

Karakterisatie van de ondiepe Nederlandse ondergrondtemperatuur

Een analyse van verschillen in gemeten
temperatuurprofielen 1980-2024

TNO 2025 R13074 – 20 juli 2026

Karakterisatie van de ondiepe Nederlandse ondergrondtemperatuur

Een analyse van verschillen in gemeten
temperatuurprofielen 1980-2024

Auteurs	Zanne Korevaar en Willem Jan Zaadnoordijk
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Rapporttekst	TNO Public
Aantal pagina's	83 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Aantal kopieën	SMO
Programmanaam	KarDySaG
Programmanummer	VP 310
Projectnaam	KarDySaG
Projectnummer	060.63503/01.04.03

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

Samenvatting

Informatie over de opwarming in de ondergrond en daarmee ook de ondergrondtemperatuur in het algemeen, is van belang in verschillende sectoren. Zo heeft de grondwatertemperatuur invloed op de grondwaterkwaliteit, op het geothermisch potentieel en op de ecologie. Samenhang van verschillende factoren bepaalt de temperatuur in de ondergrond. Hierin spelen zowel ondergrondse als bovengrondse aspecten een rol, zoals petrofysische eigenschappen van sedimenten, hydrogeologische processen en landgebruik.

Rond 1980 zijn bijna 600 temperatuur-diepteprofielen gemeten in grondwatermonitoringsputten verspreid over Nederland. Destijds is op basis van deze metingen een drie-dimensionaal beeld van de grondwatertemperatuur geschetst in een set landelijke kaarten op verschillende dieptes, tot een maximale diepte van 250 meter onder maaiveld. Sindsdien is het klimaat opgewarmd en zijn bovengronds en ondergronds allerlei (nieuwe) menselijke activiteiten ontplooid die de ondergrondtemperatuur veranderen en exploiteren, zoals bodemenergie.

In 2024 zijn in 16 grondwatermonitoringsputten metingen gedaan van temperatuur-diepteprofielen, als herhaling van metingen op dezelfde locatie rond 1980. Dit rapport presenteert een analyse van de verschillen tussen de historische en recente herhaalmetingen. Hieruit wordt duidelijk dat in de afgelopen 45 jaar een ondergrondse opwarming vanaf maaiveld heeft plaatsgevonden, onder de diepte tot waar seizoensinvloeden de ondergrond indringen. Hoewel de gemeten opwarming sterk verschilt per locatie is de temperatuur op alle meetpunten toegenomen, van enkele tienden graden tot enkele graden. Lokale verschillen in de gemeten profielen zijn beschreven in de context van geologische bodemopbouw, gerelateerde geohydraulische parameters en landgebruik. Vervolgens is het belang van de gepresenteerde analyse – en in het algemeen informatie over ondergrondtemperatuur – bediscussieerd aan de hand van enkele voorbeelden van toepassingen en gebruik van grondwatertemperatuurmetingen, zoals het waarborgen van de grondwaterkwaliteit en een juiste inschatting van het geothermisch potentieel. Hieruit volgt hoe een toename in grondwatertemperatuur risico's met zich mee brengt voor grondwaterreserves voor drinkwater. Daarnaast laten enkele simulaties van open en gesloten bodemenergiesystemen zien dat ondergrondse opwarming zorgt voor een verandering in de randvoorwaarden voor voorspellende berekeningen aan de systeemprestatie. Met een potentieel effect op het energierendement van 10% tot 25%, bij de huidige mate van opwarming, heeft dit impact op de business case van bodemenergie.

Uit de analyse en discussie volgen dat een regionale of landelijke karakterisatie van de ondergrondtemperatuur nuttig is voor het inzicht in de risico's van de opwarming in de Nederlandse ondiepe ondergrond. Tot slot doen we enkele aanbevelingen voor vervolgstappen.

Inhoudsopgave

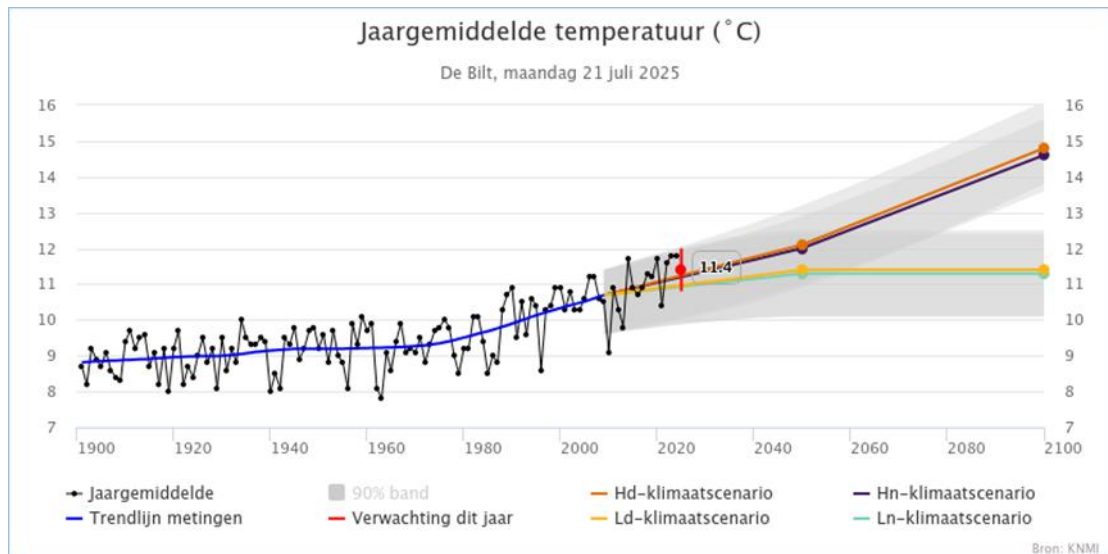
Samenvatting	4
1 Inleiding.....	3
1.1 Gevolgen van toename in ondergrondtemperatuur	4
1.2 Factoren die de ondergrondtemperatuur bepalen	5
1.3 Huidige grondwatertemperatuurmonitoring in Nederland	8
1.4 Doel van het rapport.....	9
2 Methode	10
2.1 Data-selectie voor uitsluiten korte-termijnfluctuaties	10
2.2 Lokale analyse	11
2.3 Landelijke analyse.....	12
3 Resultaten	13
3.1 Lokaal beeld opwarmend grondwater	13
3.2 Landelijk beeld opwarmend grondwater	30
4 Discussie meetresultaten.....	34
4.1 Mogelijke bias in meetresultaten.....	34
4.2 Samenhang van bepalende factoren	34
4.3 Gebruik van resultaten voor behoud en bescherming van grondwater voor drinkwatervoorziening ...	35
4.4 Gebruik van resultaten voor bepalen geothermisch potentieel	36
4.5 Gebruik van resultaten voor parametrisatie	39
4.6 Aandacht voor andere dieptes en resoluties	39
5 Conclusies en aanbevelingen.....	41
6 Ondertekening	42
7 Referenties.....	43

1 Inleiding

Veel informatie is beschikbaar over de temperatuurstijging in de atmosfeer als gevolg van klimaatverandering. Zo volgt uit constante monitoring van het Nederlandse klimaat door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), dat de jaargemiddelde luchttemperatuur in De Bilt in 2024 met 11,8 °C bijna 2,6 °C hoger lag in vergelijking met de jaargemiddelde temperatuur van 9,2 °C in 1980 (Figuur 1). Daarnaast is in elk van de gemodelleerde klimaat-scenario's voor Nederland (Hd, Hn, Ld en Ln-scenario) een verdere stijging van de jaargemiddelde temperatuur voorspeld.

Over het effect van de atmosferische opwarming op de temperatuur in de (Nederlandse) ondergrond is minder bekend en is de beschikbare informatie beperkt tot regionale studies (bijvoorbeeld Kooi, 2008; Visser e.a., 2020 en Bense, 2025a, b). Benz e.a. (2024) deden, in een modelstudie op wereldwijde schaal, een voorspelling van de opwarming in de ondergrond op diepte van de grondwaterspiegel en 30 meter onder maaiveld, als gevolg van verschillende voorspelde scenario's in wereldwijde klimaatverandering tot het jaar 2100. Hieruit volgt een sterke toename in jaargemiddelde ondiepe (in dit rapport gedefinieerd als tot ruim 100 meter diepte) grondwatertemperatuur, met name in gebieden waar grondwaterspiegel dicht bij het aardoppervlak ligt (maximaal enkele meters diep), zoals in Nederland. Echter, de modelstudie van Benz e.a., (2024) gebruikt een 1-dimensionaal model waarin enkel warmtetransport door middel van diffusie in acht is genomen. Er is dus niet gekeken naar het effect van advectief warmtetransport, als gevolg van grondwaterstroming. Op landelijke schaal en in een heterogene ondergrond met grondwaterstromingssystemen (zoals voor Nederland), kan verticale grondwaterflux een wezenlijke invloed hebben op de ondergrondtemperatuur (Bense, 2025; Bense e.a., 2022). Ook kunnen laterale grondwaterstroming en andere invloeden een rol spelen en is de snelheid van het grondwater niet goed bekend. Het is daarom belangrijk om het effect van de atmosferische opwarming op de temperatuur in de (Nederlandse) ondergrond ook met metingen in kaart te brengen, aangezien grondwatertemperatuur een bepalende factor is voor bijvoorbeeld grondwaterkwaliteit voor drinkwaterwinning of de potentie van bodemenergie.

Het vervolg van dit hoofdstuk benadrukt het belang van informatie over de ondergrondtemperatuur door een beeld te schetsen van de verschillende effecten van een temperatuursverandering (paragraaf 1.1). Daarnaast worden bepalende factoren voor de ondergrondtemperatuur geïntroduceerd in zowel ondergrondse parameters zoals petrofysische eigenschappen van sedimenten en hydrologische processen, als bovengrondse aspecten zoals landgebruik (paragraaf 1.2). Ook wordt een beeld geschetst van de huidige manier van grondwatertemperatuurmonitoring in Nederland (paragraaf 1.3). Als laatste wordt het doel van dit rapport geïntroduceerd (paragraaf 1.4).



Figuur 1: Gemeten jaargemiddelde temperatuur in De Bilt (in °C) sinds 1900 en bijbehorende trendlijn en voorspelling volgens verschillende klimaatscenario's (KNMI, 2025).

1.1 Gevolgen van toename in ondergrondtemperatuur

Temperatuur beïnvloedt processen in de ondergrond gerelateerd aan grondwaterkwaliteit en grondwaterkwantiteit. Zo is microbiologische activiteit en oplosbaarheid van gassen sterk temperatuurafhankelijk en beïnvloedt temperatuur de chemische balans tussen het grondwater en de mineralen in de ondergrond. Daar komt bij dat een afname in neerslaghoeveelheden als gevolg van klimaatverandering en een toename in verdamping als gevolg van hogere grondwatertemperaturen, de effecten van temperatuurverandering op de grondwaterkwaliteit kan versterken (Benz e.a., 2024; Visser, 2024).

Grondwaterstroming kan ook veranderen als gevolg van een stijging van ondergrondtemperatuur, onder invloed van een verandering in de viscositeit en dichtheid van het grondwater (Visser, 2024 en daarin benoemde referenties). Daarnaast beïnvloedt temperatuur de hydraulische doorlatendheid van sedimentaire lagen in de ondergrond, die, net zoals de waterkwaliteit, mede wordt bepaald door oplossen of afzetten van mineralen onder invloed van verschuiving in de temperatuurafhankelijke (geo)chemische balans tussen de het grondwater en het ondergrondmateriaal (Visser, 2024).

1.1.1 Het effect op drinkwaterwinning

Temperatuur is van belang bij gebruik van grondwater voor drinkwaterwinning. Zo bepaalt de invloed van temperatuur op de grondwaterkwaliteit bijvoorbeeld welke zuivering benodigd is voor de productie van drinkwater. Daarnaast is de hydraulische werking van scheidende lagen, onder invloed van de temperatuur in de ondergrond, een belangrijke component in de bescherming van de grondwaterkwaliteit tegen verontreinigingen vanaf het maaiveld of uit de diepere ondergrond. De invloed van temperatuur op de hydraulische doorlatendheid bepaalt ook de energie die benodigd is voor grondwaterwinning.

Tenslotte is de temperatuur van het water zelf van belang bij de distributie, voor de bacteriologische betrouwbaarheid in verband met het risico van groei van pathogene organismen en opportunistische ziekteverwekkers (Van Der Wielen, 2020). De temperatuur van de bodem waar de distributieleidingen in liggen is hierin bepalend voor de watertemperatuur tijdens distributie (Agudelo-Vera e.a., 2020).

1.1.2 Het effect op het geothermisch potentieel

Het potentieel voor warmtewinning d.m.v. ondiepe open en gesloten bodemenergiesystemen wordt groter bij een hogere ondergrondtemperatuur. Met de grote hoeveelheid open (>7000) en gesloten (>80.000) bodemenergiesystemen in Nederland, zoals geregistreerd in het Landelijk Grondwater Register (WKO-bodemenergietool, 2025), kan de potentie voor de winning van warmte uit de ondiepe ondergrond dus toenemen.

Toch is de situatie onder invloed van klimaatverandering paradoxaal, aangezien door de opwarmende atmosfeer de warmtevraag juist zal afnemen en de koudevraag zal toenemen (Rovers e.a., 2021). Daarnaast staan deze systemen onder invloed van temperatuurafhankelijke thermische eigenschappen van de ondergrond zoals thermische geleidbaarheid en thermische diffusiviteit. De waardes van deze eigenschappen nemen af bij een toename in temperatuur, waardoor efficiëntie van de bodemenergiesystemen zal verminderen (Vosteen & Schellschmidt, 2003).

1.1.3 Het effect op natuur

Temperatuurveranderingen spelen een cruciale rol in de ecologie van oppervlaktewater en grondwater tot enkele meters onder de grondwaterspiegel. Enkele voorbeelden van directe effecten van stijgende temperaturen op ecologie zijn:

- Een netto afname van het zuurstofgehalte in het water, met als mogelijk gevolg het ontstaan van anoxische omstandigheden, vooral in stilstaande of langzaam stromende waterlichamen (Griebler e.a., 2016).
- Veranderingen in de populatiedynamiek van waterinsecten en andere ongewervelden wat kan resulteren in een mismatch tussen verschillende trofische niveaus binnen de voedselketen (Evers, 2007; Schülting e.a., 2016).

Binnen de Europese Kaderrichtlijn Water (KRW) is temperatuur erkend als een belangrijke parameter voor het behalen van een Goede Ecologische Toestand (GET). Voor natuurlijke watertypen zijn maximumtemperaturen vastgesteld van 21,5 °C of 25 °C, afhankelijk van het type waterlichaam (Evers, 2007). Overschrijding van deze drempels, bijvoorbeeld door klimaatverandering of thermische lozingen, kan leiden tot ecologische degradatie. Specifiek voor oppervlaktewaterlichamen die gevoed worden vanuit grondwater, vormt een verhoogde grondwatertemperatuur dus een risico.

1.2 Factoren die de ondergrondtemperatuur bepalen

Temperatuur in de ondergrond neemt toe met diepte volgens de verticale geothermische gradiënt. Deze geothermische gradiënt wordt bepaald door radiale warmtestroom van de relatief hoge temperatuur in de aardkern naar de relatief lage temperatuur aan het aardoppervlak. Warmte vanuit de aardkern, die wordt gegenereerd als gevolg van radioactief verval van elementen, stroomt richting de aardkorst door middel van hoofdzakelijk advectief warmtetransport in de mantel. Vervolgens stroomt de warmte vanaf de onderkant van de aardkorst naar het aardoppervlak door middel van hoofdzakelijke conductief warmtetransport.

Hierin speelt in het grondwaterdomein advectief warmtetransport door middel van grondwaterstroming ook een rol.

Deze paragraaf beschrijft hoe verschillende bepalende factoren van invloed zijn op het temperatuurverloop in de ondergrond, waaronder atmosferische temperatuurschommelingen (sectie 1.2.1), de geologische opbouw van de ondergrond (sectie 1.2.2), het hydrogeologische regime (sectie 1.2.3) en land- en bodemgebruik (sectie 1.2.4). Hiermee wordt het beeld geschetst dat de samenhang van deze bepalende factoren lokaal sterk kan variëren.

1.2.1 Atmosfeer

Het evenwicht tussen de warmtestroming en het verschil tussen de temperatuur in de aardkern en die aan het aardoppervlak wordt beïnvloed door fluctuaties in de atmosferische temperatuur. Op korte tijdschaal zijn dit vooral dagelijkse en seizoensgebonden variaties, terwijl op geologische tijdschaal klimaatverandering een dominante rol speelt. Door de geschiedenis heen heeft het mondiale klimaat voortdurend gefluctueerd, maar sinds ca. 1900 is een versnelde opwarming van de atmosfeer gemeten. Deze ontwikkeling hangt samen met de toename van broeikasgasuitstoot als gevolg van de industriële revolutie.

De mate waarin deze atmosferische temperatuurschommelingen doordringen in de ondergrond en het geothermische gradiënt beïnvloeden, hangt af van de verstoring van het thermisch evenwicht en de dempende werking van de warmtecapaciteit van de ondergrond. Een modelstudie van Gies e.a., (2021) toont aan dat het afkoelingseffect van de laatste ijstijd nog steeds meetbaar is in de ondiepe ondergrond van Nederland. Tijdens het Holocene bedekten landijskappen de noordelijke helft van het land, en op basis van modelkalibratie aan de historische temperatuur-diepteprofielen van Wim van Dalfsen (Van Dalfsen 1979; 1980; 1981; 1983) wordt beargumenteerd dat dit historische afkoelingseffect nog steeds zichtbaar is. Voor een actueel beeld van dit effect zou de balans tussen deze na-ijlende afkoeling en recente temperatuurmetingen (Fokker e.a., 2025) opgemaakt moeten worden, maar dit gaat voorbij aan het doel van dit rapport.

1.2.2 Geologie

Onder de zone waarin dagelijkse en seizoensgebonden temperatuurschommelingen optreden, neemt de temperatuur van nature toe met de diepte. Deze toename volgt de verticale geothermische gradiënt in de aardkorst, die wordt bepaald door de warmtestroom vanuit de aardmantel en de thermische geleidbaarheid van de aanwezige lithologieën.

Lithologische lagen met een lage thermische geleidbaarheid, zoals hydraulisch verzadigde klei, vertonen een hogere temperatuurgradiënt dan lagen met een hogere geleidbaarheid, zoals hydraulisch verzadigd zand.

Hoewel atmosferische opwarming zich afspeelt op kortere tijdschaal dan geologische processen, dringt deze via thermische diffusie en warmtestroom door in de ondergrond. Hierbij spelen zowel conductieve als advectieve processen een rol. In conductieve warmtestroom is de thermische geleidbaarheid van de ondiepe lithologische lagen cruciaal. Deze geleidbaarheid wordt sterk beïnvloed door de mate van hydraulische verzadiging: verzadigde sedimenten geleiden warmte beter dan onverzadigde. De advectieve warmtestroom wordt daarentegen bepaald door het hydrologische regime, waarbij stromend grondwater warmte transporteert en zo het temperatuurverloop beïnvloedt.

1.2.3 Hydrogeologie

Afwijkingen van de op geologische tijdschaal statische verticale temperatuurgradiënt worden in het grondwaterdomein veroorzaakt door verticale en horizontale grondwaterstroming. Zo

bepaalt de verticale grondwaterflux bij atmosferische temperatuurschommelingen de (neerwaartse) advectione warmtestroom vanaf het aardoppervlak. De belangrijkste drijfveer van deze verticale grondwaterflux is de balans tussen de infiltratie en evaporatie van neerslag. De temperatuur van de (neerwaartse) grondwaterflux wordt bepaald door de balans tussen de infiltratie van relatief koude neerslag in de winter en relatief warmere neerslag in de zomer (Visser, 2024). Hoewel door klimaatverandering het jaargemiddelde en daarmee de algehele trend in de atmosferische temperatuur toeneemt, zou het natter worden van de winters en het droger worden van de zomers, tevens een gevolg van klimaatverandering, mogelijk een matigend effect kunnen hebben op de opwarming van het grondwater. Zo zou er meer infiltratie van de relatief koude neerslag kunnen zijn in de winter en minder infiltratie van relatief warme neerslag in de zomer. Toch wijzen meerdere studies erop dat het netto effect van klimaatverandering leidt tot hogere grondwatertemperaturen.

Een eerste aanwijzing hiervoor werd geleverd door Kooi (2008), die in 2006 in Midden-Nederland metingen van temperatuur-diepteprofielen in grondwatermonitorsputten uit de jaren 1980 herhaalde en een opwarming vaststelde. Recentelijk heeft Visser (2024) enkele tientallen temperatuur-diepteprofielen gemeten tot een diepte van ongeveer 35 meter verspreid over Nederland. Uit een tijdreekanalyse toegepast op deze dataset blijkt een sterke correlatie tussen de trend in de stijging van de grondwatertemperatuur en de grondwateraanvulling. Zo vindt Visser (2024) een stijgende trend in de grondwatertemperatuur in gebieden zoals de Veluwe en stabielere grondwatertemperaturen in het westen van het land. Hij legt hiermee dus de relatie tussen de locatie-specifieke verticale grondwaterflux en de ondergrondtemperatuur. Deze correlatie hangt ook samen met het reliëf in het Nederlandse oppervlak, waarbij in hoger gelegen gebieden, zoals de Veluwe, over het algemeen meer infiltratie plaatsvindt en in de lagere minder door drainage en afwatering. Hij concludeert dat meer data nodig is om het effect van de veranderende balans tussen infiltratie en evaporatie op de ondergrondtemperatuur, als gevolg van klimaatverandering, beter te kwantificeren.

Naast verticale grondwaterstroming kan ook horizontale grondwaterstroming zorgen voor (lokale) afwijkingen van de statische geothermische temperatuurgradiënt. Deze flux wordt hoofdzakelijk bepaald door de plaats in het grondwatersysteem tussen infiltratie en drainage of onttrekking.

1.2.4 Land- en bodemgebruik

Landgebruik is een bepalende factor in de balans tussen verdamping en infiltratie, maar ook in de opname van warmte door de ondergrond. Zo zorgt gewasverdamping bijvoorbeeld voor verkoeling van het aardoppervlak. Verder absorberen asfalt en tegels in stedelijk gebied meer warmte uit zonnestraling dan agrarische percelen. Ook is de infiltratie van relatief koel regenwater in de winter lager in bebouwde omgeving dan daarbuiten. Het stedelijk hitte-eiland- ("Urban Heat Island") effect is hier een gevolg van (Klok e.a., 2012). De ondergrondse stedelijke opwarming in Amsterdam is onderzocht door Visser (2024) in temperatuur-diepteprofielen onder de stad. Daaruit volgt een duidelijke trend in toename van (ondiepe, > 50 m) ondergrondtemperatuur met een afname in afstand tot de binnenstad. Daarbij is het verschil tussen 20 en 35 meter diepte, vlak onder de grens van seizoensinvloed op de ondergrondtemperatuur (zie hoofdstuk 2), het hoogst. Eerdere onderzoeken waarbij herhaalmetingen werden uitgevoerd van historische temperatuur-diepteprofielen hebben gekeken naar het effect van landgebruik op de gemeten ondergrondtemperaturen in Nederland. Daaruit volgde eenzelfde conclusie: door verstedelijking neemt de temperatuur in de (ondiepe) ondergrond toe en in stedelijk gebied is de opwarming van de ondergrond ten opzichte van de historische situatie het grootst (Kooi, 2006; Bense & Kooi, 2004). Naast het landgebruik aan het oppervlak, heeft menselijke activiteit in de ondergrond ook invloed op het geothermische regime. Zo onttrekken geothermiesystemen en bodemenergiesystemen warmte en/of koude aan de bodem en zorgen daarnaast, in het geval van open systemen, voor grondwaterstroming. Wederom is het effect hiervan in stedelijke gebieden groter, aangezien de ondergrond hier een hogere dichtheid van dergelijke energiesystemen faciliteert.

1.3 Huidige grondwatertemperatuurmonitoring in Nederland

Momenteel wordt grondwatertemperatuur in Nederland niet structureel gemonitord, zoals voor bijvoorbeeld grondwaterstanden of grondwaterkwaliteit het geval is. Wel worden op verschillende momenten en voor verschillende doeleinden metingen gedaan van de grondwatertemperatuur. Zo wordt de temperatuur bepaald bij het nemen van grondwatermonsters voor inzicht in de grondwaterkwaliteit en het geochemisch evenwicht, bijvoorbeeld in het kader van ecologisch onderzoek, maar ook in periodieke metingen uitgevoerd door lokale overheden in grondwatermonitorsputten. Met datzelfde doel wordt temperatuur ook bepaald bij grondwateronttrekkingen. Daarnaast worden sporadisch temperatuur-diepteprofielen gemeten in het kader van (lokale) onderzoeksprojecten. De bodemtemperaturen die het KNMI meet op vier plaatsen in Nederland (<https://www.knmi.nl/nederland-nu/weer/actueel-weer/actuele-bodemtemperaturen>), worden tot een diepte van 100 cm onder maaiveld gemeten en geven geen temperatuur van het (verzadigd) grondwater weer.

De grondwatertemperatuur wordt af en toe in kaart gebracht bij de aanleg en monitoring van (open) bodemenergiesystemen, in het kader van onderzoek naar de systeemprestatie, maar ook op de potentie voor ondergrondse warmte- of koude-onttrekking of opslag te kwantificeren. Daarmee kan de efficiëntie van bodemenergiesystemen worden verbeterd door beter ontwerp, ruimtelijke inpassing en bedrijfsvoering. Tevens wordt de vloeistoftemperatuur geregistreerd in bodemwarmtepompen en warmtepompen aangesloten aan systemen voor warmte- en koudeopslag. Daarbij zijn de metingen bij het in werking stellen van dergelijke pompen representatief voor de thermische situatie voorafgaand aan een eventuele invloed van het bodemenergiesysteem. Bovendien, als de initiële situatie in de ondergrondtemperatuur bekend is, kan de impact van een dergelijk systeem op het

ondergrondse thermische regime, tijdens operatie of aan het einde van diens levensduur, worden gekwantificeerd (Visser, 2024).

Niet alle data van grondwatertemperatuurmetingen zoals hierboven genoemd zijn publiek toegankelijk. In de Basis Registratie Ondergrond (BRO) worden gegevens over grondwater opgeslagen, die structureel in Nederland worden verzameld, maar hier valt temperatuur niet onder, alleen als onderdeel van grondwaterkwaliteit (grondwatersamenstellingsonderzoek, GAR).

1.4 Doel van het rapport

Dit rapport beschrijft een analyse van de verandering in de temperatuur in de ondiepe Nederlandse ondergrond van de afgelopen 45 jaar aan de hand van herhaalmetingen voor 16 historische temperatuur-diepteprofielen (Fokker e.a., 2025). Daarbij zijn veranderingen in de grondwatertemperatuur als gevolg van seizoeneffecten buiten beschouwing gelaten. De resultaten zijn geïnterpreteerd en bediscussieerd in de context van klimaatverandering, verandering in landgebruik en verandering in (lokaal) hydrologisch regime. Zo kunnen zij gebruikt worden ter verificatie van het beeld dat een toename in grondwatertemperatuur sterk kan verschillen op lokale schaal. Daarnaast wordt aandacht besteed aan het belang van (kennis van) de grondwatertemperatuur. Op basis van de gepresenteerde resultaten en verkregen inzichten doen wij enkele aanbevelingen voor vervolgstappen richting een meer gedetailleerde karakterisatie van de ondiepe Nederlandse ondergrondtemperatuur.

2 Methode

Met de vergelijking van recent en rond 1980 gemeten temperatuur-diepteprofielen, is het verschil in temperatuur over diepte per meetlocatie gekwantificeerd. Deze vergelijking beslaat een set historische profielen gemeten door Van Dalfsen (1979, 1980, 1981, 1983) en Fokker e.a. (2025) in de grondwatermonitoringsputten weergegeven in Figuur 2. Hieruit is de lokale opwarming in de ondergrond tussen de twee meetmomenten bepaald.

Dit rapport richt zich op de formulering van een integrale verklaring voor de gemeten temperatuursverandering van de afgelopen 45 jaar, op basis van de verschillende factoren beschreven in paragraaf 1.2.

2.1 Data-selectie voor uitsluiten kortetermijnfluctuaties

Om effecten van atmosferische temperatuurcycli op de kortere termijn, zoals de seizoenen en het dag-nacht ritme, uit te sluiten in de analyse, is de eerste 20 meter van de temperatuurprofielen, onder maaiveld, niet meegenomen. De diepte tot waar deze invloed rijkt is afhankelijk van verschillende factoren, zoals uitgelegd in paragraaf 1.2, maar op basis van eerdere onderzoeken lijkt een diepte van 20 meter garantie te geven voor het uitsluiten van kortetermijn temperatuurfluctuaties (Bense & Kooi, 2004; Beltrami & Kellman, 2003; Taylor & Stefan, 2009; Bense e.a., 2020; Anderson, 2005). Bij de analyse van het verschil tussen de historische en recent gemeten temperatuur-diepteprofielen, is een onzekerheidsmarge in acht genomen van 0.11 graden Celsius. Hierin is de onzekerheid in de gemeten temperatuur door Van Dalfsen (1983), van 0.1 graden, en de onzekerheid in de gemeten temperaturen door Fokker e.a. (2025), van 0.01 graden, bij elkaar opgeteld. Deze onzekerheid is aangehouden als drempelwaarde om het verschil tussen het oude en het nieuwe temperatuurprofiel als verandering te interpreteren. In de verticale dimensie is de onzekerheid van zowel de historische als recente metingen verwaarloosd, op basis van de analyses in Fokker e.a. (2025) en Van Dalfsen (1981).

In Bijlage A zijn figuren opgenomen van de historische en recent gemeten temperatuur-diepteprofielen voor de meetlocaties besproken in dit rapport. Voor de volledigheid zijn in Bijlage B ook de metingen van andere locaties opgenomen, uit andere recente onderzoeken waarin historische temperatuur-diepteprofielen zijn herhaald.



Figuur 2: Locaties van grondwatermonitorsputten bemeaten voor de temperatuur-diepte-profielen die zijn vergeleken in dit rapport.

2.2 Lokale analyse

Eerst is een analyse gedaan van de lokale opwarming op de individuele meetlocaties. Daarbij zijn de individuele temperatuur-diepte-profielen beschreven in de context van de lokale geologie, hydrologische setting en het landgebruik. Voor een correlatie van de geobserveerde temperaturen met de lokale lithologische opbouw van de ondergrond, is gebruikt gemaakt van de boorbeschrijving van de respectievelijke grondwatermonitorsput die is bemeaten. In een link naar het geohydrologische regime is bij de analyse ook gekeken naar de kromming van de temperatuur-diepte-profielen ter hoogte van kleilagen, die duidt op eventueel advectief warmtetransport (Bredehoeft & Papadopoulos, 1965). Om een beeld te krijgen van de lokale geohydrologische situatie is gebruik gemaakt van de applicatie 'grondwaterstanden-in-beeld' van grondwatertools.nl (TNO-GDN, 2024).

Voor een indicatie van (een verandering in) de verticale grondwaterstroming is gebruik gemaakt van het onderdeel 'samenhang' op het tabblad met de grondwaterstandsmetingen ('dynamiek') voor het bepalen van de verticale grondwaterstandsverschillen tussen de verschillende gemonitorde filters. Het landgebruik voor de recente metingen is overgenomen van het Bestand Bodemgebruik (BBG) van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) uit 2017 (BBG2017). Voor de historische metingen is het landgebruik afgeleid van de historische topografische kaarten zoals beschikbaar op *topotijdreis.nl*.

2.3 Landelijke analyse

Vervolgens is op landelijke schaal een analyse gemaakt van de correlatie tussen de gemeten opwarming en het landgebruik en de regionale infiltratie- en kwelwaarden. Daartoe zijn de diepteprofielen van de gemeten opwarming naast elkaar geplot om eventuele trends in deze correlaties te identificeren. Voor de kwel- en infiltratiewaarden is gebruik gemaakt van het Landelijk Hydrologisch model van het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (LHM-versie 4.3), representatief voor de periode januari 2011 tot januari 2018 (Janssen e.a., 2023). Kwel- en infiltratiewaarden van de rastercellen uit het LHM, die corresponderen met de verschillende meetlocaties, zijn hierbij representatief geacht. Het LHM bevat een raster met een celgrootte van 250 bij 250 meter.

3 Resultaten

3.1 Lokaal beeld opwarmend grondwater

Deze paragraaf beschrijft de temperatuurverschillen in de peilbuizen en poogt de observaties te duiden op de individuele locaties. Hierbij is gekeken naar een eventuele correlatie met (versimpelde) lokale lithologische opbouw van de ondergrond en landgebruik. Ook zijn eventuele hydrologische bijzonderheden beschouwd, zoals bijvoorbeeld een nabijgelegen grondwateronttrekking. Alle temperatuur-diepteprofielen zijn van boven (ondiep) naar beneden (diep) beschreven. Voor de lithologische opbouw zijn de lithoklassen met de kleurcodering in Tabel 1 gebruikt.

Tabel 1: Kleuren lithologische boorbeschrijving.

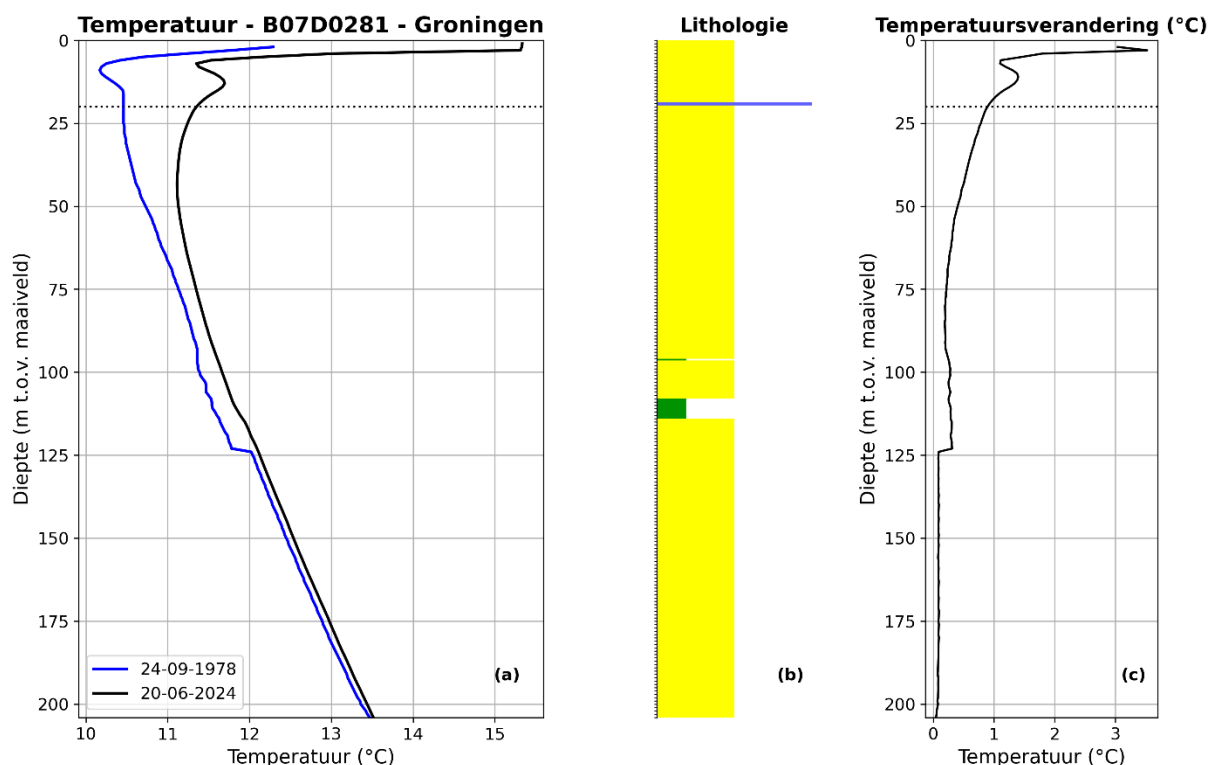
Leem	
Klei	
Zand	
Grind	
Schelpen	
Veen	

3.1.1 Groningen (B07D0281)

Voor de meetlocatie ten oosten van de stad Groningen (Groningen) is op 20 meter diepte in het recente temperatuurprofiel een opwarming gemeten ten opzichte van de situatie in 1978 van bijna een graad (Figuur 3). Deze opwarming neemt geleidelijk af tot een diepte van ongeveer 90 meter. Daaronder volgt een onregelmatig verloop van de historische temperatuurmeting met toenemende diepte, tot ongeveer 125 meter. Daardoor neemt het temperatuurverschil met het recent gemeten profiel in dit dieptebereik toe. De temperatuursprong bij 125 meter diepte valt precies samen met de diepte van een filterstelling in de bemeten peilbuis, wat gegeven de onregelmatige metingen uit 1978 zou kunnen duiden op een probleem tijdens het meetproces destijds. Echter, er is geen expliciete rapportage over de betreffende meting uit 1978 beschikbaar. Daarnaast volgt uit de (historische) stijghoogtemetingen in de peilbuis geen significante verandering in de samenhang tussen de verschillende filters en dus geen significante verandering in de verticale grondwaterstroming op de betreffende locatie. Ook is er geen indicatie voor een lokaal sterke horizontale grondwaterstroming die het onverwachte verloop van het historische temperatuurprofiel eventueel zouden kunnen verklaren. Daarom wordt de historische meting in het betreffende dieptebereik beschouwd als foutief. Het is door het onregelmatige verloop van het historische temperatuurprofiel lastig te duiden tot welke diepte de gemeten opwarming in de ondergrond precies doorloopt. Het recent gemeten profiel heeft een verandering in de temperatuurgadiënt op diepte rond 112 meter die samenvalt met een kleilaag. Het verschil in de thermische geleidbaarheid tussen een kleiige en zandige ondergrond kan dit verklaren.

In het bemeten traject dieper dan 125 meter, lopen de twee gemeten temperatuurprofielen precies parallel. Het verschil in de gemeten temperatuur tussen de twee profielen is in dit dieptebereik maximaal een tiende graad en valt daarmee binnen de onzekerheidsmarge van de meetmethoden.

Het landgebruik op de locatie van de peilbuis is gekwalificeerd als woongebied en is niet veranderd sinds 1978.



Figuur 3: (a) In 1978 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B07D0281 in Groningen. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.2 Witmarsum (B10B0191)

In de bemeten peilbuis in Witmarsum (Friesland) is op 20 meter diepte een opwarming gemeten in de grondwatertemperatuur van iets minder dan een graad sinds 1980 (Figuur 4). Deze opwarming neemt geleidelijk af tot een diepte van ongeveer 75 meter, waarna er een vrij constant temperatuurverschil is geobserveerd van enkele tienden graden tot aan de onderkant van de peilbuis.

In beide gemeten temperatuur-diepte-profielen komen duidelijke veranderingen in temperatuurgradiënt over diepte naar voren. Zo neemt tussen 75 en 100 meter diepte de temperatuurgradiënt sterk toe, waarna deze vanaf 100 meter weer afneemt met diepte. Deze karakteristiek valt samen met een dikke kleilaag, waarmee een verandering in thermische geleidbaarheid wordt geïntroduceerd ten opzichte van de boven en onderliggende zandlagen. Daarnaast bestaat een stijghoogteverschil tussen het filter op 113 meter diepte en 60 meter diepte van 1 tot 1,5 meter in de afgelopen 20 jaar (TNO-GDN, 2024), met een opwaartse stroming tot gevolg.

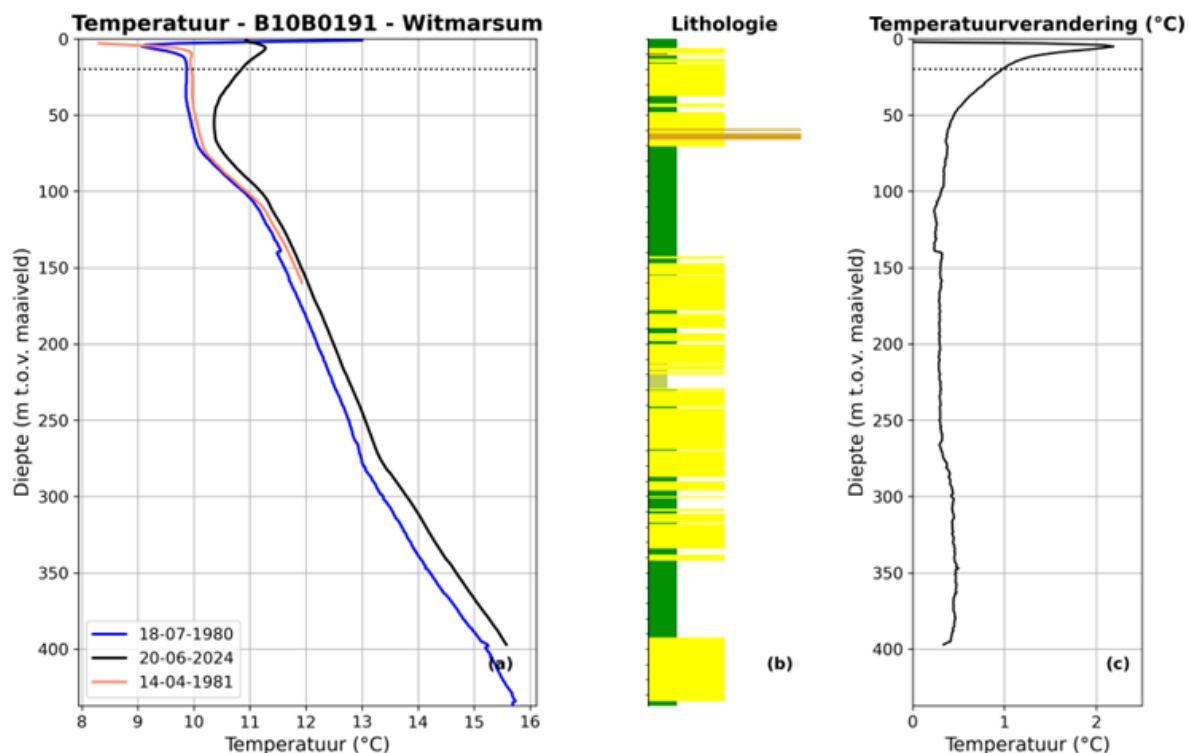
Hierdoor wordt warmte uit diepere lagen naar boven vervoerd door middel van advectief warmtetransport. Dit zorgt ervoor dat de temperatuurgradiënt onder in de kleilaag afneemt en boven in de kleilaag juist toeneemt. Vanaf 275 meter diepte neemt de temperatuurgradiënt in beide profielen weer toe. Hier is, anders dan een lichte toename in de hoeveelheid klei, echter geen duidelijke correlatie met een variatie in lithologie. Het stijghoogteverschil tussen de filters op 250 en 321 meter wijst wel op een opwaartse stroming, als rekening gehouden wordt met de lokale dichtheden van het grondwater.

Hoewel de historische en recent gemeten temperatuurprofielen een vrij constant verschil over diepte vertonen, valt deze observatie in principe niet binnen de onzekerheidsmarge van de meetmethode, gezien de mate van het temperatuurverschil groter is dan 0.11 graden.

Echter, er zijn meerdere aanwijzingen dat bij de meting van het profiel uit 1980 mogelijk dingen mis zijn gegaan waardoor afwijkingen van de daadwerkelijke ondergrondtemperatuur in het temperatuurprofiel worden weerspiegeld. Zo bevat het verloop van het temperatuurprofiel uit 1980 rond 140 meter diepte een abrupte verschuiving naar lagere temperatuurwaarden. Daarnaast bevat het temperatuurprofiel rond 400 meter diepte een abrupt piekje met verhoogde waardes vergeleken met de boven- en ondergelegen sectie.

Ook is in 1981 is door Wim van Dalfsen een tweede profiel gemeten in de grondwatermonitoringsput bij Witmarsum, tot een diepte van zo'n 155 meter. Opvallend is dat dit in profiel, in vergelijking met de meting uit 1980, hogere temperaturen zijn geregistreerd, behalve in het dieptebereik tussen 75 en 100 meter. Tevens is de abrupte verschuiving rond 140 meter diepte in het profiel uit 1980 niet terug te zien in het profiel uit 1981. Toch is geen duidelijke verklaring gevonden voor een constante opwarming in de ondergrondtemperatuur sinds 1980, in het dieptebereik tussen 75 en 400 meter. Mogelijk wordt de afwijking veroorzaakt door een foutieve kalibratie van de sensor in 1980 of in 2024. Daarnaast is het door dit verloop van de gemeten temperatuur-diepteprofielen niet mogelijk om uitspraak te doen over de precieze diepte tot waar de temperatuursverandering als gevolg van atmosferische opwarming is doorgedrongen. De observaties op deze meetlocatie illustreren daarmee de onzekerheid in de vergelijking van de recente en historische temperatuur-diepteprofielen.

Het landgebruik op de locatie van de peilbuis is gekwalificeerd agrarisch en lijkt niet te zijn veranderd sinds 1980.

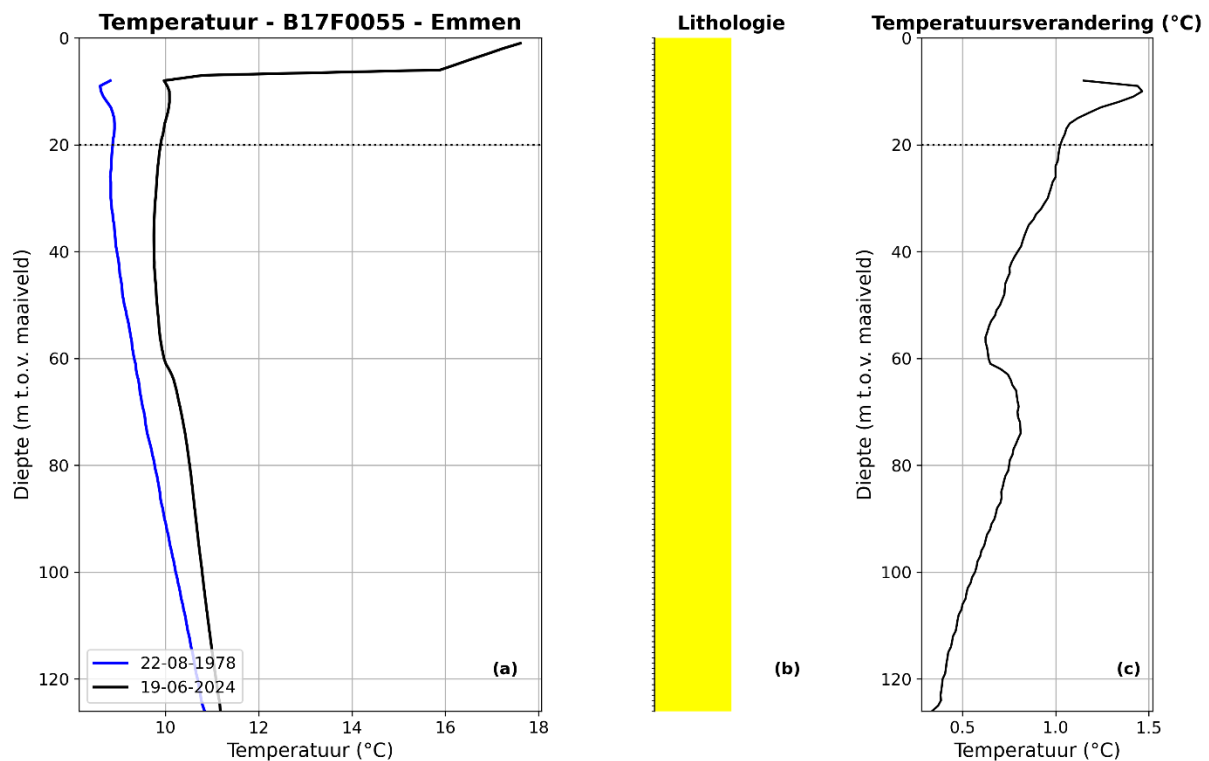


Figuur 4: (a) In 1980, 1981 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B10B0191 bij Witmarsum. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering tussen 1980 en 2024. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.3 Emmen (B17F0055)

Op de meetlocatie noordelijk van Emmen (Drenthe) is, in het verschil tussen het historische en recente temperatuur-diepte-profiel, op 20 meter diepte een opwarming gemeten van ongeveer een graad (Figuur 5). Tot een diepte van ongeveer 60 meter neemt deze opwarming af tot 0.6 graden. Echter, in de volgende meters neemt de temperatuurgradiënt in het recent gemeten profiel toe om daarna weer af te nemen. Dit is niet het geval in het historische profiel, waardoor de opwarming vanaf deze diepte, tot 70, meter weer enkele tienden graden toeneemt. Aangezien er geen lithologische variatie beschreven is in de boorbeschrijving en het geobserveerde patroon enkel te zien is in de recente meting, suggereert dit een verandering in de grondwaterstroming ten opzichte van de historische situatie. Echter, vanuit de stijghoogtemonitoringsdata voor de verschillende filters in de waarnemingsput is geen indicatie te vinden voor een verandering in de verticale waterflux (TNO-GDN, 2024). Daarnaast is er geen indicatie van een verandering in horizontale grondwaterstroming ten opzichte van de situatie in 1978. Wel ligt de peilbuis in nabijheid van een aantal grondwateronttrekkingen, opgenomen in het Landelijk Grondwater Register (WKO-bodemenergie-tool, 2025), die de grondwaterstroming kunnen beïnvloeden. Helaas is niet in het LGR gegeven van welke diepte de grondwaterwinningen onttrekken en hoe veel water onttrokken wordt.

Het landgebruik op de meetlocatie in Emmen is gekwalificeerd als bos, wat geen verandering is ten opzichte van de situatie in 1978.

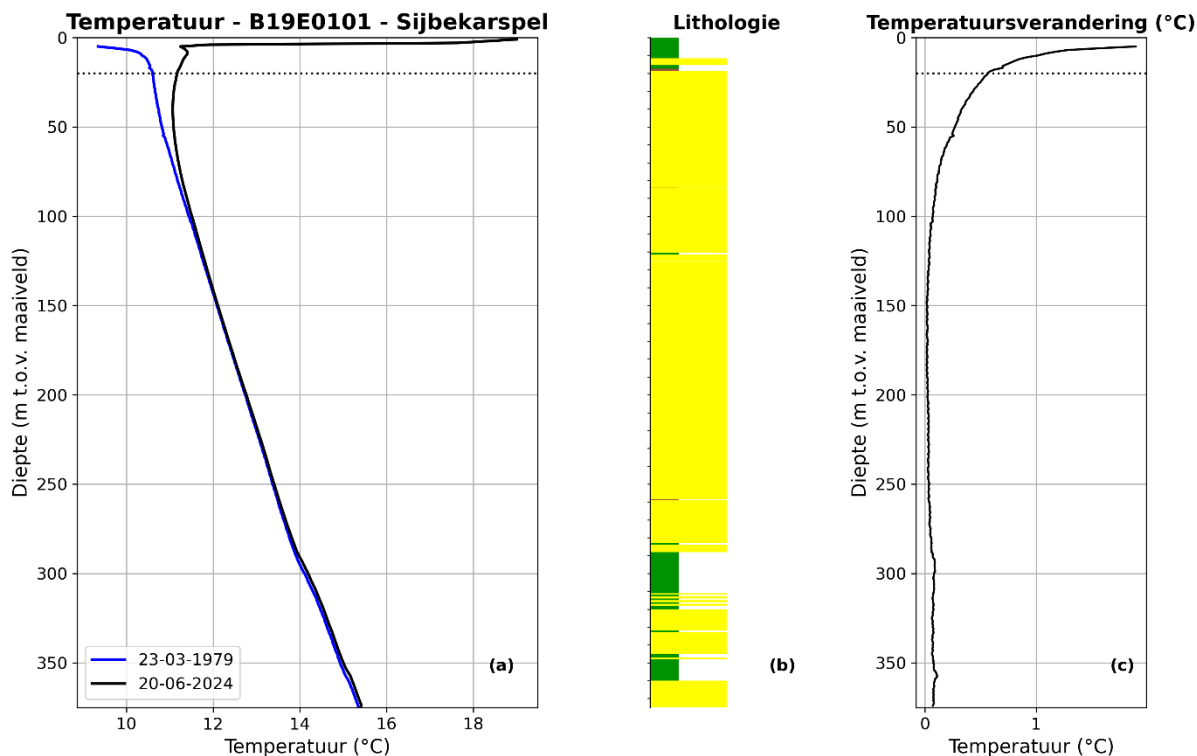


Figuur 5: (a) In 1978 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B17F0055 bij Emmen. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.4 Sijbekarspel (B19E0101)

In de peilbuis op de meetlocatie in Sijbekarspel (Noord-Holland) is in vergelijking met de hierboven beschreven locaties een kleinere temperatuursverandering geobserveerd in de herhaalde temperatuursmeting ten opzichte van de historische meting. Zo is op een diepte van 20 meter een opwarming van 0.5 graden bepaald. Deze opwarming neemt geleidelijk af over diepte, waarna het verschil met het tussen het recent gemeten temperatuur-diepte-profiel en dat uit 1979 vanaf een diepte van ongeveer 100 meter binnen de onzekerheidsmarge valt. Tot een diepte van ongeveer 290 meter omvatten beide profielen een zeer constante temperatuurgradiënt, die vervolgens in het ondergelegen dieptebereik wat groter is ter hoogte van klei in de boorbeschrijving.

Het landgebruik op de meetlocatie in Sijbekarspel is gekwalificeerd als bedrijfsterrein en is niet veranderd ten opzichte van de situatie in 1979.

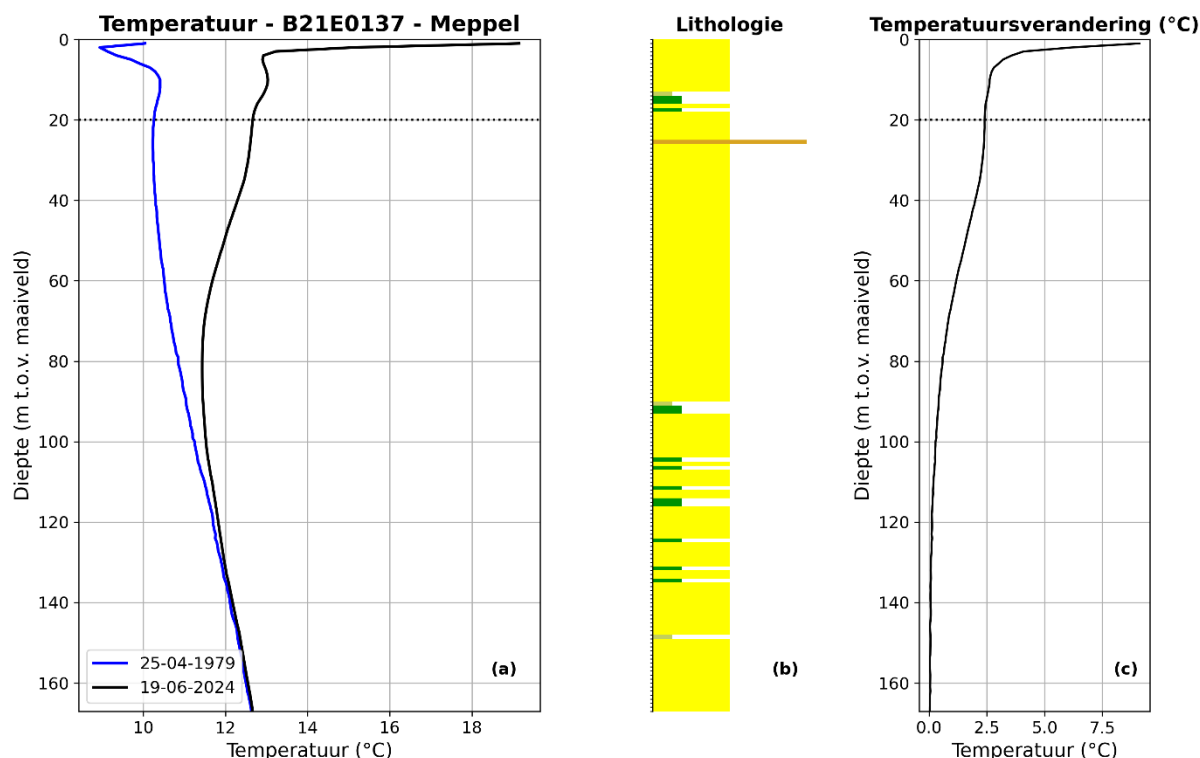


Figuur 6: (a) In 1979 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B19E0101 bij Sijbekarspel. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.5 Meppel (B21E0137)

De gemeten opwarming in het recente temperatuur-diepte-profiel ten opzichte van de historische situatie is het grootst op de meetlocatie in Meppel (Drenthe, Figuur 7). Op deze locatie is op 20 meter diepte een temperatuursverandering gemeten van 2,4 graden in 2024 ten opzichte van 1979. Daarnaast tonen de metingen dat de opwarming, die afneemt met diepte, doorloopt tot een diepte van ongeveer 120 meter. Hoewel dit niet de diepst gemeten temperatuursverandering is voor alle bemeaten locaties, lijkt dit wel een betrouwbare observatie, aangezien de profielen uit 1979 en 2024 in het dieptebereik hieronder precies overeenkomen.

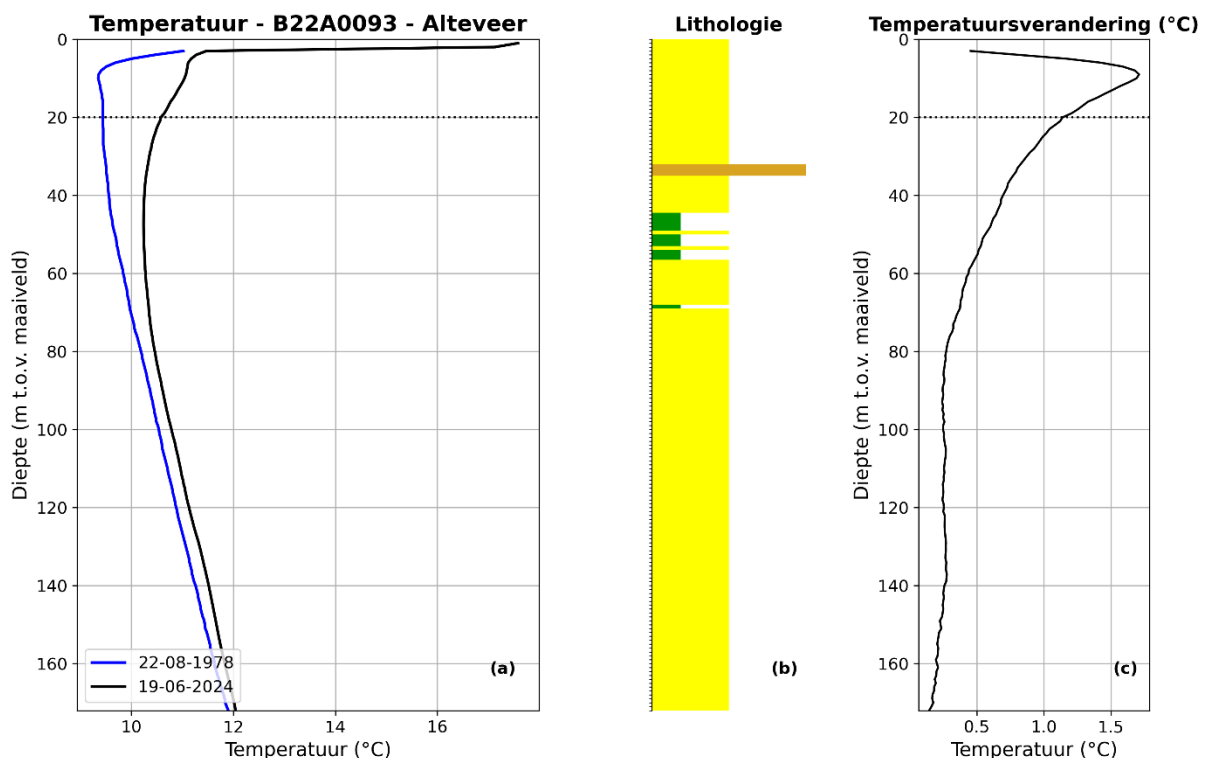
Het landgebruik valt onder stedelijk gebied en is momenteel nog hetzelfde als ten tijde van de historische meting van het temperatuur-diepte-profiel uit 1979. Daarnaast volgt uit de historische stijghoogtemetingen in de betreffende grondwatermonitorsput geen verandering in de verticale grondwaterflux op de meetlocatie. Echter, een mogelijke verklaring voor de sterke toename in grondwatertemperatuur zou in de buurt gezocht kunnen worden, aangezien op enkele tientallen meters afstand van de meetlocatie een grondwateronttrekking ligt (WKO-bodemenergiETOOL, 2025). In het geval dat deze onttrekking plaatsvindt in de bovenste 50 meter van de ondergrond, zou geïnduceerde verticale grondwaterstroming, een verklaring kunnen geven voor de sterke opwarming in dit dieptebereik.



Figuur 7: (a) In 1979 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B21E0137 bij Meppel. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.6 Alteveer (B22A0093)

Op de meetlocatie in Alteveer (Drenthe, ten zuiden van Hoogeveen), is op 20 meter diepte in 2024 een opwarming in het grondwater gemeten van ongeveer een graad ten opzichte van de situatie in 1978. Deze opwarming neemt geleidelijk af met diepte, waarna het historische en recente temperatuurprofiel tussen een diepte van ongeveer 80 en 140 meter een constant temperatuurverschil van enkele tienden graden. Vanaf 140 meter tot aan de onderkant van de peilbuis neemt dit verschil verder af. Een mogelijke verklaring voor het relatief diep doordringen van de atmosferische opwarming in het grondwater, zou kunnen worden gegeven door de ligging van de peilbuis op het terrein van een grondwateronttrekking in Alteveer (WKO-bodemenergie-tool, 2025). Mogelijk wordt water onttrokken onder een diepte van ongeveer 60 meter, de ondergrens van de eerste kleilaag op de meetlocatie, maar geen informatie is beschikbaar over de onttrekkingslocatie om deze hypothese verder te onderzoeken. Het landgebruik op de locatie van het meetpunt in Alteveer is gekwalificeerd als bestemd voor agrarisch gebruik, wat niet is veranderd ten opzichte van de situatie in 1978. Een relatief hoge infiltratie door gebruik van oppervlaktewater voor beregening van landbouwgrond zou ook een verklaring kunnen geven voor het diep doordringen van de opwarming in het grondwater op deze locatie. Echter, andere meetlocaties waar het landgebruik binnen de klasse van agrarische doeleinden valt, tonen geen soortgelijk patroon (zie paragraaf 3.2). Historische stijghoogtemetingen in de verschillende filters in de peilbuis, in combinatie met het LHM, geven geen indicatie voor een verandering in mate van verticale grondwaterstroming sinds 1978 en/of een sterke horizontale grondwaterstroming.

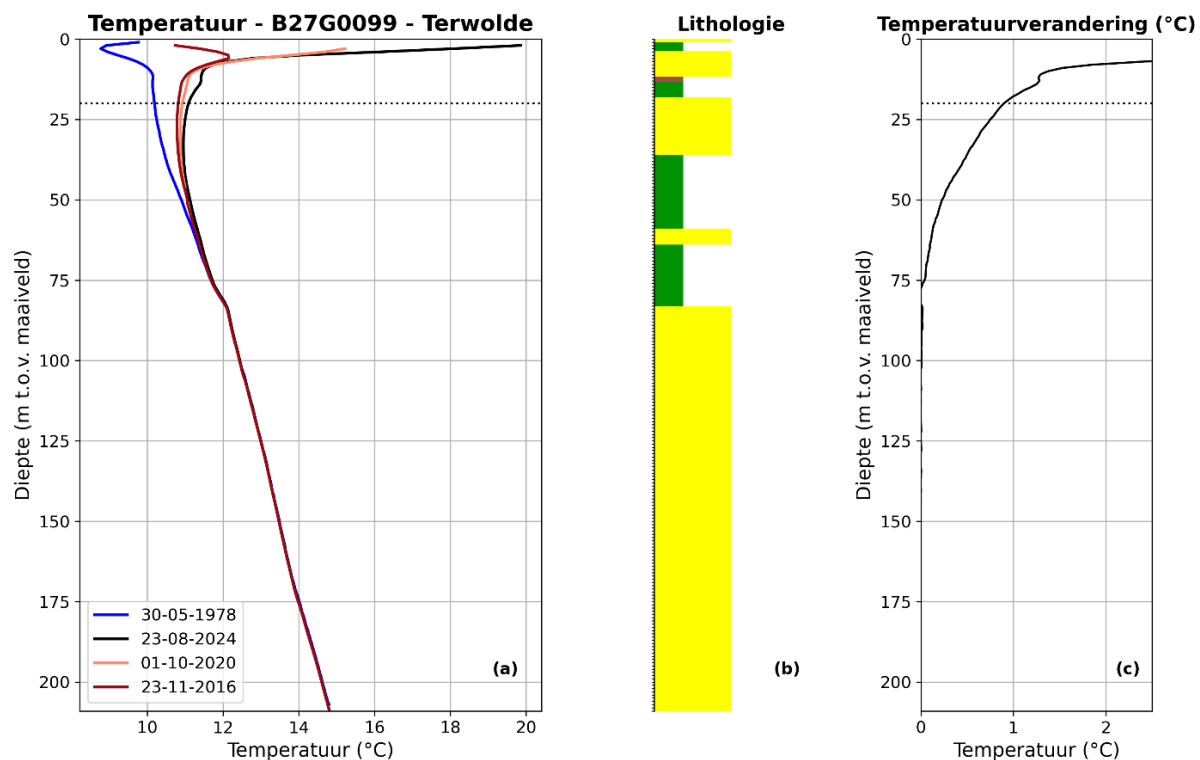


Figuur 8: (a) In 1978 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B22A0093 bij Alteveer. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.7 Terwolde (B27G0099)

Op de meetlocatie in Terwolde (Gelderland, noordwestelijk van Deventer) zijn, naast de metingen van een temperatuur-diepte-profiel in 1978 en 2024, ook twee tussentijdse metingen beschikbaar uit 2016 (meetlocatie nr. 10 in Bense & Kurylyk, 2017) en 2020. Tot een diepte van ongeveer 75 meter, tonen de verschillende herhaalmetingen een constante opwarming van het grondwater (Figuur 9). Hoewel tussen de tweede en derde meting (2016 en 2020) en derde en vierde meting (2020 en 2024) evenveel tijd zit, is de gemeten opwarming in de laatste vier jaar groter dan in de vier jaar daarvoor. De snelheid van de opwarming neemt consistent toe tussen de metingen. In totaal is de gemeten opwarming sinds 1978 op 20 meter diepte iets minder dan een graad.

Op 80 meter diepte valt een verandering in de temperatuurgradiënt in de gemeten profielen samen met een lithologische verandering van klei naar zand. Het effect van deze lithologische grens op de ondergrondtemperatuur is groot voor enkel een overgang in thermische geleidbaarheid. Aangezien de stijghoogte in het filter onder dit kleipakket een meter hoger is dan erboven, zou opwaartse stroming van dieper, relatief warm water een aanvullende verklaring kunnen zijn. Uit de stijghoogtemetingen en het LHM, volgt een kleine stijghoogtegradiënt en dus wordt weinig invloed van horizontale grondwaterstroming verwacht. De meetlocatie bevindt zich in de uiterwaarde van de IJssel en is geclassificeerd als bestemd voor agrarisch gebruik. Dit is niet veranderd sinds 1978.



Figuur 9: (a) In 1978, 2016, 2020 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B27G0099 bij Terwolde. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering tussen 1978 en 2024. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

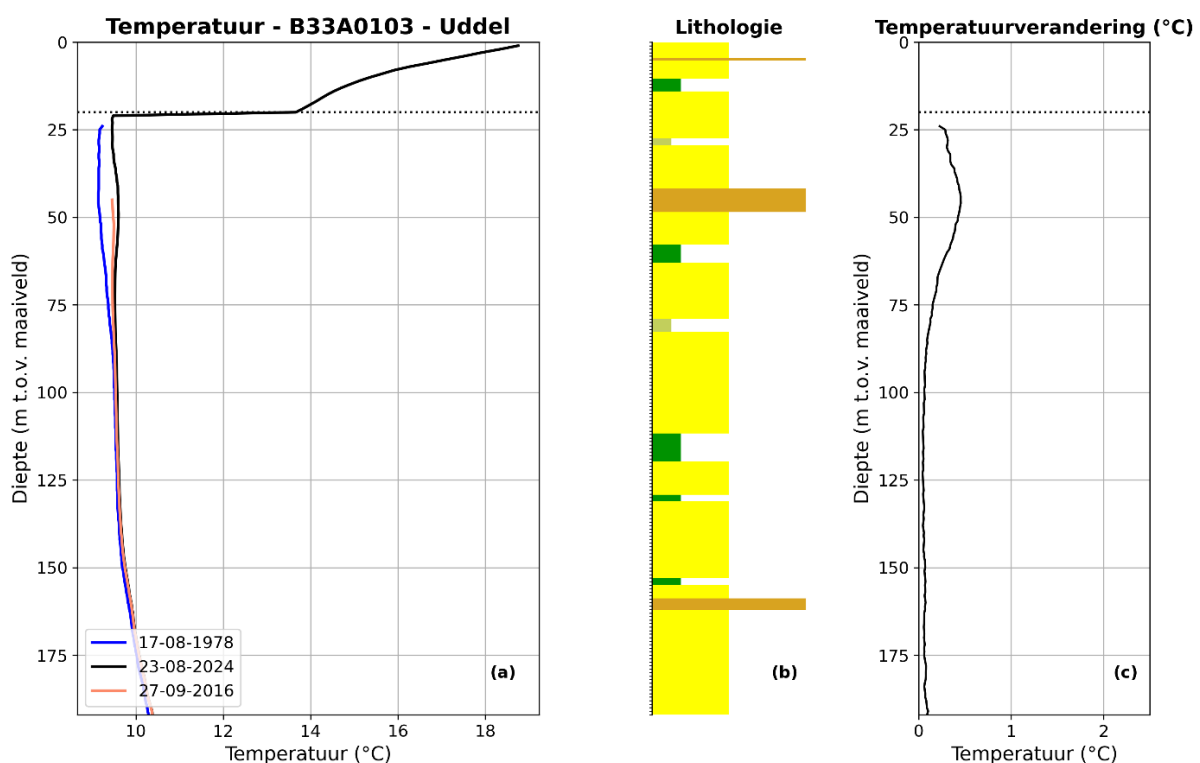
3.1.8 Uddel (B33A0103)

Ook op meetlocatie Uddel (Gelderland, gelegen op de Veluwe ten westen van Apeldoorn) is, naast de temperatuur-diepte-profielen uit 1978 en 2024, een meting gedaan in 2016 (meetlocatie nr. 3 in Bense & Kurylyk, 2017) (Figuur 10). De opwarming van het grondwater in de afgelopen 40 jaar is met maximaal 0,5 graden relatief klein en vertoont een ander patroon dan op de andere meetlocaties is geobserveerd. Net als bij de metingen in Terwolde (B27G0099) neemt de opwarming in de tijd toe. In tegenstelling tot alle andere meetpunten, neemt de gemeten opwarming vanaf een diepte van ongeveer 25 meter toe tot een diepte van 50 meter, waarna deze geleidelijk minder wordt en vanaf ongeveer 90 meter diepte binnen de onzekerheidsmarge valt.

De grondwaterstand in de put is bijna 25 meter beneden maaiveld, zodat geen opwarming op 20 meter diepte bepaald kan worden. Het landgebruik op de meetlocatie in Uddel is geclassificeerd als droog, natuurlijk terrein. Een snelle wegzijging van neerslag en snelle verdamping van het overgebleven waterresidu in de onverzadigde zone zou het relatief kleine temperatuurverschil tussen de gemeten temperatuur-diepte-profielen kunnen verklaren. Het maximale temperatuurverschil tussen de profielen, op een diepte van 50 meter, valt samen met een grindlaag in de lithologische kolom. De stijghoogtedata van de verschillende filters in de put toont een zeer constante stijghoogte over diepte en daarmee een gebrek aan verticale grondwaterstroming dan wel weerstand.

Daarnaast kan op basis van het temperatuurverloop vanaf de bovenkant van de meting geen verklaring worden gevonden in een invloed van infiltratie; de temperatuur stijgt naar beneden toe voordat deze weer wat afneemt. Met infiltratie bij een consistente opwarming van de atmosfeer en daarmee neerslagtemperatuur zou dit niet tot het geobserveerde patroon kunnen leiden.

De meetlocatie bevindt zich aan de westflank van de Oost-Veluwse stuwwal. De infiltratie op deze stuwwal is relatief hoog (LHM-versie 4.3) en van nature stroomt het grondwater in dit gebied van hoger gebied op de wal naar naastgelegen dalen. Hierdoor zou afvoer van geïnfiltreerde neerslag op de wal preferente horizontale stroming kunnen veroorzaken in de grove en sterk doorlatende grindlaag, wat de temperatuur op de betreffende diepte zou kunnen beïnvloeden.

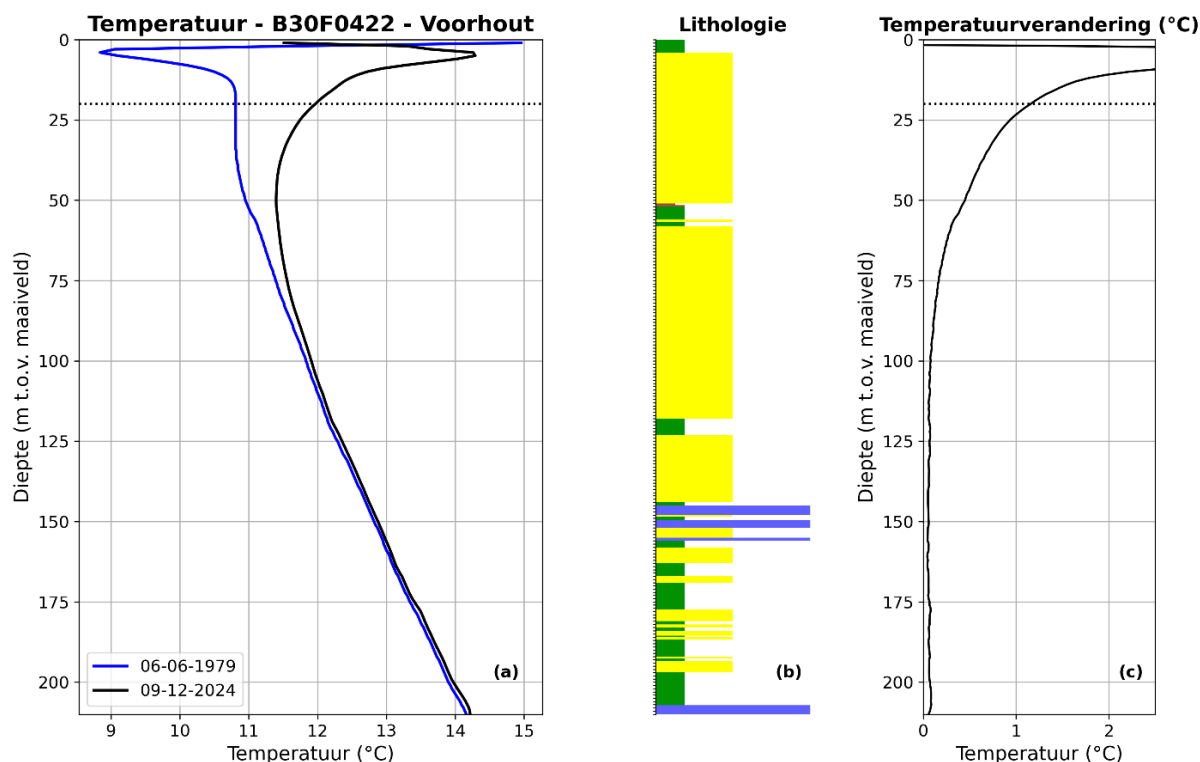


Figuur 10: In 1978, 2016 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B33A0103 bij Uddel. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuurverandering tussen 1978 en 2024. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.9 Voorhout (B30F0422)

Op de meetlocatie in Voorhout (Zuid-Holland, tussen Noordwijk en Sassenheim), is op 20 meter diepte een opwarming in ondergrondtemperatuur gemeten van ruim een graad sinds 1979, die naar beneden minder wordt tot een diepte van ongeveer 100 meter (Figuur 11). Enkele variaties in de temperatuurgradiënt in de gemeten temperatuur-diepte-profielen vallen samen met variaties in lithologie en daarmee ondergrond thermische geleidbaarheid. In het gemeten profiel uit 1979 vindt op ongeveer 55 meter, een sterkere verandering in temperatuurgradiënt plaats dan in het profiel uit 2024. Toch is op basis van (historische) stijghoogtemetingen en het LHM geen eenduidige verklaring te definiëren voor dit verschil, aangezien er geen verandering te identificeren is in het hydrologische regime.

De bemeten peilbuis in Voorhout ligt direct langs een weg, waar het landgebruik als bos is geclassificeerd. Op de topografische kaart uit 1979 lijkt het bos te ontbreken, maar is de weg wel te herkennen.



Figuur 11: (a) In 1979 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B30F0422 bij Voorhout. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

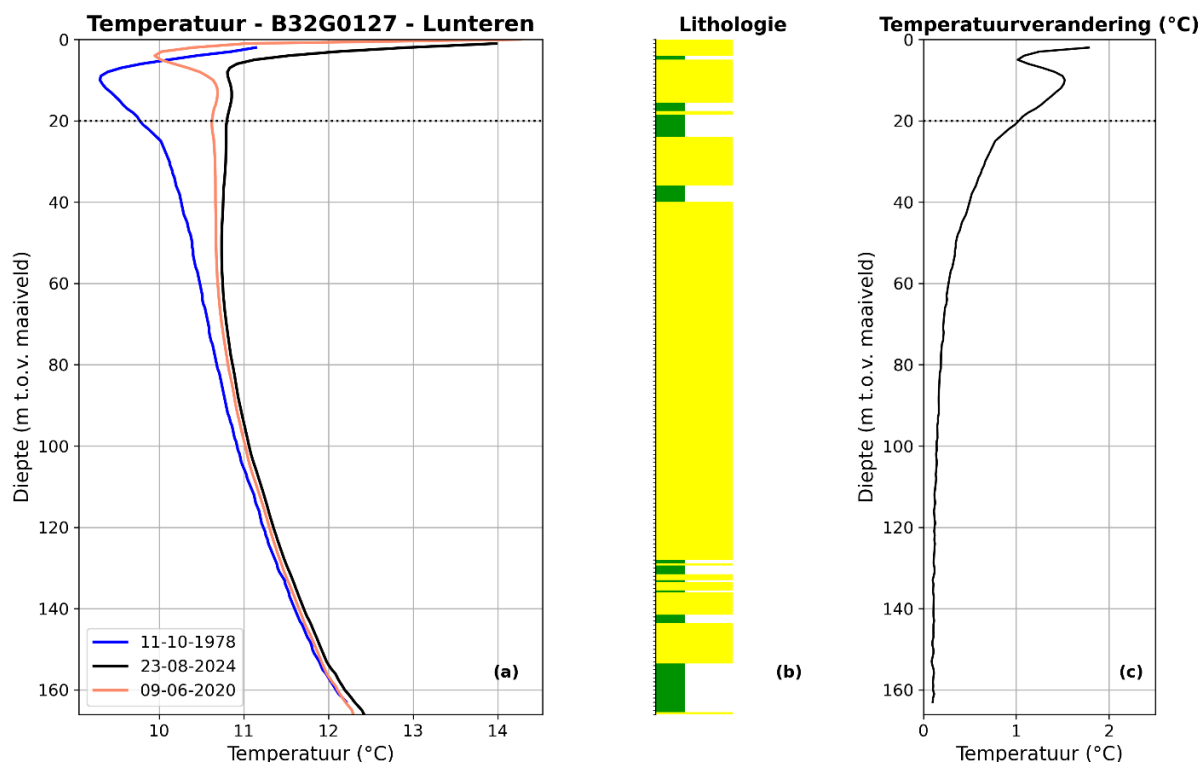
3.1.10 Lunteren (B32G0127)

Op de meetlocatie in Lunteren (Gelderland, ten oosten van Amersfoort) is de peilbuis sinds de eerste meting in 1978 twee keer bemeten; in 2020 en in 2024. Net als bij de eerder besproken meetlocaties waarvoor meerdere temperatuur-diepte-profielen beschikbaar zijn, is door de tijd heen een toenemende opwarming gemeten (Figuur 12). Deze opwarming neemt af met diepte, waarbij vanaf een diepte van ongeveer 110 meter het temperatuurverschil tussen het historische profiel uit 1978 en het recente profiel uit 2024 binnen de onzekerheidsmarge van de meetmethoden valt. Daarnaast is te zien dat het gemeten temperatuur-diepte-profiel uit 2020 vanaf een diepte van ongeveer 150 meter precies overeenkomt met de meting uit 1978. In alle metingen neemt de temperatuurgradiënt vanaf deze diepte sterk toe, wat precies samenvalt met het voorkomen van een kleilaag met een relatief lage thermische geleidbaarheid.

De meetlocatie ligt enkele tientallen meters afstand van een grondwateronttrekking. Daarnaast bevindt zich tussen de 40 en 150 meter diepte, direct boven de kleilaag, een relatief dik zandpakket. Mogelijk veroorzaakt de nabijgelegen grondwateronttrekking voor een verticale grondwaterstroming in het zandpakket en daarmee aanvoer van relatief warm, ondieper grondwater. Helaas is ook hier geen informatie beschikbaar over de hoeveelheid onttrokken grondwater en de diepte van de onttrekking.

De minimale verschillen tussen de stijghoogtes in de filters van de waarnemingsput suggereren dat het geobserveerde patroon in het temperatuurverschil niet veroorzaakt kan worden door verticale grondwaterstroming.

Het meetpunt in Lunteren bevindt zich in een gebied dat geclassificeerd is als bos; iets dat niet is veranderd sinds 1978.

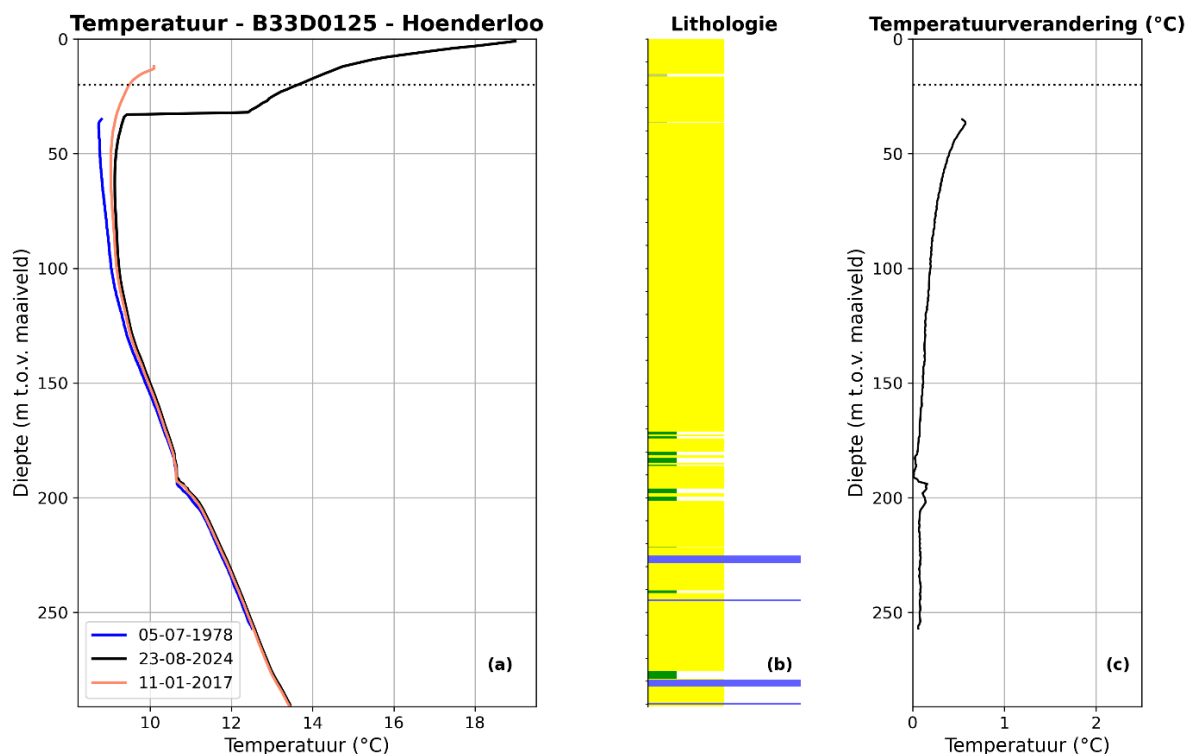


Figuur 12: (a) In 1978, 2020 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B32G0127 bij Lunteren. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuurverandering tussen 1978 en 2024. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.11 Hoenderloo (B33D0125)

In de peilbuis op de meetlocatie in Hoenderloo (Gelderland, op de Veluwe zuidwestelijk van Apeldoorn) is zowel in 2017 (meetlocatie nr. 5 in Bense & Kurylyk, 2017) als in 2024 een herhaalmeting gedaan van het temperatuur-diepte-profiel uit 1978. De profielen tonen wederom een toenemende opwarming van het grondwater in de afgelopen 47 jaar, met een maximale opwarming op ongeveer 35 meter van ruim een halve graad (Figuur 13). Tot een diepte van ongeveer 190 meter neemt het temperatuurverschil tussen het eerst gemeten profiel en het meest recente profiel af. Door een kleine diepteverschuiving ter hoogte van de knik in de profielen hier, is het verschil tussen de metingen uit 1978 en 2024 groter. Bij de publicatie van het temperatuur-diepte-profiel uit 1978, wordt dit patroon door Van Dalfsen (1981) simpelweg uitgelegd als het effect van grondwaterstroming. Echter, een meer gedetailleerde verklaring kan worden gevonden in een opwaartse stroming in het grondwater op deze diepte, waarbij warmer grondwater van grotere diepte naar boven wordt getransporteerd en die volgt uit een halve meter stijghoogteverschil tussen de filters op 158 meter en 203 meter. Er bevinden zich enkele dunne kleilagen, met een maximale dikte van een ongeveer meter, op de betreffende diepte.

De opwaartse stroming zou dus gerelateerd kunnen zijn aan een slecht geïnstalleerde peilbuis waarbij de boorgatafdichting onvoldoende afsluit en een kortsluitstroming toelaat tussen de zandpakketten onder en boven de kleilaag. De toename in temperatuurgradiënt in de gemeten profielen zal, naast het effect van de opwaartse stroming, ook worden veroorzaakt door een variatie in thermische geleidbaarheid van de ondergrond. De meetlocatie in Hoenderloo ligt op de Veluwe, waar het landgebruik is geclassificeerd als zijnde bos, wat niet is veranderd sinds de meting van het eerste temperatuurprofiel.

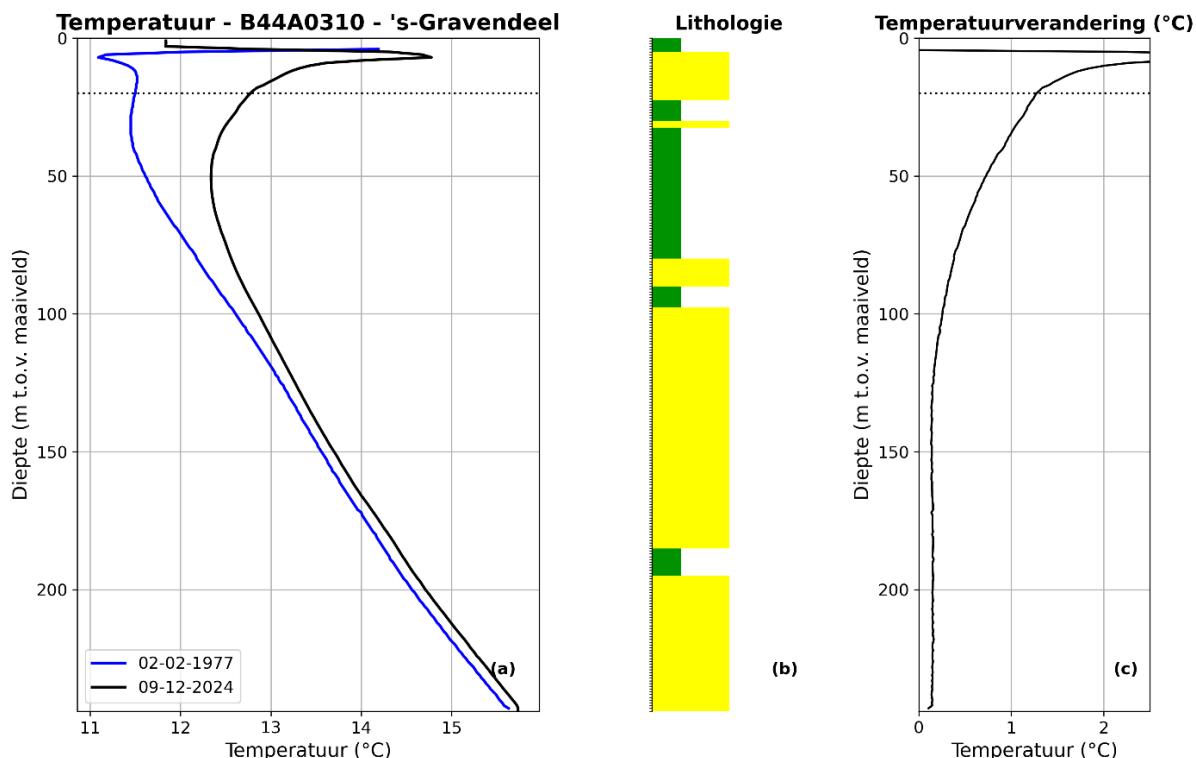


Figuur 13: (a) In 1978, 2017 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B33D0125 bij Hoenderloo. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering tussen 1978 en 2024. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.12 's-Gravendeel (B44A0310)

Op de meetlocatie in 's-Gravendeel (Zuid-Holland, ten westen van Dordrecht) is de geobserveerde opwarming tussen het recent gemeten temperatuur-diepte-profiel en het temperatuur-diepte-profiel uit 1977 op 20 meter ongeveer 1.2 graden (Figuur 14). Deze opwarming neemt af tot een diepte van ongeveer 125 meter, waaronder een constant verschil van ongeveer 0.15 graden tussen de profielen blijft aanhouden, tot aan de onderkant van de bemeten peilbuis. De temperatuurgradiënt is vanaf 125 meter diepte in beide profielen ook zeer constant tot onderin de peilbuis, ondanks het voorkomen van een kleilaag op ongeveer 180 meter. Hoewel het verschil tussen de twee gemeten temperatuur-diepte-profielen boven de onzekerheidsmarge van de meetmethoden valt, is in de tijdreeksanalyse van de stijghoogtedata in en rondom deze peilbuis, in combinatie met het LHM, geen duidelijke indicatie te vinden voor een verandering in hydrologisch regime sinds de eerste temperatuurmeting.

De bemeten peilbuis bevindt zich in het centrum van 's-Gravendeel, waar het landgebruik is geclassificeerd als woongebied. Dit komt overeen met de situatie in 1977.



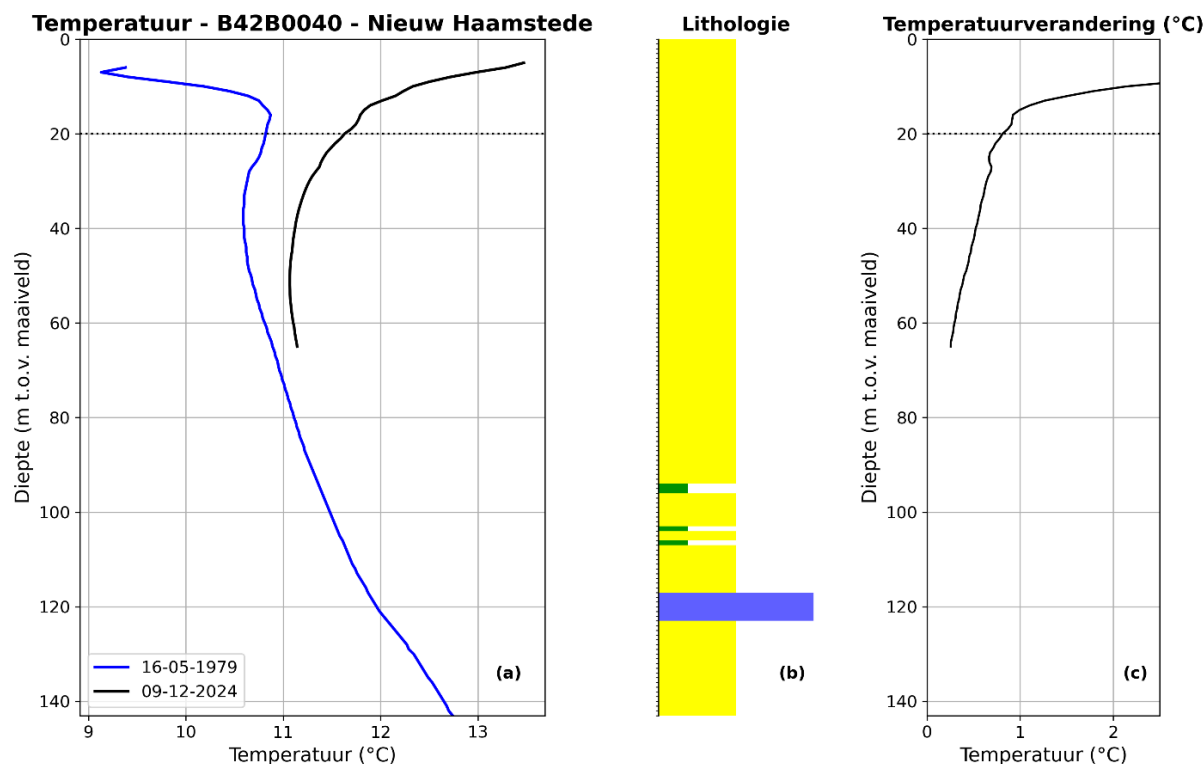
Figuur 14: (a) In 1977 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B44A0310 bij 's-Gravendeel. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.13 Nieuw-Haamstede (B42B0040)

Het temperatuur-diepte-profiel uit 2024 in Nieuw-Haamstede (Zeeland, Schouwen-Duiveland) niet tot aan de onderkant van de bemeten peilbuis, maar heeft een maximale diepte van ongeveer 65 meter vanwege technische problemen tijdens het uitvoeren van de meting. Uit de vergelijking met het historische profiel uit 1979 volgt een opwarming in de ondergrondtemperatuur van ongeveer 0.8 graden op 20 meter diepte. Over het gehele bemeten dieptebereik van de meting uit 2024 is een opwarming gemeten ten opzichte van de situatie in 1979, met ongeveer 0.3 graden verschil tussen beide metingen op 65 meter diepte. In beide temperatuur-diepte-profielen vindt een verandering in thermische gradiënt plaats tussen een diepte van ongeveer 18 en 30 meter. Hoewel de bovenste twee meter van dit dieptebereik in principe binnen de zone van seizoensinvloed op de ondergrondtemperatuur valt, is het eventuele effect hiervan aan de onderkant van deze zone, tot 20 meter, minimaal. Het geobserveerde temperatuurverloop, dat consistent is tussen de twee gemeten temperatuur-diepte-profielen, wordt daarom beschouwd als niet gerelateerd aan seizoensfluctuaties in atmosferische temperatuur. Echter, uit de boorbeschrijving van de betreffende peilbuis volgt geen correlatie met een lithologische variatie op deze diepte.

Wel liggen op enkele tientallen meters afstand meerdere grondwateronttrekkingen (WKO-bodemenergietool, 2025), die mogelijk in dit ondiepe bereik zorgen voor verticale grondwaterstroming en daarmee verstoring van de natuurlijk temperatuurgradiënt in de ondergrond.

De meetlocatie ligt aan de rand van het duingebied op de Kop van Schouwen, waar het landgebruik is geclassificeerd als droog natuurlijk terrein. Dit is niet veranderd sinds 1979.



Figuur 15: (a) In 1979 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B42B0040 bij Nieuw-Haamstede. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

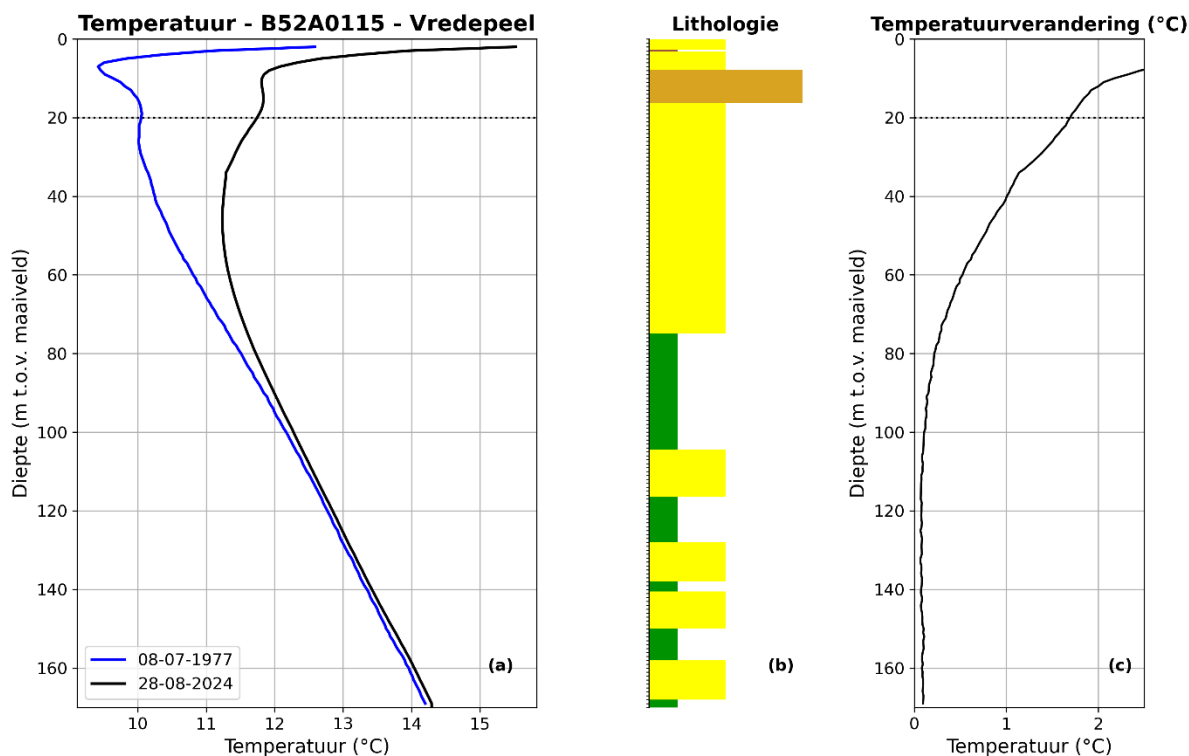
3.1.14 Vredepeel (B52A0115)

Op de meetlocatie in Vredepeel (Noord-Brabant, tussen Venray en Gemert) is, na de locatie in Meppel, de grootste opwarming in ondergrondtemperatuur gemeten sinds 1977 (Figuur 16). Op deze locatie is het recent gemeten temperatuur-diepte-profiel op 20 meter ruim 1.5 graden warmer dan het historische temperatuur-diepte-profiel. Deze opwarming neemt geleidelijk af tot een diepte van ongeveer 110 meter. Tot aan de onderkant van de peilbuis hebben beide profielen, ondanks de lithologische variatie in de ondergrond, een zeer constante temperatuurgradiënt en minder dan een tiende graad absoluut temperatuurverschil. Dit valt binnen de onzekerheidsmarge van de meetmethoden.

Met de relatief grove en dikke grindlagen in het dieptebereik tot 20 meter en het onbebouwde landgebruik, zou een relatief hoge mate van infiltratie, die ook volgt uit het LHM-versie 4.3, een verklaring kunnen zijn van de relatief hoge opwarming in ondergrondtemperatuur die op deze locatie gemeten is.

Ook zou horizontale grondwaterstroming een verklaring kunnen geven, in een vergelijkbare situatie met de geobserveerde opwarming op meetlocatie Uddel. Daarbij komt dat Vredepeel in het stroomgebied van de Maas ligt en relatief bij het rivierdal, waardoor afwatering richting de Maas de horizontale stroming zou kunnen induceren.

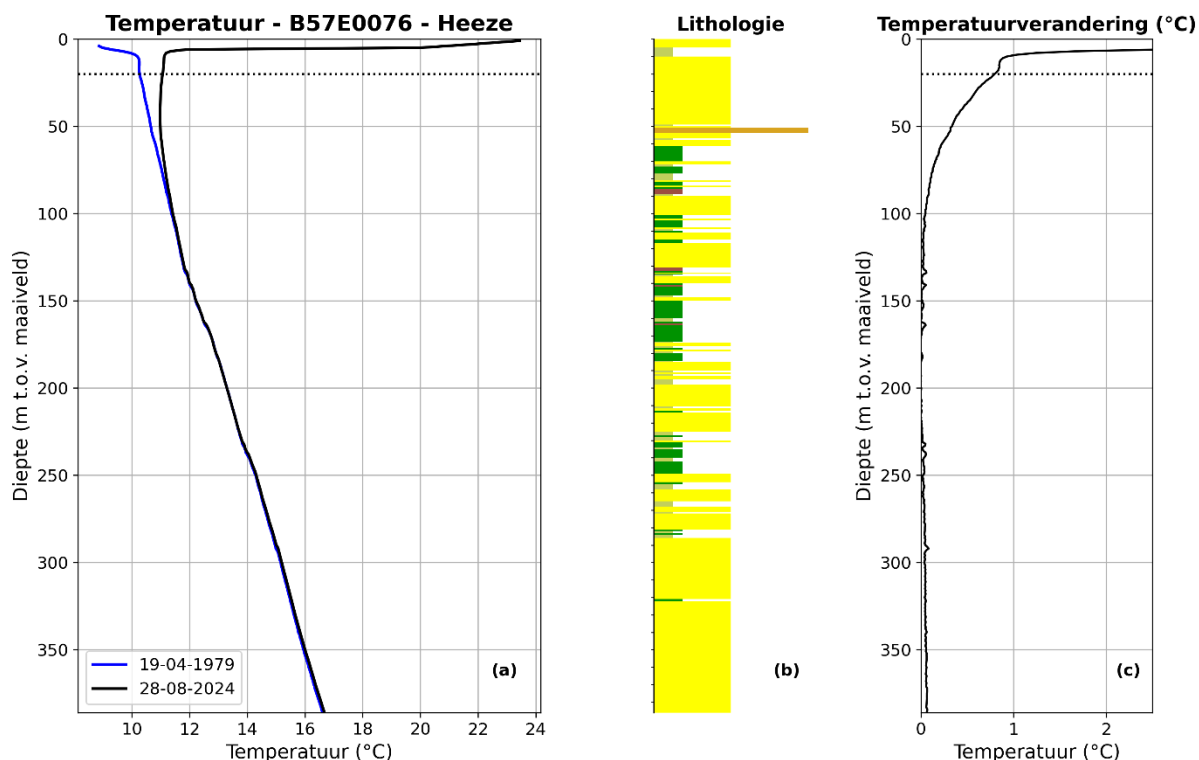
Het landgebruik wordt op de locatie in Vredepeel geclassificeerd als bestemd voor agrarisch gebruik. Dit was ook het geval in 1977.



Figuur 16: (a) In 1977 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B52A0115 bij Vredepeel. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.15 Heeze (B57E0076)

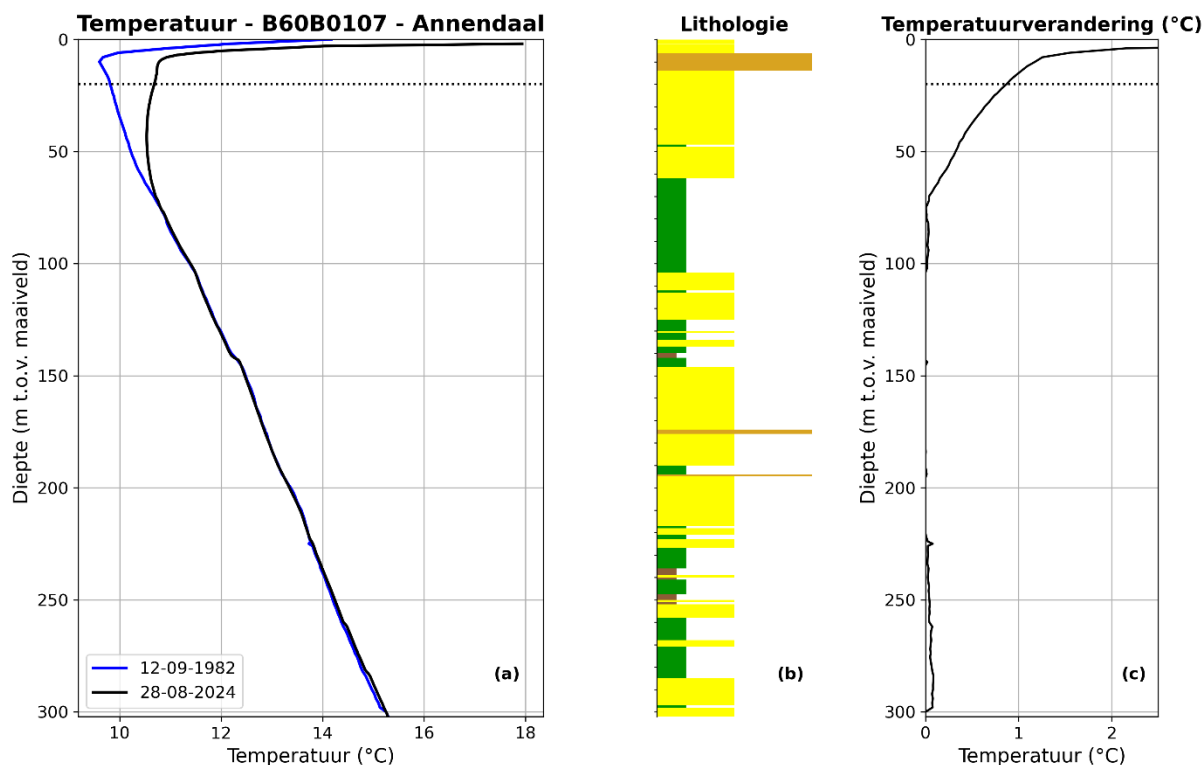
In Heeze (Noord-Brabant, zuidwestelijk van Eindhoven) is in 2024 op een diepte van 20 meter een opwarming in ondergrondtemperatuur gemeten van ongeveer 0.8 graden sinds de meting in 1979 (Figuur 17). Deze opwarming neemt af tot een diepte van ongeveer 100 meter, waaronder de temperatuur-diepte-profielen uit 1979 en 2024 precies overeenkomen. Hierbij is een variatie in temperatuurgradiënt geobserveerd, die correleert aan een kortstondige afwisseling van lithologie in de boorbeschrijving van de bemeeten peilbuis. De meetlocatie in Heeze bevindt zich in een bos, wat zich nu over een groter gebied uitstrekt rond de monitoringslocatie dan in 1979.



Figuur 17: (a) In 1979 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B57E0076 bij Heeze. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuurverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.1.16 Annendaal (B60B0107)

In Annendaal (Limburg, ten zuiden van Roermond) heeft tussen de meting in 1982 en 2024 een opwarming in de ondergrondtemperatuur plaats gevonden van 0.9 graden op 20 meter diepte (Figuur 18). Deze opwarming wordt minder met toenemende diepte en loopt door tot ongeveer 75 meter. Daaronder, tot aan de onderkant van de bemeten peilbuis op 200 meter diepte, komt het recente gemeten temperatuur-diepte-profiel precies overeen met de historische meting. De gemeten variatie in temperatuurgradiënt valt samen met de lithologische variatie in de ondergrond. Op ongeveer 140 meter diepte bevindt zich een kort interval met een toename in de temperatuurgradiënt. Dit interval komt overeen met een veenlaag, waarvan de thermische geleidbaarheid lager is dan die van klei en zand en daarmee een verklaring zou kunnen geven. Daarnaast is vindt er op basis van de (historische) stijghoogtemetingen in de peilbuis geen opwaartse stroming plaats in dit dieptebereik, die de toename in temperatuurgradiënt zou kunnen verklaren. Het geobserveerde patroon wordt niet herhaald ter hoogte van de veenlagen tussen de 230 en 250 meter diepte, maar hierin kan een verschillende samenstelling in het veen een eventuele verklaring geven. De meetlocatie in Annendaal bevindt zich in een bos, dat er in 1982 ook stond.

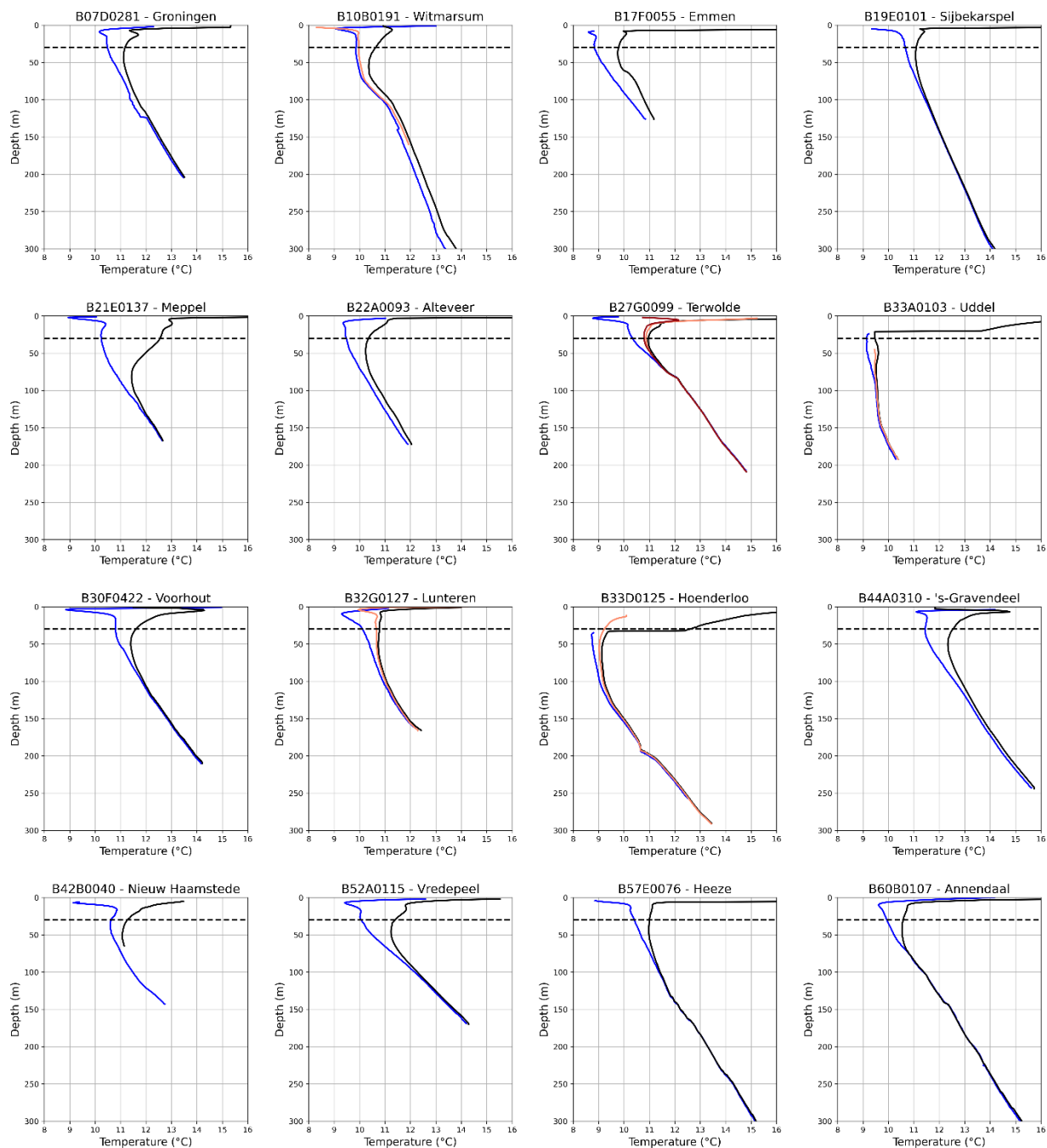


Figuur 18: (a) In 1982 en 2024 gemeten temperatuur-diepte-profiel in peilbuis B60E0107 bij Annendaal. (b) Lithologisch diepte-profiel op locatie van de peilbuis. Horizontale schaal van de verschillende lithologische lagen correleert met de relatieve korrelgrootte. Voor kleurenlegenda zie Tabel 1. (c) De temperatuursverandering van de huidige situatie in de grondwatertemperatuur t.o.v. de situatie ten tijde van het historische meetmoment. De zwarte stippellijn in plot (a) en (c) duidt de diepte van 20 meter aan.

3.2 Landelijk beeld opwarmend grondwater

De historische en recente temperatuurprofielen uit Figuur 3 tot Figuur 18 beschreven in paragraaf 3.1 zijn gezamenlijk weergegeven in Figuur 19. Voor een kwantitatieve vergelijking van de opwarming van de ondergrond die op alle meetlocaties is geobserveerd, geeft Tabel 2 de opwarming voor alle locaties op dieptes om de 10 meter, vanaf 20 meter diepte, wat is aangehouden als de grens van de seizoensinvloed.

Uit Tabel 2 volgen een aantal algemene observaties. Zo is in alle bemeten grondwater-monitoringsputten opwarming gemeten ten opzichte van de situatie tot 1983. Deze opwarming neemt af met de diepte, behalve bij B17F0055 en B33A0103 waar lokale geologische en hydrologische aspecten zorgen voor een eventuele afwijking van dit patroon. De maximaal gemeten opwarming per profiel ligt, in de huidige dataset, tussen de 0,5 en 2,4 graden. De maximale diepte van indringen van de opwarming in de ondergrond is niet voor alle meetlocaties eenduidig te bepalen. Op basis van de metingen waarbij het diepste deel van de recente en historische temperatuur-diepte-profielen binnen de meetnauwkeurigheid van elkaar liggen, kan worden geconcludeerd dat de opwarming op landelijke schaal rijkt tot een diepte van minimaal 75 en maximaal 190 meter. De mate van opwarming van de ondergrond wordt sterk beïnvloed door lokale factoren zoals landgebruik (zie sub-paragraaf 3.2.1) en hydrologisch regime (zie sub-paragraaf 3.2.2). Het is op basis van de huidige dataset dus niet mogelijk om op landelijke schaal een patroon te herkennen.



Figuur 19: Historische en recent gemeten temperatuur-diepteprofielen uit de in 2024 bemeeten set grondwatermonitoringsputten verspreid over Nederland. Op de y-as de diepte in meters t.o.v. maaiveld en op de x-as de temperatuur in °C. In zwart is het eerst geregistreerde temperatuurprofiel gegeven en in blauw het temperatuurprofiel gemeten in 2024. In roodtinten zijn temperatuurprofielen weergegeven die tussen het eerste en laatste meetmoment zijn geregistreerd. Voor de precieze jaartallen zie de locatie-specifieke figuur bij de corresponderende sectie onder paragraaf 3.1. De zwarte stippellijn correspondeert aan een diepte van 20 meter, welke in dit rapport als representatief is genomen voor de ondergrens van seizoensinvloed op de gemeten grondwatertemperatuur.

Tabel 2: Per meetlocatie het landgebruik, de hoeveelheid kwel (+) en infiltratie (-) volgens het LHM-versie 4.3 in mm/dag en temperatuurverschil (in °C) tussen het historische temperatuur-diepteprofiel van rond 1980 en dat uit 2024 vanaf 20 meter diepte (aangehouden als de grens van seizoensinvloed).

NITG nr.	B10B0191	B22A0093	B27G0099	B52A0115	B19E0101	B17F0055	B32G0127	B33D0125	B57E0076	B60B0107	B30F0422	B33A0103	B42B0040	B21E0137	B44A0310	B07D0281
Kwel/ Infiltratie	0,02	2,29	-1,28	-2,73	-0,14	-1,04	0,33	-1,21	2,07	-0,44	0,07	-1,22	-0,26	0,01	0,48	1,73
Landgebruik	Agrarisch gebied	Agrarisch gebied	Agrarisch gebied	Agrarisch gebied	Bedrijfsterrein	Bos	Bos	Bos	Bos	Bos	Bos	Droog, natuurlijk terrein	Droog, natuurlijk terrein	Park en plantsoen	Woongebied	Woongebied
20m	1.0	1.1	0.9	1.7	0.6	1.0	1.0		0.8	0.9	1.2		0.8	2.4	1.3	0.9
30m	0.8	0.9	0.6	1.3	0.4	1.0	0.7		0.6	0.6	0.8	0.3	0.6	2.3	1.1	0.7
40m	0.6	0.7	0.4	1.0	0.3	0.8	0.5	0.5	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	2.0	0.9	0.5
50m	0.4	0.6	0.2	0.8	0.3	0.7	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	1.6	0.7	0.4
60m	0.4	0.4	0.1	0.5	0.2	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	1.2	0.6	0.3
70m	0.4	0.4	0.1	0.4	0.1	0.8	0.2	0.3	0.2	0.0	0.2	0.2		0.8	0.5	0.2
80m	0.4	0.3	0.0	0.2	0.1	0.8	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1		0.6	0.4	0.2
90m	0.3	0.2	0.0	0.2	0.1	0.7	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1		0.4	0.3	0.2
100m	0.3	0.2	0.0	0.1	0.1	0.6	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1		0.3	0.3	0.3

3.2.1 Verband met landgebruik

In Tabel 2 zijn de temperatuur-diepteprofielen uit 2024 gekleurd op basis van het landgebruik op de meetlocatie. Op geen van de meetlocaties is het landgebruik veranderd sinds de historische metingen. Uit deze tabel blijkt geen duidelijke correlatie tussen het landgebruik en de relatieve verandering in de grondwatertemperatuur in de laatste 40 jaar. Zo is de hoogste opwarming gemeten in de bebouwde omgeving, maar de meetlocatie met de hoeveelheid opwarming die daarop volgt ligt in agrarisch gebied. Het lokale landgebruik is dus geen overheersende factor voor de gemeten opwarming.

3.2.2 Verband met kwel en infiltratie

Zoals besproken in paragraaf 1.2, hangt de invloed van landgebruik op de snelheid van opwarming in de ondergrondtemperatuur nauw samen met de invloed van verschillen in kwel- en infiltratie. In Tabel 2 zijn de kwel- en infiltratiewaarden opgenomen uit het LHM-versie 4.3 voor de meetlocaties, gekleurd naar de schaal de kwel- en infiltratiekaart in het LHM. Hieruit volgt geen duidelijke correlatie tussen de mate van opwarming in het grondwater en de gemiddelde infiltratie van oppervlaktewater op een bepaalde locatie. Zo is op meetlocaties Alteveer (B22A0039) en Vredepeel (B52A0115) relatief veel opwarming gemeten (respectievelijk 1,1 en 1,7 °C onder de grens van seizoensinvloed), maar ligt meetlocatie Alteveer in een gebied met veel kwel (2,29 mm/dag), terwijl in Vredepeel juist veel infiltratie plaatsvindt (-2,73 mm/dag). Op de Veluwe, een gebied in oost Nederland met een relatief hoge mate van infiltratie liggen meetlocaties Uddel (B33A0103) en Hoenderloo (B33D0125) met infiltratiewaarden van respectievelijk -1,22 en -1,21 mm/dag. De gemeten opwarming lijkt hier echter minder te zijn ten opzichte van de andere metingen. Wel ligt de grondwaterspiegel in dit gebied significant lager dan op andere plekken, wat een vertekend beeld geeft in de regionale situatie.

4 Discussie meetresultaten

4.1 Mogelijke bias in meetresultaten

Voor het onderzoek uit 2024 zijn putten geselecteerd uit de dataset van Van Dalfsen (1983) waarbij gekeken is naar de maximale diepte, het nog in gebruik zijn voor grondwaterstandsmetingen en een spreiding over het land (Korevaar & Zaadnoordijk, 2024). Hierbij is niet gekeken naar representatie van grondwatersystemen en ook niet getoetst of de putten een goede afspiegeling geven van de ondergrondtemperaturen.

Bovendien zijn artesische putten uitgesloten vanwege de maatregelen die nodig zijn tijdens de meting om stroming in de peilbuis te voorkomen. Zonder maatregelen zoals het plaatsen van een ophoogbuis op de peilbuis, stroomt een artesische put over als resultaat van het drukverschil tussen de filterdiepte en de buitenlucht. De hoge druk bij het filter is ook de drijvende kracht voor opwaartse stroming in de ondergrond. Het uitsluiten van artesische putten creëert mogelijk een bias doordat locaties met grote opwaartse stroming uitgesloten zijn (Fokker e.a., 2025).

De resultaten geven dus alleen een kwalitatief beeld van opgetreden veranderingen en kunnen niet gebruikt worden voor kwantitatieve uitspraken over de verandering van de ondergrondtemperatuur in het grondwaterdomein in Nederland.

4.2 Samenhang van bepalende factoren

Het is lastig om de effecten van verschillende factoren die de grondwatertemperatuur beïnvloeden, zoals landgebruik en lokale grondwaterstroming, van elkaar te scheiden bij de interpretatie van individuele temperatuur-diepteprofielen. De meetlocatie Meppel is hier een goed voorbeeld van. De bemeten grondwatermonitorsput ligt hier in stedelijk gebied, waardoor het stedelijk hitte-eiland-effect een mogelijke verklaring zou kunnen zijn voor de hoogst gemeten opwarming van alle meetpunten. Een andere verklaring zou echter kunnen worden gegeven door de nabijgelegen grondwateronttrekkingen die grondwaterstroming induceren en daarmee het warmer grondwater van grotere dieptes aantrekken. Een breder regionaal of nationaal temperatuurbeeld, met trends in ondergrondtemperatuur, zou hierbij beter inzicht kunnen geven. Om dit beeld te vormen en daarbij het effect van klimaatverandering op de ondergrondtemperatuur verder te kwantificeren, zijn meer metingen nodig. Zo zou een bijgewerkte versie gemaakt kunnen worden van de isothermenkaarten van Van Dalfsen (1983), die gebaseerd zijn op 577 temperatuur-diepteprofielen.

Dit zou een kwantitatieve bepaling mogelijk maken van de opwarming in de ondergrond op landelijke schaal.

Visser (2024) heeft een analyse uitgevoerd voor het dieptebereik tussen 20 en 35 meter. Hieruit blijkt een significante toename van de grondwatertemperatuur tussen 1991 en 2011. In Noord- en Zuid-Holland vertoont de grondwatertemperatuur veelal geen statistisch significante trend in die periode. Visser koppelt de ruimtelijke variatie in grondwatertemperatuur aan verschillende factoren per regio in Nederland. Zo lijkt de temperatuurstijging in het westen van Nederland vooral toe te schrijven aan stedelijk landgebruik, terwijl deze in het zuidoosten voornamelijk wordt veroorzaakt door een lagere hoeveelheid neerslag en daarmee minder infiltratie van relatief koud oppervlaktewater in de winter. Gezien de gemeten opwarming in de temperatuur-diepteprofielen uit 2024 tot ten minste 75 meter diepte doordringt, zouden vergelijkbare kaarten voor diepere intervallen een beter inzicht kunnen geven in de samenhang van bepalende factoren voor de ondergrondtemperatuur. Hiermee zou het beeld van de opwarming en daarmee de huidige temperatuur verfijnd kunnen worden. Dat is van belang voor processen en activiteiten die door de grondwatertemperatuur worden beïnvloed en om eventueel maatregelen te nemen als (verdere) opwarming ongewenst is of om de opwarming in onze leefomgeving integraal aan te pakken. Visser (2024) benadrukt dan ook het belang van meer data in het dieptebereik onder de 35 meter, om een beter beeld te krijgen van het belang van een consistente, periodieke monitoring van de grondwatertemperatuur.

4.3 Gebruik van resultaten voor behoud en bescherming van grondwater voor drinkwatervoorziening

Voor duurzaam grondwaterbeheer is de grondwateraanvulling – en daar mee samenhangend verticale grondwaterstroming— van belang. Omdat het hydrologische regime het verloop van temperatuur-diepteprofielen beïnvloedt, kan temperatuurdataben ook gebruikt worden om het lokale hydrologische regime in kaart te brengen (Bense e.a., 2017, 2020, 2022). Zo hebben Bense e.a. (2020), op basis van herhaalde metingen van historische temperatuur-diepteprofielen en een eenvoudig hydrologisch model, de verticale grondwaterstroming gekwantificeerd. Met een grootschaliger meetcampagne op locaties die eerder ook zijn beme-ten zouden hiermee bijvoorbeeld risicogebieden voor beschikbare drinkwaterreserves in kaart kunnen worden gebracht. Ook wordt dit principe gebruikt in Bense (2025a), waarbij ge-meten temperatuur-diepteprofielen in het mijnbouwgebied en de daaruit afgeleide verticale grondwaterflux, inzicht geven in de hydraulische werking en doorlatendheid van lokale schei-dende lagen en breuken.

Naast dat informatie over grondwatertemperaturen gebruikt kan worden om de grondwaterreserves te monitoren, heeft het ook een toepassing in het waarborgen van de kwaliteit van drinkwater gewonnen uit grondwater, zoals uitgelegd in sectie 1.1.1. Echter, slechts 18 landen hebben een temperatuurstandaard opgenomen in de richtlijnen en regels voor drinkwaterkwaliteit. Daarbij wordt in geen enkel land een indicatie gegeven van eventuele gevolgen voor het overschrijden van deze richtlijnen (WHO, 2021). In 29 landen wordt een drempelwaarde voor temperatuur (22 °C en/of 37 °C) gelinkt aan de microbiologische activiteit, waarbij gestreefd wordt naar een minimale hoeveelheid aan microbiologische bestanddelen (WHO, 2021). In de kwaliteitseisen voor drinkwater in Nederland geldt, naast een lijst fysische, chemische en microbiologische parameters, een maximumtemperatuur van 40 °C (Besluit kwaliteit drinkwater BES). Op basis van de huidige gemeten opwarming in het grondwater in de afgelopen 45 jaar, verwachten we nog geen significant effect op de drinkwaterkwaliteit. Ook omdat de bodemtemperatuur rondom de

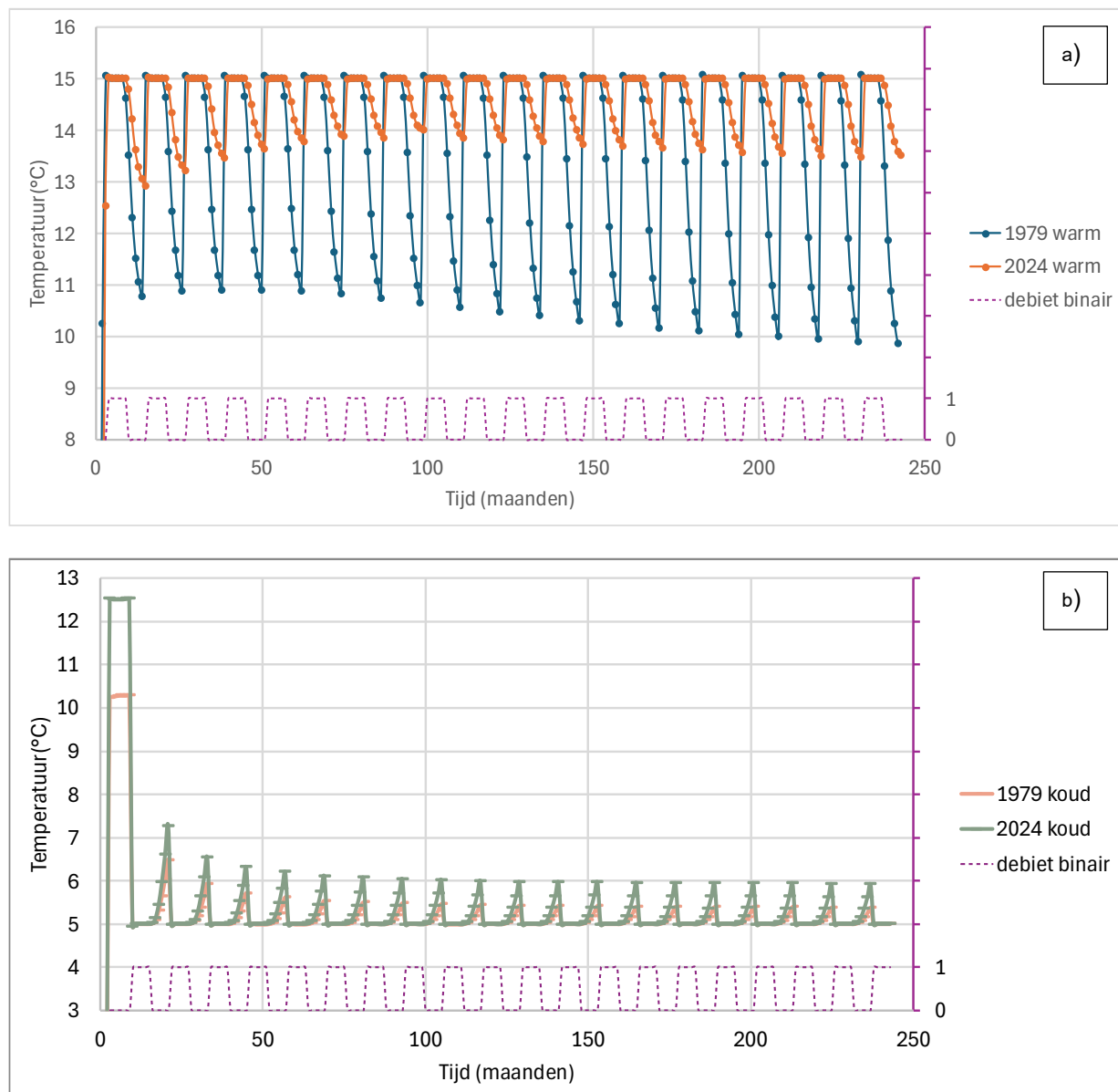
distributieleidingen hoofdzakelijk bepalend is voor de drinkwatertemperatuur tijdens distributie en de distributieleidingen op diepte liggen die onderhevig is aan seizoens- en dag-nacht temperatuurfluctuaties.

4.4 Gebruik van resultaten voor bepalen geothermisch potentieel

Om een inschatting te maken van de potentiële winbare aardwarmte bij de aanleg van een bodemenergiesysteem, zoals geothermische doubletten/tripletten voor de diepe ondergrond en open en gesloten bodemenergiesystemen voor de ondiepe ondergrond, wordt onder andere een inschatting gemaakt van de initiële ondergrondtemperatuur. Zo ontwikkelt en publiceert TNO verschillende temperatuurmodellen voor de ondergrond, representatief voor verschillende diepte-bereiken. Als uitgangspunt voor de kalibratie van deze modellen wordt meetdata gebruikt. Voor het meest recente ondiepe temperatuurmodel, ontwikkeld in het kader van het WINDOW-project (Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag, TKI Energie), is voor kalibratie in het ondiepe bereik de dataset met historische temperatuur-diepteprofielen uit de periode rond 1980 gebruikt (Dinkelmann e.a., 2020). Echter, de recente meetcampagne laat zien dat deze kalibratiedataset verouderd is en zeker niet overal representatief voor het huidige thermische regime in de ondiepe ondergrond. Met een indringingsdiepte van de gemeten opwarming, in ordegrootte van 100 meter, heeft dit geen effect op het potentieel van diepe geothermische systemen, maar wordt de prestatie(voorspelling) van ondiepe bodemenergiesystemen wel beïnvloed.

Hoe sterk de invloed van de nu gemeten ondergrondse opwarming is op het geothermisch potentieel is onderzocht met simulaties van een warmte-koude opslag (WKO) en voor een verticale bodemwarmtewisselaar (VBWW). Toelichting op het simulatieprogramma en de simulatie-invoer zijn opgenomen in Bijlage C voor de WKO en voor de VBWW in Bijlage D. Hierbij is de prestatie berekend in twee simulaties, met een identiek systeemontwerp, maar met een verschil in initiële ondergrondtemperatuur. Daartoe zijn scenario's doorgerekend met een initiële ondergrondtemperatuur zoals gedefinieerd door de gemeten temperatuur-diepteprofielen op de meetlocatie in Meppel in 1979 en 2024.

Voor een indicatie van de invloed op een WKO, is gekeken naar een WKO-doublet tot een diepte van 80 meter, met een bodemopbouw zoals representatief voor de binnenstad in Utrecht (Hockin e.a., 2024). In de simulaties is een ongebalanceerd gebruiksprofiel opgelegd (in het debiet) met een hogere warmte- dan koudevraag. Hoewel verwacht wordt dat deze balans in de toekomst verandert, is een hogere warmtevraag t.o.v. koudevraag op dit moment nog representatief voor het warmtevraagprofiel in een gemiddeld huishouden (Rovers e.a., 2021, 2022; Senel & Kruit, 2023). Voor een injectietemperatuur van 15 graden in de warme bron en van 5 graden in de koude bron, is berekend hoe de extractietemperatuur van de twee bronnen verandert over een periode van 10 jaar. De resultaten (Figuur 20) laten zien hoe de hogere initiële ondergrondtemperatuur in 2024 de warmteverliezen tijdens de productiefase in de warme bron sterk vermindert, met een productietemperatuur van enkele graden hoger t.o.v. de situatie in 1979. Het omgekeerde geldt voor de productiefase in de koude bron, waarbij de productietemperatuur sneller stijgt in het scenario van 2024 t.o.v. de situatie in 1979. De verschillen in de productietemperatuur zijn hier kleiner t.o.v. de situatie in de warme bron, zoals volgt uit het ongebalanceerde gebruiksprofiel met een lagere koudevraag en daarom een kleiner debiet tijdens productie uit de koude bron.

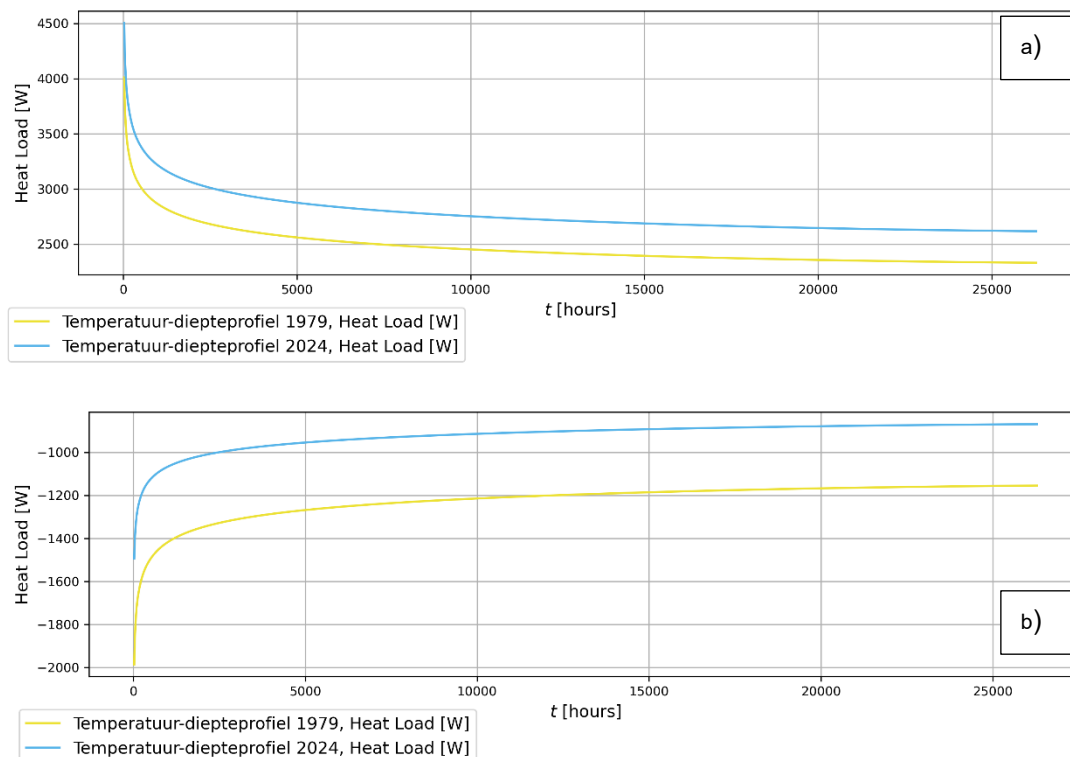


Figuur 20: Productie-/injectietemperatuur in de warme (a) en koude (b) bron van een WKO-systeem in de binnenstad van Utrecht voor de eerste 10 jaar van gebruik. De injectie- en productiefases in beide bronnen worden gegeven in de curve van het debiet, waarbij de injectiefase wordt weergegeven met een waarde van 1 en de productiefase met een waarde van 0.

Voor de prestatieberekeningen van een VBWW is een systeem gesimuleerd met een enkele U-lus tot een diepte van 150 meter, voor een locatie met een homogene bodemopbouw van zand. Om de jaargemiddelde vermogensopbrengst te berekenen tijdens de eerste drie jaar van systeemoperatie is een vaste aanvoertemperatuur gehanteerd van 3 °C en 15 °C, voor het simuleren van respectievelijk warmte- of koudevraag en conform de uiterste vloeistoftemperatuurwaarden van een gangbare bodemwarmtepomp. Hierbij is een vast debiet aangehouden van 0,45 l/s.

De verschillen in het berekende jaargemiddelde vermogen (Figuur 21) laten duidelijk zien hoe de opwarming in de ondergrond de potentie van een dergelijk systeem in de afgelopen 45 jaar heeft beïnvloed.

Voor de gesimuleerde scenario's kan de ondergrond, in het geval van een constante warmte-onttrekking, op dit moment ongeveer 11% meer energie leveren dan 45 jaar geleden. In het geval van een constante koude-onttrekking kan de ondergrond op dit moment juist zo'n 24% minder energie leveren dan 45 jaar geleden. In deze simulaties komt de paradox tussen de toename in potentie van bodemenergie voor gebouwverwarming als gevolg van de opwarmende ondergrond en de verwachte toename in koudevraag als gevolg van klimaatverandering dus duidelijk naar voren.



Figuur 21: Jaargemiddelde vermogensopbrengst (Heat Load [W]), tijdens de eerste drie jaar van gebruik in tijdstappen van een uur (t [hours]), voor een verticale bodemwarmtewisselaar tot 150 meter diepte. Het systeemontwerp in de twee simulaties is identiek, maar de initiële ondergrondtemperatuur verschilt en is gedefinieerd door het temperatuur-diepte-profiel op de meetlocatie van Meppel voor het jaar 1979 en 2024. a) Resultaten voor een scenario met een constante warmte-onttrekking bij een bodemzijdige aanvoertemperatuur van 3 °C. b) Resultaten voor een scenario met een constante koude-onttrekking bij een bodemzijdige aanvoertemperatuur van 15 °C.

De simulaties van beide typen bodemenergiesystemen illustreren de potentiële impact van ondergrondse opwarming op de prestatie van dergelijke systemen. Ondergrondse opwarming zorgt voor een verandering in de randvoorwaarden voor voorspellende berekeningen aan de systeemprestatie, die belangrijk zijn voor de financiële onderbouwing en evaluatie van de duurzaamheid.

De opwarming van de ondergrond in Meppel in de afgelopen 40 jaar heeft dus een invloed van zo'n 10% tot 25 % op het rendement van een Verticale Bodemwarmtewisselaar en een Warmte-Koude Opslag. Een actueel ondiep temperatuurmodel draagt dus bij aan betere ontwerpen voor dergelijke systemen en aan betere voorspellingen van het potentieel van deze duurzame energiebronnen.

4.5 Gebruik van resultaten voor parametrisatie

Door de afhankelijkheid van verticale temperatuurprofielen van verticale grondwaterstroming, kunnen deze gebruikt worden om verticale grondwaterfluxen te bepalen, speciaal die door scheidende lagen). Met informatie over het stijghoogteverschil over zo'n scheidende laag kan de weerstand van de scheidende laag bepaald worden (Bense e.a., 2022; Bense, 2025a). Het resultaat is onafhankelijk van de huidige hydraulische-parametrisatiemethode van REGIS II (Hummelman e.a., 2019). REGIS II is het hydrogeologisch model van de ondergrond dat is opgenomen in de Basisregistratie Ondergrond (BRO) en de basis vormt voor de meeste grondwatermodellen in Nederland. Het geeft een onderverdeling van de ondergrond in hydrogeologische eenheden met doorlatendheden en onzekerheden. Voor de doorlatendheden worden waarden uit laboratoriummetingen en literatuur gebruikt. Een gedetailleerd temperatuurmodel kan dus ook gebruikt worden om de hydraulische parametrisatie van de ondergrondmodellen te verbeteren.

Naast de bestaande hydraulische parametrisatie is er ook behoefte om de thermische eigenschappen van de ondergrond te karteren. Deze kartering kan het best getoetst worden aan het verloop van de temperatuur in ruimte en tijd, waarbij ook informatie over grondwaterstroming nodig is. De grondwaterstromingsinformatie zou aan het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) van het Nederlands Hydrologisch Instrumentarium (<https://www.nhi.nu>) ontleend kunnen worden. Aangezien de relevante transportprocessen sterk verwant zijn aan de processen van grondwaterkwaliteitsmodellering, zou het gebruik van de waterkwaliteitsversie van het LHM ook nog meerwaarde voor het LHM kunnen hebben, doordat uit de temperatuurvalidatie onvolkomenheden in de grondwaterstroming gevonden kunnen worden.

4.6 Aandacht voor andere dieptes en resoluties

Nu is geen aandacht gegeven aan ondergrondtemperaturen binnen het dieptebereik van seizoensinvloeden. Ook binnen dat bereik zijn veranderingen opgetreden die consequenties kunnen hebben, bijvoorbeeld voor leidingen in de ondergrond.

Vanwege dit belang is het zinvol om ook naar deze zone te kijken en inzicht in deze ondiepe-ondergrondtemperatuur te geven, bijvoorbeeld door de seizoensfluctuatie weer te geven met een gemiddelde hoogste temperatuur en een gemiddelde laagste temperatuur (analoog aan de GxG – gemiddelde hoogste en laagste grondwaterstanden uit het BRO-model *grondwaterspiegeldiepte*).

Bovendien kan data van de temperatuur in de bovenste meters via bepaling van de vertraging van de temperatuurfluctuatie ten opzichte van de lucht of het oppervlaktewater inzicht geven in grote lokale grondwaterstroming, zoals die bijvoorbeeld optreedt bij dijken of de infiltratie van het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK). Het waterbezwaar in de omringende polders bij het ARK is een punt van zorg en de stroming bij dijken is van belang voor het beoordelen van de veiligheid.

We hebben nu alleen gekeken naar veranderingen ten opzichte van Van Dalfsen (1983). De nu beschouwde meetpunten geven veel te weinig resolutie om een landsdekkend beeld van de veranderingen te geven. Er is nu niet beoordeeld in hoeverre de resolutie van het onderzoek van Van Dalfsen voldoet voor de huidige vraagstukken. Naast de resolutie is wellicht ook de verdeling van de temperatuurinformatie over verschillende typen landgebruik daarvoor niet optimaal. Voor ondergrondse energiesystemen ligt de focus immers op (nieuw te ontwikkelen) stedelijk gebied. Afhankelijk van de gewenste diepte zijn meer of minder

nieuw aangelegde monitoringsputten beschikbaar om de resolutie te vergroten. Ook kunnen andere gegevensbronnen gebruikt worden zoals de temperatuur die wordt gemeten bij het nemen van een watermonster en beschikbaar is via de Basisregistratie Ondergrond (registratieobject GAR, grondwatersamenstellingsonderzoek, in combinatie met GMW, grondwatermonitoringsput). Ook biedt de temperatuurmonitoring van ondergrondse energiesystemen kansen. Meer en meer putten worden uitgerust met glasvezelkabels waarmee continu temperatuurprofielen kunnen worden gemeten (DTS, *distributed temperature sensing*). Dit maakt ze bij uitstek geschikt is om temperatuurveranderingen te meten.

5 Conclusies en aanbevelingen

De temperatuur in de ondiepe (tot 500 meter) ondergrond speelt een belangrijke rol in de kwaliteit van grondwater, het functioneren van grondwaterafhankelijke ecosystemen en de potentie van bodemenergiesystemen. De herhaalmetingen uit 2024 laten op alle meetlocaties opwarming van het grondwater zien sinds de historische metingen van temperatuur-diepteprofielen van rond 1980. De mate van opwarming varieert tussen de verschillende meetlocaties, van enkele tienden graden tot enkele graden, met een indringingsdiepte van minimaal 75 meter en maximaal 130 meter. Op basis van de huidige dataset is het effect van de verschillende factoren die een rol spelen bij de mate van opwarming, zoals landgebruik, grondwaterstroming en lithologie, niet te onderscheiden. Wel tonen we op basis van de huidige analyse aan dat de orde van grootte van de gemeten opwarming het geothermisch potentieel in belangrijke mate kan veranderen. Ook bespreken we mogelijke risico's voor grondwaterreserves voor drinkwaterwinning.

De huidige analyse draagt bij aan het actualiseren van het beeld van de ondergrondtemperatuur zoals gemeten rond 1980. De huidige dataset geeft echter een fragmentarisch beeld van het ondergrondse temperatuurregime in Nederland. Op basis van de lessen die wij hebben getrokken uit voorbereiding, uitvoer en analyse van de huidige set metingen, doen wij hier voor enkele aanbevelingen.

Omdat rond 1980 in veel meer waarnemingsputten een temperatuur-diepteprofiel is gemeten dan de 16 in 2024, is een grootschaliger opgezette meetcampagne een logische optie om de opwarming van de ondergrond beter in beeld te brengen. Deze meetcampagne is nodig voor een regionale of landelijke karakterisatie van de ondergrondtemperatuur, die inzicht geeft in de omvang van de effecten en risico's van de huidige mate van opwarming. Omdat de verwachting is dat deze effecten in de toekomst zullen toenemen, onder de voorspelde klimaatverandering en ontwikkeling van bijvoorbeeld bodemenergie, is er noodzaak om de omvang van de risico's op korte termijn in kaart te brengen. Daarnaast zijn deze metingen nodig voor het verbeteren van de temperatuurmodellen die gebruikt worden voor potentievoorspellingen van geothermie- en bodemenergiesystemen, welke momenteel nog met name gericht zijn op de diepe ondergrond en ondiepe processen niet of onvoldoende meenemen.

In dat kader bevelen we aan om een landelijke selectie te maken van putten die technisch gezien te bemeten zijn en waarin nog geen historische temperatuur-diepteprofielen beschikbaar zijn. Daarbij moeten de gewenste ruimtelijke resolutie van de metingen worden bepaald en of ook seizoenfluctuaties van de temperatuur in het bovenste deel van de ondergrond gekarteerd moeten worden. Hierbij is het aan te bevelen om ook gebruik te maken van andere bestaande temperatuurbedata (bijvoorbeeld van sensoren voor stijghoogte in grondwatermonitoringsputten, temperatuur gemeten bij het nemen van monsters voor grondwaterkwaliteitsbepalingen of tijdreeksen van temperatuur-diepteprofielen uit *Distributed Temperature Sensing* (DTS) kabels die aangelegd zijn voor monitoring van geothermie- en bodemenergiesystemen. Op basis van een grootschaliger beeld van het huidige temperatuurregime in de ondiepe ondergrond en de verandering ten opzichte van eerdere metingen kan dan worden bepaald welke frequentie van herhaling of aanvulling van temperatuurmetingen gewenst is.

6 Ondertekening

Auteur

ValidSigned door Zanne Korevaar
op 21-07-2026

Z.E.R. Korevaar MSc
Scientist

Tweede lezer

ValidSigned door Hans Veldkamp
op 21-07-2026

Drs.J.G. Veldkamp
Geoscientist geothermal energy

Autorisatie vrijgave

ValidSigned door Yvonne Schavemaker
op 20-07-2026

Y.A. Schavemaker MSc
Research Manager

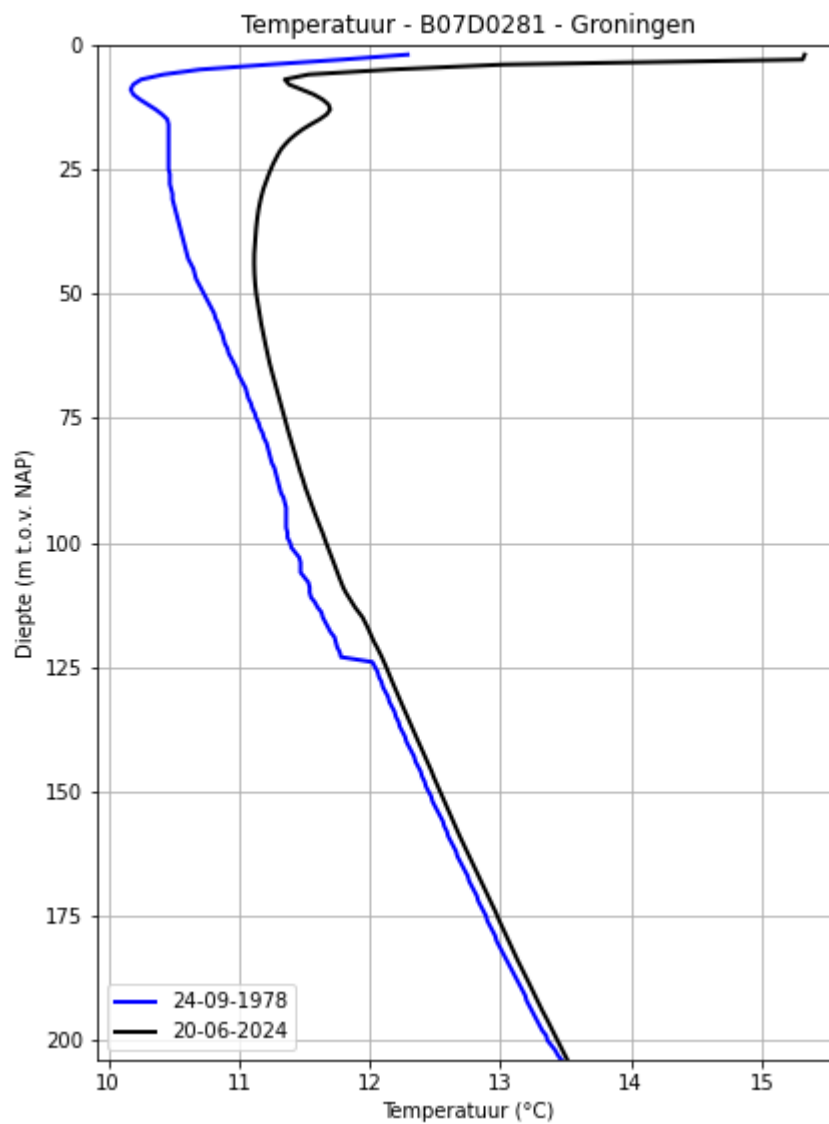
7 Referenties

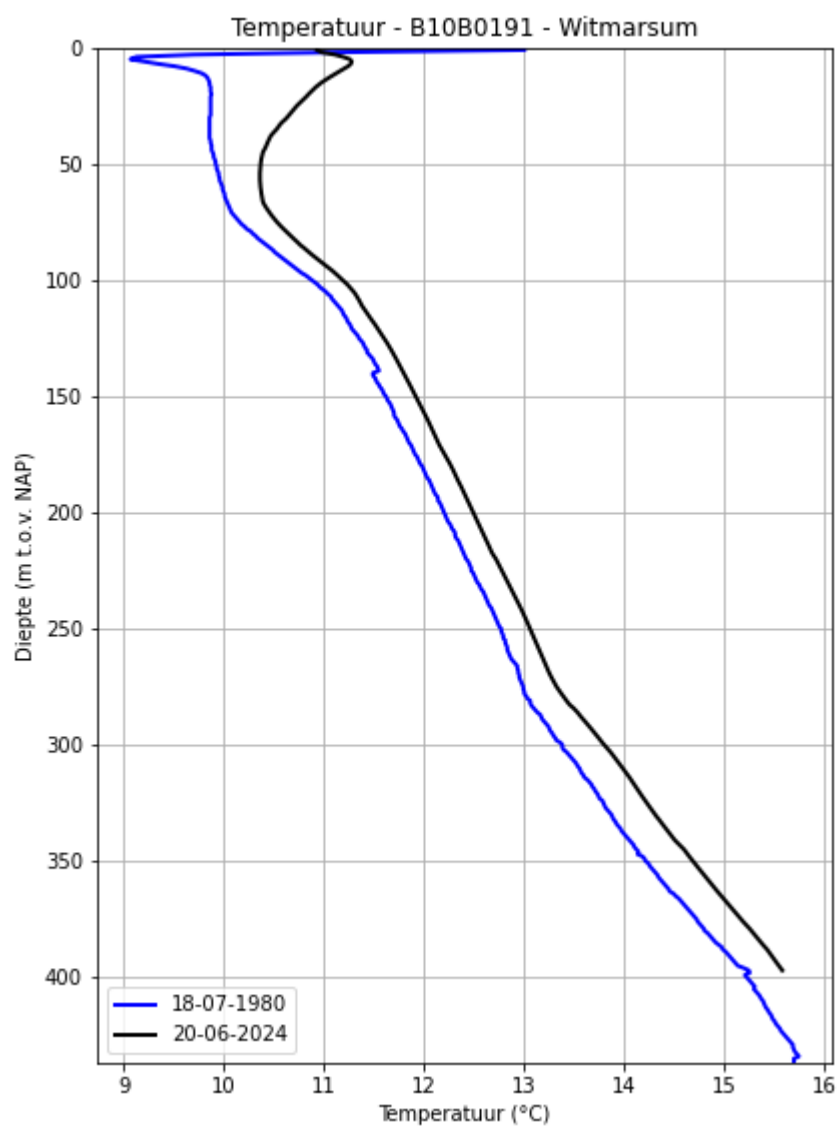
- A Global Overview of National Regulations and Standards for Drinking-Water Quality* (2nd ed). (2022). World Health Organization. Licence: CC BYNC-SA 3.0 IGO.
- Agudelo-Vera, C., Blokker, M., & Quintiliani, C. (2020). *Maatregelen tegen ongewenste opwarming van het drinkwater in het leidingnet* (BTO 2020.015). KWR.
- Anderson, M. P. (2005). Heat as a Ground Water Tracer. *Groundwater*, 43(6), 951–968. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>
- Beltrami, H., & Kellman, L. (2003). An examination of short- and long-term air–ground temperature coupling. *Global and Planetary Change*, 38(3–4), 291–303. [https://doi.org/10.1016/s0921-8181\(03\)00112-7](https://doi.org/10.1016/s0921-8181(03)00112-7)
- Bense, V. F., & Kooi, H. (2004). Temporal and spatial variations of shallow subsurface temperature as a record of lateral variations in groundwater flow. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B4). <https://doi.org/10.1029/2003JB002782>
- Bense, V. F., Kruijsen, T., van der Ploeg, M. P., & Kurylyk, B. L. (2022). Inferring Aquitard Hydraulic Conductivity Using Transient Temperature-Depth Profiles Impacted by Ground Surface Warming. *Water Resources Research*, 58(5), e2021WR030586. <https://doi.org/10.1029/2021WR030586>
- 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(24), 12,244–12,253. <https://doi.org/10.1002/2017GL076015>
- Bense, V. F., Kurylyk, B. L., de Bruin, J. G. H., & Visser, P. (2020). Repeated Subsurface Thermal Profiling to Reveal Temporal Variability in Deep Groundwater Flow Conditions. *Water Resources Research*, 56(6), e2019WR026913. <https://doi.org/10.1029/2019WR026913>
- Bense, Victor. F. (2025a). *Hydraulische doorlatenheid van de eerste kleiige eenheid van de Waalre Formatie (Wak1) en andere scheidende lagen in de ondergrond van Noord-Brabant op grond van temperatuur-diepte metingen in peilbuizen*. In opdracht van: TNO-GDN, Bense Thermohydrologie, Wageningen.
- Bense, Victor. F. (2025b). *Thermohydrogeology former coal mining area South-Limburg*. In opdracht van: TNO-GDN, Bense Thermohydrologie, Wageningen.
- Bense, Victor. F., Kurylyk, B. L., van Daal, J., van der Ploeg, M. J., & Carey, S. K. (2017). Interpreting Repeated Temperature-Depth Profiles for Groundwater Flow. *Water Resources Research*, 53(10), 8639–8647. <https://doi.org/10.1002/2017WR021496>
- Benz, S. A., Bayer, P., & Blum, P. (2017). Global patterns of shallow groundwater temperatures. *Environmental Research Letters*, 12(3), 034005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5fb0>
- Benz, S. A., Irvine, D. J., Rau, G. C., Bayer, P., Menberg, K., Blum, P., Jamieson, R. C., Griebler, C., & Kurylyk, B. L. (2024). Global groundwater warming due to climate change. *Nature Geoscience*, 17(6), 545–551. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01453-x>
- Bestand Bodemgebruik 2017 (BBG2017) Productbeschrijving*. (2017). CBS.
- 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. <https://doi.org/10.1029/WR001i002p00325>
- Cogswell, C., & Heiss, J. W. (2021). Climate and Seasonal Temperature Controls on Biogeochemical Transformations in Unconfined Coastal Aquifers. *Journal of Geophysical*

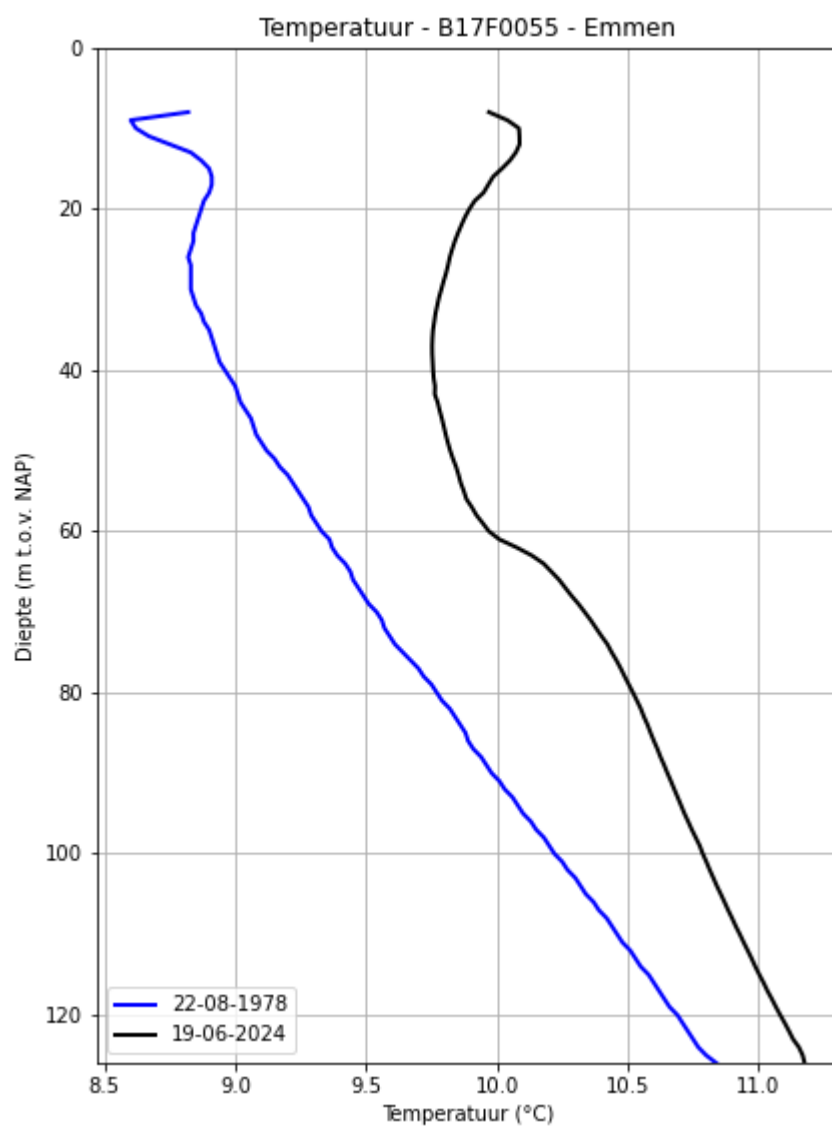
- Research: *Biogeosciences*, 126(12), e2021JG006605.
<https://doi.org/10.1029/2021JG006605>
- Dinkelman, D., Bergen, F., & Veldkamp, H. (2020). *B2 Potentieel en toepassingscondities—Geologisch model, temperatuurmodel voor de ondiepe ondergrond en potentieelkaarten voor HTO in Nederland*.
- Evers, N. (2007). *Getalswaarden bij de Goede ecologische toestand voor oppervlaktewater voor de algemene fysischchemische kwaliteitselementen temperatuur, zuurgraad, doorzicht, zoutgehalte en zuurstof* (2007–01). STOWA.
- Fokker, E.B., Korevaar, Z.E.R., & Bense, V.F. (2025) *Temperatuurmetingen in het Nederlandse grondwater - Herhaalmetingen voor 16 temperatuur-diepteprofielen uit de periode 1976-1982*. TNO 2025 R11314, TNO Geologische Dienst Nederland, Utrecht.
- Florea, L. J., Hart, D., Tinjum, J., & Choi, C. (2017). Potential Impacts to Groundwater from Ground-Coupled Geothermal Heat Pumps in District Scale. *Groundwater*, 55(1), 8–9.
<https://doi.org/10.1111/gwat.12484>
- Gies, C., Struijk, M., Békési, E., Veldkamp, H., & van Wees, J.-D. (2021). An effective method for paleo-temperature correction of 3D thermal models: A demonstration based on high resolution datasets in the Netherlands. *Global and Planetary Change*, 199, 103445.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103445>
- Griebler, C., Brielmann, H., Haberer, C. M., Kaschuba, S., Kellermann, C., Stumpp, C., Hegler, F., Kuntz, D., Walker-Hertkorn, S., & Lueders, T. (2016). Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes. *Environmental Earth Sciences*, 75(20). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6207-z>
- Hockin, C.V., Koenen, M., Hoving, A., Korevaar, Z.E.R., Dinkelman, D., Griffioen, J., Fokker, E.B., Bus, S.A.R., & Bloemendal, M. (2024) *Groundwater Quality and Energy Transition (SMO-grondwater 2024)*. TNO.
- Janssen, G., Walsum, P. van, Vermeulen, P., Meeusen, R., Pouwels, J., Prinsen, G., Amerika, I., Mes, E., Delsman, J., Kok, H., & Kroon, T. (2023). *Veranderingsrapportage LHM 4.3*.
- Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H., & Mauri, E. (2012). The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.009>
- 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(1–2), 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.015>
- Korevaar, Z., & Zaadnoordijk, W. J. (2024). *Grondwater-temperatuurprofielen* (TNO 2024 R10070).
- Peters, E., Vrijlandt, M., & van Wees, J. D. (2023). *Comparison of reservoir simulator DC3D (based on ROSIM input files) to other simulators* (No. TNO 2023 R12123). TNO.
https://www.nlog.nl/sites/default/files/2025-06/tno_2023_r12123_comparison_of_reservoir_simulators_dc3d_based_on_rosim_input_files_external.pdf
- Rasmussen, J. J., Baattrup-Pedersen, A., Riis, T., & Friberg, N. (2011). Stream ecosystem properties and processes along a temperature gradient. *Aquatic Ecology*, 45(2), 231–242.
<https://doi.org/10.1007/s10452-010-9349-1>
- Rovers, V., Menkveld, M., van de Brugge, R., Brolsma, R., & Pothof, I. (2022). *Kennisagenda toekomstige koudevraag woningen* (11207754-000-HYE-0002). TNO, Deltares.
- Rovers, V., Niessink, R., Loonen, P., van der Wal, A., & Matthijsen, E. (2021). *Energievraag van ruimtekoeling in woningen* (TNO 2021 P12657). TNO.
- Schincariol, R. A., & Raymond, J. (2023). Borehole Heat Exchangers—Addressing the Application Gap with Groundwater Science. *Groundwater*, 61(2), 163–170.
<https://doi.org/10.1111/gwat.13100>

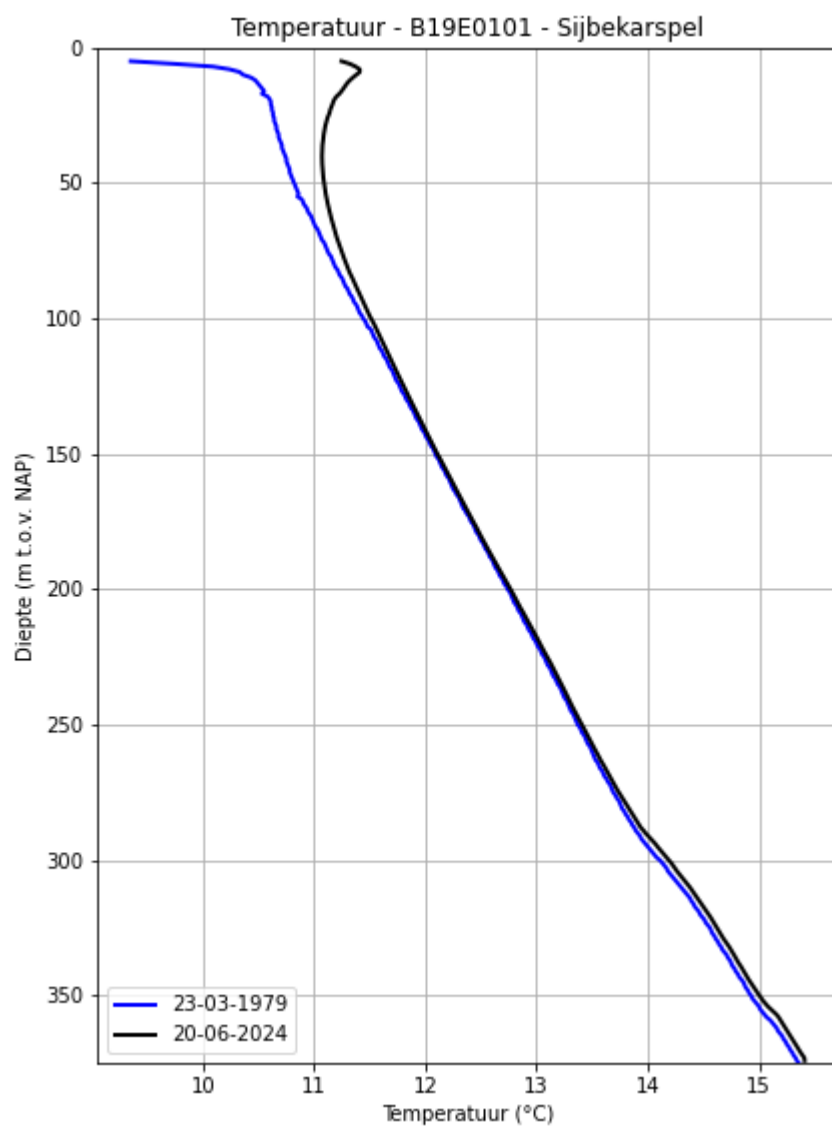
- Schülting, L., Feld, C. K., & Graf, W. (2016). Effects of hydro- and thermopeaking on benthic macroinvertebrate drift. *Sci Total Environ.*
- Senel, S., & Kruit, K. (2023). *Kansen voor warmtekoudenetten* (23.220429.067). CE Delft.
- Taylor, C. A., & Stefan, H. G. (2009). Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. *Journal of Hydrology*, 375(3–4), 601–612. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.009>
- Van Dalfsen, W. van. (1979). *Geothermal investigation in shallow observation wells*.
- Van Dalfsen, W. (1980). *The Shallow Subsurface Temperature Field in The Netherlands*. TNO.
- Van Dalfsen, W. (1981). *The Shallow Subsurface Temperature Field in The Netherlands*. TNO.
- Van Dalfsen, W. (1983). *Het Ondiepe Temperatuurveld in Nederland (volgens temperatuurmetingen tot 1984)* (OS 83-31). TNO.
- Van Der Wielen, P. (2020). *Invloed van temperatuur op groei van opportunistische ziekteverwekkers in drinkwater* (BTO 2020.036). KWR.
- Vannote, R., & Sweeney, B. (1980). Geographic Analysis of Thermal Equilibria: A Conceptual Model for Evaluating the Effect of Natural and Modified Thermal Regimes on Aquatic Insect Communities. *The American Naturalist*, 115(5). https://www.ephemeroptera-galactica.com/pubs/pub_v/pubvannoter1980p667.pdf
- Visser, P. W. (2024). *Groundwater temperatures, their spatiotemporal distribution and drivers of groundwater temperature evolution in the Netherlands* [Delft University of Technology]. <https://doi.org/10.4233/UUID:F27CBA52-FC9C-49BF-99A4-8DB7A945FEFC>
- Visser, P. W., Kooi, H., Bense, V., & Boerma, E. (2020). Impacts of progressive urban expansion on subsurface temperatures in the city of Amsterdam (The Netherlands). *Hydrogeology Journal*, 28(5), 1755–1772. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02150-w>
- Vosteen, H.-D., & Schellschmidt, R. (2003). Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(9–11), 499–509. [https://doi.org/10.1016/s1474-7065\(03\)00069-x](https://doi.org/10.1016/s1474-7065(03)00069-x)

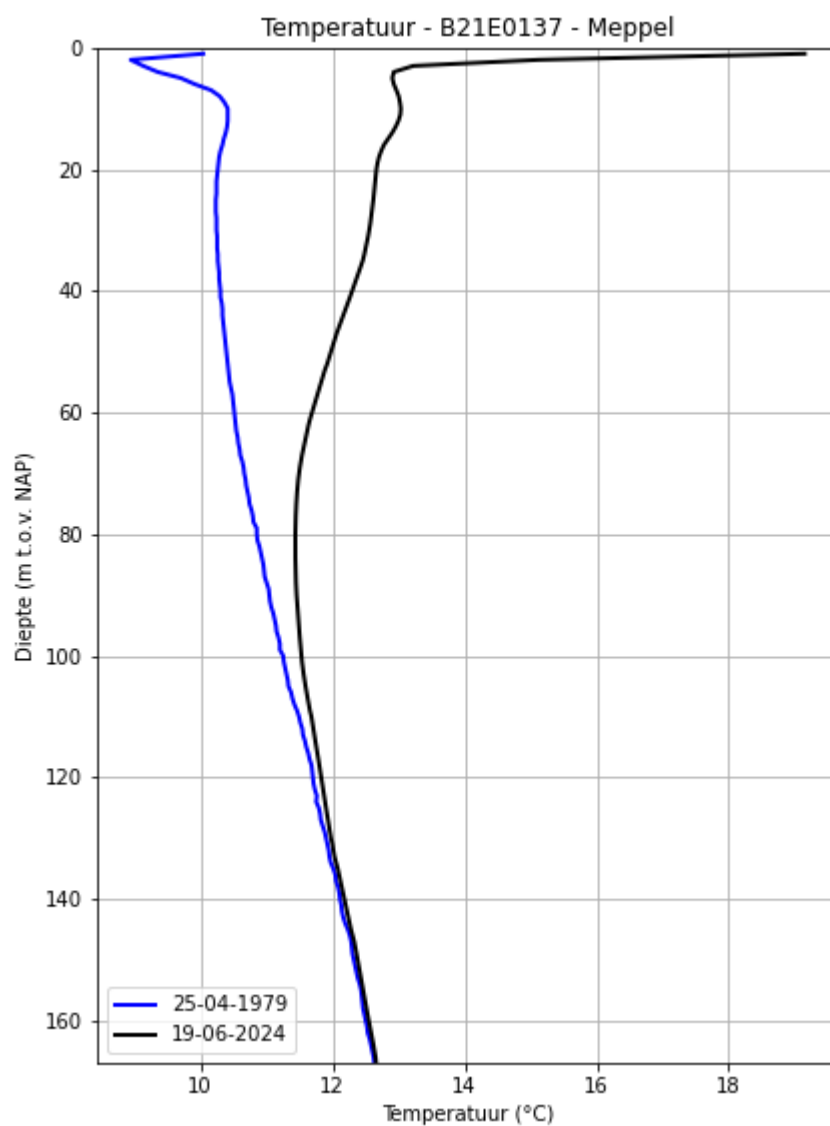
Bijlage A: Historische en recente temperatuur-diepteprofielen uit dit rapport

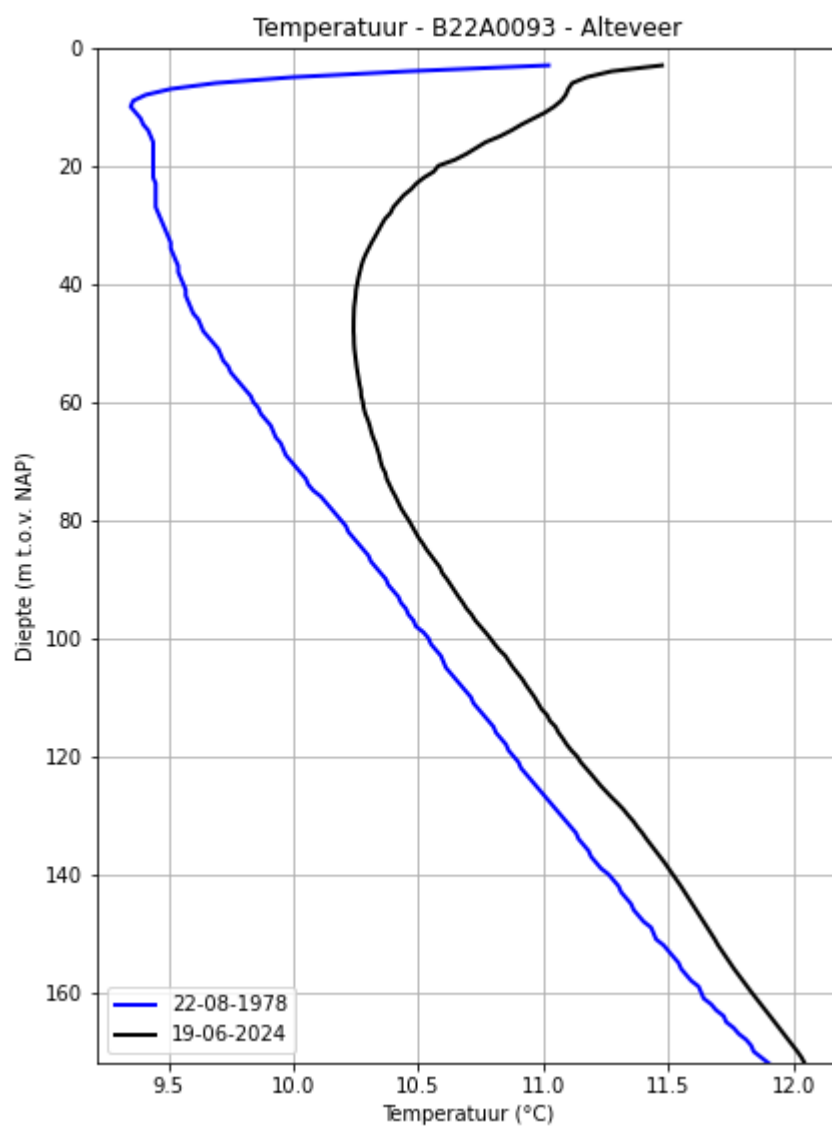


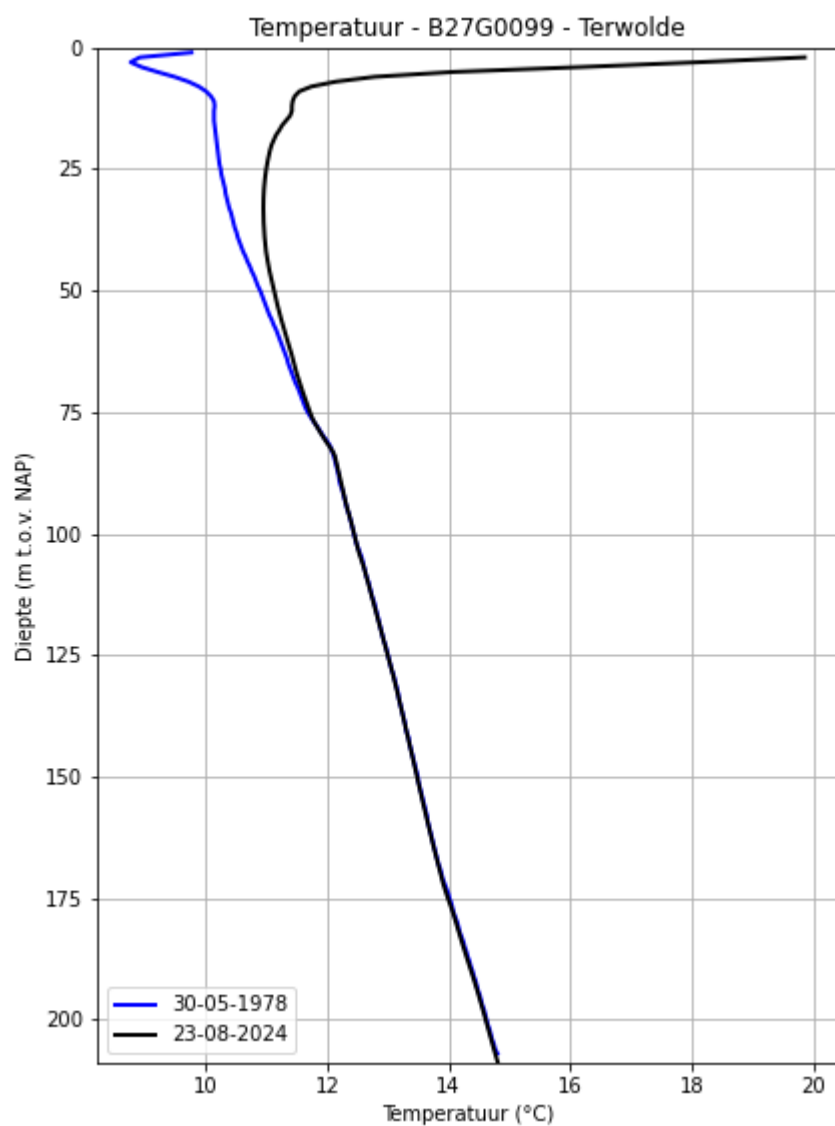


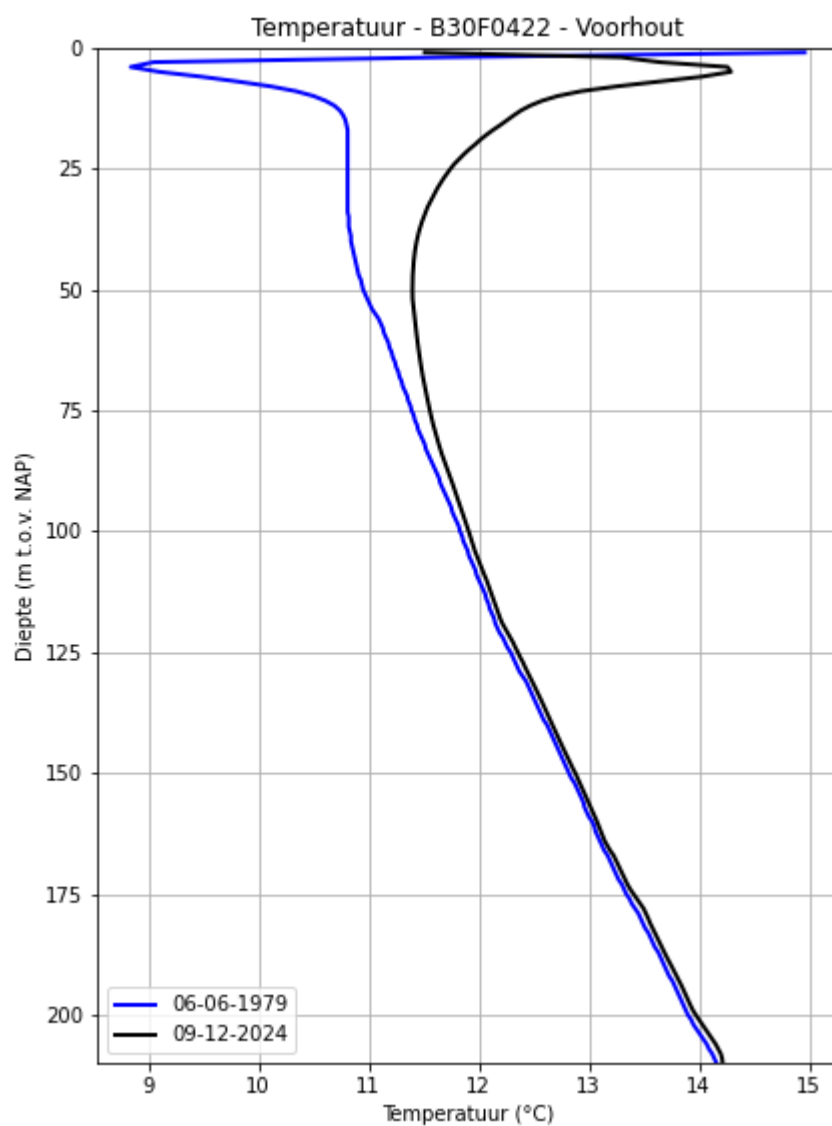


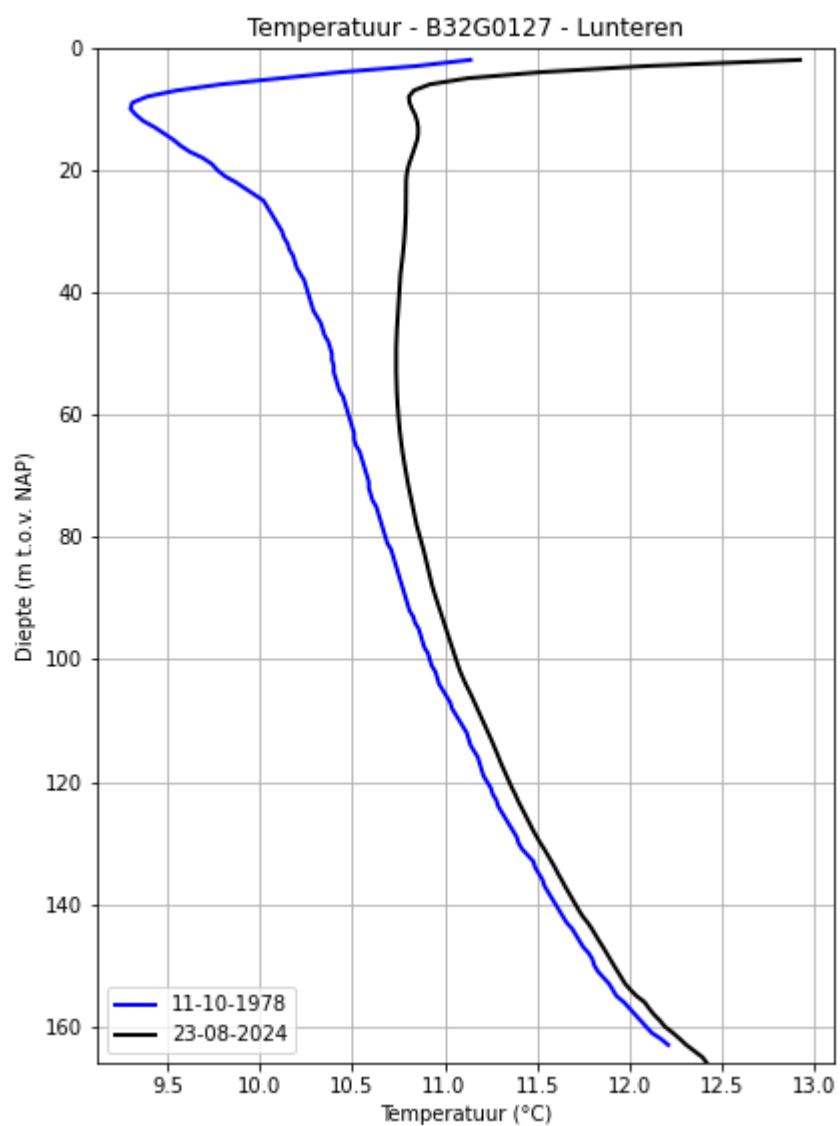


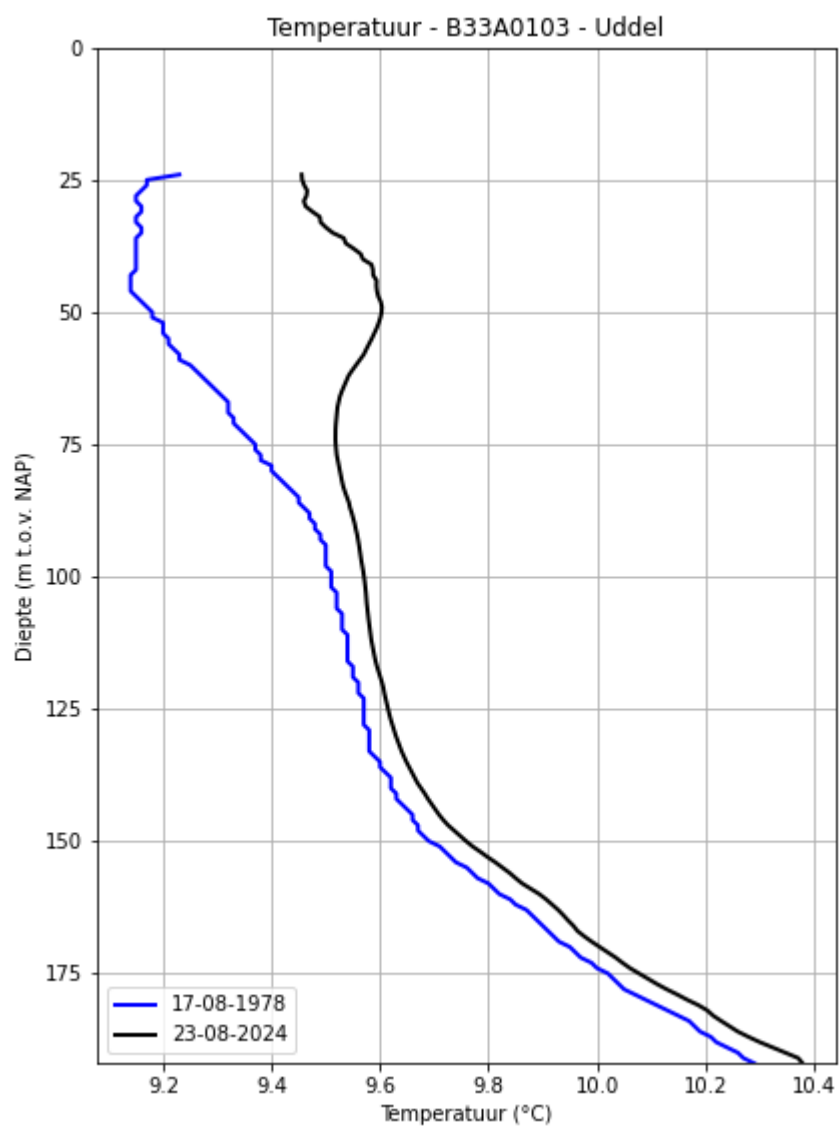


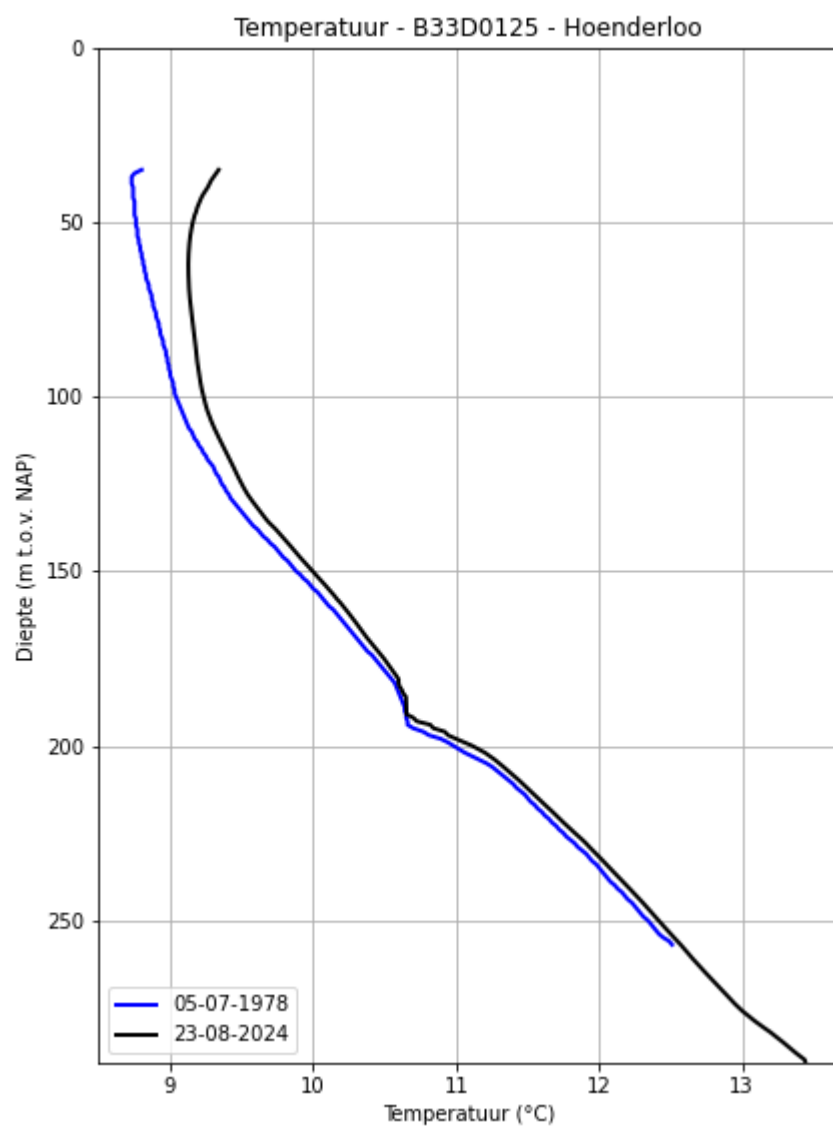


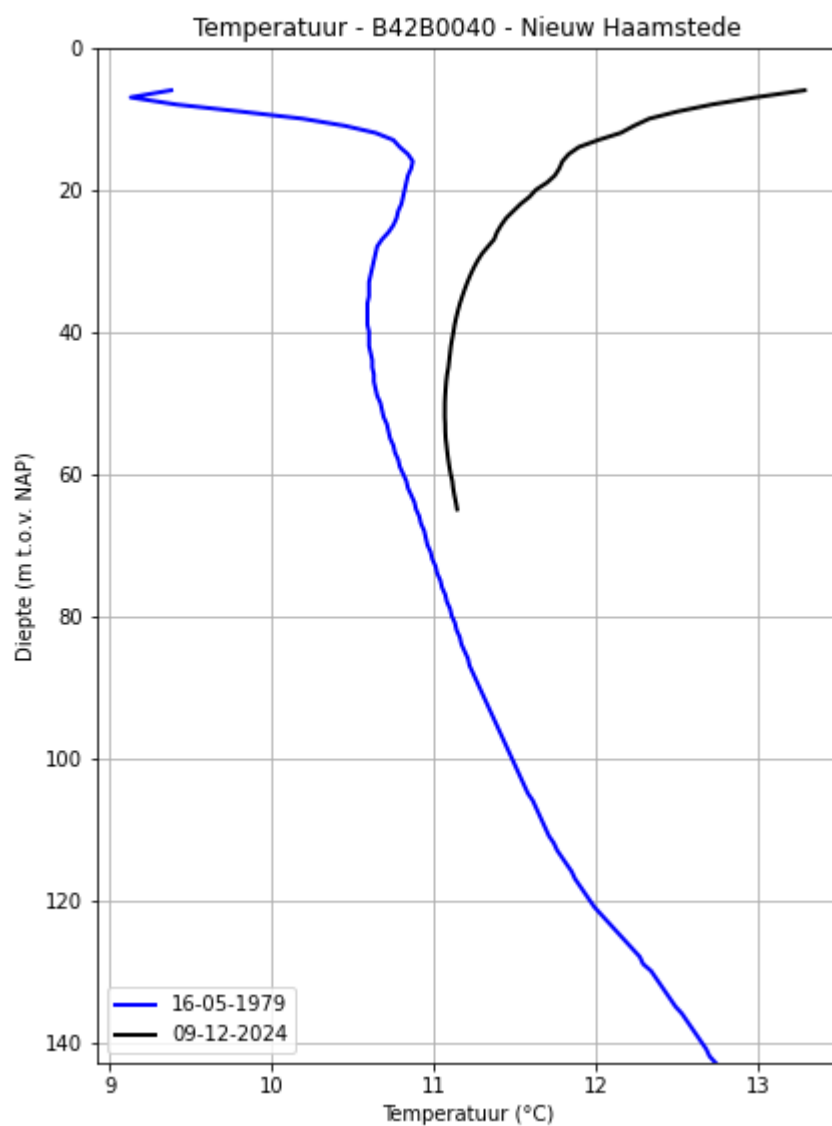


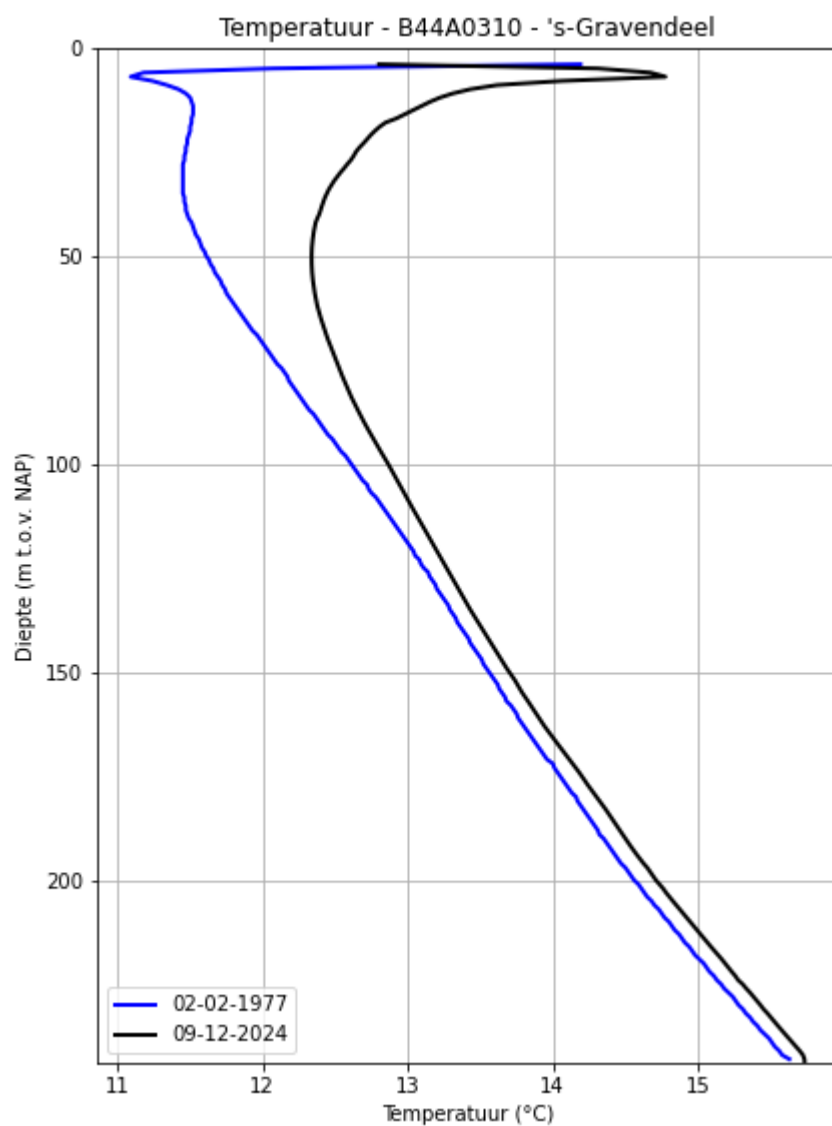


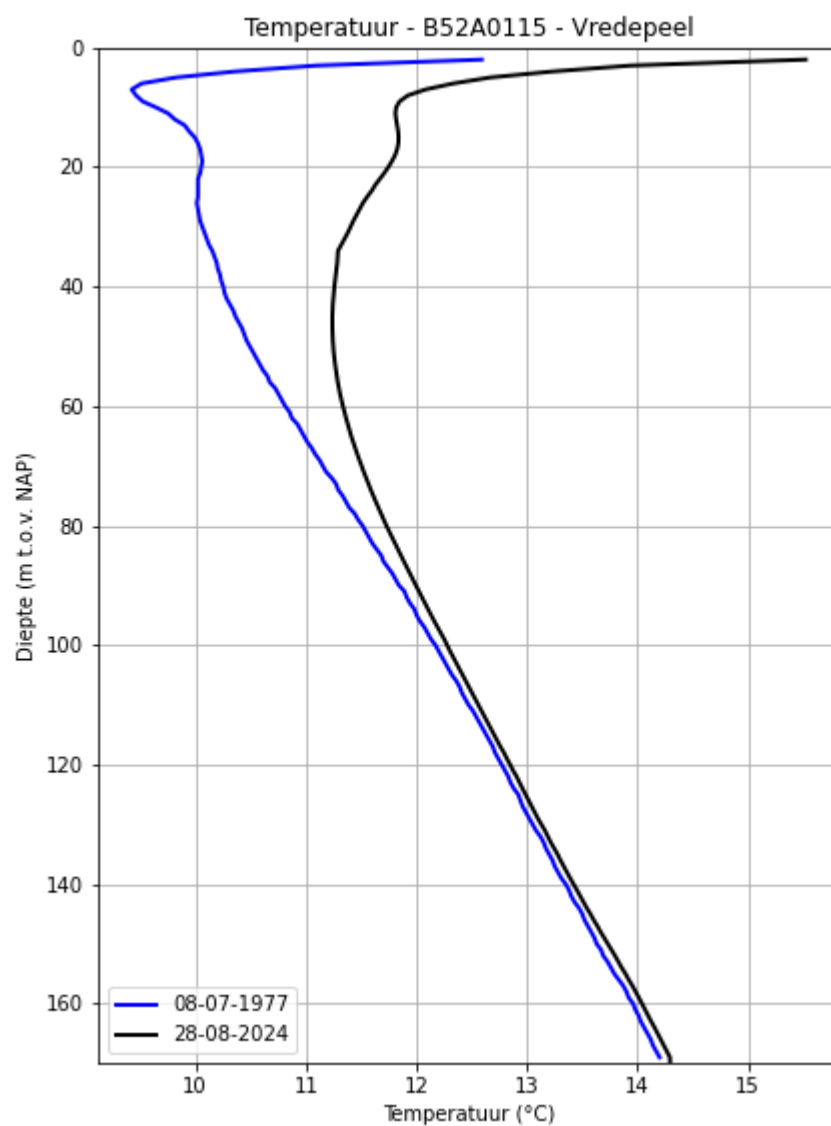


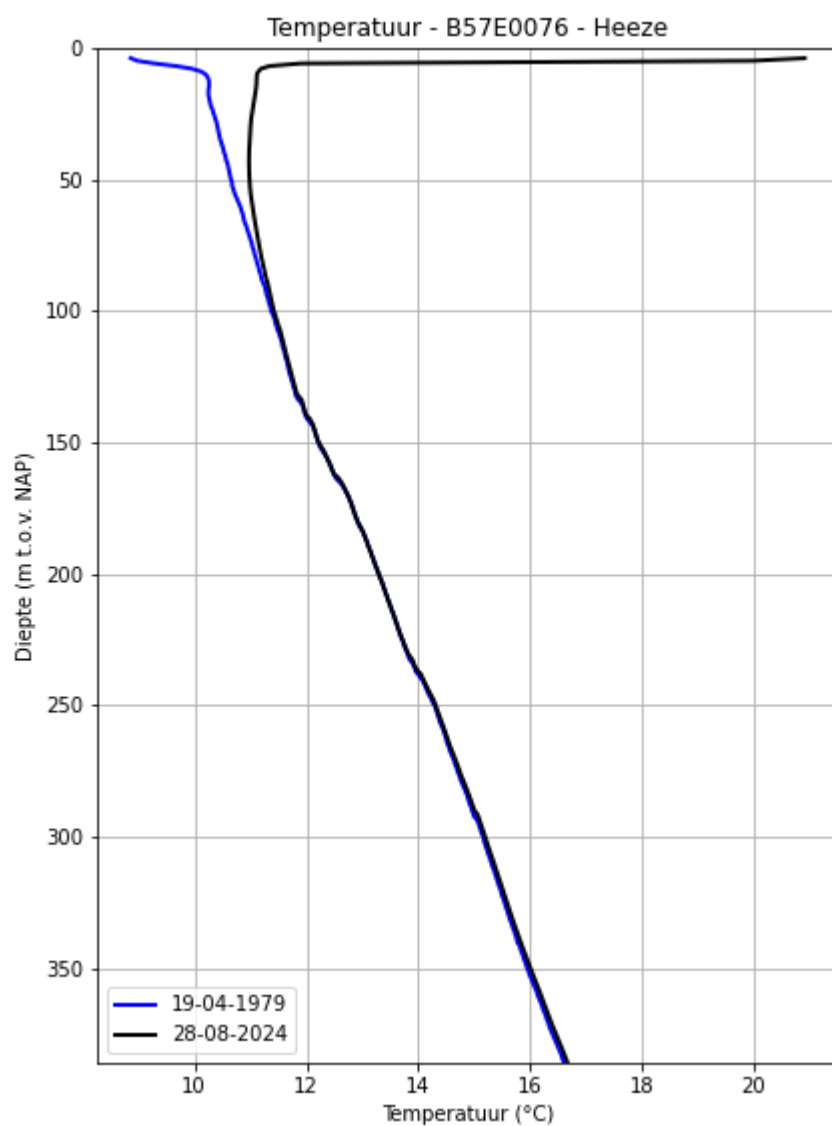


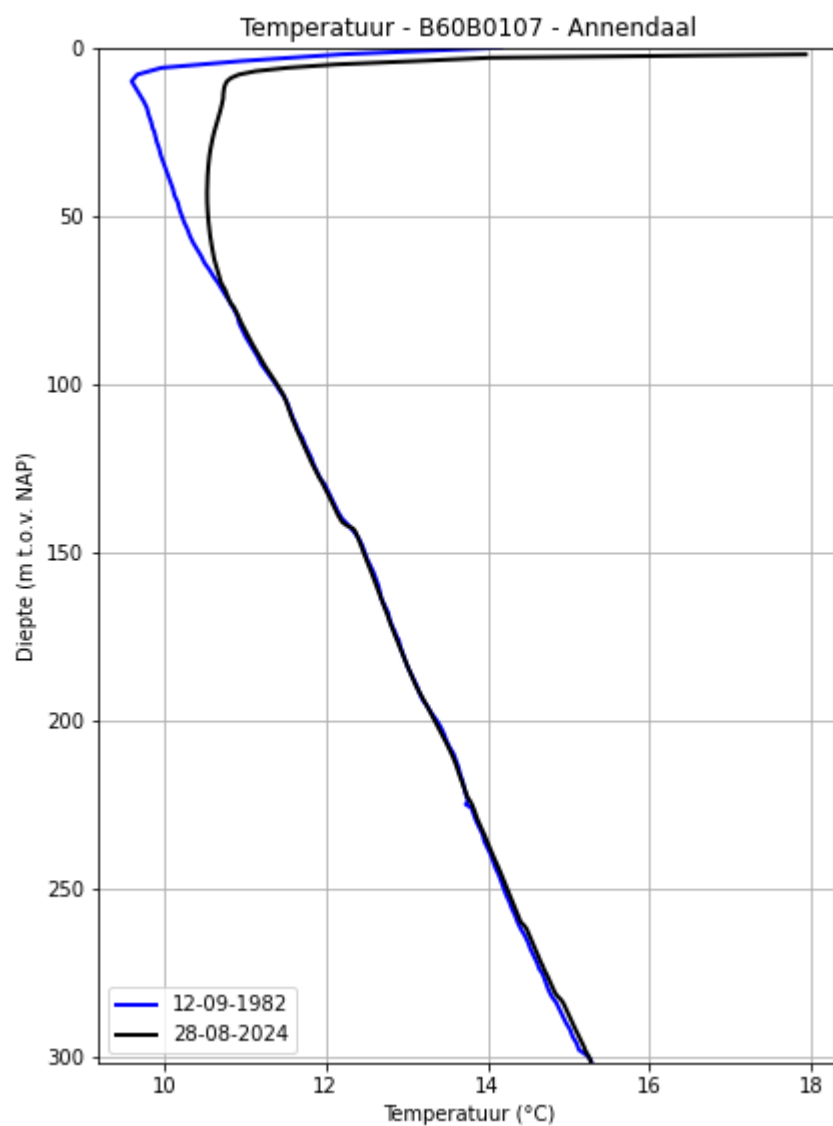




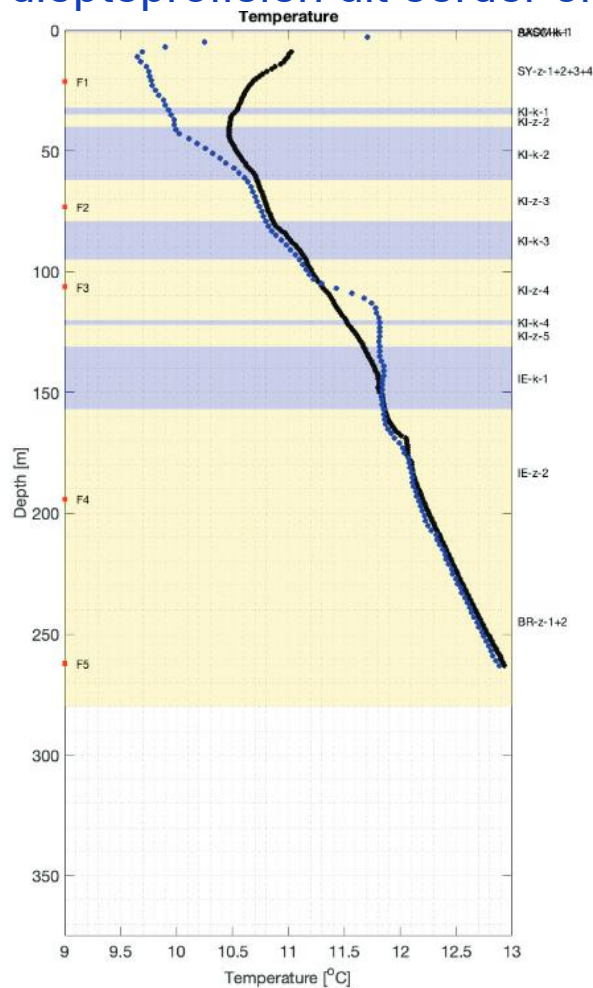




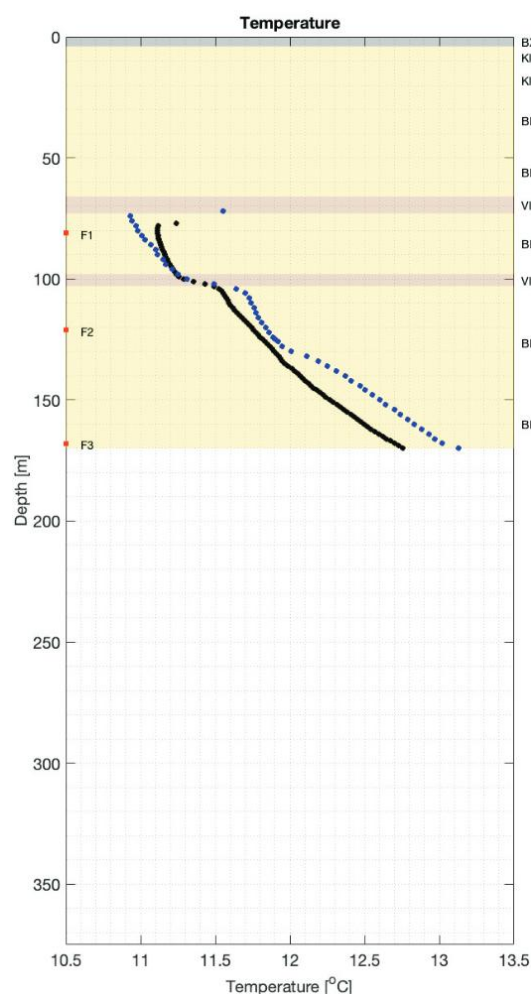




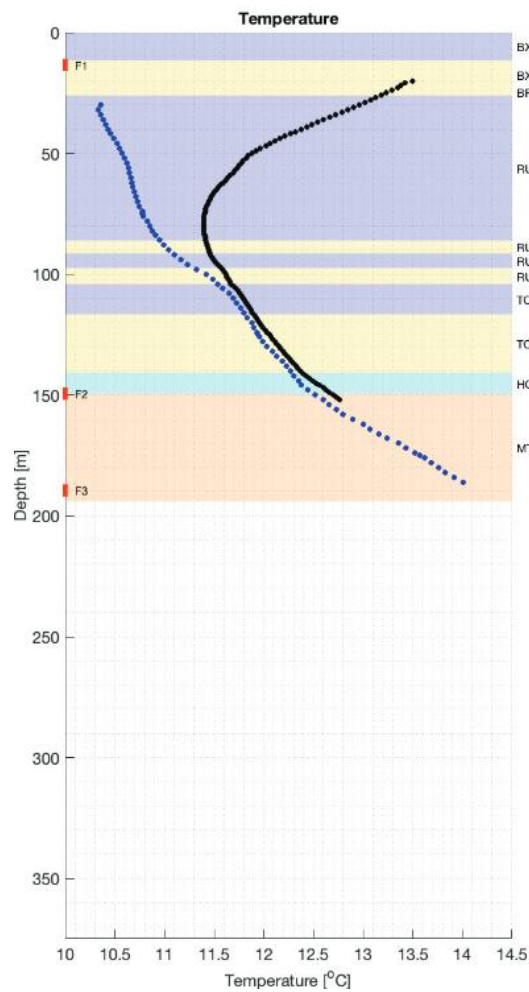
Bijlage B: Historische en recente temperatuur-diepteprofielen uit eerder onderzoek



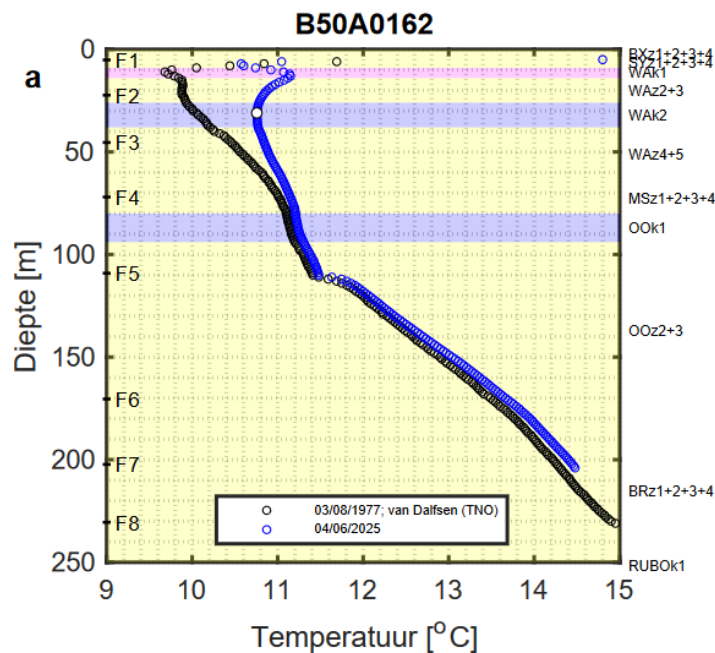
Figuur 22: Temperatuur-diepteprofielen uit 2023 (blauw) en 1982 (zwart) in grondwatermonitorsput B60D1027. In de achtergrond is de stratigrafische boorbeschrijving weergegeven. Figuur afkomstig uit Bense (2025a).



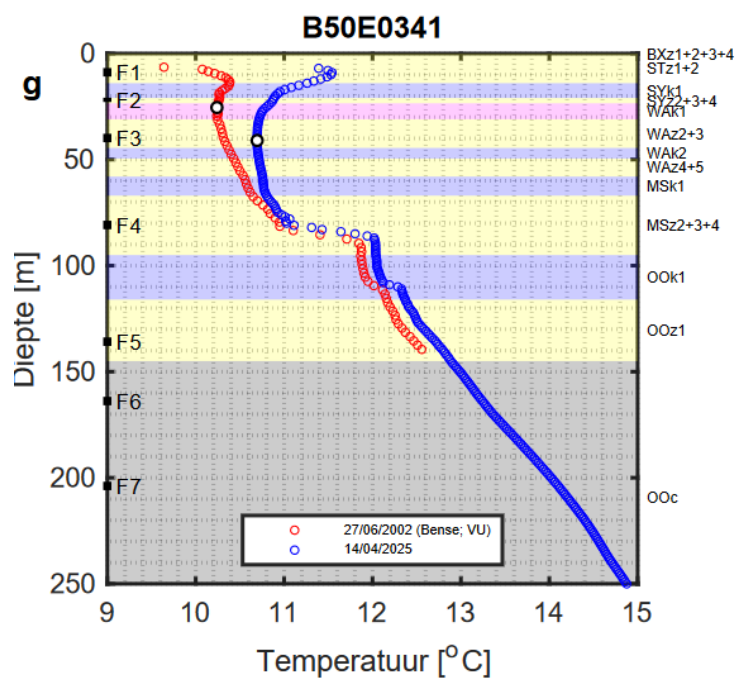
Figuur 23: Temperatuur-diepte-profielen uit 2023 (blauw) en 1982 (zwart) in grondwatermonitoringsput B60G0123. In de achtergrond is de stratigrafische boorbeschrijving weergegeven. Figuur afkomstig uit Bense (2025a).



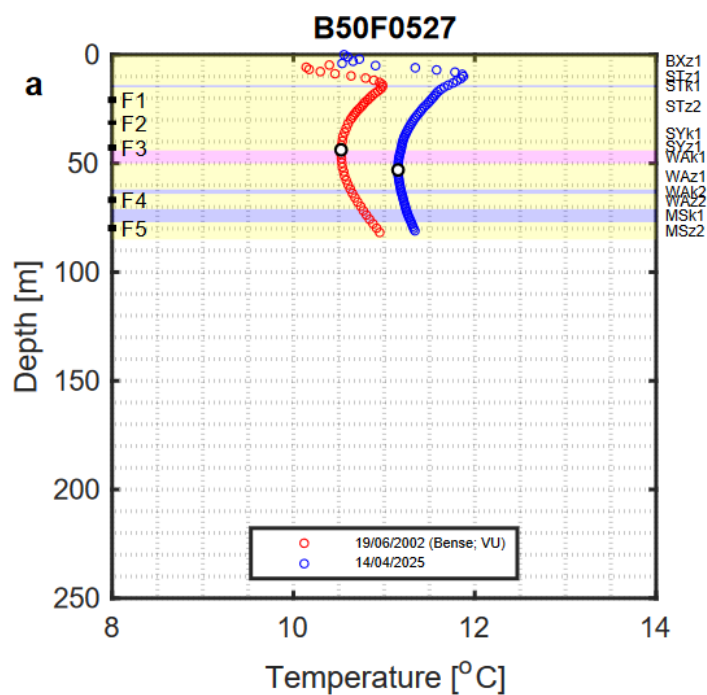
Figuur 24: Temperatuur-diepteprofielen uit 2023 (blauw) en 1982 (zwart) in grondwatermonitoringsput B60C0839. In de achtergrond is de stratigrafische boorbeschrijving weergegeven. Figuur afkomstig uit Bense (2025a).



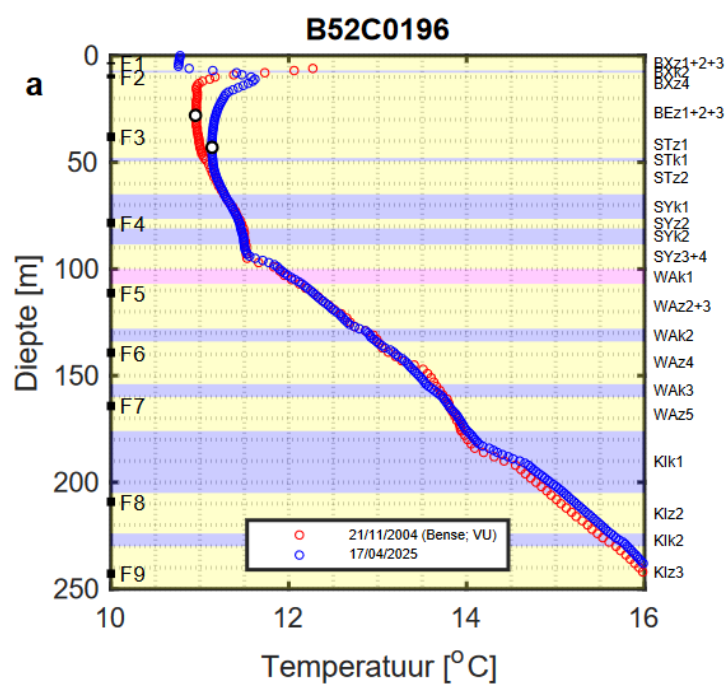
Figuur 25: Temperatuur-diepte-profielen uit 2025 (blauw) en 1977 (zwart) in grondwatermonitorsput B50A0162. In de achtergrond is de stratigrafische boorbeschrijving weergegeven. Figuur afkomstig uit Bense (2025b).



Figuur 26: Temperatuur-diepte-profielen uit 2025 (blauw) en 2002 (rood) in grondwatermonitorsput B50E0341. In de achtergrond is de stratigrafische boorbeschrijving weergegeven. Figuur afkomstig uit Bense (2025b).



Figuur 27: Temperatuur-diepteprofielen uit 2025 (blauw) en 2022 (rood) in grondwatermonitorsput B50F0527. In de achtergrond is de stratigrafische boorbeschrijving weergegeven. Figuur afkomstig uit Bense (2025b).



Figuur 28: Temperatuur-diepteprofielen uit 2025 (blauw) en 2022 (rood) in grondwatermonitorsput B52C0196. In de achtergrond is de stratigrafische boorbeschrijving weergegeven. Figuur afkomstig uit Bense (2025b).

Bijlage C: Input parameters voor ROSIM simulaties van een warmte- koudeopslag systeem

ROSIM is een door TNO intern ontwikkelde tool om statische 3D geologische ondergrondmodellen te bouwen en daaropvolgende stromingssimulaties uit te voeren met behulp van DoubletCalc 3D (Peters e.a., 2023).

C.1 Scenario met temperatuur-diepteprofiel uit 1979

number	depth(m-mv)	layer name	vertical cells	geometry option	thickness/base[m]	actnum	initial (surface) temperature	gradient	porosity total	net to gross	perm x	perm y	perm z	rock matrix thermal conduct	water thermal conduct	salinity	rock matrix heat capacity	rock matrix dens
	0	Based on (effectenstudie IF,2011)			m		°C	°C/km	fraction	fraction	mD	mD	mD	W/Km	W/Km	ppm	J/kgK	kg/m3
1	1	unsaturated	1	thickness	1	1	10.04	0	0.45	1	14	14	1	4	0.24	150	926	2700
2	2	unsaturated	1	thickness	1	1	8.94	0	0.45	1	14	14	1	4	0.24	150	926	2700
3	3	unsaturated	1	thickness	1	1	9.13	0	0.45	1	14	14	1	4	0.24	150	926	2700
4	4	Holocene (EC) below gw level	1	thickness	1	1	9.35	0	0.45	1	28	28	2	4	0.6	150	926	2700
5	5	Holocene (EC) below gw level	1	thickness	1	1	9.7	0	0.45	1	28	28	2	4	0.6	150	926	2700
6	6	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	9.91	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
7	7	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.16	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
8	8	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.29	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
9	9	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.36	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
10	10	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.41	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720

11	11	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.41	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
12	12	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.41	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
13	13	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.4	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
14	14	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.38	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
15	15	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.35	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
16	16	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.33	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
17	17	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.3	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
18	18	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.28	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
19	19	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.27	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
20	20	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.26	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
21	21	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	10.25	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
22	22	ST filter	1	thickness	1	1	10.24	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
23	23	ST filter	1	thickness	1	1	10.24	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
24	24	ST filter	1	thickness	1	1	10.24	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
25	25	ST filter	1	thickness	1	1	10.23	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
26	26	ST filter	1	thickness	1	1	10.23	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
27	27	ST filter	1	thickness	1	1	10.23	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
28	28	ST filter	1	thickness	1	1	10.24	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720

29	29	ST filter	1	thickness	1	1	10.24	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
30	30	ST filter	1	thickness	1	1	10.24	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
31	31	ST filter	1	thickness	1	1	10.25	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
32	32	ST filter	1	thickness	1	1	10.25	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
33	33	ST filter	1	thickness	1	1	10.25	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
34	34	ST filter	1	thickness	1	1	10.26	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
35	35	ST filter	1	thickness	1	1	10.26	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
36	36	ST filter	1	thickness	1	1	10.27	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
37	37	ST filter	1	thickness	1	1	10.28	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
38	38	ST filter	1	thickness	1	1	10.28	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
39	39	ST filter	1	thickness	1	1	10.29	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
40	40	ST filter	1	thickness	1	1	10.3	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
41	41	ST filter	1	thickness	1	1	10.3	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
42	42	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.32	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
43	43	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.33	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
44	44	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.33	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
45	45	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.34	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
46	46	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.35	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
47	47	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.36	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720

48	48	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.37	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
49	49	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.38	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
50	50	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.39	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
51	51	PZWA below filter	1	thickness	1	1	10.4	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
52	52	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.41	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
53	53	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.42	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
54	54	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.43	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
55	55	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.44	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
56	56	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.46	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
57	57	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.48	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
58	58	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.49	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
59	59	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.5	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
60	60	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.51	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
61	61	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.52	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
62	62	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.53	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
63	63	Clay (aquitar d 1)	1	thickness	1	1	10.54	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700

64	64	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.56	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
65	65	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.57	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
66	66	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.59	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
67	67	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.6	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
68	68	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.63	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
69	69	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.65	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
70	70	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.66	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
71	71	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	10.68	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
72	81	aquifer2	1	thickness	10	1	10.78	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720

C.2Scenario met temperatuur-diepteprofiel uit 2024

number	depth(m-mv)	layer name	vertical cells	geometry option	thickness/base[m]	actnum	initial (surface) temperature	gradient	porosity total	net to gross	perm x	perm y	perm z	rock matrix thermal conduct	water thermal conduct	salinity	rock matrix heat capacity	rock matrix dens
	0	Based on (effectenstudie IF,2011)			m		°C	°C/km	fraction	fraction	mD	mD	mD	W/Km	W/Km	ppm	J/kgK	kg/m3
1	1	unsaturated	1	thickness	1	1	19.15	0	0.45	1	14	14	1	4	0.24	150	926	2700
2	2	unsaturated	1	thickness	1	1	15.12	0	0.45	1	14	14	1	4	0.24	150	926	2700
3	3	unsaturated	1	thickness	1	1	13.22	0	0.45	1	14	14	1	4	0.24	150	926	2700

4	4	Holocene (EC) below gw level	1	thickness	1	1	12.93	0	0.45	1	28	28	2	4	0.6	150	926	2700
5	5	Holocene (EC) below gw level	1	thickness	1	1	12.90	0	0.45	1	28	28	2	4	0.6	150	926	2700
6	6	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.93	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
7	7	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.96	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
8	8	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	13.00	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
9	9	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	13.02	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
10	10	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	13.03	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
11	11	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	13.02	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
12	12	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	13.00	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
13	13	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.95	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
14	14	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.90	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
15	15	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.84	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
16	16	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.78	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
17	17	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.73	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
18	18	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.70	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
19	19	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.68	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
20	20	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.66	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
21	21	KR+BX above filter	1	thickness	1	1	12.65	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720
22	22	ST filter	1	thickness	1	1	12.64	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
23	23	ST filter	1	thickness	1	1	12.64	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
24	24	ST filter	1	thickness	1	1	12.63	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720

25	25	ST filter	1	thickness	1	1	12.62	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
26	26	ST filter	1	thickness	1	1	12.60	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
27	27	ST filter	1	thickness	1	1	12.59	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
28	28	ST filter	1	thickness	1	1	12.58	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
29	29	ST filter	1	thickness	1	1	12.57	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
30	30	ST filter	1	thickness	1	1	12.55	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
31	31	ST filter	1	thickness	1	1	12.54	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
32	32	ST filter	1	thickness	1	1	12.52	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
33	33	ST filter	1	thickness	1	1	12.50	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
34	34	ST filter	1	thickness	1	1	12.48	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
35	35	ST filter	1	thickness	1	1	12.46	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
36	36	ST filter	1	thickness	1	1	12.43	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
37	37	ST filter	1	thickness	1	1	12.39	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
38	38	ST filter	1	thickness	1	1	12.36	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
39	39	ST filter	1	thickness	1	1	12.33	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
40	40	ST filter	1	thickness	1	1	12.29	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
41	41	ST filter	1	thickness	1	1	12.26	0	0.36	1	65406	65406	16352	5.2	0.6	150	919	2720
42	42	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.23	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
43	43	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.19	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
44	44	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.16	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
45	45	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.13	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720

46	46	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.10	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
47	47	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.06	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
48	48	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.03	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
49	49	PZWA below filter	1	thickness	1	1	12.00	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
50	50	PZWA below filter	1	thickness	1	1	11.97	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
51	51	PZWA below filter	1	thickness	1	1	11.94	0	0.36	1	62558	62558	15640	4.2	0.6	150	919	2720
52	52	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.92	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
53	53	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.88	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
54	54	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.85	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
55	55	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.82	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
56	56	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.79	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
57	57	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.77	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
58	58	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.74	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
59	59	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.71	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
60	60	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.68	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
61	61	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.66	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
62	62	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.63	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
63	63	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.61	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
64	64	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.59	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
65	65	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.57	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
66	66	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.55	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700

67	67	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.54	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
68	68	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.52	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
69	69	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.50	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
70	70	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.49	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
71	71	Clay (aquitard 1)	1	thickness	1	1	11.48	0	0.45	1	185	185	14	4	0.6	150	926	2700
72	81	aquifer2	1	thickness	10	1	11.45	0	0.36	1	70151	70151	17538	4.2	0.6	150	919	2720

Bijlage D: Input parameters voor Geoloop simulaties van een verticale bodemwarmtewisselaar

Geoloop is een Python bibliotheek met verschillende modellen voor prestatieberekeningen van gesloten bodemwarmtewisselaars, ontwikkeld door TNO (publicatie in voorbereiding). Voor de berekeningen in dit rapport is gebruik gemaakt van de semi-analytische methode die in Geoloop is opgenomen.

In deze bijlage zijn de input parameters gegeven voor de simulaties met een constante koude-onttrekking. In de simulaties met een constante warmte-onttrekking is een waarde van 3 °C gegeven aan de parameter 'Tin'.

D.1 Scenario met temperatuur-diepteprofiel uit 1979

```
{
  "base_dir": "output",
  "type": "UTUBE",

  "H": 150,
  "D": 5,
  "r_b": 0.07,
  "pos": [ [-0.042, 0], [0.042,0] ],
  "r_out": [ 0.02, 0.02 ],
  "SDR": 11,
  "nInlets": 1,
  "k_p": 0.4,

  "insu_dr": 0.02,
  "insu_k": 0.03,
  "insu_z": 0,

  "k_g": [0.844],
  "z_k_g": [150],

  "epsilon": 1e-6,
```

```
"fluid_str": "water",
"fluid_percent" : 100,
"m_flow": 0.45,

"Tg": [
  10.04, 8.94, 9.13, 9.35, 9.7, 9.91, 10.16, 10.29, 10.36, 10.41,
  10.41, 10.41, 10.4, 10.38, 10.35, 10.33, 10.3, 10.28, 10.27, 10.26,
  10.25, 10.24, 10.24, 10.24, 10.23, 10.23, 10.23, 10.24, 10.24, 10.24,
  10.25, 10.25, 10.25, 10.26, 10.26, 10.27, 10.28, 10.28, 10.29, 10.3,
  10.3, 10.32, 10.33, 10.33, 10.34, 10.35, 10.36, 10.37, 10.38, 10.39,
  10.4, 10.41, 10.42, 10.43, 10.44, 10.46, 10.48, 10.49, 10.5, 10.51,
  10.52, 10.53, 10.54, 10.56, 10.57, 10.59, 10.6, 10.63, 10.65, 10.66,
  10.68, 10.69, 10.71, 10.73, 10.74, 10.77, 10.79, 10.8, 10.85, 10.85,
  10.86, 10.89, 10.91, 10.93, 10.95, 10.96, 10.97, 11, 11.03, 11.04,
  11.05, 11.07, 11.1, 11.12, 11.14, 11.15, 11.18, 11.2, 11.2, 11.25,
  11.26, 11.28, 11.3, 11.32, 11.33, 11.37, 11.39, 11.42, 11.46, 11.49,
  11.51, 11.54, 11.55, 11.58, 11.6, 11.63, 11.65, 11.68, 11.69, 11.7,
  11.71, 11.73, 11.76, 11.75, 11.79, 11.81, 11.82, 11.85, 11.88, 11.9,
  11.92, 11.94, 11.95, 11.97, 12.01, 12.04, 12.05, 12.08, 12.1, 12.11,
  12.13, 12.14, 12.16, 12.19, 12.23, 12.26, 12.28, 12.29, 12.3, 12.32,
  12.34, 12.36, 12.38, 12.41, 12.43, 12.44, 12.45, 12.46, 12.48, 12.5,
  12.52, 12.53, 12.56, 12.58, 12.6, 12.62, 12.63
],
"Tgrad": 2,
"z_Tg": [
  1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
  11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,
  21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,
  31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40,
  41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50,
  51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60,
  61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70,
  71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80,
```

```
    81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90,  
    91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100,  
    101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110,  
    111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120,  
    121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130,  
    131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140,  
    141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150,  
    151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160,  
    161, 162, 163, 164, 165, 166, 167  
],  
  "k_s": [2.5],  
  "z_k_s": [150],  
  "k_s_scale": 1,  
  "alfa": 1e-6,  
  
  "model_type": "ANALYTICAL",  
  "run_type": "TIN",  
  "nyear": 3,  
  "nled": 24,  
  "nsegments": 15,  
  
  "dooptimize": false,  
  "copcrit": 20,  
  "optimize_keys": ["m_flow"],  
  "optimize_keys_bounds": [[0.1, 10]],  
  
  "Q": 25000,  
  "Tin": 15  
}
```

D.2 Scenario met temperatuur-diepteprofiel uit 2024

```
{
  "base_dir": "output",
  "type": "UTUBE",

  "H": 150,
  "D": 5,
  "r_b": 0.07,
  "pos": [ [-0.042, 0], [0.042,0] ],
  "r_out": [ 0.02, 0.02 ],
  "SDR": 11,
  "nInlets": 1,
  "k_p": 0.4,

  "insu_dr": 0.02,
  "insu_k": 0.03,
  "insu_z": 0,

  "k_g": [0.844],
  "z_k_g": [150],

  "epsilon": 1e-6,
  "fluid_str": "water",
  "fluid_percent" : 100,
  "m_flow": 0.45,

  "Tg": [
    18.629878, 19.148938, 15.119473, 13.219780, 12.925295, 12.902828, 12.925422, 12.964948, 13.000124, 13.019101,
    13.031862, 13.024948, 12.996803, 12.954265, 12.901506, 12.837309, 12.775416, 12.734583, 12.701017, 12.678397,
    12.662340, 12.653394, 12.644694, 12.635616, 12.625087, 12.615618, 12.604022, 12.592321, 12.581650, 12.568516,
    12.553372, 12.537287, 12.516456, 12.497987, 12.478736, 12.455833, 12.425407, 12.392163, 12.360586, 12.326866,
    12.294306, 12.262447, 12.228562, 12.193296, 12.161997, 12.125977, 12.095457, 12.059138, 12.030529, 12.002062,
```

```

11.972493, 11.944561, 11.916487, 11.881073, 11.852950, 11.824097, 11.794680, 11.765672, 11.737422, 11.709302,
11.682598, 11.659008, 11.634847, 11.614541, 11.592631, 11.571709, 11.552875, 11.535177, 11.518932, 11.503206,
11.489974, 11.478469, 11.469086, 11.461326, 11.454537, 11.449319, 11.444530, 11.441215, 11.438384, 11.436131,
11.434732, 11.434165, 11.433932, 11.434267, 11.435358, 11.437016, 11.439049, 11.441550, 11.444386, 11.448334,
11.453635, 11.460162, 11.466164, 11.472791, 11.480169, 11.486939, 11.493957, 11.501775, 11.509549, 11.517191,
11.526073, 11.535500, 11.545952, 11.559646, 11.572581, 11.588819, 11.606001, 11.621242, 11.636714, 11.655428,
11.677954, 11.692073, 11.705849, 11.720111, 11.737034, 11.753004, 11.768059, 11.783273, 11.797440, 11.811308,
11.826100, 11.839795, 11.853472, 11.868683, 11.883954, 11.899080, 11.915014, 11.930554, 11.944865, 11.959440,
11.975269, 11.995901, 12.011287, 12.027142, 12.053138, 12.077025, 12.097034, 12.116757, 12.136578, 12.155849,
12.175301, 12.196059, 12.217573, 12.236578, 12.256849, 12.275973, 12.296532, 12.315849, 12.337332, 12.364941,
12.386225, 12.407034, 12.426313, 12.449863, 12.465433, 12.487315, 12.509432, 12.533134, 12.549497, 12.569982,
12.594333, 12.617416, 12.644649, 12.665247, 12.688982, 12.705732, 12.730132, 12.751032
],
"Tgrad": 2,
"z_Tg": [
0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0,
10.0, 11.0, 12.0, 13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0, 18.0, 19.0,
20.0, 21.0, 22.0, 23.0, 24.0, 25.0, 26.0, 27.0, 28.0, 29.0,
30.0, 31.0, 32.0, 33.0, 34.0, 35.0, 36.0, 37.0, 38.0, 39.0,
40.0, 41.0, 42.0, 43.0, 44.0, 45.0, 46.0, 47.0, 48.0, 49.0,
50.0, 51.0, 52.0, 53.0, 54.0, 55.0, 56.0, 57.0, 58.0, 59.0,
60.0, 61.0, 62.0, 63.0, 64.0, 65.0, 66.0, 67.0, 68.0, 69.0,
70.0, 71.0, 72.0, 73.0, 74.0, 75.0, 76.0, 77.0, 78.0, 79.0,
80.0, 81.0, 82.0, 83.0, 84.0, 85.0, 86.0, 87.0, 88.0, 89.0,
90.0, 91.0, 92.0, 93.0, 94.0, 95.0, 96.0, 97.0, 98.0, 99.0,
100.0, 101.0, 102.0, 103.0, 104.0, 105.0, 106.0, 107.0, 108.0, 109.0,
110.0, 111.0, 112.0, 113.0, 114.0, 115.0, 116.0, 117.0, 118.0, 119.0,
120.0, 121.0, 122.0, 123.0, 124.0, 125.0, 126.0, 127.0, 128.0, 129.0,
130.0, 131.0, 132.0, 133.0, 134.0, 135.0, 136.0, 137.0, 138.0, 139.0,
140.0, 141.0, 142.0, 143.0, 144.0, 145.0, 146.0, 147.0, 148.0, 149.0,
150.0, 151.0, 152.0, 153.0, 154.0, 155.0, 156.0, 157.0, 158.0, 159.0,
160.0, 161.0, 162.0, 163.0, 164.0, 165.0, 166.0, 167.0
],

```

```
"k_s": [2.5],  
"z_k_s": [150],  
"k_s_scale": 1,  
"alfa": 1e-6,  
  
"model_type": "ANALYTICAL",  
"run_type": "TIN",  
"nyear": 3,  
"nled": 24,  
"nsegments": 15,  
  
"dooptimize": false,  
"copcrit": 20,  
"optimize_keys": ["m_flow"],  
"optimize_keys_bounds": [[0.1, 10]],  
  
"Q": 25000,  
"Tin": 15  
}
```

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl