ekwadraat ARCHITECTS OF THE SUSTAINABLE CHAIN

EBN B.V.

Het hergebruik van ondergrondse cavernes voor warmtetoepassingen

EBN B.V.
Het hergebruik van ondergrondse cavernes voor warmtetoepassingen

Opdrachtgever	EBN B.V. namens Kennisagenda Aardwarmte en het programma Kas als Energiebron (contactpersoon: dhr. F. Schoof) Daalsesingel 1 3511 SV Utrecht
Adviseur	Ekwadraat BV Legedijk 4 8935 DG Leeuwarden 088-4000 500 088-4000 509 info@ekwadraat.com
Colofon	Contactpersoon: Frank van Bergen Auteurs: Frank van Bergen, Chun Lam Yip Status: Definitief Datum: 1 mei 2019 Projectnummer: 101821

Samenvatting

Er zijn honderden zoutcavernes, dit zijn holle ruimtes in de ondergrond gevuld met pekel, in de Nederlandse ondergrond als gevolg van de zoutindustrie. Hergebruik van deze cavernes voor verschillende nieuwe toepassingen wordt overwogen. Deze theoretische studie richt zich op het onderzoeken van de mogelijkheden voor het hergebruik van cavernes voor warmtetoepassingen, zoals het winnen van aardwarmte door waterproductie, door productie uit een gesloten systeem of zoals de seizoensopslag van warmte.

Voor beide toepassingen geldt dat het volume van de cavernes groot genoeg is om interessant te zijn voor collectieve warmtetoepassingen in de gebouwde omgeving. De warmte die mogelijk gewonnen kan worden uit het volume van de aanwezige pekel in de caverne staat in potentie gelijk aan de jaarlijkse warmtebehoefte van 200 tot 1.500 woningen. Winning van warmte lijkt echter niet haalbaar omdat de opwarming van het afgekoelde pekel te lang duurt om interessant te zijn. De theoretische evaluatie van de vervanging van de pekel door andere werkmiddelen (zoet water, vloeibare ammoniak, glycerol, vloeibare CO_2) leidt niet tot een significante verbetering van de opwarmingstijd. Een gesloten systeem, waarbij een werkmiddel door een buizensysteem wordt gecirculeerd, lijkt geen haalbare optie te zijn omdat het interne volume van de buizen niet groot genoeg zal zijn om significante vermogens te halen. De lage geleidbaarheid in het systeem maakt de caverne echter wel tot een goed geïsoleerde ondergrondse ruimte. Dit biedt goede mogelijkheden voor ondergrondse (seizoens)opslag van warmte waarbij het verlies van warmte minimaal is in een tijdsbestek van enkele maanden. Het gepresenteerde systeem is een combinatie van de opslag in een caverne waarbij de warmte voor opslag wordt geleverd door zonthermie uit een groot aantal collectoren of door een overschot aan warmte uit een geothermiebron. Uit de verkennende businesscases blijkt dat het voorgestelde systeem voor circa 1.500 aangesloten woningen mogelijk haalbaar is voor een diepe caverne indien een terugverdientijd van 10 tot 15 jaar acceptabel wordt geacht. De haalbaarheid is uitdagender voor een ondiepe caverne door een verwachte lange terugverdientijd maar wordt mogelijk interessant indien er al een lage temperatuur warmtenet aanwezig is waarop het systeem kan worden aangesloten.

Summary

The Dutch subsurface contains hundreds of salt caverns, which are hollow spaces filled with brine, as remnants of the salt producing industry. Re-use of these caverns is being considered for a variety of applications. This theoretical study aims at researching the possibilities for the re-use of these caverns for heat related applications, such as the production of geothermal heat by water production, by production from a closed system, or by the use of the cavern for seasonal storage.

The volume of the caverns appears to be large enough to be interesting for collective heating of houses and buildings. The heat that possibly can be produced potentially equals the yearly heat demand of 200 to 1.500 houses. However, production of geothermal heat does not seem to be feasible because the heating of the reinjected cool brine takes too long to be of any interest. The theoretical evaluation of replacing the brine with another working fluid (such as fresh water, liquid ammonia, glycerol, liquid CO_2) does not lead to a significant improvement of the heating time. A closed system, where the work fluid is circulated through an installed piping system, does not seem to be feasible as the internal volume of the pipes will not be big enough to reach a significant power for the system. However, the low conductivity in the system makes the cavern a well-insulated underground storage space. This offers good possibilities for underground seasonal storage of heat where the loss of heat during storage over a couple of months is minimal. The presented system is a combination of storage in a cavern where the heat is supplied by a large number of solar thermal collectors or by a surplus of heat from a geothermal source. The reconnaissance business cases show that for a deep cavern the proposed system can possibly connect about 1.500 houses if a 10 to 15 year return time on investment is considered acceptable. The feasibility is more challenging for the shallower caverns because of the long return time on investment but could become interesting if the system can be connected to an already existing low temperature heat net.

Inhoudsopgave

Inleiding ... 9
Doel van het onderzoek ... 9
Betrokken partners en partijen ... 9
Afbakening van het onderzoek ... 9
Leeswijzer ... 10
1 Cavernes in Nederland ... 11
1.1 Zout in de ondergrond van Nederland ... 11
1.2 Zoutcavernes in Nederland ... 11
1.3 Toepassingen van zoutcavernes ... 12
2 Theoretische potentie van cavernes voor onttrekking van warmte (geothermie) ... 15
2.1 Inleiding ... 15
2.2 Potentie van warmteonttrekking met een open systeem ... 15
2.2.1 Aannames voor de bepaling van de potentie ... 15
2.2.2 Potentie van warmteonttrekking ... 16
2.2.3 Benodigde tijd voor opwarming in de caverne na productie ... 20
2.2.4 Beschrijving van het model ... 21
2.2.5 Benodigde tijd voor opwarming ... 22
2.2.6 Resultaten en conclusie ... 22
2.3 Potentie van warmteonttrekking met een gesloten systeem ... 24
2.3.1 Aannames voor de bepaling van de potentie ... 25
2.3.2 Benodigde tijd voor opwarming ... 25
2.3.3 Resultaten en conclusie ... 27
3 Theoretische potentie van cavernes voor seizoensopslag warmte ... 29
3.1 Inleiding ... 29
3.2 Potentie van warmteopslag ... 29
3.3 Mogelijke bronnen van warmte voor opslag ... 30
4 Systeemkeuze ... 33
4.1 Inleiding ... 33
4.2 Warmteopslag in een enkele diepe caverne met zonthermie ... 33
4.2.1 Systeembeschrijving ... 33
4.2.2 Economische haalbaarheid ... 37
Aannames ... 37
Inschatting van kosten en opbrengsten ... 37
4.2.3 Resultaten ... 40
4.3 Warmteopslag in een enkele diepe caverne met geothermie ... 41
4.3.1 Systeembeschrijving ... 41
4.3.2 Economische haalbaarheid ... 42
Aannames ... 42
Inschatting van kosten en opbrengsten ... 42

4.3.3 Resultaten ... 43
4.4 Warmteopslag in een enkele ondiepe caverne ... 45
4.4.1 Systeembeschrijving ... 45
4.4.2 Economische haalbaarheid ... 47
Aannames ... 47
Inschatting van kosten en opbrengsten ... 47
4.4.3 Resultaten ... 48
4.5 Warmteopslag in een dubbele ondiepe caverne ... 49
4.5.1 Systeembeschrijving ... 49
4.5.2 Economische haalbaarheid ... 49
Aannames ... 49
Inschatting van kosten en opbrengsten ... 49
4.5.3 Resultaten ... 51
4.6 Warmteopslag in een dubbele ondiepe caverne met restwarmte ... 52
4.6.1 Systeembeschrijving ... 52
4.6.2 Economische haalbaarheid ... 52
Aannames ... 52
Inschatting van kosten en opbrengsten ... 52
4.6.3 Resultaten ... 54
4.7 Discussie en conclusies ... 55
5 Conclusies en aanbevelingen voor vervolg ... 57
5.1 Vervolgonderzoek ... 57

Inleiding

Het volgende onderzoek (projectnummer 20107[1]) is uitgevoerd in het kader van de vijfde onderzoekscall van de Kennisagenda Aardwarmte[2]. De kennisagenda financiert onderzoek naar de ontwikkeling van aardwarmte. Voor de invulling en aansturing van de kennisagenda is de Kenniscoördinatiegroep vanuit het bedrijfsleven en overheid ingesteld, bestaande uit: Platform Geothermie, DAGO, LTO Glaskracht Nederland, ministerie van Economische Zaken DG ETM en DG AGRO, TNO AGE, SodM, RvO.

Doel van het onderzoek

Er zijn honderden zoutcavernes, dit zijn ruimtes in de ondergrond gevuld met pekel, in Nederland als gevolg van de zoutindustrie. Hergebruik van deze cavernes voor verschillende nieuwe toepassingen wordt overwogen. Deze theoretische studie richt zich op het onderzoeken van de mogelijkheden voor het hergebruik van cavernes voor warmtetoepassingen, zoals het winnen van aardwarmte door waterproductie, door productie uit een gesloten systeem of de seizoensopslag van warmte. Het doel is het onderzoeken van de technische en financiële haalbaarheid van aardwarmtewinning en/of warmteopslag in verlaten zoutcavernes in Nederland. Hierbij wordt benadrukt dat dit vooral om een theoretische studie gaat en dat de praktische haalbaarheid buiten het kader van deze studie vallen.

Betrokken partners en partijen

Het onderzoek is uitgevoerd door Ekwadraat Advies B.V. Energie Beheer Nederland treedt op als opdrachtgever namens de Kennisagenda Aardwarmte voor LNV, EZK, LTO Glaskracht Nederland en het programma Kas als Energiebron. Aanspreekpunt voor de studie is dhr. F. Schoof. Er is een begeleidingscommissie opgesteld die bestaat uit dhr. H. Mijnlieff (TNO), dhr. R. Te Gussinklo Ohmann (Spidron-Weco) en dhr. R. Crabbendam (HVC).

Afbakening van het onderzoek

Zoals aangegeven in het doel gaat het hier om een theoretische studie. Bij (her)gebruik van cavernes staat de stabiliteit van de caverne centraal om daarmee (bodemdalings)effecten aan het maaiveld te minimaliseren. Dit is ook een punt van zorg voor de toezichthouder[3]. De onderzoekers zijn zich hier terdege van bewust, maar hier is in het kader van deze studie niet verder op ingegaan. Ook juridische aspecten over (overdracht van) eigenaarschap en verantwoordelijkheden, abandonering, etc. vallen buiten het kader van deze studie. De dieptegrens voor de winning van aardwarmte ligt volgens de mijnbouwwet op 500 meter. Veel van de cavernes in Twente liggen ondieper (400-500m) en voor warmtetoepassingen op deze diepte gelden andere regels dan voor de dieper liggende cavernes. In het kader van deze studie is niet ingegaan op

[1] https://www.kasalsenergiebron.nl/onderzoeken/20107-geothermie-in-zoutcavernes/
[2] https://www.kasalsenergiebron.nl/duurzame-energie/aardwarmte/ik-heb-al-een-bron/kennisagenda-aardwarmte/
[3] https://www.sodm.nl/documenten/brieven/2018/07/20/brief-aan-akzo-over-risicobeheersplan-voor-zoutcavernes-onder-afvalopslag-twence

dit verschil en ook is niet specifiek ingegaan op de technische uitvoering van de boringen en de bovengrondse faciliteiten. Er is vanuit gegaan dat de benodigde technieken voor de uitvoering niet wezenlijk verschillen van de beschikbare technieken voor de winning van pekel door de zoutindustrie. De omgang met het zeer zoute pekelwater in warmte gerelateerde apparatuur zoals warmtewisselaars en warmtepompen en effecten zoals corrosie en scaling zullen later nader onderzocht moeten worden. Bij deze studie is hier geen specifieke aandacht aan besteed. Ook bij het gebruik van diverse werkmiddelen is uitgegaan van de eigenschappen, waarbij er niet is gekeken naar de technische haalbaarheid van het gebruik van deze middelen, zoals de mogelijkheid van het onder druk houden van bepaalde middelen.

Leeswijzer

Hoofdstuk 1:	Een algemene introductie in de stand van zaken rondom cavernes in Nederland
Hoofdstuk 2:	De haalbaarheid van het gebruik van cavernes voor de (continue) winning van warmte wordt geëvalueerd. Hierbij wordt gekeken naar de mogelijke circulatiesnelheden en gerelateerde verblijftijden van de vloeistof in de caverne, in combinatie met de snelheid van opwarming van de vloeistof die gecirculeerd wordt.
Hoofdstuk 3 en 4:	De haalbaarheid van het gebruik van de caverne als (seizoens)opslag voor warmte wordt beschouwd. Hierbij worden de mogelijkheden voor het gebruik van diverse warmtebronnen beschreven, met specifieke aandacht voor zonthermie. Op basis van de resultaten van deze hoofdstukken wordt een systeem voorgesteld waarvan ook op hoofdlijnen een businesscase is opgesteld.
Hoofdstuk 5:	De conclusies van de studie worden samengevat en er worden aanbevelingen gedaan voor het vervolg.

1 Cavernes in Nederland

1.1 Zout in de ondergrond van Nederland

Onder grote delen van Noord-Nederland komen dikke zoutlagen voor van soms wel honderden meters dik. Deze zoutlagen zijn ontstaan doordat miljoenen jaren geleden het water uit binnenzeeën is verdampt, waarna het zout achterbleef[4]. Dit zgn. steenzout kan voorkomen in gelaagde vorm, in de vorm van kussens en in de vorm van verticale pijlers[5]. De dikste zoutpakketten dateren uit het Laat-Perm ("Zechstein") tot een maximum van in totaal ongeveer 1 kilometer[5]. Tijdens het Trias zijn er ook diverse zoutlagen afgezet (Röt, Muschelkalk- en Keuper-zout). In eerste instantie zijn de zoutlagen in horizontale pakketten afgezet maar in de loop van de tijd traden vervormingen op en accumuleerde de steenzoutvoorkomens lokaal in verticale pijlers tot ruim 3.500m hoog of in kussens[5]. In de ondergrond van Nederland zijn 34 zoutpijlers en zoutkussens herkend, waarvan 25 in Noord-Nederland en 9 in het oosten van ons land[5]. De ondiepste zoutlagen bevinden zich onshore op een diepte vanaf 100m (Zuidwending), de diepste zoutlagen zijn aanwezig tot een diepte van 5.000m. Een recent overzicht van het voorkomen van zoutpijlers is gegeven in een TNO-studie[6].

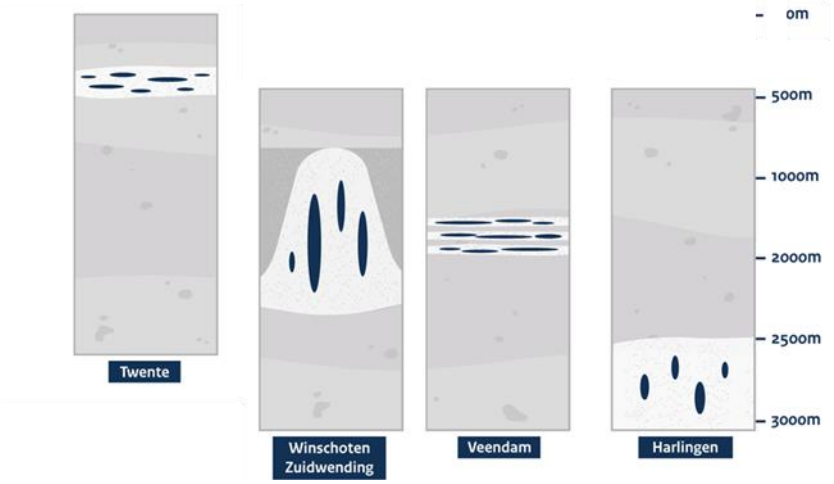
1.2 Zoutcavernes in Nederland

Winning van steenzout in Nederland begon in 1919 en vindt dus al honderd jaar plaats. De economisch winbare voorraad aan steenzout in de Nederlandse ondergrond voor de komende jaren bedraagt ruim 350 miljoen ton[5]. Winning van zowel natrium- als magnesiumzouten gebeurt door zoet water in de zoutlaag te spuiten waardoor het steenzout oplost en de pekel naar boven kan worden gepompt[5]. Opgepompte pekel wordt, bijvoorbeeld voor zoutwinning, vervolgens verdampt om water van de zouten te scheiden[7]. Door deze oplossingsmijnbouw ontstaan met pekel gevulde holten rondom het boorgat, de zogenaamde cavernes[5]. Afhankelijk van het zoutvoorkomen is de vorm van de caverne anders. In Twente vindt winning plaats uit de Trias zouten en zijn de cavernes ondieper (400-500m) en kleiner dan de cavernes in Noord-Nederland. In het gebied rond Hengelo en Enschede zijn er honderden cavernes die in vorm en volume variëren[8], met een aantal cavernes met een volume van meer dan 200.000 m^3. Omdat de zoutlaag niet zo dik is, zijn de cavernes relatief plat van vorm. Ze hebben een hoogte van enkele tientallen meters en een doorsnee van circa 120m. In een gebied van ongeveer tien vierkante kilometer bevinden zich circa 350 cavernes. Er zijn momenteel nog zo'n 80 in gebruik[9]. Een aantal van deze cavernes worden actief gestabiliseerd[10], waarbij gekeken is naar de

---

[4] https://www.sodm.nl/onderwerpen/zoutwinning
[5] De ondergrond van Nederland, ISBN 90 01 60514 1
[6] https://kennisbank.ebn.nl/ondergrondse-opslag-in-nederland-technische-verkenning-2018/
[7] https://www.agbzw.nl/onze-cavernes/hoe-een-caverne-wordt-gebouwd
[8] Zie bijvoorbeeld kaarten en illustraties in https://www.commissiemer.nl/docs/mer/p26/p2655/2655-052mer.pdf
[9] https://www.sodm.nl/onderwerpen/zoutwinning/vraag-en-antwoord/wat-zijn-de-risicos-van-zoutwinning-in-twente
[10]https://www.tubantia.nl/enschede-e-o/cavernes-onder-stortplaats-boeldershoek-worden-ook-stabiel-gemaakt~a452d6e8/

toepassing van verschillende vulstoffen[11]. Het volume van de cavernes in Noord-Nederland varieert van circa 500.000 tot 1.000.000 m^3. Ook deze cavernes zijn gevuld met pekel en hebben een hoogte van zo'n 300 tot 500 meter, een doorsnede van tussen 50 à 80 meter en liggen op een diepte tussen 1.000 en 1.500 meter[6]. Er wordt echter lokaal ook zout gewonnen op een diepte van meer dan 2.500m[5].



Figuur 1 Diverse vormen van zoutcavernes in Nederland. Aangepast figuur, oorspronkelijk figuur op https://www.sodm.nl/onderwerpen/zoutwinning.

1.3 Toepassingen van zoutcavernes

Op dit moment worden zoutcavernes al op diverse manieren hergebruikt. De voornaamste toepassingen van zoutcavernes zijn gerelateerd aan opslag.

- *Opslag van gas of olie.* De toepassing van gasopslag in zoutcavernes is een reeds ver doorontwikkelde technologie voor diverse gassen (aardgas, stikstof, lucht, waterstof en zelfs (recentelijk) ook helium)[12]. Er zijn vijf ondergrondse aardgasopslagen in Nederland. Een daarvan is in Zuidwending. Deze opslag bestaat uit vijf zoutcavernes in een cluster. Dit cluster fungeert als een gasbuffer. Gas- of luchtopslag vereist een bepaalde diepte en is daarom alleen toepasbaar in Noord-Nederland[13]. Dergelijke energieopslag projecten vergen grote investeringen en de betrokkenheid van meerdere partijen[12], wat een drempel kan zijn voor de ontwikkeling van dit soort projecten. Hoewel recentelijk de mogelijkheden naar de opslag van gasolie in een zoutcaverne in Twente-Rijn Marssteden op een diepte van ongeveer 400-450m diep nog zijn geëvalueerd bestaan er daarom op dit moment geen initiatieven en/of plannen voor energieopslag in Hengelo[12].
- *Opslag van perslucht.* In het noorden van Nederland worden de mogelijkheden voor opslag van samengeperste lucht in cavernes bij Zuidwending onderzocht[12]

[11] https://www.commissiemer.nl/docs/mer/p26/p2655/2655-052mer.pdf
[12] https://kennisbank.ebn.nl/ondergrondse-opslag-in-nederland-technische-verkenning-2018/
[13] https://www.akzonobel.com/nl/generic-content/energieopslag-zoutcavernes

- *Opslag van waterstof.* Het gebruik van cavernes voor opslag van waterstof wordt ook geëvalueerd voor Nederland, zie ook het rapport van TNO[12]. Deze opslag wordt al toegepast in zoutcavernes in de VS en het VK.
- *Opslag van warmte*. Deze vorm van opslag in cavernes is minder gebruikelijk en is bijvoorbeeld niet meegenomen in de recente overzichtsstudie naar de technische mogelijkheden voor ondergrondse opslag van TNO[14]. Het idee is echter niet nieuw en er zijn in het verleden wel studies naar uitgevoerd, bijvoorbeeld in de VS[15].

[14] https://kennisbank.ebn.nl/ondergrondse-opslag-in-nederland-technische-verkenning-2018/
[15] https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800014315.pdf

2 Theoretische potentie van cavernes voor onttrekking van warmte (geothermie)

2.1 Inleiding

De theoretische potentie van het gebruik van cavernes voor warmtetoepassingen hangt af van de combinatie van de hoeveelheid water die geproduceerd wordt en het vermogen om dit water af te koelen door het onttrekken van warmte voor het weer teruggepompt wordt in de caverne. Om deze potentie te bepalen is er uitgegaan van twee situaties: een ondiepe situatie, representatief voor de cavernes in Twente en een diepe situatie als model voor de cavernes in Noord-Nederland. Er wordt een open systeem geëvalueerd, d.w.z. dat de putten niet onderling verbonden zijn en er rechtstreeks uit de caverne wordt geproduceerd en in de caverne wordt geïnjecteerd. Aan het eind van dit hoofdstuk wordt de potentie van een gesloten systeem nog geëvalueerd.

2.2 Potentie van warmteonttrekking met een open systeem

2.2.1 Aannames voor de bepaling van de potentie

De aannames voor deze situaties zijn weergegeven in Tabel 1. Voor de bepaling van de gemiddelde temperatuur is uitgegaan van de gemiddelde geothermische gradiënt in Nederland van 31°C/km. De mogelijkheid tot afkoelen is in eerste instantie afhankelijk van de warmtewisselaar, mogelijk in combinatie met het gebruik van een warmtepomp. Gegeven de temperatuur van het opgepompte water is er geen warmtepomp nodig voor de diepe situatie en zou de gewonnen warmte ingezet kunnen worden op een warmtenet dat 70°C vraagt en 40°C terug levert[16]. Voor de diepe situatie wordt derhalve uitgegaan van een uitkoeling tot 40°C voor her-injectie. Het water zou mogelijk verder afgekoeld kunnen worden maar hier is niet van uitgegaan.

Voor de ondiepe situatie wordt uitgegaan van levering op een lage temperatuur warmtenet dat 40°C vraagt en 15°C terug levert. Gezien de aanvoertemperatuur vanuit de caverne is de inzet van een warmtepomp hierbij essentieel. Bij een warmtepomp wordt een temperatuursprong gerealiseerd waarbij elektriciteit omgezet wordt in warmte en toegevoegd aan een warmtestroom. Voor de evaluatie wordt aangenomen dat er in de ondiepe situatie kan worden afgekoeld tot 15°C.

[16] In de praktijk kan een invoeding van 75°C nodig zijn voor levering aan de huishoudens op 70°C. In deze studie zijn we echter uitgegaan van een invoeding en levering op 70°C.

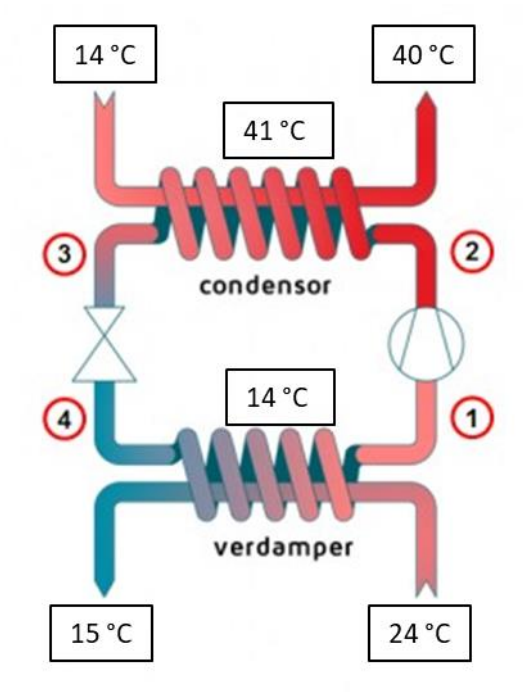
	Gemiddelde diepte [m)]	Gemiddelde temperatuur [°C]	Volume [m³]
Ondiepe situatie	450	24	200.000
Diepe situatie	2.250	80	500.000

Tabel 1 Aannames voor de geëvalueerde situaties.

Het rendement van de warmtepomp, dus de hoeveelheid elektriciteit die moet worden toegevoegd om de temperatuursprong te realiseren, wordt berekend met behulp van de Coefficient of Performance (COP) van de warmtepomp. Het theoretisch maximale rendement van een warmtepomp kan worden beschreven met het Carnot-rendement[17]. Dit rendement wordt berekend door:

$$COP_{h,Carnot} = \frac{T_{cond}\ [K]}{T_{cond} - T_{evap}}$$

In de ondiepe situatie is de T_{cond} dus 314K (41°C) en de T_{verd} 287K (14°C). Het Carnot-rendement komt hiermee op 11,6. Dit rendement gaat echter alleen op bij een ideale compressiecyclus zonder verliezen. Omdat dit in de praktijk niet mogelijk is, wordt de werkelijke COP daarom gegeven door het Carnot rendement vermenigvuldigd met een systeemrendement. Het systeemrendement ligt meestal tussen de 50 en 70%. Voor deze evaluatie is een systeemrendement van 50% aangehouden. De aangenomen COP komt hiermee op 5,8.



Figuur 2 Schematische weergave van de warmtepomp en de temperaturen aan de condensor- (warmtenet) en verdamperkant (caverne)

2.2.2 Potentie van warmteonttrekking

Voor de bepaling van het maximale potentieel aan warmte dat uit de caverne wordt gewonnen is het uitgangspunt dat het gehele vloeistofvolume wordt onttrokken, vervolgens wordt afgekoeld en weer wordt teruggepompt in de caverne. Dit is uiteraard een theoretisch uitgangspunt waarbij de aanname is dat er buiten het afkoelingsproces aan de warmtewisselaar geen warmteonttrekking of toevoeging is. Bij deze benadering wordt de warmtecapaciteit gebruikt van diverse vloeistoffen, vanuit de gedachte dat de pekel vervangen zou kunnen worden door een andere vloeistof in de caverne. Hierbij wordt benadrukt dat dit om een theoretische berekening gaat, omdat het gebruik van deze vloeistoffen in deze context niet haalbaar is. Er is geen temperatuurafhankelijkheid van de warmtecapaciteit, thermische geleidbaarheid en dichtheid meegenomen.

[17] http://industrialheatpumps.nl/nl/techniek/cop_warmtepomp/

	Volume [m³]	Vloeistof (werkmiddel)	Warmtecapaciteit [kJ/kg*°C]	ΔT [°C]	Maximaal potentieel te onttrekken warmte [TJ]	Maximaal toe te voegen door warmtepomp [TJ]	Totaal potentieel warmte [TJ]
Ondiepe situatie	200.000	Zoet water	4,2	9	7,5	1,5	9,1
	200.000	Pekel	3,2	9	6,8	1,4	8,2
	200.000	Glycerol	2,4	9	5,4	1,1	6,5
	200.000	Ammoniak (20 bar)	4,9	9	6,3	1,3	7,6
Diepe situatie	500.000	Zoet water	4,2	40	83,8	n.v.t.	83,8
	500.000	Pekel	3,2	40	75,9	n.v.t.	75,9
	500.000	Glycerol	2,4	40	60,5	n.v.t.	60,5
	500.000	Ammoniak (20 bar)	4,9	40	70,3	n.v.t.	70,3

Tabel 2 Aannames voor de geëvalueerde situaties. Het totaal van de potentiële warmte is de warmte die onttrokken kan worden door een cyclus, d.w.z. dat het totale volume van de caverne een keer wordt rondgepompt.

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat de diepe cavernes een groter potentieel hebben dan de ondiepe cavernes door het grotere volume en de grotere ΔT. De toegevoegde warmte vanuit de warmtepomp in de ondiepe situatie is, los van het feit dat de elektriciteit hiervan moet worden ingekocht, niet dusdanig dat het totaal potentieel aan warmte groter is dan in de diepe situatie. Hierbij moet wel worden bedacht dat de kosten van een dieper systeem aanzienlijk hoger zullen liggen dan bij een ondiep systeem, waarover later meer. Van de verschillende werkmiddelen is, zoals verwacht, duidelijk dat de vloeistof met de hoogste warmtecapaciteit en dichtheid het hoogste potentieel aan warmte heeft. Door de hogere dichtheid en de relatief beperkte ΔT is het potentieel van pekel in de ondiepe situatie iets hoger dan voor zoet water. Vanwege de oplosbaarheid van het zoute gesteente zal er echter niet met zoet water gewerkt kunnen worden. Voor de evaluatie van de open systemen is daarom zoet water niet meegenomen als optie.
Voor de diepe situatie is het maximaal potentieel dus 76 TJ voor pekel. Een degelijke hoeveelheid warmte staat, ter vergelijking, gelijk aan het jaarlijks verbruik van 1.800 woningen[18]. Voor de ondiepe situatie gaat het om 8 TJ voor pekel, gelijk aan het jaarverbruik van 190 woningen. Voor glycerol staat de hoeveelheid te winnen warmte gelijk aan 155 woningen.

Uitgaande van de aanwezige pekel als werkmiddel kan de onttrekking van de warmte in korte tijd gebeuren, door met een hoog debiet te produceren, of over een langere tijd door te pompen met een laag debiet. Aangezien het om dezelfde hoeveelheid warmte gaat, wordt het vermogen van het systeem bepaald door

[18] Bij een aangenomen gemiddeld jaarlijks verbruik van 42 GJ per woning

het aantal uren dat gebruikt wordt om het volledige volume aan pekel rond te pompen. Het maximale vermogen is berekend door de totaal onttrokken warmte te delen door een aantal aangenomen productie uren. Een hoger vermogen is wenselijk, dit betekent echter dat bij kortere circulatietijden (hoog debiet) de opwarming in de caverne sneller moet gaan. Indien er onvoldoende tijd is voor opwarming zal de temperatuur van het opgepompte pekel dalen waarmee het vermogen afneemt. De tijd voor opwarming wordt in de volgende paragraaf besproken.

	Vloeistof (werkmiddel)	Productie-uren	Debiet [m³/uur]	Vermogen zonder WP [MW]	Vermogen van WP [MW]	Totale vermogen [MW]
Ondiepe situatie	Zoet water	8.000	25	0,2	0,0	0,3
		5.000	40	0,4	0,1	0,5
		2.000	100	0,9	0,2	1,1
		800	250	2,3	0,5	2,8
	Pekel	8.000	25	0,2	0,0	0,3
		5.000	40	0,4	0,1	0,5
		2.000	100	0,9	0,2	1,1
		800	250	2,4	0,5	2,9
	Glycerol	8.000	25	0,2	0,1	0,3
		5.000	40	0,3	0,1	0,4
		2.000	100	0,8	0,2	1,0
		800	20	1,9	0,4	2,3
	Ammoniak	8.000	25	0,2	0,1	0,3
		5.000	40	0,4	0,1	0,5
		2.000	100	0,9	0,3	1,2
		800	250	2,2	0,5	2,7
Diepe situatie	Zoet water	8.000	62,5	2,9	n.v.t.	2,9
		5.000	100	4,7	n.v.t.	4,7
		2.000	250	11,6	n.v.t.	11,6
		1.000	500	23,3	n.v.t.	23,3
	Pekel	8.000	62,5	2,6	n.v.t.	2,6
		5.000	100	4,2	n.v.t.	4,2
		2.000	250	10,5	n.v.t.	10,5
		1000	500	21,1	n.v.t.	21,1
	Glycerol	8.000	62,5	2,1	n.v.t.	2,1
		5.000	100	3,4	n.v.t.	3,4
		2.000	250	8,4	n.v.t.	8,4
		1.000	500	16,8	n.v.t.	16,8
	Ammoniak	8.000	62,5	2,4	n.v.t.	2,4
		5.000	100	3,9	n.v.t.	3,9
		2.000	250	9,8	n.v.t.	9,8
		1.000	500	19,5	n.v.t.	19,5

Tabel 3 Berekende vermogens voor de geëvalueerde situaties.

Evaluatie van geothermieprojecten in Nederland laat zien dat er debieten tot 380 m^3/uur gerealiseerd zijn[19]. Dit terwijl er uit een permeabel gesteente moet worden geproduceerd in plaats van een open (dus zeer permeabele) caverne. Bij productie uit een caverne zullen eerder de pompen dan het reservoir het debiet limiteren. Voor deze evaluatie gaan we ervan uit dat een debiet van 250 m^3/uur haalbaar is. Uit Tabel 3 blijkt dat als uitgegaan wordt van pekel met deze bovengrens er een vermogen behaald kan worden van 2.9 MW voor de ondiepe situatie en 10,5 MW voor de diepe situatie.

Gegeven de debieten kan er op basis van het volume van de caverne een gemiddelde verblijftijd worden berekend. Deze verblijftijd is de maximale tijd waarin de pekel (of ander werkmiddel) moet zijn opgewarmd als er wordt uitgegaan van een continue toepassing van geothermie. Met andere woorden, dit betekent dat de koude pekel die in de caverne is geïnjecteerd aan het eind van deze periode weer moet zijn opgewarmd voor de daaropvolgende cyclus. In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan. Voorwaarde voor een continu proces is dan wel dat de verblijftijd in het reservoir (bij 250 m^3/uur respectievelijk 800 en 2.000 uur voor de ondiepe en diepe situatie) voldoende is voor opwarming van de geïnjecteerde pekel, waarover later meer.

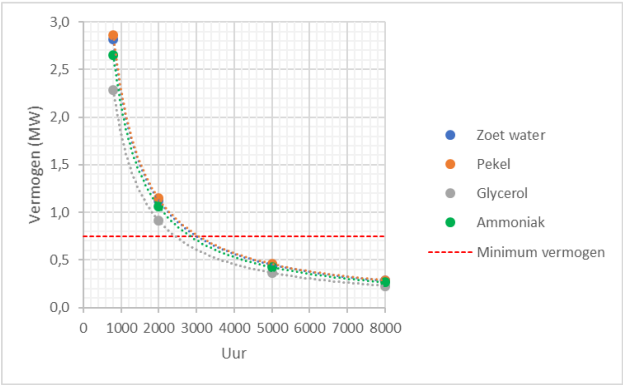
Hoewel theoretisch elk duurzaam systeem interessant is gaan wij voor deze evaluatie naast de totale warmtevraag ook uit van een minimaal vermogen. Omdat wij naar een collectief systeem kijken is de ondergrens van een interessant systeem gelegd op 750 kW. Deze ondergrens is, enigszins arbitrair, bepaald door het minimum van 100 woningen dat moet worden aangesloten[20]. Op basis van dit criterium kan worden bepaald wat het minimale debiet (dus de maximale circulatietijd) mag zijn om dit vermogen te behalen (Tabel 4). Dit betekent dat als er op een lager debiet wordt gepompt dat dan het minimale vermogen niet gehaald wordt. Indien voor hetzelfde (minimale) vermogen een hoger debiet benodigd is dan is dit ongunstiger, omdat de consequentie hiervan is dat er harder gepompt moet worden met nadelige effecten voor het geïnstalleerd pompvermogen en het energieverbruik (en daarmee de kosten). De berekende minimale debieten en daarmee de gerelateerde verblijftijden in het reservoir, zijn weergegeven in Tabel 4.

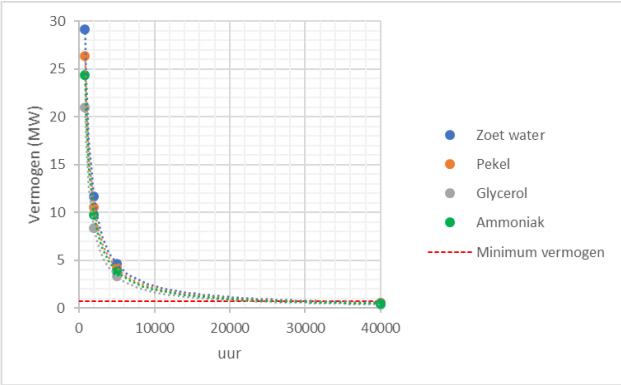
Hiermee is ook de voorwaarde voor het succes van een continu warmteproces gedefinieerd, omdat bepaald is dat voor het ondiepe systeem continue warmteonttrekking alleen interessant is (d.w.z. een vermogen behaald kan worden van meer dan 750 kW) als de opwarming van de geïnjecteerde afgekoelde vloeistof minder tijd kost dan circa 4 maanden. Voor de diepe situatie is dit, door het grotere volume, circa 35 maanden.

---

[19] Dit is berekend aan de hand van de maandproducties van geothermieprojecten zoals gepubliceerd op nlog.nl

[20] Voor deze 100 woningen is uitgegaan van een benodigd piekvermogen van 14 kW per woning en van een maximale gelijktijdigheid, d.w.z. het percentage woningen dat op hetzelfde moment een maximaal vermogen vraagt, van 50%.





Figuur 3 De relatie tussen het mogelijk te realiseren vermogen en de tijd die wordt uitgetrokken voor volledige circulatie van het vaste volume werkmiddel in de caverne. Aangezien het volume van de caverne niet veranderd, neemt het vermogen af als het debiet naar beneden gaat (de tijd neemt dan toe).

	Vloeistof (werkmiddel)	Minimale tijd om volume caverne te circuleren bij max. debiet van 250 m³/uur [uren/maanden]	Minimum debiet voor een 750 kW vermogen [m³/uur]	Benodigde tijd om volume caverne te circuleren bij minimum debiet voor 750 kW vermogen [uren/maanden]
Ondiepe situatie	Zoet water	800/ 1.1	67	3.000/ 4.1
	Pekel	800/ 1.1	67	3.000/ 4.1
	Glycerol	800/ 1.1	83	2.400/ 3.3
	Ammoniak	800/ 1.1	71	2.800/ 3.8
Diepe situatie	Zoet water	2.000/ 2.8	20	25.000/ 35
	Pekel	2.000/ 2.8	20	25.000/ 35
	Glycerol	2.000/ 2.8	20	25.000/ 35
	Ammoniak	2.000/ 2.8	20	25.000/ 35

Tabel 4 Indicatie van de benodigde tijd voor circulatie met een minimum leverbaar vermogen van 750 kW voor diepe en ondiepe caverne met het gebruik van verschillende werkvloeistoffen.

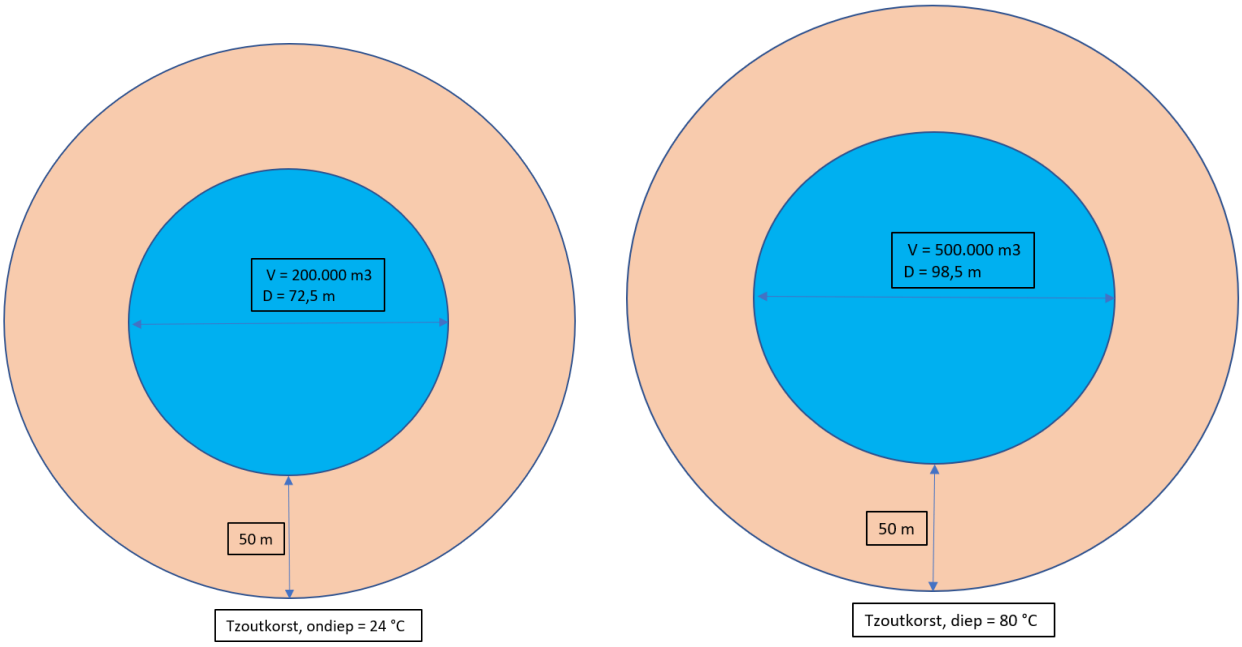
2.2.3 Benodigde tijd voor opwarming in de caverne na productie

Zoals hierboven aangegeven kan de toepassing van cavernes voor de onttrekking van warmte interessant zijn, mits het afgekoelde water weer binnen afzienbare tijd kan opwarmen. Om een beeld te krijgen van de benodigde opwarmingsperiode moet in eerste instantie worden onderzocht wat de thermische eigenschappen van een caverne zijn. Tezamen met de eigenschappen van de vloeistof in de caverne bepalen die de tijd die het kost om de temperatuur van de vloeistof weer in evenwicht te brengen met de omgeving. In het geval van opwarming van de vloeistof gaat het erom of er warmte uit het omliggende gesteente overgedragen kan worden aan de vloeistof. Om dit te onderzoeken is er een 2-dimensionaal model opgezet in Excel. Dit model wordt gebruikt om de theoretische situatie na te bootsen waarin de temperatuur van de

vloeistof verlaagd wordt en gemodelleerd wordt hoe lang het duurt voordat de temperatuur weer in evenwicht is met het gesteente. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de temperatuur aan de rand van het model, dus van het gesteente waarin de caverne aanwezig is, constant blijft. Met deze aanname wordt dus een oneindige aanvoer van warmte vanuit het gesteente gesimuleerd.

2.2.4 Beschrijving van het model

Om de tijdsafhankelijkheid van de opwarming in de caverne te bepalen is er een conceptueel model van een caverne gedefinieerd. Hierbij wordt de caverne gesimuleerd door een bolvormige holle ruimte gevuld met pekelwater. De aangenomen diameter van de caverne is voor de ondiepe situatie 72,5m (volume 200.000 m^3) en voor de diepe situatie 98,5m (volume 500.000 m^3). De bol heeft een schil van steenzout (haliet) met een dikte van 50m. Aan de buitenkant van deze schil is de temperatuur gefixeerd. Binnen de schil verandert de temperatuur met de tijd. Aan het pekelwater en het steenzout zijn thermische eigenschappen toegewezen zoals weergegeven in Tabel 5. Er zijn enkele scenario's doorgerekend met andere vloeistoffen dan pekel. Hiervoor zijn in Tabel 5 ook de thermische eigenschappen weergeven.



Figuur 4 Schematische bovenaanzicht van ondiepe zoutcaverne (links) en diepe zoutcaverne (rechts).

Werkmiddelen						
Parameters	Zoetwater	Pekelwater	Haliet	Glycerol	Ammoniak (20 bar)	CO_2 (74 bar)
Dichtheid [kg/m^3]	997	1.183	2.160	1.260	604	731
Warmtecapaciteit [kJ/kg*°C]	4,2	3,6	0,9	2,4	4,8	9,2
Thermische geleidbaarheid [W/m*°C]	0,6	1,2	6,1	0,3	0,5	0,1

Tabel 5 Dichtheid, warmtecapaciteit en thermische geleidbaarheid van componenten op 25 °C en 1 atm. (m.u.v. ammoniak en CO_2).

2.2.5 Benodigde tijd voor opwarming

Voor de berekening wordt aangenomen dat de opwarming begint aan het eind van de eerste productiecyclus. Dit wordt gesimuleerd door aan te nemen dat aan het begin van de berekening de pekel in de caverne al dezelfde temperatuur heeft, die gelijk is aan de temperatuur van de geïnjecteerde pekel. Voor de diepe situatie gaat het hier dus om 40°C en voor de ondiepe situatie om 15°C. Vervolgens wordt berekend hoe lang het duurt voordat de pekel weer op 1°C onder de omgevingstemperatuur zit[21]. Voor de diepe situatie gaat het hier dus om 79°C en voor de ondiepe situatie om 23°C. Voor de berekening wordt van een stilstaande situatie uitgegaan (er wordt geen vloeistof onttrokken of geïnjecteerd). De berekeningen zijn uitgevoerd onder de aannames dat de dichtheid en thermische eigenschappen van het systeem constant zijn en dat de oplosbaarheid van zout in pekelwater niet verandert (zie ook bijlage). Ook is aangenomen dat er geen energie verloren gaat in het systeem, bijvoorbeeld via leidingen of warmtepomp.

De vloeistof in de caverne wordt opgewarmd door overdracht van warmte vanuit het gesteente. Er zijn drie vormen van warmteoverdracht[22]:

- Geleiding (conductie). Dit is warmteoverdracht waarbij warmte stroomt van deeltjes met de hogere kinetische energie (temperatuur) naar minder energierijke (koudere) deeltjes;
- Stroming (convectie). Dit is warmteoverdracht door verplaatsing van een vloeistof of gas;
- Straling (radiatie). Dit is warmteoverdracht tussen twee lichamen, die niet met elkaar in aanraking zijn zonder gebruik te maken van een tussenstof;

In het model is uitgegaan van conductie als enig proces van warmteoverdracht. Het is de verwachting dat convectie door circulatie van de vloeistof wel zal optreden, maar dit is modelmatig een te complex proces om in het kader van deze studie mee te nemen. Het effect van convectie op de opwarmingstijd zal later wel kwalitatief worden besproken. Naar verwachting zal straling geen rol spelen in het opwarmingsproces in de caverne en is daarom niet meegenomen.

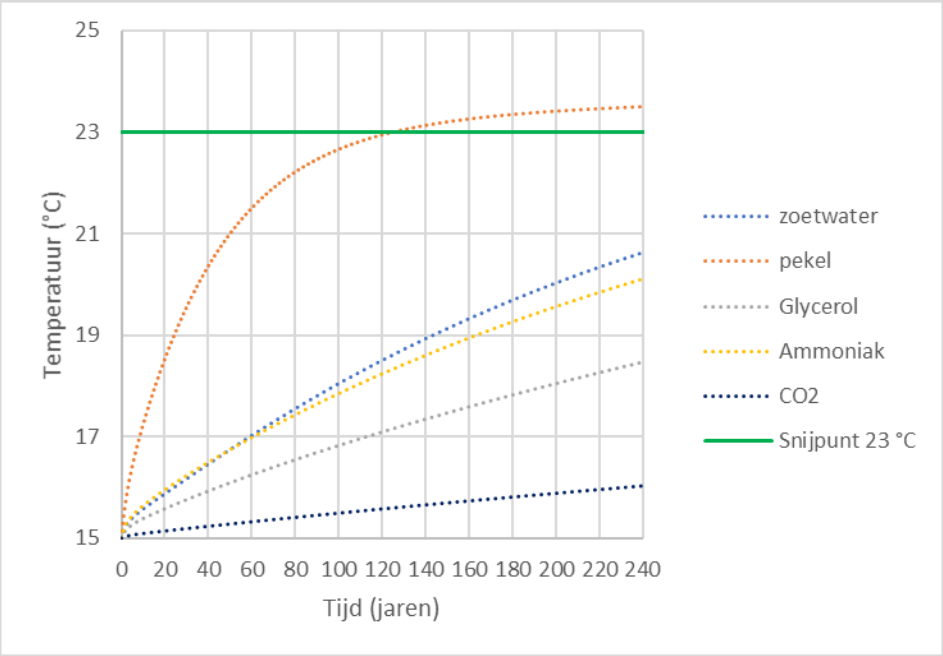
Bij conductie is de warmtestroom afhankelijk van het temperatuurverschil over de afstand (de temperatuurgradiënt) en de interne weerstand tegen warmtestroom van het betreffende materiaal, die de thermische geleidbaarheid of warmtegeleidingscoëfficiënt genoemd wordt. Dit principe wordt uitgedrukt in de wet van Fourier[23] en deze wet is de basis van het model. Een verdere toelichting hierover staat in de bijlage.

2.2.6 Resultaten en conclusie

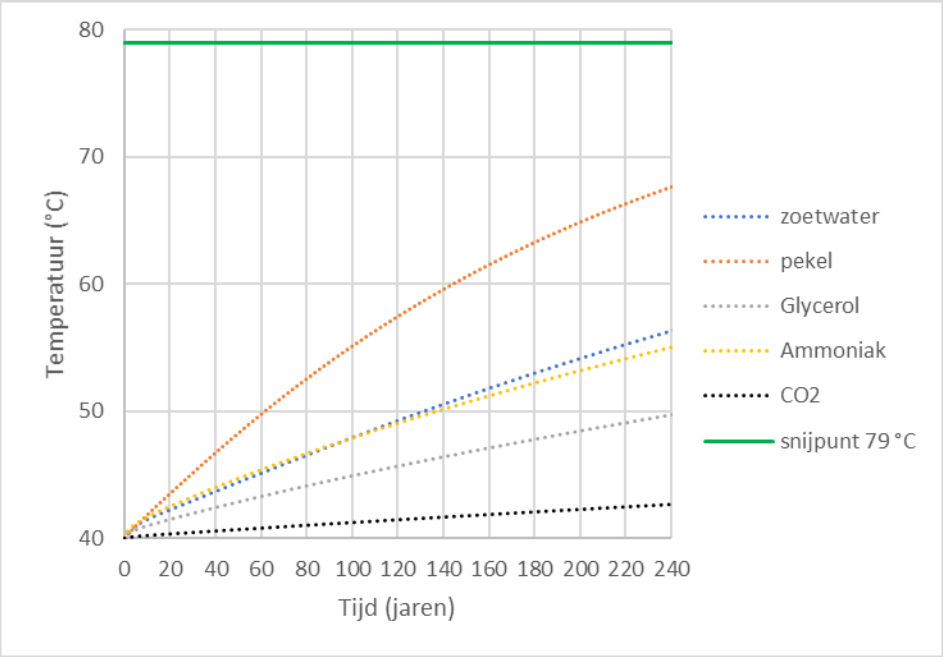
De onderstaande figuren geven voor de diepe en de ondiepe situatie weer wat de opwarmingstijden zijn als de pekel op de injectietemperatuur in de caverne wordt gebracht. In de ondiepe situatie duurt het 125 jaar om de pekel van 15°C pekel op te warmen tot 23°C. Voor de diepe zoutcaverne is berekend dat de opwarming van 40°C naar 79°C meer dan 700 jaar in beslag neemt. Voor de andere werkmiddelen geldt dat de berekende

[21] De opwarming is een asymptoot, opwarming tot 100% van de omgevingstemperatuur is daarom niet mogelijk
[22] https://nl.wikipedia.org/wiki/Warmteoverdracht
[23] https://nl.wikipedia.org/wiki/Warmteoverdracht

opwarmingstijden nog langer zijn. Dit komt met name omdat de geleidbaarheid van deze stoffen lager is dan voor pekel (Tabel 5). Hierbij valt bijvoorbeeld de lange opwarmingstijd van vloeibare CO_2 op. Dit heeft een zeer hoog vermogen om warmte op te slaan (hoge waarde voor de warmtecapaciteit), maar door de lage thermische geleidbaarheid duurt het heel lang om de warmte door de vloeistof op te laten nemen.



Figuur 5 Het opwarmen van een bepaalde vloeistof gevulde zoutcaverne vanaf 15°C (ondiep).



Figuur 6 Het opwarmen van een bepaalde vloeistof gevulde zoutcaverne vanaf 40°C (diep).

	Vloeistof (werkmiddel)	Verblijftijd tot vloeistof is opgewarmd [jaar]
Ondiepe situatie (tot 23°C)	Zoet water	530
	Pekel	125
	Glycerol	1.159
	Ammoniak	651
	CO_2	5.394
Diepe situatie (tot 79°C)	Zoet water	1.636
	Pekel	731
	Glycerol	3.638
	Ammoniak	2.040
	CO_2	16.960

Tabel 6 Tijd voor het opwarmen van de werkmiddelen.

De benodigde tijden voor opwarming zijn een orde groter dan de maximale verblijftijd om nog een interessant vermogen te kunnen leveren. Het is de verwachting dat als het effect van stroming in het reservoir (convectie) zou worden meegenomen dat dan de opwarming sneller zal gaan. Het is echter zeer de vraag of dit het opwarmingsproces dusdanig kan versnellen om nog wel binnen de maximale verblijftijd te vallen. Bovendien zal in een continu proces waarschijnlijk worden gestreefd naar zo min mogelijk convectie om afkoeling aan de productieput te voorkomen.

De conclusie op basis van het bovenstaande is daarom dat continue warmteonttrekking in een open systeem uit een caverne niet mogelijk is als een minimaal vermogen van 750 kW vereist is, omdat de opwarming van de geïnjecteerde afgekoelde vloeistof te lang duurt om een stabiele temperatuur te behouden van het geproduceerde water. Vervolgonderzoek moet uitwijzen of in een cilindervormige caverne, waar de afstand tot de wand korter is dan in een bol met een gelijk volume, de opwarmingstijd dusdanig kan worden versneld dat deze wordt teruggebracht tot enkele maanden.

2.3 Potentie van warmteonttrekking met een gesloten systeem

Naast de evaluatie van het open systeem wordt er gekeken naar de mogelijkheden van een gesloten systeem. Bij een gesloten systeem worden de putmonden van de injectie- en de productieput met elkaar verbonden door een lange pijp of buis. Door hiervoor een buigzame variant te nemen kan in theorie een groot volume aan buizen in de caverne worden gebracht. Het grote voordeel van een gesloten systeem is dat er meer mogelijkheden zijn voor de keuze van het werkmiddel. Gezien de bovenstaande resultaten is zoet water het meeste effectieve werkmiddel voor dit systeem. Het grote nadeel is dat het volume van het werkmiddel dat in de caverne wordt rondgepompt veel kleiner is dan in een open systeem. Om voldoende volume te krijgen dient er een lange buis in de caverne te worden gebracht, deze dient flexibel/buigzaam te zijn om de buis te kunnen plaatsen.

2.3.1 Aannames voor de bepaling van de potentie

Om het volume van de buis te berekenen wordt uitgegaan van een leiding met een binnendiameter van 3.5 inch. Dit is momenteel de grootste diameter die beschikbaar is voor "coiled tubing"[24]. Het volume van 1 meter leiding is dan 0,0062 m^3. Voor de dikte van de leiding is uitgegaan van 0,1 inch (2,5 mm).
In eerste instantie is het effect van de buis op de warmteoverdracht geëvalueerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende formule[24]:

$$Q = k * A * \frac{\Delta T}{s}$$

Na de energieoverdracht wordt de nieuwe temperatuur van de pekel berekend voor de volgende tijdstap met de volgende formule[25]:

$$T_2 = \frac{Q}{m * C_p} + T_1$$

Uit Tabel 7 blijkt dat er zeer lange leidingen nodig zijn om significante hoeveelheden warmte te kunnen onttrekken per cyclus. Bij een aangenomen lengte van 1 km buis is het totaal potentieel aan warmte per cyclus in de ondiepe situatie 0,3 GJ en in de diepe situatie 1,0 GJ. Aangezien het volume van het gesloten systeem veel kleiner is dan van de caverne is de circulatietijd veel korter dan voor het open systeem om het gestelde minimale vermogen van 750 kW te behalen. Het gesloten systeem is daarom alleen interessant als de korte verblijftijden voldoende lang zijn om het werkmiddel (in dit geval zoet water) weer op te warmen.

2.3.2 Benodigde tijd voor opwarming

Om het gestelde minimale vermogen van 750 kW te behalen zijn bij een gelijke ΔT de benodigde debieten gelijk aan die van het open systeem: respectievelijk 20 m^3/uur voor de diepe en 67 m^3/uur voor de ondiepe situatie. Gegeven de relatief kleine volumes in de buis betekent dit dat de circulatietijd veel korter is dan voor het open systeem. Het gesloten systeem is daarom alleen interessant als de korte verblijftijden voldoende lang zijn om het werkmiddel (in dit geval zoet water) weer op te warmen. De wand van de buis is in eerste instantie bepalend voor de warmteoverdracht.

Voor de diepe en ondiepe situatie is bij een gelijkblijvend debiet (van 67 m^3/uur voor de ondiepe en 20 m^3/uur voor de diepe situatie) berekend wat de verblijftijd is van de vloeistof in de caverne. Dit is afhankelijk van de buislengte: des te langer de buis, des te langer de verblijftijd. Vervolgens is bekeken welke thermische

---

[24] https://petrowiki.org/Coiled_tubing en https://www.nov.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=28541

[24] https://www.engineeringtoolbox.com/conductive-heat-transfer-d_428.html. Q is warmteoverdracht (W), k is thermische geleidbaarheid (W/m* °C), s is materiaaldikte (m) en ΔT is temperatuurgradiënt (°C)

[25] https://www.engineeringtoolbox.com/heat-capacity-d_338.html. Q is overgedragen warmte (W), m is massa (kg), C_p is warmtecapaciteit (J/kg* °C), T_1 is de huidige temperatuur (°C) en T_2 is temperatuur voor de volgende tijdstap (°C)

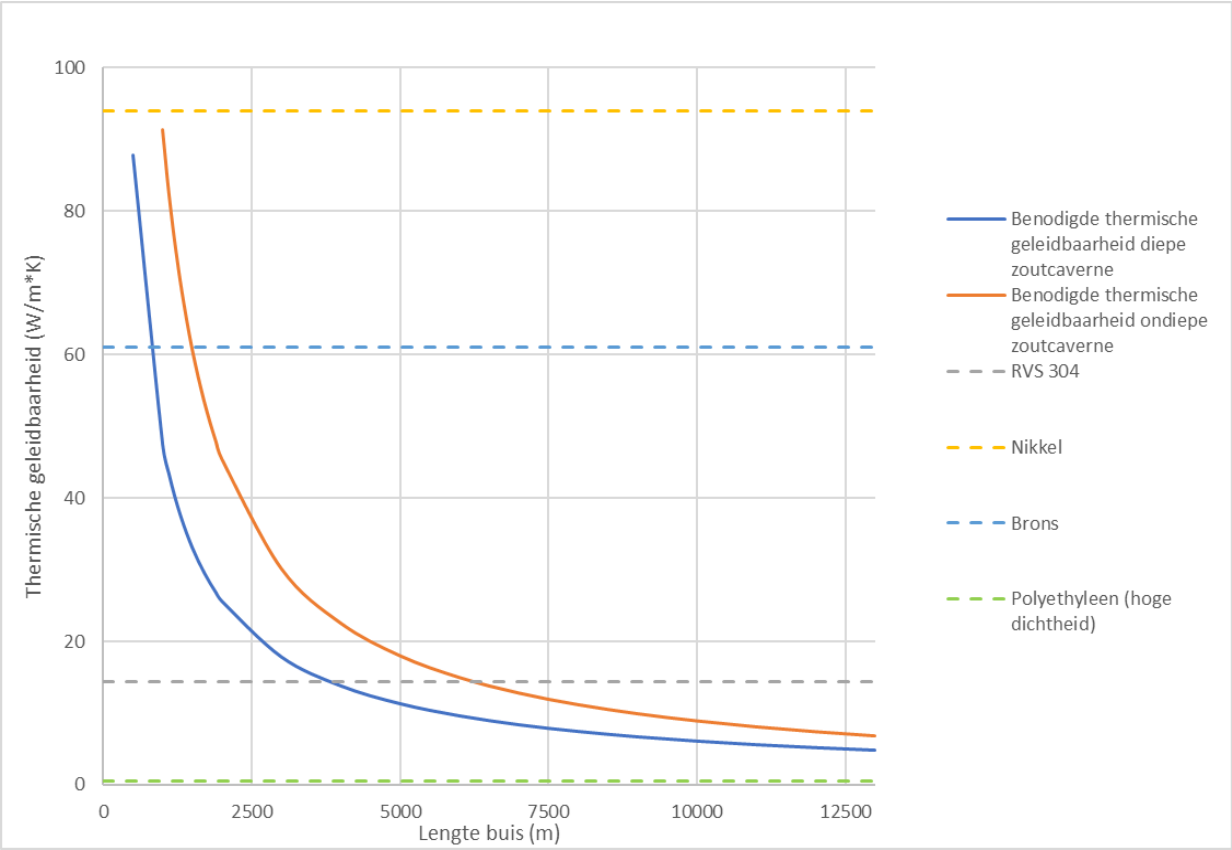
geleidbaarheid er nodig is voor een buiswand van 0.1 inch om binnen deze tijd tot de gewenste temperatuur te komen (23°C voor de ondiepe en 79°C voor de diepe situatie). Hierbij geldt ook dat des te langer de buis, des te langer de verblijftijd en daarom des te lager de thermische geleidbaarheid mag zijn. De resultaten van deze evaluatie zijn geplot in Figuur 7. In deze grafiek zijn ook de thermische eigenschappen van een aantal materialen weergeven.

	Lengte buis	Volume [m³]	Vloeistof (werkmiddel)	Warmte-capaciteit [kJ/kg*°C]	ΔT [°C]	Maximaal potentieel te onttrekken warmte [GJ]	Maximaal toe te voegen door warmtepomp [GJ]	Totaal potentieel warmte [GJ]
Ondiepe situatie	100	0,62	Zoet water	4,2	8	0,0	0,0	0,0
	1.000	6,20	Zoet water	4,2	8	0,2	0,0	0,3
	2.000	13,40	Zoet water	4,2	8	0,4	0,1	0,5
	10.000	60,20	Zoet water	4,2	8	2,1	0,4	2,5
Diepe situatie	100	0,62	Zoet water	4,2	39	0,1	n.v.t.	0,1
	1.000	6,20	Zoet water	4,2	39	1,0	n.v.t.	1,0
	2.000	13,40	Zoet water	4,2	39	2,1	n.v.t.	2,0
	10.000	60,20	Zoet water	4,2	39	10,1	n.v.t.	10,1

Tabel 7 Aannames voor de geëvalueerde situaties voor een gesloten systeem. Het totaal van de potentiele warmte is de warmte die onttrokken kan worden door één cyclus, d.w.z. dat het totale volume van het leidingsysteem een keer wordt rondgepompt.

	Vloeistof (werkmiddel)	Debiet [m³/uur] (gelijk aan open systeem)	Lengte buis [m]	Maximum aantal productie-uren/jaar voor een 750 kW vermogen	Aantal minuten
Ondiepe situatie	Zoet water	75	100	0,01	0,6
			1.000	0,08	4,8
			2.000	0,18	10,8
			10.000	0,82	49,2
Diepe situatie	Zoet water	18	100	0,03	1,8
			1.000	0,34	20,4
			2.000	0,74	44,4
			10.000	3,40	204,0

Tabel 8 Eigenschappen van de verschillende scenario's van een gesloten systeem.



Figuur 7 De benodigde thermische geleidbaarheid voor ondiepe en diepe caverne over de lengte van de buis in caverne voor een gesloten systeem.

2.3.3 Resultaten en conclusie

Uit deze theoretische benadering blijkt dat de geleidbaarheid van polyethyleen (maar ook andere plastics) te laag is om binnen de gestelde verblijftijden (als functie van de buislengte) de warmte over te dragen aan de vloeistof in de buis. Indien RVS wordt gebruikt voor de buizen zou deze warmteoverdracht binnen de gestelde verblijftijden wel plaats kunnen vinden, de buislengte dient hiervoor echter meer dan 3.000m te zijn wat onrealistisch lang is vanuit technisch oogpunt en kostenperspectief. Hierbij moet worden opgemerkt dat de tijd voor de warmteoverdracht van de buis naar de vloeistof niet is meegenomen waardoor de buis mogelijk nog langer zou moeten zijn.

De conclusie is derhalve dat een gesloten systeem niet haalbaar wordt geacht voor winning van aardwarmte uit de caverne als een minimaal vermogen van 750 kW vereist is, omdat er onvoldoende verblijftijd kan worden gerealiseerd met het systeem om de werkvloeistof na her-injectie opnieuw op te warmen. De buis van het systeem werkt negatief omdat deze een extra barrière vormt voor de warmteoverdracht.

3 Theoretische potentie van cavernes voor seizoensopslag warmte

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is de conclusie getrokken dat winning van warmte uit een caverne niet haalbaar is, omdat de overdracht van warmte van de cavernewand naar de vloeistof te lang duurt. Dit zal daarom echter ook omgekeerd het geval zijn: het zal lang duren voordat warmte vanuit de caverne is overgedragen aan de cavernewand. Met andere woorden: de caverne kan warmte over langere tijd goed vasthouden. Hierdoor is een caverne mogelijk zeer geschikt voor het opslaan van warmte. In dit hoofdstuk wordt geëvalueerd wat de theoretische potentie van cavernes is als seizoensopslag voor warmte. De warmte komt in dit geval van externe bronnen. De randvoorwaarde van het systeem, met name voor het systeem ondieper dan 500m, is dat er over het jaar heen evenveel warmte in de ondergrond wordt gebracht als dat er aan de ondergrond wordt onttrokken.

3.2 Potentie van warmteopslag

Voor de ondiepe situatie wordt uitgegaan van een toepassing voor een lage temperatuur warmtenet (40/20). Om niet afhankelijk te zijn van de inzet van een warmtepomp dient de pekel in de caverne van de oorspronkelijke temperatuur van 24°C op circa 45°C gebracht te worden. Bij een aangenomen volume van 200.000 m^3, een warmtecapaciteit van 3,2 kJ/kg*K en een dichtheid van 1.186 kg/m^3 moet er in eerste instantie 16.000 GJ aan warmte toegevoegd worden. Bij opvolgende productie van warmte in de winter wordt uitgegaan van afkoeling tot 20°C, d.w.z. onttrekking van 19.000 GJ. Dit staat gelijk aan het jaarverbruik van circa 450 huishoudens. In de zomer moet deze hoeveelheid energie weer worden aangevuld.
Uitgaande van 4 maanden (2920 uur) zomer voor opslag en 4 maanden winter voor onttrekking is het benodigde debiet voor het rondpompen van 200.000 m^3 pekel in vier maanden circa 69 m^3/uur. Dit debiet wordt haalbaar geacht. Het vermogen van de bron bij dit debiet is circa 1,8 MW, ruim boven het minimaal gestelde vermogen van 750 kW.

Voor de diepe situatie is de oorspronkelijke temperatuur hoger dan gevraagd wordt voor het aangenomen warmtenet (70/40). Bij de eerste onttrekking van warmte wordt afgekoeld van 80°C naar 40°C. Bij een aangenomen volume van 500.000 m^3, een warmtecapaciteit van 3,2 kJ/kg*K en een dichtheid van 1.186 kg/m^3 kan er in de eerste cyclus 76.000 GJ aan warmte onttrokken worden. Voor de opslag van warmte hoeft slechts naar 75°C terug verwarmd te worden, dus een toevoeging van 66.000 GJ aan warmte. Bij opvolgende productie van warmte in de winter kan deze hoeveelheid, gelijk aan het jaarverbruik van circa 1.550 huishoudens, weer worden onttrokken. In de zomer moet deze hoeveelheid energie telkens worden aangevuld.

Uitgaande van 4 maanden (2.920 uur) zomer voor opslag en 4 maanden winter voor onttrekking is het benodigde debiet voor het rondpompen van 500.000 m^3 pekel in vier maanden circa 170 m^3/uur. Dit debiet

is hoog, maar wordt haalbaar geacht gezien de ervaringen met geothermie. Het vermogen van de bron bij dit debiet is circa 6,3 MW, ruim boven het minimaal gestelde vermogen van 750 kW.

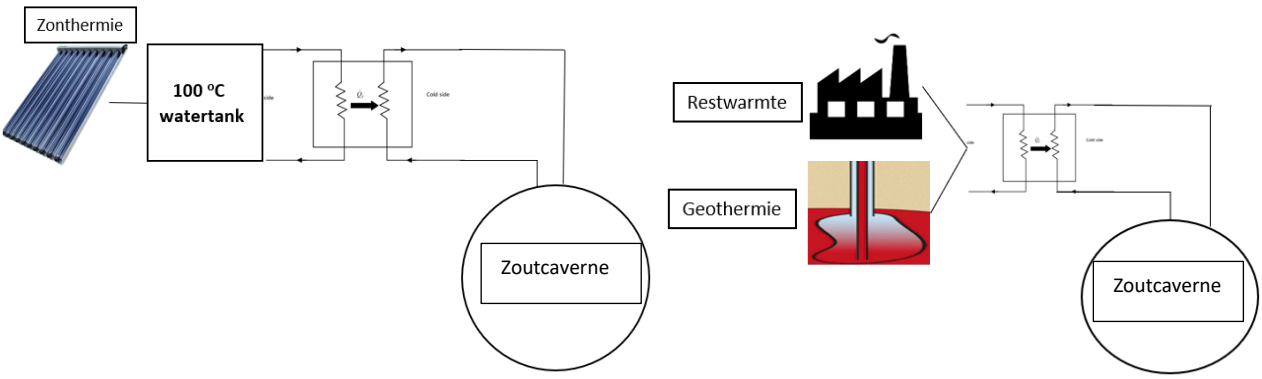
Op basis van het bovenstaande is er voldoende potentie voor warmteopslag in de caverne voor zowel de ondiepe als de diepe situatie, mits er in de zomermaanden voldoende warmte geleverd kan worden door een externe bron.

3.3 Mogelijke bronnen van warmte voor opslag

Aangezien de vraag naar warmte in de winterperiode het grootste is, dient de warmte tijdens de zomer te worden opgeslagen om in de winter te kunnen worden gebruikt. Dit past in het algemeen goed bij de meeste bronnen van warmte die een overschot aan warmte in de zomer produceren. Mogelijke bronnen van warmte zijn:

- *Restwarmte van industriële processen*. Er zijn al diverse warmtenetten in Nederland aangesloten op de restwarmte van bijvoorbeeld energiecentrales of afvalverwerkers. Relevante voorbeelden hiervan in de buurt van de zoutwinning zijn in Hengelo en Enschede te vinden waar warmte wordt geleverd door de afvalverwerker (Twence) en door Akzo-Nobel. Een nadeel van het gebruik van restwarmte kan, met name op de lange termijn, de afhankelijkheid zijn van de industriële processen. Een voordeel is de continue aanvoer van warmte door het jaar heen.
- *Electriciteitsoverschotten*. Er zijn scenario's denkbaar dat er op de langere termijn in de zomer een overschot komt aan elektriciteit door de groei van zon- en windenergie. Tijdens deze periodes kan elektriciteit worden omgezet in warmte en opgeslagen worden in de caverne. Energetisch gezien is dit echter zeer ongunstig en zijn er waarschijnlijk efficiëntere manieren om elektriciteit op te slaan, bijvoorbeeld via waterstofproductie.
- *Geothermie*. Geothermie wordt gekenmerkt door een zeer stabiele productie van warmte die tijdens overproductie moeilijk kan worden teruggeschroefd om het ondergrondse reservoir niet te beschadigen. Doordat de warmtevraag meestal een "badkuip" profiel heeft kan er een flink overschot aan warmte zijn in de zomerperiode. Een koppeling met een warmteopslag kan daarom zeer interessant zijn om deze warmte niet verloren te laten gaan. Gezien het beperkte geothermische potentieel in Twente zal deze koppeling met name in Noord-Nederland mogelijkheden bieden. Gezien de bovenstaande berekening wordt er voor de caverne in de diepe situatie voor de 4 maanden zomertijd een vermogen gevraagd van 6,3 MW om voldoende warmte te realiseren. Bij een aangenomen vermogen van 10 MW voor de geothermiebron is het, hoewel afhankelijk van de warmtevraag in de zomer, geen onwaarschijnlijk scenario dat dit in de zomer geleverd kan worden door de geothermiebron. Dit kan met name het geval zijn als de grootste vraag uit de gebouwde omgeving komt, gezien het "badkuip"-model. De continue aanvoer van warmte door het jaar heen is een groot voordeel van dit systeem.
- *Zonthermie*. Zonthermie wordt al decennialang toegepast voor verwarmingsdoeleinden maar wordt vaak beperkt tot invulling van de basis warmtevraag, dus de warmtevraag in de zomer, vanwege de afhankelijkheid van de zonne-instraling. Een van de beperkingen voor opschaling van collectieve systemen zit in de beperking voor seizoensopslag van de warmte die gegenereerd is in de zomer. Deze beperking zit zowel op de maximale temperatuur die kan worden opgeslagen als op het volume. Er zijn

ontwikkelingen voor ondergrondse opslagtanks die oplossingen hiervoor bieden, maar ook cavernes zouden hiervoor zeer geschikt kunnen zijn. Gezien de dag-nacht variatie in het aanbod vanuit de zonthermie zal er een relatief kleine opslag(tank) nodig zijn om het systeem continu te kunnen laten draaien. Het volume van de tank kan mogelijk verkleind worden door opslag op hogere temperatuur (mogelijk tot circa 100°C), omdat deze door de zonthermie geleverd kan worden.



Figuur 8 Schematische overzicht van zoutcaverne (met pekel) als seizoensopslag van warmte met externe bronnen. Restwarmte en geothermie kunnen continu warmte leveren en gekoppeld worden aan het cavernesysteem. Wegens de dag-nacht cyclus van zonthermie is er een opslagtank nodig waaruit wel continu warmte kan worden geleverd. Dit water van de watertank staat dan in contact met een warmtewisselaar waar aan de andere zijde pekel stroomt dat wordt opgepompt vanuit de zoutcaverne. In de warmtewisselaar vindt dan warmteoverdracht plaats van water naar pekel zonder fysiek contact.

4 Systeemkeuze

4.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is uitgegaan van een caverne waarvan de totale pekel inhoud volledig gecirculeerd wordt. Warmte aan het systeem wordt geleverd door een externe bron. In de praktijk lijkt het waarschijnlijk dat er gestreefd gaat worden naar het in stand houden van een thermocline, d.w.z. een vrij scherpe temperatuur overgang in vloeistof in de caverne. Het concept van een thermocline in een caverne is niet nieuw, reeds in 1980 is hier onderzoek naar gedaan in de Verenigde Staten waar is gekeken naar de haalbaarheid van warmteopslag in een zoutcaverne. Het ging hierbij vooral om het opvangen van dag-nacht ritmes in het electriciteitsgrid. Deze zoutcaverne bevat kiezels en olie, waarbij de olie fungeert als een warmteoverdrachts- en opslagmiddel. De kiezels fungeren als warmte-opslagmateriaal, reduceren van werkmiddel en zorgen ervoor dat de zoutcaverne intact blijft[25]. Thermische laagvorming hangt af van de lengte/diameter ratio van de opslag, muurdikte tot lengte ratio, thermische eigenschappen van de materialen van de inhoud van de tank en de tank zelf, type en dikte van de isolatie en het design van warm en koud water uitstroom. Een thermocline kan degraderen door warmteoverdracht met de omgeving, thermische verspreiding in opslagtank, conductie via muur en mengen van vloeistof in de tank gedurende laden en ontladen van vloeistof[26].

Als de thermocline in stand kan worden gehouden dan vindt er weinig menging plaats tussen het warme en koude water wat de efficiëntie van het systeem ten goede komt. Om deze thermocline stabiel te houden dient de stroming en daarmee convectie van warmte, zoveel mogelijk beperkt te worden. Het afgekoelde water wordt daarom zo diep mogelijk in de caverne geïnjecteerd en het warme water wordt zo hoog mogelijk in de caverne onttrokken. De thermocline zal afhankelijk van de opslag of onttrekkingsperiode omhoog en omlaag gaan, waarbij deze niet onder de injectieput of boven de productieput mag komen. Er is hierdoor mogelijk een iets kleiner volume beschikbaar.

4.2 Warmteopslag in een enkele diepe caverne met zonthermie

4.2.1 Systeembeschrijving

Voor deze casus gaan we uit van een bolvormige caverne van 500.000 m^3 waarin de aanwezige pekel wordt gebruikt als werkmiddel. De top van de caverne bevindt zich op 2.200m en de basis op 2.298m diepte. Er wordt gebruik gemaakt van een tweetal putten, een injectie- en een productieput. Mogelijk kunnen de injectie en productie ook gecombineerd worden in één put, waarbij de stromen gescheiden worden door

[25] https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800014315.pdf

[26] https://www.researchgate.net/publication/245212975_Parametric_studies_on_thermally_stratified_chilled_water_storage_systems

interne verbuizingen in de put. Hiervan wordt ook gebruik gemaakt bij de zoutwinning[27]. Indien de buizen onvoldoende zijn geïsoleerd kan dit echter een nadelig effect hebben op het systeem door warmteoverdracht in de put tussen de stromen en daarmee warmteverlies in de productiestroom. De productieput wordt geplaatst op 10m van het dak van de caverne. De injectieput wordt geplaatst op 10m boven de basis van de caverne. Er wordt aangenomen dat de thermocline hier 5 meter onder de productie- en 5m boven de injectieput blijft, dus gaat variëren van 2.215 tot 2.283m diepte. Het actieve volume van de pekel (het "werkvolume") in dit dieptebereik is dan circa 440.000 m^3, oftewel 88% van het totale caverne volume[28]. Bij een aangenomen ΔT van 30°C (van 71 naar 41°C) is de energie-inhoud van het werkvolume dat achtereenvolgens geproduceerd en opgeslagen wordt circa 50.000 GJ (gelijk aan het jaarverbruik van 1.200 huishoudens).

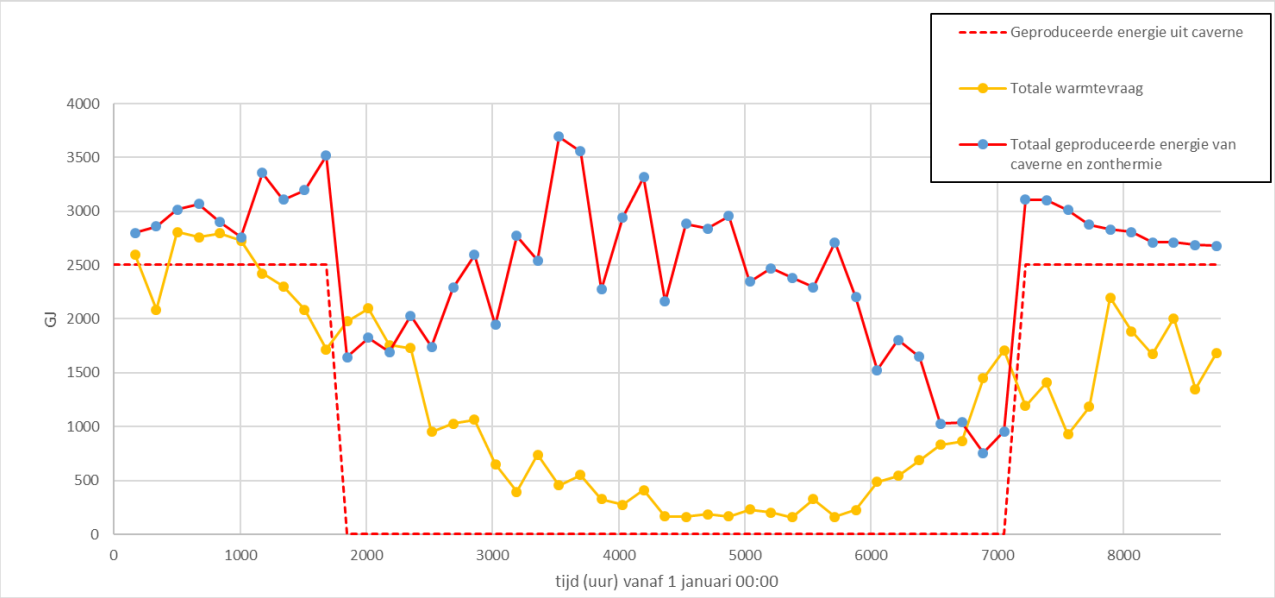
Het systeem is dusdanig gekozen dat in de gemiddelde warmtevraag (op weekbasis) wordt voorzien. Voor een huishouden ligt de hoogste weekvraag op circa 520 kWh (1.9 GJ) bij een gemiddeld vermogen (op weekbasis) van iets boven de 3kW. De piekvraag (op seconde/minuut basis) ligt echter hoger (tot meer dan 2.500 kWh bij 15 kW vermogen per huishouden). Hier wordt bij deze systeemkeuze echter geen rekening gehouden. Voor de levering van de piekvraag dient gebruik gemaakt te worden van een alternatief systeem (zoals bijvoorbeeld een houtgestookte ketel). Dit alternatief is niet meegenomen in deze evaluatie.

Er is gekeken naar de warmtevraag door het jaar heen van 1.500 gemiddelde woningen[29]. Netverlies is niet meegenomen. Aan de hand van deze warmtevraag is op weekbasis de productietijd van de caverne bepaald, deze loopt in de winter van week 43 tot week 10. Op basis van continue productie en van het aantal vollasturen in deze periode (3.360 uur) kan worden bepaald dat de caverne een continu vermogen levert van 4.1 MW bij een debiet van 131 m^3/uur. De productie uit de caverne in deze periode kan voorzien in 62% (39.000 GJ) van de totale jaarlijkse warmtevraag van de 1.500 woningen (63.000 GJ). Het overige deel van de jaarlijkse warmtevraag voor de huizen wordt ingevuld door zonthermie (22.000 GJ) en door het back-up systeem (2.000 GJ). Deze laatste is vooral nodig als er wordt geschakeld tussen het zomer en winter systeem (Figuur 9). De back-up optie valt buiten het hier gepresenteerde systeem. Aan het eind van de productieperiode wordt de stroom omgedraaid en wordt er vanaf week 10 tot en met week 42 warmte in de caverne opgeslagen (5.376 uur[30]). In deze zomer periode is er nog steeds een warmtevraag voor de aangesloten woningen, gelijk aan 23.000 GJ. Deze wordt ingevuld door de zonthermie (21.000 GJ) en de eerder genoemde back-up van 2.000 GJ. De totale warmtevraag in de zomerperiode is daarom het totaal van de aan te vullen warmte voor de caverne (50.000 GJ) en de warmtevraag van de woningen, dus in totaal 73.000 GJ.

---

[27] zie bijvoorbeeld de winning bij Frisia:
https://www.esco-salt.com/fileadmin/files/downloads/company/locations/frisia_zout/MER_zoutwinning.pdf
[28] Berekend met http://ambrsoft.com/TrigoCalc/Sphere/Cap/SphereCap.htm
[29] Met een verbruik van 42 GJ op jaarbasis. Mogelijk dat dit verbruik na isolerende maatregelen daalt. Het verbruik door het jaar heen is gebaseerd op informatie van https://energytransitionmodel.com/
[30] Er wordt hier uitgegaan van 52 weken, oftewel 8736 uur, in een jaar

Voor het beschreven systeem is uitgegaan van zonthermie om deze hoeveelheid warmte in de zomer te leveren. Op basis van de zoninstraling in Noord-Nederland is op weekbasis berekend wat de verwachte opbrengst per m^2 paneel is [31]. Om in de zomerperiode (week 10 tot en met week 42) de gevraagde warmte te kunnen produceren dient er circa 37.000 m^2 aan panelen te worden geïnstalleerd, oftewel het dakoppervlak van circa 1.860 woningen. Dit zijn dus 360 woningen meer dan aangesloten op het warmtenetsysteem. Ook in de wintermaanden wordt er warmte via zonthermie opgewekt. Tezamen met de warmte uit de caverne is deze voldoende om aan de gemiddelde vraag te voldoen (Figuur 9). Over het jaar heen kan met de panelen 80.000 GJ worden opgewekt, waarvan 50.000 naar de caverneopslag gaat voor gebruik gedurende de winter, 21.000 wordt gebruikt voor verwarming in de zomer, 1.000 GJ wordt gebruikt voor verwarming in de winter en 8.000 GJ overschot is in de winterperiode. Tijdens de lente en de herfst is er een overschot van warmte door de gezamenlijke productie van warmte uit de caverne en uit de zonthermie. Dit overschot van in totaal 19.000 GJ (waarvan 8.000 GJ uit de zonthermie en 11.000 GJ uit de warmte van de caverne) is nu beschouwd als warmteverlies[32]. Optimalisatie in een later stadium dient deze overschotten zo klein mogelijk te houden.



Figuur 9 Warmtevraag vanuit 1.500 woningen en warmteaanbod vanuit de caverne en vanuit de zonthermie. Half maart (op 1.680 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte stopgezet en begint de opslag. Begin november (op 7.056 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte uit de caverne hervat. Als de totaal geproduceerde energie hoger is dan de vraag, is er sprake van overschot/verlies van warmte. In de zomerperiode wordt het overschot aan geproduceerde warmte door de zonthermie opgeslagen in de caverne. Een tekort aan warmte komt in dit profiel alleen voor aan het begin en eind van de zomerperiode. Er wordt ervan uitgegaan dat een back-up systeem in deze warmte voorziet.

[31] De geselecteerde type zonnecollector is "Prisma Pro 24 CPC zonnecollector met 24 vacuüm heat pipes". In dit geval wordt er van uitgegaan dat de woningen een schuin dak met 35-36° hellingshoek hebben om de geselecteerde zonnecollectoren te plaatsen. Er is uitgegaan van een maximaal bruto oppervlakte voor zonnecollectoren zijn van 20 m^2 per woning.

[32] De maximale waarde van 19.000 GJ is circa 475 keuro bij een afnameprijs van 25 euro/GJ indien hiervoor afnemers kunnen worden gevonden.

Figuur 10 en Figuur 11 geven schematisch de onderdelen weer die benodigd zijn voor het systeem. Hiervan zijn de belangrijkste als volgt.

Zonnecollectoren. Zoals hierboven beschreven is uitgegaan van 37.000 m^2 aan collectoren. De gekozen collectoren hebben een vermogen van 2.943 Wp bij een aperture oppervlak van 4,14 m^2 [33]. Het geïnstalleerde vermogen van de collectoren komt daarmee op circa 25 MW.

Nachtopslag van warmte. Om een continu proces van de opslag te kunnen realiseren dient er een opslagtank te worden geïnstalleerd om de dagproductie van de zonthermie op te kunnen slaan om zo ook 's nachts door te kunnen met de opslag van warmte in de caverne. Voor de temperatuur van de opslag is 100°C aangehouden; deze kan worden geleverd door de collectoren. Het vat heeft een groot volume nodig voor de opslag van zoet water dat is berekend op 2.900 m^3 [34]. Om deze temperatuur gedurende een aantal uur te kunnen vasthouden dient het vat voldoende geïsoleerd te zijn. Geïsoleerde vaten met het benodigde volume zijn op de markt verkrijgbaar.

Warmtewisselaars. Er is een warmtewisselaar nodig die tijdens productie uit de caverne de warmte overdraagt van de pekel naar het warmtenet. De warmtewisselaar oppervlakte[35] is 1.025 m^2 waarbij de in- en uitlaat warmtestroom respectievelijk 71°C en 41°C zijn. De in- en uitlaat koude stroom aan de warmtenet kant zijn respectievelijk 40°C en 70°C. Om het vermogen aan de (zoet water) warmtenetkant gelijk te houden is de bijpassende stroomsnelheid bepaald op 117 m^3/uur[36].
Daarnaast is er een warmtewisselaar nodig voor de overdracht van warmte van het opslagvat (100°C) naar de pekel die de caverne wordt ingepompt. Hierbij wordt het water uit het opslagvat afgekoeld naar 70°C alvorens het aan het warmtenet wordt toegevoegd. Met een in- en uitlaat koude stroom van 40°C en 70°C respectievelijk, zal de warmtewisselaar oppervlakte 34 m^2 zijn.
In de zomer zal er warmteoverdracht van zoet water (100°C) van de opslag met het geproduceerde pekel (41°C) plaatsvinden. Uit de warmtewisselaar komen twee stromen: opgewarmde pekel (71°C) dat wordt opgeslagen in de caverne en afgekoeld zoet water (70°C) dat rechtstreeks wordt teruggepompt naar de zonnecollectoren. De warmtewisselaar voor deze energieoverdracht heeft een oppervlakte van 36 m^2.

Pompen. De pekel uit de caverne dient te worden rondgepompt op het gewenste debiet door middel van bovengrondse pompen. naar alle waarschijnlijkheid zal er geen pomp in de productieput (ESP) benodigd zijn.

---

[33] https://2-improve.com/winkel/heatpipes-2/prisma-pro-24-cpc-zonnecollector-met-2943-wp-vermogen/
[34] Pekelstroomsnelheid is 132 m^3/uur, C_p 3,2 kJ/kg*K, dichtheid 1.181 kg/m^3, ΔT 30 °C en 24 uur. Deze energie wat kan worden opgeslagen is vervolgens omgerekend met energiedichtheid van zoet water (C_p = 4,2 kJ/kg*°C, 998 kg/m^3 en ΔT van 30 °C).
[35]https://www.econo.nl/Bereken/4213?Param1=75&Param2=45&Param3=40&Param4=70&Param5=3100&Param6=NaN&Param7=NaN&Param8=1123,2&Param9=1497,6 (ingevulde vermogen is 4.100 kW)
[36] Aannames voor deze stroomsnelheid zijn ΔT van 30 °C, dichtheid van 998 kg/m^3 en een C_p van 4,2 kJ/kg*°C

Filters. De opgepompte pekel dient te worden gefilterd voordat de pekel de warmtewisselaars in gaat.

Warmteleidingen. De caverne dient zo dicht mogelijk tegen de gebouwde omgeving te worden ontwikkeld om de transportafstand te minimaliseren. Er is uitgegaan van een hoofdleiding met een interne diameter van 300 mm met een lengte van 1,5 km. De aansluiting van de individuele huizen op deze leiding is niet verder gespecificeerd, hiervoor wordt een vast bedrag per woning meegenomen in de kosten.

Injectie- en productieput. Voor de productieput is van een boordiepte van 2.210m en voor de injectieput van een diepte van 2888m aangehouden. Aangezien de caverne al gevormd is met behulp van bestaande putten wordt ervan uitgegaan dat er twee bestaande putten gebruikt kunnen worden die wel moeten worden aangepast.

4.2.2 Economische haalbaarheid

Aannames

Er is voor het systeem een indicatie gemaakt van de investeringskosten. Hierbij moet benadrukt worden dat deze kosten zeer indicatief zijn en in een eventuele vervolgstudie moet deze inschatting verder worden onderzocht en onderbouwd. Op basis van de inschatting is een businesscase opgezet conform de richtlijnen voor Fase I (verkenning) van het Toetsingskader van RVO[37]. Dit betekent dat er wel operationele, maar geen financieringskosten of afschrijvingen worden meegenomen. Tijdens deze verkenningsfase worden de prijzen ook niet geïndexeerd. Er is vanuit gegaan dat het systeem wordt aangelegd tot aan de woningen en dat er één partij is die investeert en exploiteert. De kosten van de benodigde aanpassingen van de woning (zoals afleverset, etc.) zijn niet meegenomen, onder de aanname dat deze kosten door de huiseigenaren (corporaties of particulieren) worden gedragen.

Inschatting van kosten en opbrengsten

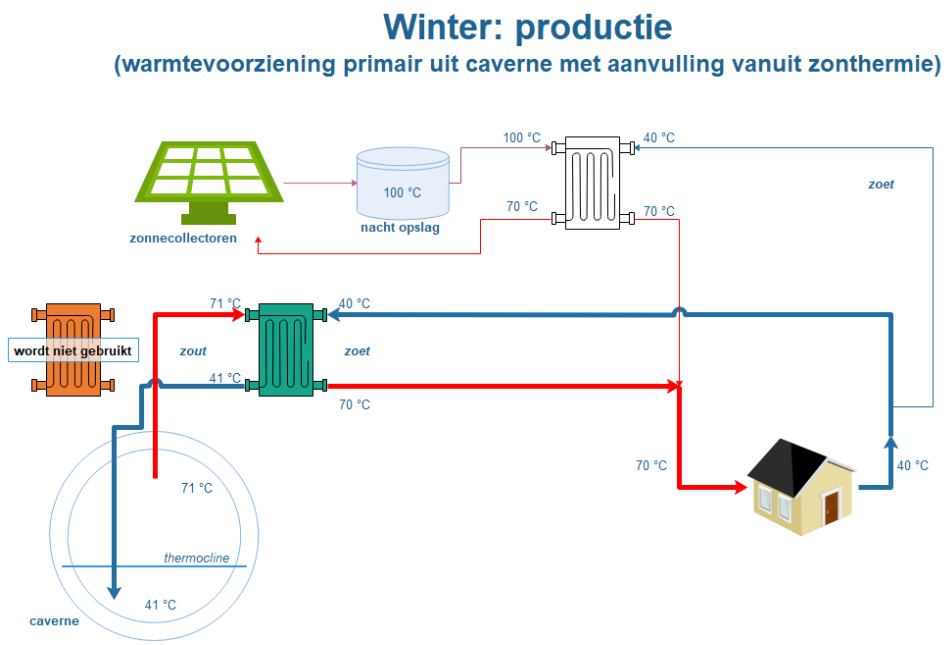
De investeringskosten voor het basisscenario van het systeem zijn weergegeven in Tabel 9. voor de hoofdleiding is uitgegaan van een prijs voor aanleg van 1.500 euro/m. Voor de aansluiting van de individuele woningen aan de hoofdleiding is gerekend met een prijs van 5.000 euro/huis. Voor de overige kosten van de leidingen, zoals aansluitingen, boosterpompen, vergunningen etc.) is een bedrag opgenomen van 750 keuro (33% van de kosten voor de leiding). Voor de kosten van de opslagtank van 2.856 m^3 is een bedrag van 500 keuro opgenomen, gebaseerd op prijzen van het Internet[38]. Zoals hierboven beschreven is het geïnstalleerde piekvermogen van de collectoren 25 MW. Voor de berekening van de prijs wordt uitgegaan van de indicatie van PBL van 500 euro/kW_{output} [39]. Voor de kosten van de warmtewisselaars is een bedrag van 200 keuro opgenomen, op basis van indicatieve prijzen op het Internet.

---

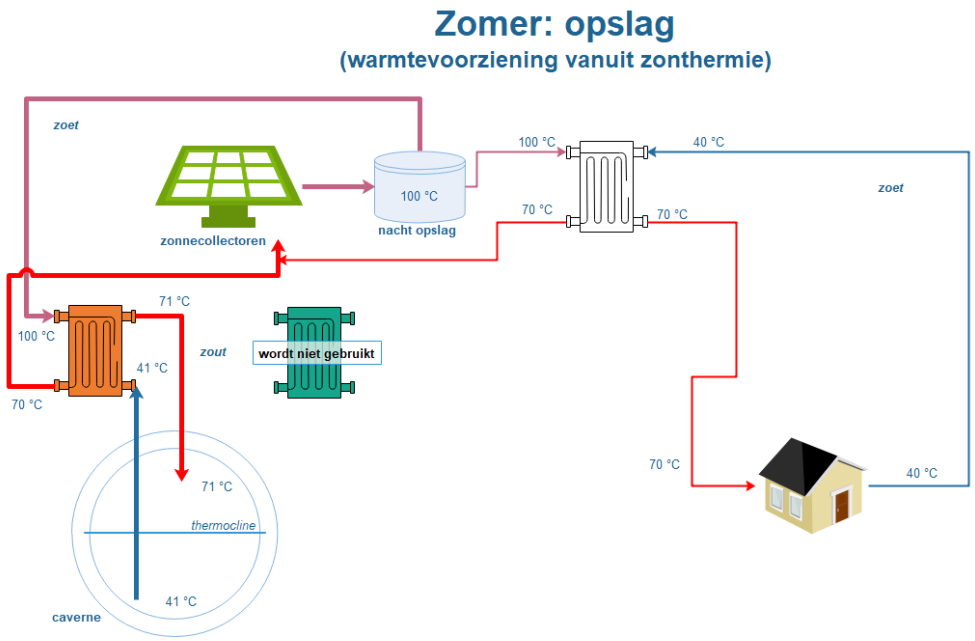
[37] https://www.rvo.nl/toetsingskader-financi%C3%ABle-businesscase-warmte-uitwisselingsprojecten

[38] De prijs voor een geïsoleerde plastic tank is volgens https://www.promaxplastics.co.nz/products/tanks/promax-insulated-tank-30000-lt circa 500 keuro. Voor de berekeningen is op basis hiervan uitgegaan van een bedrag van 500 keuro

[39] Pbl-2018-concept advies



Figuur 10 Schematische weergave van het systeem van een diepe caverne met zonthermie in de winter.



Figuur 11 Schematische weergave van het systeem van een diepe caverne met zonthermie in de zomer .

Voor het verpompen van de pekel (tot 150 m3/uur) is een bedrag van 500 keuro opgenomen[40], eenzelfde bedrag voor filters en overig[41]. Voor het aanpassen van de putten voor elk een bedrag opgenomen van 1,5 Meuro[42].

De operationele kosten, inclusief kosten voor elektriciteit, zijn ingeschat op 2,5% van de totale investeringskosten.

Investering		[€ x 1.000]
Warmtenet	Hoofdleiding	2.250
	Aansluitingen divers	750
	Aansluiting woningen à 5.000 euro/woning	7.500
Bovengrondse installatie	Warmtewisselaars	200
	Pompen (150 m^3/uur)	500
	Filters en overig	500
Zonnecollectoren	25 MW a 500 euro/kW output	12.500
Tankopslag		500
Caverne	Injectieput	1.500
	Productieput	1.500
Totaal		**27.700**

Tabel 9 Investeringskosten voor het systeem met een diepe caverne en zonthermie.

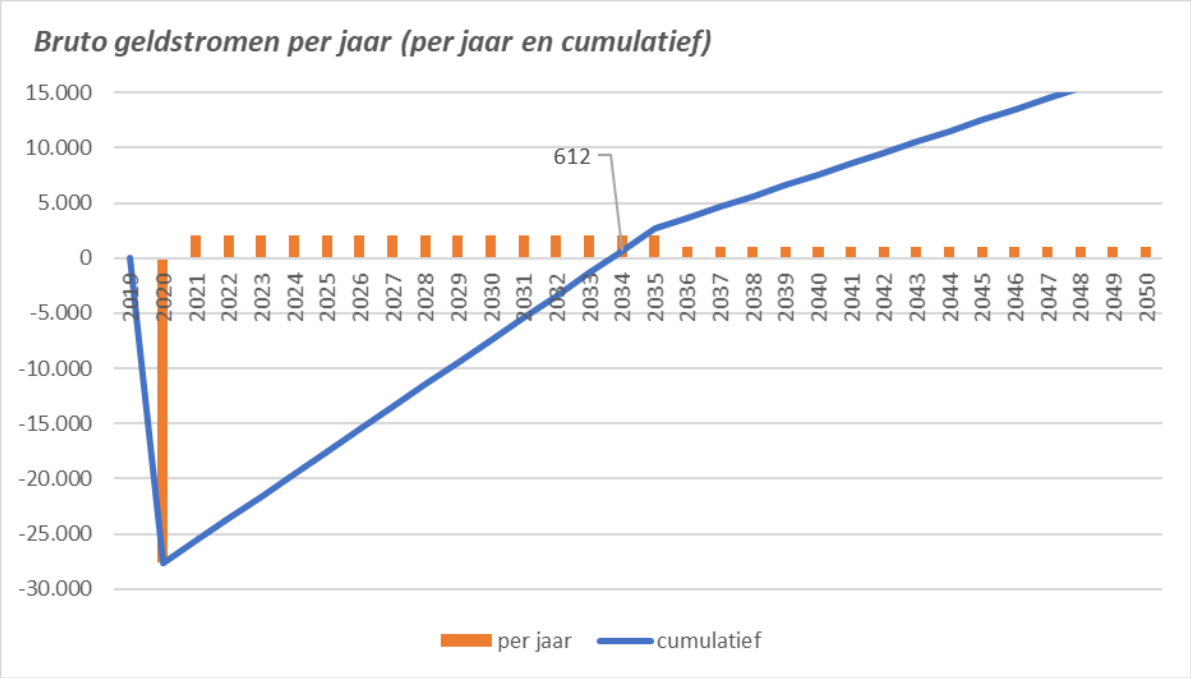
Voor de inkomsten is uitgegaan van een variabel warmtetarief (berekend bij de afnemers) van 25 euro/GJ en vaste aansluitkosten van € 310,00 per jaar. Dit is in lijn met de maximale ACM tarieven[43]. Per woning komt dit neer op € 1.360,00 per jaar voor warmte. Er is aangenomen dat van het variabele tarief 5 euro/GJ gereserveerd moet worden voor diverse kosten (zoals handlingkosten voor energielevering, etc.) waardoor er gerekend is met variabele opbrengsten van 20 euro/GJ. Bij een jaarlijkse afname van 61.000 GJ (totaal aan warmte geleverd uit caverne en zonthermie) van de 1.500 woningen zijn de inkomsten derhalve 1,21 miljoen euro plus 0,47 miljoen euro uit de vaste aansluiting. Daarnaast zijn er vanuit de SDE+ mogelijkheden voor subsidie van zonthermie. Er worden maximaal 700 vollasturen gesubsidieerd voor zonthermie. Uitgaande van deze 700 vollasturen bij 25 MW zonthermisch vermogen is 17.500 MWh subsidiabel onder de SDE+

[40] stelpost
[41] stelpost
[42] De kosten van nieuwe boringen zijn locatie specifiek en afhankelijk van het well design. Richtlijnen voor prijzen worden gegeven door Limberger (2018), https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/360022, waarbij moet worden opgemerkt dat de gegeven correlatie tussen kosten en diepte waarschijnlijk voor in het ondiepere domein minder nauwkeurig zijn. De kosten van een nieuwe put tot 450 meter wordt volgens deze relatie ingeschat op 2,3 Meuro en tot 2.250 m op 6,9 Meuro. Voor deze studie is ervan uitgegaan dat de bestaande twee putten in de caverne gebruikt kunnen worden, waarbij deze voor circa 20% (1.5 Meuro) van de nieuwwaarde moet worden aangepast
[43] https://www.acm.nl/nl/warmtetarieven

subsidie. Voor een zonthermisch systeem is SDE+ subsidie mogelijk voor een periode van 15 jaar. Na deze periode houdt de SDE op. Mogelijk wordt deze tegen die tijd door een andere regeling vervangen, maar dat is niet meegenomen in deze evaluatie. Eventuele andere subsidies zijn niet meegenomen. Bij een aangenomen basisbedrag van € 0,085/kWh en een correctiebedrag van € 0,026/kWh[44] worden de inkomsten, zonder indexering, ingeschat op 1,03 miljoen euro per jaar. De totale netto inkomsten komen hierbij op 2,02 Meuro per jaar[45].

4.2.3 Resultaten

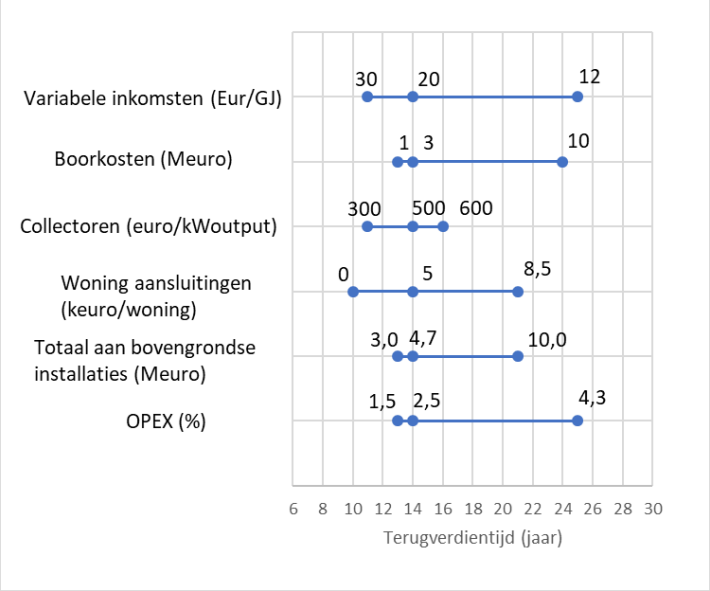
De geldstroom is afgezet tegen de tijd, waarbij de initiële investeringen worden terugverdiend met de netto inkomsten. Onder de aannames zoals hierboven beschreven, waarbij voor de berekening alleen is uitgegaan van een eerste evaluatie van kosten vs. opbrengsten, zonder rekening te houden met afschrijving, financiering, inflatie of overige indexeringen conform de RVO-toetsingskader richtlijn, is er een terugverdientijd van 14 jaar (Figuur 12). De gevoeligheid van de kostenfactoren op de terugverdientijd is getoetst en gepresenteerd in een Tornado diagram (Figuur 13). In dit diagram is de terugverdientijd van het basisscenario weergegeven en de resulterende terugverdientijden wanneer de waarde van één van de parameters wordt gewijzigd. De situatie waarin het systeem kan worden aangesloten op een bestaand warmtenet (dus waarbij er geen kosten zijn voor de aansluiting van de woningen) geeft alsnog een terugverdientijd van 10 jaar.



Figuur 12 Geldstromen in de tijd van het basisscenario.

[44] SDE+ tarieven voorjaar 2019

[45] Totale inkomsten: 2.71 Meuro, totale uitgaven 0.69 Meuro



Figuur 13 Tornado diagram om de gevoeligheid van de kostenfactoren te presenteren, de variabele inkomsten zijn het tarief dat de afnemer betaalt minus 5 euro/GJ voor diverse kosten. De boorkosten zijn de kosten van beide putten. Het totaal aan bovengrondse installaties zijn de kosten van de warmteleiding en de bovengrondse installaties zoals gespecificeerd in Tabel 9.

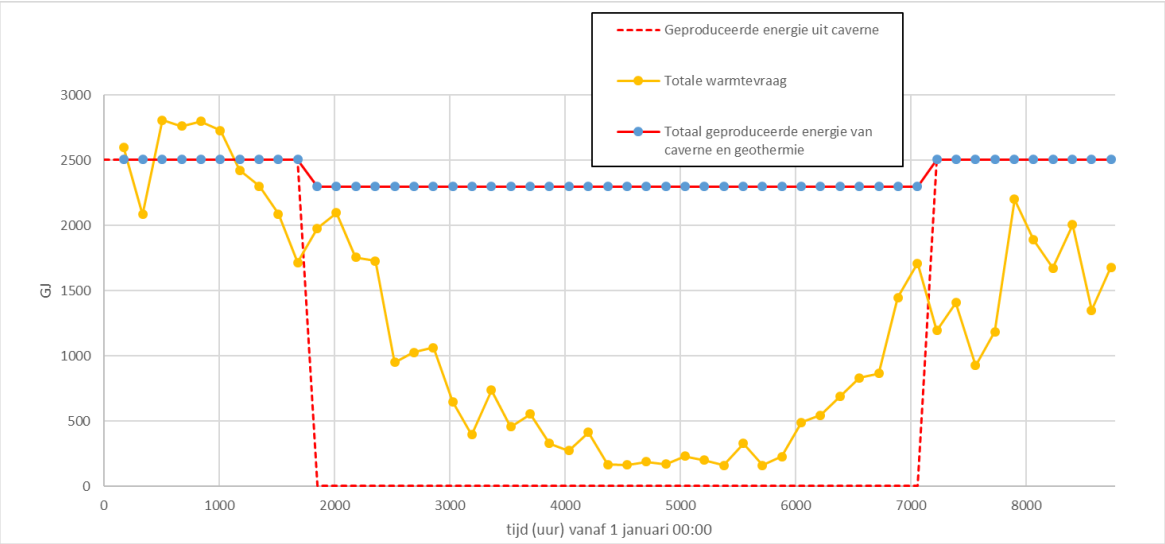
4.3 Warmteopslag in een enkele diepe caverne met geothermie

4.3.1 Systeembeschrijving

Voor dit systeem is uitgegaan van het systeem zoals hiervoor is beschreven waarbij warmte in een diepe caverne wordt opgeslagen. De warmte van dit systeem komt van een geothermiebron die groot genoeg is om continu de gevraagde warmte te leveren. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een geothermie bron in een Slochteren reservoir onder het Zechstein zout. De bron levert zout water op een temperatuur van 90°C. Er wordt ervan uitgegaan dat de geothermiebron separaat wordt geëxploiteerd, deze exploitatie valt buiten dit systeem. In de zomer kan het overschot aan warmte uit dit separate systeem echter worden afgenomen door de opslag. Dit is zeer gunstig voor de geothermiebron, omdat deze dan in de zomer met een hoog vermogen kan blijven draaien. Het warme water van de geothermiebron wordt in de winter via een warmtewisselaar afgekoeld naar 45°C (zie Figuur 11). De warmte wordt hierbij overgedragen naar de pekel, die met een temperatuur van 71°C wordt opgeslagen.

De totale jaarlijkse warmtevraag van de 1.500 woningen is 63.000 GJ. Hiervan wordt in de winter 39.000 GJ geleverd door de caverne, waarbij er enkele weken additioneel warmte moet worden geleverd door een back-up systeem (300 GJ). In de zomer wordt de gevraagde warmte (23.000) geleverd door een geothermiebron met een vermogen van 3.8 MW[46]. Deze kan de gevraagde warmte in de zomer leveren plus de 50.000 GJ om op te slaan in de caverne. Tijdens de winterperiode is er een overschot van 11.000 GJ aan geproduceerde warmte.

[46] In het algemeen is het vermogen van geothermiebronnen in Nederland > 5MW



Figuur 14 Warmtevraag vanuit 1.500 woningen en warmteaanbod vanuit de caverne en vanuit geothermie in de zomer. Half maart (op 1.680 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte stopgezet en begint de opslag. Begin november (op 7.056 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte uit de caverne hervat. Als de totaal geproduceerde energie hoger is dan de vraag, is er sprake van overschot/verlies van warmte. In de zomerperiode wordt het overschot aan geproduceerde warmte door de geothermie opgeslagen in de caverne. Tijdens enkele weken in de winterperiode is er een tekort aan warmte. Er wordt ervan uitgegaan dat een back-up systeem in deze warmte voorziet.

4.3.2 Economische haalbaarheid

Aannames

De aannames zijn gelijk aan die van de vorige casus.

Inschatting van kosten en opbrengsten

De investeringskosten voor het basisscenario van het systeem zijn weergegeven in Tabel 10 en zijn grotendeels gelijk aan de aannames van de vorige casus. Voor dit systeem met geothermie zijn er geen collectoren of opslagtank nodig. De overige kosten zijn gelijk gehouden aan die van de vorige casus.
De operationele kosten zijn ingeschat op 2,5% van de totale investeringskosten.

Investering		[€ x 1.000]
Warmtenet	Hoofdleiding	2.250
	Aansluitingen divers	750
	Aansluiting woningen à 5.000 euro/woning	7.500
Bovengrondse installatie	Warmtewisselaars	200
	Pompen (150 m^3/uur)	500
	Filters en overig	500
Caverne	Injectieput	1.500
	Productieput	1.500
Totaal		**14.700**

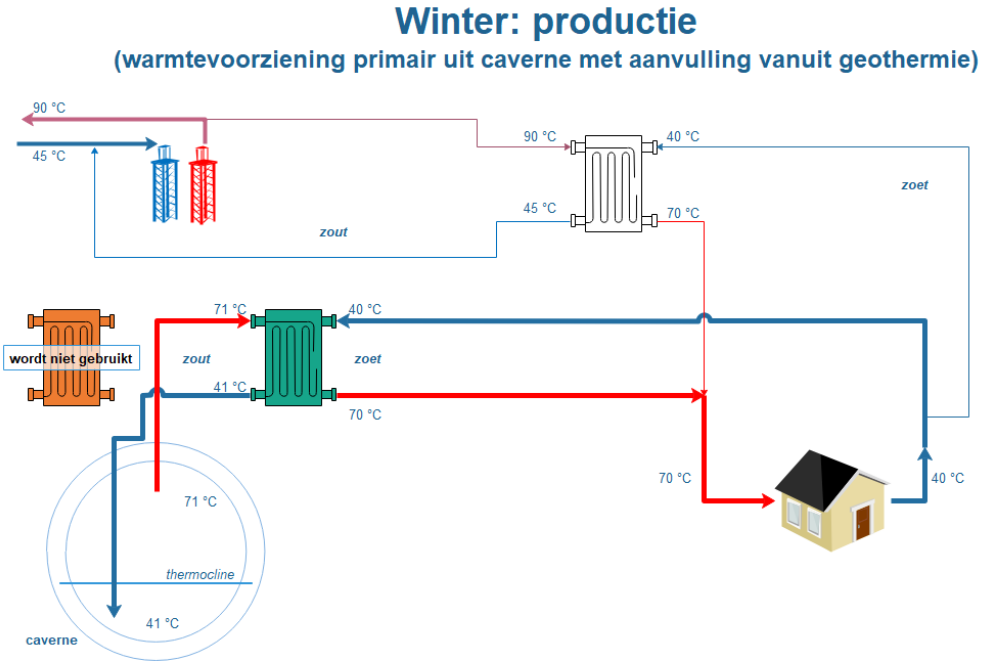
Tabel 10 Investeringskosten voor het systeem met een diepe caverne en geothermie.

Voor de inkomsten is uitgegaan van een variabel warmtetarief (berekend bij de afnemers) van 25 euro/GJ en vaste aansluitkosten van € 310,00 per jaar. Dit is in lijn met de maximale ACM tarieven[47]. Per woning komt dit neer op € 1.360,00 per jaar voor warmte. Er is aangenomen dat van het variabele tarief 5 euro/GJ gereserveerd moet worden voor diverse kosten (zoals handlingkosten voor energielevering, etc.) waardoor er gerekend is met variabele opbrengsten van 20 euro/GJ. Bij een jaarlijkse afname van 62.000 GJ uit het systeem (excl. back-up) van de 1.500 woningen zijn de inkomsten derhalve 1,23 miljoen euro plus 0,47 miljoen euro uit de vaste aansluiting.
Voor dit systeem wordt ervan uitgegaan dat er geen kosten zijn voor de inkoop van restwarmte uit de geothermie installatie. Voor een geothermie operator kan het zeer gunstig zijn om tijdens de zomer de overproductie van warmte kwijt te kunnen wegens de SDE regeling van deze operator. Wellicht dusdanig gunstig dat er zelfs met een negatieve prijs gerekend zou kunnen worden. De totale netto inkomsten komen hierbij op 1,33 Meuro per jaar[48].

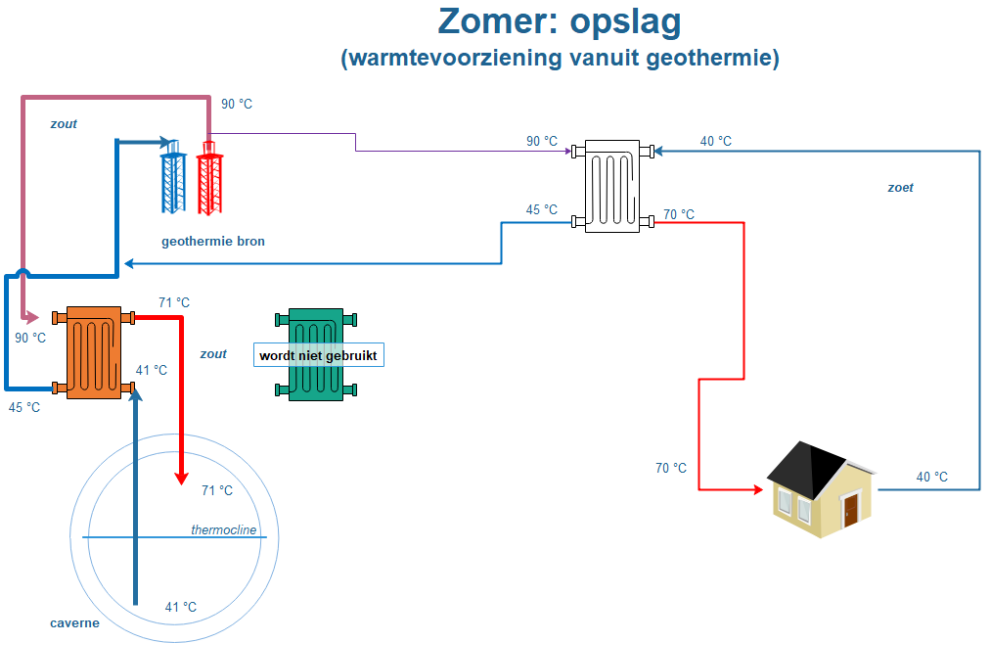
4.3.3 Resultaten

De geldstroom is afgezet tegen de tijd, waarbij de initiële investeringen worden terugverdiend met de netto inkomsten. Onder de aannames zoals hierboven beschreven, waarbij voor de berekening alleen is uitgegaan van een eerste evaluatie van kosten vs. opbrengsten, zonder rekening te houden met afschrijving, financiering, inflatie of overige indexeringen conform de RVO-toetsingskader richtlijn, is er een terugverdientijd van 12 jaar (Figuur 17). De gevoeligheid van de kostenfactoren op de terugverdientijd is opnieuw getoetst en gepresenteerd in een Tornado diagram (Figuur 18). Dit diagram laat zien dat de terugverdientijd gunstig kan uitvallen bij gunstige randvoorwaarden.

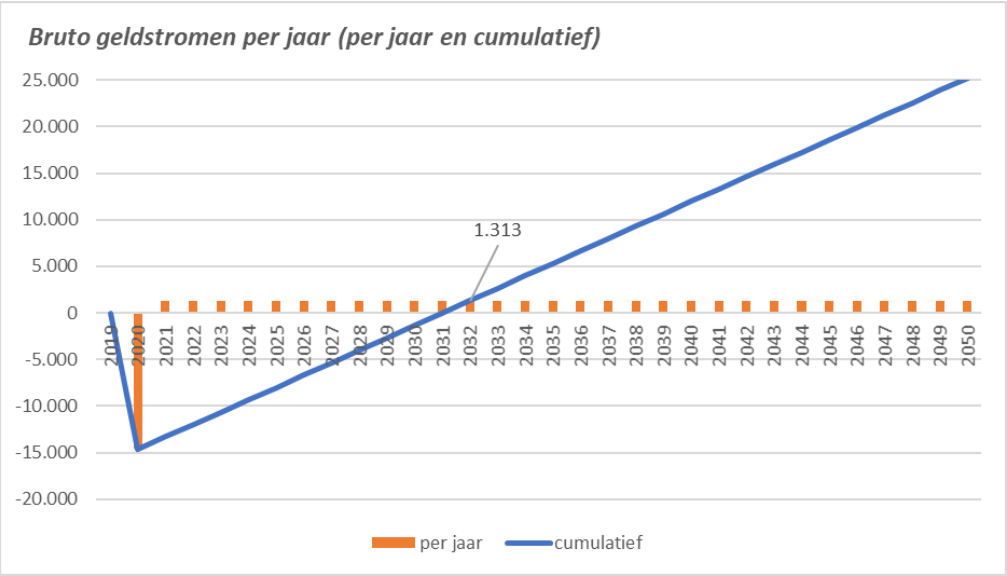
[47] https://www.acm.nl/nl/warmtetarieven
[48] Totale inkomsten: 1.60 Meuro, totale uitgaven 0.37 Meuro



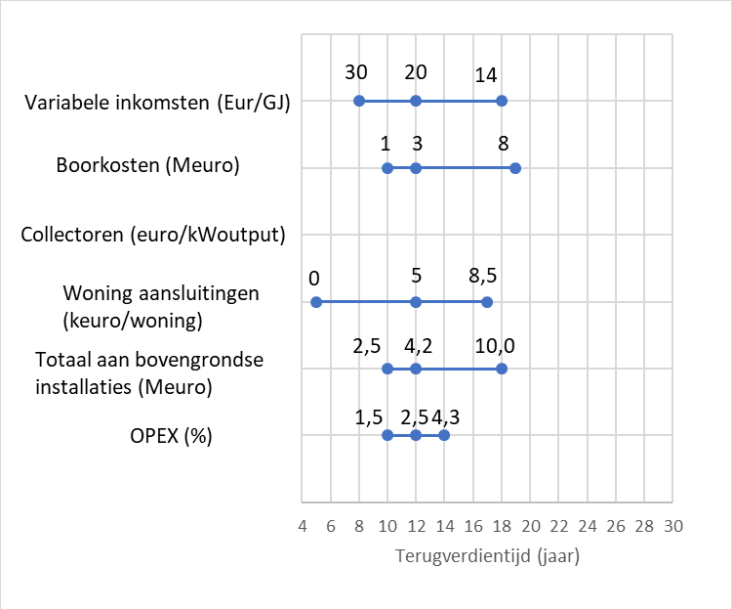
Figuur 15 Schematische weergave van het systeem van een diepe caverne met geothermie in de winter.



Figuur 16 Schematische weergave van het systeem van een diepe caverne met geothermie in de zomer .



Figuur 17 Geldstromen in de tijd van het basisscenario.



Figuur 18 Tornado diagram om de gevoeligheid van de kostenfactoren te presenteren, De variabele inkomsten zijn het tarief dat de afnemer betaalt minus 5 euro/GJ voor diverse kosten. De boorkosten zijn de kosten van beide putten. Het totaal aan bovengrondse installaties zijn de kosten van de warmteleiding en de bovengrondse installaties zoals gespecificeerd in Tabel 10.

4.4 Warmteopslag in een enkele ondiepe caverne

4.4.1 Systeembeschrijving

Voor deze casus gaan we uit van hetzelfde systeem als hierboven beschreven maar dan in combinatie met een kleinere caverne van 200.000 m^3. De top van de caverne bevindt zich op 414m en de basis op 486m diepte. Er wordt opnieuw gebruik gemaakt van een tweetal putten, een injectie- en een productieput die op eenzelfde afstand van het dak en de basis worden gesitueerd als hierboven beschreven. De thermocline gaat

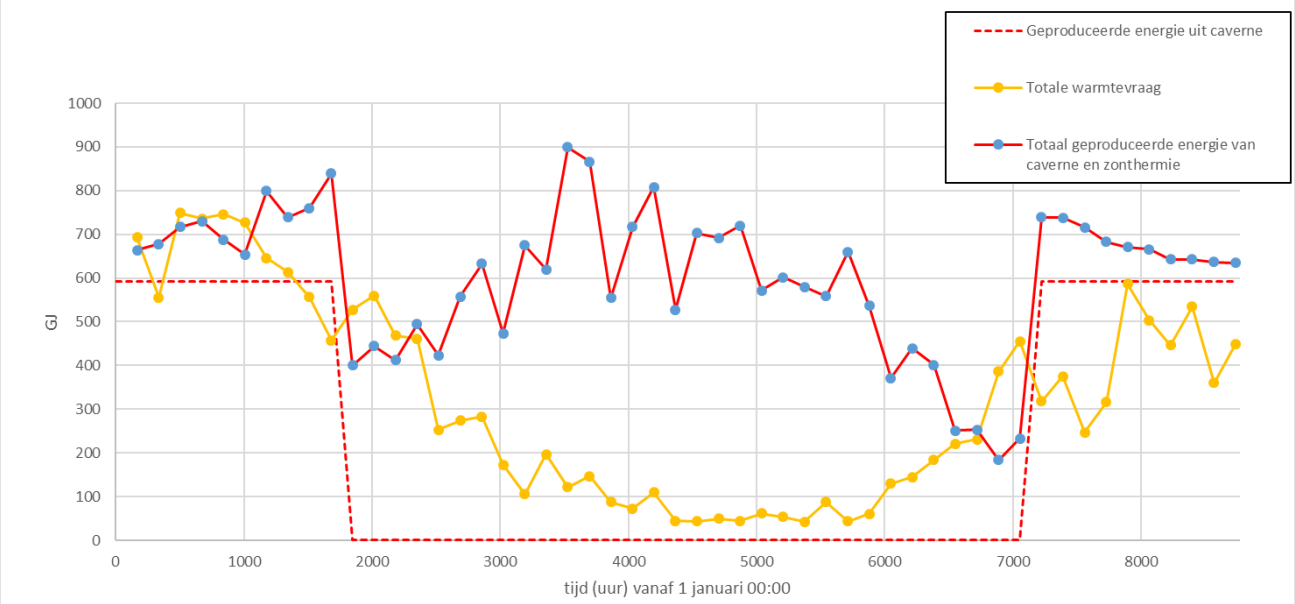
variëren van 429 tot 471m diepte, waarmee het “werkvolume” van de pekel in dit dieptebereik dan circa 156.000 m^3 is, oftewel 78% van het totale cavernevolume[49]. Bij een aangenomen ΔT van 20°C (van 41 naar 21°C) is de energie-inhoud van het werkvolume per caverne dat achtereenvolgens geproduceerd en opgeslagen wordt circa 11.800 GJ (gelijk aan het jaarverbruik van 285 huishoudens).

Het systeem is opnieuw gekozen om in de gemiddelde warmtevraag (op weekbasis) te voorzien (Figuur 19). Er is gekeken naar de warmtevraag door het jaar heen van 400 gemiddelde woningen[50]. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij aansluiting van een lage temperatuur warmtenet, zoals voorzien in deze casus, een hoge isolatiegraad benodigd is waarmee het verbruik van de woning aanmerkelijk gereduceerd zal zijn ten opzichte van de huidige gemiddelde woning. Het aantal aangesloten woningen kan daarom ook een stuk hoger uitvallen dan hier is aangenomen. Op basis van continue productie en van het aantal vollasturen in de productie periode (3.360 uur) kan worden bepaald dat de caverne een continu vermogen levert van 1,0 MW bij een debiet van 46 m^3/uur. De productie uit de caverne in deze periode kan voorzien in 59% van de totale jaarlijkse warmtevraag van de 400 woningen. De totale warmtevraag tijdens de opslagperiode is de som van de warmtevraag van de aangesloten woningen in deze periode, gelijk aan 6.100 GJ en de aan te vullen warmte voor de caverne (11.800 GJ), dus in totaal 17.900 GJ.

Ook voor deze casus wordt aangenomen dat zonthermie deze hoeveelheid warmte gaat leveren. Hiervoor is berekend dat er circa 9.000 m^2 aan panelen benodigd zijn (dakoppervlak van circa 450 woningen). De opgewekte energie in de winter wordt ook gebruikt voor voeding van het warmtenet. Dezelfde onderdelen zijn benodigd voor het systeem zoals hierboven beschreven. Het geïnstalleerde vermogen van de *zonnecollectoren* is circa 6 MW. Het benodigd volume van de *nachtopslag van warmte* is 1.000 m^3 [51]. Gezien het lagere vermogen en de lagere ΔT zijn de bovengrondse installaties een slag kleiner. Bij de *warmtewisselaars* is in de winterperiode het verschil in temperatuur aan beide kanten van de warmtewisselaar klein. Het benodigde oppervlak van de warmtewisselaar is daarom relatief groot.
Echter, gezien het kleinere gevraagde vermogen in dit lage temperatuursysteem is de het benodigde oppervlak (250 m^2) in de warmtewisselaar flink kleiner dan voor de diepe caverne. Er is aangenomen dat de diameter van de *warmteleidingen* gelijk blijft, onder de aanname dat het lagere vermogen (dus kleinere diameter benodigd) en de lagere ΔT (dus grotere diameter benodigd) elkaar opheffen. Aangezien de *putten* veel minder diep zijn, heeft dit een significant effect op de kosten.

---

[49] Berekend met http://ambrsoft.com/TrigoCalc/Sphere/Cap/SphereCap.htm
[50] Met een verbruik van 42 GJ op jaarbasis. Mogelijk dat dit verbruik na isolerende maatregelen daalt. Het verbruik door het jaar heen is gebaseerd op informatie van https://energytransitionmodel.com/
[51] Bij een behoud van vermogen van 1 MW na de warmtewisselaar is debiet aan de zoet water kant berekend op 43 m^3/uur. Voor de continue overdracht van warmte aan het zoute water is uitgegaan van een voorraad van 24 uur productie.



Figuur 19 Warmtevraag vanuit 400 woningen en warmteaanbod vanuit de caverne en vanuit de zonthermie. Half maart (op 1.680 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte stopgezet en begint de opslag. Begin november (op 7.056 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte uit de caverne hervat. Als de totaal geproduceerde energie hoger is dan de vraag is er sprake van overschot/verlies van warmte. In de zomerperiode wordt het overschot aan geproduceerde warmte door de zonthermie opgeslagen in de caverne. Een beperkt tekort van warmte komt in dit profiel alleen voor rond uur 6.800. tijdens de winter levert de zonthermie ook een klein deel van de warmte. Tijdens de winter is er een overschot van 3.500 GJ (2.000 GJ uit caverne, 1.600 GJ uit zonthermie) door hogere productie dan de vraag. Aan het begin en eind van de zomerperiode is de vraag even groter dan het aanbod, hiervoor wordt 900 GJ geleverd door een back-up systeem. Dit systeem is verder niet meegenomen in deze evaluatie.

4.4.2 Economische haalbaarheid

Aannames

Deze ondiepe casus is uitgevoerd onder dezelfde aannames als voor de diepe casus.

Inschatting van kosten en opbrengsten

De investeringskosten voor het basisscenario van het systeem zijn weergegeven in Tabel 11. Gezien de kleinere schaal zijn in het algemeen de kosten lager. De operationele kosten zijn voor dit systeem ingeschat op 2,5% van de totale investeringskosten. De totale netto inkomsten komen hierbij, rekening houdend met de SDE+ regeling voor de zonnecollectoren in de eerste 15 jaar, op 0.44 Meuro per jaar[52].

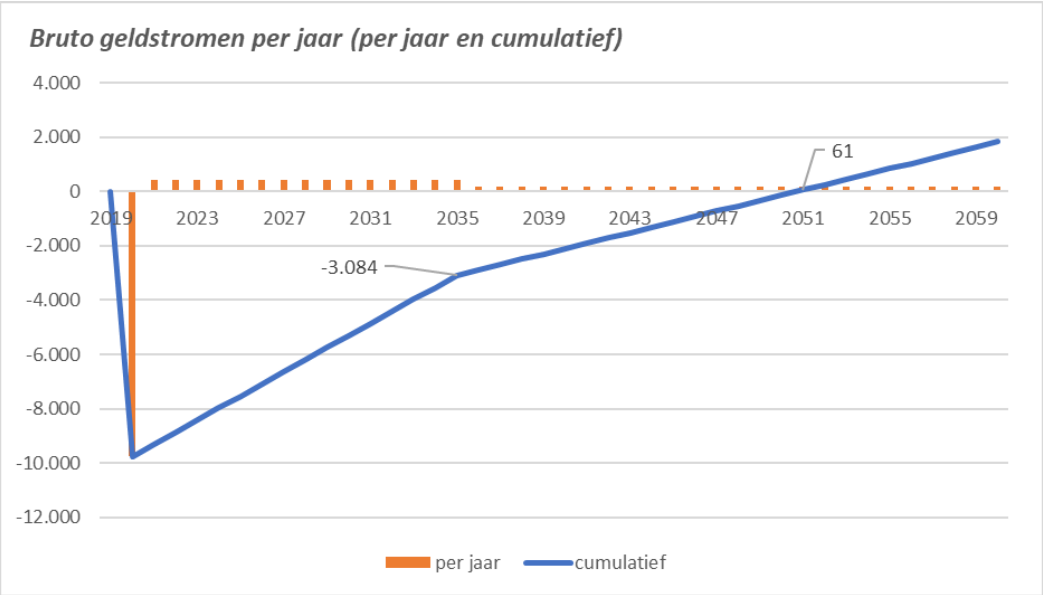
[52] Totale inkomsten: 0.69 Meuro, totale uitgaven 0.24 Meuro

Investering		[€ x 1.000]
Warmtenet	Hoofdleiding	2.250
	Aansluitingen divers	750
	Aansluiting woningen à 5.000 euro/woning	2.000
Bovengrondse installatie	Warmtewisselaars	100
	Pompen (50 m^3/uur)	200
	Filters en overig	200
Zonnecollectoren	6 MW a 500 euro/kW output	3.000
Tankopslag		250
Caverne	Injectieput	500
	Productieput	500
Totaal		**9.750**

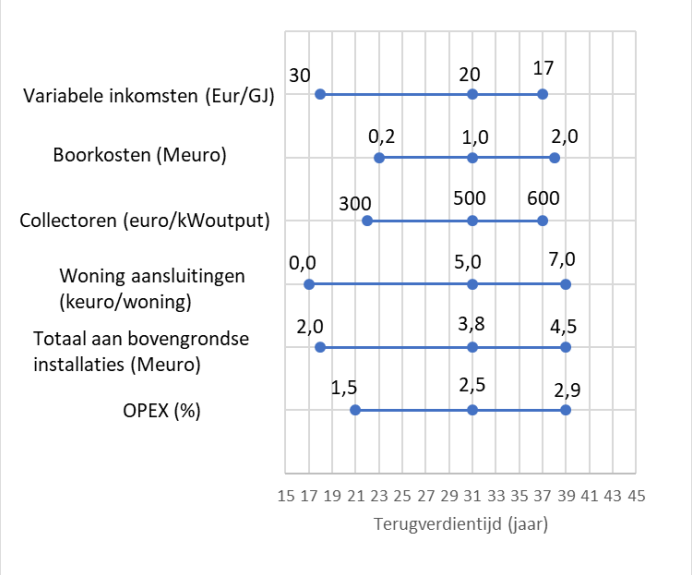
Tabel 11 Investeringskosten voor het systeem met een ondiepe caverne en zonthermie.

4.4.3 Resultaten

Uit de plot van de geldstroom tegen de tijd blijkt er een zeer lange terugverdientijd is van 31 jaar is voor dit systeem, d.w.z. dat de netto inkomsten onvoldoende zijn om de investeringen terug te verdienen in de eerste 31 jaar na realisatie. Dit lijkt voor een investering te lang om haalbaar te worden geacht. Om de terugverdientijd te besparen, is de gevoeligheid van de kostenfactoren op de terugverdientijd getoetst (Figuur 13). Hieruit blijkt dat de terugverdientijd met name teruggebracht kan worden indien er al een warmtenet ligt en de investeringen voor de aansluitingen van de woningen niet gemaakt hoeven te worden.



Figuur 20 Geldstromen in de tijd van het basisscenario.



Figuur 21 Tornado diagram om de gevoeligheid van de kostenfactoren te presenteren. De variabele inkomsten zijn het tarief dat de afnemer betaald minus 5 euro/GJ voor diverse kosten. De boorkosten zijn de kosten van beide putten. Het totaal aan bovengrondse installaties zijn de kosten van de warmteleiding en de bovengrondse installaties zoals gespecificeerd in Tabel 11.

4.5 Warmteopslag in een dubbele ondiepe caverne

4.5.1 Systeembeschrijving

Naast de mogelijkheid van het gebruik van een enkele caverne is ook naar een systeem gekeken waarbij twee cavernes zijn gekoppeld. Het grote voordeel hiervan is dat door de onderlinge verbinding de temperatuursprong over de thermocline niet zo groot is waardoor deze naar verwachting stabieler gehouden kan worden wat de efficiëntie ten goede komt. De meerkosten van dit systeem zitten met name in de ombouw van twee extra putten terwijl de opbrengsten gelijk blijven. Gezien de uitkomsten hierboven kan dit alleen uitkomen als de (operationele) kosten lager zijn.

4.5.2 Economische haalbaarheid

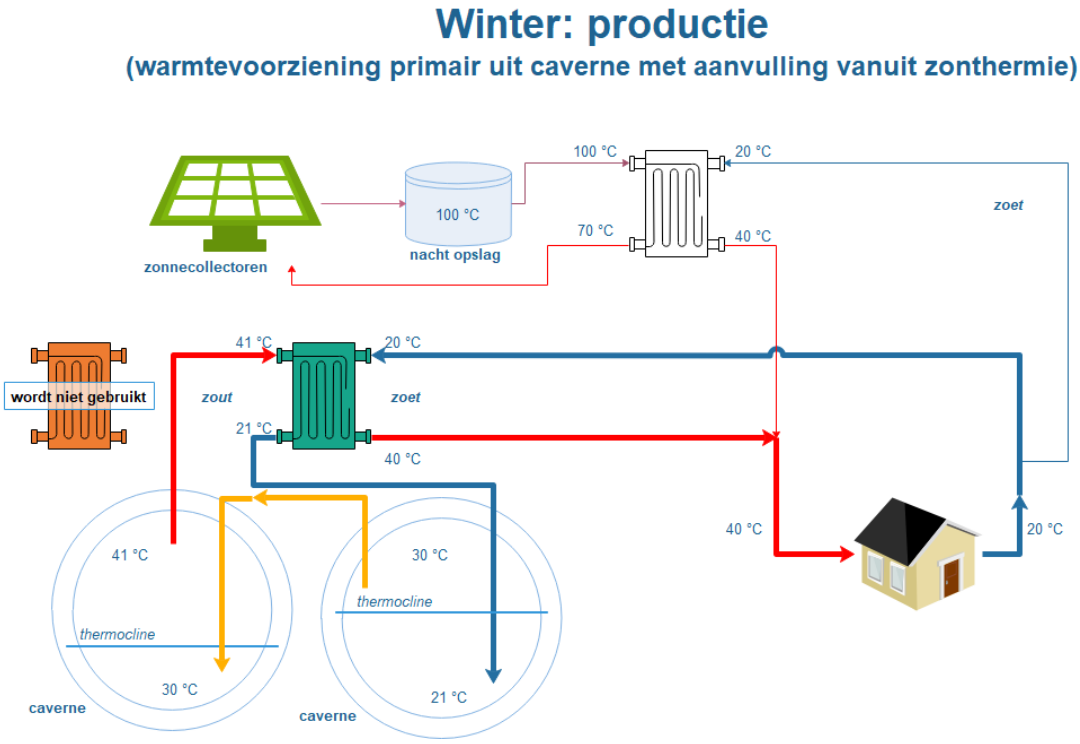
Aannames

Deze ondiepe casus is uitgevoerd onder dezelfde aannames als voor de andere cases.

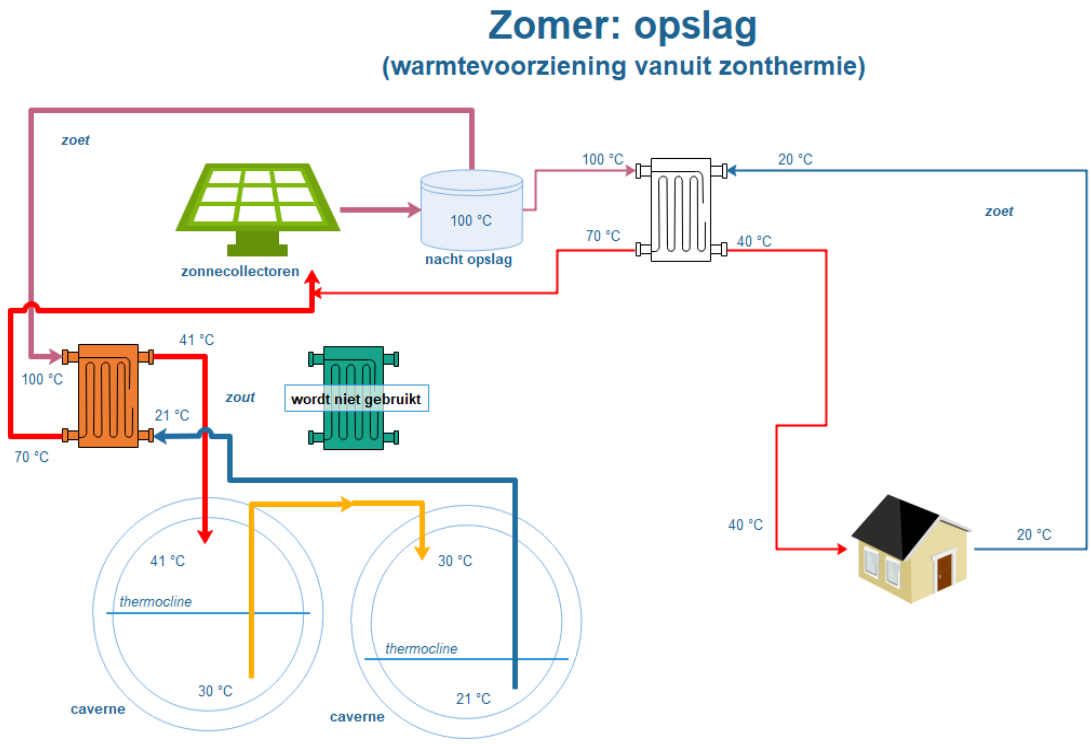
Inschatting van kosten en opbrengsten

De investeringskosten voor het basisscenario van het systeem zijn weergegeven in Tabel 12. Alleen de kosten voor de putten zijn verdubbeld. Voor de operationele kosten zijn voor dit systeem 2,5% van de totale investeringskosten meegenomen per jaar. De totale netto inkomsten komen hierbij op 0.42 Meuro per jaar[53]. Dit technisch mogelijk stabieler systeem vraagt dus meer investeringskosten en heeft daardoor meer onderhoudskosten, waardoor de netto inkomsten lager zijn dan voor een enkele caverne.

[53] Totale inkomsten: 0.69 Meuro, totale uitgaven 0.27 Meuro



Figuur 22 Schematische weergave van het systeem van twee ondiepe cavernes met zonthermie in de winter.



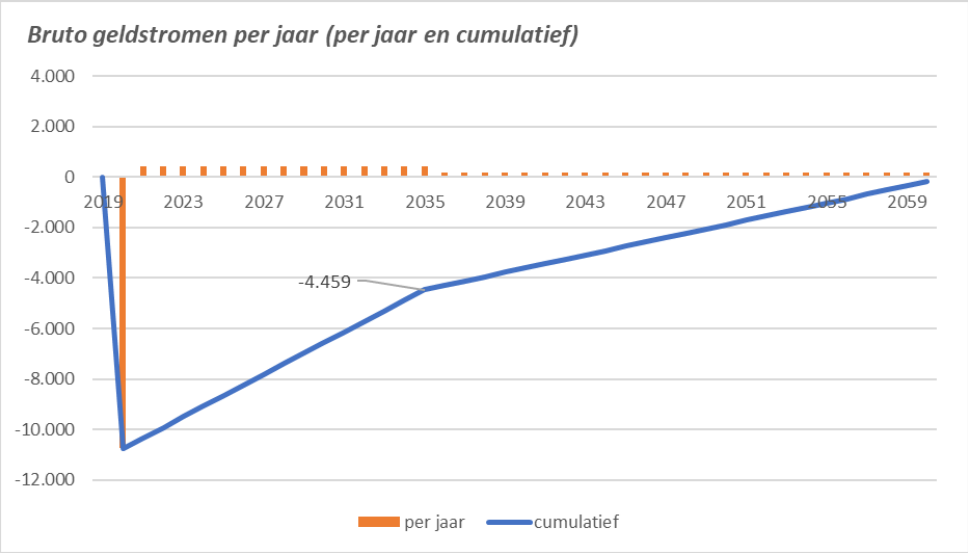
Figuur 23 Schematische weergave van het systeem van twee ondiepe cavernes met zonthermie in de zomer.

Investering		[€ x 1.000]
Warmtenet	Hoofdleiding	2.250
	Aansluitingen divers	750
	Aansluiting woningen a 5.000 euro/woning	2.000
Bovengrondse installatie	Warmtewisselaars	100
	Pompen (50 m^3/uur)	200
	Filters en overig	200
Zonnecollectoren	6MW a 500 euro/kW output	3.000
Tankopslag		250
Caverne	Injectieputten (2x)	1.000
	Productieputten (2x)	1.000
Totaal		**10.750**

Tabel 12 Investeringskosten voor het systeem met twee ondiepe cavernes en zonthermie

4.5.3 Resultaten

Uit de plot van de geldstroom tegen de tijd blijkt dat ook hier een zeer lange terugverdientijd is van meer dan 40 jaar voor dit systeem. Zoals gezegd kan dit systeem dus mogelijk wel efficiënter zijn.

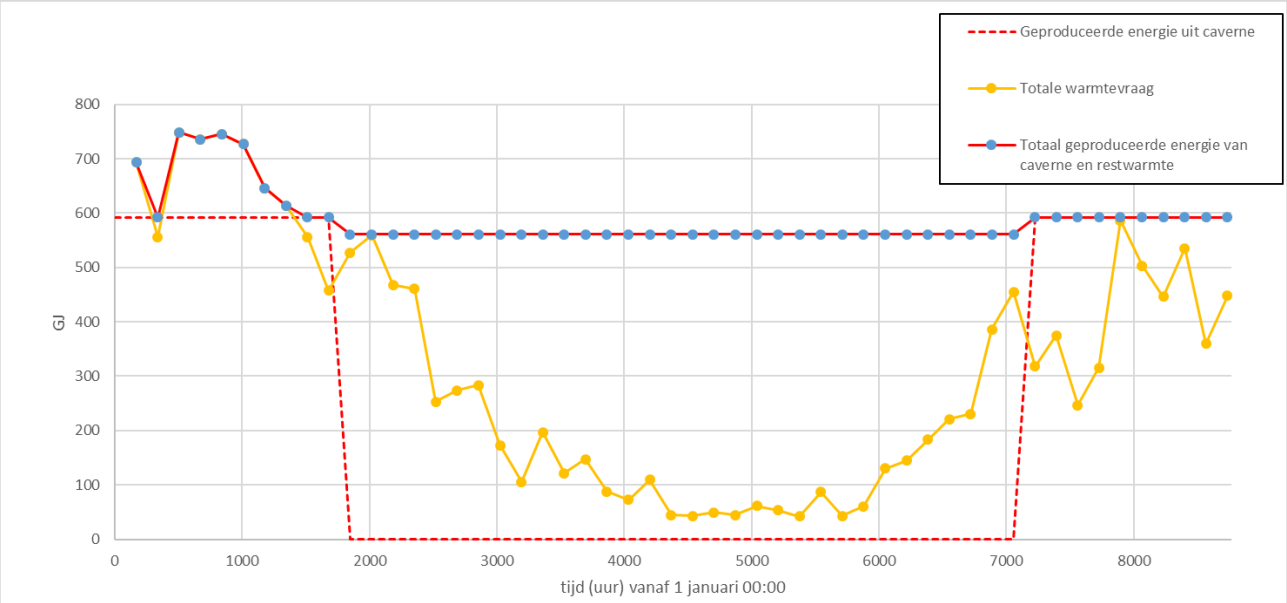


Figuur 24 Geldstromen in de tijd van het basisscenario.

4.6 Warmteopslag in een dubbele ondiepe caverne met restwarmte

4.6.1 Systeembeschrijving

Voor dit systeem is uitgegaan van het voorgaande systeem waarbij twee cavernes gekoppeld zijn. In plaats van de zonthermie komt de restwarmte in dit systeem echter van een industriële warmtebron die continu de gevraagde warmte kan leveren. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat deze bron al is aangesloten op een bestaand lage temperatuur warmtenet.



Figuur 25 Warmtevraag vanuit 400 woningen en warmteaanbod vanuit de caverne. Half maart (op 1.680 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte stopgezet en begint de opslag. Begin november (op 7.056 uur van 1 januari 00:00) wordt de productie van warmte uit de caverne hervat. In de winterperiode is er soms een overschot aan warmte, gelijk aan 2.000 GJ. Soms is er in de winter ook meer vraag dan geleverd kan worden uit de caverne, hiervoor is aangenomen dat dit uit restwarmte geleverd kan worden (gelijk aan 800 GJ). Voor de zomerperiode wordt aangenomen dat er een continue afname is van 560 GJ per week. Dit is voldoende om aan de zomervraag te voldoen (totaal 6.100 GJ)en om op te slaan in de caverne (11.800 GJ voor regeneratie van de warmte). In totaal wordt er dus 18.800 GJ aan restwarmte afgenomen.

4.6.2 Economische haalbaarheid

Aannames

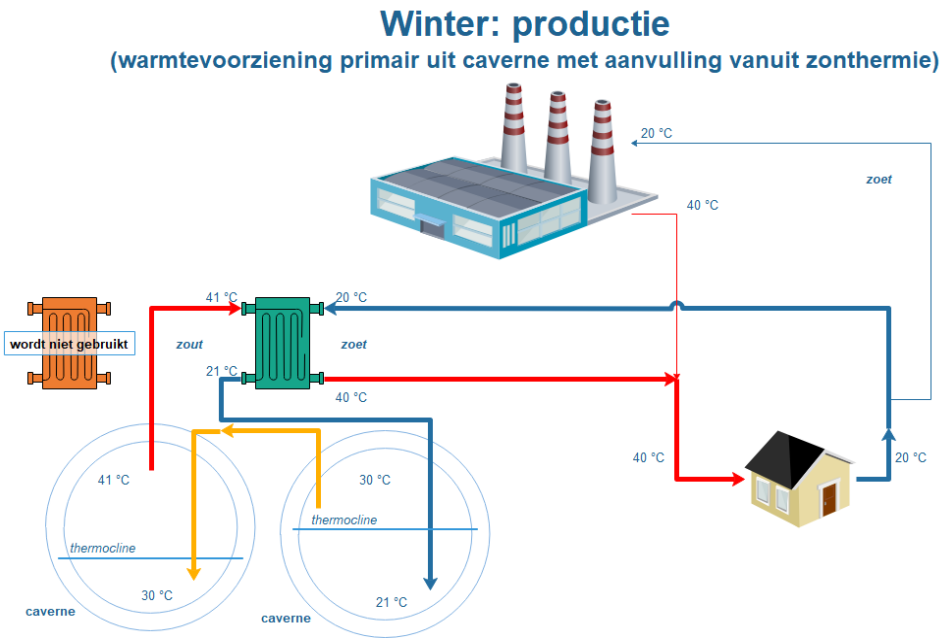
Deze casus is uitgevoerd onder dezelfde aannames als voor de andere cases.

Inschatting van kosten en opbrengsten

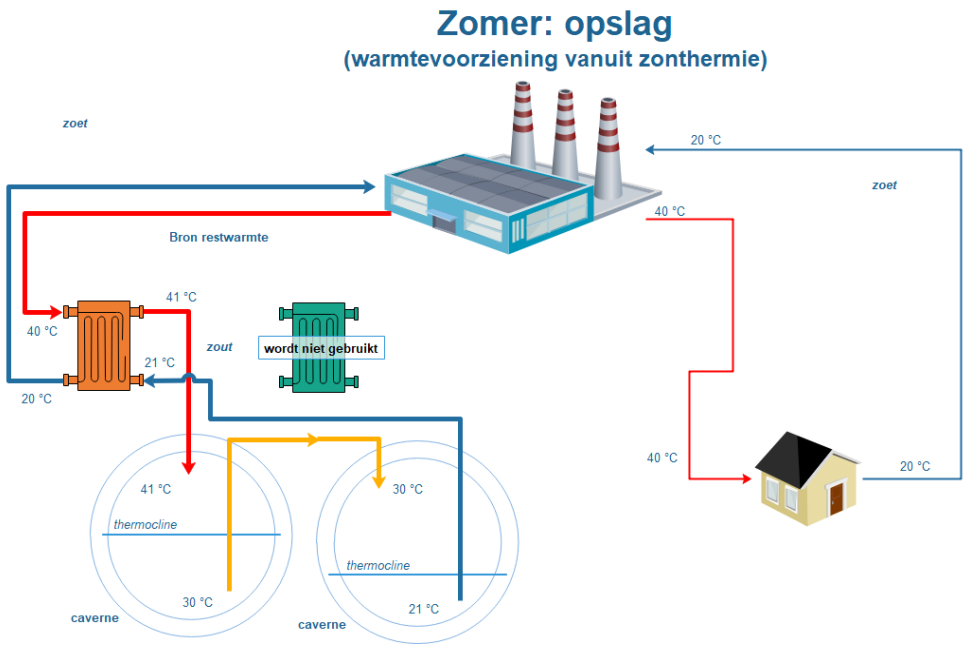
De investeringskosten voor het basisscenario van het systeem zijn weergegeven in Tabel 13. Deze zijn gelijk aan de vorige casus met een aantal uitzonderingen. Voor de hoofdleiding is 1 km aangenomen in plaats van 1,5 km. Er zijn geen kosten voor de aansluitingen van de woningen en er zijn twee in plaats van drie warmtewisselaars. Er zijn ook geen kosten voor de zonnecollectoren en de tankopslag. De operationele kosten voor dit systeem zijn 2,5% van de totale investeringskosten per jaar.

Voor dit systeem zijn er geen inkomsten uit de SDE. Er is vanuit gegaan dat de prijs voor de inkoop van restwarmte 5 euro/GJ is. De totale jaarlijkse kosten voor inkoop van 18.800 GJ aan restwarmte zijn dan 94

keuro. De jaarlijkse inkomsten voor verkoop van de 16.700 GJ warmte (voor 20 euro/GJ) bedragen dus 335 keuro. De totale netto inkomsten komen hierbij, rekening houdend met OPEX, op 0,12 Meuro per jaar[54].



Figuur 26 Schematische weergave van het systeem van twee ondiepe cavernes met restwarmte in de winter.



Figuur 27 Schematische weergave van het systeem van twee ondiepe cavernes met restwarmte in de zomer.

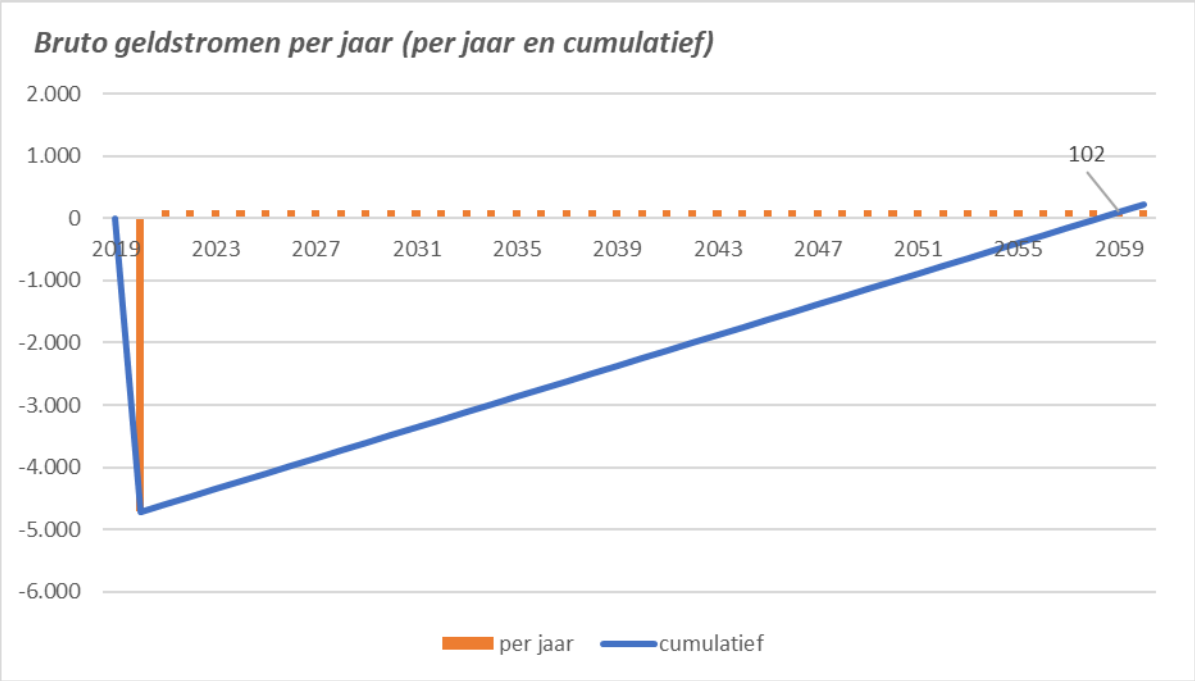
[54] Totale inkomsten: 0.34 Meuro, totale uitgaven incl. OPEX 0.21 Meuro.

Investering		[€ x 1.000]
Warmtenet	Hoofdleiding (1 km)	1.500
	Aansluitingen divers	750
Bovengrondse installatie	Warmtewisselaars	60
	Pompen (50 m^3/uur)	200
	Filters en overig	200
Caverne	Injectieput	1.000
	Productieput	1.000
Totaal		**4.710**

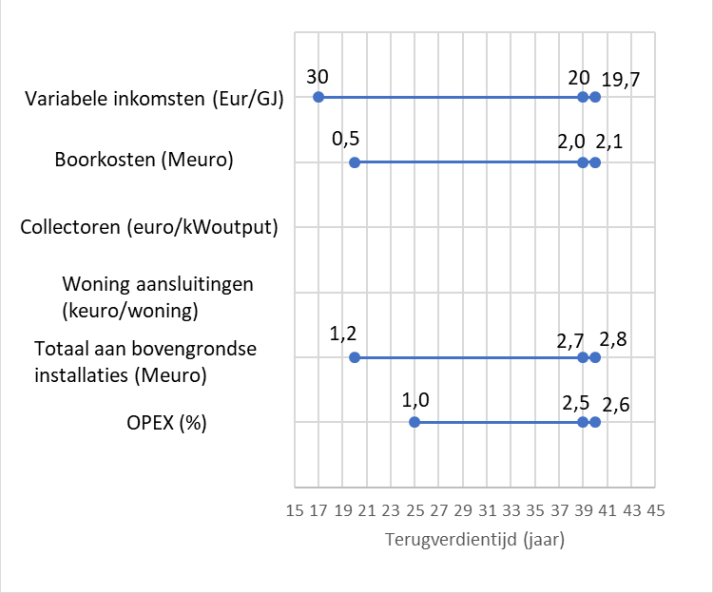
Tabel 13 Investeringskosten voor het systeem met twee ondiepe cavernes en restwarmte.

4.6.3 Resultaten

Uit de plot van de geldstroom tegen de tijd blijkt dat ook hier een zeer lange terugverdientijd (39 jaar) is voor dit systeem, met name omdat de inkomsten uit de SDE komen te vervallen. De grootste kosten voor dit systeem zitten in de aanleg voor de hoofdleiding. Uit het Tornado diagram blijkt dat ook na het significant terugbrengen van de kosten de terugverdientijd nog steeds relatief lang blijft.



Figuur 28 Geldstromen in de tijd van het basisscenario.



Figuur 29 Tornado diagram om de gevoeligheid van de kostenfactoren te presenteren, De variabele inkomsten zijn het tarief dat de afnemer betaald minus 5 euro/GJ voor diverse kosten. De kosten voor inkoop van de restwarmte zijn gefixeerd op 5 euro/GJ. De boorkosten zijn de kosten van beide putten. Het totaal aan bovengrondse installaties zijn de kosten van de warmteleiding en de bovengrondse installaties zoals gespecificeerd in Tabel 13.

4.7 Discussie en conclusies

Er zijn systemen gepresenteerd waarbij de warmte voor opslag wordt geleverd door zonthermie, geothermie overschotten en restwarmte. Voor de zonthermie optie moet een groot (dak)areaal aan zonnecollectoren worden geïnstalleerd. Verkennende businesscases geven aan dat het voorgestelde systeem mogelijk haalbaar is voor een diepe caverne indien een terugverdientijd van 10 tot 15 jaar acceptabel wordt geacht. Met de installatie van het gehele systeem, waaraan circa 1.500 woningen kunnen worden aangesloten op een hoge temperatuur warmtenet, is wel een investering aan de voorkant van enkele tientallen miljoenen euro's gemoeid. Er lijkt ook een business case mogelijk te zijn met een terugverdientijd van 10-15 jaar indien er in de zomerperiode een overschot aan warmte vanuit een nabije geothermiebron beschikbaar is. Voordeel van de geothermieoptie is dat er geen investering hoeft te worden gedaan voor de zonnecollectoren. Voor een ondiepe caverne, die een kleiner volume en een lagere temperatuur heeft, is de haalbaarheid uitdagender door een verwachte lange terugverdientijd. Deze optie is mogelijk alleen interessant indien er al een lage temperatuur warmtenet aanwezig is waarop het systeem kan worden aangesloten. De aanleg van het warmtenet hoeft dan niet mee te worden genomen in de investeringen. De terugverdientijd is echter nog steeds lang en een positieve beslissing over een dergelijk systeem zal waarschijnlijk meer gebaseerd zijn op basis van de voordelen voor een toegenomen leveringszekerheid van een groter systeem dan op basis van verwacht rendement.

5 Conclusies en aanbevelingen voor vervolg

In deze studie zijn twee mogelijke toepassingen van ondergrondse cavernes voor warmtetoepassingen geëvalueerd: winning van warmte uit de caverne en seizoensopslag van warmte. Voor beide toepassingen geldt dat het volume van de cavernes groot genoeg is om interessant te zijn voor collectieve warmtetoepassingen in de gebouwde omgeving. De warmte die mogelijk gewonnen kan worden uit het volume van de aanwezige pekel in de caverne staat in potentie gelijk aan de jaarlijkse warmtebehoefte van 200 tot 1.500 woningen. Winning van warmte lijkt echter niet haalbaar omdat de opwarming van het afgekoelde pekel te lang duurt om interessant te zijn. Hoewel in deze studie alleen is gekeken naar opwarming via geleiding door de pekel is de verwachting niet dat indien de effecten van stroming worden meegenomen dit tot een andere conclusie leidt. De theoretische evaluatie van de vervanging van de pekel door andere werkmiddelen (zoet water, vloeibare ammoniak, glycerol, vloeibare CO_2) leidt niet tot een significante verbetering van de opwarmingstijd. De lage geleidbaarheid in het systeem maakt de caverne echter wel tot een goed geïsoleerde ondergrondse ruimte. Dit biedt goede mogelijkheden voor ondergrondse (seizoens)opslag van warmte waarbij het verlies van warmte minimaal is in een tijdsbestek van enkele maanden. Het gepresenteerde systeem is een combinatie van de opslag in een caverne waarbij de warmte voor opslag wordt geleverd door zonthermie uit een groot aantal collectoren of door een overschot van warmte in de zomer uit een nabije geothermie bron. Uit de verkennende businesscases blijkt dat het voorgestelde systeem voor circa 1.500 aangesloten woningen mogelijk haalbaar is voor een diepe caverne indien een terugverdientijd van 10 tot 15 jaar acceptabel wordt geacht. De haalbaarheid is uitdagender voor een ondiepe caverne door een verwachte lange terugverdientijd maar wordt mogelijk interessant indien er al een lage temperatuur warmtenet aanwezig is waarop het systeem kan worden aangesloten.

5.1 Vervolgonderzoek

Op basis van de resultaten van dit onderzoek zou vervolgonderzoek zich moeten richten op de praktische haalbaarheid van opslag in een diepe caverne. De volgende zaken worden aanbevolen om te evalueren of te onderzoeken alvorens een eventuele realisatie werkelijkheid zou kunnen worden.

- Stakeholders dienen te worden geïnventariseerd, zoals de verantwoordelijke bedrijven voor de cavernes, vergunningverleners, toezichthouders etc. Middels gesprekken met deze stakeholders moet duidelijk worden welke kansen en drempels er zijn voor daadwerkelijke realisatie van een dergelijk systeem. Ook de bereidheid tot betrokkenheid van deze stakeholders dient in deze gesprekken te worden geïnventariseerd.
- Al dan niet in samenwerking met de stakeholders zal in ieder geval de effecten van een dergelijk systeem op de lange-termijn stabiliteit van de caverne onderzocht moeten worden. Voor die cavernes die maatregelen moeten nemen om instorting te voorkomen kan de uitgevoerde studie aanleiding zijn om te kijken naar een combinatie van stabilisatie van de caverne met het geschikt maken van de caverne voor warmtetoepassingen. Ook kan er worden gekeken naar stabilisatie van andere caverne geometrieën. Het vervolgonderzoek moet uitwijzen of de stabiliteit van de caverne

gegarandeerd kan worden en daarmee (bodemdalings)effecten geminimaliseerd kunnen worden tijdens de opslagperiode.

- In deze studie is voor modelmatige redenen uitgegaan van een bolvormige caverne. De cavernes in Noord-Nederland zijn echter sigaarvormig, wat mogelijk gunstig is voor de opwarmingstijd. Vervolgonderzoek moet uitwijzen of in een cilindervormige caverne, waar de afstand tot de wand korter is dan in een bol met een gelijk volume, de opwarmingstijd dusdanig kan worden versneld dat deze wordt teruggebracht tot enkele maanden.
- Daarnaast kan een cilindervorm gunstig zijn voor het in stand houden van een thermocline, wat van belang is voor de efficiëntie van het systeem. De voorwaarden voor het in stand houden van deze thermocline en de mogelijkheden om deze te stabiliseren te bevorderen moeten nader onderzocht worden. In een volgende fase kan het effect van verschillende geometrieën van de caverne op de thermocline worden onderzocht om zo de optimale vorm voor het systeem te bepalen.
- De komende jaren zal zoutexploratie in Nederland worden gecontinueerd en zullen nieuwe cavernes gecreëerd worden. Het wordt aanbevolen om in de ontwerpfase van de caverne rekening te houden met de hergebruik optie voor warmte-opslag, bijvoorbeeld door de vorm van de caverne te optimaliseren voor de warmte-opslag. Daarnaast kan er ook rekening worden gehouden met het well-design en stabilisatie van de caverne zelf.
- Vervolgonderzoek naar de juridische aspecten over (overdracht van) eigenaarschap en verantwoordelijkheden, abandonering, etc. moet aantonen dat de opslag ook juridisch mogelijk is.
- De businesscase van het systeem zoals gepresenteerd in deze studie is verkennend. In een volgende fase dienen zowel de kosten, de financieringslasten als het financieringsmodel verder onderbouwd en gespecificeerd te worden. De gehanteerde prijzen en kosten van de componenten van het systeem zijn zeer indicatief en in een eventuele vervolgstudie zouden deze inschattingen verder kunnen worden onderzocht en onderbouwd door bijvoorbeeld offertes op te vragen bij de desbetreffende partijen/bedrijven. Bij de uitwerking van een volledige business case dient ook rekening gehouden te worden met zaken als afschrijving, financiering, inflatie of overige indexeringen welke in deze studie nog niet zijn meegenomen.
- Voor de business case is informatie over verdere technische details van het well design en van de bovengrondse installaties ook essentieel.
- Ook de rolneming van partijen is van belang voor de onderbouwing van de financiering. Omdat bij verdere verdieping van de businesscase ook locatie-specifieke informatie belangrijker zal worden, met name wat betreft de afnamemogelijkheden, zal er een locatie geselecteerd moeten worden. Hierbij is de combinatie van geologische geschiktheid en de bovengrondse situatie essentieel.
- Ook de technische en praktische haalbaarheid van de installatie van een groot areaal aan zonnecollectoren en de opslagtank moet worden onderzocht. Op het zoneiland in Almere zijn al in 2.010 collectoren opgesteld met een gezamenlijk oppervlakte van 7.000 m² (anderhalf voetbalveld)[55]. Voor het diepe caverne systeem gaat het hierbij dus om een 4 tot 5 keer zo groot areaal. Indien gebruik wordt gemaakt van de daken van de aangesloten huizen betekent dit dat dit dakoppervlak niet meer beschikbaar is voor zon-PV. Al deze afwegingen moeten in overweging genomen worden in de haalbaarheidsstudie.

[55] https://energiekaart.net/initiatieven/zoneiland-almere/

- De technische uitvoering van de boringen en de bovengrondse faciliteiten dienen verder te worden onderzocht en ontworpen.
- Voor een verdere technische onderbouwing van het systeem dienen ook een aantal processen verder onderzocht te worden, zoals de voorwaarden voor het in stand houden van de thermocline (door stromingsstudies) en het effect van de pekel en de neerslag van zouten uit de pekel op de installatie (door geochemische studies). De omgang met het zeer zoute pekelwater in warmte gerelateerde apparatuur zoals warmtewisselaars en warmtepompen en effecten zoals corrosie en scaling dienen hier een onderdeel van zijn. Ook de technische haalbaarheid over de opslagtermijn dient te worden onderzocht.

Bijlagen

Bijlage 1 Bepaling van opwarming van het werkmiddel in zoutcaverne 63
Bijlage 2 Algemene achtergrond informatie 65

Bijlage 1 Bepaling van opwarming van het werkmiddel in zoutcaverne

Voor dit project is Numerical Transient Heat Conduction (NTHC) methode gebruikt voor het berekenen van de tijdsduur voor het opwarmen van een bepaalde vloeistof na het rondpompen van de vloeistof in de caverne, in Excel software. Vloeistof in de caverne wordt opgewarmd door warmteconductie via de zoutkorst. Buitenkant van de korst heeft een constante temperatuur waarvan de waarde afhankelijk is van de diepte. Parameters die de berekende tijd voor opwarming van de werkmiddelen verder beïnvloeden zijn volume, grootte, afmetingen, vorm en thermische eigenschappen van de zoutcaverne en de hoeveelheid en thermische eigenschappen van de werkmiddelen.

Volume, afmetingen en temperatuur van de caverne bepalen

Grootte en vorm

De grootte van de zoutcaverne wordt aangenomen. In dit geval zijn de aangenomen groottes 200.000 (Twente) en 500.000 m^3 (Noord-Nederland) voor de ondiepe en diepe zoutcaverne respectievelijk.
Diameter van de zoutcavernes zijn berekend met de formule van de bol met als aanname dat de zoutcavernes bolvorming zijn. Diameter is twee keer de straal (parameter 'r')

$$V_{caverne} = \frac{4}{3} * \pi * r^3$$

Vergelijking 1 – Volume van de caverne

De radii van de ondiepe en diepe zoutcaverne zijn respectievelijk 36,28 en 49,24m. Om de zoutcavernes heen is er een zoutkorst. De zoutkorst is overal 50m. Daarna zijn de lengte van de diameter van de zoutcaverne opgesplitst over 15 Excelcellen en een Excelcel waar water wordt ingepompt. De aangenomen diameter voor de cel waar water wordt ingepompt is ongeveer 0,2m. Elke cel bootst een deel van de temperatuur van de zoutcaverne na en in deze cellen zijn de temperaturen aangeven, zie Vergelijking 2 voor de lengte berekening van elke cel.

$$\text{Lengte cel in de caverne} = \frac{\text{Diameter caverne} - \text{ lengte cel van waterinflow}}{15}$$

Vergelijking 2 – Lengte van de cel nagebootst t.o.v. de zoutcaverne

Elke Excelcel voor de ondiepe en diepe zoutcaverne heeft een lengte van respectievelijk 2,405 en 3,27 m.
Dikte van de zoutkorst is opgesplitst in vijf cellen, elke Excel-cel is dus 10 m.

Temperatuur

De temperatuur van de buitenrand van de korst heeft een constante temperatuur van 24°C voor de ondiepe en 80°C voor de diepe zoutcaverne. De geselecteerde retourtemperaturen van een bepaalde vloeistof voor de ondiepe en diepe zoutcaverne zijn respectievelijk 15°C en 40°C.

Numerical transient heat conduction

NTHC wordt gebruikt voor het berekenen van de temperatuur in een Excel cel over de tijd. De gebruikte formule is het 'omgebouwde warmtevergelijking'. Deze temperatuur geeft aan hoe warm het is in een bepaalde deel van de zoutcaverne in doorsnede.

De omgebouwde warmtevergelijking is van de literatuur[56] genomen. In de literatuur is ook een extra energiebron 'E1' aangegeven, maar deze parameter is verwaarloosd, omdat er geen extra externe bron is ingezet voor warmteproductie. De literatuur heeft Vergelijking 3 afgeleid vanuit de algemene warmtevergelijking.

$$T_{ij+1} = \frac{\alpha * \Delta t}{\Delta x_s^2}\left[T_{i+1,j} - 2T_{ij} + T_{i-1,j}\right] + T_{ij}$$

Vergelijking 3 – Gemodificeerde warmtevergelijking voor het berekenen van de temperatuur

T_{ij+1}	=	Nieuwe temperatuur node ij (volgende tijdstap)	[°C]
T_{ij}	=	Huidige temperatuur node ij	[°C]
$T_{i-1,j}$	=	Huidige temperatuur node i-1, j	[°C]
$T_{i+1,j}$	=	Huidige temperatuur node i+1, j	[°C]
α	=	Alfa (combinatie van thermische eigenschappen)	[s/m^2]
Δt	=	Tijdsstap	[uur]
Δx_s	=	Dikte materiaal per Excel cel	[m]

Time step	Temperature		
0	Ti-1,j	Tij	Ti+1,j
1		Tij+1	

Tabel 14 Overzicht van de nodes

Node T_{ij+1} (tijdstap 1) is afhankelijk van de temperatuur T_{ij} en de temperaturen links en rechts van T_{ij} van tijdstap 0.

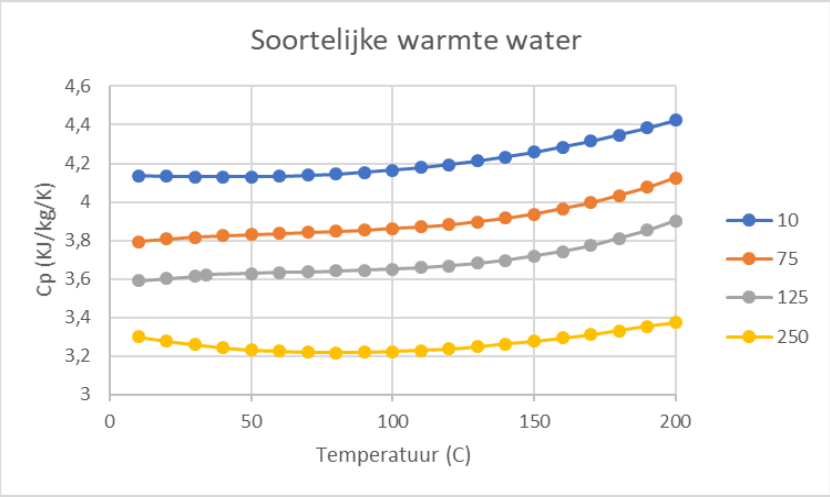
$$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p}$$

Vergelijking 4 – Alpha

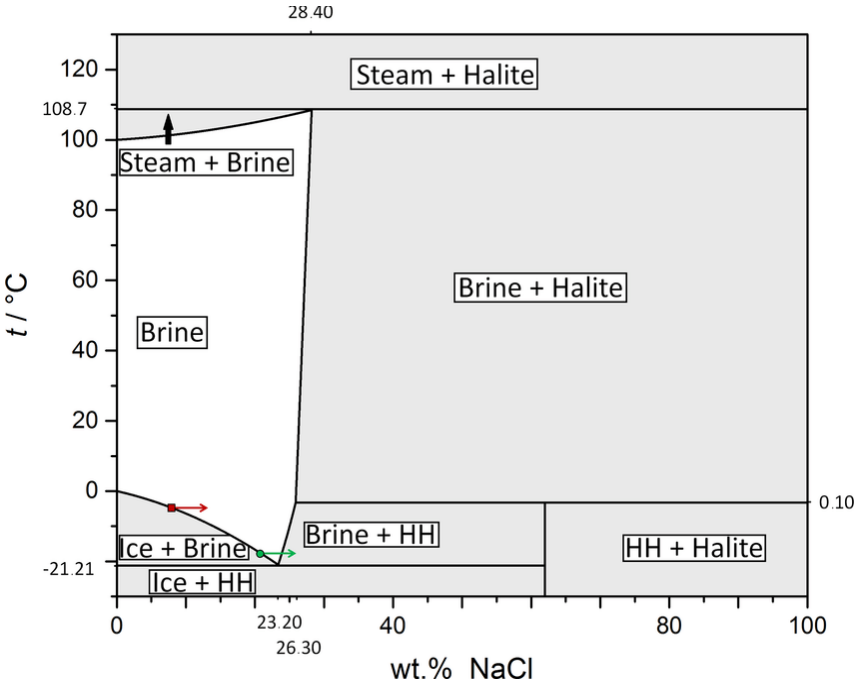
k	=	Thermische geleidbaarheid	[W/m*°C]
ρ	=	Dichtheid	[kg/m^3]
C_p	=	Warmtecapaciteit	[J/kg*°C]

[56] http://www.ams.org/journals/mcom/1960-14-072/S0025-5718-60-99228-0/S0025-5718-60-99228-0.pdf

Bijlage 2 Algemene achtergrond informatie



Figuur 30 Warmtecapaciteit van water als functie van de saliniteit van het water. Bron: doublet calc. https://www.nlog.nl/sites/default/files/tno%202012%20r10846%20handleiding%20doubletcalc14.pdf



Figuur 31 De verticale lijn tussen brine en brine+halite geeft aan dat binnen het temperatuurbereik van deze toepassing, de invloed van de temperatuur relatief beperkt is op de oplosbaarheid/neerslag van zout in pekel [57].

[57] https://www.researchgate.net/figure/The-phase-diagram-for-a-water-NaCl-system-Indicated-red-and-green-arrows-are-our_fig4_317116525