+K4+L4)=0;0;(((B4*J4)+(C4*K4)+(D4*L4))/(J4+K4+L4)))
 Gem T ret: =ALS((J4+K4+L4)=0;0;(((F4*J4)+(G4*K4)+(H4*L4))/(J4+K4+L4)))
 Op deze manier zal de gemiddelde temperatuur op '0' gezet worden wanneer de debieten bij elkaar opgeteld '0' zijn. Deze aanname is niet erg, aangezien de temperatuur er niet toe doet wanneer er geen debiet is; de totale energie zal dan ook '0' zijn.
- Voor Delta T geldt de berekening T aanv – T ret ofwel:
 =O4-P4
- Wanneer in de Energieformule met deze ΔT gerekend zou worden, zou dat negatieve waarden voor de energie opleveren wanneer T ret groter is dan T aanv. Dit zou bijvoorbeeld kunnen gebeuren wanneer het systeem niet helemaal aanstaat (de pompen bij de bronnen uit, maar de pompen na de warmtewisselaars aan). Het zou niet juist zijn om deze negatieve waarden mee te nemen in de berekening voor de totale hoeveelheid energie. Dit zou immers zorgen voor een verlaging van het totaal terwijl er in de praktijk niets bijkomt, maar ook niets afgaat; de pompen staan immers uit en er wordt geen warmte uit de bron gehaald nog erin terug gepompt. Deze data zou dus beschouwd kunnen worden als 'meetfout' en wordt dan ook niet meegenomen.
 In Excel is dit doorgevoerd door alleen die ΔT 's mee te nemen die groter zijn dan '0':
 $\Delta T > 0$: =ALS(Q4<0;0;Q4)
- De gemiddelde temperatuur is berekend door het gemiddelde van de aanvoer en retour temperaturen te berekenen (=GEMIDDELDE(O4:P4)). Deze was nodig voor het bepalen van

de dichtheid en soortelijke warmte waar in paragraaf D.5 nog op terug gekomen wordt. De constanten staan op het tabblad 'constanten' (zie afbeelding D.3) en in de energieformule (zie 'energieberekening' hieronder) wordt hiernaar verwezen.

- De totale flow wordt berekend door de drie flows bij elkaar op te tellen:
 $=\text{SOM.ALS}(J4:L4;">5")$. Voor de flow per seconde geldt dan $U4/3.600$.
 Hierbij is ingebouwd dat een flow pas meegenomen wordt in de optelsom wanneer deze groter is dan 5. Deze aanname is gedaan op grond van de volgende argumenten:
 Wanneer er geen debiet (flow) is, is deze '0'. Bij bestudering van de data kwam echter naar voren dat deze soms een aantal keer 5 minuten op '1' staat of een ander laag getal. Dit kan gezien worden als 'storing'; het levert in de praktijk geen warmte op voor de kassen omdat het debiet daar te laag voor is, maar wordt wel als zodanig meegenomen in de berekening, wat dus onjuist is. Daarnaast heeft Green Well Westland (Scheffers, 2012) aangegeven dat de ESP pomp, die het water uit de bron omhoog pompt, een range heeft van 100 tot 200 m³/h. Dit betekent dat wanneer de pomp minimaal draait, elk van de drie warmtewisselaars bij stap I en II, een debiet van minstens $100/3 =$ ongeveer 30 tot 35 m³/h zal hebben: een waarde van rond de '1' is dus inderdaad storing en kan theoretisch gezien niet voorkomen. Het is dus correct dat dit eruit gefilterd wordt.
 Wel werd in de eerste maanden (de testperiode) het systeem 's nachts nog uitgeschakeld. Dit hield in dat de pomp elke dag opnieuw opgestart en uitgeschakeld werd wat ongeveer 10 minuten duurt; het debiet zit in deze opstart- en uitschakelperiode steeds ongeveer 10 minuten onder de minimum waarde. Aangezien het om erg weinig tijd gaat op een hele maand, en doordat de bijdrage van lage debieten aan de totale hoeveelheid energie beperkt is, kan de bijdrage van deze debieten aan de totale hoeveelheid energie als verwaarloosbaar klein beschouwd worden. Dit betekent dat het niet meenemen van de lage waarden die wel betekenis hebben in verband met opstarten en uitschakelen, ook verwaarloosbaar is.
 In paragraaf D.4 volgt een analyse die tot deze conclusie heeft geleid met daarbij de redenering waarom de grens op 5 m³/h is gesteld.

Energieberekening

In paragraaf D.1 is besproken hoe de berekening van de totale energie eruit ziet, en in deze paragraaf is dit verder toegelicht. De formule zag er zo uit:

$$E = Q * C_p * \Delta T * \rho * t$$

In Excel is dit als volgt vertaald:

$=V4*\text{Constanten!E\$9}*R4*\text{Constanten!E\$10}*\text{Constanten!E\$11}$

Hierbij is:

$Q = V4$	(debiet [m ³ /s])
$C_p = \text{Constanten!E\$9}$	(soortelijke warmte [J/kgK])
$\Delta T = R4$	(verandering in temperatuur [K])
$\rho = \text{Constanten!E\$10}$	(dichtheid [kg/m ³])
$t = \text{Constanten!E\$11}$	(verstreken tijd [s])

Dit leidt uiteindelijk tot X4 op afbeelding D.5. wat de hoeveelheid energie per 5 minuten in Joule weergeeft. In Y4 wordt dit gedeeld door 1.000.000 waardoor de energie wordt uitgedrukt in MJ. In AA4 staat de totale hoeveelheid energie van die hele maand bij elkaar opgeteld. Dit is gedeeld door 1.000 waardoor de eenheid hier GJ is.

	A	W	X	Y	Z	AA
1						
2			Energie	Energie		Totaal
3			J	MJ		Energie GJ
4	1-10-2012 0:00		1.670.950.436	1.670,95		1.122,01
5	1-10-2012 0:05		1.669.241.725	1.669,24		
6	1-10-2012 0:10		1.673.334.575	1.673,33		
7	1-10-2012 0:15		1.661.334.876	1.661,33		
8	1-10-2012 0:20		1.638.043.261	1.638,04		

Afbeelding D.5 - Energieberekening

Na bestudering van de data bleek dat er ook een output 'vermogen' per 5 minuten beschikbaar was uit het systeem van Green Well Westland. Het zou tijd gescheeld hebben om dit vermogen (in kW) te vermenigvuldigen met de 300 seconden per regel, en deze uitkomsten te analyseren. Na vergelijking met de berekening zoals hierboven uitgelegd, werd echter duidelijk dat deze output geen rekening hield met een aantal belangrijke onderdelen, zoals een negatieve ΔT : wanneer deze negatief was, werd de output 'vermogen' dit ook, maar deze werd wel gewoon meegenomen met het totaal, in tegenstelling tot wat hierboven is toegelicht. Dit heeft er toe geleid dat de berekeningen uitgevoerd zijn op de manier zoals uitgelegd in deze bijlage D.

D.4 Debiet analyse

Op afbeelding D.2c is te zien hoe de debieten vanuit het computerprogramma naar Excel worden geëxporteerd: elke 5 minuten op een nieuwe regel en dat voor de drie warmtewisselaars (aan het begin van het systeem, plek I) in drie kolommen naast elkaar.

Om te beslissen welke debieten meegenomen worden in de energieberekening is gekeken naar de maanden oktober en augustus. Er is voor deze maanden gekozen aangezien augustus nog een echte 'testmaand' was, en er in oktober al echt gedraaid is en bovendien beschouwd kan worden als gemiddelde maand (zie bijlage K). Zo kon bekeken worden of dit verschil maakte en of bij de uiteindelijke vergelijking tussen testmaanden en gewone maanden rekening gehouden moest worden met dit verschil.

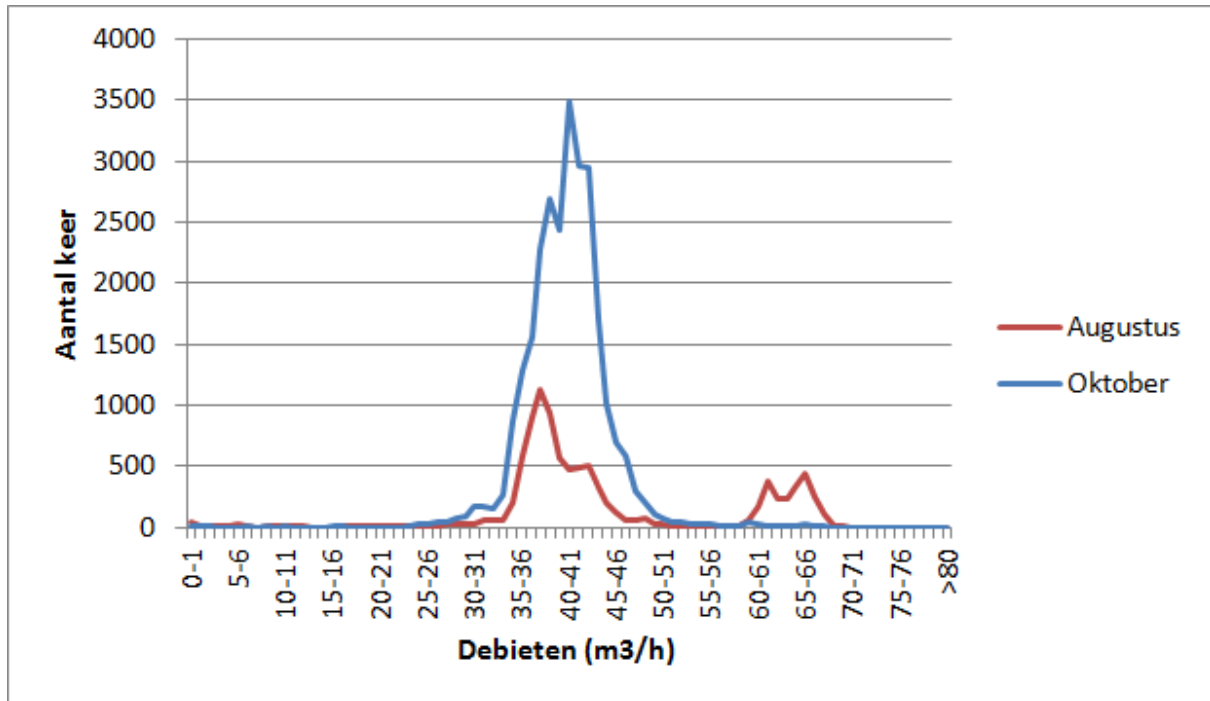
De analyse:

Beide maanden hebben hetzelfde aantal dagen, en dus hetzelfde aantal keer 5 minuten: 31 dagen van 24 uur van 12 keer 5 minuten. Dit geeft $12 \cdot 24 \cdot 31 = 8.928$ keer 5 minuten. Dit geldt uiteraard voor elk van de drie warmtewisselaars; in totaal zijn er dus zowel in augustus als in oktober $3 \cdot 8.928 = 26.703$ vakjes in Excel met een debiet erin.

Van deze 26.703 debieten is vervolgens gekeken hoe groot ze zijn, en hoe vaak deze groottes voorkomen. Dit is als volgt gedaan:

De debieten zijn verdeeld in ranges: $>0 - 1$; $>1 - 2$; $>2 - 3$;; $>78 - 79$ en >80 (m^3/h).

Vervolgens is met de formule =AANTALLEN.ALS(...) geteld hoe vaak deze ranges voorkomen. Een plot in Excel leverde de volgende grafieken op:



Afbeelding D.6 – aantal keer dat debieten voorkomen in augustus en oktober op plek I

Hieronder volgen de belangrijkste conclusies en opvallendheden van deze analyse:

- Het aantal keren dat de Excel output '0 m^3/h ' gaf, is niet meegenomen in de grafiek, omdat dit de schaalgrootte van de grafiek zou verstoren:
 - o Augustus: 17.212
 - o Oktober: 135

Verklaring: augustus was een testmaand waarbij de warmtewisselaars nog vaak werden uitgezet. In oktober was dit niet meer het geval. Dit verklaart ook waarom de grafiek van oktober hoger is dan die van augustus.

- In beide maanden begint de piek inderdaad tussen de 30-35 m^3/h , zoals Jos Scheffers heeft aangegeven.
- In augustus is er ook nog een piek waarneembaar rond de 60-70 m^3/h . Dit komt doordat in de testperiode regelmatig één van de warmtewisselaars werd uitgezet: er was dan lucht in de warmtewisselaar terecht gekomen wat verwijderd diende te worden voor het optimaal functioneren van de warmtewisselaar (Scheffers, 2012). Het wegvallende debiet werd vervolgens opgevangen door de andere twee warmtewisselaars, die daardoor met een hoger debiet gingen draaien.
In oktober kwam dit ook voor, maar veel minder vaak dan in augustus, waardoor de pieken hier niet waarneembaar zijn.

- Het aantal keren dat een debiet lager was dan $30 \text{ m}^3/\text{h}$ was bij allebei in totaal 352. Dit is 1,3% van het totaal van 26.703, en dus verwaarloosbaar klein. Wat er daaronder gebeurt, en wat er dus wel of niet meegenomen wordt aan debieten, is dus niet erg relevant. Bovendien leveren zulke kleine debieten nauwelijks een bijdrage aan de totale energieberekening, en zijn dus ook op die manier verwaarloosbaar.

Uiteindelijk is besloten om debieten van lager dan $5 \text{ m}^3/\text{h}$ niet mee te nemen. Op deze manier wordt de ergste storing die af en toe waargenomen wordt eruit gefilterd, maar wordt de meeste 'opstarttijd' nog wel meegenomen.

Verderop bij de kassen zijn in totaal 5 warmtewisselaars. Aangezien er hier per warmtewisselaar lagere debieten doorheen gaan is de grens van 5 aangepast naar 3. Dit is als volgt beredeneerd: De drie warmtewisselaars in het begin staan elk op een grens van $5 \text{ m}^3/\text{h}$. Voor de drie warmtewisselaars bij elkaar is dit maximaal $15 \text{ m}^3/\text{h}$.

Wanneer bij de kassen ook deze grens van $15 \text{ m}^3/\text{h}$ aangehouden wordt, is dat per warmtewisselaar $15/5 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$.

D.5 Soortelijke warmte en dichtheid

In paragraaf D.1 is aangegeven dat ook de dichtheid en soortelijke warmte nodig waren voor de energieberekening. Hierbij gaat het om de ρ en C_p van de vloeistof in het circuit van de warmtewisselaars. Deze zijn, voor een vloeistof met een bepaalde samenstelling, afhankelijk van de temperatuur en de druk, die in principe elke 5 minuten kan variëren. Voor dit onderzoek is gekeken of voor elke energieberekening, dus voor elke 5 minuten, berekend kon worden wat de dichtheid en soortelijke warmte op dat moment was. Dit bleek echter zeer tijdrovend te zijn, en een slechts schijnbare nauwkeurigheid met zich mee te brengen: de ρ en C_p zouden dan wel per 5 minuten zijn bepaald, maar het bepalen van deze waarden zou alsnog gebaseerd zijn op aannames. Er was dus slecht zicht op hoe belangrijk het voor het onderzoek was dat deze gegevens zo nauwkeurig in beeld werden gebracht. Daarom is onderzocht of het mogelijk was om één dichtheid en soortelijke warmte te nemen, die als constanten te beschouwen, en in elke (5 minuten-)berekening deze gemiddelden te gebruiken. Na dit onderzoek is besloten dat dit inderdaad mogelijk is. Het onderzoek met bijbehorende resultaten zijn in deze paragraaf te lezen.

Zoals in paragraaf D.2 al genoemd is, is het medium op plek I anders dan bij II, III en IV; namelijk het uit de aarde opgepompte brine in plaats van zoet water. Dit heeft gevolgen voor de dichtheid en de soortelijke warmte van het medium; bij I zal deze anders zijn dan bij II, III en IV, aangezien de samenstelling van de vloeistoffen anders is.

Hieronder wordt voor zowel het circuit bij deel I als bij de overige delen uitgelegd hoe de gemiddelde dichtheid en soortelijke warmte zijn bepaald. Voor deze onderzoeken is steeds gebruik gemaakt van de maand oktober, aangezien deze (zoals eerder al gezegd) beschouwd kan worden als een gemiddelde maand (zie bijlage K).

Brine bij plek I

Om de dichtheid en soortelijke warmte van het brine te berekenen in deel I van het systeem, is een tool gebruikt die via IF Technology is verkregen (Buik, 2012a). In deze tool kan de saliniteit, druk en temperatuur van het water uit de bron ingevuld worden, waarna de tool berekent wat de dichtheid en soortelijke warmte is. De druk en saliniteit zijn verkregen via T&A Survey (2012b), die het boormanagement van Green Well Westland hebben verzorgd (paragraaf 4.5). De temperatuur is afkomstig van Green Well Westland (2012b), evenals de diepte die nodig was voor het berekenen van de druk. Dit heeft tot de volgende gegevens geleid:

Saliniteit:	123.000 ppm
Druk:	1,03 bar per 10 meter verticale diepte. Op een diepte van 2.850 bij GWW wordt dit ongeveer 295 bar
Temperatuur:	85°C

De temperatuur van 85°C wordt ook bevestigd na bestudering van de data; de gemiddelde T aanv van oktober is namelijk 84,9°C met een standaarddeviatie van 0,32 voor waarden >0. De 'populatie' (aantal keer 5 minuten in oktober die 'meedoen', ofwel groter zijn dan 0,) is 8.916.

Na het invullen van de gegevens in de tool gaf dit:

Dichtheid:	$1,069 \text{ g/cm}^3 = 1.069 \text{ kg/m}^3$
Soortelijke warmte:	$3,65 \text{ kJ/kgK} = 3.650 \text{ J/kgK}$

Deze dichtheid en soortelijke warmte zijn van het brine op 2.850 meter diepte. De berekening in dit onderzoek vindt echter niet op diepte plaats, maar nadat het water omhoog is gepompt en er warmte uit wordt onttrokken. Hierbij zal de saliniteit niet veranderen maar de temperatuur van brine en de druk waaronder het staat wel. (Buik, 2012b)

Na bevestiging van IF Technology dat de tool ook geschikt is voor het bepalen van dichtheden en soortelijke warmtes van brine nadat het naar boven is gepompt, is met behulp van de tool onderzocht wat de verandering zal zijn.

Hiervoor is eerst gekeken welke temperatuur en druk ingevuld kunnen worden in de tool om een beeld te vormen van de dichtheid en soortelijke warmte nadat het brine naar boven is gepompt. De temperatuur en druk zijn hier niet constant, en daarom is onderzocht wat de gemiddelde temperatuur en druk zijn en welke standaarddeviaties hierbij horen.

De waarden die hieruit naar voren kwamen (zie hieronder voor uitleg van deze waarden) zijn vervolgens ingevuld in de tool waarmee een maximum en minimum waarde voor zowel de dichtheid als de soortelijke warmte verkregen zijn.

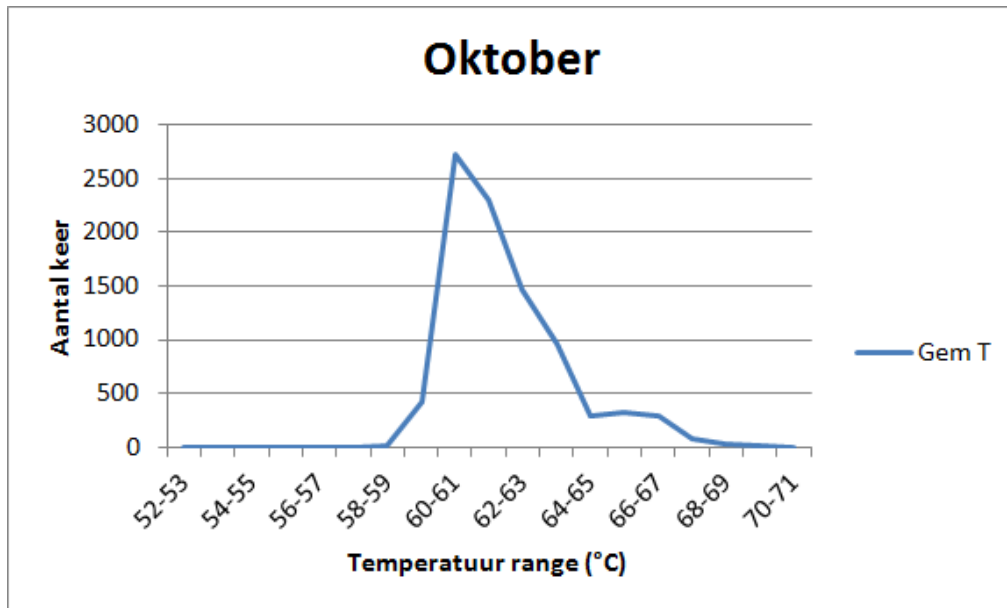
Deze waarden zijn op hun beurt weer ingevuld in de Excel-sheets waardoor duidelijk werd wat het effect was van de verschillende dichtheden en soortelijke warmtes op de totale energie. Dit resultaat is geanalyseerd en er is gekeken hoe groot de verschillen waren. Naar aanleiding van dit resultaat is besloten welke dichtheid en soortelijke warmte gebruikt is in de berekening.

Hieronder volgt een overzicht van dit onderzoek voor de maand oktober.

Temperatuur

In oktober is de gemiddelde temperatuur bij de drie warmtewisselaars 61,96°C. Dit is het gemiddelde van de kolom S zoals aangegeven in afbeelding D.4. De standaardafwijking die hierbij hoort is 1,75°C. Wanneer twee keer de standaardafwijking van het gemiddelde wordt genomen krijg je de waarden: 58,46°C en 65,46°C. Ook bij deze populatie hoort een 'n' van 8.916. 11 waarnemingen (0,12%) vallen onder de grens van 58,46°C. 525 waarnemingen (5,89%) vallen boven de grens van 65,46°C. Wanneer voor de bovengrens drie keer de standaarddeviatie genomen wordt, is deze grens 67,21; hier valt slechts 1,07% boven (95 waarnemingen).

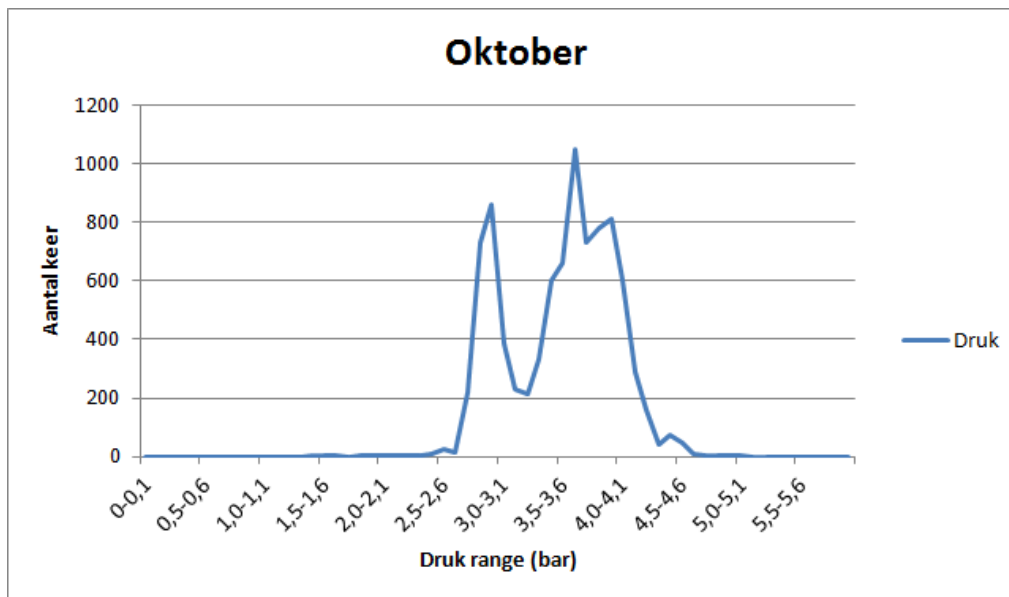
De grafiek die bij deze gegevens hoort is te zien op afbeelding D.7.



Afbeelding D.7 – Aantal keer dat een gemiddelde temperatuur range voorkomt in oktober bij plek I

Druk

Ook de druk van het systeem is op verschillende plekken bijgehouden. Voor de energieberekening zelf was het niet nodig om de druk te weten in het systeem, vandaar dat deze niet is opgenomen in de Excel-sheets. Voor het bepalen van de dichtheid en soortelijke warmte van het brine op plek I, is een aparte berekening gemaakt met de druk op deze plek. De gemiddelde druk in oktober was 3,57 bar met een standaarddeviatie van 0,46. Wanneer twee keer de standaarddeviatie van het gemiddelde wordt genomen, krijg je de waarden: 2,66 bar en 4,48 bar. Bij deze populatie hoort een 'n' van 8.928. 61 waarnemingen (0,68%) vallen onder de grens van 2,66 bar en 137 waarnemingen (1,53%) vallen boven de grens van 4,48 bar. De grafiek die bij deze gegevens hoort is te zien op afbeelding D.8.



Afbeelding D.8 – aantal keer dat een druk range voorkomt in oktober bij plek I

Na deze analyse konden de temperatuur en druk gegevens ingevuld worden in de tool. Voor temperatuur is hier gekozen voor een ondergrens van 58°C en een bovengrens van 66°C; door het aanhouden van een vrij grote range is er gekozen voor 'safe', ook omdat andere maanden wellicht een iets andere gemiddelde temperatuur en bijbehorende standaarddeviaties hebben. Voor druk is gekozen voor een ondergrens van 2,6 bar en een bovengrens van 4,5 bar. Dit leverde de volgende resultaten op, waarbij de dichtheid en bijbehorende soortelijke warmte ingevuld zijn in de energieberekening in de Excel-sheet:

Temperatuur [°C]	Druk [bar]	Dichtheid [kg/m ³]	Soortelijke warmte [J/kgK]	Energie [GJ]
66	2,6	1.069	3.643	16.065
66	4,5	1.069	3.643	16.065
58	2,6	1.072	3.639	16.092
58	4,5	1.073	3.639	16.107

Tabel D.1 – Resultaten uit de berekeningstool voor dichtheid en soortelijke warmte van brine, met variaties in temperatuur en druk

Uit tabel D.1 blijkt dat het verschil in druk zo klein is, dat het geen of nauwelijks invloed heeft op de dichtheid en soortelijke warmte. De temperatuur heeft wat meer invloed, maar ook deze is klein: Wanneer de uiterste waarden worden genomen die uit de energieberekening volgen (16.065 GJ en 16.107 GJ), zit hier een verschil tussen van 42 GJ, wat overeenkomt met 0,26%. Hieruit is de conclusie getrokken dat aangenomen mag worden dat de gemiddelde temperatuur en de gemiddelde druk gebruikt mogen worden voor het bepalen van de dichtheid en soortelijke warmte met behulp van de tool. Dit was 61,96°C en 3,57 bar.

Invullen in de tool geeft:

Dichtheid: 1.071 kg/m³
 Soortelijke warmte: 3.641 J/kgK

In de energieberekening op plek I in het systeem van GWW, is voor elke maand gerekend met deze dichtheid en soortelijke warmte. De hierboven genoemde p en C_p zijn ingevuld op het tabblad 'constanten' van het Excel-document dat hoort bij plek I van het systeem.

Zoet water bij de kassen

In de overige delen van het systeem, op plek II, III en IV, is sprake van normaal, zoet water. Hierbij hoeft de tool die voor het brine nodig was dus niet gebruikt te worden. In plaats daarvan kan gekeken worden naar het verband dat bestaat tussen temperatuur-dichtheid en temperatuur-soortelijke warmte voor water. Dit verband wordt door veel bronnen beschreven, onder andere door Taal (2005a) in 'Toegepaste Energieleer'. Hierin staat ook beschreven dat de invloed van druk verwaarloosbaar is, aangezien vloeistoffen vrijwel onsamendrukbaar zijn (Taal, 2005b). Voor het brine is niet gebruik gemaakt van dit gegeven, aangezien de druk wel ingevuld diende te worden in de tool. Voor water is het verband echter makkelijker te omschrijven. Er hoeft geen gebruik gemaakt te worden van een tool, maar er kan verwezen worden naar bronnen zoals Taal (2005). Hieruit kunnen gegevens gehaald worden zoals tabel D.2.

Temperatuur [°C]	Dichtheid [kg/m ³]	Soortelijke warmte [J/kgK]
40	992	4.170
50	988	4.180
60	983	4.180
70	978	4.190

Tabel D.2 – stofeigenschappen van vloeibaar water (Taal, 2005b)

Voor elk van de vijf tuinbouwbedrijven van Green Well Westland is gekeken naar wat de gemiddelde temperatuur was bij hun warmtewisselaar. Vanwege vertrouwelijkheid zullen deze exacte gegevens niet genoemd worden in dit rapport. De gemiddelde temperatuur van de vijf kassen bij elkaar is in oktober ongeveer 55°C, met een spreiding (twee keer de standaarddeviatie) van 45°C tot 65°C. Door interpoleren van tabel D.2 zijn hier de volgende gegevens uit af te leiden:

Temperatuur [°C]	Dichtheid [kg/m ³]	Soortelijke warmte [J/kgK]
45	990	4.175
55	985,5	4.180
65	980,5	4.185

Tabel D.3 – relatie tussen temperatuur en dichtheid van water (afgeleid uit Taal, 2005b)

Vervolgens is uitgerekend uitgaande van deze gemiddelden, wat de bijbehorende hoeveelheid totale energie zou zijn voor oktober. Dit is te zien in Tabel D.4.

Temperatuur [°C]	Dichtheid [kg/m ³]	Soortelijke warmte [J/kgK]	Energie [GJ]
45	990	4.175	15.727
55	985,5	4.180	15.675
65	980,5	4.185	15.614

Tabel D.4 – Verschillen in totale hoeveelheid energie bij verschillende gemiddelde temperaturen

Het verschil tussen de twee uiterste waarden is in oktober 113,6 GJ. Dit is een verschil van 0,72% waarmee er vanuit wordt gegaan dat de dichtheid en soortelijke warmte die horen bij een gemiddelde temperatuur van 55°C representatief zijn, en gebruikt kunnen worden voor de energieberekeningen bij de kassen.

Gekozen is dus voor:

Dichtheid: 985,5 kg/m³

Soortelijke warmte: 4.180 J/kgK

Deze zijn ingevoerd op het tabblad 'constanten' van de Excel-documenten die horen bij plek II, III en IV van het systeem.

Bijlage E – Distributiesysteem in Afyon

In hoofdstuk 5 worden de verliezen van GWW vergeleken met andere aardwarmte- en distributiesystemen, ook in het buitenland. Een voorbeeld van een buitenlands systeem is het Afyon geothermal district heating system in Afyon, Turkije. (Keçebas, 2013) Dit systeem is veel groter dan GWW: het bestaat uit 4 productie- en 3 injectieputten. Bovendien zit de ondergrond (geologisch) anders in elkaar: de putten zijn slechts enkele honderden meters diep, maar het reservoir heeft wel een gemiddelde temperatuur van 105°C. Daarnaast bevinden de putten zich op ongeveer 15 km afstand van Afyon zelf, waardoor het distributienetwerk veel langer is dan bij GWW en er dus meer warmte verloren kan gaan. Ook wordt niet al het opgepompte water geïnjecteerd; een deel laat men wegstromen in de natuur, aangezien de injectiecapaciteit lager is dan de hoeveelheid water die opgepompt wordt. Dit brengt ook warmteverliezen met zich mee.

Keçebas (2013) heeft onderzoek gedaan naar dit systeem, en hierbij onder andere een energetische analyse uitgevoerd. Helaas heeft Keçebas de analyse anders uitgevoerd dan voor GWW is gebeurd, waardoor de resultaten lastig vergelijkbaar zijn: zo worden bijvoorbeeld injectieverliezen apart meegenomen in plaats van vanaf het begin afgetrokken zoals bij het onderzoek van GWW. Wat wel geconcludeerd kan worden is dat de bruikbare warmte in de orde van grote van 200.000 GJ per maand ligt, wanneer fulltime doorgedraaid wordt. Voor de transportverliezen komt hij uit op 25,7%. Hoewel dit resultaat door de andere aanpak niet direct vergelijkbaar is met de verliezen zoals berekend bij GWW, geeft het wel aan dat de 3% verlies bij GWW niet erg veel is vergeleken bij dit systeem. Bovendien is de totale hoeveelheid warmte die verloren gaat nog meer, aangezien sowieso al meer bruikbare warmte beschikbaar is. (orde van grote 200.000 GJ ten opzichte van orde van grote 20.000 GJ)

Bijlage F – Elektriciteitsverbruik GWW

Voor dit onderzoek is het elektriciteitsverbruik, net als de overige data, per maand geanalyseerd. In tegenstelling tot de overige data, was deze data niet per 5 minuten maar per uur beschikbaar. Op de afbeeldingen F.1 t/m F.5 staan de grafieken van de maandelijkse verbruiken.

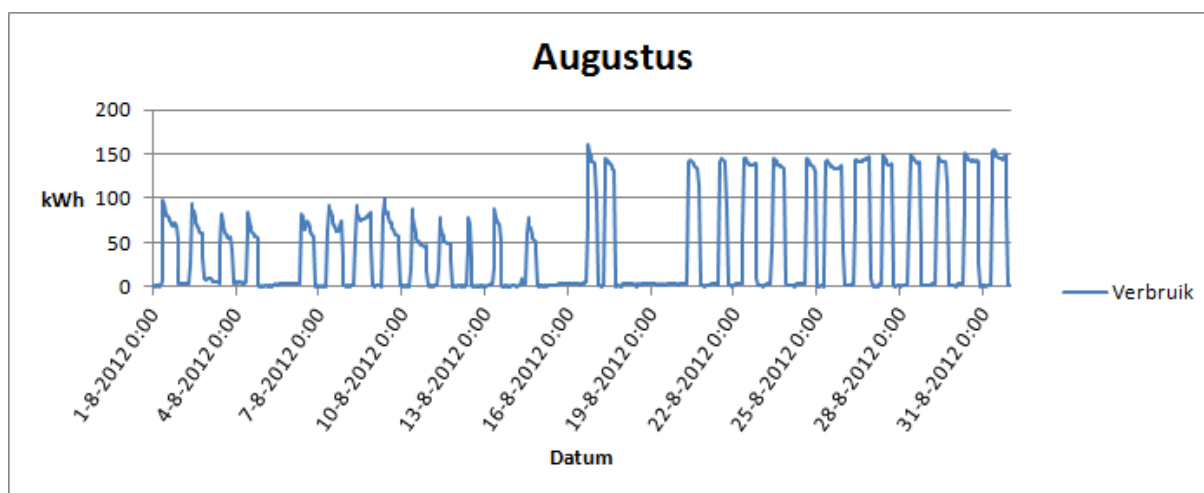
In de testmaanden (augustus en september) is te zien dat het verbruik vaak richting '0' gaat. Op deze momenten worden de pompen uitgeschakeld en wordt het verbruik alleen nog bepaald door bijvoorbeeld de computers en lichten van GWW. Dit verbruik ligt rond de 2 kWh; hieruit blijkt dat het totale verbruik gedomineerd wordt door het verbruik van de pompen, aangezien het verbruik rond de 150 kWh ligt wanneer deze aanstaan. Op afbeelding F.3 t/m F.5 is te zien dat de pompen vanaf oktober veel minder vaak zijn uitgezet. Wel zijn er nog regelmatig sterke afnamen te zien met direct erna herstel naar de oorspronkelijke waarden; vaak was hier sprake van onderhoud zoals het vervangen van filters e.d. Het diepe dal in de grafiek van halverwege december laat zien dat het systeem toen tijdelijk is uitgeschakeld voor het aansluiten van de twee nieuwe bedrijven. Dit vond plaats op 17 december.

Verder is te zien dat de pompen vanaf oktober harder gedraaid hebben. Dit komt o.a. doordat:

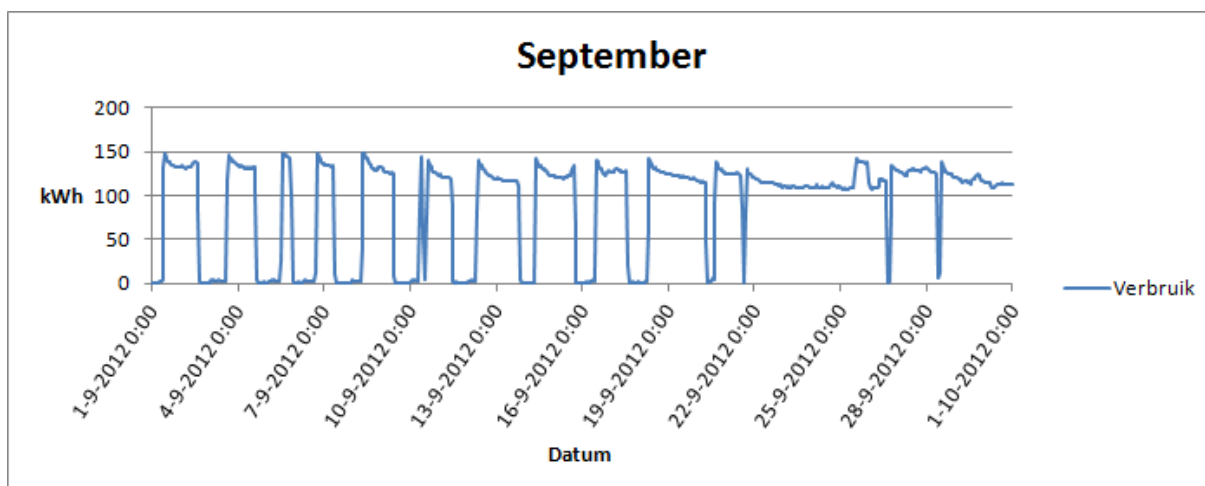
- deze maanden kouder werden waardoor meer warmte nodig was
- in december de nieuwe bedrijven zijn aangesloten waardoor de warmtevraag groter werd
- GWW wilde testen hoe hard de pompen konden en wat dit voor resultaten zou geven; dit is bijvoorbeeld te zien op afbeelding F.4 als een piek halverwege november (zie hiervoor ook hoofdstuk 8 Verdere mogelijkheden)

Afbeelding F.6 is een overzicht van het temperatuurverloop in de bilt in 2012. Hierop is duidelijk te zien dat de eerste helft van december kouder was dan de tweede helft. Dit is ook op afbeelding F.5 terug te zien: de pompen hebben toen minder hard gedraaid.

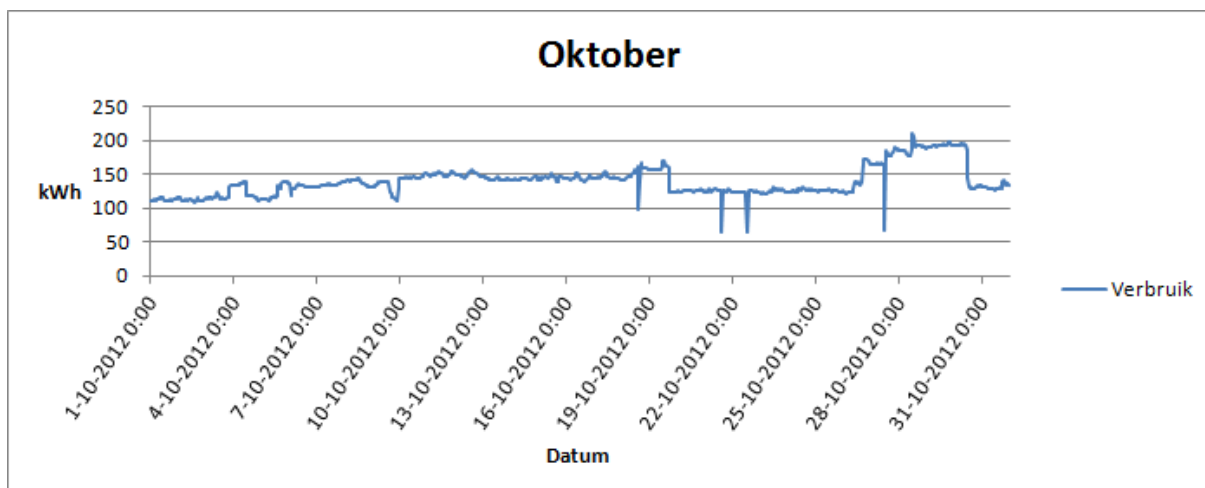
Een gehele vergelijking van het temperatuurverloop in de onderzoeksmaanden met de opgewekte hoeveelheid warmte of gebruikte hoeveelheid elektriciteit is echter niet mogelijk; GWW heeft vaak geëxperimenteerd met wat mogelijk was, waardoor alleen globale trends zijn te ontdekken zoals in december. Verder is het individuele verbruik in de kassen ook onderhevig aan (vertrouwelijke) fluctuaties die niet meegenomen zijn in dit onderzoek (zie hoofdstuk 2). Hierdoor is alleen globaal (en niet dag op dag) een relatie te leggen tussen het verbruik en de temperatuur.



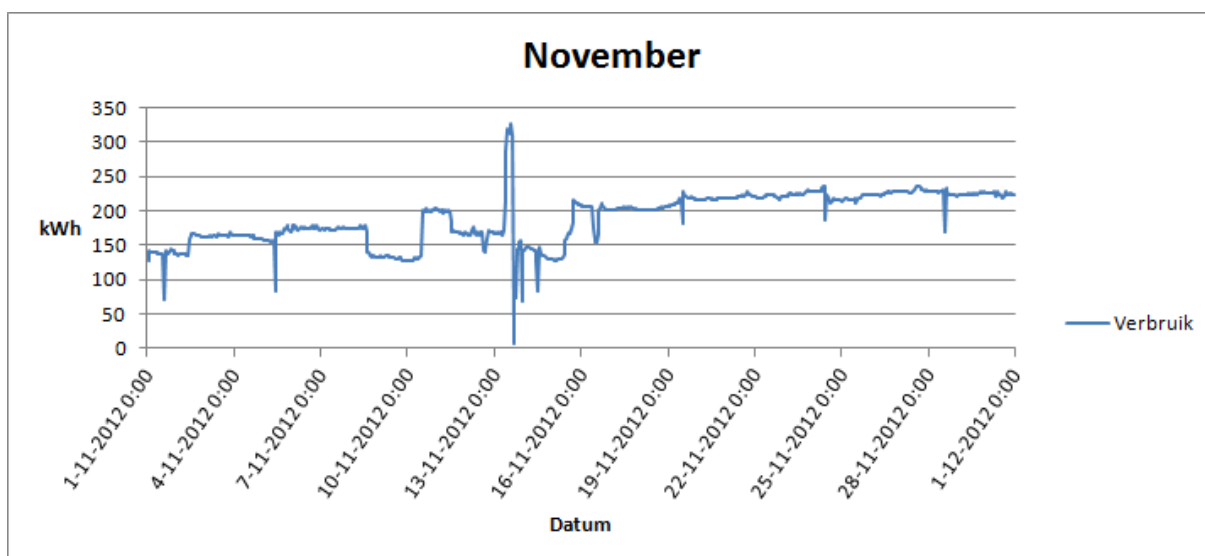
Afbeelding F.1 – Elektriciteitsverbruik GWW in augustus



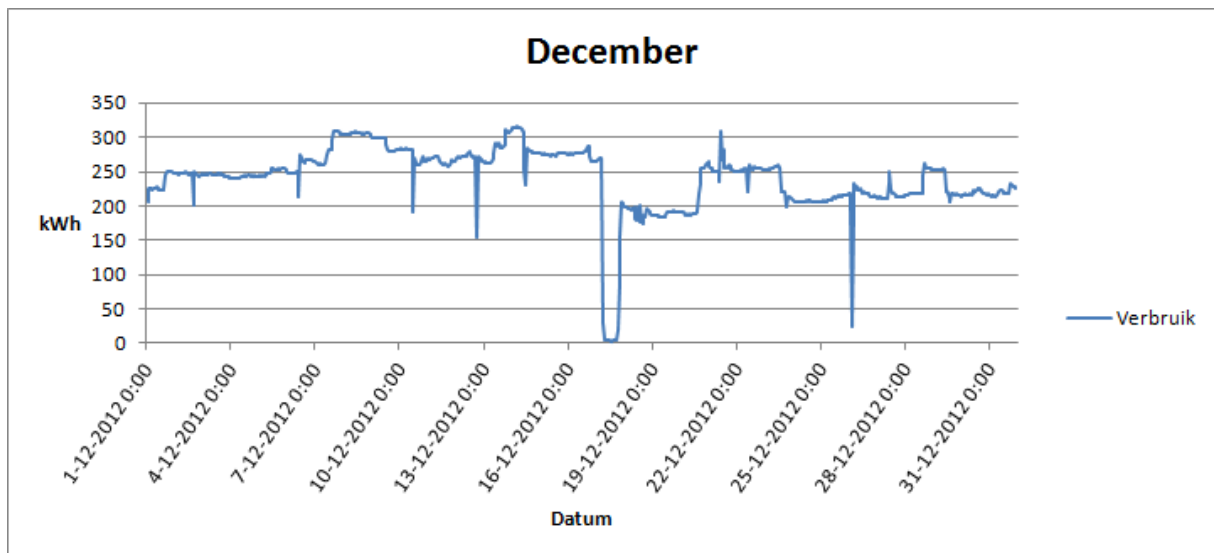
Afbeelding F.2 – Elektriciteitsverbruik GWW in september



Afbeelding F.3 – Elektriciteitsverbruik GWW in oktober



Afbeelding F.4 – Elektriciteitsverbruik GWW in november



Afbeelding F.5 – Elektriciteitsverbruik GWW in december



Afbeelding F.6 – Gemiddelde temperatuur in 2012 (weerverleden.nl, 2012 cijfers KNMI)

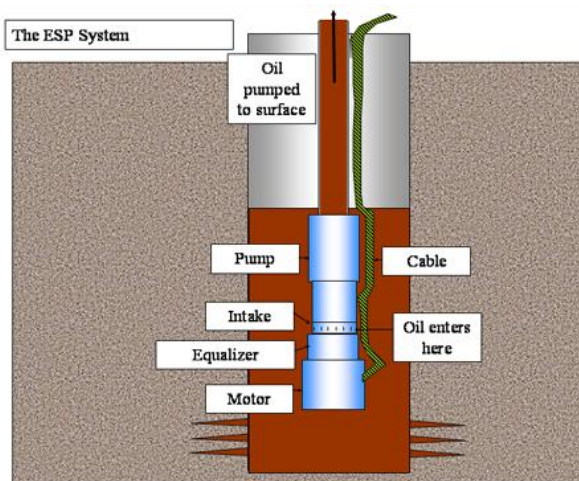
Bijlage G – Pompen GWW

In hoofdstuk 6 staan de conclusies wat betreft de duurzaamheidsanalyse van het elektriciteitsverbruik van GWW. Dit wordt gedomineerd door het verbruik van de pompen (zie bijlage F).

Deze bijlage geeft een korte toelichting op de gebruikte pompen, met name de belangrijkste, de productiepomp.

Om het warme water dat GWW gebruikt voor het verwarmen van de kassen uit de aarde omhoog te krijgen, wordt een ESP pomp (electric submersible pump) gebruikt. Deze pomp bevindt zich in de put en is ondergedompeld in het brine, waar het de vloeistof naar boven stuwt. Het water aanzuigen zou hier niet werken, omdat dit maar tot 10 meter diepte mogelijk is; bij grotere dieptes wordt een vacuüm gezogen. (Platform Geothermie, 2012g)

Op afbeelding G.1 is een ESP pomp afgebeeld waarmee olie omhoog gepompt wordt; het principe van deze pomp is hetzelfde als voor het omhoog pompen van brine.



Afbeelding G.1 – ESP pomp (The Full Wiki, 2012)

Op de afbeelding is te zien dat er een kabel loopt richting de motor. Deze kabel zorgt voor de aanvoer van elektriciteit die nodig is om de motor van de pomp te laten draaien.

Naast de productiepomp, heeft GWW ook twee pompen om het water weer terug de grond in krijgen. Deze pompen zijn eenvoudiger dan de ESP pomp, en staan ook bovengronds.

Bijlage H – Aardgas factoren

Deze bijlage geeft achtergrondinformatie over de gegevens gebruikt in hoofdstuk 7. In dit hoofdstuk wordt berekend hoeveel aardgas en CO₂-uitstoot GWW bespaart door het gebruik van aardwarmte.

H.1 Energetische waarde van aardgas

Om te kunnen berekenen hoeveel aardgas bespaard is, moet de hoeveelheid energie die gebruikt is om de kassen te verwarmen, omgerekend worden naar m³ aardgas; ofwel, de hoeveelheid aardgas die nodig zou zijn geweest om dezelfde hoeveelheid energie te produceren die nu gebruikt is. Hiervoor wordt de energetische waarde van aardgas gebruikt. Aangezien de samenstelling van aardgas varieert, is de energetische waarde ook niet altijd hetzelfde. Daarom wordt het gemiddelde van Nederland genomen. Hierbij wordt nog onderscheid gemaakt tussen de boven- en onderwaarde, respectievelijk 35,17 MJ/m³ en 31,65 MJ/m³ aardgas. Dit verschil wordt bepaald door het wel of niet meenemen van de warmte die vrijkomt bij het condenseren van het water dat geproduceerd wordt tijdens de verbranding. (Energieleveranciers.nl, 2012) Normaal gesproken wordt dit laatste niet meegenomen, en wordt gerekend met de onderwaarde. Dit is ook de reden dat HR-ketels een rendement van meer dan 100% kunnen hebben, aangezien hier de condensatiewarmte wel gebruikt wordt. In dit onderzoek wordt dan ook uitgegaan van de onderwaarde van aardgas, 31,65 MJ/m³. Deze waarde wordt door meerdere bronnen genoemd als de onderwaarde van aardgas, zo ook door Harmelen (2006).

Verder was ook het rendement nodig voor het opwekken van elektriciteit om de netto besparing van aardgas uit te kunnen rekenen. Deze factor wordt in bijlage J.3 behandeld.

In tabel H.1 staan de resultaten van de berekeningen; tabel 7.1 geeft hiervan de samenvatting.

H.2 CO₂-emissiefactor bij aardgasverbranding

Bij het verbranden van aardgas komt CO₂ vrij. Deze hoeveelheid CO₂ kan worden uitgedrukt in kg/m³ of in kg/GJ. Volgens Hermans (2009) is de hoeveelheid uitgestoten CO₂ 1,78 kg/m³ aardgas en het AgentschapNL (2010) geeft aan dat het in 2009 en 2010 56,6 kg/GJ was. Wanneer deze waarden in elkaar worden omgerekend, wordt duidelijk dat de waarden met elkaar overeenkomen:

Wanneer bij het verbranden van 1 GJ aardgas 56,6 kg CO₂ vrijkomt, en de energie-inhoud van aardgas 31,65 GJ/1000 m³ is, komt er dus $56,6 \cdot 31,65 = 1.791,39$ kg CO₂ vrij per 1.000 m³. Dit komt overeen met 1,79 kg/m³, wat vrijwel gelijk is aan de 1,78 kg/m³ van Hermans (2009).

Uiteindelijk is gekozen om gebruik te maken van de factor 56,6 kg/GJ, aangezien de hoeveelheid energie bij de kassen van GWW in eerste instantie ook in GJ was uitgedrukt, en deze hoeveelheid ten behoeve van dit onderzoek is omgerekend in m³ aardgas. Op deze manier is voorkomen dat er onnauwkeurigheidfouten optreden door heen en weer te rekenen tussen GJ en m³.

Voor het berekenen van de netto CO₂-besparing was ook een factor nodig die aangeeft hoeveel CO₂ er wordt uitgestoten bij het opwekken van elektriciteit. Deze factor wordt in bijlage J.3 behandeld.

De resultaten uit de berekening staan weergegeven in tabel H.2 en worden samengevat in tabel 7.2.

	Gebruikte warmte bij kassen [GJ]	Bruto bespaarde hoeveelheid aardgas [1.000 m ³]	Gebruikte elektriciteit voor oppompen [GJ]	Benodigde energie voor opwekken elektriciteit [GJ] (rendement 50,5%)	Aardgas nodig voor productie van elektra [1.000 m ³]	Netto bespaarde hoeveelheid aardgas [1.000 m ³]	Netto bespaarde hoeveelheid energie [GJ]
Augustus	5.022	158,67	114	226	7,13	151,54	4.796
September	9.615	303,79	232	459	14,52	289,28	9.156
Oktober	15.673	495,20	375	743	23,46	471,74	14.930
November	16.318	515,58	491	972	30,72	484,86	15.346
December	18.708	591,09	644	1.275	40,29	550,80	17.433

Tabel H.1 – Berekeningen voor de netto bespaarde hoeveelheid aardgas in 1.000 m³ en energie in GJ per maand

	Gebruikte warmte bij kassen [GJ]	Vermeden CO ₂ -emissie [1.000 kg]	Gebruikte elektriciteit voor oppompen [GJ]	CO ₂ -emissie bij opwekking van gebruikte elektra [1.000 kg]	Netto bespaarde hoeveelheid CO ₂ [1.000 kg]
Augustus	5.022	284,25	114	14,25	270,00
September	9.615	544,21	232	29,00	515,21
Oktober	15.673	887,09	375	46,88	840,22
November	16.318	923,60	491	61,38	862,22
December	18.708	1.058,87	644	80,50	978,37

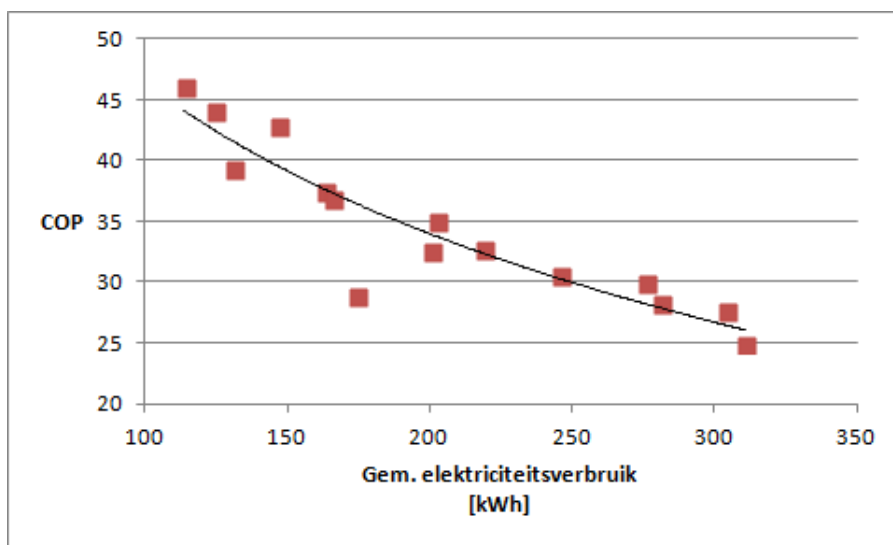
Tabel H.2 – Berekeningen voor de netto bespaarde hoeveelheid CO₂ in 1.000 kg per maand

Bijlage I – Verdere mogelijkheden

In deze bijlage wordt het onderzoek naar de COP besproken uit hoofdstuk 8 Verdere mogelijkheden.

COP

In de loop van de onderzoeksperiode hebben de pompen van GWW op verschillende standen gedraaid; in bijlage F is te zien dat de pompen in de loop van de maanden steeds harder zijn gaan draaien. Na het bepalen van de COP per maand (zie hoofdstuk 6), leek de COP lager te worden wanneer de pompen harder gingen draaien. Dit is vervolgens verder getest met behulp van periodes in de maanden oktober, november en december waarin het elektriciteitsverbruik van de pompen redelijk stabiel was. Van deze periodes is het totale elektriciteitsverbruik en de hoeveelheid opgepompte energie bepaald, waarna hiermee de bijbehorende COP is berekend. Deze steekproeven zijn vervolgens in een grafiek tegen elkaar uitgezet zoals te zien op afbeelding I.1. Hieruit blijkt duidelijk dat er inderdaad een negatief verband is tussen het elektriciteitsverbruik en bijbehorende COP.



Afbeelding I.1 – afnemende COP met toenemend elektriciteitsverbruik van de pompen van GWW

Bij de 'stabiele' periodes in het elektriciteitsverbruik die zijn gebruikt, was de standaarddeviatie van het gemiddelde verbruik ongeveer 4kWh. Dit is bepaald om te controleren of er geen grote uitschieters bij zaten. Meer nauwkeurigheid was niet nodig aangezien de bijbehorende opgepompte warmte ook erg fluctueerde. Bovendien was het doel onderzoeken of de COP afnam wanneer de pompen harder draaiden; hierbij was de trend belangrijk en was het niet noodzakelijk de exacte waarden te bepalen.

Bijlage J – Well to warmth

In hoofdstuk 9 wordt berekend hoeveel het realiseren van de bron heeft gekost in energie en CO₂-uitstoot. In deze bijlage worden de aannames en achterliggende argumentaties besproken die tot de factoren hebben geleid waarmee deze berekeningen zijn uitgevoerd.

J.1 Staal

Hoeveelheid

Via Jan Vissee (T&A Survey, 2012c) zijn de gegevens over de gebruikte casings verkregen. Zoals besproken in hoofdstuk 9, bestaan de casings uit verschillende delen. Elk deel heeft zijn eigen specifieke diameter (zie ook bijlage C), met een eigen specifieke massa per lengte-eenheid. In tabel J.1 is samengevat hoeveel meter van elke soort casing voor GWW gebruikt is en welke massa per lengte-eenheid hierbij hoort (in pond per voet en omgerekend naar kilogram per meter). In de laatste kolom van de tabel is uitgerekend uit hoeveel ton staal de casings bestaan.

Diameter v/d casing [inch]	Lengte v/d casing [m]	Massa per lengte-eenheid		Massa [T] (1.000 kg)
		[Lbs/ft]	[Kg/m]	
20	200	84,4	125,6	25,12
9,625	2.224	53,5	79,6	177,07
7	3.026	29	43,2	130,59
4,5	1.234	12,6	18,8	23,14
6,625	468	24	35,7	16,72
Totaal				372,63

Tabel J.1 – Casing gegevens GWW (gebaseerd op T&A Survey, 2012c)

De totale hoeveelheid staal voor de casings is ongeveer **373 ton**.

Voor de transportleidingen is dit ongeveer **50 ton** staal. Dit gegeven is verkregen via Marco de Bruijne van VB Group B.V. en is een geschatte hoeveelheid. Dit komt omdat hier ook isolatiemateriaal mee is genomen en de bovengrondse delen van de leidingen (staal) juist niet. Isolatiemateriaal heeft echter een veel lagere massa dan staal en verreweg het grootste deel van de leidingen ligt ondergronds, waardoor 50 ton een reële schatting is.

Productiekosten

Het type staal dat voor GWW is gebruikt, wordt onder andere door ArcelorMittal geproduceerd. (T&A Survey, 2012c) ArcelorMittal (2012) geeft aan dat hun productie een CO₂-uitstoot heeft van zo'n **2,15 ton CO₂ / ton staal**.

Over de hoeveelheid energie die het produceren van een ton staal kost, gaf ArcelorMittal geen informatie. Daarom is gezocht naar publicaties van onderzoek dat hiernaar gedaan is. Uiteindelijk is gekozen voor de waarde van **40,1 MJ/kg** die Lenzen et al. (2000) in zijn artikel heeft onderbouwd.

J.2 Cement

Hoeveelheid

Voor het aan elkaar bevestigen van de casings is cement nodig. Hiervoor is ongeveer 280 ton pozzolan cement gebruikt, wat een standaard soort is (basic Portland cement).

Productiekosten

Het cement is gemixt en verpompt door Schlumberger. Bij dit bedrijf konden de productiekosten echter niet achterhaald worden. Vandaar dat gekeken is naar verschillende andere bronnen. Heidelberg gaf voor de CO₂-uitstoot, zonder onderscheid in soorten cement, 821,85 kg CO₂ / ton cement (HeidelbergCement, 2012). Deze orde van grootte werd bevestigd door een artikel van Worrell et al. (2001) die na onderzoek heeft bepaald dat de totale globale CO₂-emissies door cement productie 222 kg C/ton cement is. Hierbij staat C alleen voor Carbon (koolstof). Dit kan omgerekend worden naar koolstofdioxide door 222 te vermenigvuldigen met $(44/12)^1 = 814$ kg CO₂ / ton cement. (Worrell, 2012).

Op basis van deze gegevens is gekozen om **820 kg CO₂ / ton** cement aan te houden. Dit is gedaan omdat het, door de schattingen van de hoeveelheid cement die gebruikt is, niet logisch zou zijn om een exact getal als 821,85 te gebruiken. Dit zou namelijk bij de berekening de indruk geven dat de hoeveelheid CO₂ die uitgestoten wordt bij de productie van cement tot achter de komma bekend is, wat onjuist zou zijn. Verder is gekozen voor een waarde dichterbij 821,85 dan 814: naast het cement en het staal worden veel onderdelen niet meegenomen, waarvan de productie ook CO₂-uitstoot. Hierdoor is besloten dat een wat te hoge waarde realistischer zou zijn voor de benadering van de werkelijkheid dan een te lage.

Wat betreft de energie die nodig was voor het produceren van het cement zijn verschillende bronnen het redelijk met elkaar eens: 4,8 GJ / ton cement (Worrell et al., 2001) en ongeveer 4 GJ / ton cement (Khurana et al., 2002). Aangezien de 4 GJ van Khurana et al. een benadering is, en om dezelfde redenen die hierboven zijn genoemd, is gekozen voor **4,5 GJ / ton** cement.

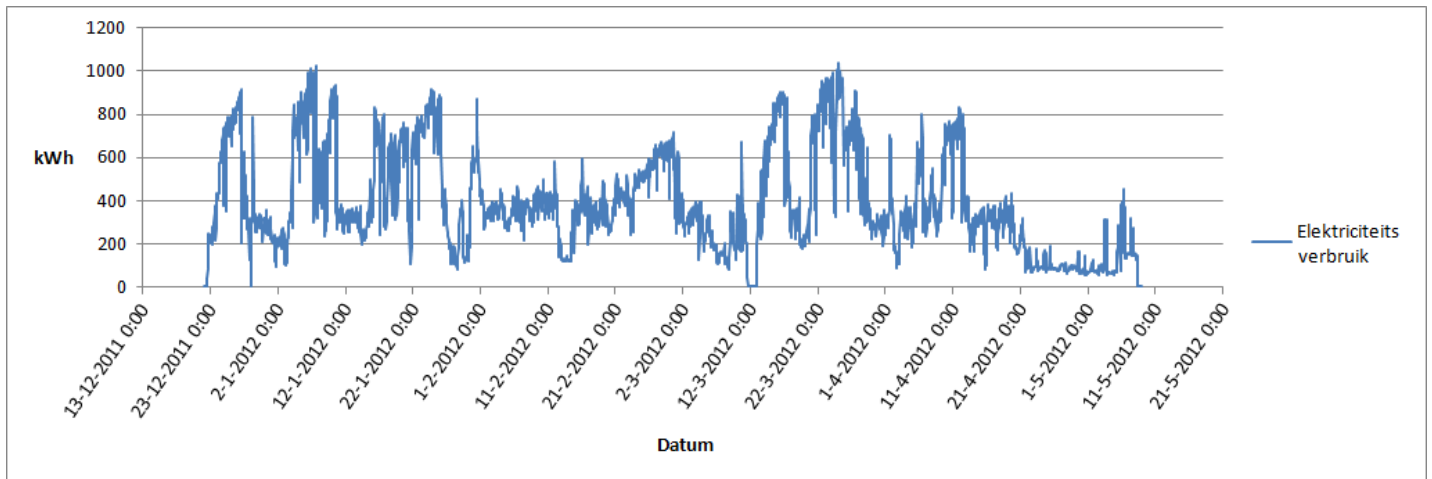
J.3 Elektriciteit

De boring van de productie- en injectieput heeft plaatsgevonden van december 2011 t/m mei 2012. Op afbeelding J.1 is het verloop van dit verbruik afgebeeld.

Hoeveelheid

De totale hoeveelheid elektriciteit die voor de boring is gebruikt, is **1.325,3 MWh** (Hanemaaijer, 2012).

¹ 44/12 is als volgt bepaald: CO₂ bestaat uit één ¹²C atoom en twee ¹⁶O atomen. $12 + 2 \cdot 16 = 44$. De 222 kg C/ton gaat over één ¹²C atoom. Om van één ¹²C atoom naar één ¹²C atoom en twee ¹⁶O atomen te gaan moet gedeeld worden door 12 en vermenigvuldigd met 44.

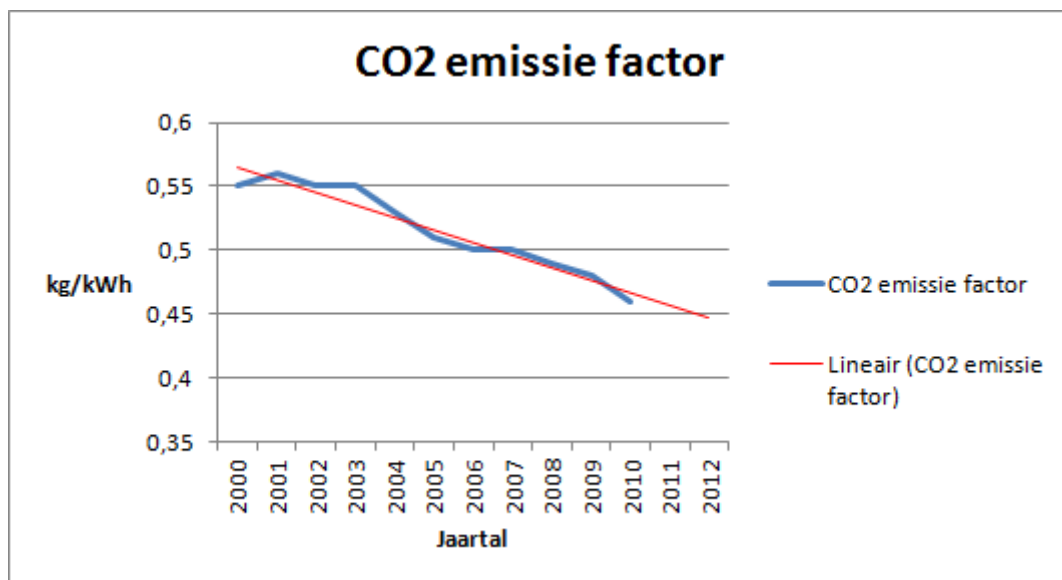


Afbeelding J.1 – elektriciteitsverbruik van GWW tijdens boring

Productiekosten

Voor de CO₂-uitstoot van elektriciteit in kg CO₂/kWh zijn verschillende factoren in omloop. Milieucentraal (2012a) rekent bijvoorbeeld met een emissiefactor van 0,55 kg CO₂/kWh, en DWA (2012) met 0,43 kg CO₂/kWh.

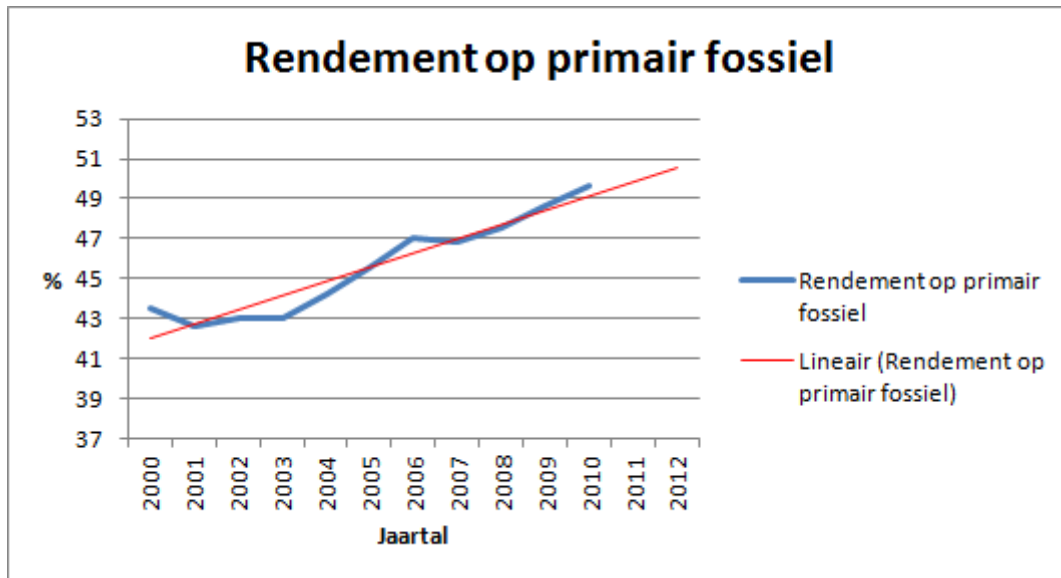
AgentschapNL (Harmelink, 2012) heeft naar aanleiding van de variatie in factoren een document opgesteld waarin ze op transparante wijze de factoren hebben berekend van 2000 t/m 2010. Wanneer deze worden geplot, lijkt er de afgelopen jaren een lineaire trend te zijn naar een lagere CO₂-emissiefactor (zie afbeelding J.2). Aan de hand van deze trend kan de emissiefactor voor 2012 geschat worden. Deze komt uit op **0,45 kg CO₂/kWh**.



Afbeelding J.2 – lineaire trend van CO₂-emissiefactor vanaf 2000 (gebaseerd op Harmelink, 2012)

Hetzelfde document geeft ook de waarden van 2000 t/m 2010 voor het gemiddelde rendement van de productie van elektriciteit in Nederland. Dit rendement geeft aan hoeveel primaire energie nodig is geweest om een bepaalde hoeveelheid elektriciteit te produceren. Op afbeelding J.3 is de grafiek te zien van deze waarden vanaf 2000. Opnieuw lijkt er een (lineaire) trend te zitten in de afgelopen jaren. Met behulp van deze trend kan het rendement voor 2012 geschat worden, wat uitkomt op een

waarde van **50,5%**. Dit komt overeen met **7,13 MJprim/kWh²**, waarbij andere vormen van energie buiten fossiel dus niet meegenomen zijn. Voor dit onderzoek is dit een goede factor, omdat het voor de duurzaamheid niet nodig is te weten hoeveel duurzame energie gebruikt is.



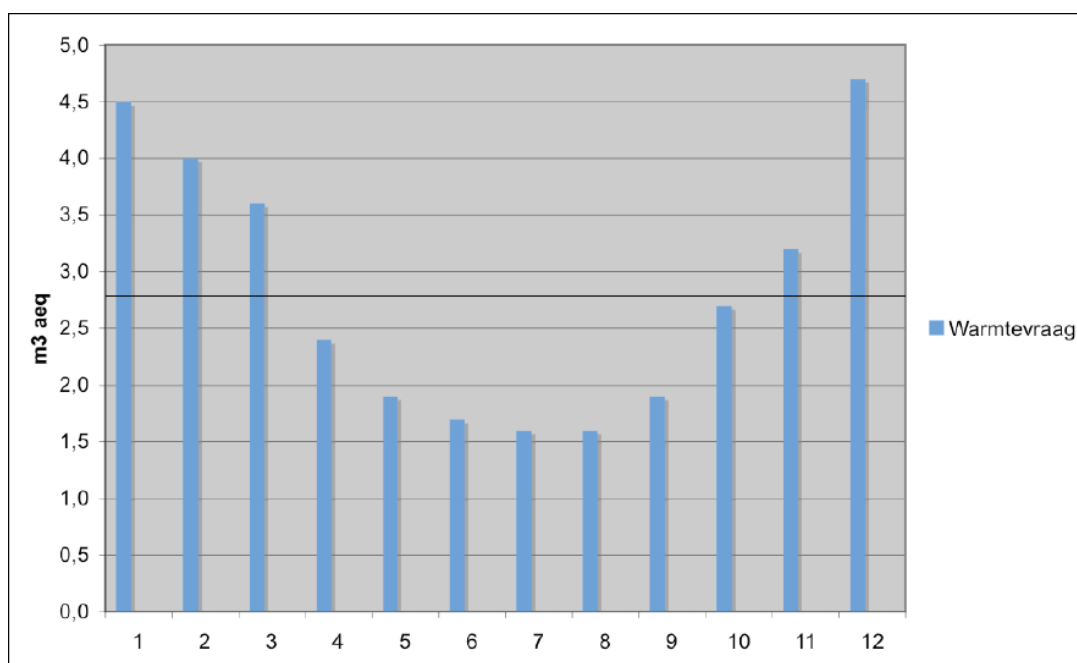
Afbeelding J.3 – lineaire trend van het rendement van elektriciteitsproductie wat betreft primaire fossiele energie vanaf 2000 (gebaseerd op Harmelink, 2012)

² $7,13 \text{ MJprim per } 1 \text{ kWh} = 7.130 \text{ kJprim per } 1 \text{ * kJ/s * } 3.600\text{s} = 7.130 \text{ kJprim per } 3.600 \text{ kJ}$.
Voor 3.600 kJ elektriciteit is dus 7.130 kJ aan primaire energie nodig. Dit geeft een rendement van $3.600/7.130 = 50,5\%$

Bijlage K – Gemiddeld maandverbruik in een jaar

Voor het onderzoek naar de duurzaamheid van Green Well Westland, was het voor de hoofdstukken 5, 6, 7 en 8 noodzakelijk te weten wat het gemiddelde maandverbruik was in een jaar. Zo konden gegevens beter met elkaar vergeleken worden; met het maandgemiddelde is bijvoorbeeld berekend wat er ongeveer in een jaar verbruikt en geproduceerd wordt en zou kunnen worden, en hoe dit overeenkomt met de inschattingen ten tijde van de realisatie van de geothermiebron (hoofdstuk 7 en 8).

Voor het bepalen van de gemiddelde maand, is gebruik gemaakt van afbeelding K.1. Deze afbeelding is afkomstig van Agro AdviesBuro en is een inschatting van de warmtevraag van GWW per maand. Hiermee is in dit onderzoek bepaald wat de gemiddelde warmtevraag per maand is; de zwarte lijn in de afbeelding geeft dit aan. De maand oktober komt hierbij het meest overeen met deze gemiddelde warmtevraag en is in het onderzoek dan ook gebruikt als gemiddelde maand.



Afbeelding K.1 – warmtevraag van GWW in m³ equivalenten (Hanemaaijer, 2012)

Bijlage L - Terugverdientijd realisatiekosten

Deze bijlage laat in print screens zien hoe de Excel sheet uit hoofdstuk 9 is opgebouwd en wat er ingevuld kan worden door de operators.

De cijfers die nu in de groene vakjes staan, zijn waarden van GWW zelf.

Staal					
Casings	373	ton	(1.000 kg)		
Transportleidingen	50	ton	(1.000 kg)		
Energie productiekosten	16.962	GJ		40,1 MJ/kg	
CO2-uitstoot	909	ton CO2		2,15 ton/ton	
Cement					
Hoeveelheid	280	ton	(1.000 kg)		Totaal
Energie productiekosten	1.260	GJ		4,5 GJ/ton	Energie productiekosten 27.672 GJ
CO2-uitstoot	230	ton CO2		820 kg/ton	CO2-uitstoot 1.735 ton CO2
Elektriciteit					
Hoeveelheid nodig voor boring	1.325	MWh			
Hoeveelheid primair	9.449	GJ		7,13 MJprim/kWh	
CO2-uitstoot	596	ton CO2		0,45 kg CO2/kWh	

Vermogen berekenen (optioneel)							
Eigenschappen bron							
Debiet	180	m3/h					
Aanvoer temperatuur	85	°C			* Rendement elektriciteitscentrale	50,5%	
Retour temperatuur	35	°C			** Energie inhoud aardgas	31,65	MJ/m3
Eigenschappen medium (brine)					*** Emissiefactor voor aardgas	56,6	kg/GJ
					**** Emissiefactor voor elektriciteit	0,45	kg/kWh
					"	125	kg/GJ
Soortelijke warmte	3.641	J/kgK					
Dichtheid	1.071	kg/m3					
Vermogen	9,7	MW					

Bruto energie productie			Bruto bespaard aardgas **			Bruto besparing CO2-uitstoot ***		
Vermogen	9,7	MW						
Aantal vollastuur	7.000	uur						
Per jaar	245.669	GJ	Per jaar	7.762.060	m3 aardgas	Per jaar	13.905	ton CO2
Gemiddeld per maand	20.472	GJ	Gemiddeld per maand	646.838	m3 aardgas	Gemiddeld per maand	1.159	ton CO2
Elektriciteitsverbruik			CO2-uitstoot elektriciteit ****					
Per uur	325	kWh				Per uur	146,25	kg CO2
	1,17	GJ						
Per jaar	8.190	GJ				Per jaar	1.024	ton CO2
Gemiddeld per maand	683	GJ				Gemiddeld per maand	85	ton CO2
Energie elek. productie *			Aardgas elek. productie **					
Per jaar	16.218	GJ	Per jaar	512.411	m3 aardgas			
Gemiddeld per maand	1.351	GJ	Gemiddeld per maand	42.701	m3 aardgas			
Netto energie productie			Netto bespaard aardgas			Netto besparing CO2-uitstoot		
Per jaar	229.451	GJ	Per jaar	7.249.648	m3 aardgas	Per jaar	12.881	ton CO2
Gemiddeld per maand	19.121	GJ	Gemiddeld per maand	604.137	m3 aardgas	Gemiddeld per maand	1.073	ton CO2

Terugverdientijd		
Energie	1,4	maanden
CO2-uitstoot	1,6	maanden
COP (ter controle)	30,0	

x	In te vullen cel; wordt gebruikt in berekening
x	Constante; kan aangepast worden indien gewenst, wordt gebruikt in berekening
x	Berekende constante; niet aanpassen, volgt uit andere (gele) constante en wordt gebruikt in berekening
x	Uitkomst van berekening; indien liever zelf in te vullen zonder berekening is dit mogelijk