

KEEN

Evaluatie van effecten HTO Middenmeer op grondwaterkwaliteit

TNO 2026 R10848 – 7 april 2026

KEEN

Evaluatie van effecten HTO

Middenmeer op grondwaterkwaliteit

Auteurs	Alwina Hoving, Mariëlle Koenen, Jasper Griffioen
Rubricering rapport	TNO Public
Titel	TNO Public
Aantal pagina's	31 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	0
Programmanaam	KEEN

KEEN

Het Ministerie van EZK heeft in 2025 opdracht gegeven om het onderzoeksprogramma Kennis van Ecologie voor Energietransitie (KEEN) te starten. Doel van het programma is te voorkomen dat de energietransitie leidt tot ongewenste ecologische gevolgen en tegelijkertijd te voorkomen dat de energietransitie vertraging ondervindt als gevolg van onzekerheid over de ecologische effecten van hernieuwbare energieopwekking.

De energietransitie zal een impact hebben op de kwaliteit en het leven in het water, op het land en in de bodem. Deltares, TNO, WUR en KWR onderzoeken de effecten van het opschalen van hernieuwbare energiebronnen zoals wind, zon, aquathermie en bodemenergie, om ervoor te zorgen dat onze overgang naar een duurzame toekomst zowel effectief als ecologisch verantwoord is. Er is nieuw onderzoek gestart binnen KEEN maar ook lopend onderzoek wordt gebruikt, gebundeld en aangevuld binnen KEEN. In dit rapport wordt het eerste seizoen van monitoring gepresenteerd, de wens is om een langjarige monitoringreeks te kunnen opbouwen. Het onderzoek is georganiseerd in drie clusters:

Cluster Land:

1. Onderzoek naar de verdeling van bodemvocht onder zonnepanelen
2. Onderzoek naar aanvaringsrisico's voor roofvogels bij het combineren van zon- en windenergie met modellering van de luchtstromen.

Cluster Water:

1. Onderzoek op één locatie naar de effecten van een aquathermie installatie op de ecologie. Er is gekeken naar de effecten van waterfiltering, koudelozing en stroming.
2. Onderzoek naar de relatie tussen bedekking door zonnepanelen op water en de impact op primaire productie van biomassa.

Cluster Bodem:

1. Onderzoek naar de temperatuureffecten van MTO- en HTO-systemen op de grondwaterkwaliteit.

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

De maximale opslagtemperatuur van open bodemenergiesystemen is wettelijk begrensd op 25°C, omdat onder deze grens geen significant effect op de grondwaterkwaliteit te verwachten is. Hogere opslagtemperaturen zijn wenselijk om op grotere schaal duurzame energie efficiënt op te kunnen slaan. Het is echter momenteel onduidelijk of en onder welke omstandigheden hogere temperatuur opslag veilig toegepast kan worden zonder negatieve effecten op de grondwaterkwaliteit.

Als onderdeel van het KEEN project is aanvullende monitoring uitgevoerd bij het HTO systeem in Middenmeer, welke al vier succesvolle operationele jaren heeft gedraaid als pilot project. Boven de dikke afsluitende kleilaag van het opslagpakket ligt een dik zandpakket. Grondwatermonsters uit peilbuizen bij de hete bron, lauwe bron en monitoringsput boven en onderin dit pakket zijn geanalyseerd op geochemische en microbiologische samenstelling tijdens drie bemonsteringsrondes tijdens het vierde operationele jaar.

De geochemische analyses laten een duidelijk verschil in samenstelling zien bovenin en onderin het zandpakket waarbij het diepe grondwater veel zouter is met onder andere hogere concentraties chloride, natrium, sulfaat en arseen, en lagere concentraties bicarbonaat, silicium, opgelost organische koolstof en ijzer. De analyses bij de hete bron bevestigden de theorie op basis van temperatuurmetingen langs de putten dat opwarming rondom de hete bron opdrijving veroorzaakt en vervolgens het diepe zoute grondwater mengt met ondiep, minder zout grondwater. In het zandpakket bovenin bij de hete bron is een mengverhouding berekend van 82% diep en 18% ondiep grondwater. In mindere mate laten de analyses dit proces ook zien bij de lauwe bron. Het effect hiervan is nog niet meetbaar bovenin bij de monitoringsput. Behalve verandering in grondwater samenstelling bovenin de zandlaag door menging zijn er indicaties voor (zeer beperkte) temperatuur-gedreven hydrogeochemische reacties, waaronder kationuitwisseling van natrium, ijzer en kalium.

Onderin bij de hete en lauwe bron zijn indicaties voor kalkneerslag, terwijl bovenin oplossing lijkt plaats te vinden. Relatief lage sulfaat- en arseenconcentraties bij de hete en lauwe bron ten opzichte van de monitoringsput duiden op microbiële sulfaatreductie, gevolgd door neerslag van ijzersulfides. Dit lijkt bevestigd te worden door een gemeten verschuiving in activiteit binnen de sulfaatreducerende microben, welke duidt op een thermofiele soort die zich beter voelt bij hogere temperaturen. De totale activiteit van de microbiële populatie is overigens zeer laag en is niet toegenomen ten opzichte van referentiemetingen.

Samenvattend zijn de veranderingen in geochemie grotendeels toe te schrijven aan de opdrijving en menging van verschillende grondwater typen als gevolg van opwarming rondom de hete bron en in mindere mate de lauwe bron. De samenstelling bovenin het dikke zandpakket verandert hierdoor langzaam richting de samenstelling van onderin het pakket. Verder zijn er indicaties voor beperkte, al dan niet microbiële versnelde chemische reacties als gevolg van de opwarming. Deze veranderingen zijn niet per definitie goed of slecht, er komen geen hoge concentraties aan ongewenste elementen in het grondwater vrij en er groeien ook geen ongunstige microben. De resultaten laten echter voor toekomstige systemen wel het belang van een goede hydrogeologische en geochemische karakterisatie van de bovenliggende lagen zien. Wanneer een dikke, ondiepe zandlaag aanwezig is welke in de nabije omgeving voor andere doeleinden gebruikt wordt of gaat worden is het noodzakelijk om de potentiële effecten van grondwatermenging te evalueren en ongewenste verzilting tegen te gaan door bijvoorbeeld de bronnen op voldoende afstand aan te leggen, dan wel met behulp van extra bronisolatie het opdrijvingseffect te beperken.

Inhoudsopgave

Samenvatting	
1 Inleiding.....	1
2 Monitoring HTO Middenmeer	3
2.1 HTO-systeem en ondergrond bij Middenmeer	3
2.2 Bemonstering en analysemethoden	5
3 Thermische effecten	7
3.1 Temperatuur.....	7
4 Chemische effecten	9
4.1 Grondwatersamenstelling	9
4.2 Chemische effecten - Opdrijving.....	11
4.3 Chemische effecten - temperatuur.....	13
5 Microbiële effecten	14
6 Conclusies	17
Ondertekening.....	19
Referenties	20
Appendix A.....	22
Appendix B	23
Appendix C.....	27

1 Inleiding

Bodemenergiesystemen worden steeds vaker gebruikt om thermische energie op te slaan voor verwarmings- of koelingsdoeleinden in de bebouwde omgeving en kan een belangrijke bijdrage leveren aan het verduurzamen van ons energiesysteem. Hierbij wordt warmte tijdelijk ondergronds opgeslagen in watervoerende zandpakketten (aquifers). Voor open bodemenergiesystemen is het (wettelijk) uitgangspunt dat er geen wezenlijke verslechtering van de grondwaterkwaliteit optreedt bij opslagtemperaturen tot 25°C. Er geldt dat de waterkwaliteitseffecten die optreden bij lage-temperatuur WKO-systemen hoofdzakelijk veroorzaakt worden door menging van verschillende watertypen (bijvoorbeeld zoet en brak of zout water) als gevolg van het rondpompen van water tussen de koude en warme bron met menging over de diepte van het watervoerende pakket (Dinkla et al., 2012). Momenteel wordt er in Nederland steeds meer gekeken naar de toepassing van midden- en hoge-temperatuur open bodemenergiesystemen (MTO en HTO) met opslagtemperaturen tussen de 40 en 90°C. Het voordeel hiervan is dat er meer energie opgeslagen kan worden per volume grondwater en dus grootschaligere seizoensopslag mogelijk is.

HTO-systemen bestaan uit één of meerdere hete en warme/lauwe bron(nen). In beide wordt grondwater opgeslagen en teruggewonnen met temperaturen boven de natuurlijke grondwatertemperatuur.

Het gebruik van de (diepe) ondergrond voor hogere temperatuur warmteopslag heeft niet alleen invloed op de temperatuur van het grondwater op de injectiediepte, maar kan ook invloed hebben op ondieper grondwater. Vanuit het opslagpakket kan de warmte via geleiding op boven en onderliggende kleilagen overgedragen worden (Drijver et al., 2025). Warmte uit de hetere bronnen wordt bovendien vanuit de bronbehuizing door geleiding overgedragen naar de omringende ondergrond, waaronder naar ondiepe zandlagen. Naarmate de omgeving rond een put opwarmt, kunnen de chemische en fysische eigenschappen van zowel het poriewater als het sediment veranderen. Ook kan een hogere temperatuur invloed hebben op de microbiële populatie. Verschillende studies hebben deze effecten gemodelleerd of in laboratoria experimenteel onderzocht (o.a. Brons et al., 1991; Bonte et al., 2013; Bin Hudari et al., 2022; Lüders et al., 2020; Schout & Hartog, 2020). Aangezien er nog maar weinig MTO en HTO systemen lang actief zijn, zijn de daadwerkelijke effecten op de lange termijn van enkele tot tientallen jaren nog weinig onderzocht. In Dobson et al. (2025) staan monitoringsgegevens van opslagaquifers van verschillende MTO en HTO systemen in Duitsland en Nederland samengevat. In Nederland zijn momenteel slechts enkele MTO-systemen en 1 HTO-systeem operationeel. Van dit HTO-systeem, gelegen bij Middenmeer in Noord-Holland, zijn op dit moment de waterkwaliteitsresultaten binnen het opslagpakket (365 m diepte) van de eerste twee jaar dat de HTO in werking is, gerapporteerd (Schout et al., 2023; Koenen, 2023) en wordt de volledige vier jaar gerapporteerd in de TKI HTO-PEN rapporten (verwacht in Q3 2026). De impact en eventuele risico's van warmtetransport van een HTO naar ondieper grondwater zijn nog niet onderzocht en moeten beter worden begrepen, met name wat betreft de grondwaterkwaliteit.

Om te voorkomen dat de uitrol van MTO en HTO leidt tot ongewenste ecologische gevolgen, of dat deze onnodig vertraging ondervindt als gevolg van onzekerheid over effecten, heeft het Ministerie van EZK opdracht gegeven deze kennislacune verder te onderzoeken binnen het Kennis van Ecologie voor de Energietransitie (KEEN) project, cluster Ondergrond. In deze rapportage worden de geochemische en microbiologische analyseresultaten van grondwater in een zandpakket boven het opslagpakket van de HTO in Middenmeer beschreven en bediscussieerd. Op basis hiervan krijgen we een beter inzicht in de eventuele effecten van HTO op de waterkwaliteit in ondiepere lagen en kunnen er mogelijk aanbevelingen geformuleerd worden over de randvoorwaarden voor de duurzame toepassing van ondergrondse warmteopslag.

2 Monitoring HTO Middenmeer

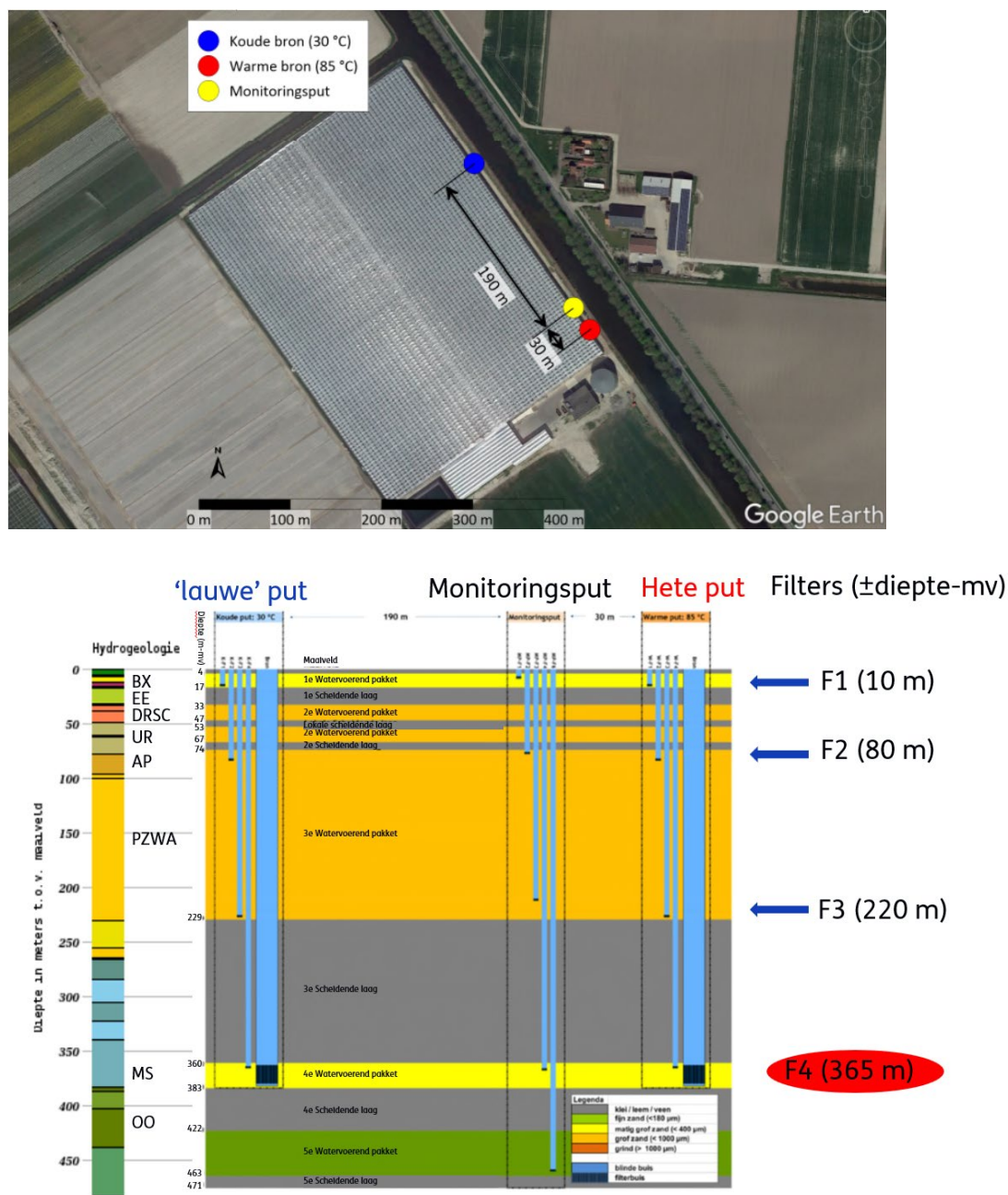
2.1 HTO-systeem en ondergrond bij Middenmeer

Het HTO-systeem bij Middenmeer staat uitgebreid beschreven in o.a. Oerlemans et al. (2022) en Schout et al. (2023). Hieronder volgt een korte samenvatting.

Het systeem, gerealiseerd binnen het Geothermica HEATSTORE project en operationeel sinds 2021, slaat in de zomer water op afkomstig van aardwarmte, voor verwarming van glastuinbouw in de winter. Het systeem bestaat uit drie grondwaterputten: een hete bron, een lauwe/warme bron, en een monitoringsput. De afstand tussen de hete bron en de monitoringsput is 30 meter en tot de lauwe bron 220 meter. De locaties van de putten zijn weergegeven in Figuur 1. In de zomer wordt overtollige warmte opgeslagen uit meerdere nabije geothermiesystemen met een productietemperatuur van 80 tot 85°C, en in de winter wordt het hete water teruggewonnen voor verwarming van enkele kassen. De retourtemperatuur in de lauwe bron is dan ongeveer 30 tot 36°C.

Figuur 2.1b toont een schematisch overzicht van de bodemopbouw en de filterdieptes van de twee bronnen en de monitoringsput. Bij de monitoringsput zijn in totaal vijf watervoerende pakketten (WVP's) doorboord tot een diepte van 470 meter. Vanwege de slechtere hydrologische eigenschappen en hoge methaan concentratie in het 5^e WVP, is uiteindelijk alleen het 4^e WVP (360-383 m-mv) gebruikt als opslagpakket voor de HTO. Dit watervoerende pakket is een zandige laag behorend tot de Formatie van Maassluis. De lithologie van de drie boringen is te vinden in appendix A.

In de hete en lauwe bron zijn bronfilters geplaatst met een lengte van 16.5 m aan de bovenkant van het opslagpakket. Verder zijn zowel in de monitoringsput als in de omstorting van de hete en lauwe bron peilbuizen geplaatst in het opslagpakket met peilfilters van 2 meter lang (W-F4, K-F4 en MP-F4). Daarnaast zijn ook in een aantal van de bovenliggende watervoerende lagen peilbuizen geplaatst (F1, F2 en F3; zie Figuur 1). In de monitoringsput zijn daarnaast ook twee filters geplaatst in het 5^e WVP, waarvan er één inmiddels is gedempt vanwege lekkage (MP-F5). Het bestaan van dit lek, waardoor grondwater vanuit het 5^e naar het 4^e WVP heeft kunnen stromen, werd ontdekt in april/mei 2021. Om het lek te verhelpen is de betreffende monitoringsbuis afgedicht. Peilbuizen F2 en F3 zijn aangelegd in respectievelijk de boven- en onderkant van een zeer dikke en goed doorlatende zandlaag van de Peize-Waalre Formatie (3^e WVP), gelegen boven de afsluitende kleilaag van het opslagpakket. In deze studie is de grondwater kwaliteit van deze zandlaag, en veranderingen ten gevolge van opwarming vanuit de hete en lauwe bronnen, onderzocht.



Figuur 1. A (boven) Satellietfoto van de kas met daarnaast de locaties van de HTO-bronnen en de monitoringsput (Bron: Oerlemans et al., 2022). Note: In eerste instantie werd de hete bron 'warme bron' genoemd en de lauwe bron 'koude bron'. B. (onder) Schematisch overzicht van bodemopbouw en de putafwerking van de grondwaterputten bij het HTO-systeem in Middenmeer (Bron: Oerlemans et al., 2022).

2.2 Bemonstering en analysemethoden

Voor deze studie zijn de peilbuisfilters op een diepte van 80 meter (F2) en 220 meter (F3), boven- en onderin in de Peize-Waalre zandlaag, bij de monitoringsput (MP), de hete bron (W) en de lauwe bron (K) bemonsterd¹. Deze filters bij de verschillende putten bieden de mogelijkheid om de impact van hetere bronnen op grondwaterkwaliteit in bovenliggende lagen te onderzoeken. De bemonsteringen zijn uitgevoerd door IF technology.

Bedrijfsvoering en monitoring

In 2019 is de monitoringsput gerealiseerd en zijn meerdere referentiebemonsteringen gedaan. In 2020 zijn de bronnen geboord en in maart 2021 zijn referentiebemonsteringen uitgevoerd op het grondwater bij de hete bron, de lauwe bron en de monitoringsput. Deze bemonsteringen zijn noodzakelijk om een beeld te krijgen van de natuurlijke samenstelling van het grondwater in het opslagpakket. Vervolgens is in mei 2021 het systeem officieel in gebruik genomen en werd begonnen met het 'laden' van de hete bron (opslaan van warmte). Op dit moment (Q1 2026) wordt er voor de 5^e keer ontladen en is het systeem dus al bijna 5 jaar operationeel.

De bemonsteringen voor dit onderzoek hebben plaatsgevonden op 3 en 4 december 2024 net na het vierde laadseizoen, op 8 mei 2025 net na de vierde productieperiode, en op 25 juni 2025 aan het eind van een rustperiode vlak voor aanvang van een volgende laadperiode (Tabel 1).

Filters 2 en 3 in de peilbuis bij de monitoringsput zijn bij elke monitoringsronde bemonsterd. Daarnaast zijn F2 en F3 ook bij de hete en lauwe bron bemonsterd tijdens de eerste bemonstering op 18 december 2024. Op de overige twee bemonsteringsmomenten zijn behalve de monitoringsput alleen W-F3 en K-F3 bemonsterd. Zie tabel 1 voor een overzicht van de bemonsteringen. De bemonstering in de peilbuizen vond plaats door middel van een slangenpomp op 10 meter diepte na eerst driemaal het watervolume in de peilbuis te hebben opgepompt om deze te verversen. Tijdens oppompen zijn de temperatuur, zuurstofconcentratie, pH en conductiviteit direct in het veld gemeten. Vervolgens zijn alle monsters geanalyseerd op hoofd- en sporenelementen, alkaliniteit en opgelost organisch koolstof (DOC) door SGS Environmental Analytics. De gassamenstelling is gemeten door Isolab. De resultaten van de chemische analyses zijn weergegeven in appendix B en C. Bij het grootste deel van de monsters zijn ook microbiologische metingen uitgevoerd. Daarbij is de concentratie ATP bepaald (adenosinetrifosfaat) en daarnaast is het DNA uit de monsters geïsoleerd en geanalyseerd met Next Generation Sequencing (NGS).

Tabel 1. Overzicht van genomen monsters binnen KEEN, en de 2 referentie monsters uit F2 en F3 van de monitoringsput in 2021. T(heet) en T(lauw) geven de gemiddelde injectietemperatuur in de hete en lauwe bron tijdens de betreffende fase.

Bemonstering	T(heet)	T(lauw)	K-F2			K-F3		
			Lauw	Monitoring	Heet	Lauw	Monitoring	Heet
0 Baseline (2021)* Referentie	-	-						
1 3 en 4 dec 2024 na 4e laadfase	80.2°C	33.1°C						
2 8 mei 2025 na 4e ontladefase	59.2°C	36.4°C						
3 25 juni 2025 voor 5e laadfase	-	-						

*Voor de referentie bemonstering zijn destijds geen DNA-analyses uitgevoerd. Ook zijn er geen referentiemetingen gedaan voor F2 en F3 in de hete en lauwe bron.

¹ Ten tijde van de realisatie van de HTO werd de hete bron de warme (W) put genoemd en de lauwe bron werd koude (K) put genoemd. Tegenwoordig spreken we van hete en lauwe bron.

ATP is een maat voor de activiteit van de aanwezige microbiologische populatie. Een hoger ATP-gehalte geeft aan dat de populatie actiever is. Met NGS kan de microbiële populatie van het grondwater (actieve en 'slapende' populatie) in detail in kaart worden gebracht aan de hand van DNA karakterisatie. Uit de NGS-analyses kunnen vervolgens verschillende resultaten worden gehaald, zoals de relatieve aanwezigheid van bepaalde soorten aan micro-organismen.

3 Thermische effecten

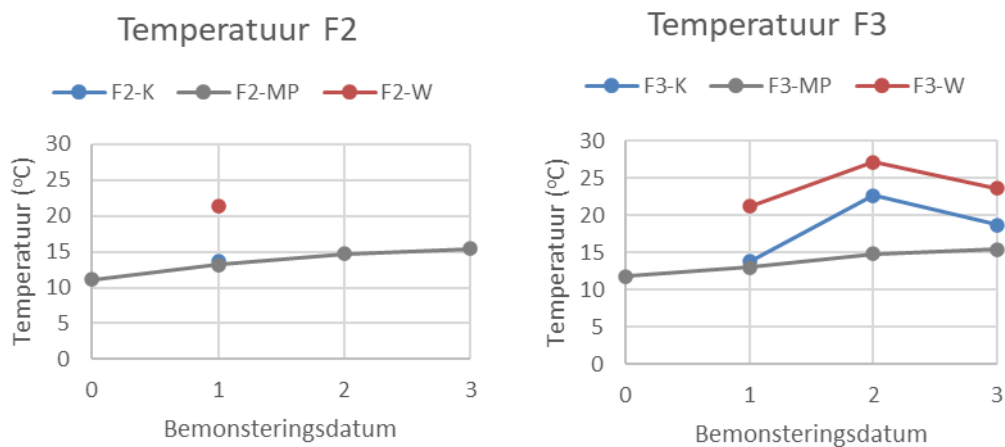
3.1 Temperatuur

Het opslaan van warmte in de ondergrond zorgt voor temperatuurverhoging van grondwater en sediment. De temperaturen van het geïnjecteerde water bij zowel de hete als de lauwe bron zijn hoger dan die van het natuurlijke grondwater. Afhankelijk van de laad/ontlaadperioden, vindt directe opwarming plaats door injectie in het opslagpakket bij de hete en lauwe bronnen. Daarnaast wordt bij een HTO niet alle warmte teruggewonnen die geïnjecteerd wordt, waardoor restwarmte zich opstapelt en het thermisch beïnvloede gebied, en daarmee ook de terugwin efficiëntie, jaarlijks groter wordt (Schout et al. 2023, Beernink et al., 2020). Verder kan de warmte zich door warmtegeleiding vanuit de putbuis lateraal naar de ondiepere lagen verspreiden. Deze warmte kan zich verder verspreiden door conductie, en is afhankelijk van de temperatuurgradiënt, de opbouw van de ondergrond, en de thermische geleidbaarheid. Ook kan de warmte zich verspreiden door advectie via stromend grondwater. De advectiesnelheid van het water kan hoger zijn dan de warmteverspreiding door advectie omdat de warmte ook deels wordt afgestaan aan de korrelmatrix. De stroming van het verwarmde water door de ondergrond is niet op alle plekken even snel door de heterogene structuur van de ondergrond, met afwisselingen van grover en fijnere sedimenten, wat leidt tot een verspreid grensvlak. Horizontaal is de warmteverspreiding doorgaans groter dan verticaal, omdat de (verticale) stroomsnelheden in kleilagen normaliter geringer zijn dan de (horizontale) stroomsnelheden in watervoerende pakketten.

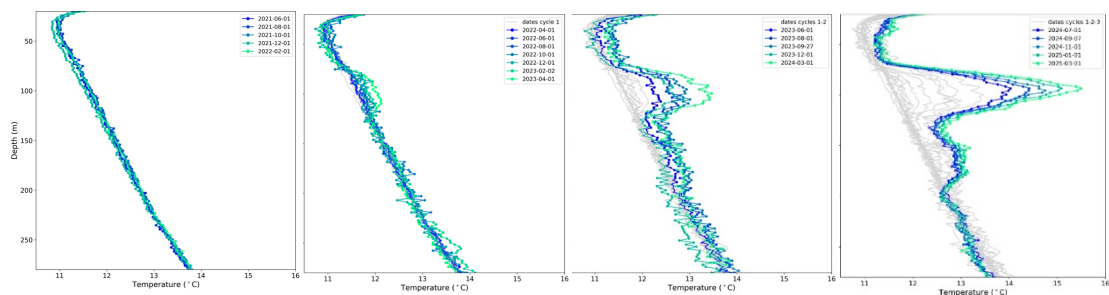
De temperaturen van het bemonsterde grondwater zijn direct tijdens bemonstering in het veld gemeten. Deze waarden geven slechts een momentopname van een bepaald volume aan grondwater onttrokken uit het sediment. Bovendien kan bij de veldmeting van het bemonsterde grondwater de temperatuur al iets afgekoeld zijn tijdens het oppompen. Bij interpretatie van deze waarden moet dit in het achterhoofd gehouden worden. Verder vindt monitoring van de temperatuur in de ondergrond plaats in alle drie de putten door middel van DTS-techniek ('Distributed Temperature Sensing') (Dinkelman et al., 2022). De glasvezelkabel loopt bij elke put naar beneden en weer naar boven, en meet elke 10 minuten op elke 2 m langs de kabel. De beschikbare DTS-metingen gaan tot april 2025 en zijn dus alleen beschikbaar voor de eerste meetronde. Bij de monitoringsput was de temperatuur van de grondwatermonsters (F2: 13.2°C, F3: 13°C) ongeveer gelijk aan die gemeten met DTS (F2: 13.1°C, F3: 12.8°C). Voor de lauwe bron was er een lichte afkoeling zichtbaar van het grondwatermonster (13.7°C) ten opzichte van de DTS-meting (14.6°C). Bij de hete bron was de grondwatertemperatuur bij F2 en F3 21.2°C terwijl de DTS-meting een temperatuur van 29°C aangaf op 79 m diepte en 25°C op 220 m diepte.

Bij F2 van de hete en de lauwe bronnen is slechts één keer gemeten, namelijk bij meetronde 1 net na het ontladen. Het monster uit de hete bron is met 21.3°C een stuk warmer dan die uit de lauwe bron, die met 13.7°C dicht bij de temperatuur uit MP-F2 ligt (13.2°C) (Figuur 2). Dit ligt in de lijn der verwachting, gezien de hoge watertemperatuur in de hete bron tijdens het laden en de veel lagere temperatuur in de lauwe bron (tabel 1). Ook bij F3 ligt de temperatuur van het monster uit de hete bron altijd boven die uit de lauwe bron. Voor F3 is te zien dat de temperatuur uit zowel de hete als de lauwe bron het koelst was tijdens de eerste meting, het warmst bij de tweede meting en er tussenin bij de laatste meting aan het eind van de rustperiode (Figuur 2).

Voor de monitoringsput toont de DTS data dat de temperatuur bovenin de dikke zandlaag van de Peize-Waalre Formatie geleidelijk omhoog gaat met een temperatuurpiek rond de ~90 meter diepte (Figuur 3). Deze piek bereikt een opwarming van 4°C na 4 operationele jaren. Een kleinere piek is zichtbaar rond de 150 m diepte (Figuur 3). Vanwege de afwezigheid van kleilagen binnen het dikke zandpakket en de grote afstand tussen de hete bron en de monitoringsput kunnen deze pieken niet veroorzaakt worden door versnelde laterale warmteverplaatsing van de hete bron naar de monitoringsput op deze dieptes ten opzichte van andere dieptes. De meest logische verklaring voor de pieken bovenin het zandpakket is opwaartse stroming van het hete water rondom de hete bron door de lagere dichtheid (opdrijving), gevolgd door laterale stroming richting de monitoringsput wanneer het de bovenliggende kleilaag op een diepte van ~74 m bereikt. Op de dieptes van de temperatuurpieken, 80-125 en 150 m-mv is ook bij de hete bron grof zand aanwezig, terwijl daartussenin zand in de midden categorie aanwezig is. De duidelijke temperatuurpieken op deze dieptes zijn mogelijk het gevolg van de opdrijving in combinatie met hogere advectiesnelheden op die dieptes. De daadwerkelijke temperatuurontwikkeling in het dikke, ondiepe zandpakket is niet bekend, en hydrothermische modellering zou hier meer inzicht in kunnen geven. In ieder geval kunnen we aannemen dat er, met name rondom de hete bron maar in mindere mate rondom de lauwe bron, sprake is van opwarming tijdens laden en ontladen, en gedeeltelijke afkoeling door warmteverspreiding tijdens rustperiodes. De temperatuuroptename in het bovenste deel bij de monitoringsput geeft in ieder geval een sterke indicatie dat progressieve opwarming tussen de hete bron en monitoringsput plaatsvindt.



Figuur 2. Temperatuur van het grondwater op de verschillende bemonsteringsdata in filters 2 (80 m-mv) (links) en 3 (220 m-mv) (rechts) bij de hete bron (rood), lauwe bron (blauw) en bij de monitoringsput (grijs).

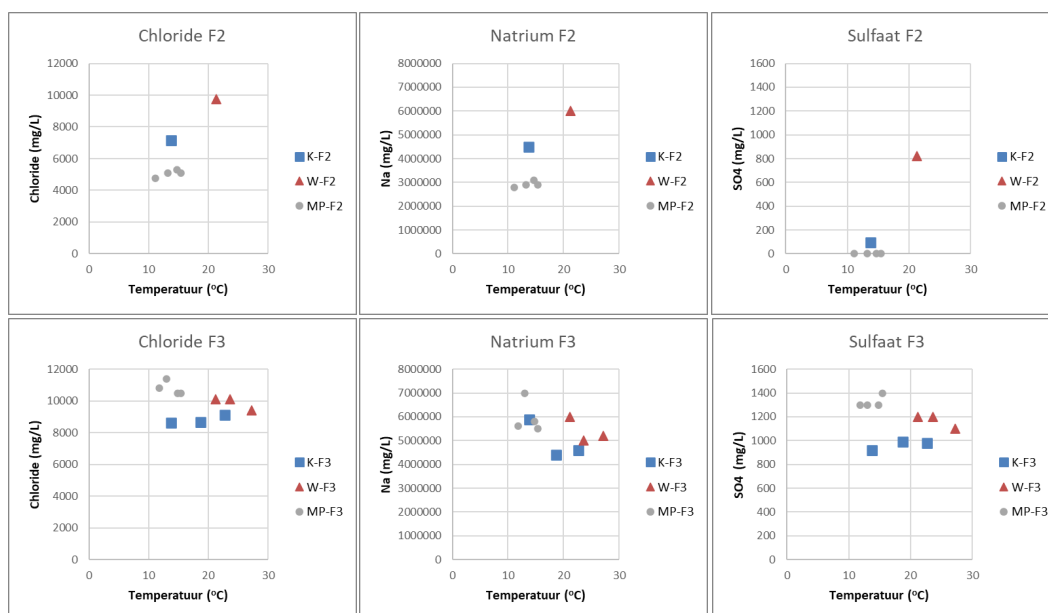


Figuur 3. Diepteprofiel van de temperatuur langs de bovenliggende zandlaag in monitoringsput door de jaren heen, gemeten met DTS (Distributed Temperature Sensing). Bron: TKI HTO-PEN, eindrapportage 2026.

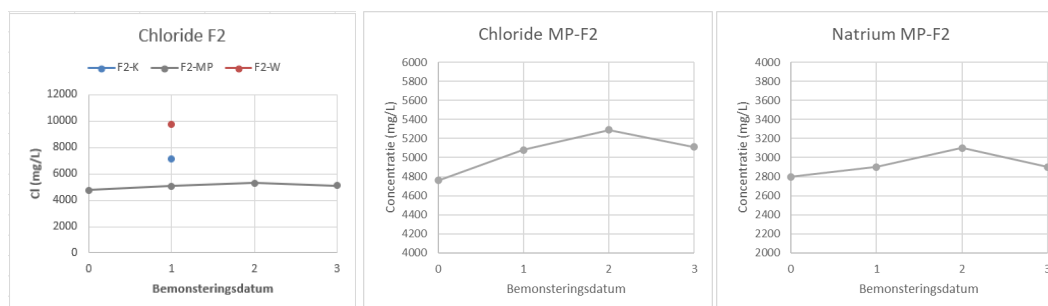
4 Chemische effecten

4.1 Grondwatersamenstelling

Een volledig overzicht van de resultaten van de geochemische grondwateranalyses is te vinden in appendix B. De grondwaterchemie bij F2, op een diepte van circa 80 m, vertoont duidelijke verschillen tussen de drie putten. De concentraties chloride, natrium, kalium en sulfaat zijn het hoogst in de hete bron, gemiddeld in de lauwe bron en het laagst in de monitoringsput (Figuur 4).



Figuur 4. Concentraties van chloride, natrium en sulfaat in grondwater bij filters 2 (80 m-mv) en filters 3 (220 m-mv) als functie van de temperatuur bij de hete bron (rode driehoeken), lauwe bron (blauwe vierkanten) en bij de monitoringsput (grijze cirkels).



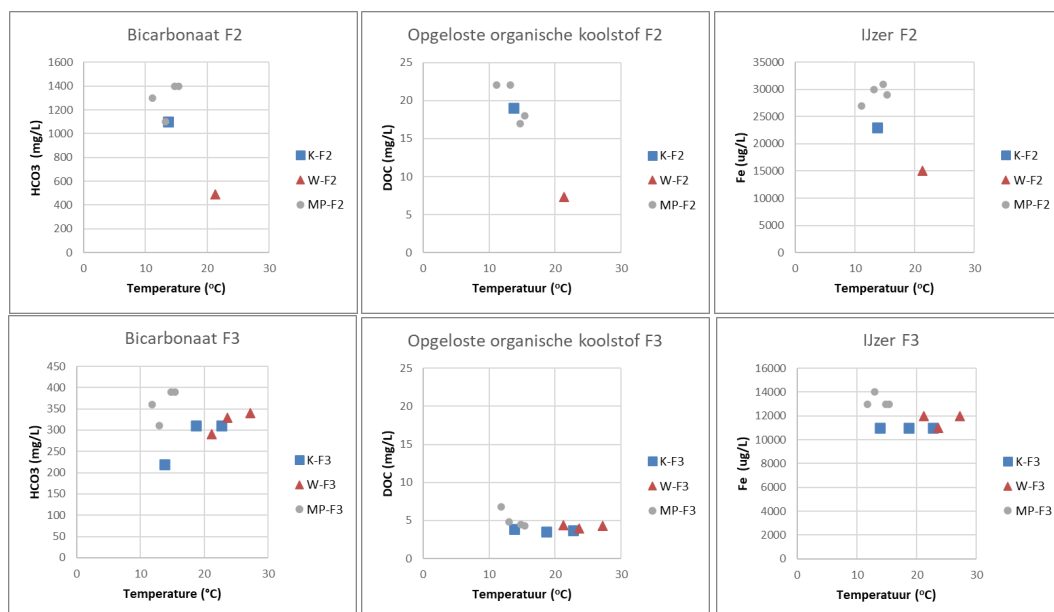
Figuur 5. Chloride en natrium concentraties op de 3 bemonsteringsdata in 2024-2025 (1, 2, 3) en de nulmeting in 2022 (0).

De sulfaatgehalten in de monitoringsput liggen vrijwel op nul. In de monitoringsput vertonen chloride en natrium een geringe, maar geleidelijke toename in concentratie in de tijd (Figuur 5).

Bij F3, op een diepte van circa 220 m, is het grondwater zouter dan bij F2, met hogere concentraties chloride, natrium, kalium en sulfaat in alle putten. De verschillen tussen de putten op deze diepte zijn relatief klein; de concentraties zijn iets hoger in de monitoringsput, iets lager in de hete bron en het laagst in de lauwe bron (Figuur 4).

Omdat chloride geen reacties aangaat geeft dit element vaak een goede indicatie voor eventuele menging van water met verschillende samenstellingen. In dit geval bekrachtigt de hoge chlorideconcentratie in W-F2 de theorie van opdrijving van warm water rondom de hete bron. Ook de verhoogde kalium- en sulfaatconcentraties in W-F2 kunnen toegeschreven worden aan opdrijving, gevolgd door menging. Een dergelijke trend lijkt ook zichtbaar bij de lauwe bron, maar in mindere mate.

Bicarbonaat, opgelost organisch koolstof (DOC) en ijzer vertonen bij F2 een tegengesteld patroon ten opzichte van chloride (Figuur 6). Bij F3 liggen de concentraties van deze stoffen aanzienlijk lager dan bij F2. Bij F2 zijn de concentraties het laagst in de hete bron en het hoogst in de monitoringsput. Op de diepte van F3 zijn de concentraties van deze stoffen tussen de verschillende putten vergelijkbaar. De lage concentraties van deze stoffen in W-F2 en in mindere mate in K-F2 bekrachtigen wederom de opdrijving bij de hete en mogelijk ook de lauwe bron.

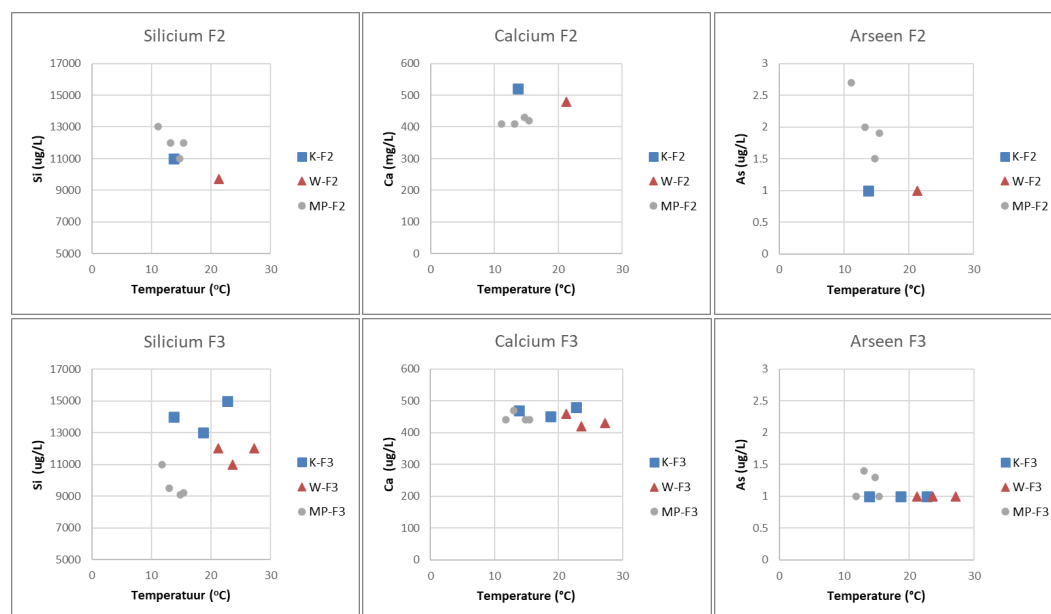


Figuur 6. Concentraties van bicarbonaat, opgelost organisch koolstof en ijzer bij filters 2 (80 m-mv) en filters 3 (220 m-mv) als functie van de temperatuur bij de hete bron (rode driehoeken), lauwe bron (blauwe vierkanten) en bij de monitoringsput (grijze cirkels).

Siliciumconcentraties (Figuur 3.6) zijn voor F2 vrijwel gelijk in de drie putten (11-13 mg/L), op een kleine verlaging van de concentratie bij de hete bron na (9.7 mg/L). Bij F3, zijn de Si concentraties iets hoger in de hete en lauwe bron (11-15 mg/L) dan in de monitoringsput (9.1-11 mg/L) (Figuur 7). Calcium concentraties zijn ook iets lager in F3 dan F2 maar zijn gelijk in alle putten. In F2 zijn ze hoger voor de hete en lauwe bron.

De mangaanconcentraties bij F2 zijn stabiel in alle putten, met waarden van ongeveer 450 µg/L. Bij F3 liggen de mangaangehalten iets hoger, waarbij de monitoringsput de hoogste concentraties vertoont (800–900 µg/L), terwijl de hete en lauwe bronnen waarden rond 600 µg/L bevatten. Concentraties van sporenelementen zoals Co, Cu, Pb, Cd, Ni, Mo, V en Zn blijven in alle monsters onder de detectielimiet. Voor arseen geldt dat in de hete en lauwe bron bij zowel F2 als F3 alle concentraties onder de detectielimiet liggen (<1 µg/L), terwijl in grondwater bij F2 en F3 van de monitoringsput deze net boven de detectielimiet liggen (F2: gem. 2 ± 0.5 µg/L, F3: gem. 1.2 ± 0.2 µg/L; Figuur 7).

Methaanconcentraties zijn hoger in MP-F2 (2.3 ± 1.0 mg/L) dan in MP-F3 (0.05 ± 0.05 mg/L). Bij F2 van de hete en lauwe bron zijn de methaanconcentraties veel lager dan bij de monitoringsput met respectievelijk 0.01 mg/L en 0.03 mg/L. Bij K-F3 (0.05 ± 0.02 mg/L) en W-F3 (0.01 ± 0.002 mg/L) zijn de methaanconcentraties gemiddeld gezien gelijk of lager dan die bij MP-F3. Bij K-F3 lijkt er door de tijd heen wel een stijging te zijn van 0.03 mg/L naar 0.08 mg/L.



Figuur 7. Silicium, calcium en arseen concentraties in het grondwater bij filters 2 (80 m-mv) en filters 3 (220 m-mv) bij de hete bron (rode driehoeken), lauwe bron (blauwe vierkanten) en bij de monitoringsput (grijze cirkels). Arseen concentratie van 1 µg/L betekent beneden detectie limiet.

4.2 Chemische effecten - Opdrijving

Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven, lijkt er opdrukking plaats te vinden rondom de hete bron, waarbij door de verhoogde temperatuur het zoutere, diepe grondwater bij W-F3 zich naar boven verplaatst richting W-F2. Er is tussen deze twee filters geen noemenswaardige scheidende laag aanwezig waardoor het water zich tussen deze dieptes kan verplaatsen zonder hydraulische hindernis. Hierdoor zijn de Cl, Na, K en S concentraties bij W-F2 flink omhoog gegaan en bicarbonaat, DOC en Fe omlaag. Om de menging van het grondwater te kunnen kwantificeren gebruiken we de verschillen in chlorideconcentraties in het grondwater bij F2 en F3. Hierbij moet opgemerkt worden dat voor K-F2 en W-F2 slechts 1 meting beschikbaar is, waardoor de berekende mengverhouding slechts een indicatie geeft.

Ervan uitgaande dat chloride zich conservatief gedraagt (geen reacties aangaat) en de concentratie bij de monitoringsput representatief is voor de natuurlijke samenstelling, bevat het grondwater bij W-F2 ongeveer 82% diep, zout grondwater afkomstig van 220 m-mv en 18% van het oorspronkelijke grondwater dat aanwezig was op 80 m-mv. Voor Na, Si, bicarbonaat, Ba en in lichte mate Ca zijn de gemeten waarden hoger dan berekend met dit mengpercentage (Tabel 2), wat zou kunnen aangeven dat andere processen de concentraties van deze elementen verhoogd hebben. Dus ondanks dat de concentratie van bicarbonaat in W-F2 flink lager is dan MP-F2 zijn ze nog lager dan verwacht op basis van de mengverhouding.

Voor sulfaat, kalium en magnesium is dit precies andersom; de concentratie in W-F2 is flink hoger dan MP-F2 maar flink lager dan verwacht op basis van de mengverhouding (Tabel 2). Een verhoging, dan wel verlaging van de concentratie ten opzichte van de berekende waarde op basis van het mengpercentage, kan een indicatie zijn dat er andere processen een rol spelen dan menging, bijvoorbeeld ion-uitwisseling of neerslag/oplossing van mineralen of redoxreacties.

De monsters uit de lauwe bron laten een gelijke trend zien als de hete bron (Tabel 2). Op basis van de chloridegehalten zou bij K-F2 36% diep, zout grondwater gemengd zijn met 64% ondiep, minder zout water. De gemeten bariumconcentratie is zeer hoog, hoger dan berekend op basis van menging en zelfs flink hoger dan de gemeten waarden bij MP-F2.

Tabel 2. Overzicht van gemeten en berekende waarden voor een selectie van elementen. Oranje en groene gekleurde elementen: gemeten waarden in K-F2 en W-F2 respectievelijk hoger en lager dan MP-F2. Oranje en groen gekleurde gemeten waarden: waarden in K-F2 en W-F2 respectievelijk hoger en lager dan berekend op basis van de mengverhouding.

		K-F2	W-F2	MP-F2	MP-F3	
	% diep water	36%	82%	Gemiddeld		Opmerking
Chloride mg/l	gemeten	7140	9750	5060	10800	Gemeten waarden gebruikt om mengverhouding te berekenen
	berekend	7126	9767			
Natrium mg/l	gemeten	4500	6000	2925	5975	Gemeten waarden hoger dan MP-F2, en hoger dan berekend
	berekend	4023	5426			
Silicium mg/l	gemeten	11	11	12	10	Gemeten waarden minimaal verlaagd tov MP-F2 en licht hoger dan berekend
	berekend	10	10			
Calcium mg/l	gemeten	520	480	418	448	Gemeten waarden hoger dan MP-F2, en minimaal verhoogd tov berekend
	berekend	428	442			
Bicarbonaat mg/l	gemeten	1400	780	1725	443	Gemeten waarden lager dan MP-F2, hoger dan berekend
	berekend	1263	673			
Sulfaat mg/l	gemeten	96	820	2	1325	Gemeten waarden hoger dan MP-F2, lager dan berekend
	berekend	478	1087			
Ijzer mg/l	gemeten	23	15	29	13	Gemeten waarden lager dan MP-F2, even hoog als berekend
	berekend	23	16			
Kalium mg/l	gemeten	15	89	11	148	Gemeten waarden hoger dan MP-F2, lager dan berekend
	berekend	60	123			
Magnesium mg/l	gemeten	280	530	190	738	Gemeten waarden hoger dan MP-F2, lager dan berekend
	berekend	387	639			
Barium µg/l	gemeten	1300	310	810	155	Gemeten waarde bij K-F2 veel hoger en bij W-F2 lager dan MP-F2, beide (veel) hoger dan berekend
	berekend	574	273			

Bij de monsters uit MP-F2 valt ook een lichte stijging in het chloridegehalte te zien in de tijd wat ook veroorzaakt zou kunnen zijn door opdrijving langs de hete bron en zijwaartse stroming naar de nabijgelegen monitoringsput. Echter is tijdens de laatste meting de chlorideconcentratie lager dan ervoor, dus dit effect is niet eenduidig en langere termijn monitoring is nodig om dit effect goed in beeld te krijgen en de temperatuurverhoging door opdrijving te bevestigen.

4.3 Chemische effecten - temperatuur

De menging van het diepe, zoute water met het ondiepe, zoete water en de bijkomende veranderingen in grondwatersamenstelling zijn een indirect effect van de opwarming rondom de hete bron. *Directe* chemische beïnvloeding, chemische reacties veroorzaakt door verhoogde temperaturen, zijn minder goed zichtbaar en lijken beperkt. Per put en per filter zijn er geen significante of eenduidige trends waarneembaar van de concentraties als functie van de in het veld gemeten temperatuur. Wel zijn er verschillen zichtbaar tussen de putten, welke kunnen duiden op temperatuur gedreven chemische reacties. Ook kunnen de gemeten waarden van enkele elementen in K-F2 en W-F2 ten opzichte van de berekende waarde op basis van de mengwaarde een indicatie geven voor chemische effecten.

In F3 zijn in de hete en lauwe bron lagere bicarbonaat en iets verhoogde siliciumconcentraties te zien ten opzichte van de monitoringsput. Dit zou veroorzaakt kunnen zijn door carbonaatneerslag en verwerking van silicaten (Bonte et al., 2014). Carbonaten hebben immers een lagere oplosbaarheid bij hogere temperaturen, terwijl silicaten juist beter oplosbaar zijn en een hogere verwerkingssnelheid hebben bij hogere temperaturen. Ook Ca en Mn hebben een lagere concentratie bij W-F3 ten opzichte van de MP-F3 wat zou kunnen wijzen op neerslag van calciet (CaCO_3) en rhodochrosiet (MnCO_3).

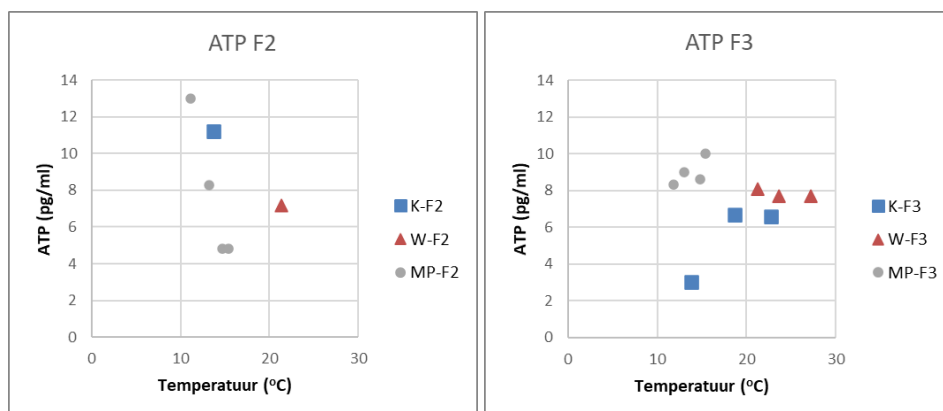
Op de diepte van F2 zou zowel bij de hete als de lauwe bron, op basis van berekende mengverhoudingen voor calcium en bicarbonaat, juist calcietoplossing hebben kunnen plaatsvinden. Oplossing van calciet is echter tegenstrijdig met de verlaagde oplosbaarheid van calciet bij hogere temperaturen.

Sulfaatconcentraties zijn iets lager in de hete en lauwe bron bij F3 in vergelijking met de monitoringsput. Deze zijn ook bij W-F2 lager dan verwacht op basis van de mengverhouding met het diepere water. De lage sulfaatconcentratie zou veroorzaakt kunnen zijn door sulfaatreductie, veroorzaakt door een hogere activiteit van sulfaatreducerende bacteriën wat leidt tot sulfidevorming waarbij, in aanwezigheid van opgelost Fe, ijzersulfides kunnen neerslaan. Dit geeft wellicht ook een verklaring dat arseen lager is bij W-F2 en K-F2 dan bij MP-F2. Arseen staat erom bekend ingebouwd te worden in ijzersulfides (Zhang et al., 2022). IJzer is daarentegen niet lager dan berekend op basis van de mengverhouding. Mogelijk speelt kation-uitwisseling hierbij een rol, waarbij het neergeslagen ijzer aangevuld wordt met desorptie van ijzer. Aangezien K en Mg flink lager zijn dan berekend raken deze elementen mogelijk juist geadsorbeerd, terwijl hoge Na en Ba concentraties op desorptie kunnen wijzen. Het is hierbij bekend dat uitwisselcoëfficiënten temperatuurafhankelijk zijn, ofwel verschuivingen zijn theoretisch mogelijk. Bovendien kunnen ze veroorzaakt worden door de verandering in grondwater samenstelling als gevolg van menging.

Alle zware metalen, zoals Co, Pb, Zn, hebben concentraties onder de detectielimiet. Volgens verschillende studies (o.a. Bonte et al., 2013; Lüders et al., 2020) zou de adsorptie van deze tweewaardige kationen sterker zijn bij hogere temperaturen waardoor een toename door temperatuurverhoging ook niet verwacht wordt.

5 Microbiële effecten

Microben hebben verschillende optimale groeitemperaturen (Dettmer, 2002). Maximale groeisnelheden kunnen worden bereikt rond de optimale temperatuur, terwijl de snelheden snel afnemen bij hogere temperaturen en stoppen onder suboptimale omstandigheden (Mohr en Krawiec, 1980; Huang et al., 2011). Zo zijn er psychrofielen (0-20°C), mesofielen (8-48°C), thermofielen (40-70°C) en hyperthermofielen (65-90°C) soorten (Madigan et al. 2017). In verschillende studies naar de effecten van temperatuursverhoging op de microbiële populatie was er bij een temperatuursverhoging van 10°C naar 25°C tot 45°C een toename te zien van organische koolstof en een sterke toename van mesofiele bacteriële activiteit terwijl het aantal soorten Archaea afnam (Bonte et al., 2013; Bin Hudari 2020; 2022; Metze et al., 2020). In de studie van Bonte et al. (2013) was een verschuiving te zien van ijzerreducerende naar sulfaatreducerende en methanogene omstandigheden. In Schout et al. (2023) werd in het opslagpakket bij HTO Middenmeer (~400 m-mv, T = 40-80°C) een verandering in de microbiële populatie waargenomen waarbij de thermofiele en sporenvormende micro-organismen in relatieve aanwezigheid toenamen.

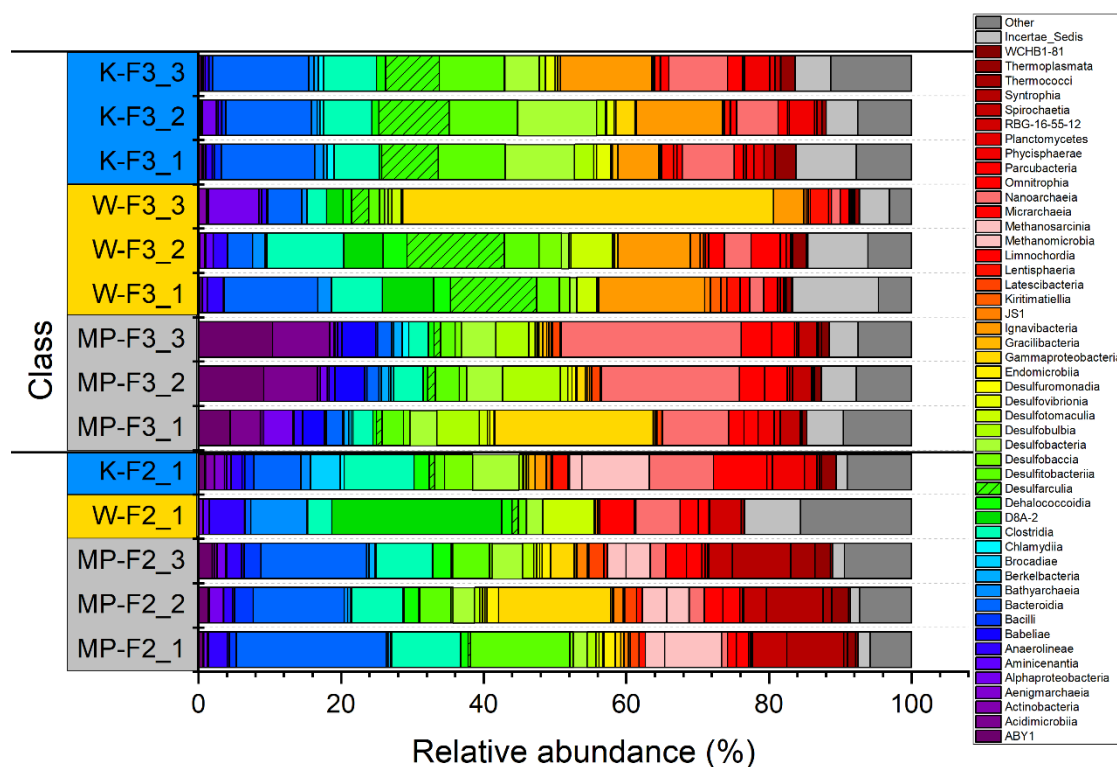


Figuur 8. Gemeten ATP waarden bij F2 (80 m-mv) en F3 (220 m-mv) bij de hete bron (rode driehoeken), lauwe bron (blauwe vierkanten) en bij de monitoringsput (grijze cirkels). ATP staat voor de actieve microbiële populatie.

Voor de monsters genomen in F2 en F3 bij HTO Middenmeer tonen de ATP metingen zeer lage microbiële activiteit (Figuur 8). De waarden zijn dezelfde orde van grootte als gemeten in het opslagpakket van het HTO-systeem (Schout et al. 2023). De meest voorkomende microbiële klassen gemeten in de grondwatermonsters zijn geplot in Figuur 9 (een figuur op genera niveau staat in appendix D). Allereerst is er een verschil te zien tussen de microbenpopulatie op diepte F2 en F3 bij de monitoringsput, waarbij we ervan uitgaan dat deze de natuurlijke populatie tonen en niet of nauwelijks beïnvloed zijn door de lichte temperatuursverhoging. Bij MP-F3 zijn *ABY1*, *Acidimicrobiia*, *Nanoarchaea* dominant, terwijl bij MP-F2 de *Bacteroidia*, *Methanosarcinia*, *Methanomicrobia* en *Syntrophia* meer aanwezig zijn.

Bij de hete bron op zowel de diepte van F2 als F3, valt op dat de thermofiele *D8A-2* relatief meer voorkomt (2-23%) dan in de lauwe en monitoringsputten (max. 0.1%). Hetzelfde geldt voor *Desulfotomaculia*. Op de diepte van F3, is *Ignavibacteria* zowel in de lauwe als de hete bron relatief meer aanwezig ten opzichte van de monitoringsput. Hetzelfde geldt voor *Desulfarculia* en *Bacterioida* (*Roseimarinus*). *Clostridia* (*Anaerocolumna*) is ook relatief meer aanwezig bij de hete en lauwe bron ten opzichte van de monitoringsput. In de lauwe bron, bij zowel F2 als F3 is *Desulfobacteria* relatief meer aanwezig.

Voor *ABY1*, *Acidimicrobiia*, *Nanoarchaea*, *Spirochaetia* en *Babeliae* geldt juist dat ze dominanter zijn in de monitoringsput en relatief minder aanwezig zijn in de lauwe en hete bronnen. Verder is opvallend dat in W-F3-3, MP-F3-1 en MP-F2_2 de *Gammaproteobacteria* een groot percentage uitmaken van de populatie. Hierbij is het genus bij W-F3_3 *Thiomicrospira*, bij MP-F3_1 *Nitrosomonas* en bij MP-F2_2 *Mythylomonas* en *Methylotenera*.



Figuur 9. Samenstelling van de microbiële populatie in grondwater bij F2 en F3 bij de lauwe (K), hete (W) en monitoringsput (MP) weergegeven op klasseniveau. Microbenklassen waarvan de hoeveelheid minder dan 3% waren in alle monsters, zijn gegroepeerd als 'other'.

In de studies van Bin Hudari et al. (2020; 2021) was te zien dat de dominante fylogtypes in een incubatie bij 45°C behoorden tot de ordes *Spirochaetales*, *Clostridiales* en *Bacteroidiales*. Op genusniveau bestonden de leden voornamelijk uit niet-gekweekte leden van de *Spirochaetaceae* en *Desulfotomaculum*. Bij 25°C kwamen de *Ignavibacteria* en *Gammaproteobacteria* meer voor in vergelijking met incubaties bij 12°C.

Ook in deze studie was in grondwater bij de hete bron in zowel F2 als F3 een relatief hogere aanwezigheid van *Desulfotomacula* te zien. De temperatuuroptima tot max. 27,2°C was ook het grootst bij F3 van deze put. *Desulfotomaculum* zijn sporenvormende, sulfaatreducerende bacteriën, die in verschillende omgevingen voorkomen en actief zijn bij verschillende temperaturen, waaronder psychrofile en thermofiele omstandigheden.

Tevens kwam *Bacillota D8A-2* in hogere hoeveelheid voor bij de hete bron. Deze groep wordt in de literatuur voornamelijk beschreven als een thermofiele groep van syntrofe acetaat oxiderende bacteriën (Bin Hudari en Vogt, 2025; Xu et al., 2020). Ook het verhoogde voorkomen van *Ignavibacteria* in de hete en lauwe bron is vergelijkbaar met de studie van Bin Hudari et al. (2020). Een groot verschil is het gedrag van *ABY1*, die bij de lauwe en hete bron juist minder voorkomt dan bij de monitoringsput, terwijl in Bin Hudari et al. (2020) deze groep juist het meest voorkwam bij 25°C. *Thiomicrospira*, die in hoge mate aanwezig was in W-F3_3, is een zwavel-oxiderende chemolithoautotroof.

Op de diepte van F2 maken de methanogenen zo'n 5-10% uit van de totale populatie, maar zijn zo goed als afwezig in de hete bron. Dit komt overeen met het voorkomen van methaan bij MP-F2, terwijl methaan afwezig is bij H-F2. Het feit dat de methaanconcentraties heel laag waren bij K-F2 maar de populatie *methanosarcinia* juist toenam, verdient nadere aandacht. Op de diepte van F3, waar de methaanconcentraties zeer laag zijn, is de methanogene groep nagenoeg afwezig.

Samenvattend, is er een verschuiving gaande binnen de microbenpopulatie. De methanogene microben verdwijnen bij de hete bron, waarschijnlijk omdat de temperatuur te hoog is. Verder zien we een verschuiving binnen de sulfaat reducerende bacteriën. Specifiek voor F3 geldt dat de *Nanoacrchaea* niet goed lijken te gedijen bij de verhoogde temperaturen bij de hete bron. Hetzelfde geldt voor *ABY1* en de *Acidimicrobiia*. De anaerobe heterotroof *Bacteroidia Roseimainus* lijkt juist goed te gedijen bij de verhoogde temperaturen bij de lauwe en hete bron, terwijl *Bacteroidia Incertae Sedis* vrijwel volledig verdwijnt bij de lauwe en hete bron (F2). Er zijn verder geen aanwijzingen dat de microbiële activiteit door de verhoogde temperatuur wordt gestimuleerd, want de ATP niveaus zijn niet hoger bij de lauwe of hete bron ten opzichte van de monitoringsput.

6 Conclusies

Op basis van drie bemonsteringsrondes in 2024-2025 is onderzocht wat de eventuele effecten van de HTO in Middenmeer zijn op de grondwaterkwaliteit van watervoerende pakketten boven het opslagpakket. Hierbij kan het volgende worden geconcludeerd:

Er is een lichte temperatuurverhoging in ondieper grondwater waargenomen.

Op 80 meter onder maaiveld is bij de monitoringsput een verhoging van 4°C waargenomen. Deze put ligt 30 meter van de hete bron en wordt hoogst waarschijnlijk beïnvloed door conductie en opdrijving van heet grondwater rondom de hete bron.

Veranderingen in zoutgehalte op 80 meter diepte bij de hete bron door opdrijving.

Opwarming rondom de hete bron en in mindere mate rondom de lauwe bron lijken opdrijving van het warme water te veroorzaken, waardoor het op diepte aanwezige zoute grondwater (~200 m diepte) naar het oorspronkelijk minder zoute grondwater op 80 meter diepte stroomt. Hierdoor worden de zoutconcentraties van het ondiepe water hoger, terwijl de alkaliniteit en opgelost organische koolstof gehalte juist lager worden. Deze (indirecte) effecten van opwarming rondom de hete bron zijn nog niet eenduidig waargenomen bij de monitoringsput.

Mogelijke chemische reacties toe te schrijven aan temperatuurverhoging.

De *directe* chemische beïnvloeding door verhoogde temperaturen is beperkt. Onderin bij de hete en lauwe bron zijn indicaties voor kalkneerslag (relatief lage bicarbonaat, calcium en mangaan), verhoogde snelheid van silicaatverwerking (lichte verhoging van silicium) en sulfaatreductie wellicht gevolgd door neerslag van ijzersulfides met opname van arseen (relatief lage sulfaat-, ijzer- en arseenconcentraties). De sulfaatreductie zou wijzen op verhoogde activiteit van sulfaatreducerende bacteriën. In het ondiepe deel van de zandlaag zijn indicaties voor kalkoplossing bij de hete en lauwe bron, afgeleid uit de mengverhouding en verwachte kalkconcentraties. Kationuitwisseling vindt mogelijk plaats tussen natrium, ijzer en barium enerzijds (desorptie) en kalium en magnesium (adsorptie) anderzijds. Concentraties van sporenelementen zijn allen onder detectielimiet voor zowel de monitoringsput, de lauwe en hete bron. Er treedt dus geen noemenswaardige mobilisatie van de betreffende sporenelementen op.

Bij de hete bron is een verandering van microbiologische samenstelling zichtbaar naar meer thermofiele soorten maar er is geen verhoogde activiteit.

De samenstelling van microbiële gemeenschappen is verschillend bij F2 en F3, wat wordt veroorzaakt door het voorkomen van methaan bij F2 en de afwezigheid daarvan op de diepte van F3. Bij F2 zijn er zowel sulfaatreducerende als methaanoxiderende micro-organismen aanwezig, wat overeenkomstig is met de chemische samenstelling van het water. Bij de hete en de lauwe bron is er een verschuiving gaande binnen de populatie sulfaatreducerende bacteriën naar meer mesofiele groepen. Er zijn echter geen aanwijzingen dat de microbiële activiteit door de verhoogde temperatuur wordt gestimuleerd, want de ATP niveaus zijn zeer laag (<5–6 ng/L) onafhankelijk van de temperatuur.

Aanbevelingen voor site-operator, onderzoek en beleid

De bevindingen van dit onderzoek bevestigen de waarde van lange-termijn monitoring bij HTO systemen, gezien sommige processen, zoals de langzame opdriving bij de hete bron, pas na meerdere jaren zichtbaar zijn. Het is daarom ook zinvol om, naast metingen in het opslagaquifer, ook metingen te blijven doen in bovenliggende pakkettenlagen waar geen menging plaatsvindt door het rondpompen van water, zoals gebeurt in het opslagpakket.

In de ondiepere lagen bij HTO Middenmeer zijn de effecten op de waterkwaliteit door directe opwarming minimaal gebleken. Er zijn echter indicaties voor opdriving van opgewarmd water rondom de hete en in mindere mate de lauwe bron, waarbij het effect op temperatuur meetbaar is bij de monitoringsput, maar de veranderingen in grondwatersamenstelling (nog) niet. In het geval van HTO Middenmeer vindt dit plaats in een zeer dik, zandig pakket waarin geen waterscheidende lagen aanwezig zijn, maar er wel verschillen in grondwater-samenstelling zijn met de diepte. Hoewel verschillend in samenstelling gaat het in beide gevallen om zout water wat niet geschikt zou zijn voor drinkwaterwinning.

Voor locaties waar ondieper grondwater wel zoet is, is het belangrijk om de potentiële effecten van opwarming rondom de hete bron in kaart te brengen. Zoet grondwater wordt vaak gebruikt voor andere doeleinden, of het wordt als strategische grondwatervoorraad aangemerkt. Wanneer een HTO systeem een risico tot verzilting met zich meebrengt door menging met dieper en zouter water binnen hetzelfde zandpakket kunnen mitigerende maatregelen genomen worden om dit risico weg te nemen. Voldoende afstand van de bronnen tot de zoetwater zone of extra bronisolatie om opwarming van omliggend sediment te minimaliseren behoren tot de mogelijkheden. De risico's en benodigde maatregelen zijn sterk locatie specifiek en dienen om die reden voor nieuwe HTO systemen onderzocht te worden.

Vervolgonderzoek

Door de monitoring in het ondiepe zandpakket te verlengen kunnen de effecten van progressieve menging bij alle drie de putten gevolgd worden. Aanvullend zou reactief transport modellering de opwarming, opdriving en menging in 3D in kaart kunnen brengen om de sterke indicaties van menging en de minder sterke indicaties van temperatuur geïnduceerde geochemische en biochemische reacties te ondersteunen. Hierdoor zal een beter beeld ontstaan van de potentiële effecten van MT- en HT-OBES op de ondiepere ondergrond en grondwaterkwaliteit, en juist de ondiepe effecten zijn belangrijk wanneer sprake is van toenemende activiteit in de ondergrond en mogelijk conflicterende belangen in het relatief ondiepe domein.

Ondertekening

Auteur

Valid Signed by Alwina Hoving
on 2026-04-07 14:51:10

Dr. A.L. Hoving
Geochemist/Geomodeller

Tweede lezer

Valid Signed by Max de Kruijf
on 2026-04-07 14:44:34

M. de Kruijf MSc
Scientist Innovator

Autorisatie vrijgave

Valid Signed by Yvonne Schavemaker
on 2026-04-07 14:18:19

Y.A. Schavemaker MSc
Research Manager

Referenties

Beernink, S., Bloemendal, M., and Hartog, N (2020). C2 - Prestaties en Thermische Effecten van Ondergrondse Warmteopslagsystemen. WINDOW fase 1, Rapport KWR 2020.146

Bin Hudari, M.S., Vogt, C. and Richnow, H.H., 2020. Effect of temperature on acetate mineralization kinetics and microbial community composition in a hydrocarbon-affected microbial community during a shift from oxic to sulfidogenic conditions. *Frontiers in Microbiology*, 11, p.606565.

Bin Hudari, M.S., Vogt, C. and Richnow, H.H., 2022. Sulfidic acetate mineralization at 45° C by an aquifer microbial community: key players and effects of heat changes on activity and community structure. *Environmental Microbiology*, 24(1), pp.370-389.

Bin Hudari, M.S.B. and Vogt, C., 2025. Sulfidic toluene mineralization by aquifer microbial communities at different temperatures. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(8), p.fiaf079.

Bonte, M., Röling, W.F., Zaura, E., van der Wielen, P.W., Stuyfzand, P.J. and van Breukelen, B.M., 2013. Impacts of shallow geothermal energy production on redox processes and microbial communities. *Environmental science & technology*, 47(24), pp.14476-14484.

Bonte, M., Stuyfzand, P.J. and Breukelen, B.M.V., 2014. Reactive transport modeling of thermal column experiments to investigate the impacts of aquifer thermal energy storage on groundwater quality. *Environmental science & technology*, 48(20), pp.12099-12107.

Brons, H.J., Griffioen, J., Appelo, C.A.J. & Zehnder, A.J.B. (1991). (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Res.* (25), 729-736.

Dinkelman, D., Carpentier, S., Koenen, M., Oerlemans, P., Godschalk, B., Peters, E., Bos, W., Vrijlandt, M., Van Wees, J.D., (2022). High-temperature aquifer thermal energy storage performance in Middenmeer, the Netherlands: thermal monitoring and model calibration. In *Proceedings of the European Geothermal Congress* (Vol. 2022).

Dinkla, I., Lieten, S., Hartog, N., & Drijver. (2012). *Meer met bodemenergie: Rapport 3 & 4 - Effecten op de ondergrond*. <https://soilpedia.nl/wp-content/uploads/Rapport-3-4-Effecten-op-de-ondergrond-Meer-met-Bodemenergie.pdf>

Koenen, M., (2023) Carbonate scaling and water treatment. Report WarmingUP. <https://www.warmingup.info/documenten/carbonate-scaling-and-water-treatment.pdf>

Lüders, K., Dahmke, A., Fiedler, M. and Köber, R., 2020. Temperature influence on mobilisation and (re) fixation of trace elements and heavy metals in column tests with aquifer sediments from 10 to 70 C. *Water Research*, 169, p.115266.

Metze, D., Popp, D., Schwab, L., Keller, N.S., da Rocha, U.N., Richnow, H.H. and Vogt, C., 2021. Temperature management potentially affects carbon mineralization capacity and microbial community composition of a shallow aquifer. *FEMS microbiology ecology*, 97(2), p.fiaa261.

Oerlemans, P., Drijver, B., Koenen, M., Koornneef, J., Dinkelman, D., Bos, W. and Godschalk, B., 2022. First field results on the technical risks and effectiveness of mitigation measures for the full scale HT-ATES demonstration project in Middenmeer. In *Proceedings of the European geothermal congress*.

Schout, G., Hartog, N. (2020) Effecten van hoge temperatuur warmteopslag op grondwaterkwaliteit. WINDOW fase 1 (C3). <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---c3---effecten-van-hoge-temperatuur-warmteopslag-op-grondwaterkwaliteit.pdf>

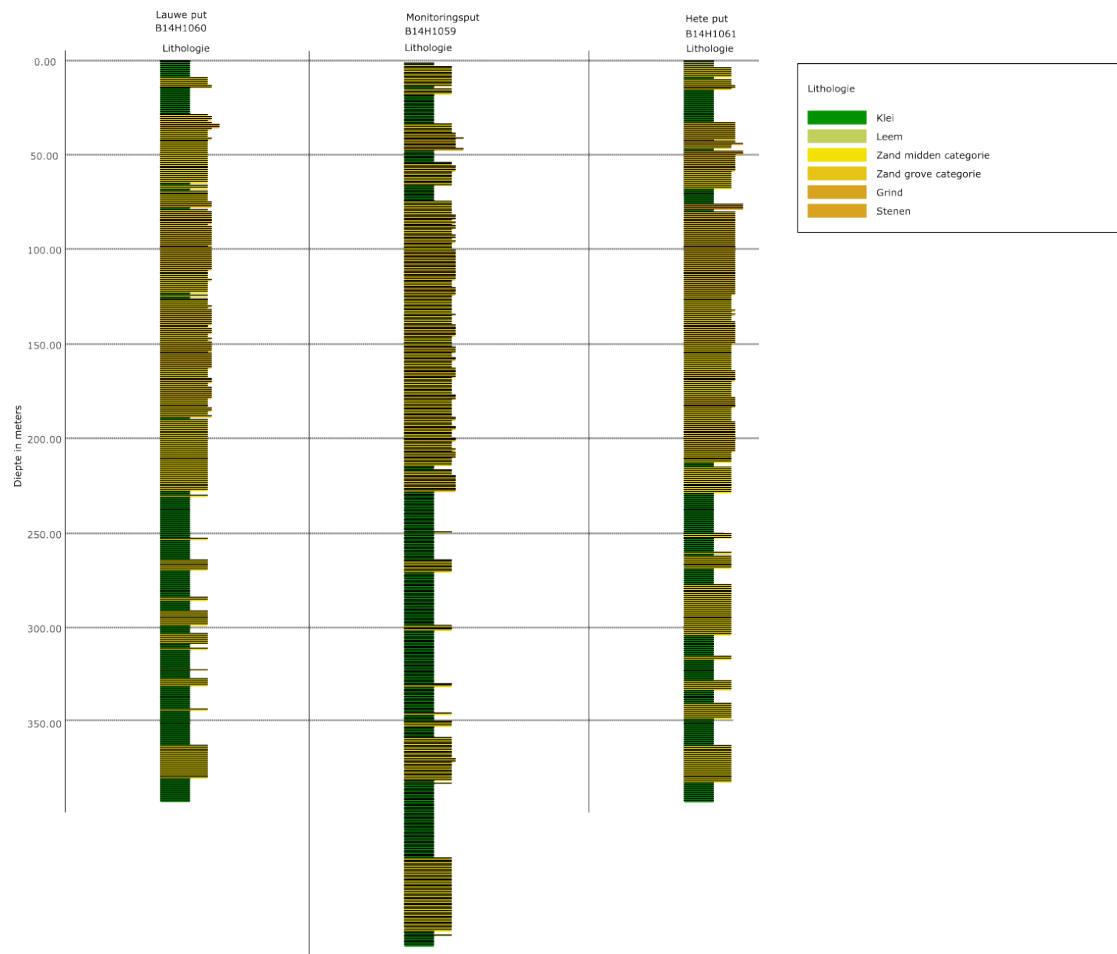
Schout, G. Hartog, N. Timmers, P. (2023). Waterkwaliteitseffecten bij en monitoring van HTO systemen – synthese en update op basis van de monitoring bij HTO Middenmeer. Rapport KWR 2023.120

Xu, J., Bu, F., Zhu, W., Luo, G., Xie, L., 2020. Microbial consortiums of hydrogenotrophic methanogenic mixed cultures in lab-scale ex-situ biogas upgrading systems under different conditions of temperature, pH and CO. *Microorganisms*, 8(5), p.772.

Zhang, X., Fan, H., Yuan, J., Tian, J., Wang, Y., Lu, C., Han, H., Sun, W. (2022). The application and mechanism of iron sulfides in arsenic removal from water and wastewater: a critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108856.

Appendix A

Bodemopbouw van de drie putten van het HTO-systeem in Middenmeer op basis van boorbeschrijvingen.



Appendix B

Totaaloverzicht van geochemische analyses.

	Row Labels	temp_veld	(ortho) PO4 mgP/l	Alkaliteit mmol/l	Alkaliteit (mg CaCO3/l)	NH4 mg/l	As µg/l	ATP (pg/ml)	Ba µg/l	HCO3 mg/l	B µg/l	Br mg/l	Cd µg/l
K-F2	1	13.7	0.25	21	1100	11	<1	11.2	1300	1400	910	22	<0.2
MP-F2	0	11.1	0.1	27	1300	9.2	2.7	13	830	1700	990		<0.2
	1	13.2	0	23	1100	11	2	8.3	810	1900	890	14	<0.2
	2	14.7	0	29	1400	10	1.5	4.8	810	1700	870	19	<0.2
	3	15.4	0	28	1400	11	1.9	4.8	790	1600	820	19	<0.2
W-F2	1	21.3	0	9.8	490	10	<1	7.2	310	780	1100	26	<0.2
K-F3	1	13.8	0	4.5	220	9.7	<1	3	140	320	1200	29	<0.2
	2	22.7	0	6.2	310	10	<1	6.6	150	370	1100	31	<0.2
	3	18.7	0	6.3	310	9.7	<1	6.7	150	360	1100	31	<0.2
F3-MP	0	11.8	0	7.2	360	9.2	<1	8.3	190	460	1800		<0.2
	1	13	0	6.2	310	10	1.4	9	160	430	1600	34	<0.2
	2	14.8	0	7.7	390	9.5	1.3	8.6	140	450	1500	36	<0.2
	3	15.4	0	7.8	390	9	<1	10	130	430	1500	38	<0.2
W-F3	1	21.2	0	5.8	290	9.7	<1	8.1	140	420	1400	33	<0.2
	2	27.2	0	6.8	340	9.6	<1	7.7	120	390	1500	32	<0.2
	3	23.6	0	6.5	330	9.3	<1	7.7	120	380	1300	34	<0.2

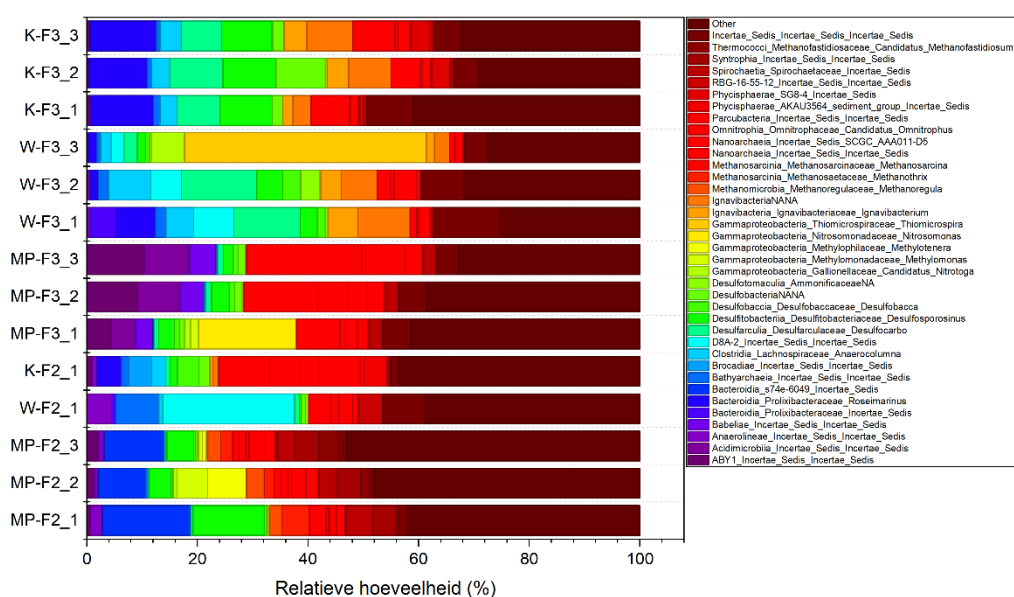
	Row La- bels	Ca µg/l	Cl mg/l	Cr µg/l	DOC	Pto- taal mgP/l	Fe µg/l	K µg/l	Co µg/l	Cu µg/l	Pb µg/l	CH4 (iso- lab) mg/l
K-F2	1	520000	7140	<1	19	1	23000	15000	<2	<2	<2	0.0326
MP-F2	0	410000	4760	<1	22	0.8	27000	11000	<2	<2	<2	2.3
	1	410000	5080	140	22	0.9	30000	11000	<2	<2	<2	0.839
	2	430000	5290	<1	17	0.98	31000	11000	<2	<2	<2	3.01
	3	420000	5110	<1	18		29000	11000	<2	<2	<2	2.93
W-F2	1	480000	9750	<1	7.3	0.31	15000	89000	<2	<2	<2	0.0141
K-F3	1	470000	8630	<1	3.9	0.27	11000	110000	<2	<2	<2	0.0354
	2	480000	9130	<1	3.7	0.32	11000	110000	<2	<2	<2	0.05
	3	450000	8670	<1	3.5		11000	110000	<2	<2	<2	0.08
F3-MP	0	440000	10800	<1	6.8	0.29	13000	150000	<2	<2	<2	0.12
	1	470000	11400	<1	4.8	0.27	14000	150000	<2	<2	<2	0.0236
	2	440000	10500	<1	4.5	0.37	13000	140000	<2	<2	<2	0.02
	3	440000	10500	<1	4.3		13000	150000	<2	<2	<2	0.02
W-F3	1	460000	10100	<1	4.4	0.23	12000	140000	<2	<2	<2	0.0131
	2	430000	9430	<1	4.3	0.34	12000	140000	<2	<2	<2	0.01
	3	420000	10100	<1	4		11000	130000	<2	<2	<2	0.01

	Row La- bels	Mg µg/l	Mn µg/l	CH4 (isoflask) mg/L	Mo µg/l	Na µg/l	Ni µg/l	NO3 mg/l	Si (µg/L)	SO4 mg/l	V µg/l	Zn µg/l
K-F2	1	280000	370	0.0326	<2	4500000	<3	<0.05	11000	96	<2	<10
MP- F2	0	160000	440	2.3	<2	2800000	<3	<0.05	13000	2.6	<2	<10
	1	200000	420	0.839	<2	2900000	<3	<0.05	12000	1	<2	<10
	2	200000	420	3.01	<2	3100000	<3	<0.05	11000	1.3	<2	<10
	3	200000	410	2.93	<2	2900000	<3	<0.05	12000	2.5	<2	<10
W-F2	1	530000	450	0.0141	<2	6000000	<3	<0.05	9700	820	<2	<10
K-F3	1	540000	630	0.0354	<2	5900000	<3	<0.05	14000	920	<2	<10
	2	530000	640	0.05	<2	4600000	<3	<0.05	15000	980	<2	<10
	3	530000	630	0.08	<2	4400000	<3	<0.05	13000	990	<2	<10
F3- MP	0	690000	910	0.12	<2	5600000	<3	<0.05	11000	1300	<2	<10
	1	860000	880	0.0236	<2	7000000	<3	<0.05	9500	1300	<2	<10
	2	710000	820	0.02	<2	5800000	<3	<0.05	9100	1300	<2	<10
	3	690000	780	0.02	<2	5500000	<3	<0.05	9200	1400	<2	<10
W-F3	1	620000	660	0.0131	<2	6000000	<3	<0.05	12000	1200	<2	<10
	2	630000	590	0.01	<2	5200000	<3	<0.05	12000	1100	<2	<10
	3	600000	580	0.01	<2	5000000	<3	<0.05	11000	1200	<2	<10

	Row Labels	temp_veld	geleidbaarheid (uS/cm)	pH_veld	zuurstof_veld	pH_lab	temperatuur t.b.v. pH_lab
K-F2	1	13.7	19790	6.6	0.7	7.1	18.8
MP-F2	0	11.1	15770	7.2		6.9	19.4
	1	13.2	16880	6.5	0.63	7	18.6
	2	14.7	17020	7.5	0.37	7	19
	3	15.4	16960	6.8	0.38	7	21.6
W-F2	1	21.3	26300	6.4	0.7	7	18.6
K-F3	1	13.8	26400	6.6	0.8	7.1	18.4
	2	22.7	25700	6.5	0.42	7	18.9
	3	18.7	25800	6.8	0.88	7	21.7
F3-MP	0	11.8	31600	7.1		6.9	19.4
	1	13	31900	6.5	0.56	7	18.8
	2	14.8	31600	6.6	0.54	6.9	18.9
	3	15.4	31600	6.9	0.34	7.1	21.7
W-F3	1	21.2	29200	6.3	0.27	6.9	18.6
	2	27.2	25800	6.5	0.44	7.1	19
	3	23.6	28300	6.7	0.36	7	21.4

Appendix C

Samenstelling van de microbiële populatie in grondwater bij F2 en F3 bij de lauwe (K), hete (W) en monitoringsput (MP) weergegeven op generatieniveau. Microben-genera waarvan de hoeveelheid minder dan 3% waren in alle monsters, zijn gegroepeerd als 'other'.



Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl