

Grondwatertemperatuur op drift: een kans om hydrogeologische systemen door te lichten

VICTOR BENSE, TITUS KRUIJSSEN, MARTINE VAN DER PLOEG

Grondwatertemperatuur-diepteprofielen worden al lange tijd gebruikt om de verticale component van grondwaterstroming te berekenen. Hierbij wordt aangenomen dat het temperatuurprofiel stabiel is in de tijd. Grondwatertemperaturen in de Nederlandse ondergrond zijn echter al waarschijnlijk sinds eind jaren 60 aan het toenemen als gevolg van een atmosferische opwarming en verstedelijking. Dit blijkt uit een analyse van temperatuur-dieptemetingen in peilbuizen uit de jaren 70 en 80 van de vorige eeuw, vergeleken met recente data verkregen op dezelfde locaties. Als gevolg van de huidige opwarming van het grondwater zijn klassieke methodes om met grondwatertemperatuurmetingen grondwaterstroming in kaart te brengen steeds minder goed toepasbaar. In dit artikel laten we zien hoe met behulp van een nieuwe methode de temperatuur-diepte profielen toch gebruikt kunnen worden voor het correct inschatten van verticale grondwaterstroming. Daartoe analyseren we de variatie in diepte tot waar het signaal van opwarming aan het oppervlak te zien is in temperatuur-dieptedata verzameld in en rondom het Renkums Beekdal. De berekende verticale grondwaterstroming is in combinatie met stijghoogtemetingen gebruikt om de verticale hydraulische doorlatendheid van de Waalre aquitard te berekenen. Deze blijkt goed overeen te komen met waarden in REGIS. We concluderen daarom dat met onze methode temperatuur-diepteprofielen die verstoord zijn door opwarming kwantitatief geïnterpreteerd kunnen worden om verticale grondwaterstroomsnelheden te bepalen.

Artikel

Inleiding

Seizoensfluctuaties van de oppervlaktetemperatuur zijn terug te zien tot ongeveer 20 meter diepte in de temperatuur van het grondwater. Daaronder neemt de temperatuur toe met de diepte. Dat is het gevolg van de aanwezigheid van geothermische warmte, een combinatie van restwarmte aanwezig in de mantel sinds de vorming van de aarde en warmte uit radioactief verval van zware metalen in de aardkorst. Deze warmte stroomt voornamelijk via warmtegeleiding in de richting van het aardoppervlak. In Nederland is de toename van temperatuur met de diepte in de bovenste ~500 m van de ondergrond in de orde van 0.02-0.03 °C/m. Grondwaterstroming resulteert ook in warmteverplaatsing, convectie, en kan op die manier de warmteverdeling in de ondergrond beïnvloeden. Metingen van temperatuurvariaties kunnen daarom gebruikt worden voor de detectie en kwantificering van grondwaterstroming. Hierbij merken we op dat het vooral de verticale component van grondwaterstroming is die een duidelijk waarneembaar effect heeft op de ondergrondse temperatuurverdeling. In grondwatervoedingsgebieden worden de verticale temperatuurgradiënten

verkleind doordat de convectie tegen de geothermische gradiënt inwerkt en de netto warmteflux naar het oppervlak verlaagd wordt. Terwijl in kwelgebieden het omgekeerde gebeurt en grondwater op een bepaalde diepte relatief warm is ten opzichte van de zelfde diepte in infiltratie gebieden. In combinatie met de geothermische achtergrondgradiënt levert dit effect in kwel- en infiltratie gebieden respectievelijk concave en convexe temperatuur-diepteprofielen op. De kromming van het temperatuur-diepteprofiel ten opzichte van een lineair profiel kan zo gebruikt worden om de verticale grondwaterstroming te berekenen met de analytische oplossing van Bredehoeft en Papadopoulos (1965). Een belangrijke aanname van deze analytische methode is dat de temperaturen stabiel in de tijd zijn, stationair, en dat de krommingen in het temperatuur-diepteprofiel alleen door verticale grondwaterstroming worden veroorzaakt. Bij sterke laterale instroom van water met een afwijkende temperatuur, of een specifieke gelaagdheid in geologie en daarbij behorende variatie in thermische geleidingscoëfficiënten kan in sommige gevallen ook een gekromd temperatuur-diepteprofiel ontstaan. Een kromming in het temperatuur-diepteprofiel kan echter ook ontstaan omdat er geen sprake is van een stationaire situatie. Dit is in toenemende mate het geval door zowel opwarming van de atmosfeer als veranderingen in landgebruik. Beide leiden tot een opwarming van het ondiepe grondwater die langzaam dieper doordringt. Hierdoor ontstaat tot een versterking van de puur stationaire situatie waardoor de klassieke analytische technieken onbruikbaar worden (Ferguson en Woodbury, 2005).

In dit artikel laten wij voor drie locaties in het Veluwegebied zien hoe de grondwatertemperatuur in de bovenste 100-150 m van de ondergrond sterk is toegenomen, met name in de afgelopen vier decennia. Onze data suggereren dat de toename van temperatuur op diepte als gevolg van opwarming aan het oppervlak sterk afhankelijk is van de mate van verticale grondwaterstroming. Voor recent verkregen data uit het Renkums Beekdal laten we op grond van dit effect zien dat de verticale component van de grondwaterstroomsnelheid ook aan de hand van deze niet-stationaire temperatuur-diepte profielen nog goed geschat kan worden.

Temperatuur-diepte metingen

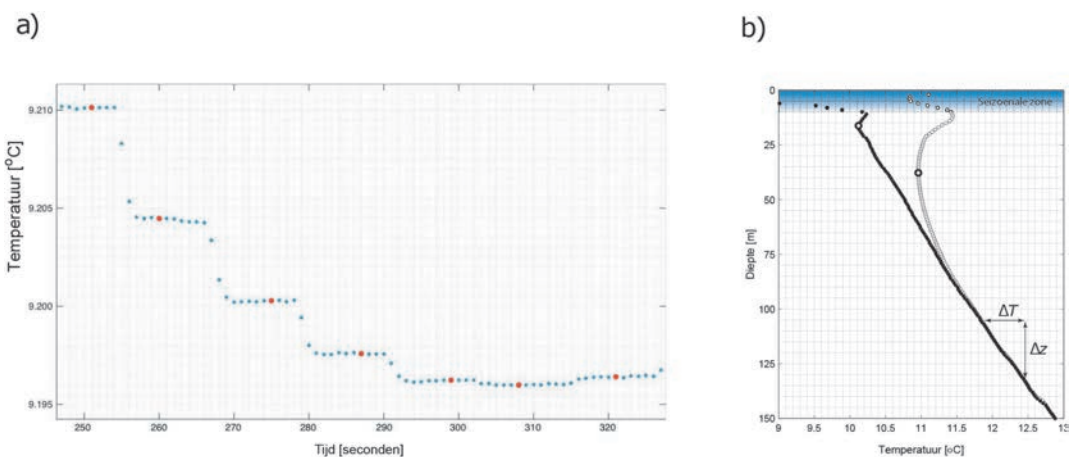
Het verloop van grondwatertemperatuur met diepte kan in principe relatief eenvoudig bepaald worden door een thermometer te laten zakken in een peilbuis. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat de temperatuurverdeling met de diepte zoals die in de temperatuurdata van de waterkolom binnen de peilbuis gemeten wordt gelijk is aan die in de geologische formatie buiten de peilbuis. Op het moment dat een thermometer in de waterkolom neergelaten wordt zal deze temperatuurverdeling licht verstoord worden, maar zodra het zakken stopt zal die ook weer snel de temperatuur van de formatie buiten de buis aannemen. Vooral voor de smalle peilbuizen die in Nederland veel gebruikt worden met een diameter van 1" of 2" (~25-50 mm) zijn voorgaande aannames redelijk, zo blijkt uit modellen en metingen.

Tot recent werden temperatuur-dieptemetingen in peilbuizen vooral gedaan met een temperatuurgevoelige weerstand die met een kabel werd neergelaten

in een peilbuis. Daarbij kan de stabilisatie van de temperatuur op elke meetdiepte bekeken worden voordat men de kabel verder laat zakken naar de volgende meetdiepte. Met deze methode duurt het, bijvoorbeeld, al snel anderhalf tot twee uur voordat een peilbuis van 100 meter is bemeten. Het gebruik van autonome temperatuurloggers (wij gebruiken de temperatuurloggers van de firma RBR, Canada), ontworpen voor mariene toepassingen, bevestigd aan simpele staalkabels blijkt een veel tijdefficiëntere methode op te leveren, waarbij in ongeveer 20 minuten een diepte-interval van 100 meter kan worden gemeten. Bovendien kan met deze instrumenten de temperatuur met een zeer hoge precisie worden bepaald. Op deze manier kan de temperatuur tijdens de meting niet geïnspecteerd worden voor stabiliteit, maar dit nadeel weegt ruimschoots op tegen de zojuist benoemde voordelen. Afbeelding 1a laat een voorbeeld zien van temperatuurmetingen die verkregen zijn met laatstgenoemde methode. Verder illustreert deze meting de zogenaamde 'stop-go' methode: De temperatuursonde meet elke seconde de temperatuur, en met behulp van een stopwatch en meter-lengte-indicaties op de staaldraad waar de sonde aan bevestigd is, wordt de sonde elke 10 seconden een meter verder in de peilbuis neergelaten. In de data is goed te zien hoe snel de temperatuur stabiliseert binnen enkele seconden nadat de sonde op een volgende meetdiepte is aangekomen, maar ook hoe nauwkeurig en stabiel de meting gedaan kan worden. De data in Afbeelding 1a laten zien dat verschillen kleiner dan een duizendste van een graad tussen twee meetdieptes op deze manier overtuigend gemeten kunnen worden.

Verandering van temperatuur in de Nederlandse ondergrond

In de Nederlandse ondergrond zijn in de late jaren 70 en vroege jaren 80 van de vorige eeuw in het hele land temperatuur-diepte metingen gedaan in grondwater peilbuizen, uitgevoerd door Wim van Dalftsen, werkend voor TNO (op te vragen via dinoloket.nl). Deze reiken tot een diepte van maximaal 300-400 meter en hebben meestal een diepteresolutie van 1 of 2 meter. Diepere temperatuur-dieptemetingen, tot dieptes van enkele kilometers, zijn gedaan in het



Afbeelding 1: a) Voorbeeld van velddata van temperatuurmetingen in een peilbuis verkregen met de zogenaamde stop-go methode b) Temperatuur-diepteprofielen gemeten in de Gelderse vallei in 1980 (zwarte symbolen) en 2019 (open cirkels).

kader van geologisch onderzoek ten behoeve van exploratie voor olie- en gas-reserves en onderzoek naar geothermische potentieel, maar deze hebben veelal een matige diepte- en temperatuurreolutie, en worden hier buiten beschouwing gelaten maar zijn elders behandeld (Ter Voorde et al, 2014). Een aantal van de peilbuizen bemeten door van Dalen in de jaren 70 en 80, zijn, waar mogelijk, opnieuw bemeten in de tientallen jaren erna (zie bijvoorbeeld Kooi, 2008). Een voorbeeld van een hermeting is te zien in Afbeelding 1b. Zowel de meting in 1978 als die in 2021 is gedaan met een instrument dat goed gekalibreerd ten opzichte van de absolute temperatuur. In beide metingen is in de bovenste ~15 meter het effect van seizoenfluctuaties van de oppervlaktetemperatuur zichtbaar.

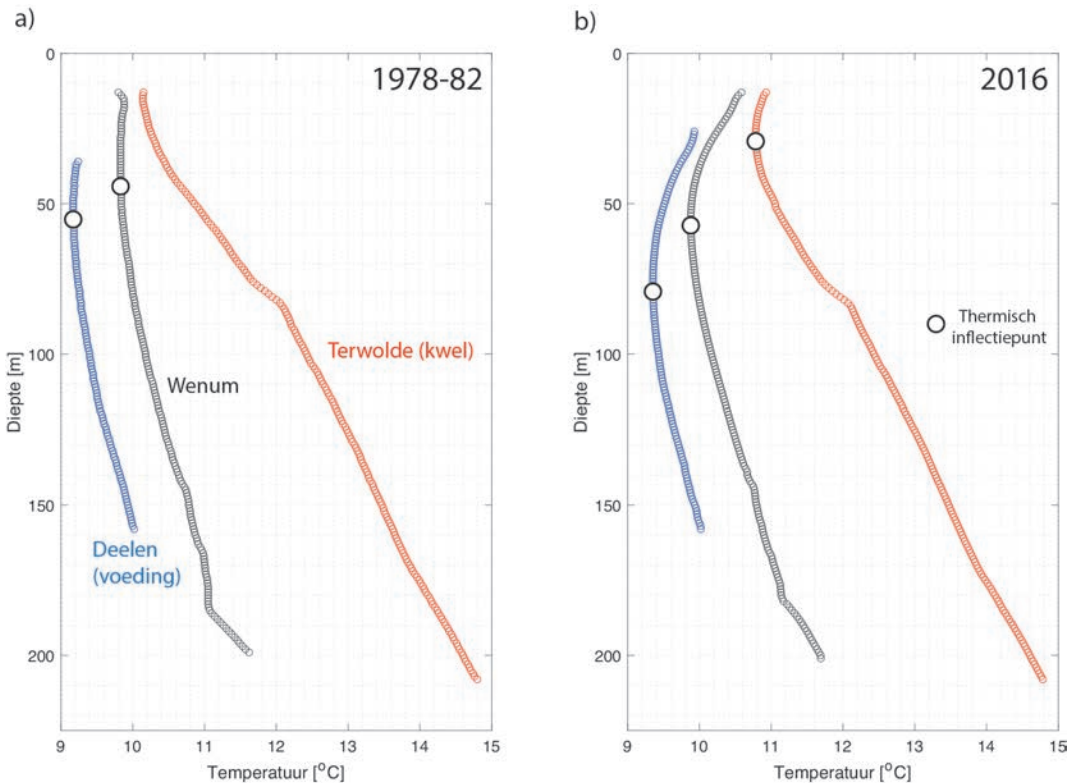
Het is duidelijk dat op deze plek in de Gelderse Vallei voor dieptes vanaf ongeveer 110 meter en tot 150 m de temperatuur in de 41 jaar tussen de twee metingen vrijwel nergens meetbaar is veranderd (Afbeelding 1b). Ondieper is echter het effect van opwarming aan het oppervlak duidelijk te zien. Als gevolg van de opwarming van het oppervlak is de richting van de warmtestroom in bovenste tientallen meters van de ondergrond omgekeerd: De ondergrond wordt nu dus opgewarmd vanaf het oppervlak, waardoor de geothermische warmtestroom van dieper naar het aardoppervlak toe wordt tegengehouden. De diepte waarop de thermische gradiënt omslaat is in Afbeelding 1b aangegeven, en we noemen dit de inflectiepunt diepte in het temperatuur-diepte profiel. Eind jaren 90 van de vorige eeuw suggereerde Makoto Taniguchi (Taniguchi et al., 1999), op grond van metingen in Japan, dat de diepte van dit thermische inflectiepunt, samen met de snelheid van temperatuurverandering aan het oppervlak, sterk bepaald wordt door de grootte van verticale grondwaterstromingscomponent (hier verder aangeduid met q_z). Potentieel zou een temperatuur-diepte profiel dat verstoord is door de sterke opwarming van het oppervlak van de afgelopen decennia dus toch kwantitatieve informatie bevatten over de mate van grondwateraanvulling van relatief diepe aquifers. Met de data beschikbaar in Nederland kan deze hypothese verder getest worden.

Veluwe grondwatersysteem

Afbeelding 2a en b laten temperatuur-diepte profielen zien die opgenomen zijn in 1978-82 (TNO) en 2016 (Wageningen Universiteit; deze studie). Deze data illustreren temperatuur-diepte profielen in het infiltratiegebied op de Veluwe (vliegbasis Deelen), in het gebied op de grens van Veluwe en IJsselvallei (Wenum) en in de IJsselvallei (Terwolde) waar kwel van grondwater potentieel plaatsvindt. Een vergelijking tussen de situatie van 1978-82 en 2016, laat fraai zien hoe onder andere oppervlaktecondities en grondwaterstroming sterk de vorm van het temperatuur-diepte profiel en de absolute grondwatertemperatuur bepalen. De grondwatertemperatuur op alle dieptes in het temperatuur profiel op locatie Deelen zijn lager dan die op de twee andere locaties, en die in Terwolde zijn het hoogste. De ondiepe grondwatertemperatuur in het bos op de Veluwe is gemiddeld circa 1°C lager dan in het open veld nabij Terwolde. Op grotere diepte is het relatief koelende effect van infiltratie van grondwater op de Veluwe groter duidelijk zichtbaar groter dan in de IJsselvallei en neemt het temperatuurverschil toe tot circa 4°C. Een opwarming van het oppervlak is in 1978-82 al duidelijk te zien toen ter plekke van Deelen en Wenum al inflectiepunten in het tempera-

tuur-diepte profiel zichtbaar zijn. In 2016 is ook op de locatie van Terwolde zo een inflectiepunt verschenen, terwijl op de twee andere locaties de inflectiepunten veel dieper te vinden zijn dan in 1978-82. In eerste aanleg bevestigen de data in afbeelding 2, in ieder geval kwalitatief, dus de hypothese van Taniguchi et al. (1999) die zelf niet de beschikking hadden over herhaaldelijk gemeten temperatuur-diepte profielen over tijdperiodes van tientallen jaren.

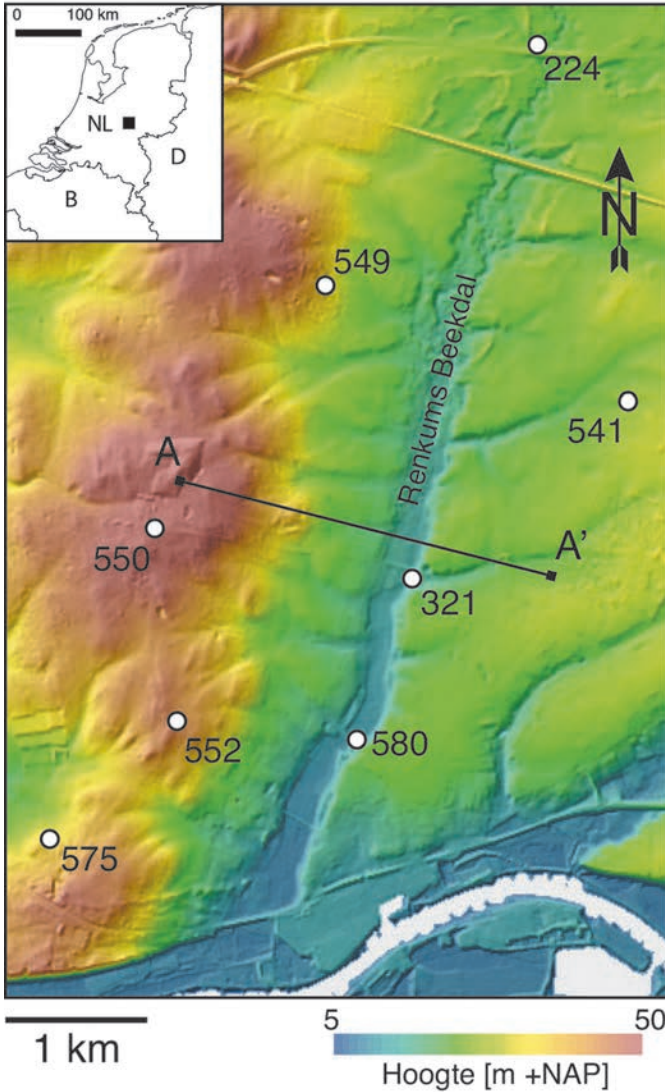
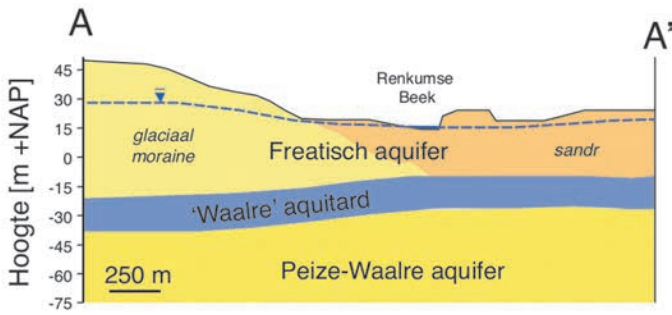
Wij hebben Taniguchi's idee verder uitgewerkt en een kwantitatieve hydrogeologische analyse uitgevoerd van het voorkomen van inflectiepunten in temperatuur-diepte profielen verzameld in het Renkums Beekdal, nabij Wageningen. We laten aan de hand van deze data zien hoe inflectiepuntdieptes direct kwantitatief vertaald kunnen worden naar waarden voor q_z .



Afbeelding 2: Drie temperatuur-diepte profielen opgenomen in a) 1978-82 en op dezelfde locaties in b) 2016.

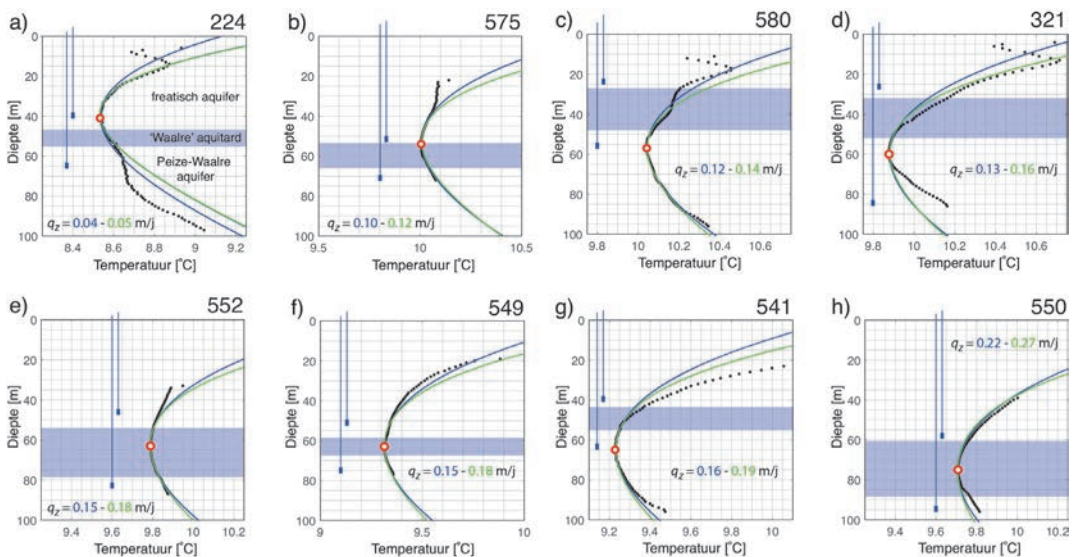
Renkums Beekdal

Het freatisch pakket in het Renkums Beekdal bestaat uit fluvio-glaciale dekzanden (afbeelding 3a). Daaronder bevindt zich de Peize-Waalre aquifer waaruit grondwater onttrokken wordt voor drinkwaterproductie. De kwantificering van de neerwaartse grondwaterstroming in de freatische aquifer is van belang voor het vaststellen van de waterbalans van deze verschillende hydrogeologische eenheden. Tussen het ondiepe en diepe pakket bevindt zich de Waalre aquitard, bestaand uit veelal fluviaatle kleien, zanden en silt.



Afbeelding 3: a) Geologisch profiel (langs A-A' in b)) gebaseerd op REGIS dwars op het Renkums beekdal. b) De topografie in het gebied in en rondom het Renkums Beekdal. Cijfercodes geven de locatie van temperatuur-dieptemetingen

In de zomer van 2019 hebben wij via de hierboven beschreven techniek in acht peilbuisnesten in het studiegebied temperatuur-diepteprofielen gemeten (afbeelding 3b). Voor deze peilbuizen zijn tevens waarnemingen van de stijghoogtes en geologische boorprofielbeschrijvingen beschikbaar (afbeelding 4). Met uitzondering van peilbuis 321 zijn er voor deze locaties geen temperatuur-diepte metingen uit het verleden beschikbaar. Deze ene historische waarneming wordt hier buiten beschouwing gelaten. De stijghoogtedata laten op alle locaties zien dat de freatische grondwaterstand vrijwel altijd hoger is dan de stijghoogte in de Peize-Waalre aquifer (deze zijn te vinden in Bense et al., 2022). Op alle locaties is dus potentieel sprake van een neerwaartse stroming van grondwater vanuit de freatische aquifer naar de diepere Peize-Waalre aquifer. De snelheid kan worden berekend met de vergelijking van Darcy als de hydraulische doorlatendheid van de Waalre aquitard en stijghoogtegradiënt over de aquitard bekend zijn.



Afbeelding 4: Temperatuur-dieptemetingen (zwarte symbolen) voor de acht locaties (a-i; zie afbeelding 3) die in deze studie behandeld worden. De lijnen (blauw en groen: respectievelijk 'hoge' en 'lage' thermische diffusiviteit) geven de gemodelleerde temperatuur-diepteprofielen aan die zijn gebruikt om een schatting te maken voor de verticale grondwaterstromingsnelheid op elke locatie door te fitten op de diepte van het thermische inflectiepunt (rode cirkel).

De vraag is nu of het mogelijk is om de verticale grondwaterstroming over de kleilaag te kwantificeren via een simpele analyse van de diepte van het inflectiepunt in het temperatuur-diepte profiel. We noemen deze flux vanaf hier q_z . In alle temperatuur-diepteprofielen zijn duidelijke inflectiepunten te identificeren gerelateerd aan de opwarming van het oppervlak. Echter, de dieptes waarop deze inflectiepunten zich bevinden variëren van 41 meter tot 75 meter, een bereik van meer dan 30 meter. We nemen nu aan dat deze variatie volledig verklaard kan worden uit verschillen in q_z zoals in het hydrogeologische systeem van het Renkums Beekdal. Het valt direct op dat de locatie met het diepste inflectiepunt (550) ook de locatie is waar de sterkste neerwaartse grondwaterstroming verwacht kan worden omdat dat punt boven op de Ede-Wageningen stuwwal ligt.

Tegelijkertijd is de locatie (224) van het ondiepste inflectiepunt in het midden van het Renkums Beekdal waar het inderdaad waarschijnlijk is dat grondwaterstroming relatief minder sterke verticale component heeft. Op andere locaties is het verband tussen inflectiepuntdiepte en de te verwachten hydrogeologische condities minder duidelijk te leggen.

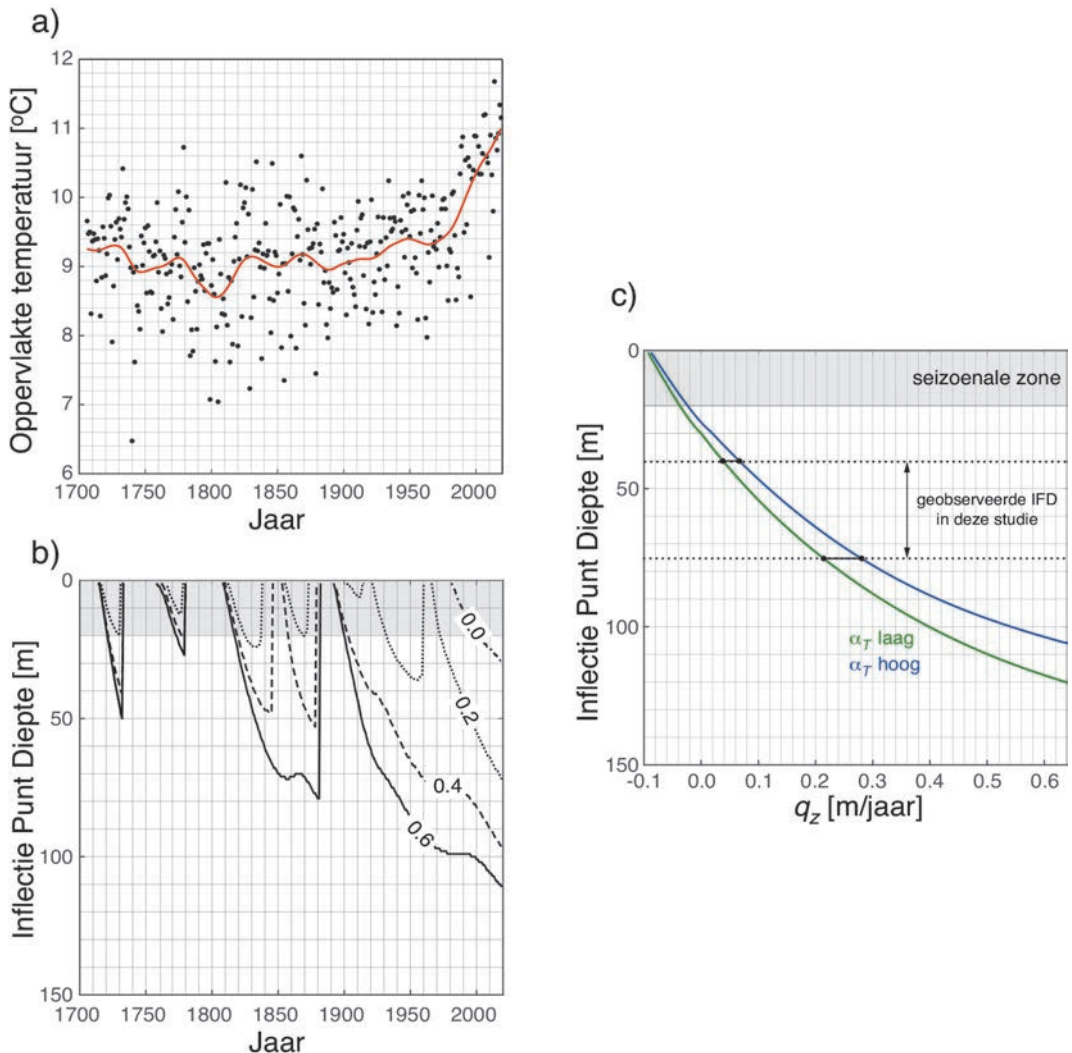
Om de geobserveerde dieptes van de thermische inflectiepunten in 2019 direct kwantitatief te kunnen interpreteren als waarden voor q_z hebben we een relatief eenvoudig één-dimensionaal niet-stationair numeriek warmtetransportmodel ontwikkeld waarin advection van warmte door grondwaterstroming en warmtegeleiding wordt gesimuleerd (zie voor meer details Bense et al. ,2022). We maken gebruik van FlexPDE software voor de constructie van dit model (pdesolutions.com). Hiermee berekenen we de diepte van de thermische inflectiepunten in de tijd zoals die zou hebben opgetreden als gevolg van het verloop van het klimaat in midden-Nederland tijdens de afgelopen eeuwen. De modellen zijn doorgerekend voor een reeks aan waarden voor q_z (-0.1 tot 0.6 m/jaar), waarbij hier positieve waarden voor q_z neerwaartse stroming inhouden. Waarden voor q_z zijn uniform met de diepte en zijn niet veranderlijk in de tijd. Het langjarig verloop van de gemiddelde jaartemperatuur, zoals gemeten en gereconstrueerd door het KNMI, wordt als thermische bovenrandvoorwaarde opgelegd voor deze simulatie. Aan de onderrand wordt een geothermische warmteflux aangenomen vanaf een diepte van 150 m, de hoogte van het model en bij benadering de diepte waaronder mariene kleiafzettingen voorkomen in het studiegebied en waaronder topografisch gedreven grondwaterstroming beperkt zal zijn. De waarde voor deze geothermische gradiënt wordt afgeleid uit de diepere gedeeltes van temperatuur-diepteprofielen in het Veluwegebied (Bense en Kurylyk, 2017). Alle modellen worden vervolgens ook nog voor een homogene ondergrond met twee uiterste waarden voor thermische diffusiviteit beschouwd zoals geschat op grond van de lithologie. Hierbij is de hoge waarde representatief voor een geologische opbouw die sterker zandig is, en de lage waarde voor een overwegend kleiige ondergrond. Aan de hand van de modelresultaten kunnen de geobserveerde inflectiepunt dieptes direct vertaald kunnen worden naar een minimum- en maximum-waarde voor q_z .

De verkregen waarden voor q_z , gebaseerd op één temperatuur-dieptewaarneming per locatie, kunnen niet eenvoudig gestaafd worden. Onafhankelijke directe waarnemingen van de neerwaartse stroming over de Waalre aquitard, bijvoorbeeld op grond van geochemische tracers, zijn niet gedaan in het gebied van het Renkums Beekdal. Er zijn echter wel in het REGIS model geschatte waarden beschikbaar voor de verticale hydraulische doorlatendheid (K_z) van de Waalre aquitard in het gebied. Deze zijn gebaseerd op verschillende bronnen zoals laboratoriumbepalingen van hydraulische doorlatendheid aan boorkernen, korrelgrootteverdelingen, en geologische beschrijvingen van het boorprofiel. Er zijn over de afgelopen decennia ook waarnemingen gedaan van de hydraulische gradiënt op de verschillende locaties over de Waalre aquitard. We gebruiken deze gegevens om het langjarig gemiddelde en standaardafwijking van de hydraulische gradiënt (i) te bepalen. Hierbij nemen we aan dat de gemeten stijghoogtes in de filters in de boven- en onderliggende aquifers representatief

zijn voor de boven- en onderkant van het aquitard. De dikte van het aquitard is gebaseerd op de boorbeschrijving en REGIS-informatie. Via een simpele Darcy-berekening ($K_z = -q_z/i$), en door de variatie in verkregen waarden voor zowel i als q_z mee te nemen, kunnen we dan een bandbreedte bepalen voor de verticale hydraulische doorlatendheid van de Waalre aquitard. Op deze manier kunnen we dus een schatting maken van K_z die onafhankelijk is van REGIS, en impliciet de betrouwbaarheid wege van de q_z waarden berekend uit de inflectiepuntdiepte in de temperatuur-diepte profielen.

Resultaten en Analyse

Afbeelding 5 laat zien hoe over de afgelopen eeuwen de inflectiepunten in temperatuur-diepteprofielen zich ontwikkelen door meerjarige periodes van afkoeling en opwarming. De modeluitkomsten suggereren dat sinds het begin van de 20^e eeuw en met name sinds het midden van de jaren 70 regionale opwarming van het klimaat voldoende was om inflectiepunten in temperatuur-diepteprofielen te veroorzaken, met wellicht een kleine onderbreking begin jaren 1960. Tegelijkertijd is de diepte van het geobserveerde inflectiepunt in de tijd sterk afhankelijk van q_z waarbij voor grotere waarden van q_z inflectiepunten zich snel manifesteren en naar de diepte schuiven. Voor condities waarbij de q_z naar het oppervlak gericht is (negatieve waarden voor q_z , kwel), ontstaan nagenoeg geen inflectiepunten onder de seizoenale zone in de gemodelleerde periode (tot 2020). Uit deze modelresultaten kunnen we nu eenvoudig een relatie halen die het verband beschrijft tussen q_z en de inflectiepuntdiepte in 2019, het jaar waarin de temperatuur-diepteprofielen in het Renkums Beekdal zijn opgenomen (afbeelding 5c). De uitkomsten zijn gevoelig voor de aangenomen waarden voor thermische eigenschappen, zodat de zo verkregen q_z waarden voor elke locatie een bepaalde bandbreedte hebben. De gemodelleerde temperatuur-diepteprofielen worden ook getoond in afbeelding 4. Hierbij is een temperatuurcorrectie voor het gehele profiel toegepast zodat de absolute temperatuur op de inflectiepuntdiepte samenvalt met de geobserveerde temperatuur op die diepte. Hiermee corrigeren we voor het verschil tussen de luchttemperatuur die is gebruikt als bovenrandvoorwaarde in de modellering en de jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur op elke peilbuislocatie, die varieert per locatie als gevolg van verschillen in landgebruik. De vergelijking tussen het gehele gemodelleerde en geobserveerde temperatuur-diepteprofiel laat zien dat deze op veel locaties goed overeenkomen, en dat verschillen vooral samenhangen met lithologische heterogeniteit. Echter, we benadrukken dat de hier uit het temperatuur-diepte profiel afgeleide q_z -waarde slechts bepaald is door de diepte van het inflectiepunt.



Afbeelding 5: a) Luchttemperatuur voor midden-Nederland (data van knmi.nl). De rode lijn is de langjarige trend gebruikt als bovenrandvoorwaarde voor de 1D warmtetransportmodellen. b) De gesimuleerde ontwikkeling van inflectiepunten in temperatuur-diepteprofielen (contouren in m/jaar) voor een gemiddelde waarde voor thermische diffusiviteit. c) De relatie tussen de diepte van het inflectiepunt en de waarde voor de verticale grondwaterstroming (q_z) voor het jaar 2019 voor 'hoge' en 'lage' thermische diffusiviteit (respectievelijk blauwe en groene lijn).

Het bereik aan waarden voor q_z zoals dat wordt gevonden voor elke locatie is gerapporteerd in Tabel 1. Deze waarden kunnen nu vergeleken worden met de waarden voor K_z op elke locatie zoals die in REGIS te vinden zijn. Voor verreweg de meeste locaties in het Renkums Beekdal zijn de waarden die wij schatten voor K_z van de Waalre aquitard, zoals hierboven beschreven gebaseerd op temperatuur-diepte profielen, volledig in overeenstemming met waarden te vinden in REGIS. Dit is met uitzondering van locatie 321 en 541, maar ook daar zijn de verschillen tussen onze schatting en de waarden in REGIS klein.

Tabel 1: Overzicht van meetdata, analysesresultaten en REGIS-informatie. IFD staat voor inflectiepuntdiepte.

| Locatie | Datum | IFD ₂₀₁₉ [m] | $q_{z,min} - q_{z,max}$ [m/jaar] | $i_{min} - i_{max}$ [m/m] | $K_{z,min} - K_{z,max}$ [$\times 10^3$ m/dag] (deze studie) | $K_{z,min} - K_{z,max}$ [$\times 10^3$ m/dag] (REGIS) |
|----------|------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|--|--|
| B39F0224 | 16/07/2019 | 41 | 0.04—0.05 | 0.037—0.043 | 2.6—3.6 | 1.0—5.0 |
| B39F0575 | 23/09/2019 | 54 | 0.10—0.12 | 0.012—0.056 | 4.9—28 | 10—50 |
| B39F0580 | 05/07/2019 | 57 | 0.12—0.14 | 0.040—0.065 | 5.0—9.5 | 5.0—10 |
| B39F0321 | 16/07/2019 | 60 | 0.13—0.16 | 0.054—0.066 | 5.4—8.1 | 10—50 |
| B39F0552 | 20/08/2019 | 63 | 0.15—0.18 | 0.291—0.326 | 1.3—1.7 | 1.0—5.0 |
| B39F0549 | 17/07/2019 | 63 | 0.15—0.18 | 0.255—0.277 | 1.5—1.9 | 1.0—5.0 |
| B40A0541 | 23/09/2019 | 65 | 0.16—0.19 | 0.034—0.043 | 10—16 | 1.0—5.0 |
| B39F0550 | 11/02/2019 | 75 | 0.22—0.27 | 0.348—0.381 | 1.6—2.1 | 1.0—5.0 |

Dit resultaat suggereert dat de q_z waarden geschat uit de temperatuur-diepte-profielen goede schattingen zijn voor de lange termijn gemiddelde neerwaartse grondwaterstroming over de Waalre aquitard. Voor q_z vinden we waarden tussen de 40 en 270 mm/jaar, dit is lager dan wat algemeen wordt aangenomen voor grondwateraanvulling in het Veluwegebied (~150-350 mm/jaar). Normaliter zal q_z sterk afnemen met toenemende diepte en wordt met 'grondwateraanvulling' de verticale flux van water over de waterspiegel bedoeld en is daar dus maximaal. We nemen in ons model één waarde voor q_z aan, die niet variabel is met de diepte en dus een gemiddelde waarde over het verticale profiel betreft en daarmee lager is dan de grondwateraanvulling zoals die aan de freatische waterspiegel zal plaatsvinden. Aangezien de Waalre aquitard grofweg halverwege het totale profiel van 150 m ligt zou het dus kunnen dat in dit geval de q_z waarde die we vinden representatief is voor de neerwaartse stroming op die diepte. Tweedimensionale modellen kunnen dit aspect verder verhelderen, maar daarmee zouden dan ook weer andere onzekerheden worden geïntroduceerd, met name wat betreft de randvoorwaarden van een dergelijk model. Desalniettemin worden zulke modellen momenteel ontwikkeld en zullen in een toekomstig artikel verwerkt worden. Een ander belangrijk aspect van ons huidige model is dat grondwaterstroming niet varieert in de tijd. In werkelijkheid zullen er ongetwijfeld veranderingen plaatsvinden in het hydrogeologische systeem als gevolg van klimaatfluctuaties die grondwateraanvulling beïnvloeden, of uitbreiding of verplaatsing van grondwateronttrekkingen. Het meenemen van zulke processen is in principe mogelijk in numerieke modellen die warmtetransport en grondwaterstroming niet-stationair en gekoppeld beschrijven. Maar, hier hebben we gepoogd het model zo simpel mogelijk en zo min mogelijk locatiespecifiek te houden. Op deze manier is het gebruikte model representatief voor zo veel mogelijk verschillende locaties. Dus, hoewel het model dat hier gebruikt wordt een duidelijk sterke simplificatie is van de werkelijke omstandigheden, lijkt ons resultaat erop te duiden dat het toch een accurate voorspelling doet van de diepte van het inflectiepunt in de tijd als functie van verschillende waarden voor q_z .

Conclusies

Temperatuur-dieptemetingen zijn eenvoudig uit te voeren in bestaande peilbuizen. De verkregen data kunnen kwalitatief inzichtelijk zijn in de eigenschappen van het hydrogeologische systeem. Hier laten we zien dat zulke metingen ook concreet kwantitatieve schattingen opleveren voor de verticale grondwaterstroomsnelheden met behulp van een relatief eenvoudige model interpretatie. Klassieke interpretatiemethodes gebaseerd op de analytische vergelijkingen van Bredehoeft en Papadopoulos (1965) kunnen niet meer gebruikt worden als het temperatuur-diepteprofiel verstoord is door recente opwarming aan het oppervlak. Echter, we laten hier zien dat juist een analyse van die recente verstoring een goede kwantitatieve schatting kan opleveren van de verticale grondwaterstroomsnelheid. De wegzijging van water over de Waalre klei onder het Renkums beekdal, onderwerp van deze studie, zou eigenlijk slechts anderszins bepaald kunnen worden met behulp van gedetailleerde verticale profielen van de geochemische- en isotopensamenstelling van poriewater zoals bijvoorbeeld gedaan is in de buurt van grondwateronttrekkingen nabij de Holterberg in Gelderland (Visser et al., 2013). Vergeleken met de inspanning die voor een geochemische studie nodig is, is de analyse van temperatuur-diepte profielen vele malen eenvoudiger. Idealiter zouden beide methodes op een locatie een keer gecombineerd worden ter vergelijking. Vooralsnog kunnen we stellen dat onze analyse van de verstoring door oppervlakte opwarming van temperatuur-diepte profielen een geschikte methode oplevert voor het in kaart brengen en kwantificeren van verticale grondwaterstroomsnelheden. Daarbij merken we op dat de methode zoals hier toegepast waarschijnlijk meer geschikt is voor toepassing in grondwatervoedingsgebieden dan in kwelgebieden waar de signalen van opwarming aan het oppervlak minder eenduidig te detecteren zijn in temperatuur-diepte profielen.

We merken op dat het detecteren van thermische inflectiepunten in middel-diepe peilbuizen (bijvoorbeeld >100 m) tijdelijk is omdat deze naar steeds grotere dieptes wegzakken. De methode zoals hier beschreven zal op een gegeven moment niet meer toepasbaar zijn in de meeste peilbuizen. Dat is des te meer reden om observaties van veranderingen in de grondwatertemperatuur waar mogelijk te gebruiken om onze kennis en kijk op de ondergrond uit te breiden, het voornaamste doel van dit werk.

Literatuur

- Asmuth, J. van, & Post, V.E.,** (2013). Review: Hydraulic head measurements—New technologies, classic pitfalls. *Hydrogeology Journal*, 21(4), 737–750
- Balen, R. van, Luijendijk, E., Kooi, H, & Voorde, M. ter.** (2014). Weichselian and Holocene climate history reflected in temperatures in the upper crust of the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 93(3), 107–117. Doi:10.1017/njg.2014.9
- Bense, V.F., & Kurylyk, B.L.** (2017). Tracking the subsurface signal of decadal climate warming to quantify vertical groundwater flow rates. *Geophysical Research Letters*, 44(24244–12), 12253.

- Bense, V.F., Kruijssen, T., Kurylyk, B.L., & Ploeg, M.P. van der,** (2022). Inferring aquitard hydraulic conductivity using transient temperature-depth profiles impacted by ground surface warming. *Water Resources Research*, 58, e2021WR030586
- Bense, V., Irvine, D., & Kurylyk, B.,** (2019). Theory, tools, and multidisciplinary applications for tracing groundwater fluxes from temperature profiles. *WIREs Water*, 6(1)
- Bredehoeft, J.D., & Papadopoulos, I.S.** (1965). Rates of vertical groundwater movement estimated from the Earth's thermal profile. *Water Resources Research*, 1(2), 325-328
- Broers, H.P., Jonge, M. de, Visser, A., Purtschert, R., & Sültenfuß, J.** (2013). Groundwater age distributions at a public drinking water supply well field derived from multiple age tracers (^{85}Kr , $^3\text{H}/^3\text{He}$, and ^{39}Ar). *Water Resources Research*, 49(11), 7778-7796
- Ferguson, G., & Woodbury, A.D.** (2005). The effects of climatic variability on estimates of recharge from temperature profiles. *Ground Water*, 43(6), 837-842
- Kayane, I., Sakura, Y., Shimada, J., Shimano, Y., Tanaka, T., Taniguchi, M., et al.** (1999). Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan. *Water Resources Research*, 35(5), 1507-1517
- Kooi, H.,** (2008) Spatial variability in subsurface warming over the last three decades; insight from repeated borehole temperature measurements in The Netherlands. *Earth and Planetary Science Letters*, 270, 86-94. doi:10.1016/j.epsl.2008.03.015

Auteurs

VICTOR BENSE, TITUS KRUIJSSEN, MARTINE VAN DER PLOEG
Wageningen University and Research
victor.bense@wur.nl

