

A photograph of an industrial facility, likely a geothermal power plant. In the foreground, there's a concrete area with some low-lying plants. A large, insulated pipe with a grey, quilted jacket runs horizontally across the middle ground, supported by a metal frame. To the left, there's a smaller vertical pipe with a similar jacket. In the background, a large industrial building with a flat roof and a chimney is visible under a clear blue sky.

KWR 2025.030 | Maart 2025

Modellering van opwarming ondergrond door warmteuitstraling vanuit geothermieput bij Trias-Westland

**Vergelijking van veldobservaties met resultaten
van thermisch verspreidingsmodel**

Colofon

Modellering van opwarming ondergrond door warmteuitstraling vanuit geothermieput bij Trias-Westland

Vergelijking van veldobservaties met resultaten van thermisch verspreidingsmodel

KWR 2025.030 | Maart 2025

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, N. (Nora) Heijnen (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, MODFLOW 6

Jaar van publicatie
2025

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



Maart 2025 ©

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

Geothermie wordt in Nederland toegepast voor duurzame verwarming door water van 80-90°C op te pompen van 2-3 km diepte. Warmteverlies uit, met name, de productieput (producer) leidt tot opwarming van de omringende ondiepe ondergrond. Het geothermiesysteem Trias-Westland is operationeel sinds 2019, en in 2021 zijn er drie Distributed Temperature Sensing (DTS) kabels geplaatst op verschillende afstanden van de productieput (NLW-GT-02) en is in detail de verticale temperatuurvariatie in de ondergrond vanaf maaiveld tot 60 m daaronder op meerdere meetmomenten bepaald. Deze DTS-veldmetingen lieten opwarming zien tot meer dan 30°C op enkele meters afstand van de productieput en zijn in eerder onderzoek beschreven en geïnterpreteerd (De Vries & Hartog, 2024). Het doel van het in deze rapportage beschreven onderzoek was om een numeriek model te ontwikkelen dat de thermische impact door warmteverliezen uit de put kon beschrijven voor de monitoringsperiode tot maart 2024. Hierbij is rekening gehouden met temperatuurvariaties aan maaiveld, geohydrologische en operationele omstandigheden gedurende die periode, zoals productiestops. Gebruikmakend van bestaande productie- en ondergrondgegevens is er een locatie-specifiek numeriek grondwaterstroming en transportmodel (MODFLOW 6) ontwikkeld en handmatig gekalibreerd aan de hand van de DTS-metingen op de verschillende afstanden en verschillende meetmomenten. Het model bevestigde het ontstaan van thermische convectiecellen als belangrijkste warmtetransport mechanisme in de aanwezige watervoerende pakketten, welke door thermische conductie via de scheidende lagen verder opwaarts verspreid wordt. Na kalibratie kon, met een relatief simpel gehouden laagopbouw en toekenning van realistische parameterwaarden voor doorlatendheden en thermische eigenschappen, het uiteindelijke model een goede benadering geven van de waargenomen verticale temperatuurvariatie en ruimtelijke verspreiding in de ondergrond voor de beschouwde monitoringsperiode. Als uiteindelijke randvoorwaarden zijn hierbij een temperatuur van 55°C van de buitenste casing (tijdens productie, $T_{\text{prod}}: \sim 86^\circ\text{C}$) en wekelijks variërende maaiveld temperaturen gehanteerd. Het model toont aan dat de opwarming tot de laatst beschouwde monitoringsronde (maart 2024) niet verder dan 25 m reikte, ruim binnen de op 64.2 m als referentie beschouwde DTS-meting. Op basis van de goede overeenstemming van de modelresultaten met de waarnemingen is de verwachting dat met het model ook geanticipeerd kan worden op de verdere ruimtelijke ontwikkeling van de thermische impact, al zal dit ook blijven afhangen van het optreden van productiestops. Hoewel de beschouwde veldmetingen en de inzichten uit de simulatie hier nog niet op wijzen, zal op termijn mogelijk ook thermische impact van de later gerealiseerde productieput NLW-GT-03 op 20 m afstand van invloed gaan hebben op de DTS-metingen.

Inhoud

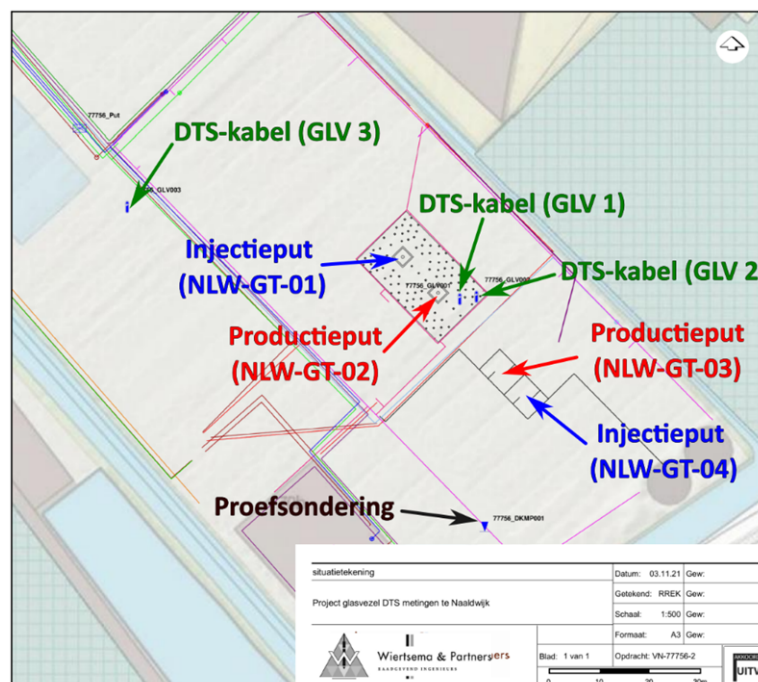
Colofon	1
Samenvatting	2
Inhoud	3
1 Inleiding	4
2 Methode	5
2.1 Afstanden van de DTS-kabels tot de productieput	5
2.2 Modelopzet	5
2.3 Modelrandvoorwaarden	6
3 Resultaten en Discussie	12
3.1 Modelkalibratie	12
3.2 Evaluatie van het gekalibreerde model	22
3.3 Reflectie en Discussie	24
4 Conclusies	27
Referenties	28
I Bijlage	29
I.I Locatie DTS-kabels	29
I.II Atmosferische randvoorwaarden	30

1 Inleiding

In Nederland wordt bij geothermie (aardwarmtewinning) van een diepte van twee tot drie kilometer formatiewater met een temperatuur van 80 tot 90 °C opgepompt, voornamelijk voor de duurzame verwarming van gebouwen en kassen, waarna het met een lagere temperatuur het reservoir weer wordt ingepompt. Vanwege de hogere temperatuur van het formatiewater vindt er, met name bij de productieput, via de buitenste casing conductief warmteverlies naar de omringende ondiepe ondergrond en grondwater plaats (De Vries & Hartog, 2024; Van Lopik et al., 2015).

Recent is door De Vries & Hartog, (2024) op basis van verticaal gedetailleerde temperatuurmetingen met glasvezelkabel (DTS-kabel) nabij een productieput van het geothermiesysteem Trias Westland (NLW-GT-02, Figuur 1) het optreden van opwarming van de ondergrond rondom de put bevestigd en geïnterpreteerd. Na minder dan 4 jaar productie lieten de twee putnabije (<10m) monitoringslocaties sterke opwarming zien, met een stijging van 20-25 °C bij de monitoringslocatie het dichtstbij (~4m) de put. Op de derde en verste (~64m) monitoringslocatie, bedoeld als referentie, was er geen indicatie van opwarming door de put. De sterke verticale variatie in temperatuur kon worden gerelateerd aan de aanwezige gelaagdheid in de ondergrond, waarbij warmteverspreiding door convectiecellen dominant is in de zandige eenheden en conductie in de kleiige eenheden. Daarbij was in het bovenste deel van holocene deklaag de invloed van de seizoenale atmosferische temperatuurvariatie dominant. Het optreden van beperkte afkoeling tussen enkele monitoringsrondes kon worden toegeschreven aan tussentijdse onderbrekingen in productie.

Om de verklaringen voor de waargenomen opwarming en de invloed van de locatie-specifieke productiedynamiek en ondergrondcondities op de ontwikkeling van de warmteverspreiding te toetsen heeft KWR op verzoek van EBN een gedetailleerd, locatie-specifiek numeriek thermisch verspreidingsmodel ontwikkeld, op basis van de beschikbare geohydrologische en operationele gegevens. Het verticale temperatuurprofiel voor de dichtstbijzijnde monitoringlocatie bij de start van de monitoring is gebruikt als basis voor de handmatige kalibratie en vervolgens zijn de uitkomsten van het model vergeleken met de waarnemingen bij latere monitoringsrondes en op grotere afstand.



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 Wiersema & Partners (2021b).

2 Methode

2.1 Afstanden van de DTS-kabels tot de productieput

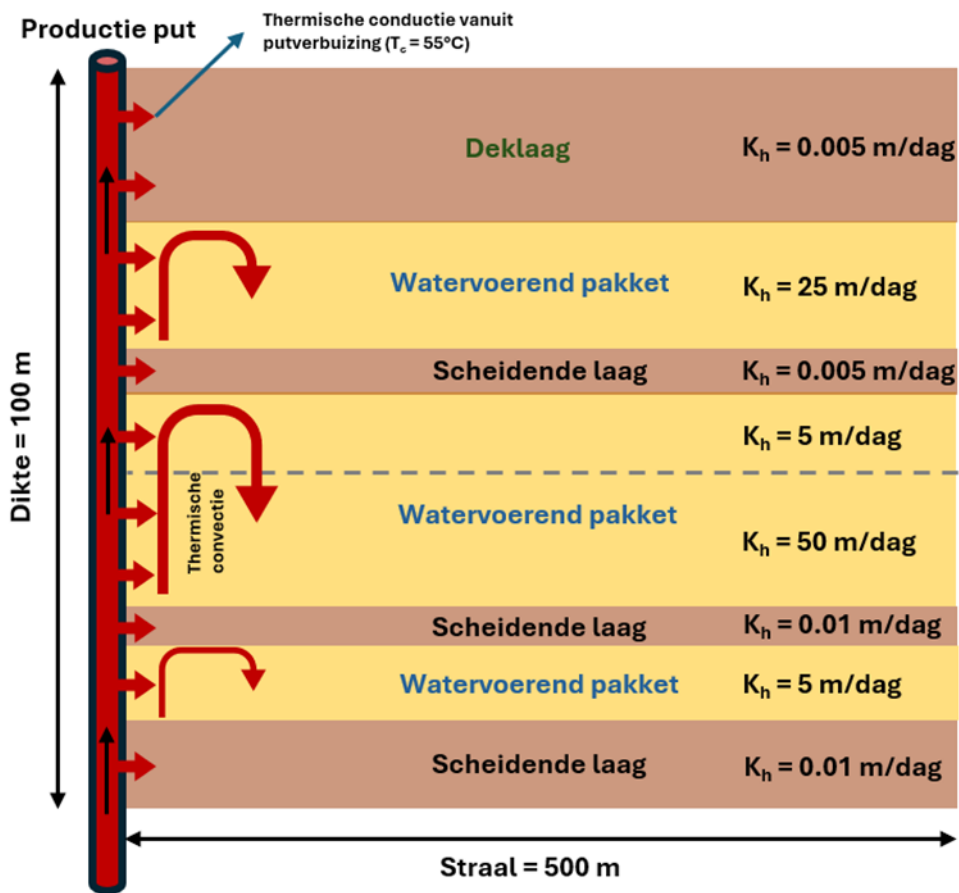
In het eerdere onderzoek (de Vries en Hartog, 2024) zijn op basis van de toen bekende gegevens (EBN, 2021) afstanden van DTS-kabels GLV1 en GLV2 tot de productieput van respectievelijk 6 en 9 meter vermeld. Hoewel dat voor de kwalitatieve interpretatie van de temperatuur gegevens in dat onderzoek geen consequenties heeft, bleek tijdens gedurende dit onderzoek echter dat deze afstanden onvoldoende accuraat waren om te gebruiken voor de simulaties. In dit onderzoek zijn de voor de simulatie aangenomen afstanden (GLV1; 4.2 m, GLV2; 7.6 m en GLV3; 64.2 m) daarom afgeleid op basis van verschillende informatiebronnen (Bijlage I.I), waaronder data van NLOG, luchtfotografie (Publieke Dienstverlening Op de Kaart), fysieke meting van HVC, de operator van het geothermiesysteem, en de ingemeten locaties tijdens de sonderingen door Wiertsema & Partners, (2021b).

2.2 Modelopzet

Voor de modellering van de warmteverspreiding vanuit de productieput in de ondergrond is gebruikgemaakt van MODFLOW 6, een finite-difference grondwaterstromingsprogramma. MODFLOW 6 ondersteunt gekoppelde stromings- en transportmodellen met variabele dichtheid en viscositeit, wat het geschikt maakt voor het beschrijven van dichtheidsstroming in grondwater als gevolg van opwarming van grondwater. Voor deze studie is het MODFLOW-2005 aan MT3DMS en SEAWAT gekoppelde model van Van Lopik et al. (2015) opnieuw opgebouwd in het nieuwere MODFLOW 6 waarin alle functionaliteiten inmiddels ondergebracht zijn. Vanwege de minimale grondwaterstroming bij het geothermiesysteem Trias-Westland (Wiertsema & Partners, 2021a), is aangenomen dat deze verwaarloosd kon worden en dat een axi-symmetrische configuratie (Langevin, 2008) kon worden gebruikt, wat de rekentijd aanzienlijk verkort ten opzichte van een 3D-model.

Het opgezette axi-symmetrische model heeft een straal van 500 m (Figuur 2), waarbij de eerste en tweede cel de productieput (radius = 0.381 m) representeren. De productieput is gemodelleerd als een impermeabele kolom (eerste cel, 0.380 m) met een constante temperatuur tijdens productie, terwijl de warmteuitstraling plaatsvindt vanuit de tweede cel (0.001 m). Met toenemende afstand van de productieput, is een progressief grotere celgrootte toe gepast tot maximaal 0.5 m tot 100 m afstand en maximaal 50 m op 500 m afstand. Dit om de rekenefficiëntie van de simulaties te verbeteren en tegelijkertijd voldoende resolutie nabij de put te behouden (Van Lopik & Hartog, 2023). Voor de modeldikte is 100 m gebruikt, tot de derde scheidende laag, 37 meter dieper dan de onderkant van de DTS-kabel GLV1. Als celdikte is standaard 0.5 m gebruikt, waar nodig op basis van de geologische gelaagdheid is extra verfijning toegepast tot 0.125 m.

De uitgevoerde simulaties beschouwden de periode vanaf de start van de aardwarmtewinning (juli 2019) tot aan de tussentijdse monitoringsronde van 5 maart 2024. De aangenomen initiële grondwatertemperatuur is vastgesteld op basis van de meetronde op 17 augustus 2023 op de referentielocatie op 64.2 m afstand van de productieput (GLV3). Voor deze monitoringsronde is gekozen omdat deze in hetzelfde jaargetijde viel als de start van de productie (juli 2019). Aan de buitenrand van het model (op 500 m) is een constante temperatuur opgelegd, gelijk aan de initiële temperatuur. De temperatuur aan de buitenzijde van de productieput (T_c) is gevarieerd als onderdeel van de kalibratie en is als constant aangenomen over de beschouwde diepte tijdens productieperiodes en tijdens productiestops vrijgegeven, zodat de temperatuur zich kon aanpassen aan de omgevingsomstandigheden. De temporele variatie in productie als ook de temperatuur aan maaiveld zijn op als variabele randvoorwaarden op weekbasis (stressperiode) voor het model gebruikt.



Figuur 2. Schematisch overzicht van het MODFLOW 6 model, horizontale hydraulische conductiviteit waarden (K_h) behoren tot het gekalibreerde model.

2.3 Modelrandvoorwaarden

2.3.1 Invloed van atmosferische temperatuurvariatie

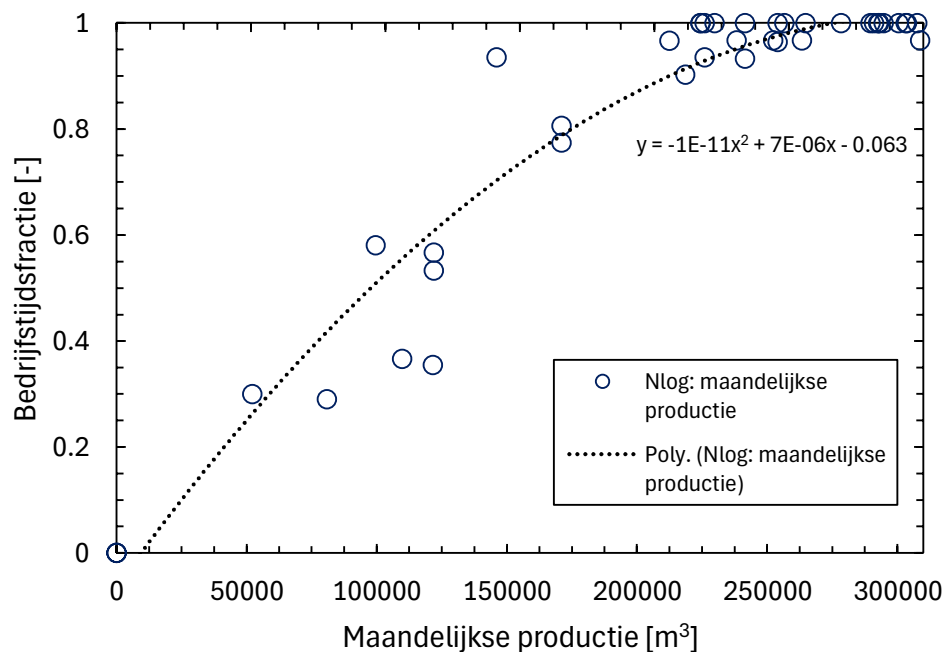
Zoals beschreven in het eerdere onderzoek naar de temperatuurmetingen (de Vries & Hartog, 2024) wordt de temperatuur in het bovenste gedeelte van deklaag beïnvloedt door met name de variatie van atmosferisch temperatuur aan maaiveld. Om de thermische invloed van de atmosfeer bij het modelleren mee te nemen is aangenomen dat de bovenzijde van het model overeenkomt met de omgevingstemperatuur gebaseerd op meteorologische data van het KNMI voor het weerstation Hoek van Holland. Om aan te sluiten bij de gehanteerde stressperioden van één week in het model, zijn op basis van de beschikbare dagelijkse data wekelijkse gemiddelden bepaald. Uit de vergelijking van het gebruik van maandelijkse en jaarlijkse gemiddelden of wanneer er geen atmosferische randvoorwaarde werd ingesteld bleek dat wekelijkse gemiddelden goed de variatie in het bovenste deel van de deklaag kon beschrijven (Bijlage I.II).

2.3.2 Invloed van operationele condities: aan- en uitschakeling

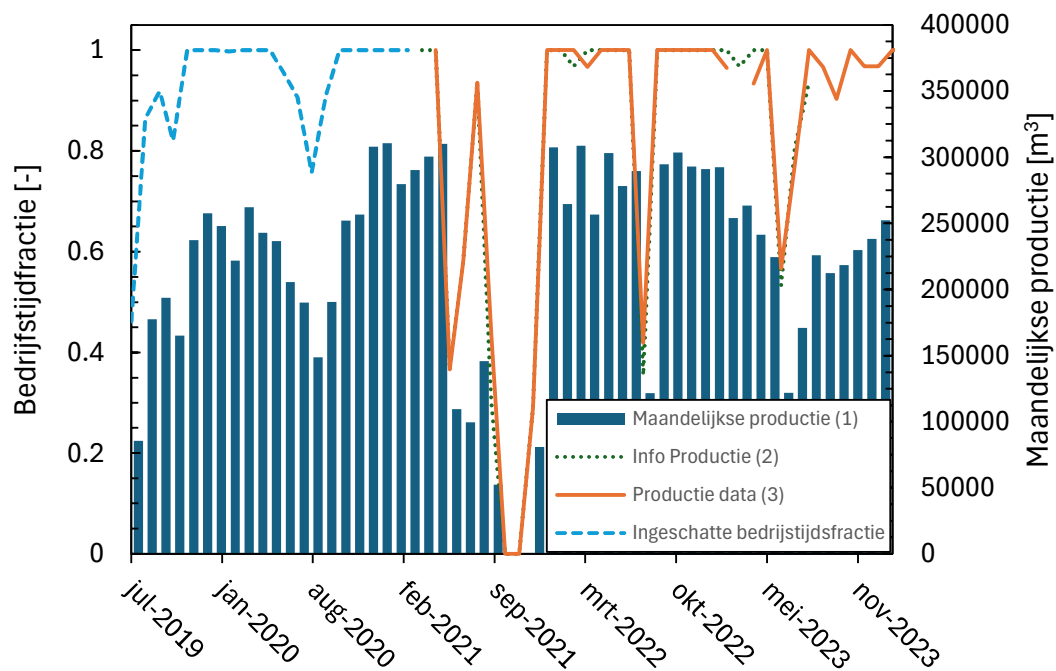
Uit de DTS-metingen bleek dat naast opwarming ook periodes van afkoeling waren opgetreden, correlerend met periodes van verminderde of geen productie (de Vries & Hartog, 2024). Voor het bepalen van de periodes wanneer het systeem met een constante buitenste casingtemperatuur (in bedrijf) of met vrije buitenste casingtemperatuur (buiten bedrijf) gesimuleerd zou worden, zijn drie databronnen gebruikt:

- 1) Maandelijks productiedata, beschikbaar sinds de start van productie, van de Nederlandse Olie- en Gasportaal (NLOG).
- 2) Operationele productie informatie, beschikbaar sinds april 2021, bevat gebeurtenissen rond de productie bijgehouden door de beheerder, HVC.
- 3) Dagelijkse productiedata, beschikbaar sinds mei 2021, met daggemiddelde pompfrequentie, daggemiddelde debieten en daggemiddelde temperaturen van het geproduceerde water aan het maaiveld. Bijgehouden door de beheerder, HVC.

De gegevens uit bronnen 2 en 3 zijn rechtstreeks omgezet naar wekelijkse in- en uitschakeldata voor de periode na april 2021. Voor korte uitschakelperiodes van minder dan een week zijn onderbrekingen binnen een tijdsvenster van twee weken vóór en na de betreffende uitschakeling gecombineerd. Indien gedurende minstens 2/3 van een week de productie stil lag, werd deze periode in het model beschouwd als een volledige week van uitschakeling. Voor de periode vóór april 2021, waarvoor uitsluitend maandelijks productiedata beschikbaar was, is de maandelijks productiedata na april 2021 vergeleken met de fractie van de maand dat het systeem actief was; de bedrijfstijdsfractie (bepaald op basis van bronnen 2 en 3). De redelijke relatie tussen de maandelijks productie en de bedrijfstijdsfractie (Figuur 3) voor deze periode is toegepast om de wekelijkse invoerdata te extrapoleren voor de periode tussen juli 2019 (start van systeem) en april 2021 (Figuur 4). De gegenereerde wekelijkse in- en uitschakeldata is vervolgens gebruikt als input voor het numerieke model.



Figuur 3. Maandelijks productie (Nlog) tegen de bekende fractie van de maand dat er productie plaatsvond, bedrijfstijdsfractie (gebaseerd op: productie info en dagelijkse productiedata).

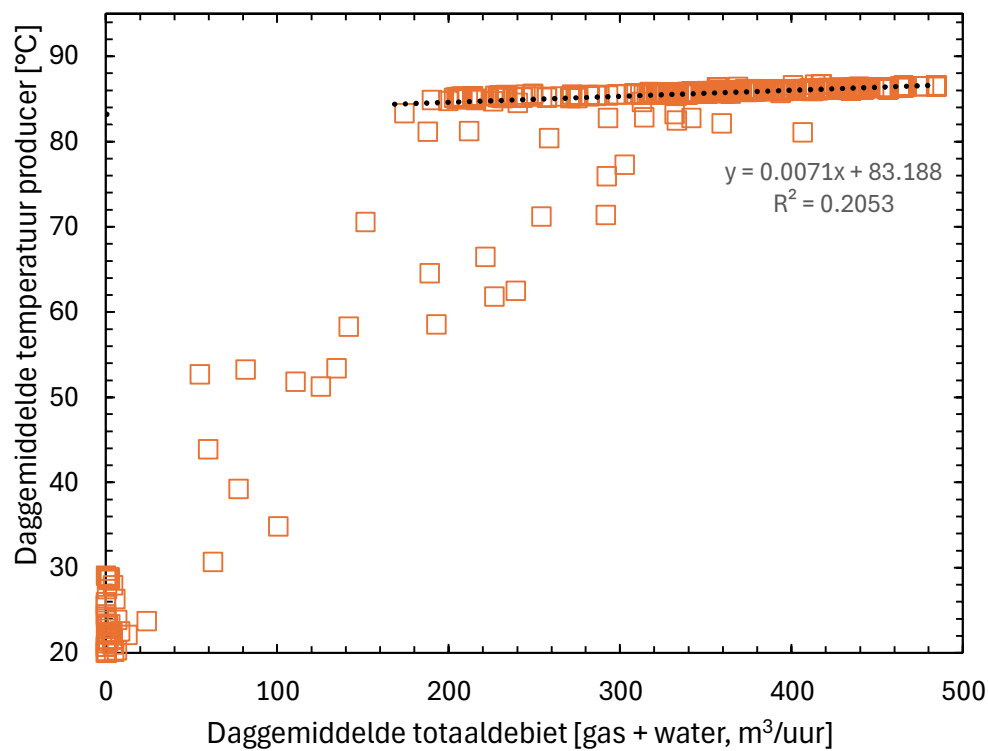


Figuur 4. De verschillende bronnen voor aan- en uitschakeling productieput en de voorspelde bedrijfstijdsfractie (aan- en uitschakeling) gebaseerd op de relatie tussen de maandelijkse productie en de bedrijfstijdsfractie.

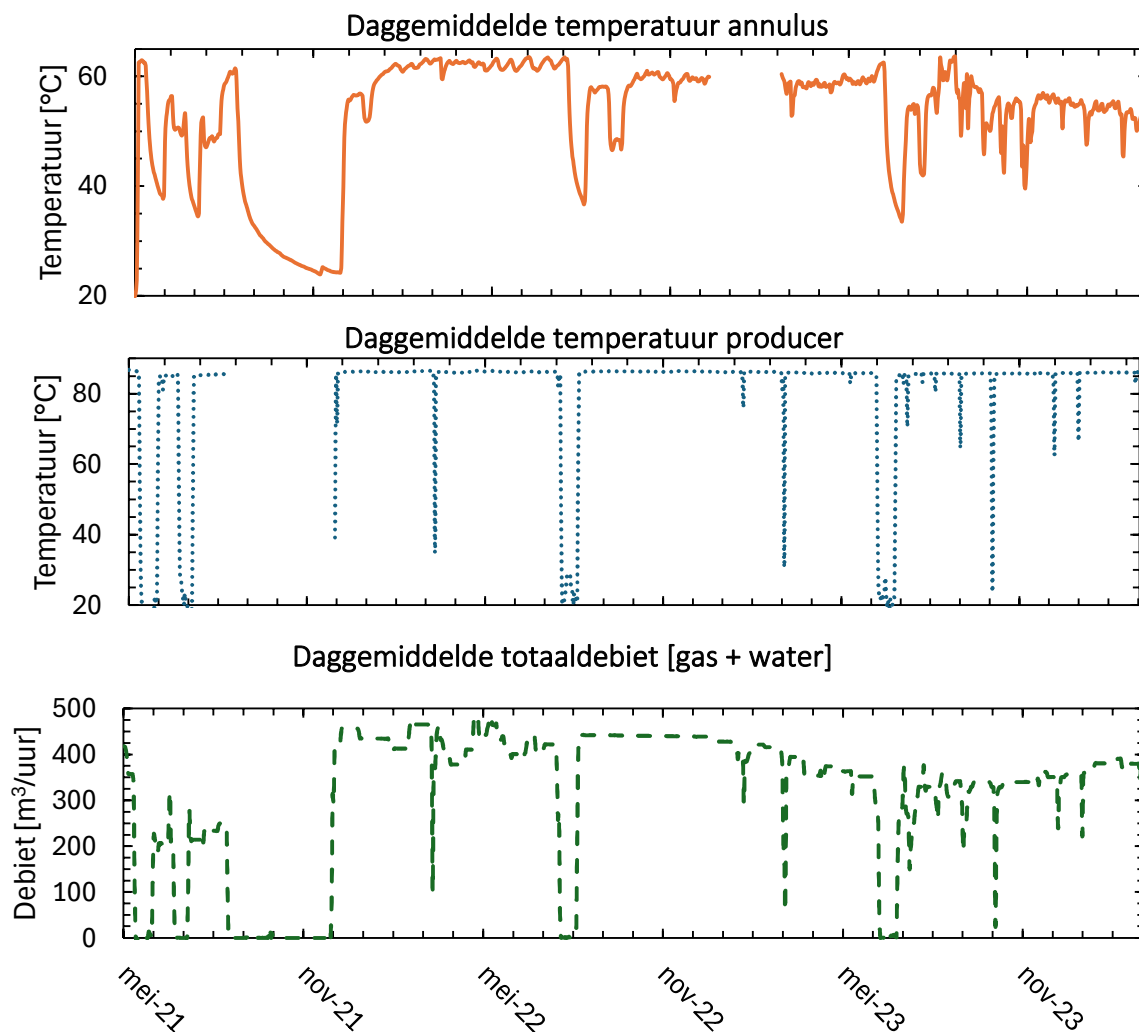
2.3.3 Buitenste casingtemperatuur

Voor het bepalen van de in de simulaties te gebruiken temperatuur van de buitenste casing (conductor) geven de bovengronds gemeten productietemperaturen een bovengrens met daggemiddelden van maximaal $\sim 86^{\circ}\text{C}$ tijdens productie (Figuur 5). De temperatuur van het geproduceerde formatiewater (gemeten aan het oppervlak) varieerde een paar graden tijdens productie tussen maximaal 86.5°C bij hoge debieten (tot $480\text{ m}^3/\text{uur}$, totaaldebiet van gas en water) en minimaal 84.8°C bij lage debieten ($>150\text{ m}^3/\text{uur}$, Figuur 5). In dit debietbereik is er tijdens productie een sterke lineaire relatie tussen de daggemiddelden voor debiet en productietemperatuur (Figuur 5) een reflectie van de invloed van het warmteverlies, langs de gehele lengte van de producer, op de productietemperaturen. Tijdens productiestops daalde de geregistreerde “productie” temperatuur binnen maximaal een paar dagen tot de bovengrondse temperaturen in de productieruimte ($15\text{--}25^{\circ}\text{C}$), terwijl het dieper in de producer warmer zal zijn gebleven.

Naast gegevens over de productietemperatuur was er ook temperatuurdata beschikbaar van een temperatuursensor (Figuur 6) die tijdens de aanleg van de DTS-kabels is geïnstalleerd in het stilstaand water in de annulaire ruimte tussen de buitenste surface casing en de conductor, op een diepte van 7 m boven de cementering ($\sim 0.325\text{ m}$ vanaf het midden van de producer). Het temporele patroon volgt grotendeels de variatie van de producortemperatuur (Figuur 6), alleen zijn de met deze sensor geregistreerde maximale temperaturen lager (max 64°C), in overeenstemming met een warmteverliesprofiel door de putverbuizingen (Sui et al., 2018). Aannemelijk is daarom dat de temperatuur van de conductor vanwege de grotere afstand (0.381 m) in het algemeen nog wat lager liggen dan bij de temperatuursonde (de Vries & Hartog, 2024). Een aantal waargenomen temperatuurdalingen zoals in januari 2022, eind september 2023 en begin november 2023 (Figuur 6), wijzen mogelijk op externe verstoring, bijvoorbeeld door werkzaamheden bij de productieput. Op basis van het geregistreerde maximum van de temperatuursonde (64°C) en vanwege de onzekerheden in wat een representatieve temperatuur is voor de conductor casing tijdens productie zijn tijdens de modelkalibratie 50°C , 55°C en 60°C als randvoorwaarden getoetst.



Figuur 5. Het daggemiddelde totaaldebiet (water en gas, (databron 3)) en temperatuur van het formatiewater in de producer aan maaiveld (mei 2021-maart 2024) tijdens productie en stilstand. Voor de gefitte lijn zijn uitsluitend de datapunten ($n=929$) gebruikt waarbij de producer actief (pompfrequentie $>30\text{Hz}$) was. Het totaaldebiet bestaat nog uit ongeveer 8% gas en wordt door meetfouten incidenteel door de debietmeter overschat (HVC, persoonlijke communicatie, 9-9-2024).



Figuur 6. De daggemiddelde temperatuur van het geproduceerde water, temperatuur gemeten met sensor in de annulus op 7 m diepte en het daggemiddelde totaaldebiet van mei 2021 tot maart 2024. Het totaaldebiet bestaat nog uit ongeveer 8% gas en wordt door meetfouten incidenteel door de debietmeter overschat (HVC, persoonlijke communicatie, 9-9-2024).

2.3.4 Geohydrologische schematisatie en parametrisatie

De ondiepe ondergrond waarin de DTS-kabels zijn geïnstalleerd, bestaat grofweg uit vier hoofdlagen: een deklaag, het 1^{ste} watervoerende pakket, de 1^{ste} scheidende laag en het 2^{de} watervoerende pakket (Wiertsema & Partners, 2021a). Onder deze lagen bevinden zich tot een diepte van 100 meter nog drie eenheden: de 2^{de} scheidende laag, het 3^{de} watervoerende pakket en de 3^{de} scheidende laag (REGIS II v2.2, Wiertsema & Partners, 2021a). Deze opbouw is initieel overgenomen voor de opzet van het model door voor de verschillende lagen één vaste waarde voor de hydraulische conductiviteit (met aanvullend een detaillering van het 2^{de} watervoerend pakket). De overgangen tussen de geohydrologische eenheden en de hydraulische conductiviteit zijn ingeschat en de waarden gekalibreerd aan de hand van de volgende bronnen:

- 1) REGIS II v2.2 voor de laagopbouw en initiële schatting doorlaatbaarheid
- 2) Proefsondering en Bureau studie grondwater (Wiertsema & Partners, 2020, 2021a) voor de laagopbouw
- 3) Interpretatie temperatuurmetingen (de Vries & Hartog, 2024) voor de laagopbouw

Vanwege de onbekendheid van de anisotropie van de lagen, de verhouding tussen de horizontale (K_h) en verticale hydraulische conductiviteit (K_v) en de wens om het aantal vrijheidsgraden beperkt te houden, is voor de modellering één enkele anisotropiewaarde voor alle lagen gehanteerd. Scenario's met lage anisotropiewaarde (1, isotroop) tot hogere waarden (5) zijn tijdens de kalibratie onderzocht om tot een geschikte waarde voor het gehele model te komen.

2.3.5 Modelkalibratie en evaluatie

De geohydrologische opbouw, hydraulische conductiviteit, anisotropie, casing temperatuur en thermische geleiding van de ondergrond zijn handmatig gekalibreerd, terwijl voor andere modelparameters een constante waarde is aangenomen (Tabel 1). De kalibratie vond plaats op de meetgegevens bij de aanleg van de DTS-kabels op de dichtstbijzijnde meetlocatie vanaf de producer (afstand 4.2 m, GLV1). Vervolgens werden de modelresultaten gebruikt om de ontwikkeling van de gesimuleerde temperatuurprofielen over zowel de tijd als de afstand te vergelijken met de data uit volgende meetrondes en op grotere afstand (7.6 m, GLV2 en 64 m, GLV3). Hierbij is voor GLV2 de verstorende invloed van de achtergebleven sondeerstreng op de meetgegevens (de Vries & Hartog, 2024) , vanaf 36 m diepte, buiten beschouwing gelaten.

Tabel 1. Basisparameters die tijdens kalibratie constant zijn aangenomen in de opzet van het MODFLOW 6 model

Parameter	Waarden
Porositeit [-]	0.3
Bulkdichtheid [kg/m^3]	1722.5
Specifieke opslag [m^{-1}]	1.0×10^{-4}
Warmtecapaciteit bodem [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$]	800
Warmtecapaciteit water [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$]	4186
Thermische conductiviteit water [$\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$]	0.56
Moleculaire diffusie coëfficiënt [m^2/d]	8.64×10^{-5}
Longitudinale dispersiviteit [m]	0.5
Transversale dispersiviteit [m]	0.05
Zout concentratie formatiewater [g/L]	3

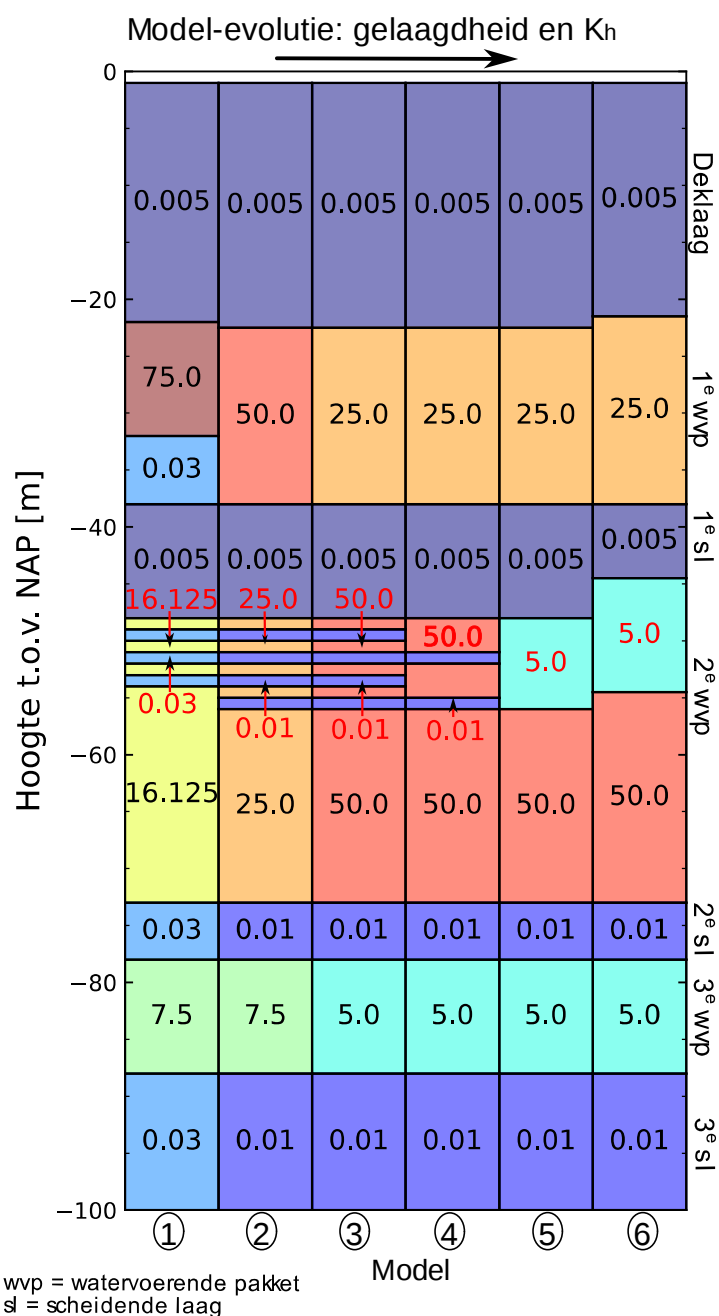
3 Resultaten en Discussie

3.1 Modelkalibratie

Het model is initieel handmatig gekalibreerd op de temperatuurmetingen voor GLV1 die zijn uitgevoerd bij de plaatsing van de DTS-kabel (meetronde 0, 1 september 2021), waarbij de referentiemetingen voor GLV3 op 17 augustus 2023 aangenomen zijn als startconditie voor het moment van aanvang van de productie (15 juli 2019). Vanwege de grote hoeveelheid parameters voor de verschillende processen die de warmteverspreiding beïnvloeden en onderling interacteren en de onbekendheid, dan wel grote onzekerheid, van parameterwaarden is er voor gekozen om bij de kalibratie met zo min mogelijk vrijheidsgraden te komen tot een voldoende goede reproductie van de waargenomen temperatuurprofielen. Naast parameters waarvoor a priori een vaste waarde is aangenomen (Tabel 1), is er voor andere parameters tijdens kalibratie bepaald welke waarde voor de hele laagopbouw aangenomen kon worden. Om overparameterisatie te voorkomen is er slechts voor een beperkt aantal parameters gekozen om deze binnen het model te variëren: de versimpelde laagopbouw zelf en de horizontale conductiviteit per laag. Met deze aanpak geeft het uiteindelijk gekalibreerde model hierdoor niet de theoretisch best mogelijke fit van de waargenomen temperaturen, als alle (of veel meer) parameterwaarden vrij gelaten zouden worden en het overzicht zou verdwijnen. In plaats daarvan is het gekalibreerde model getoetst door de mate waarin de verdere thermische ontwikkeling in de tijd bij GLV1 en ook op grotere afstand bij GLV2 en GLV3 kon reproduceren. Hieronder worden eerst de parameters die de meeste invloed hadden tijdens de kalibratie beschreven. Met name voor het reproduceren van het patroon van het temperatuurprofiel was de detaillering van de laagopbouw en de toekenning van hydraulische conductiviteiten van belang. Op basis daarvan is de kalibratie met de overige belangrijke parameters uitgevoerd voor verdere detaillering, zoals hieronder beschreven.

3.1.1 Laagopbouw en hydraulische conductiviteiten

Op basis van de gebruikte databronnen is de benodigde laagopbouw bepaald en zijn passende horizontale hydraulische conductiviteiten ingeschat en aan de hand van de temperatuurmetingen verder gekalibreerd. De regionale indicatiewaarden voor de hydraulische conductiviteit uit REGIS II v2.2 (model 1, Figuur 7) bleken niet bruikbaar om het waargenomen temperatuurprofiel in het 1^{ste} en 2^{de} watervoerende pakket te kunnen verklaren, omdat, in tegenstelling tot REGIS, de temperatuurprofielen er onder meer op wijzen dat de convectiecellen en daarmee de hydraulische conductiviteit in het 2^{de} watervoerende pakket hoger is dan in het 1^{ste} watervoerende pakket (de Vries & Hartog, 2024). In eerste vier versies van de laagopbouw van het model zijn kleilagen toegevoegd in het bovenste deel van het 2^{de} watervoerende pakket (Figuur 7), in overeenstemming met de indicatie voor een daar aanwezige afwisseling van zand en kleilagen bij de proefboring (Wiertsema & Partners, 2020). Deze toevoeging resulteerde echter lokaal in de vorming van kleinere convectiecellen, die grote temperatuurverschillen over kleine dieptes veroorzaakten. Aangezien dergelijke temperatuurverschillen niet werden waargenomen in de meetgegevens, is voor dit traject gekozen voor een lagere hydraulische conductiviteit van 5 m/dag. Bij deze waarde vond nog steeds in beperkte mate convectie plaats, wat zorgt voor een hogere temperatuur in vergelijking met een situatie waarin alleen conductie optreedt. Hierdoor ontstond er ook een goede overeenkomst tussen het patroon van de gemeten en het gemodelleerde temperatuurprofiel in het bovenste deel van het 2^{de} watervoerende pakket. Voor het uiteindelijke laagmodel (model 6, Figuur 7 en Tabel 2), is op basis van de temperatuurprofielen met name de diepte van de overgangen in de laagopbouw verder verfijnd.



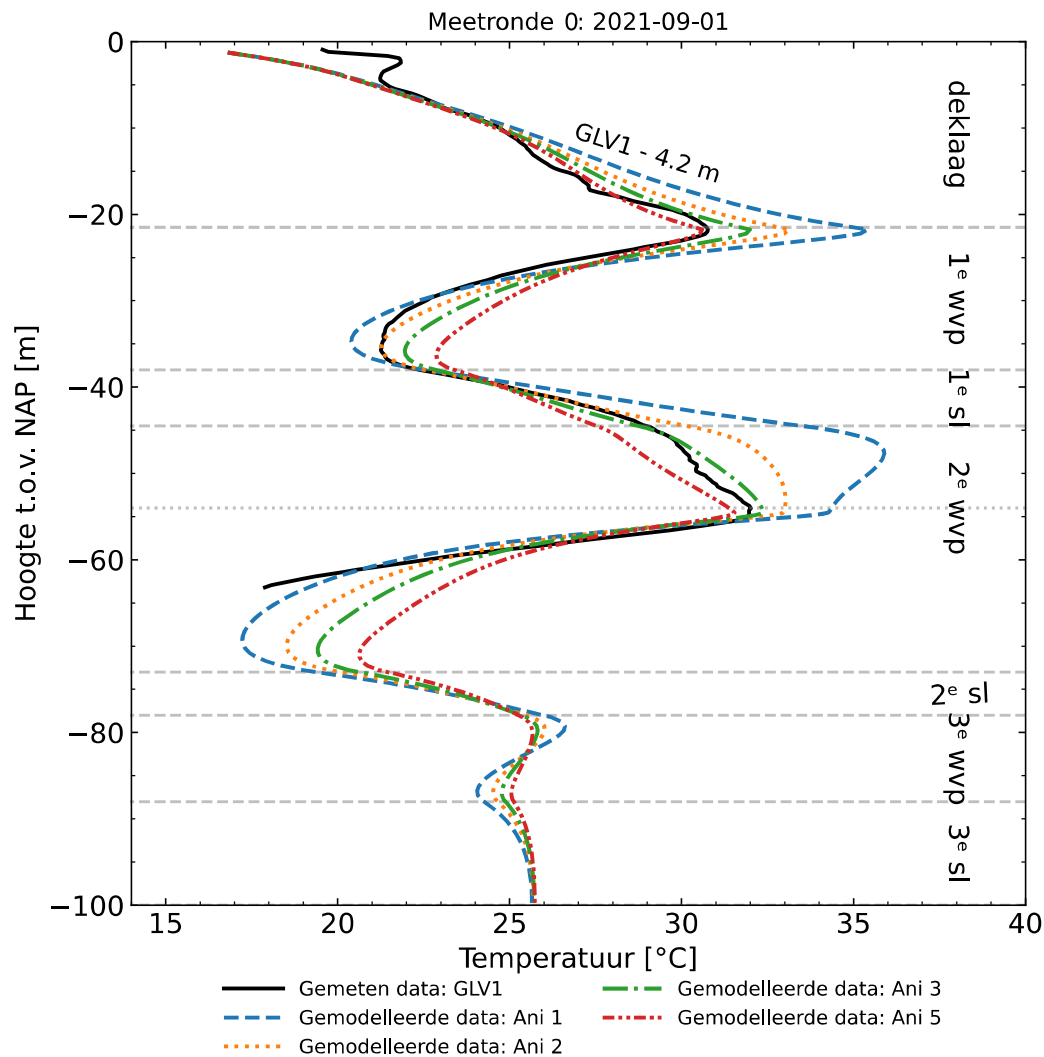
Figuur 7. Ontwikkeling van de geohydrologische laagopbouw en horizontale hydraulische conductiviteit (K_h) tijdens modelkalibratie.

Tabel 2. Geohydrologische laagopbouw en horizontale hydraulische conductiviteit (K_h) voor model 6

Diepte [m -NAP]	Formatie	Geohydrologische eenheid	K_h [m/dag]
maaiveld - 21.5	Holoceen	Deklaag	0.005
21.5 - 38.0	Formatie van Kreftenheye	1 ^{ste} watervoerende pakket	25
38.0 - 44.5	Formatie van Stramproy en formatie Waalre	1 ^{ste} scheidende laag	0.005
44.5 - 54.5	Formatie van Peize en formatie van Waalre	2 ^{de} watervoerende pakket	5
54.5 - 73	Formatie van Peize en formatie van Waalre	2 ^{de} watervoerende pakket	50
73 - 78	Formatie van Waalre	2 ^{de} scheidende laag	0.01
78 - 88	Formatie van Peize en formatie van Waalre	3 ^{de} watervoerende pakket	5
88 - 100	Formatie van Waalre	3 ^{de} scheidende laag	0.01

3.1.2 Anisotropie in hydraulische conductiviteit

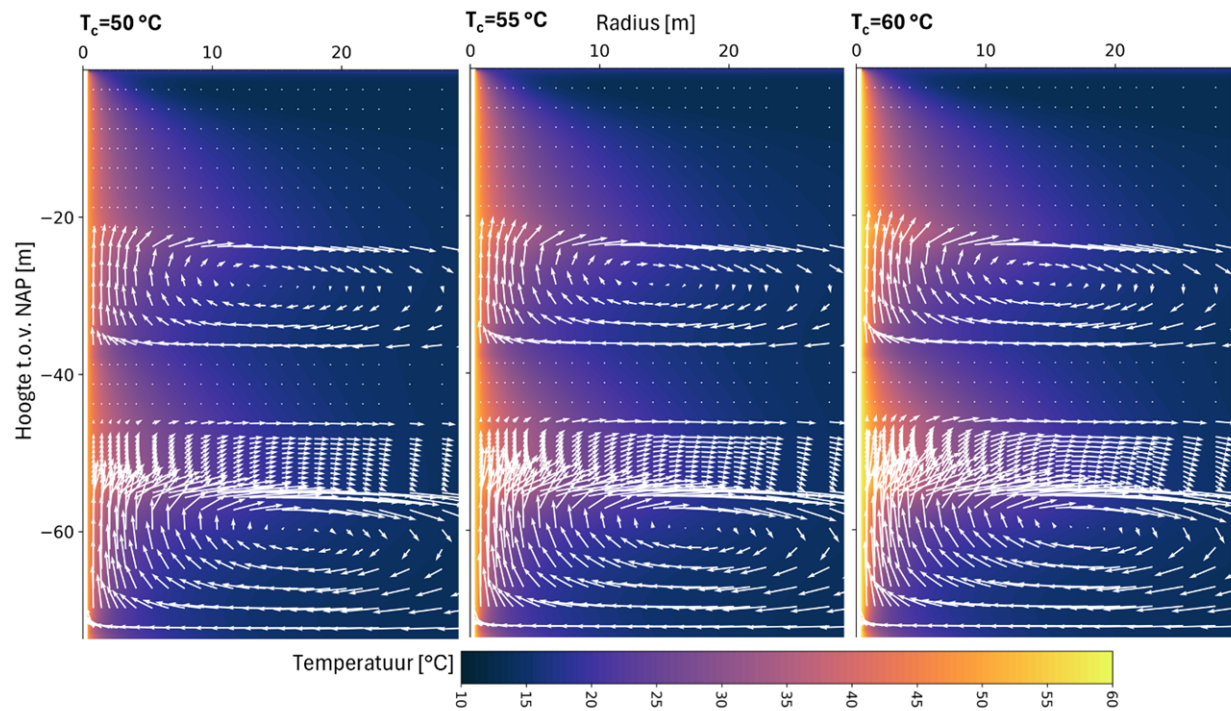
De sterkte van de convectiecellen in de lagen waren in belangrijke mate afhankelijk van de gehanteerde anisotropie (verhouding tussen horizontale en verticale hydraulische conductiviteit). Op basis van de horizontale hydraulische conductiviteiten die per laag waren aangenomen (model 6, Figuur 7) zijn bij de verdere modelkalibratie waarden voor de anisotropie in hydraulische conductiviteit (K_h/K_v) een realistische range tussen de 1 en 5 voor de gehele laagopbouw beschouwd. Hierbij zorgde een toename in anisotropie (lagere K_v) voor een hogere verticale stromingsweerstand en een afzwakking van de convectiecellen in de watervoerende pakketten. Het effect op het temperatuurprofiel manifesteerde zich met name in lagere temperaturen aan de bovenzijde en hogere temperaturen aan de onderzijde van de watervoerende pakketten (Figuur 8). Hoewel door hun lage hydraulische conductiviteit het warmtetransport door de scheidende lagen gedomineerd wordt door conductie, wordt ook het warmtetransport door conductie beïnvloedt doordat met de mate van convectiestroming in de bovenliggende en onderliggende watervoerende pakketten ook het temperatuurverschil over de scheidende laag verandert. Over het geheel genomen bleek met een anisotropiewaarde van 3 het gesimuleerde temperatuurprofiel het meest overeen te komen met het gemeten temperatuurprofiel (Figuur 8), met een goede overeenstemming voor het bovenste deel van het 2^{de} watervoerende pakket en 1^{ste} scheidende laag, en slechts een lichte overschatting van de temperaturen in het 1^{ste} watervoerende pakket en de deklaag. De simulatieresultaten in het onderste deel van het 2^{de} watervoerende pakket laten voor alle getoetste anisotropiewaarden een overschatting zien. Dit hangt waarschijnlijk samen met het ontbreken van diepere temperatuurmetingen waarmee de onzekerheden in dit deel van het model verder zouden kunnen worden ingeperkt. De modelafwijking kon niet geverifieerd worden voor GLV2 omdat daar goede temperatuurmetingen voor de 1^{ste} scheidende laag en bovenste deel van het 2^{de} watervoerende pakket in zijn geheel ontbreken vanwege de achtergebleven sondeerstreng (De Vries & Hartog, 2024). Daarom is besloten de onderste metingen in het 2^{de} watervoerende pakket niet mee te laten wegen in de beoordeling van de kalibratie.



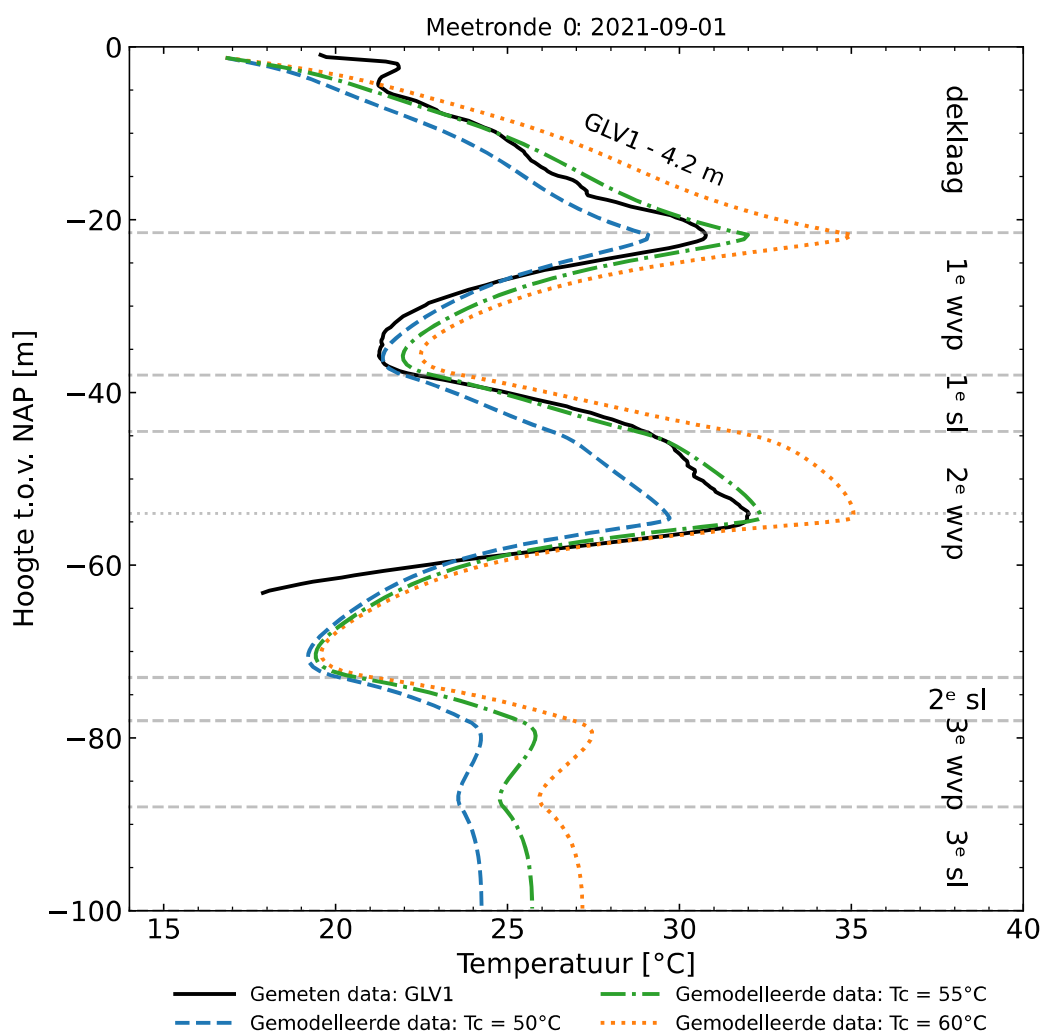
Figuur 8. Effect van anisotropie (1, 2, 3 en 5) op de warmteuitstraling, vergelijking tussen de gemeten en de gemodelleerde temperatuur voor meetpunt GLV1, meetronde 0.

3.1.3 Buitenste casingtemperatuur

Bij de modelkalibratie van de buitenste casingtemperatuur is een range van casingtemperaturen beschouwd is (50, 55 en 60°C) en aangenomen dat deze voor het dieptebereik van de temperatuurmetingen constant is. Bij hogere casingtemperaturen werden de convectiecellen in de watervoerende lagen versterkt (Figuur 9) en schoven de temperatuurprofielen over de gehele diepte naar hogere waarden (Figuur 10). Door de verhoogde convectiestroming en conductie waren de temperatuurverschillen tussen de temperatuurprofielen voor verschillende gesimuleerde casingtemperaturen het grootst aan de bovenzijde van de watervoerende pakketten, terwijl aan de onderzijde verschillen relatief klein waren, omdat bij de sterkere convectiecellen meer relatief kouder water wordt aangevoerd. Hoewel hogere casingtemperaturen op korte afstanden van put kunnen leiden tot relatief hogere temperaturen in de scheidende lagen doordat daar binnen koeling door convectie niet optreedt (De Vries & Hartog, 2024, Figuur 9). Echter lijkt op de afstand van GLV1 de invloed van de convectiestroming in de watervoerende lagen ook al van dominante invloed op de temperatuurprofielen over de scheidende lagen, op basis van het door convectiestroming resulterende temperatuurverschil over de scheidende lagen en de daarin optredende opwaartse conductieverliezen. Van de verschillende gesimuleerde casingtemperaturen gaf de simulatie met 55°C over het geheel genomen de beste overeenkomst met het gemeten temperatuurprofiel bij GLV1 (Figuur 10). Deze voor de productiefasen gesimuleerde temperatuur van de buitenste casing is ~10 °C lager dan die in de annulus, en ~30 °C dan de productietemperatuur (Figuur 6).



Figuur 9. Effect van casingtemperatuur op de warmteuitstraling vanuit de productieput. De temperatuur verdeling in de ondergrond, de pijlen geven de mate van grondwaterstroming aan. Putnabije uitsnede van de simulatieresultaten voor meetronde 0.



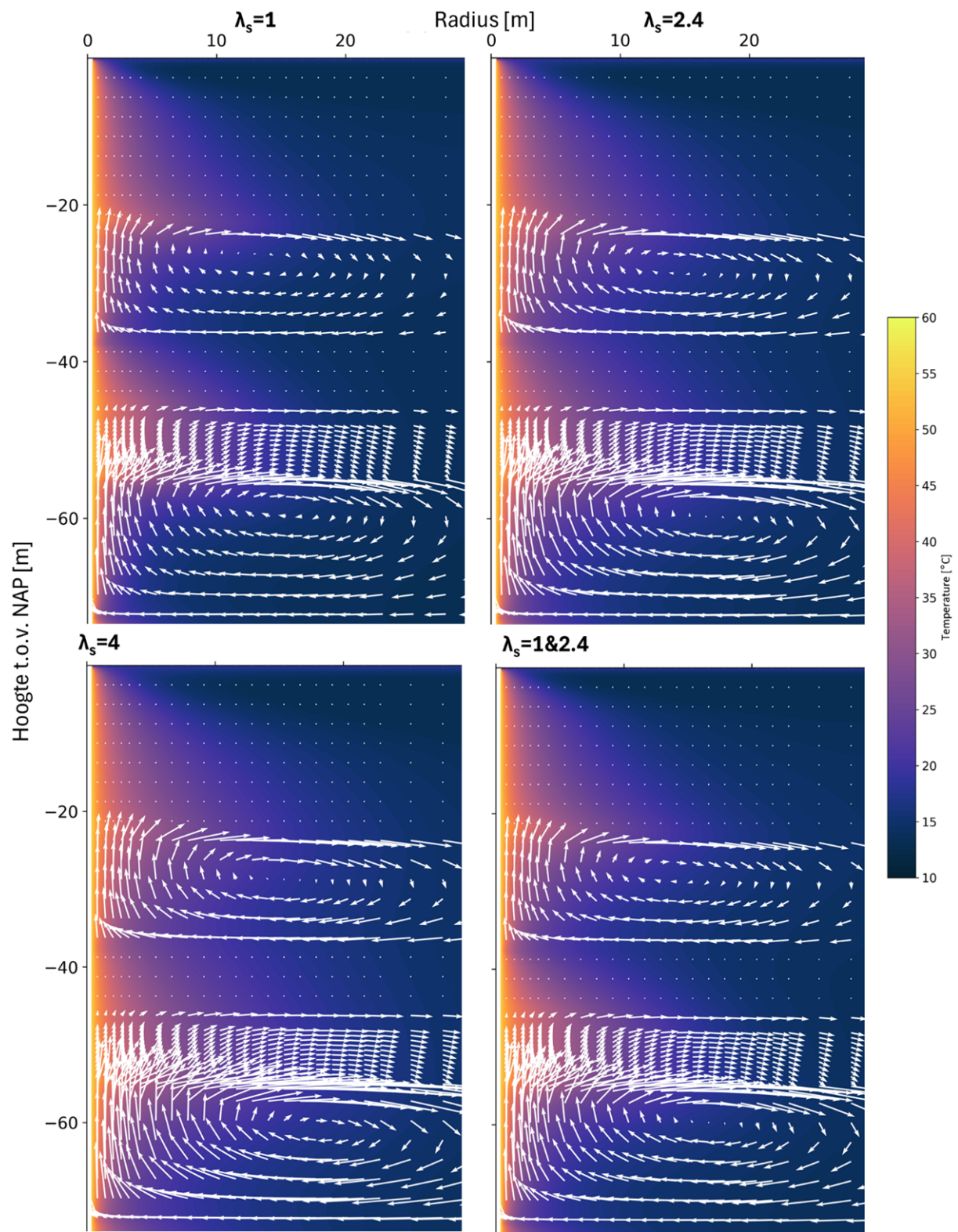
Figuur 10. Effect van casingtemperatuur (50, 55 en 60 °C) op warmteuitstraling, vergelijking tussen de gemeten en de gemodelleerde temperatuur voor meetpunt GLV1, meetronde 0.

3.1.4 Thermische conductiviteit vaste fase

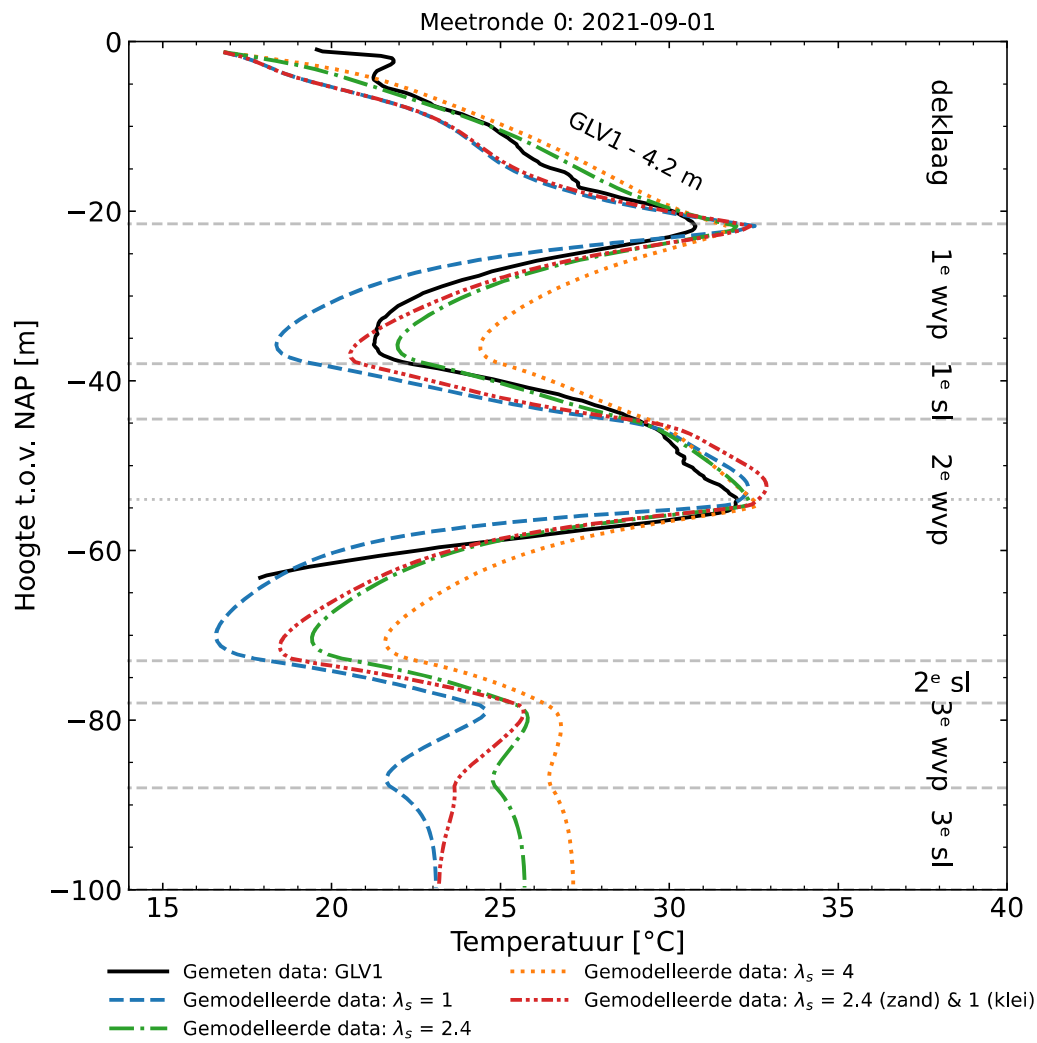
Tijdens de modelkalibratie is de thermische conductiviteit van de vaste fase gevarieerd tussen 1.0 W/(m °C) en 4.0 W/(m °C), waarden die de uiterste range van metingen beslaan (bv. Witte et al., 2002). In combinatie met de porositeit en thermische conductiviteit van water (Tabel 1) resulteren deze waarden in de bulk thermische conductiviteit voor de beschouwde geohydrologische eenheden. Bekend is dat scheidende lagen gemiddeld genomen een wat lagere bulk thermische conductiviteit hebben dan de watervoerende pakketten, maar dat de ranges voor beiden een grote overlap hebben (bijvoorbeeld recente metingen binnen het promotieonderzoek van Stijn Beernink voor onder meer de HTO locatie TU Delft). Als uitgangspunt is voor de kalibratie daarom een vaste waarde in de simulaties gehanteerd voor de gehele laagopbouw. Hierbij resulteerde een lage thermische conductiviteit voor de gehele laagopbouw voor een lagere totale aanvoer van warmte uit de putten en werd convectie nog dominanter voor het warmtetransport in de watervoerende pakketten. Figuur 11 wat geïllustreerd werd door een groter temperatuurverschil tussen de onderkant en bovenkant van de watervoerende pakketten (Figuur 12). De temperatuur boven in de watervoerende pakketten was echter vergelijkbaar met de simulaties met hogere thermische conductiviteit omdat in deze simulaties de geaccumuleerde warmte aan de bovenzijde van de watervoerende pakketten ook sneller weer door conductie naar boven wordt afgevoerd. Bij de simulaties met een hogere thermische conductiviteit verklaard de wat hogere mate van conductie voor een gedeeltelijke demping van het temperatuurverschil tussen de boven en onderkant van de watervoerende pakketten. Over het geheel genomen bleek uit de kalibratie dat met een waarde van 2.4 W/(m °C) voor de thermische conductiviteit van de

vaste fase voor de gehele laagopbouw de beste overeenstemming met het gemeten temperatuurprofiel optrad (Figuur 12).

Als gevoeligheidsanalyse is aanvullend ook nog een simulatie uitgevoerd waarbij voor de thermische conductiviteit van de vaste fase onderscheid gemaakt werd tussen de scheidende lagen met een lage thermische conductiviteit ($1.0 \text{ W/(m } ^\circ\text{C})$) en de watervoerende pakketten met een gemiddelde thermische conductiviteit ($2.4 \text{ W/(m } ^\circ\text{C})$). Hoewel over het geheel genomen in deze simulatie het waargenomen temperatuurprofiel minder goed benaderd werd dan met constante thermische conductiviteit van $2.4 \text{ W/(m } ^\circ\text{C})$ (Figuur 12), geven de resultaten nuttig inzicht in het gevolg van een lagere waarde in de scheidende lagen. Hierbij wordt namelijk het warmtetransport als het ware door de convectiecellen in de watervoerende pakketten nog wat meer “opgesloten”. Dit wordt geïllustreerd door de wat lagere temperaturen aan de onderzijde van de convectiecel (Figuur 11, Figuur 12), omdat deze minder gevoed wordt door warmteoverdracht via conductie vanuit de onderliggende scheidende laag. Vergelijkbaar zorgt de geringere warmteoverdracht naar de bovenliggende scheidende laag ervoor dat in het bovenste deel van het 2^{de} watervoerende pakket de temperatuur iets hoger is (Figuur 12).



Figuur 11. Effect van thermische conductiviteit op de warmteuitstraling vanuit de productieput. De temperatuur verdeling in de ondergrond, de pijlen geven de mate van stroming aan. Put nabije uitsnede van de simulatiereultaten voor meetronde 0.

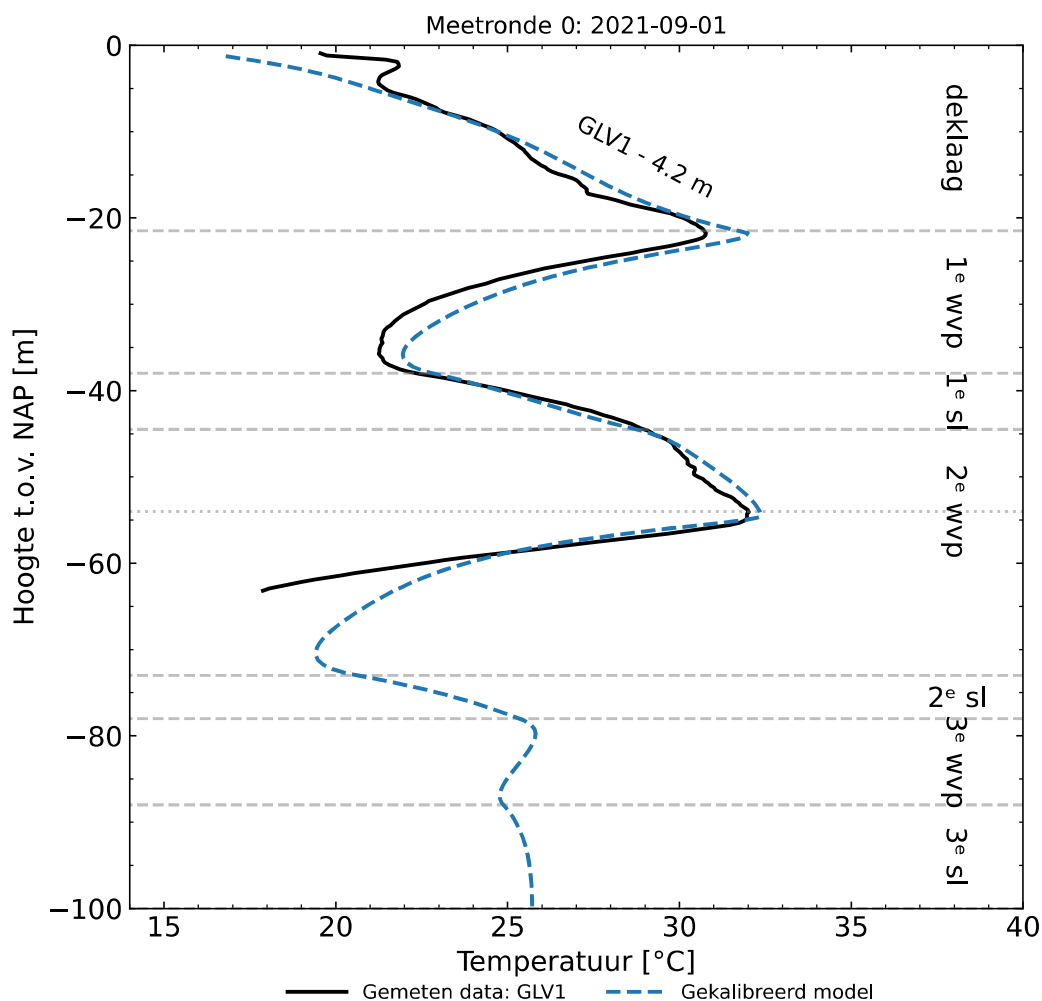


Figuur 12. Effect van thermische conductiviteit op de warmteuitstraling vanuit de productieput, vergelijking tussen de gemeten en de gemodelleerde temperatuur voor meetpunt GLV1, meetronde 0.

3.1.5 Gekalibreerd model voor het thermische effect van warmteuitstraling uit productieput

De initiële kalibratie van het model tot aan meetronde 0 bij GLV1, resulteerde in een gesimuleerd temperatuurprofiel dat het gemeten temperatuurprofiel goed reproduceert, met uitzondering van de bovenste 4 meter vanaf het maaiveld die onder sterkere temporele invloed zijn van de atmosfeer (Figuur 13) en de onderste 10 m van het 2^{de} watervoerende pakket, zoals eerder toegelicht waarschijnlijk door gebrek aan diepere meetdata die de simulatie resultaten konden helpen begrenzen.

In de resultaten van het gekalibreerde model wordt het temperatuurprofiel, zoals bij meetronde 0 waargenomen bij GLV1, redelijk goed benaderd, zowel voor de verticale patronen, de overgangen en de temperatuurwaarden. Voor de 1^{ste} scheidende laag en tot aan 58 m -NAP in het 2^{de} watervoerende grotendeels overeen met de gemeten waarden, met een lichte overschatting van max ~1°C. De grotere overschatting (tot 3°C) in het onderste deel van het model kan vele mogelijke oorzaken hebben waarvan het achterhalen bemoeilijkt wordt door het ontbreken van diepere meetgegevens die, zoals hierboven al opgemerkt, het model zouden kunnen helpen begrenzen. Zoals de simulatie resultaten voor de ondiepere lagen al illustreerde is er door de convectiestroming een belangrijke opwaarts gericht warmtetransportcomponent. Dit kan eveneens van toepassing zijn op het 3^{de} watervoerende pakket en de 3^{de} scheidende laag, aangezien deze lagen het 2^{de} watervoerend pakket ook direct beïnvloeden. Aan maaiveld spelen deze beperkingen niet en volgt de gemodelleerde temperatuur in de deklaag redelijk nauwkeurig de meetdata, dankzij het kunnen gebruiken van de temperatuurgegevens van het KNMI. Al zijn er wel kleine verschillen zichtbaar, dit kan te maken hebben met bijvoorbeeld de thermische invloed van de betonnen platen rond de putten.



Figuur 13. Vergelijking tussen de gemeten en het modelmatige gekalibreerde temperatuurprofiel voor meetpunt GLV1, meetronde 1, $T_c = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda_s = 2.4\text{ W/(m }^{\circ}\text{C)}$ en anisotropie = 3.

3.2 Evaluatie van het gekalibreerde model

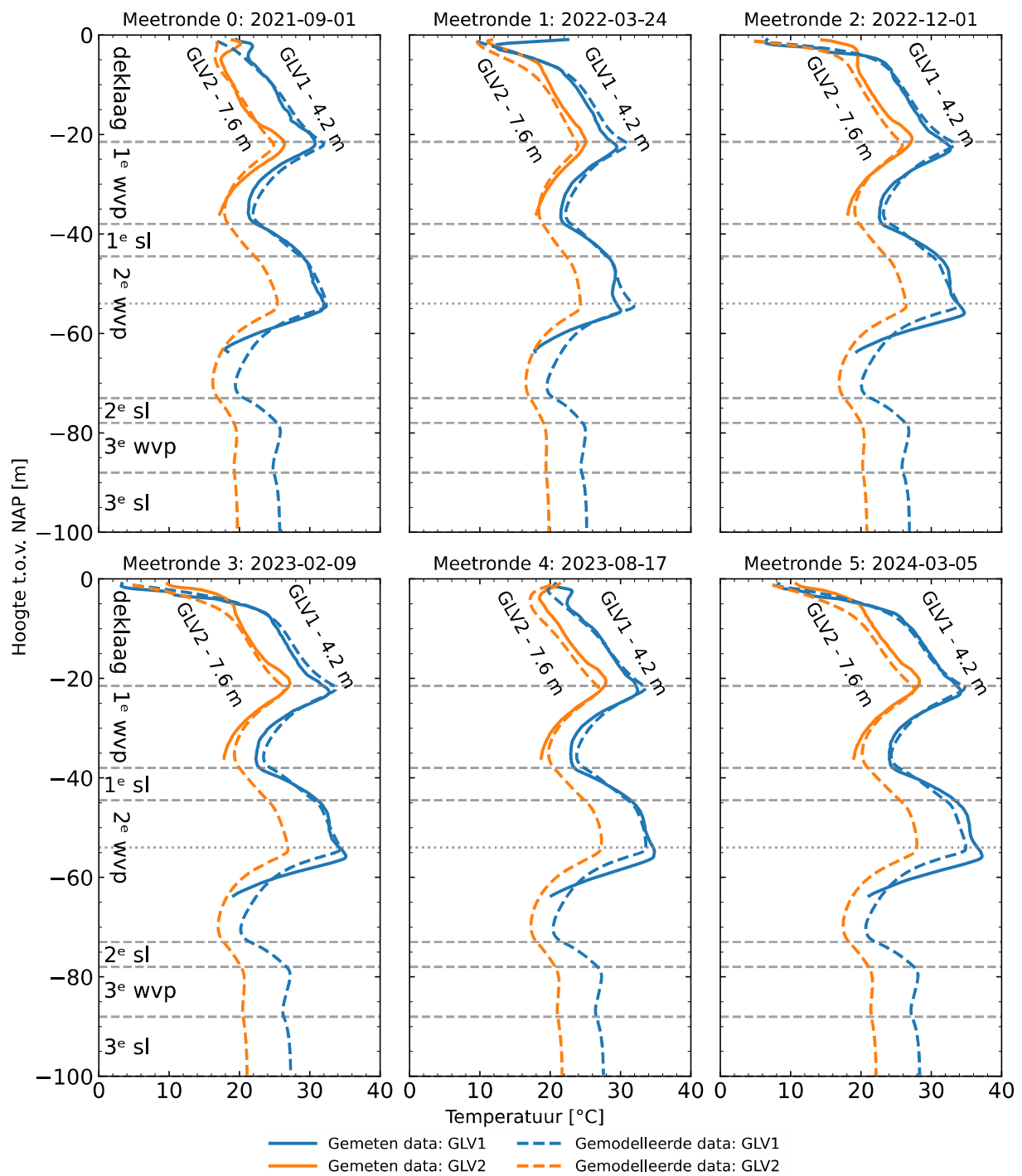
Ondanks de grote onzekerheid en onbekendheid van vele parameterwaarden gaf na een terughoudende kalibratieaanpak het model een redelijk goede benadering van het temperatuurprofiel, welke gemeten is bij de aanleg van de DTS-kabels, bij GLV1 (Figuur 13). Hoewel deze kalibratieaanpak niet de in theorie best mogelijke fit van de waargenomen temperaturen geeft (Paragraaf 3.1), kon het model nog redelijk overzichtelijk en simpel gehouden worden. Als toets op de robuustheid van het gekalibreerde model is de mate waarin de verdere thermische ontwikkeling in de tijd bij GLV1 en ook op grotere afstand bij GLV2 en GLV3 beschouwd.

3.2.1 Thermische ontwikkeling met afstand en in de tijd

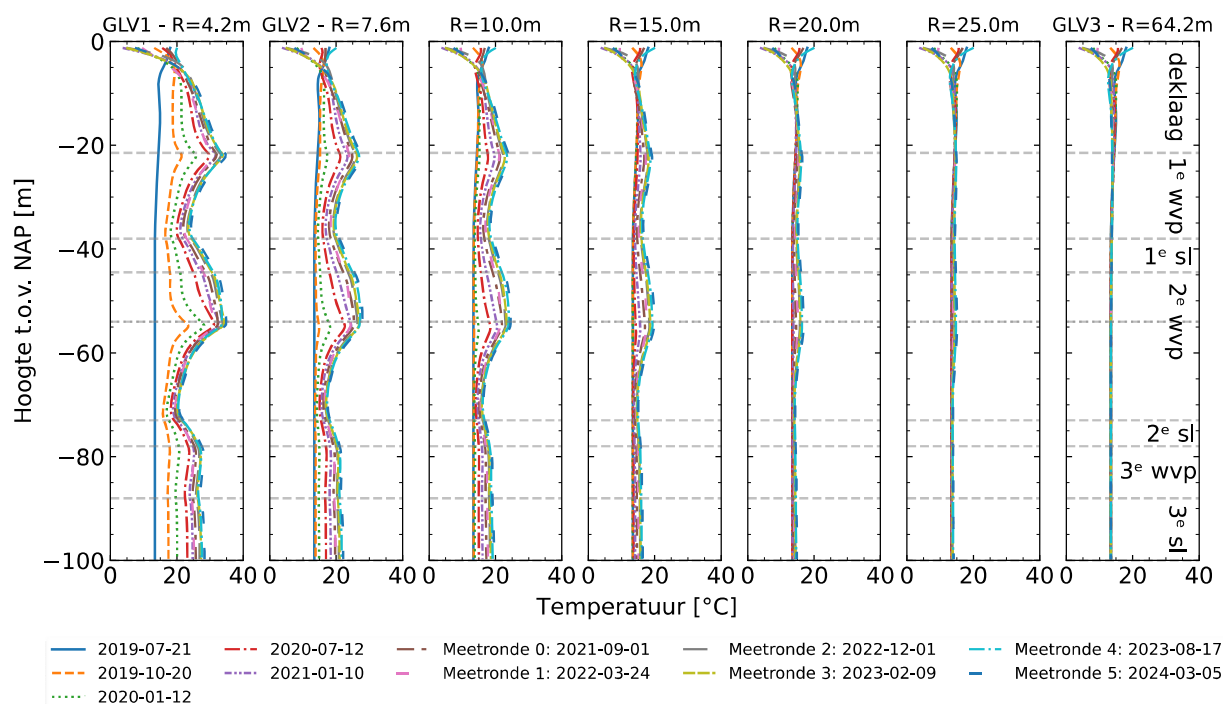
Voor meetronde 0 benaderd het initieel op GLV1 gekalibreerde model ook het toen waargenomen temperatuurprofiel bij meetpunt GLV2 redelijk goed (Figuur 14). Daar waar het model in het 1^{ste} watervoerende pakket een lichte overschatting geeft bij GLV1, geeft het een lichte onderschatting bij GLV2. De trends zoals waargenomen in de metingen bij beide meetlocaties worden gereproduceerd met een temperatuurverschil van ongeveer 5°C tussen de metingen in GLV1 en GLV2. Hoewel voor GLV2 onder het 1^{ste} watervoerende pakket geen vergelijking gemaakt kan worden volgde het gesimuleerde temperatuurprofiel ook daar die in GLV1 met een ongeveer hetzelfde temperatuurverschil. Deze overeenkomsten suggereren dat het gekalibreerde model voldoende nauwkeurig de thermische impact in de periode tussen de start van de aardwarmteproductie tot aan meetronde 0 heeft weten te beschrijven, ondanks dat er voor die periode geen gedetailleerde productiegegevens beschikbaar waren (paragraaf 2.3.2). Ook voor de daaropvolgende meetrondes blijven de modelresultaten de waargenomen GLV1 en GLV2 profielen, met hun mate van paralleliteit goed benaderen, inclusief de tijdelijke afkoelingen vanwege meerdere productiestops. Tijdens de periode tussen de meting uitgevoerd bij aanleg van de monitoring en het eerste meetmoment, waarin de productie langdurig werd onderbroken, trad de grootste afkoeling op aan de bovenzijde van de watervoerende pakketten en aan de onderzijde van de scheidende lagen. Bij GLV1 laat het model een geringere afkoeling zien dan gemeten, met een maximale overschatting van 1 °C. Bij meetpunt GLV2 onderschat het model de temperatuur met maximaal 2 °C. Voor de hierna volgende meetrondes is te zien dat er kleine verschillen zijn met name bij de laagovergangen, mogelijk zijn die het gevolg de invloed van de kleinschaliger invloed van productievariatie die niet in voldoende detail in het model meegenomen kon worden.

De grootste afwijking is te zien in het onderste deel van het 2^{de} watervoerende pakket, waarschijnlijk als gevolg van de toegelichte afwijking die het gekalibreerde model in dit deel ook al liet zien (Figuur 14). Hoewel op basis van de grotendeels overeenkomstigheid voor GLV2 en de ontwikkeling in de tijd gedurende de 5 meetrondes het gekalibreerde model vertrouwen geeft voor het blijvend kunnen benaderen van toekomstige meetrondes, vraagt het bovenste deel van het 2^{de} watervoerende pakket wellicht nog wat meer aandacht. In meetronde 5 is die onderschatting van 1-2 °C namelijk ook waarneembaar in het bovenste deel van het 2^{de} watervoerende pakket, hoewel die in eerdere rondes varieerde en beperkter was.

Tot slot geven, overeenkomstig met het niet waarnemen van thermische effecten in de als referentie bedoelde GLV3 op 64,2m, de simulatieresultaten aan dat er op afstanden groter dan 25 m is voor de beschouwde periode aan monitoringsrondes nog geen merkbare verhoging te verwachten valt (Figuur 15). Naarmate de afstand toeneemt, nemen de temperatuurverhogingen geleidelijk af, met respectievelijk 3.4 °C op 20 m en 1.6 °C op 25 m afstand. Naar verwachting zal deze thermische impact zich nog geleidelijk blijven uitbreiden.



Figuur 14. Vergelijking tussen de gemeten en het modelmatige temperatuurprofiel over aftand en tijd. Gekalibreerd model: $T_c = 55\text{ °C}$, $\lambda_s = 2.4\text{ W/(m °C)}$ en anisotropie = 3.



Figuur 15. Gemodelleerde warmteverspreiding op verschillende afstanden vanaf het begin van de productie tot aan het 5^{de} meetmoment in maart 2024. $R = 4.2$, $R = 7.5$ m en $R = 64.2$ m, zijn respectievelijk GLV1, GLV2 en GLV3. Gekalibreerd model: $T_c = 55$ °C, $\lambda_s = 2.4$ W/(m °C) en anisotropie = 3.

3.3 Reflectie en Discussie

De kalibratie heeft geresulteerd in een model dat, zowel ruimtelijk als gedurende de beschouwde monitoringsperiode, de waargenomen opwarming van de ondiepe ondergrond rond Trias-Westland productieput NLW-GT-02 grotendeels goed benadert (Figuur 14). Ondanks de vele onbekende en onzekere parameters, en de daarom terughoudende kalibratiebenadering, bevestigt dit model de dominantie van thermische convectiecellen in de watervoerende pakketten en de resulterende opwaartse thermische conductie in de scheidende lagen voor het warmtetransport op deze locatie (De Vries & Hartog, 2024) en het kunnen ontstaan van thermische convectiecellen door warmteverlies uit warme putten in het algemeen (Van Lopik et al., 2015). Deze resultaten in ogenschouw nemend zijn een aantal aspecten omtrent de thermische impact van geothermieputten, zowel voor deze specifieke locatie als meer in het algemeen, relevant voor een verdere beschouwing. Deze worden hieronder kort toegelicht.

3.3.1 Lange termijn ontwikkeling thermische beïnvloeding Trias-Westland systeem

De waargenomen temperatuurprofielen, en de modelmatige benadering daarvan, laten zien dat vanaf het begin van de geothermische productie in juli 2019 tot aan de aanleg van de DTS-kabels in september 2021 er een sterke opwarming van de omringende diepe ondergrond heeft opgetreden. Afgezien van de invloed van tussentijdse productiestops, heeft deze opwarming zich, minder snel, verder doorgezet tijdens de monitoringsperiode tot aan maart 2024. Deze doorgaande opwarming tijdens de beschouwde monitoringsperiode is vooral bij GLV1 herkenbaar aan de toenemende temperatuur aan de bovenkant van de watervoerende pakketten (Figuur 14). Met de tijd minder snel toenemende en verspreidende opwarming is ook de verwachting zolang de geothermieput produceert (Van Lopik et al., 2015). Aangezien het gekalibreerde model redelijk goed de waargenomen opwarming rond de productieput NLW-GT-02 beschrijft is de verwachting dat deze dat ook richting de toekomst zal kunnen doen, al is dat iets om nog te verifiëren. Vanwege de sterke opwaartse richting van het warmtetransport door de convectiecellen, via de deklaag naar maaiveld, kunnen deze warmteverliezen toenemen vanwege het groeiende maaiveldoppervlak door toenemende laterale warmteverspreiding onder de deklaag. Mogelijk kan dit leiden tot een situatie waarbij de warmteverliezen uit de put gecompenseerd worden door de warmteverliezen naar maaiveld en verdere laterale warmteverspreiding in de ondergrond afgeremd wordt. Of en wanneer dat te verwachten zou

kunnen zijn zou met een beter inzicht in die warmtebalans ingeschat kunnen worden. Sowieso zal ook de mate waarin de geothermische put vol zal kan produceren van invloed zijn op de verdere opwarming die optreedt. Verder aandachtspunt bij het anticiperen op de verdere opwarming van de ondiepe ondergrond op deze locatie is ook dat er sinds juli 2021 een tweede doublet in bedrijf genomen is op 20 m van het eerste doublet (Figuur 1). Vanwege deze afstand en de latere ingebruikname is het niet de verwachting dat de waargenomen opwarming bij NLW-GT-02 nu al beïnvloed wordt door het tweede systeem, maar dat zou op termijn kunnen gebeuren. In dat geval zou een axi-symmetrisch model niet langer toereikend om de algehele opwarming te simuleren maar zou een 3D-model nodig zijn.

3.3.2 Modelmatige beschrijving van thermische putuitstraling

Niet onverwacht werd tijdens de kalibratie duidelijk dat temperatuur die aangenomen werd voor de buitenste casing van grote invloed was voor de mate van opwarming (Figuur 10). Met de temperatuursensor in de annulus kon die temperatuur begrensd worden, en hoewel met de aanname van 55°C een goede benadering van de waargenomen opwarming kon worden bereikt, gaat dit voorbij aan de waarschijnlijke verticale temperatuurvariatie over de buitenste casing. De grootte van deze temperatuurvariatie door de convectiecellen, relatieve koeling onderin en opwarming bovenin, is onbekend maar lijkt geen grote invloed gehad te hebben op de waargenomen opwarming. Ten behoeve van toekomstige thermische impact monitoring bij nieuw aan te leggen systemen zou het wel goed zijn om ook een glasvezelkabel net buiten of binnen de buitenste casing te plaatsen om de hoogte en temporele (en verticale) variatie van deze belangrijke randvoorwaarde niet te hoeven inschatten tijdens kalibratie. Als alternatief of aanvullend zou ook het mee modelleren van het warmtetransport door de putverbuizing overwogen kunnen worden om tot een verticaal en temporeel niet constante casingtemperatuur te komen. Interessant in dit verband is ook de indicatie van warmteverlies uit de Trias-Westland productieput op basis van de geregistreerde relatie tussen de productietemperatuur en het debiet waarmee geproduceerd wordt (Figuur 5). Op basis van deze data is het mogelijk in te schatten wat de totale warmteverliezen tijdens productie zijn. Weliswaar treden die warmteverliezen over de hele lengte van de put op en niet alleen over het gesimuleerde ondiepe deel, maar het zou mogelijk een bovengrens kunnen geven aan de totale warmteverliezen die gesimuleerd worden. Ook zou zulke productiedata mogelijk gebruikt kunnen worden om een eerste inzicht te krijgen in verschillen in de warmteverliezen vanuit productieputten onder verschillende put- en productiecondities en hydrogeologische condities.

3.3.3 Invloed van locatie-specifieke condities op opwarming ondiepe ondergrond

De resultaten voor de onderzochte Trias-Westland locatie geven aan dat locatie-specifieke condities van grote invloed zijn op de mate en wijze van opwarming van de ondiepe ondergrond rond een productieput (en door de lagere temperatuur in minder mate een injectieput). Naast de productietemperatuur zal de putconstructie (bv. het aantal verbuizingen) sterke invloed hebben op de resulterende temperatuur van de buitenste casing. In interactie met de thermische conductiviteit van de omringende ondergrond zal dat de mate van warmteverlies naar die ondergrond bepalen, waarbij het optreden van convectiecellen langs de put de warmteoverdracht naar de ondergrond verder zullen versnellen. Deze convectiecellen zijn ook een belangrijkste factor in de laterale verspreiding van warmte langs de bovenkant van de watervoerende pakketten en zijn voor Trias-Westland de voornaamste factor in het bepalen van de thermische gradiënt over de scheidende lagen. De mate van aanwezigheid en hydraulische conductiviteit van watervoerende pakketten in de omringende ondergrond bepalen in grote mate de variatie in de temperatuurverdeling van de ondergrond. Terwijl in deze studie zowel de hydraulische als de thermische conductiviteiten moesten worden ingeschat tijdens de modelkalibratie op basis van de monitoringsgegevens, zouden goede bepalingen van deze parameterwaarden zeer zinvol zijn, te meer om de thermische impact van een geothermiesysteem a priori te kunnen inschatten. Ook de aanwezigheid van de dikke deklaag bij het Trias-Westland systeem heeft een sterke invloed op de opwarming van de ondergrond doordat deze de opwarming richting maaiveld sterk beperkt. Bij een dunnere of afwezige deklaag zullen de thermische effecten ondieper door werken en zullen ook de thermische verliezen naar maaiveld groter zijn. Om aan te kunnen geven in welke mate deze variatie aan factoren van invloed kan zijn op de verspreiding van warmte in de ondergrond

zouden aanvullende simulaties voor enkele typerende hydrogeologische condities zinvol zijn. Daarbij kan dan ook rekening gehouden worden met de invloed van eventuele grondwaterstroming, welke zeer laag is bij het Trias-Westland systeem en daarom in de modellering niet beschouwd is. Naar verwachting zal de aanwezigheid van grondwaterstroming zorgen voor een grotere ruimtelijke verspreiding van warmte in de richting van de stroming, met lagere temperaturen vanwege het koelende effect van grondwaterstroming op de verbuizing.

4 Conclusies

Naar aanleiding van de eerder waargenomen opwarming van de ondiepe ondergrond rond Trias-Westland productieput NLW-GT-02 is in het hier gerapporteerde onderzoek een locatie-specifiek model ontwikkeld dat de thermische impact door warmteverliezen uit de put kon beschrijven. Met het ontwikkelde axi-symetrische numeriek grondwaterstroming en transportmodel (MODFLOW 6) is de opwarming vanaf de start van de aardwarmtewinning in juli 2019 tot en met de laatst beschouwde monitoringsronde in maart 2024 beschouwd. Hierbij is rekening gehouden met temperatuurvariaties aan maaiveld, geohydrologische en operationele omstandigheden gedurende die periode, zoals productiestops. Gebruikmakend van bestaande productie- en ondergrondgegevens is het model handmatig gekalibreerd en geëvalueerd aan de hand van de DTS-metingen op de verschillende afstanden en verschillende meetmomenten. Het model bevestigde het ontstaan van thermische convectiecellen als belangrijkste warmtetransport mechanisme in de aanwezige watervoerende pakketten, welke door thermische conductie via de scheidende lagen verder opwaarts verspreid wordt. Na kalibratie kon, met een relatief simpel gehouden laagopbouw en toekenning van realistische parameterwaarden voor doorlatendheden en thermische eigenschappen, het uiteindelijke model een goede benadering geven van de waargenomen verticale temperatuurvariatie en ruimtelijke verspreiding in de ondergrond voor de beschouwde monitoringsperiode. Als uiteindelijke randvoorwaarden zijn hierbij een temperatuur van 55°C van de buitenste casing (tijdens productie, $T_{\text{prod.}} \sim 86^\circ\text{C}$) en wekelijks variërende maaiveld temperaturen gehanteerd. Het model toont aan dat de opwarming tot de laatst beschouwde monitoringsronde (maart 2024) niet verder dan 25 m reikte, ruim binnen de op 64.2 m als referentie beschouwde DTS-meting. Op basis van de goede overeenstemming van de modelresultaten met de waarnemingen is de verwachting dat met het model ook geanticipeerd kan worden op de verdere ruimtelijke ontwikkeling van de thermische impact, al zal dit ook blijven afhangen van het optreden van productiestops. Hoewel de beschouwde veldmetingen en de inzichten uit de simulatie hier nog niet op wijzen, zal op termijn mogelijk ook thermische impact van de later gerealiseerde productieput NLW-GT-03 op 20 m afstand van invloed gaan hebben op de DTS-metingen.

Referenties

- de Vries, E. T., & Hartog, N. (2024). Opwarming grondwater door warmteuitstraling vanuit geothermieput bij Trias-Westland; Tussentijdse interpretatie temperatuurmetingen. *KWR 2024.008*. <https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/temperatuurmonitoringproject-trias-westland-interpretatie-eind-2023/>
- EBN. (2021). Temperatuurmonitoring Grondwater nabij Geothermie; Samenvatting Projectvoorstel. *EBN Kennisbank*. <https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/temperatuurmonitoringproject-trias-westland/>
- Langevin, C. D. (2008). Modeling axisymmetric flow and transport. *Ground Water*, 46(4), 579–590. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00445.x>
- 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)*.
- Witte, H. J. L., Van Gelder, G. J., & Spitler, J. D. (2002). In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective. *Ashrae Transactions*, 263(108).

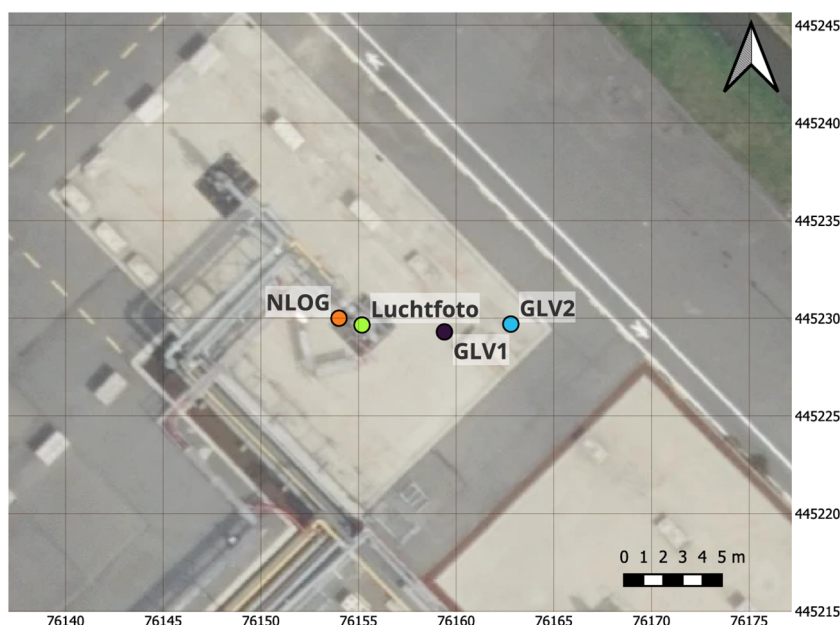
I Bijlage

I.1 Locatie DTS-kabels

Uit nader onderzoek bleken de eerder vermelde locaties niet correct, daarom zijn er op verschillende manieren de locaties opnieuw bepaald. Volgens de data beschikbaar via NLOG is de locatie van de productieput vastgesteld op RD-coördinaten 76154, 445230, met een nauwkeurigheid op meterschaal. Luchtfotografie biedt een nauwkeuriger resultaat, 76155.2, 445229.0. Deze metingen worden beide gecombineerd met de locatie van de DTS-kabels gemeten door Wiertsema & Partners (Figuur A1). HVC heeft de afstand van de buitenzijde van de productieput tot de glasvezelkabels ingemeten, waarbij alleen de radius van de put moet worden opgeteld. Wiertsema & Partners heeft de locaties van DTS-kabels op centimeter schaal ingemeten, hoewel de locatie van de productieput niet direct door hen is ingemeten kan deze wel worden afgeleid uit een situatieschets (Wiertsema & Partners, 2021b). Wanneer de meting van NLOG buiten beschouwen gelaten wordt dan variëren de gemeten afstanden tussen de productieput en de DTS-kabels maximaal 22 cm (Tabel A1). Echter liggen de DTS-kabels meer dan één meter verder van de productieput wanneer de NLOG productieputlocatie gebruikt wordt. Dit duidt op een aanzienlijke onnauwkeurigheid in de NLOG-data. Deze onnauwkeurigheid leidt tot een onderschatting van de temperatuurprofiel ten opzichte van de metingen. Verschillen in de temperatuurprofielen van de andere afstandsmetingen zijn gering, daarom is in deze studie gekozen voor de locatie van de productieput en glasvezelkabels zoals gemeten door HVC.

Tabel A1. Locatie van glasvezelkabels ten opzichte van het hart van de productieput vanuit 4 bronnen

Afstand [m]	NLOG	Luchtfoto	HVC	Wiertsema
Tussen productieput en GLV1	5.45	4.24	4.18	4.40
Tussen productieput en GLV2	8.81	7.62	7.58	7.77
Tussen GLV1 en GLV2	3.36	3.39	3.40	3.37

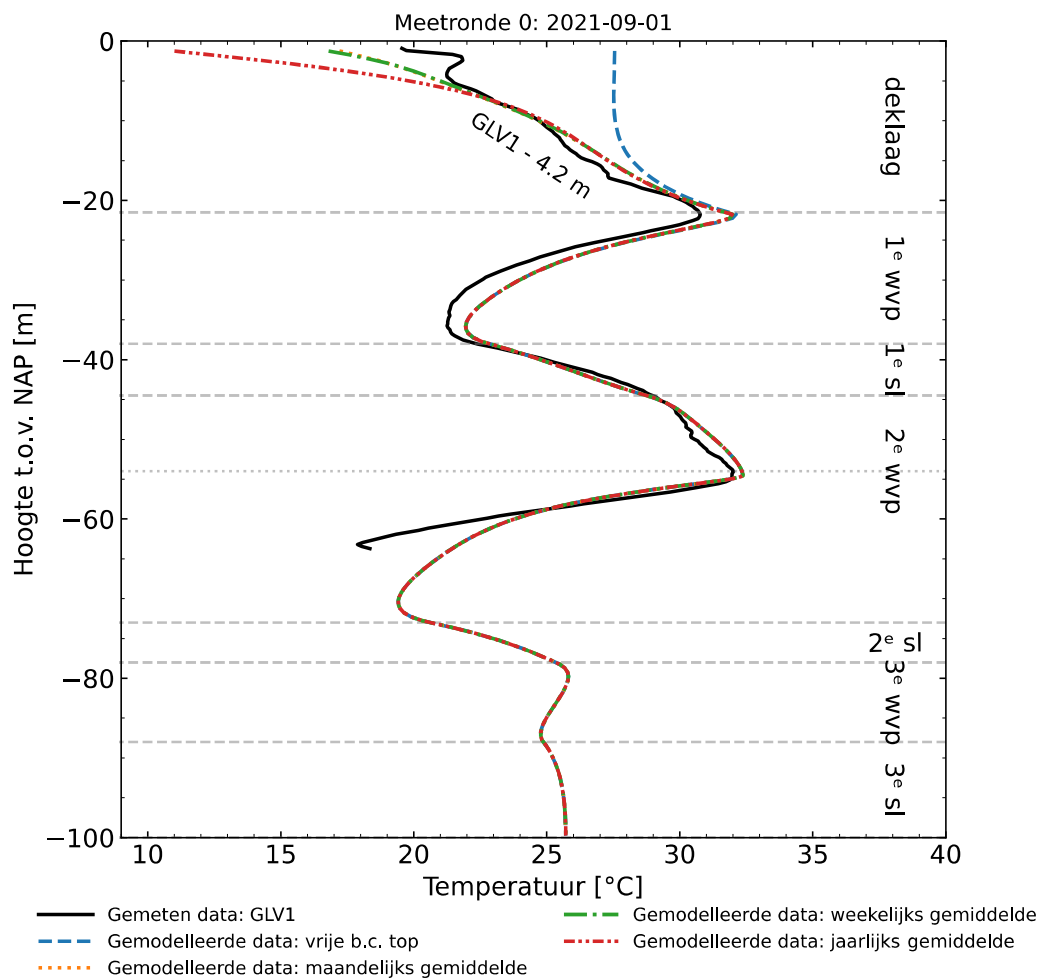


Figuur A1. Locatie van de productieput, gegeven door NLOG en gemeten in de luchtfoto en de locaties van de glasvezelkabels (Wiertsema & Partners, 2021b). Coördinaten zijn gegeven in het Rijksdriehoekstelsel.

I.II Atmosferische randvoorwaarden

In eerdere modelstudies werd de warmteuitstraling niet gemodelleerd tot het maaiveld (Van Lopik et al., 2015; Van Lopik & Hartog, 2023). De temperatuurmetingen werden echter verricht tot het maaiveld (De Vries & Hartog, 2024), en om het model te kalibreren, wordt daarom aan de bovenzijde van het model een atmosferische randvoorwaarde toegevoegd.

In het geval van het ontbreken van een atmosferische randvoorwaarde werd warmte in de deklaag geaccumuleerd, voornamelijk afkomstig vanuit de convectiecel in het 1^{ste} watervoerende pakket. Dit resulteert in onrealistisch oppervlaktetemperaturen tot 37°C (Figuur A2), hoewel dit effect zich beperkt tot de deklaag. De invloed van de opgelegde atmosferische randvoorwaarde is zichtbaar tot een diepte van 10 m –NAP, ongeacht hoe de buitentemperatuur wordt gemiddeld, hetgeen consistent is met temperatuurmetingen bij Trias Westland (de Vries & Hartog, 2024). Bij gebruik van jaarlijkse temperatuurgemiddelden verdwijnen in de bovenste 10 meter de temperatuurvariëaties over de tijd volledig, doordat seizoengebonden temperatuurfluctuaties worden uitgemiddeld. Tussen het gebruik van week-en maandgemiddelde zijn er slechts verschillen in de eerste meter beneden het maaiveld aangezien in beide gevallen de pieken en dalen in temperatuur niet volledig worden uitgevlakt. De interactie tussen de ondergrond en de ondergrond is belangrijk om te modeleren, al blijkt de keuze van de tijdschaal voor de atmosferische randvoorwaarden minder cruciaal te zijn voor realistische simulatieresultaten, aangezien de invloed beperkt blijft tot de bovenste 10 meter van de ondergrond.



Figuur A2. Effect van atmosferische invloed op de warmteuitstraling, randvoorwaarden bovenzijde model zijn wekelijkse, maandelijkse, jaarlijkse gemiddelde en onbepaalde randvoorwaarde. Vergelijking tussen de gemeten en de gemodelleerde temperatuur voor meetpunt GLV1, meetronde 0. Gekalibreerd model: $T_c = 55$ °C, $\lambda_s = 2.4$ W/(m °C) en anisotropie = 3.