

KWR 2024.008 | Januari 2024

Opwarming grondwater door warmteuitstraling vanuit geothermieput bij Trias-Westland

Tussentijdse interpretatie temperatuurmetingen

Beeld voorkant

Bron: <https://www.allesoveraardwarmte.nl>

Colofon

Opwarming ondergrond door warmteuitstraling vanuit geothermieput bij Trias-Westland

Interpretatie tussentijdse temperatuurmetingen

KWR 2024.008 | Januari 2024

Opdrachtnummer

404632

Projectmanager

ir. M. L. (Martin) van de Schans

Opdrachtgever

EBN

Auteurs

dr. E. T. (Enno) de Vries, dr. N. (Niels) Hartog

Kwaliteitsborger

dr. N. (Niels) Hartog

Verzonden naar

H. (Henk) van Lochem (EBN)

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het adviesproject. KWR zal zich onthouden van verspreiding van dit rapport en het rapport derhalve niet verstrekken aan derden, tenzij partijen anders overeenkomen. Opdrachtgever is gerechtigd het rapport te verspreiden mits KWR daarvoor vooraf toestemming heeft verleend. Aan de toestemming voor de verspreiding van (onderdelen van) het rapport kan KWR voorwaarden verbinden.

Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectuele- en industriële eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Keywords

warmteuitstraling, thermische uitstraling, geothermie, DTS-metingen, glasvezelkabels

[Jaar van publicatie](#)
2024

Meer informatie

dr. Enno de Vries
T +31 (0)30 6069744
E enno.de.vries@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl



Januari 2024 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

In Nederland wordt geothermie, of aardwarmtewinning, toegepast door water met een temperatuur van 80-90°C vanaf een diepte van 2-3 kilometer naar boven te pompen. Dit warme water wordt gebruikt voor duurzame verwarming van bijvoorbeeld kassen of gebouwen. Eerder modelonderzoek heeft aangetoond dat het warmteverlies bij het omhoog pompen van water kan leiden tot opwarming van ondiepe bodemlagen en grondwater rond de geothermieput, met mogelijke gevolgen voor de grondwaterkwaliteit.

Om beter inzicht te krijgen in de opwarming van de ondergrond en het grondwater, is bij de productieput van het geothermiesysteem Trias Westland een meetinstallatie geplaatst in kader van het KIRA programma (Kennis- en Innovatie Roadmap Aardwarmte). Deze installatie maakt gebruik van Distributed Temperature Sensing (DTS) kabels om de temperatuur van het grondwater te monitoren over de diepte op 3 locaties op 6, 9 en 63m vanaf de productieput. Voor het in deze rapportage beschreven onderzoek zijn de resultaten van de eerste 5 monitoringsmomenten van september 2021 tot oktober 2023 geanalyseerd in combinatie met productiedata en temperatuurmetingen tussen de surface casing en de conductor. Resultaten laten zien dat sinds de start van de warmteproductie in juli 2019 er een duidelijke opwarming van de ondergrond heeft plaatsgevonden, met temperaturen tot 34 °C op 6 meter afstand en 30 °C op 9 meter afstand na <4 jaar productie, wat 20-25 °C hoger is dan de referentiemeting op 63 meter afstand. De verspreiding van het warmteverlies uit de put wordt bepaald door conductie en convectie. De sterke verticale variatie in temperatuur wordt verklaard door de gelaagdheid van de ondergrond, waarbij convectiecellen ontstaan in de zandige eenheden door dichtheidsstroming en opwarming, terwijl conductie dominant is in de kleiige eenheden. Door de gevormde convectiecellen zijn de bovenzijden van de watervoerende pakketten relatief warmer dan aan de onderzijde. Door de hogere temperaturen aan de bovenzijde van de watervoerende pakketten wordt de onderzijde van de kleiige eenheden extra verwarmd door conductie. Variaties in productie en stops hebben snelle veranderingen in de temperatuur van de buitenste casing van de put veroorzaakt, wat zich vertaalt in temporele variaties tussen de meetmomenten.

De locatie-specifieke condities van de put, productie en ondergrond bepalen sterk de gedetailleerde ontwikkeling van de warmteverspreiding. De beschikbare gegevens maken het mogelijk om een gekalibreerd thermisch verspreidingsmodel te creëren voor deze locatie, en de resterende meetmomenten zullen bijdragen aan de toetsing en verdere verfijningen. Dit model kan worden toegepast om de verwachte ontwikkeling van de opwarming van de ondergrond te bepalen, niet alleen voor dit project maar ook als basis voor inzichten bij andere geothermieputten en vergelijkbare warme putten zoals hoge temperatuur opslag.

Inhoud

Colofon	2
Samenvatting	3
Inhoud	4
1 Inleiding	5
2 Methode	7
3 Resultaten en Discussie	8
3.1 Variatie in waargenomen opwarming met diepte en afstand van de productieput	8
3.2 Waargenomen ontwikkeling van opwarming over tijd	10
3.2.1 <i>Temperatuurveranderingen door variatie in productie</i>	10
3.2.2 <i>Temperatuur veranderingen in de ondergrond door de productie-intervallen</i>	11
3.3 Reflectie op veldobservaties Trias-Westland aan de hand van eerdere modelstudies	12
4 Conclusie	14
I Bijlage	15
Referenties	16

1 Inleiding

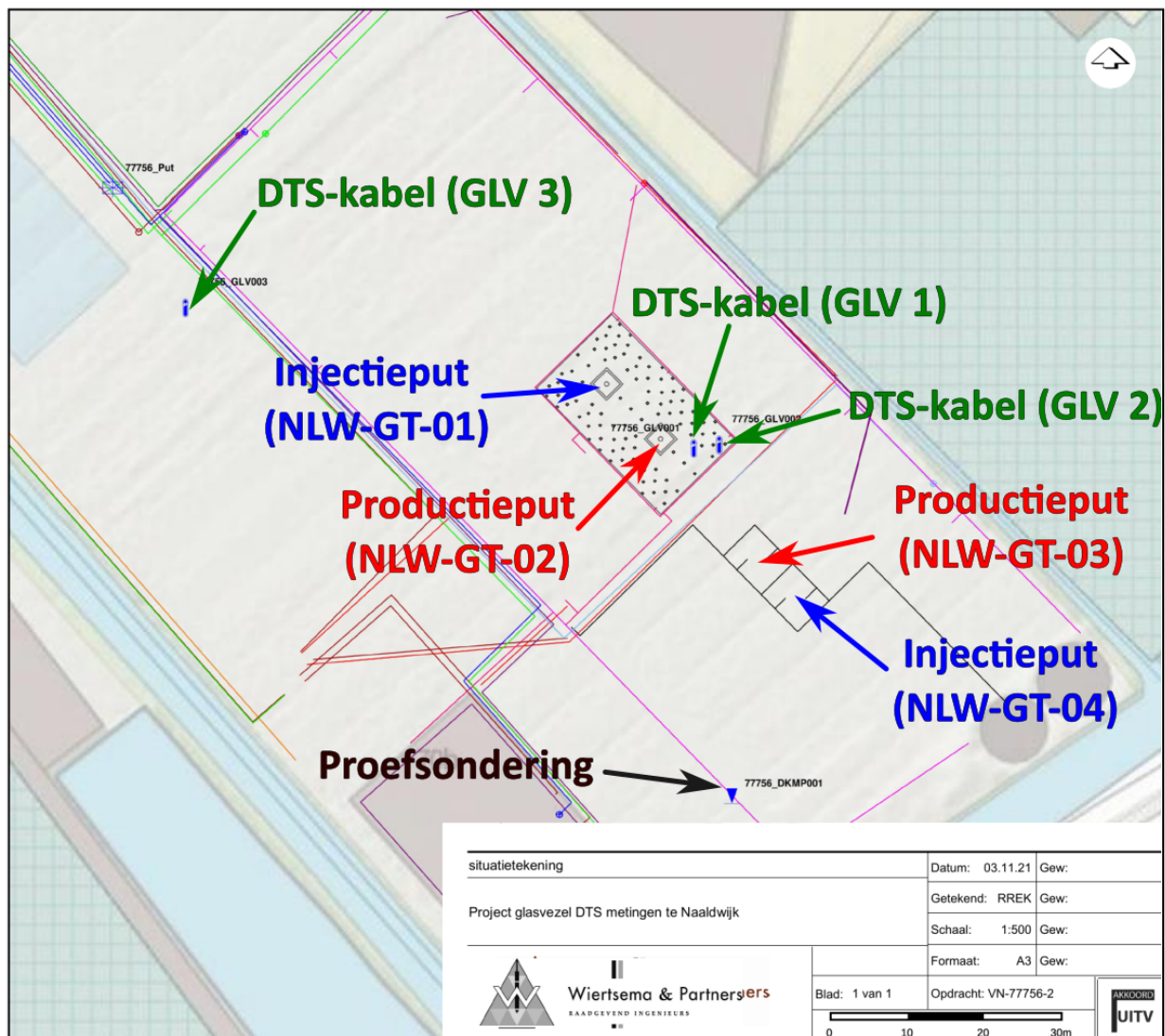
Bij geothermie of aardwarmtewinning in Nederland wordt vanaf een diepte van twee á drie kilometer water met een temperatuur van 80 á 90 °C door een put omhoog gepompt. Hiermee kunnen bijvoorbeeld kassen of gebouwen duurzaam worden verwarmd. Bij het omhoog pompen van het warme water zorgt warmtegeleiding via de verbuizing voor een relatief klein warmteverlies. Eerdere studies hebben modelmatig laten zien dat de accumulatie van dat warmteverlies door warmteuitstraling kan leiden tot de opwarming van de ondiepe bodemlagen en het grondwater rond een geothermieput (Van Lopik et al., 2015; Van Lopik & Hartog, 2023). Deze opwarming kan verder resulteren in verandering in de grondwaterkwaliteit.

Om vanuit de geothermiepraktijk beter inzicht te krijgen in hoe veel en hoe snel de ondergrond en het daarin aanwezige grondwater opwarmt door het warmteverlies via de verbuizing, is, als onderdeel van het KIRA programma (Kennis- en Innovatie Roadmap Aardwarmte), in 2021 op het terrein van het sinds juli 2019 actieve geothermiesysteem Trias Westland in Naaldwijk een meetinstallatie aangelegd voor het monitoren van de temperatuur van het grondwater. Hiervoor zijn er nabij de productieput (NLW-GT-02) drie glasvezelkabels, ook wel bekend als Distributed Temperature Sensing (DTS) kabels, in de ondergrond aangebracht tot maximaal een diepte van 63 meter. Deze glasvezels bevinden zich op afstanden van 6, 9 en 63 meter van deze productieput. Hiermee kan getoetst worden in hoeverre op deze locatie opwarming van de ondergrond daadwerkelijk optreedt en welke factoren de thermische effecten beïnvloeden. Ook wordt het met de op deze locatie verzamelde gegevens voor het eerst mogelijk om tot een gekalibreerd model te komen die de verdere ontwikkeling van thermische effecten van de warmteuitstraling in de ondiepe ondergrond kan inschatten en die voor de condities bij andere geothermieprojecten kan anticiperen (EBN & Wiertsema & Partners, 2022).

De afgelopen jaren heeft EBN samen met Wiertsema & Partners B.V. op een aantal momenten de eerste gedetailleerde glasvezelkabelmetingen binnen het KIRA project uitgevoerd om de verticale temperatuurprofielen op de monitoringslocaties in de ondergrond te bepalen. De ruwe data en bijbehorende rapportages van Wiertsema & Partners zijn online beschikbaar gesteld door EBN als onderdeel van het KIRA programma (EBN & Wiertsema & Partners, 2022).

Op verzoek van EBN heeft KWR de beschikbare monitoringsdata verwerkt en geïnterpreteerd. Voorliggende rapportage, beschrijft dat onderzoek en de daarbij verkregen inzichten. Specifiek is er gekeken in hoeverre de waargenomen thermische effecten kunnen worden verklaard aan de hand locatie-specifieke factoren, zoals de bodemopbouw en operationele condities van het Geothermiesysteem Trias-Westland.

Het geothermiesysteem Trias-Westland, gelegen nabij Naaldwijk, bestaat uit de productieput NLW-GT-02 en de injectieput NLW-GT-01 (Figuur 1). De productieput NLW-GT-02 produceert sinds juli 2019 water met een temperatuur van rond de 85 °C uit de Delft zandsteen op een diepte van ongeveer 2400 meter met een gemiddelde productie van 290 kubieke meter per uur). De put bestaat uit een 30" conductor (die reikt tot 134m), een gecementeerde 20" surface casing (die reikt tot 1076m) en een 13-3/8" Glassfiber Reinforced Epoxy piping (GRE) (Trias Westland B.V., 2020). GRE buizen zijn gebruikt omdat deze corrosiebestendig zijn en een hogere thermische weerstand hebben dan stalen buizen. Op dezelfde locatie bevindt sinds juli 2020 op 20m afstand van NLW-GT-01/02 een tweede doublet, NLW-GT-03/04 (Figuur 1) Dit doublet produceert warmte sinds juli 2021. De DTS-kabels GLV1 (77756_GLV001) en GLV2 (77756_GLV002) zijn ten oosten van de put geplaatst, in de waarschijnlijke richting van de regionale grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket als gevolg van de waterwinning in Delft (Wiertsema & Partners, 2021a), op respectievelijk 6 en 9 meter afstand van de put. De referentie DTS-kabel GLV3 (77756_GLV003) bevindt zich op 63 meter in noordwestelijke richting (Figuur 1). GLV1 is geplaatst tot halverwege het 2^{de} watervoerende pakket (Figuur 2). Bij navraag bleek dat er bij de plaatsing van DTS-kabel GLV2 een sondeerstreng is achtergebleven tussen 20 en 56 meter –NAP (Figuur 2). GLV3 is geplaatst tot aan de onderkant van het 1^{ste} watervoerende pakket.

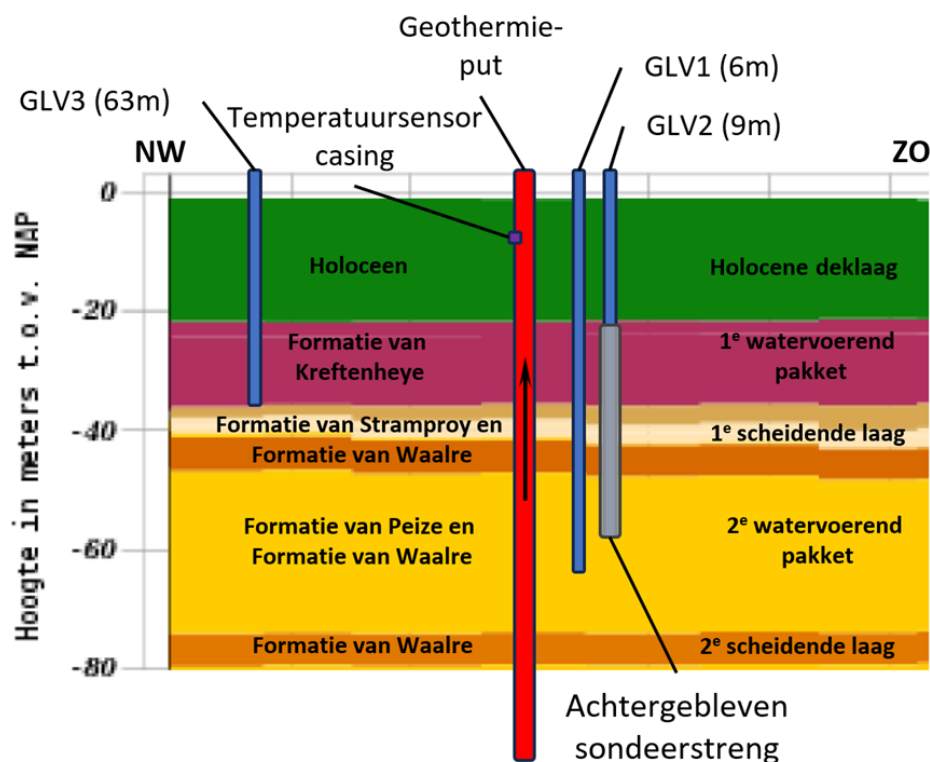


Figuur 1. Overzicht van de locatie van het Trias-Westland geothermiesysteem 1 (NLW-GT-01 en 02) en 2 (NLW-GT-03 en 04), aangepast van Wiertsema & Partners (2021b).

2 Methode

Het in dit rapport beschreven onderzoek naar de opwarming van het grondwater rond de productieput bij het Trias-Westland geothermiesysteem heeft gebruik gemaakt van de ruwe DTS temperatuurdata, zoals verkregen door Wiertsema & partners B.V., Geotechnisch onderzoek (Wiertsema & Partners, 2021b, 2022, 2023c, 2023b, 2023a). In aanvulling daarop zijn de productielogs van het geothermiesysteem op Nlog en is de productie info van NLW-GT-02 met gebeurtenissen, zoals bijgehouden door de beheerder van het geothermiesysteem gebruikt. In dit onderzoek hebben wij de periode van september 2021 tot augustus 2023 beschouwd. In die periode zijn ongeveer eens per half jaar de drie DTS-kabels, op verschillende afstanden van de productieput (6, 9 en 63m, Figuur 2), door Wiertsema & Partners uitgelezen. Per meetmoment zijn op elke locatie de DTS-kabels meerdere keren uitgelezen, resulterend in meerdere temperatuur metingen over de diepte (1 temperatuurmeting elke 25 cm) gedurende enkele minuten. De temperatuurverschillen tussen deze metingen bleken erg klein (<0.1 °C) en in dit onderzoek is per diepte de gemiddelde temperatuur gedurende die minuten gebruikt. Het verschil tussen de verticale temperatuurprofielen op de verschillende meetmomenten is gebruikt om de snelheid van de temperatuurveranderingen (dT/dt) tussen de opvolgende metingen te bepalen. Ook is gebruik gemaakt van de ieder uur geregistreerde temperatuur van de sensor die bij aanleg van de put geplaatst is op 7 m diepte in het stilstaande water tussen de buitenste surface casing en de conductor (Figuur 2). Daaronder is de annulaire ruimte tussen de conductor en de casing gevuld met cement.

Aanvullend inzicht in de lokale condities in de ondiepe ondergrond zijn verkregen uit de door de Wiertsema & partners gerapporteerde sondering en dissipatietest (Wiertsema & Partners, 2020) en bureaustudie grondwaterstroming (Wiertsema & Partners, 2021a, Bijlage I, Tabel 1 en Tabel 2).



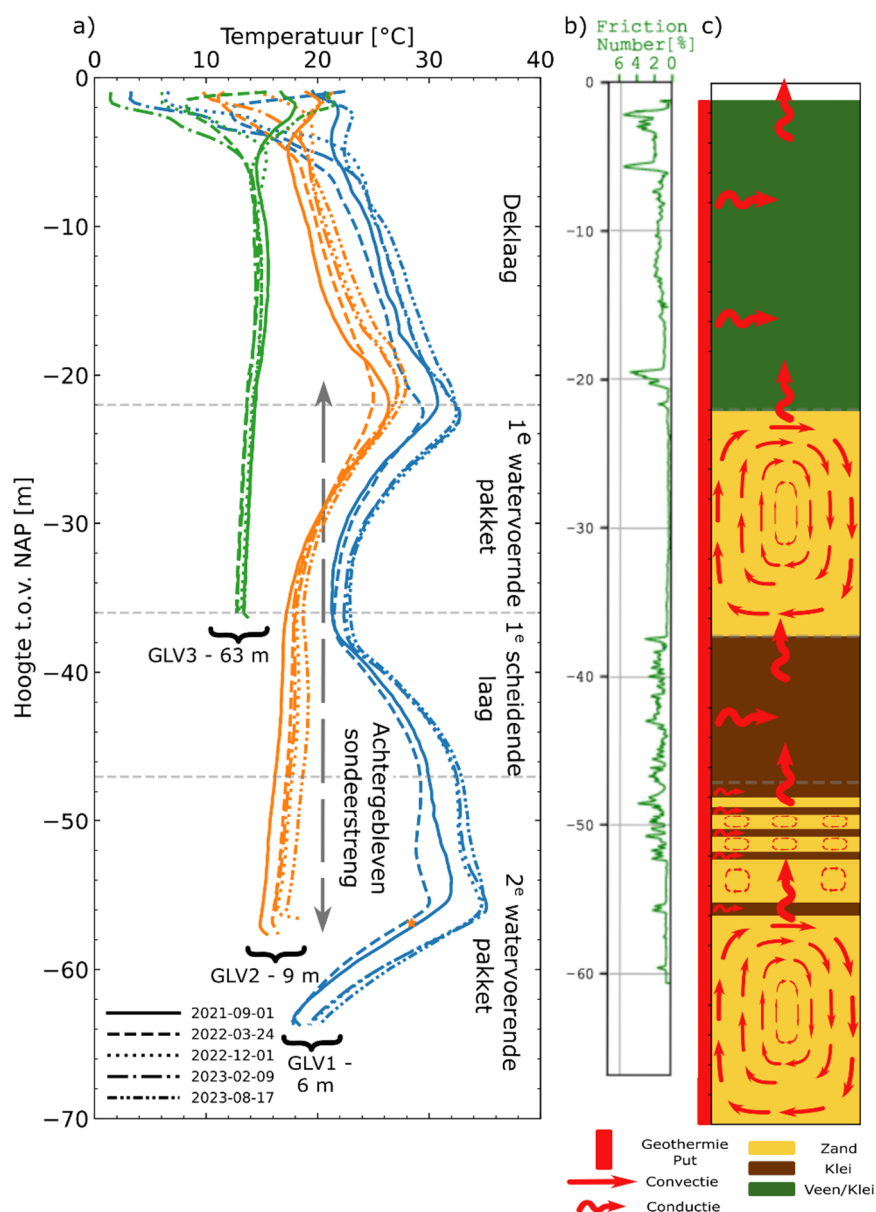
Figuur 2. Schematische ondiepe hydrogeologische dwarsdoorsnede voor het Trias-Westland geothermiesysteem en de temperatuurmonitoring. Blauw: de DTS-kabels, rood: geothermie-put, grijs: achtergebleven sondeerstreng, paars: temperatuursensor die zich op 7 m diepte bevindt tussen buitenste surface casing en de conductor. De formaties en hydrogeologische eenheden (REGIS II v2.2) zijn aangeven zoals omschreven (Wiertsema & Partners, 2021a).

3 Resultaten en Discussie

3.1 Variatie in waargenomen opwarming met diepte en afstand van de productieput

De DTS temperatuurdata laten duidelijk opwarming van het grondwater rond de productieput zien voor alle meetmomenten (Figuur 3), met de sterkste opwarming bij de DTS locatie het dichtstbij de put (6m, GLV1). Voor deze meetlocatie was de maximale temperatuur 34.8 °C op een diepte van 54.8m –NAP in GLV1 (Figuur 1). Een opwarming van circa 20 °C ten opzichte van de waargenomen temperatuur op diepte (14 °C) in de referentiemeting op 63m afstand (GLV3). De waargenomen temporele temperatuurvariatie in het ondiepe deel (tot 10m –NAP) van deze referentielocatie correspondeert met seizoensgebonden variatie tussen de meetmomenten. De verticale temperatuurvariatie bij GLV2 op 9m afstand van de productieput laat een vergelijkbaar patroon zien, met een ongeveer 4 °C lagere temperatuur dan bij GLV1 met een maximale temperatuur van 27.9 °C op een diepte van 20.8m –NAP (a). Zowel bij GLV1 als bij GLV2 bevinden de thermische gradientomkeringen zich ongeveer ter hoogte van de overgangen tussen de geohydrologische eenheden. In tegenstelling tot GLV1, is bij GLV2 de temperatuur relatief constant in het bereik dieper dan 36m –NAP, deze worden mogelijk beïnvloed door de aanwezigheid van de achtergebleven sondeerstreng (Figuur 2). Het algemene beeld van de verticale temperatuur variatie bij GLV1 en GLV2 geeft aan dat in de scheidende lagen de temperatuur toeneemt met diepte, terwijl de temperatuur afneemt met diepte in de watervoerende pakketten. Dat laatste geeft aan dat naast conductie, in de goed doorlatende lagen ook dichtheidsstroming bijdraagt aan het warmtetransport, waar als gevolg van de dichtheidsverlaging door opwarming van het grondwater rond de put een opwaartse convectiestroming ontstaat (van Lopik et al., 2015 en van Lopik & Hartog, 2023). De observaties bij Trias-Westland geven dus aan dat opgewarmd grondwater nabij de productieput omhoog stroomt in het eerste en tweede watervoerende pakket en vervolgens respectievelijke de onderkant van de bovenliggende afscheidende laag en de deklaag opwarmt (Figuur 3a). Het enigszins afgekoelde grondwater stroomt dan op grotere afstand van de put waarschijnlijk weer neerwaarts als onderdeel van een thermische convectiecel die door de opwarming vanuit de productieput inmiddels ontstaan is. Dit verklaart de wat lagere, maar nog steeds verhoogde temperaturen, onderin beide watervoerende pakketten (Figuur 3a). De warmte in de opgewarmde onderkant van de scheidende laag wordt hierbij door conductie getransporteerd naar de bovenkant van de scheidende laag en in de deklaag vergelijkbaar door conductie richting maaiveld. Bovenin het tweede watervoerende pakket valt op dat de temperatuur bij GLV1 relatief constant over de diepte is (observaties bij GLV2 zijn in dit dieptebereik beïnvloed door de achtergebleven sondeerstang), afwijkend van zowel de voor watervoerende pakketten verwachte afname van temperatuur met diepte, maar ook met de toenemende temperatuur zoals geobserveerd voor de scheidende laag en deklaag (Figuur 3a). Waarschijnlijk wordt dit verklaard door het hier aanwezig zijn van een relatief heterogene afwisseling van zand en kleilagen zoals geobserveerd in dit bereik bij de proefsondering (Wiertsema & Partners (2020), Figuur 3b, Tabel 2), waarbij verhoogde frictiegetallen wijzen op de aanwezigheid van kleilagen van afgewisseld door zandlagen (frictiegetal: 0) van geringe dikte in dit bereik. Deze condities verhinderen de vorming van grote convectie cellen zoals in wvp 1 en het onderste deel van wvp2. In plaats daarvan wordt de relatief hoge en constante temperatuur waarschijnlijk veroorzaakt door de vorming van kleine convectiecellen die voor relatief snel en effectief warmtetransport door de dunne zandlagen en voor opwarming door conductie van de dunne tussenliggende kleilagen zorgen (Figuur 3c). Over het geheel genomen lijken de effecten van convectiestroming in de goed doorlatende watervoerende pakketten de verticale temperatuurvariatie te domineren die zorgt voor opwaarts warmtetransport nabij de put en een netto opwarming bovenin. In de slecht doorlatende, scheidende lagen zorgt conductie voor opwaarts warmtetransport van de opgewarmde onderkant naar de bovenliggende goed doorlatende laag of maaiveld (Figuur 3c).

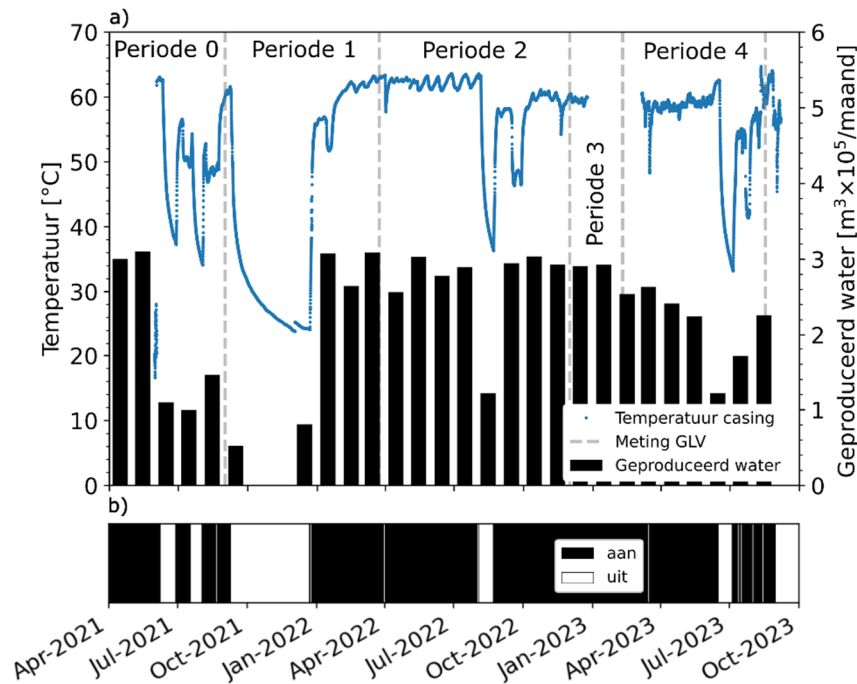
Contrastrerend met het patroon van thermische gradientomkeringen bij GLV1 en in het ondiepe deel van GLV2, is er op diepte bij GLV2 een relatief constant temperatuurprofiel (>36m –NAP) vanaf de bovenkant van de eerste scheidende laag tot in het tweede watervoerende pakket. Dit wordt waarschijnlijk verklaard doordat de in dit dieptebereik achtergebleven sondeerstreng (Figuur 2) zorgt voor kortsluitstroming van het eerste naar het tweede watervoerende pakket, in de richting van het stijghoogteverschil tussen deze twee pakketten (Wiertsema & Partners, 2021a). Hierdoor stroomt waarschijnlijk relatief koeler grondwater door de sondeerstreng langs de DTS-kabel vanaf de onderkant van het eerste watervoerend pakket, door de scheidende laag tot aan de onderkant van de achtergebleven sondeerstreng naar het tweede watervoerende pakket (Figuur 3a). Dat de temperatuur in het tweede watervoerende pakket buiten de sondeerstreng in werkelijkheid hoger is kan ook verklaren dat tijdens de meting van 1 December 22 vlakbij de onderkant van de glasvezelkabel naar boven toe uitschiet naar 28.4°C (Figuur 3a), en een meer realistisch werkelijk verschil (5°C) geeft met de temperatuur van GLV1 op die diepte (33.4°C). De drie diepste temperatuurmetingen toen (55.6 °C, 134.3°C en 0.0°C) zijn mogelijk het gevolg van kabelbeschadiging en zijn daarom in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten.



Figuur 3. a) De DTS-temperatuurmetingen voor de 5 meetmomenten voor GLV1 (afstand 6m), GLV2 (afstand 9m) en de referentiemeting GLV3 (afstand 63m) met de grenzen van de geohydrologische eenheden b) het frictiegetal over diepte van de proefsondering (Wiertsema & Partners, 2020), c) conceptuele interpretatie van geïdentificeerde warmtetransportprocessen. Een op 1 December 2022 gemeten uitschieter onderaan GLV2 (28.4 °C) is apart weergegeven als oranje ster.

3.2 Waargenomen ontwikkeling van opwarming over tijd

Naast de sterke afname van de opwarming met toenemende afstanden vanaf de productieput (Figuur 3a), waren er ook verschillen tussen de opeenvolgende meetmomenten, vooral voor de dichtstbijzijnde monitoringslocatie GLV1 (6m). Naast de te verwachte toename in opwarming door de accumulerende warmteverliezen tijdens productie (Van Lopik et al., 2015), zijn er tussen meetmomenten ook afnames in temperaturen waargenomen. Deze afnames vallen samen met periodes waar de productie door het geothermiesysteem (deels) stil heeft gestaan (Figuur 4).



Figuur 4. a) Temperatuurmeting aan de buitenzijde van de productieput (casing) van de winningsput (linker y-as), gestippelde grijze lijn geeft de tijdstip aan wanneer de DTS-kabels zijn uitgelezen en maandelijkse geproduceerd water, volgens Nlog, op rechter y-as, b) toont op basis van de productielog gedetailleerder in de tijd aan wanneer de productie actief (zwart) of inactief (wit) was, signaal geïnterpreteerd uit productie info, Kira GWTM project.

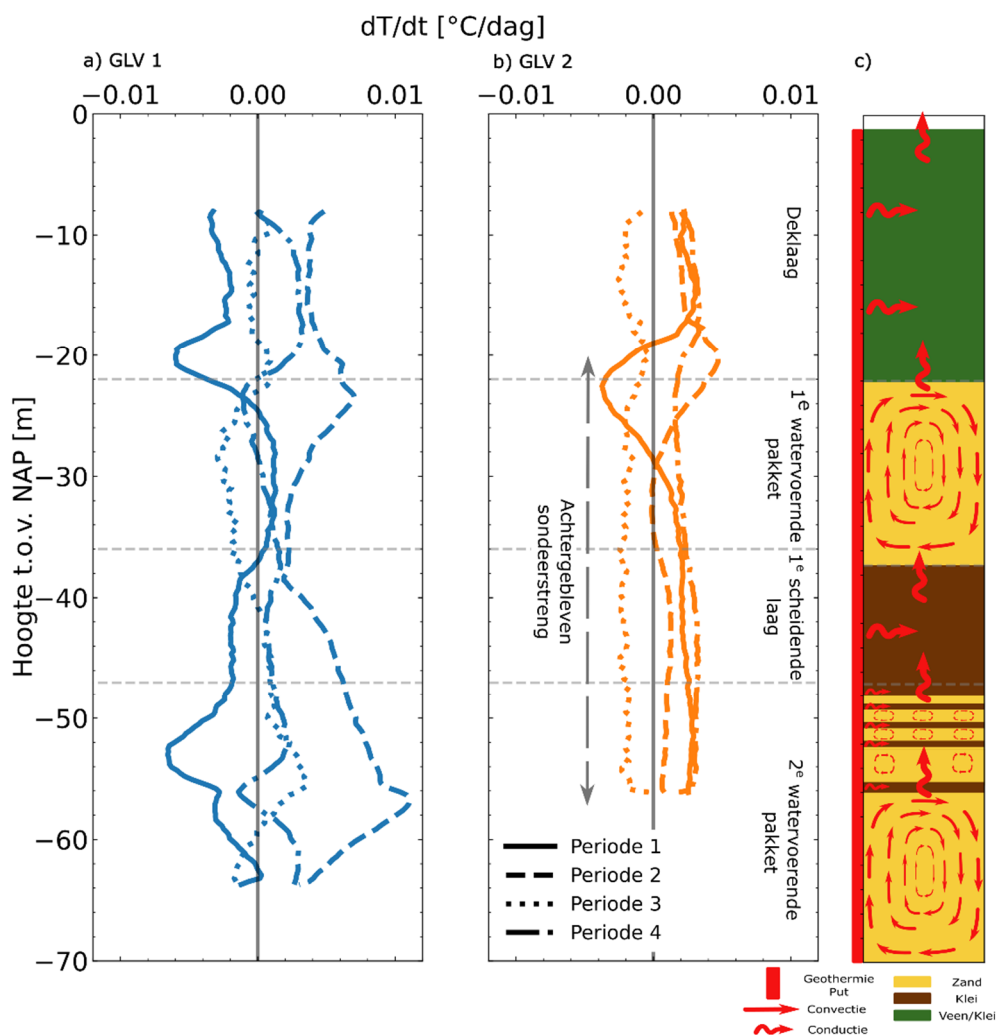
3.2.1 Temperatuurveranderingen door variatie in productie

In de periode vlak na het eerste meetmoment in begin september 2021 tot eind december 2021 (deel van Periode 1) was er deels geen productie als gevolg van onderhouds- en reparatiewerkzaamheden aan de productieleiding. De invloed hiervan is het sterkst terug te zien in de waargenomen temperatuur aan de buitenzijde van de productieput (Figuur 4a) die snel en initieel sterk daalde naar 30 °C, waarna deze geleidelijk afnam tot 24 °C tegen het einde van de productieonderbreking. Bij het hervatten van de productie neemt de temperatuur vrijwel instantaan toe tot ongeveer 64 °C, wat de gestabiliseerde temperatuur voor deze casing lijkt bij de productietemperatuur van 85 °C. Een vergelijkbaar patroon in de temperatuur buiten de surface casing is te zien bij de overige productie onderbrekingen, die korter waren waardoor de temperatuur even snel maar minder ver daalde. In periode 3 ontbreekt een deel van de data, maar uit de maandelijkse productiedata (Figuur 4) valt af te leiden dat de productie relatief stabiel was

Dat de temperatuur van het door de put geproduceerde water (85°C) 20 tot 25°C hoger is dan de maximale, temperatuur (~64 °C), gemeten bij actieve productie, tussen de surface casing (20 inch of 50.8 cm) en de conductor (30 inch of 76.2cm) geeft een indicatie van de sterkte van het radiale warmteverlies naar de omringende ondergrond. Op grotere afstand in de omringende ondergrond, bij de DTS locaties op 6m en 9m, zijn de temperaturen over de diepte op de meetmomenten (tijdens actieve productie, Figuur 3a) zoals verwacht beduidend lager dan gelijktijdig gemeten op de surface casing (Figuur 4a).

3.2.2 Temperatuur veranderingen in de ondergrond door de productie-intervallen

De aangetroffen opwarming van de ondergrond bij het eerste DTS meetmoment in September 2021 (Figuur 3a, Figuur 4a) geeft een indicatie van het warmtetoeename dat heeft opgetreden tijdens de grotendeels continue productie sinds de start van het geothermiesysteem in juli 2019 (periode 0). Naast de beschreven snelle verlaging van de casing temperatuur bij het stil vallen van de productie tijdens periode 1 (Figuur 4a), nam met name in de dichtst bij de put gelegen DTS locatie (GLV1, 6m) de temperatuur over de diepte grotendeels ook af (Figuur 5). Opvallend is dat deze temperatuurverlaging vooral aan de bovenkant van het watervoerende pakket en de onderkant van de bovenliggende scheidende laag plaatsvond, zoals ook de temperatuurverlaging onderin de deklaag bij GLV2 (6m) liet zien (het onderste deel van GLV2 is beïnvloed door de achtergebleven sondeerstreng). Dat de temperatuurverlaging met name op deze overgangen plaatsvond heeft waarschijnlijk te maken met de actieve convectiecel (Figuur 5c) die tijdens actieve productie daar voor lokaal sterkere verhoogde temperaturen zorgde. Omdat de casing temperatuur snel afnam tijdens de langdurige productiestop in periode 1 stakte waarschijnlijk ook de aandrijving van deze convectiecel en conductie zorgde voor het afvoeren van een deel van de lokaal geaccumuleerde warmte. De vervolgens grotendeels actieve productie tijdens periode 2 zorgde voor algehele opwarming over de diepte, wederom met name nabij de overgang tussen de bovenkant van de watervoerende pakketten en de bovenliggende scheidende laag dan wel deklaag, door het weer actief zijn van de convectiecel (Figuur 5c). Over het geheel genomen illustreren de waargenomen temperatuurveranderingen de impact en dynamiek van de convectiestromen in het transporteren van het warmteverlies uit de put en het verspreiden van deze warmte in de ondergrond.



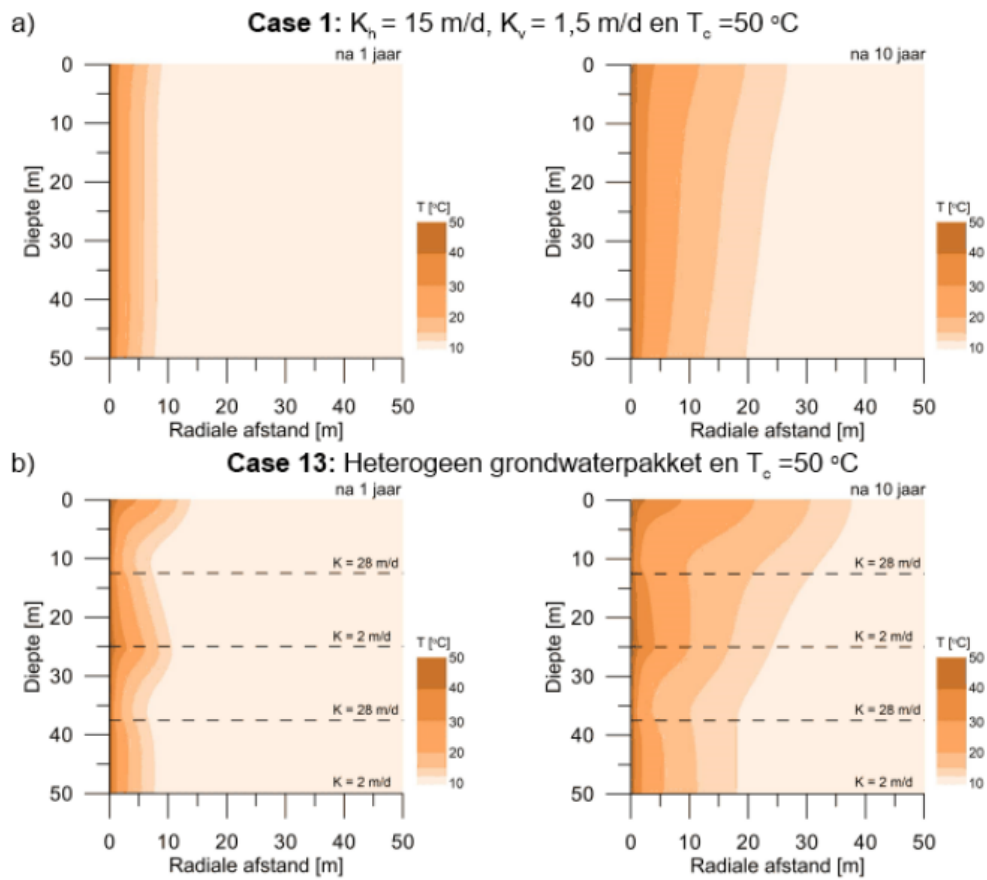
Figuur 5. De opwarmingsnelheid over de diepte voor a) GVL1 (afstand 6m), b) GVL2 (afstand 9m). En c) conceptuele interpretatie van geïdentificeerde warmtetransportprocessen. De opwarmingsnelheid is berekend op basis van het verschil in de temperatuur op een bepaalde diepte tussen 2 meetmomenten en zijn aangegeven als perioden 1, 2, 3 en 4 (Figuur 4).

3.3 Reflectie op veldobservaties Trias-Westland aan de hand van eerdere modelstudies

De veldobservaties van opwarming van de ondergrond rondom de productieput van geothermiesysteem Trias-Westland komen in grote lijnen overeen met de inzichten uit eerdere generieke modelstudies naar de verspreiding van warmteverliezen uit putten (Van Lopik et al., 2015; Van Lopik & Hartog, 2023). Als randvoorwaarde voor het warmteverlies naar de ondergrond nemen deze modelstudies een bepaalde constante temperatuur in de verticaal aan voor de buitenkant van de conductor (T_c =effective outer well casing temperature). Op basis van de snelle response bij start van productie en de redelijk constante casing temperatuur (max. ~ 64 °C) bij Trias-Westland voor maanden waar de productie (vrijwel) constant bleef (Figuur 4) is deze aanname redelijk. Waar de generieke simulaties van Van Lopik et al. (2015) een brede temperatuurrange van 40 °C tot 100 °C als randvoorwaarde beschouwden, illustreren de Trias-Westland casing metingen duidelijk dat in de praktijk de specifieke hoogte van deze temperatuur naast de combinatie van de productietemperatuur en thermische eigenschappen van de put, ook sterk afhangen van de mate van thermische dissipatie en de mate van productie(in)activiteit. Om te bepalen in hoeverre het gebruik van bv. een tijdsgemiddelde casing temperatuur een aanvaardbare versimpelende aanname zou zijn om de mate van warmteverlies en de verspreiding door de ondergrond te benaderen zou verder modelonderzoek nodig zijn. Daarnaast is onbekend in hoeverre de temperatuur aan de buitenkant van de conductor bij Trias-Westland mogelijk nog in relevante mate kan variëren met diepte, aangezien de temperatuursensor tussen de surface casing en conductor een puntmeting op 7m –NAP geeft. Hoewel de verticale variatie van de temperatuur in het geproduceerde water, zeker binnen het relatief korte ondiepe bereik van de conductor, snel verwaarloosbaar zullen zijn, kunnen verticale verschillen in warmte-dissipatie, met name door het ontstaan van convectiecellen, mogelijk van relevante invloed zijn.

De observaties van de verticale variatie in temperatuur op verschillende afstanden van de Trias-Westland put illustreren de invloed van de eigenschappen (bv. doorlatendheid) en heterogeniteit van de ondergrond (Figuur 3) op een vergelijkbare manier als recente modelresultaten laten zien (Figuur 6, (Van Lopik & Hartog, 2023)). Naast de invloed van heterogeniteit, maken deze modelresultaten duidelijk dat de thermische gradientomkeringen door convectiecellen zoals die bij Trias-Westland te zien zijn op de overgangen tussen watervoerend pakketten en scheidende lagen (Figuur 3), vooral op kortere afstanden (<10m) van de put herkenbaar zijn en het sterkst in de eerste jaren van productie (Figuur 6b), vergelijkbaar met de monitoringscondities bij Trias-Westland (6m en 9m afstand, <5 jaar productie). Over het geheel genomen passen de veldobservaties bij Trias-Westland dus bij de inzichten verkregen uit eerdere generieke modelresultaten. Naar verwachting zal het warmteverlies uit de put bij verdere productie in de toekomst langzaam afnemen door verdere opwarming van de omringende ondergrond, waarbij de temperaturen dicht bij de put relatief snel zullen stabiliseren terwijl de ondergrond langzaam op grotere afstand ook, maar in mindere mate, zal worden opgewarmd. Generieke lange-termijn simulaties van de warmteverspreiding geven aan dat in 40 jaar opwarming tot afstanden >50m kan optreden (Van Lopik et al., 2015). Afhankelijk van de operationele levensduur van het Trias-Westland geothermiesysteem zou dus op een gegeven moment ook opwarming van de DTS-referentielocatie op 63m mogelijk kunnen optreden. Ook kan de thermische invloed van het nabije Trias Westland-2 geothermiesysteem op termijn GLV-1 en GLV-2 (Figuur 1) bereiken. De gedetailleerde ontwikkeling van de warmteverspreiding wordt echter sterk bepaald door de locatie-specifieke condities van de put, productie en ondergrond. Veel van deze gegevens zijn voor het Trias-Westland geothermiesysteem in detail beschikbaar en maken het mogelijk om de verkregen verticale temperatuurdata op de verschillende DTS meetmomenten te gebruiken om tot een gekalibreerd thermisch verspreidingsmodel te komen voor deze locatie. Hoewel het is gebleken dat de variabele productieactiviteit bij Trias-Westland geothermiesysteem een belangrijke invloed heeft op de temporele variatie van de gemeten temperatuurprofielen, zou deze variatie in de simulatie meegenomen kunnen worden. Ook zal beschouwd moeten worden of de achtergebleven sondeerstreng (en de thermische data) bij GLV2 simpelweg genegeerd kan worden. De nog resterende meetmomenten in het KIRA project maken het mogelijk om een initieel gekalibreerd model te toetsen en verder te verfijnen. Dit zou het mogelijk maken om ook voorbij de loopduur van dit KIRA project de verdere te verwachten ontwikkeling van de opwarming van de ondergrond te bepalen. Verdere inzichten uit de monitoring

en modellering van de thermische effecten van de warmteuitstraling uit het Trias-Westland geothermiesysteem maken ook onderbouwde inschattingen mogelijk van de opwarming die onder andere condities bij andere geothermieputten en eventueel andere warme putten zoals bij HTO verwacht kan worden.



Figuur 6. Modelresultaten van de thermische effecten van warmteuitstraling uit een put van een effectieve outer casing temperatuur van 50 °C na 1 jaar en 10 jaar in een homogeen en heterogeen pakket (Van Lopik & Hartog, 2023)

4 Conclusie

Bij de productieput van geothermiesysteem Trias-Westland wordt sinds september 2021 de opwarming van de ondergrond met glasvezelkabels (DTS) op verschillende afstanden (6m, 9m en 63m) van de put gemonitord in het kader van het KIRA programma. In dit onderzoek zijn de resultaten van de eerste 5 monitoringsmomenten, tot oktober 2023 uitgewerkt en geïnterpreteerd. Dit is gedaan in samenhang met de analyse van productiedata en de gedetailleerde temporele data van een temperatuursonde tussen de surface casing en conductor. Uit het onderzoek blijkt dat er sinds de start van de warmteproductie (~85 °C, juli 2019) duidelijke opwarming van de ondergrond rond de put heeft plaatsgevonden, op een afstand van 6 meter van de put tot maximaal 34 °C, op 9m tot 30 °C na <4 jaar productie. Deze temperaturen 20-25 °C hoger is dan bij de referentiemeting op 63 meter afstand. Conductie en dichtheidsstroming zijn de bepalende processen voor de verspreiding van het warmteverlies uit de put. De sterke verticale variatie in temperatuur wordt verklaard door de gelaagdheid in de ondergrond, waarbij de zandige eenheden (watervoerende pakketten) convectiecellen ontstaan door oprijving van opgewarmd grondwater, wat resulteert in hogere temperaturen aan de bovenzijde van deze pakketten en relatief lagere temperaturen aan de onderzijde. In de kleiige eenheden (scheidende lagen en deklaag) vindt opwarming voornamelijk plaats door conductie, en deze eenheden worden extra opgewarmd aan de onderzijde door de warmte aan de bovenzijde van de watervoerende pakketten. Deze observaties zijn wat betreft de bepalende processen, snelheid, orde grootte en verspreiding van opwarming in overeenstemming met inzichten uit eerdere generieke studies. Variatie in productie en productiestops lieten snelle veranderingen in de temperatuur van de buitenste casing van de put zien en dit werkte door in de temporele variatie tussen de verschillende meetmomenten voor met name de meest dichtbij zijnde monitoringslocatie (6m). Over het geheel genomen bevestigt dit eerste onderzoek naar de tot nu toe beschikbare monitoringsgegevens over de opwarming bij de productieput van Trias-Westland eerdere verwachtingen op basis van generieke modelstudies en de locatie-specifieke condities hebben daar verder detail in aan gebracht zoals beschreven in deze rapportage. De gedetailleerde ontwikkeling van de warmteverspreiding wordt sterk bepaald door de locatie-specifieke condities van de put, productie en ondergrond. Veel van deze gegevens zijn voor het Trias-Westland systeem in detail beschikbaar en maken het mogelijk om de verkregen verticale temperatuurdata op de verschillende DTS meetmomenten te gebruiken om tot een gekalibreerd thermisch verspreidingsmodel te komen voor deze locatie. De nog resterende meetmomenten in het KIRA project maken het mogelijk om een initieel gekalibreerd model te toetsen en verder te verfijnen. Dit zou het mogelijk maken om ook voorbij de looptijd van dit KIRA project de verdere te verwachten ontwikkeling van de opwarming van de ondergrond te bepalen. Verdere inzichten uit de monitoring en modellering van de thermische effecten van de warmteuitstraling uit het Trias-Westland geothermiesysteem maken ook onderbouwde inschattingen mogelijk van de opwarming die onder andere condities bij andere geothermieputten en eventueel andere warme putten zoals bij HTO verwacht kan worden.

I Bijlage

Tabel 1. Watervoerende pakketten en scheidende lagen gebaseerd op REGISv2.2. uit bureaustudie grondwaterstroming (Wiertsema & Partners, 2021a)

Diepte (NAP)	Formatie	Geohydrologische eenheid	Eenheid watervoerend pakket conform NHI ¹ -instrumentarium (zie figuren 2.3 t/m 2.7).
maaiveld tot 22 m-	Holoceen	Deklaag	wvp1 en wvp 2 (zie figuur 2.3 en 2.4)
22 m- tot 36 m-	Formatie van Kreftenheye	1 ^e watervoerende pakket	wvp 3 (zie figuur 2.5)
36 m- tot 47 m-	Formatie van Stramproy en Formatie van Waalre	1 ^e scheidende laag	
47 m- tot 73 m-	Formatie van Peize en Formatie van Waalre	2 ^e watervoerende pakket	wvp 4 (zie figuur 2.6)
73 m- tot 80 m-	Formatie van Waalre	2 ^e scheidende laag	
80 m- tot 90 m-	Formatie van Peize	3 ^e watervoerende pakket	wvp 5 (zie figuur 2.7)

Tabel 2. Resultaten van dissipatietesten tijdens proefsondering (Wiertsema & Partners, 2020)

Dissipatie-test	Diepte o.b.v. sondeerlengte	Grond soort	Gemiddelde puntdruk (Qc)	Diepte o.b.v. sondeerlengte	Waterdruk	Geschatte waterstand
	[m-mv]		[Mpa]	[m- N.A.P.]	[Kpa]	[m-mv]
1	21,50	Zand	20,00	22,68	208,13	0,69*
2	31,54	Zand	55,00	32,72	304,47	1,09*
3	41,84	Klei	2,50	43,02	4,40	onbetrouwbare waarde
4	50,00	Zand met kleilagen	8,00	51,18	15,37	onbetrouwbare waarde
5	60,00	Zand	30,00	61,18	572,41	2,76*

Tabel 4, resultaten vanuit dissipatietesten

Referenties

- EBN, & Wiertsema & Partners. (2022, September 14). *Temperatuurmonitoringproject Trias Westland*.
<https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/temperatuurmonitoringproject-trias-westland/>
- Trias Westland B.V. (2020). *Winningsplan TWL-01, NLW-GT-01/02*.
- Van Lopik, J. H., & Hartog, N. (2023). De verspreiding van geothermische brijn door putlekkage in grondwater. *Warming Up - KWR*.
- Van Lopik, J. H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W. J., Cirkel, D. G., & Raoof, A. (2015). Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. *Advances in Water Resources*, 86, 32–45.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.025>
- Wiertsema & Partners. (2020). *Geotechnisch onderzoek; Project glasvezel DTS metingen te Naaldwijk (R74306)*.
- Wiertsema & Partners. (2021a). *Bureaustudie grondwater; Project glasvezel DTS metingen te Naaldwijk (R77070)*.
- Wiertsema & Partners. (2021b). *Monitoring; Project glasvezel DTS metingen te Naaldwijk (R79866)*.
- Wiertsema & Partners. (2022). *Monitoring; Project glasvezel DTS metingen te Naaldwijk (R83657)*.
- Wiertsema & Partners. (2023a). *Monitoring; Project glasvezel DTS metingen te Naaldwijk (R87518)*.
- Wiertsema & Partners. (2023b). *Monitoring; Project glasvezel DTS metingen te Naaldwijk (R88867)*.
- Wiertsema & Partners. (2023c). *Monitoring; Project glasvezel DTS metingen te Naaldwijk (R91408)*.