A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size, with some being significantly larger than others, and they are interconnected in a non-uniform, web-like pattern.

KWR 2026.031 | Maart 2026

**Evaluatie effecten op
grondwatersamenstelling
bodemenergiesysteem
Koppert Cress**

Update na nieuwe meetronde in 2025

Kennis van Ecologie voor de
Energietransitie (KEEN) – Cluster
Ondergrond

Colofon

Evaluatie effecten op grondwatersamenstelling bodemenergiesysteem Koppert Cress

Update na nieuwe meetronde in 2025

Kennis van Ecologie voor de Energietransitie (KEEN) – Cluster Ondergrond

KWR 2026.031 | Maart 2026

Projectnummer

404661

Projectmanager

Ir. M.L. (Martin) van der Schans

Opdrachtgever

Ministerie van EZK

Auteurs

Dr. G. (Gilian) Schout; Dr. M. (Maaïke) Besteman; S. (Stijn) Beernink MSc

Kwaliteitsborger

Dr. N. (Niels) Hartog

Verzonden naar

Dit rapport is openbaar

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

Keywords

OBES, warmteopslag, grondwaterkwaliteit

Jaar van publicatie
2026

Meer informatie
Dr. G. Schout
T +31 30 606 9598
E gilian.schout@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

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



Maart 2026 ©

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

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:

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

Cluster Water:

- 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.
- Onderzoek naar de relatie tussen bedekking door zonnepanelen op water en de impact op primaire productie van biomassa.

Cluster Bodem:

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

Samenvatting

Aanleiding en uitgevoerde werkzaamheden

Het OBES-systeem bij Koppert Cress wordt sinds 2015 ingezet met verhoogde opslagtemperaturen (>25 °C) om restwarmte efficiënter te benutten. Omdat kennis over de effecten van midden- en hoge-temperatuur opslag op grondwaterkwaliteit beperkt is, is in 2025 een aanvullende monitoring uitgevoerd binnen het KEEN-programma. In drie bemonsteringsrondes zijn chemische, thermische en microbiologische gegevens verzameld uit de warme en koude bronnen en uit drie monitoringsputten, als vervolg op eerdere metingen uit de periode 2010–2020.

Belangrijkste resultaten en waargenomen effecten

Uit de metingen blijkt dat de gemiddelde opslagtemperatuur sinds 2020 niet verder is toegenomen en dat slechts incidenteel pieken tot circa 30 °C zijn geïnfiltreerd. De energiebalans is in recente jaren wel omgeslagen van een koude naar een warmteoverschot, waardoor de warme bel nu jaarlijks groter wordt. De chemische effecten worden duidelijk gedomineerd door menging tussen het zoetere ondiepe en het zoutere diepere watervoerende pakket, en niet door temperatuurverhoging. Hierdoor treedt in de ondiepe aquifer een sterke verzilting op, terwijl over de volledige filterdiepte gezien een nivellering van de chlorideconcentraties plaatsvindt. Waar het effect van menging zich bij de bronnen vrijwel direct voltrekt, duurt het in monitoringsputten op afstand van de bronnen meer dan tien jaar voordat vergelijkbare waarden worden bereikt. De microbiologische activiteit blijft laag en vergelijkbaar met eerdere jaren. Er zijn geen aanwijzingen dat verhoogde temperaturen de microbiologische activiteit of diversiteit hebben beïnvloed.

Implicaties voor beheer, onderzoek en beleid

- Qua beheer geldt dat de resultaten wijzen op een systeem dat stabiel opereert, zonder directe risico's voor waterkwaliteit of putcapaciteit.
- Incidentele infiltratie tot circa 30 °C heeft in dit systeem niet tot extra effecten geleid ten opzichte van de te verwachte effecten bij de gangbare LT-OBES limiet van 25 °C. Dit wijst erop dat OBES systemen die tijdelijk deze beperkt hogere temperaturen toepassen potentie bieden om duurzame warmtebronnen efficiënter te benutten, zonder dat dit op basis van de huidige kennis tot extra risico's leidt. Over opslag bij nog hogere temperaturen kan op basis van dit onderzoek echter geen bredere conclusies worden getrokken.
- Gezien de toekomstige aansluiting op aardwarmte zullen bij Koppert Cress in de komende jaren waarschijnlijk aanzienlijk hogere opslagtemperaturen worden toegepast. De huidige situatie biedt een uitgelezen kans om in vervolgonderzoek temperatuur-effecten beter te onderscheiden, nu het effect van menging zich hier grotendeels heeft voltrokken.

Inhoud

Colofon	1
Samenvatting	3
Inhoud	4
1 Inleiding	5
2 OBES systeem en ondergrond	6
2.1 Omschrijving systeem	6
2.2 Opzet onderzoek	7
2.2.1 Bemonsteringscampagne binnen KEEN	7
2.2.2 Analyse, dataverwerking en kwaliteitscontrole	8
3 Thermische beïnvloeding	9
4 Chemische en microbiologische beïnvloeding	11
4.1 Chemische effecten	11
4.2 Microbiologische effecten	15
5 Conclusies	17
5.1 Gemeten effecten	17
5.2 Aanbevelingen voor site-operator	17
5.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek	17
5.4 Aanbevelingen voor beleid	18
Referenties	19
I Overzichtstabel meetresultaten	20
II Aanvullend figuren datakwaliteitscontrole	21
III Microbiële samenstelling (top 20 families)	22

1 Inleiding

In aanvulling op conventionele lage temperatuur open bodemenergiesystemen (LT-OBES, <25 °C) bieden MT- en HT-OBES systemen (midden- en hoge temperatuur open bodemenergie) potentie voor de warmtetransitie doordat duurzame warmtebronnen zoals restwarmte en geothermie efficiënter benut kunnen worden. De effecten van warmteopslag boven de 25 °C op grondwaterkwaliteit zijn echter nog niet goed bekend. De grotere thermische impact van opslag bij hogere temperaturen kan chemische en microbiologische processen beïnvloeden, maar praktijkgegevens zijn schaars. Deze onzekerheid maakt het lastig om de effecten en eventuele risico's voor een gegeven locatie vooraf goed in te schatten, wat een reden is gebleken voor terughoudendheid bij vergunningverlening (Schout et al., 2020).

Dit rapport beschrijft de resultaten van een onderzoek naar het OBES systeem van het glastuinbouwbedrijf Koppert Cress te Monster (Zuid-Holland), dat operationeel is sinds 2012. KC is een tuinbouwbedrijf in het Westland dat kiemgroenten produceert. Sinds 2015 is het voor KC op basis van een maatwerkvergunning toegestaan om te werken met opslagtemperaturen boven de 25 °C. Bij dit systeem is nu gedurende een jaar de waterkwaliteit uitvoerig geanalyseerd, als follow up op een eerder onderzoek dat hier is uitgevoerd toen het systeem nog grotendeels als conventioneel LT-OBES werd bedreven (Bloemendal et al., 2020).

Hoofddoel was het identificeren van mogelijke aanvullende effecten die veroorzaakt zijn door de sindsdien verhoogde opslagtemperatuur. Daarmee draagt dit onderzoek bij aan het verkleinen van onzekerheden en het ontwikkelen van een pragmatisch en wetenschappelijk onderbouwd kader voor vergunningverlening. Dit is essentieel om de toepassing van MT- en HT-OBES op verantwoorde wijze te stimuleren en de warmtetransitie te kunnen versnellen.

Deze rapportage maakt deel uit van het werk binnen het cluster ondergrond in het KEEN project (Kennis van Ecologie voor de Energietransitie). In het KEEN project onderzoekt een consortium van Deltares, TNO, en de WUR in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en het Ministerie van Klimaat en Groene Groei de ecologische effecten van het opschalen van hernieuwbare energiebronnen zoals wind, zon, aquathermie en bodemenergie. Doel van het programma is te bepalen onder welke randvoorwaarden deze hernieuwbare energiebronnen veilig toegepast en opgeschaald kunnen worden zonder ongewenste milieueffecten, en daarmee de huidige onzekerheden en de vertragingen in de implementatie zo veel mogelijk weg te nemen.

Binnen het KEEN project is parallel aan het onderzoek bij Koppert Cress op vergelijkbare wijze onderzoek gedaan naar effecten bij het HT-OBES van Ennatuurlijk Aardwarmte te Middenmeer (Hoving et al., 2026). Ook is binnen dit onderzoek een factsheet m.b.t. effecten en vergunningverlening van MT- en HT-OBES opgesteld (Schout et al., 2026), waarin de resultaten uit deze onderzoeken gebundeld zijn met een literatuurstudie en een overzicht van het regelgevend kader. Deze factsheet zal dienen als levend document waarin de aanbevelingen met betrekking tot het handelingsperspectief van hogere temperatuur OBES systemen zullen worden geüpdatet aan de hand van voortschrijdend inzicht uit toekomstige projecten.

2 OBES systeem en ondergrond

2.1 Omschrijving systeem

Koppert Cress bespaart op haar fossiele energiegebruik door warmte te winnen uit bedrijfsprocessen en deze in de bodem op te slaan en later terug te winnen. Aanvankelijk gebeurde dit met een 'conventioneel' LT-OBES, bestaande uit 4 warme en 4 koude bronnen, waarbij de maximale injectietemperatuur niet hoger mocht zijn dan 25°C. Om de effecten *en* voordelen van een hogere opslagtemperatuur te onderzoeken heeft de Provincie Zuid-Holland KC in 2015 toestemming gegeven om water met een temperatuur tot maximaal 45 °C te infiltreren (gemiddeld maximaal 40 °C).

Binnen een TKI-project is vervolgens tot en met 2020 onderzoek gedaan naar de milieueffecten en voordelen hiervan (Bloemendal et al., 2020). Gedurende dit onderzoek steeg de injectietemperatuur en werden pieken boven de 25 °C geïnfiltrerd, maar de gemiddelde temperatuur bleef onder de 25 °C. De energiebalans bleef gehandhaafd en de gemiddelde opslagtemperatuur was lager dan 25 °C. Koppert Cress heeft en had echter de intentie om de opslagtemperatuur verder toe te laten nemen om zo verder te kunnen verduurzamen.

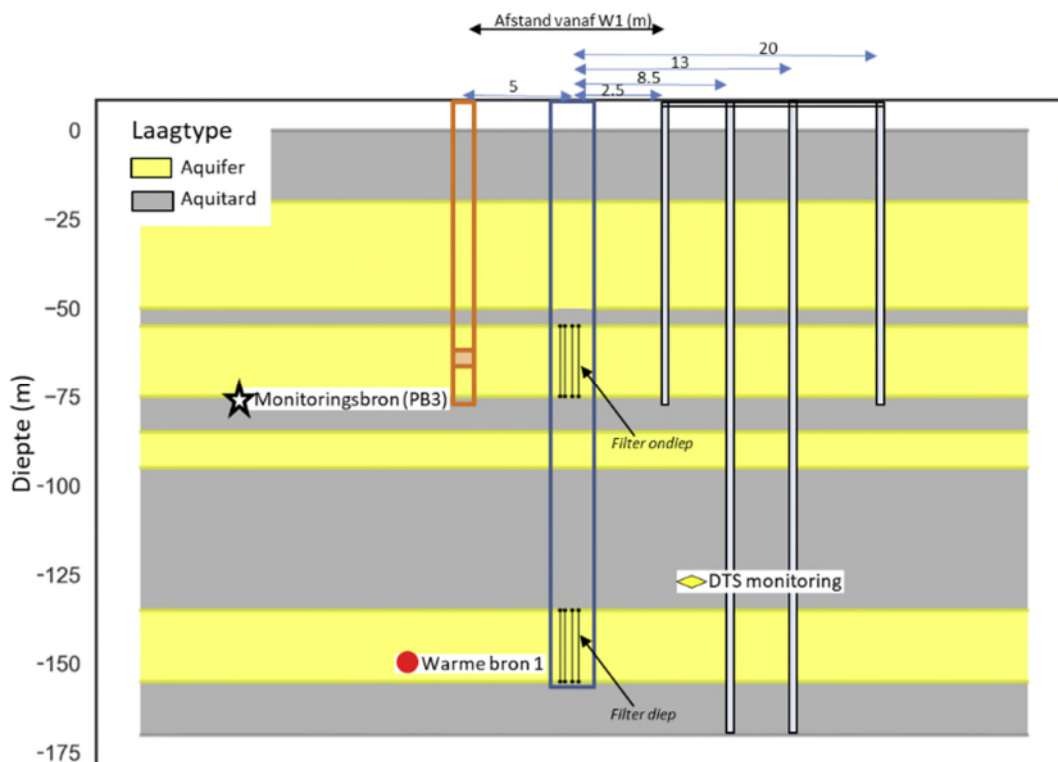
Het uitgebreide monitoringsnetwerk bij de warme bronnen dat destijds is aangelegd is nu opnieuw gebruikt voor het onderzoek naar de effecten, grofweg 5 jaar later. Het systeem bestaat uit drie monitoringsputten op 5 (PB-3), 20 (PB-1) en 75 (PB-2) meter afstand van de dichtstbijzijnde warme bron (Figuur 2-1 en Tabel 1). Daarnaast zijn er vier glasvezelkabels de grond ingebracht voor DTS (Distributed Temperature Sensing) metingen op afstanden van 2,5 tot 20 m van warme bron W1. De koude bronnen liggen ongeveer 230 meter ten zuiden van de warme.



Figuur 2-1. Ligging van de warme bronnen, de monitoringsputten en de glasvezelkabels bij KC. Bron: Bloemendal et al., 2020.

Een belangrijk aspect van het OBES systeem is dat de warme en koude bronnen zijn afgesteld in twee watervoerende pakketten: de bovenste tussen circa 55-75 m-mv en een diepere laag op 135-160 m-mv (Figuur 2-2). Tijdens de eerste studie bleek dit gegeven een groot deel van de waargenomen effecten te verklaren, gezien het water in de diepere laag aanzienlijk zouter bleek dan dat in de ondiepere laag. Het rondpompen van water door het OBES systeem zorgde daarmee voor menging en, in de ondiepere laag, aanzienlijke verzilting (hetgeen dus niet

aan de temperatuuroenname lag). De geïnstalleerde monitoringsputten hebben geen filters die reiken tot in de diepere laag, maar omgekeerd zal hier een verzoeting opgetreden moeten hebben. Door middel van een flowmeting is bepaald dat netto iets meer water wordt onttrokken uit de diepere en zoutere filtersegmenten, met een verhouding van ongeveer 40% ondiep – 60% diep (Bloemendal et al., 2020).



Figuur 2-2. Doorsnede van de ondergrond rondom warme bron 1 en de daaromheen liggende monitoringsapparatuur (1 monitoringsbron, 4x DTS). De filterstellingen van de monitoringsbuizen (zie Tabel 1) en andere warme en koude bronnen komen hiermee overeen. Bron: Bloemendal et al., 2020.

2.2 Opzet onderzoek

2.2.1 Bemonsteringscampagne binnen KEEN

Zoals vermeld is dit onderzoek een vervolg op het onderzoek van Bloemendal et al (2020). In dat onderzoek zijn de thermische en waterkwaliteitseffecten beschouwd met dezelfde meetopstelling, met name o.b.v. de metingen met glasvezelkabels en 49 monsternames uit de bronnen van de monitoringsputten. Binnen het KEEN project zijn gedurende 2025 in drie bemonsteringsrondes in totaal negen monsters genomen (Tabel 1). PB 1.2 en PB 3.1, het meest dicht bij de warme bronnen, zijn elke ronde bemonsterd. De monsternames waren zodanig door het jaar verspreid gekozen dat op elk monsternamen moment andere condities te verwachten zijn:

- 5 maart: einde winter, warme bron 'leeg':
 - Bij de warme bronnen wordt compositie gemeten na lange periode opslag
 - PB 2.2, op de grootste afstand van de bronnen, zou mogelijk weer de natuurlijke grondwaterkwaliteit aangetroffen moeten worden doordat warme bron bijna leeg is en mogelijk inzicht geven in de reversibiliteit van effecten.
- 2 juli: zomer, warm water wordt geladen:
 - Monster uit de bronnen geeft inzicht waterkwaliteit koude kant, die tijdens injectie zou moeten lijken op de metingen bij PB 1.2 en PB 2.2.
- 29 september: einde zomer, warme bron maximaal geladen
 - De twee peilbuizen dicht bij de bronnen zijn dan al enkele maanden blootgesteld aan de verhoogde temperaturen. Mogelijk zijn door temperatuur veroorzaakte effecten het best waar te nemen.

Bemonstering is uitgevoerd door IF Technology (Arnhem). De bronnen zijn bemonsterd via een bemonsteringskraan in het bovengrondse leidingwerk in de technische ruimte. Bemonstering van de peilbuizen is uitgevoerd met een Grundfos MP1 dompelpomp. Monsters zijn pas genomen nadat 3x het volume van de betreffende monitoringsbuis was verpompt en veldsensoren (geleidbaarheid, pH, zuurstof) een constante waterkwaliteit aangaven. Voor de microbiologische bemonstering is de pomp extra diep ingehangen (enkele tientallen meters) en met een laag debiet bemonsterd, om zo zuiver mogelijke de microbiologische samenstelling van het diepe grondwater te kunnen meten.

Tabel 1. Het toegepaste bemonsteringsschema, dieptes filterstelling, en afstand tot de dichtstbijzijnde warme bron. In totaal zijn negen monsters genomen (groene cellen). WB en KB staan voor de monsternaam vanuit de technische ruimte tijdens verpomping uit de warme bronnen (WB, 's winters) en de koude bronnen (KB, 's zomers).

Monitoringsput	Bronnen	PB 1.2	PB 2.2	PB 3.1
Diepte filter (m-mv)	55-75 en 135-160	60 - 62	61,5 - 63,5	55,5 - 57,5
Afstand tot warme bron	n.v.t.	20	75	5
Bemonstering 1 (5-3-'25)	WB			
Bemonstering 2 (2-7-'25)	KB		X	
Bemonstering 3 (24-9-'25)	X		X	

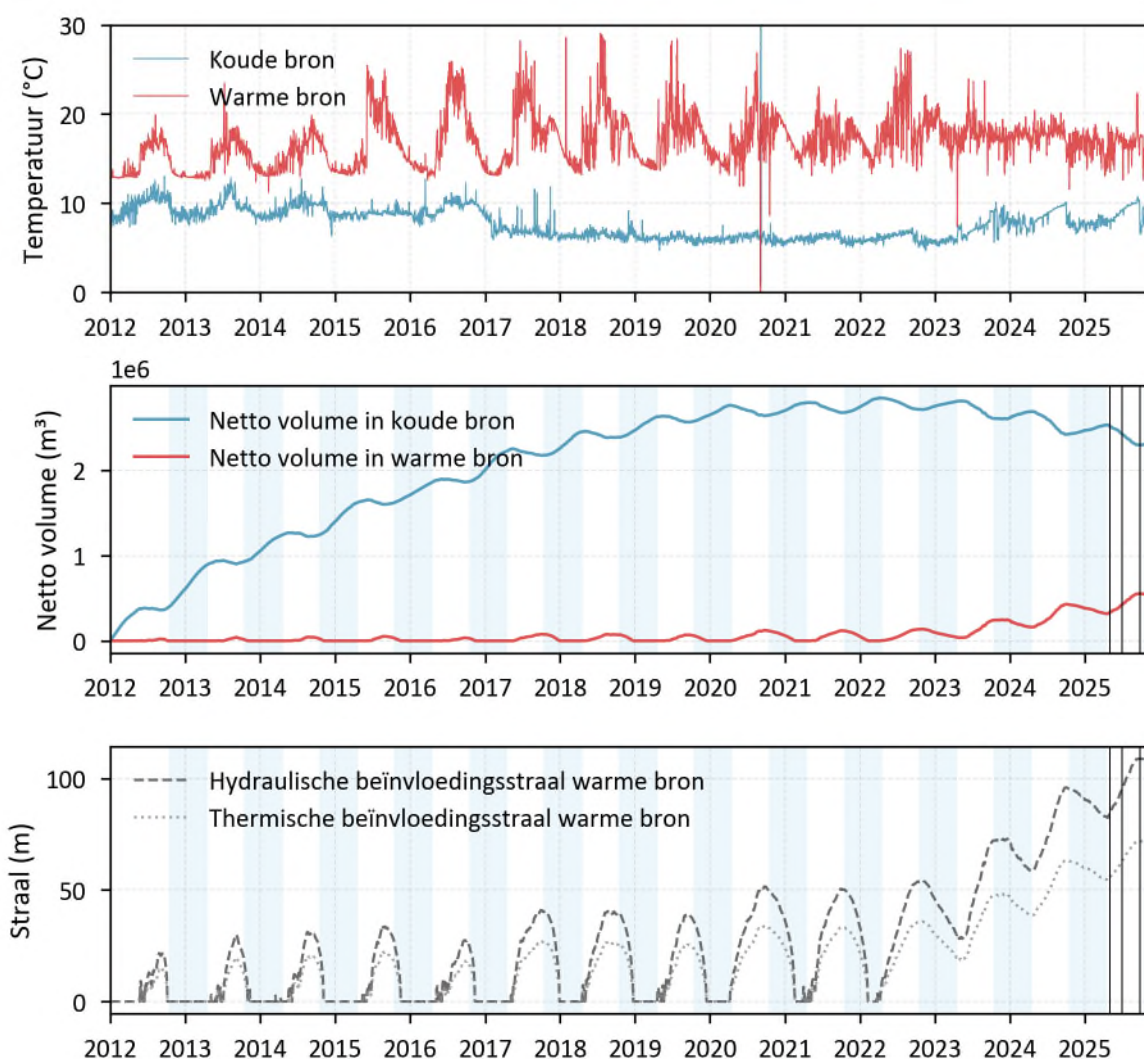
2.2.2 Analyse, dataverwerking en kwaliteitscontrole

Chemische analyses zijn uitgevoerd bij SGS Environmental Analytics (Rotterdam), m.u.v. de methaananalyse die is uitgevoerd bij ISOLAB b.v. (Geffen). De microbiologische analyses (ATP en NGS) zijn uitgevoerd door KWR. Een overzichtstabel van alle analyseresultaten voor de belangrijkste (en meest frequent gemeten) parameters is gegeven in Bijlage I.

Ter kwaliteitscontrole is gekeken naar de verhouding tussen de chloride concentratie en het in het veld gemeten elektronisch geleidbaarheidsverschil (EGV), welke bij dergelijk hoge concentraties zou moeten correleren rond EGV/Cl verhouding van ongeveer 3. Daarnaast is naar de verhouding Cl/Br gekeken, die zeker voor dit type grondwater rond de Cl/Br verhouding van zeewater zou moeten liggen (~292) en naar de ionenbalans. Op basis hiervan zijn correcties doorgevoerd in 4 van de 9 monsters. Bij 1 monsters waren de concentraties anionen een factor 10 lager dan verwacht. Daarbij is dus met zeer grote waarschijnlijkheid een fout gemaakt met het terugrekenen van concentraties na het toepassen van een verdunning, waarvoor is gecorrigeerd. In 3 gevallen was de concentratie chloride of natrium 1000 mg/l hoger dan te verwachten op basis van de ionenbalans en de EGV/Cl en Cl/Br verhouding. Ook hiervoor is een correctie doorgevoerd (Bijlage II). Na deze correcties geeft de ionenbalans vertrouwen in de kwaliteit van de dataset als geheel (maximale afwijking 6,1%, gemiddeld 4%) en zijn de verhouding EGV/Cl en Cl/Br in lijn met verwachting.

3 Thermische beïnvloeding

Om de chemische en microbiologische effecten van temperatuurverhoging te kunnen beoordelen is eerst ook gekeken naar de thermische beïnvloeding in de opslaglaag, evenals het beheer van het systeem als geheel. Daarvoor is gebruik gemaakt van de gemeten volumestroom en de temperatuur van het vanuit de bronnen verpompte water in combinatie met de metingen van de DTS-kabels. Uit deze gegevens blijkt dat de gemiddelde dagtemperatuur van het naar de warme bronnen verpompte water niet hoger is geworden dan voor 2020 (einde van het vorige onderzoek), hetgeen wel de verwachting was. Wel is te zien dat er, zeker in de periode 2017 t/m 2023 wel dagpieken van boven de 25 °C (tot 30 °C) in de warme bronnen zijn geïnfiltreerd (Figuur 3-1, boven).



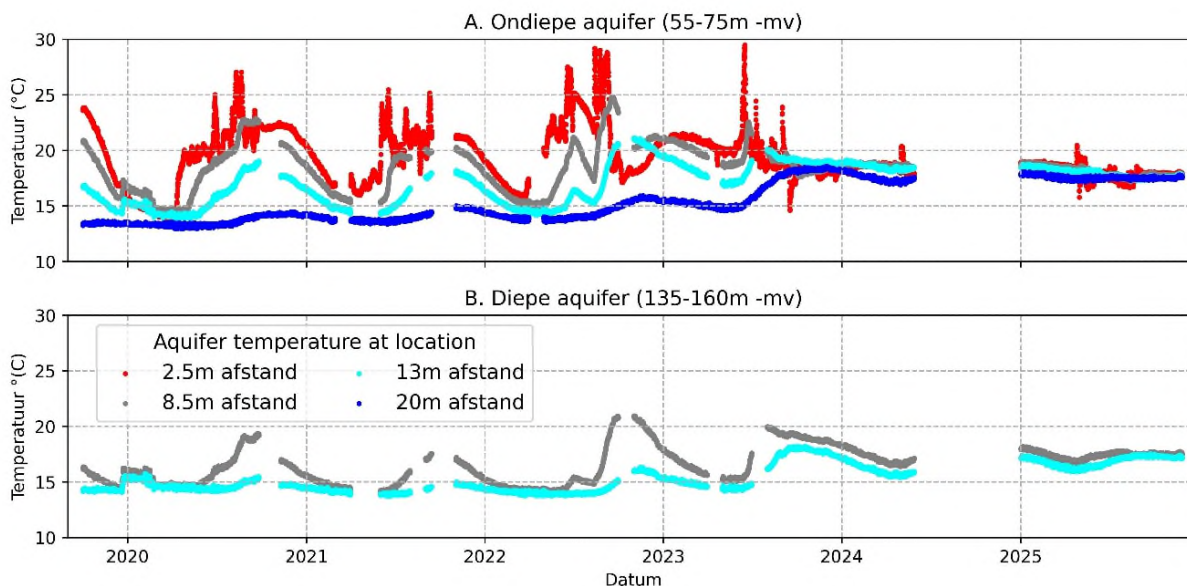
Figuur 3-1. Gebruiksgegevens van het OBES bij Kopper Cress over de periode 2012 tot 2026. Boven: Dagelijks gemiddelde van de gemeten temperatuur bij de warme en koude bronnen. Midden: Ontwikkeling van het netto volume in de warme en koude bronnen. Onder: Geschatte hydraulische en thermische beïnvloedingsstraal voor het netto volume in de vier warme bronnen gezamenlijk, op basis van een opslaglaag van 45 m dik en een porositeit van 0,33. Blauw gekleurde verticale vlakken geven de ontlad periode aan van 15 oktober tot 15 april, de drie zwart gestreepte verticale lijnen de bemonsteringsmomenten.

Duidelijk is verder dat er sinds de afronding van het vorige project meer warmte geïnfiltreerd wordt (Figuur 3-1, midden). Netto wordt er inmiddels zelfs meer warmte dan koude geïnfiltreerd waardoor de volumebalans omgeslagen is. Waar er tot grofweg 2022 sprake was van een koude-overschot (er werd meer water naar de koude bronnen verpompt dan andersom) is er sindsdien sprake van een warmteoverschot. Doordat het systeem in de

eerste jaren vanaf het begin met een jaarlijks koudeoverschot heeft gedraaid, wordt het in de ondergrond opgebouwde koude-volume-overschot nu langzaam weggewerkt. Inzicht in deze netto waterverplaatsing is belangrijk om de thermische, maar ook de chemische en microbiologische effecten te kunnen onderzoeken. Het geeft namelijk aan dat het netto geïnjecteerde volume in de warme bronnen, en daarmee de aanwezige omvang van het door de warme bron beïnvloedde grondwater, de laatste jaren gestaag toeneemt.

Om deze omvang te kwantificeren is ook de cumulatieve hydraulische en thermische beïnvloedingsstraal van de warme bronnen gezamenlijk geschat (Figuur 4-1, onder), op basis van definities in Bloemendal & Hartog (2018). Alhoewel deze niet exact berekend kunnen worden, geven ze een indicatie van de afstand vanaf de bronnen tot waar de warme bel zich heeft uitgebreid. Daarbij verspreidt het warmtefront zich altijd langzamer dan het verpompte water doordat het water een deel van de warmte afgeeft aan het sediment (retardatie). Waar voorheen al het in de warme bronnen geïnjecteerde water weer volledig was opgepompt aan het eind van elk seizoen, is dat sinds de winter van '22-'23 niet meer het geval. Aan het eind van de zomer van '25 was het netto volume toegenomen tot 550.000 m³ in de warme bron, equivalent aan een cumulatieve hydraulische beïnvloedingsstraal van ongeveer 105 m en een thermische beïnvloedingsstraal van 75 m (Figuur 3-1, onder).

Het effect van het huidige jaarlijkse warmteoverschot in het systeem is duidelijk terug te zien in de data van de DTS-kabels die op afstanden tot 20 m van de warme bronnen zijn geïnstalleerd. Tot en met de winter van '22 - '23 is een fluctuatie in de gemeten temperaturen te zien maar daarna blijft de temperatuur op alle meetafstanden hangen rond ongeveer 18 °C (Figuur 3-2). Dit komt overeen met de berekende thermische cumulatieve beïnvloedingsstraal die sinds die winter niet meer onder de 20 m is geweest. De hydraulische beïnvloedingsstraal is inmiddels dus ook groter dan de afstand tussen PB 2.2 (de meest ver weg gelegen peilbuis) en de warme bron die daar het dichtst bij ligt (75 m, Tabel 1). De thermische beïnvloedingsstraal is ongeveer even groot als deze afstand. Op basis van deze indicatieve berekeningen kunnen dus ook bij deze verder weg gelegen peilbuis inmiddels thermische effecten en effecten door menging verwacht worden.



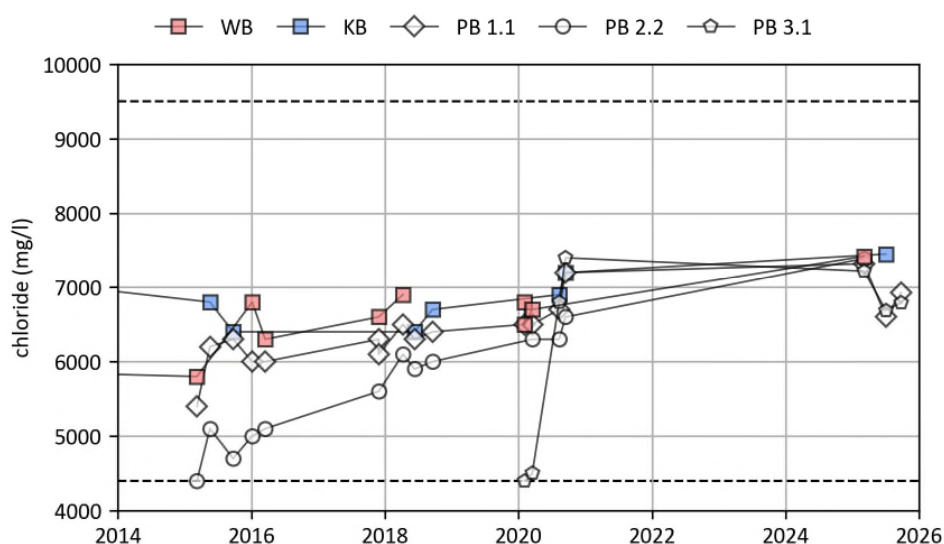
Figuur 3-2. Temperatuur in de bovenste watervoerende laag (boven) en onderste watervoerende laag (onder) over de periode 2018 t/m 2025. Alleen de DTS kabels op 8.5 en 13 m afstand reiken tot in de diepe aquifer. Getoonde temperatuur is de over de diepte van de watervoerende laag gemiddelde waarde. Gemeten bij de geïnstalleerde glasvezelkabels (zie locaties Figuur 2-1).

4 Chemische en microbiologische beïnvloeding

4.1 Chemische effecten

Menging over zoutgradiënt

Vanwege de aanwezige zoutgradiënt in de opslagaquifers is de ontwikkeling in zoutgehalte een duidelijk optredend mengeffect bij het OBES-systeem van Koppert Cress. Bij de peilbuizen (afgesteld in het van nature zoetere ondiepe deel van de opslagaquifer) heeft dit geleid tot een duidelijke verzilting tot zo'n 6500 tot 7500 mg/l chloride (Cl) in 2025 (Figuur 4-1). Indien er peilbuizen in de diepere aquifer afgesteld hadden gestaan dan had daar over dezelfde periode een verzoeting te zien zijn geweest. Over de gehele diepte van de bronnen zal er sprake zijn van een nivellering in chloride concentratie. Direct rondom de bronnen is deze menging gelijk bij aanvang van het systeem in 2012 voltrokken. Daarna is daar slechts een beperkte en geleidelijke verdere verzilting te zien. De daadwerkelijke mengfractie tussen diep en ondiep grondwater kan niet bepaald worden omdat er geen peilbuizen in de diepe aquifer zijn afgesteld, en hiervan de natuurlijke samenstelling dus ook niet precies bekend is. Wanneer een mengverhouding van 60/40 diep/ondiep voor het door de bronnen verpompte water wordt aangenomen (zie Hoofdstuk 2) en dat het eerste monster uit PB2.2 (2015) de natuurlijke samenstelling van het ondiepe grondwater aangeeft, kan de chlorideconcentratie in de diepe aquifer op basis van een eenvoudige massabalans worden geschat op circa 9500 mg/L.

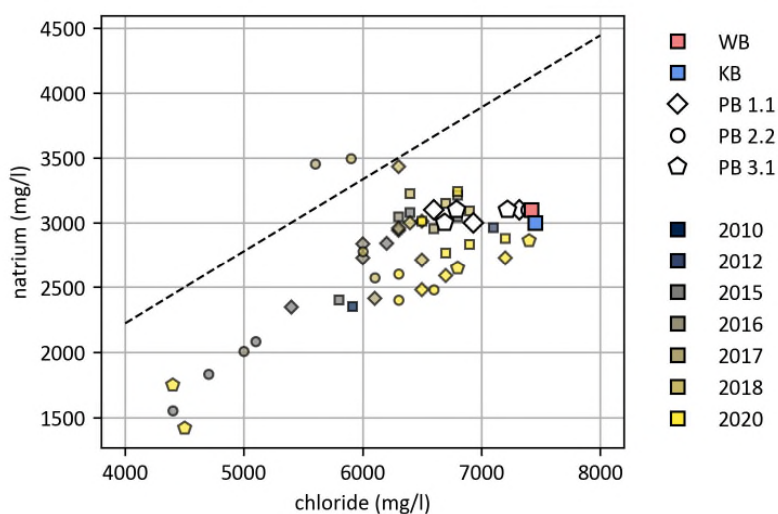


Figuur 4-1. Ontwikkeling van het gemeten chloridegehalte in zowel de nieuwe data uit 2025 als de eerdere meetreeks. De zwarte horizontale stippellijnen geven de geschatte initiële concentraties weer in de ondiepe (4400 mg Cl/l) en diepe aquifer (9500 mg Cl/l).

Peilbuis PB1.1 (op 20 meter afstand) vertoonde als eerste een sterke toename van het zoutgehalte, hetgeen logisch is gezien deze op slechts 20 m van de bronnen ligt. Ook in PB2.2 (75 m afstand) nam het zoutgehalte echter geleidelijk toe. Ondanks dat de geschatte hydraulische beïnvloedingsstraal bij PB2.2 pas in de laatste jaren groter werd dan de afstand tot de bronnen (Figuur 3-1), lijkt de peilbuis dus in werkelijkheid al eerder beïnvloed te zijn. Bij het opstellen van het monitoringsplan voor KEEN werd verondersteld dat de eerste meting in PB 2.2 in 2025 - aan het einde van de winter, wanneer de warme bel op zijn kleinst is - nog een indicatie zou kunnen geven van de nulsituatie in de bovenste aquifer. Dit bleek dus echter niet het geval. Naast de verhoogde chloride concentratie was de gemeten watertemperatuur tijdens de bemonstering hier ook al hoger dan de achtergrondtemperatuur (Bijlage I), wat dus ook duidt op thermische beïnvloeding door het systeem op deze locatie. De oorzaak voor de eerdere beïnvloeding is de vorming van een brede mengzone rondom de hydraulische straal veroorzaakt door dispersie en mogelijk lokale sterker doorlatende lagen (heterogeniteit) ter hoogte van de peilbuisfilters, die ervoor zorgen dat het water op deze diepte dieper doordringt dan gemiddeld.

Effecten van kationuitwisseling

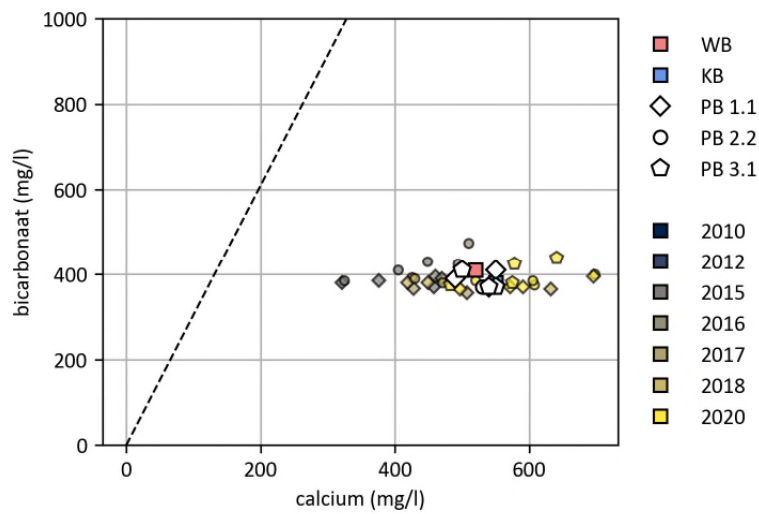
Door de verzilting als gevolg van menging stijgen naast de concentratie chloride ook een heel aantal andere parameters mee die ook in hogere concentratie voorkomen in het diepere grondwater, waaronder de concentratie natrium (Na). Als gevolg van dergelijke verzilting kunnen echter ook neveneffecten optreden door kationuitwisseling, omdat bij indringing van zout water de aan kleimineralen en organisch materiaal geadsorbeerde calcium (Ca) ionen deels kunnen worden vervangen door Na ionen, waardoor de Na/Cl verhouding afneemt. Echter, de Na/Cl verhouding is gedurende de hele meetreeks relatief constant. Wel ligt deze voor bijna alle monsters duidelijk onder de Na/Cl verhouding van zeewater, wat er op duidt dat hier historisch door natuurlijke stromingsprocessen al verzilting heeft plaats vond voor ingebruikname van het systeem. De aanvullende verzilting door het rondpompen lijkt zeker bij de bronnen een beperkt effect op de Na/Cl verhouding te hebben gehad en dus op het optreden van kationuitwisseling.



Figuur 4-2. Verhouding tussen chloride en natrium concentraties. Gestreepte zwarte lijn geeft de Na/Cl verhouding in zeewater weer (~1,8). Grote symbolen (wit, rood en blauw) geven de nieuwe metingen uit 2025 weer, de kleinere (geelachtige) symbolen de metingen uit de eerdere studie.

Kalkneerslag

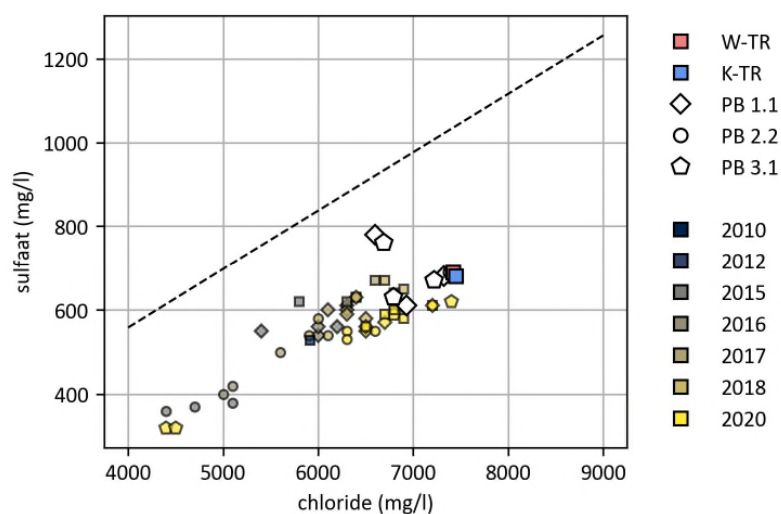
Alle metingen laten een duidelijk lagere HCO_3/Ca -verhouding zien dan de kalkoploslijn, wat consistent is met de historische verzilting waarbij Ca uit initieel zoeter grondwater is uitgewisseld tegen Na en hierdoor is toegenomen (Figuur 4-3). Daarbij valt op dat de Ca-concentraties in het ondiepe bereik tussen 2010 en 2020 verder zijn gestegen van ongeveer 400 naar 600 mg/L, maar dat deze toename niet gepaard gaat met verschuivingen in de chlorideverhouding en dus niet kan worden verklaard door eenvoudige menging met zouter water. Ook is er geen aanwijzing voor kationuitwisseling, aangezien de Na/Cl-verhouding gedurende de meetreeks relatief stabiel is. Een alternatieve verklaring is enige kalkoplossing als gevolg van menging van waters met verschillende CO_2 -spanningen, maar dit kan niet goed worden beoordeeld omdat hiervoor geen betrouwbare metingen van het diepe grondwater beschikbaar zijn. In elk geval zien we geen teken van kalkneerslag door de verhoogde grondwatertemperatuur, wat ook niet te verwachten was bij de relatief beperkte temperatuurstijging tot maximaal 30 °C.



Figuur 4-3. Verhouding tussen calcium en waterstofcarbonaat concentraties. De doorgetrokken lijn geeft de Ca/HCO_3 massaverhouding weer die vrijkomt bij oplossing van calciumcarbonaat met CO_2 (3,05). Grote symbolen (wit, rood en blauw) geven de nieuwe metingen uit 2025 weer, de kleinere (geelachtige) symbolen de metingen uit de eerdere studie.

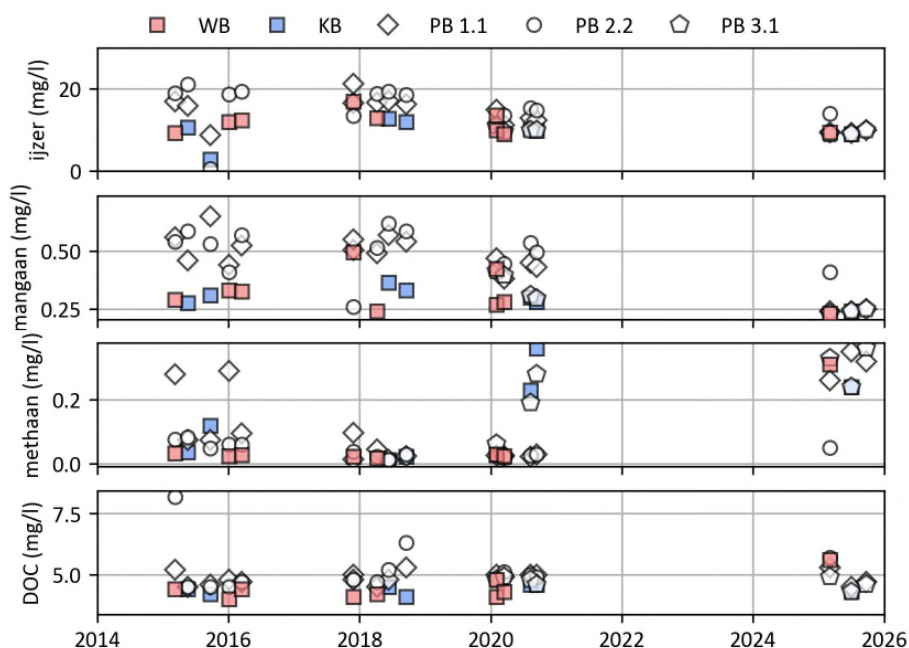
Redoxreacties

Er is een duidelijke toename in SO_4 concentraties te zien die sterk correleert met de toename in chloride, waarbij de SO_4/Cl -verhouding lager is dan dat van zeewater maar niet wezenlijk veranderd over de meetreeks (Figuur 4-4). Dit betekent dat de toename is toe te wijzen aan menging, en hoewel een deel van het oorspronkelijk uit zeewater afkomstige sulfaat historisch al is gereduceerd, er geen aanwijzingen zijn voor significante aanvullende sulfaatreductie tijdens de operationele fase. Dit ondanks de aanwezigheid van methaan in lage concentraties (<0,5 mg/l, Figuur 4-5), dat in theorie sulfaatreductie gekoppeld aan methaanoxidatie zou kunnen stimuleren. De gelijktijdige aanwezigheid van sulfaat en methaan is bij andere OBES systemen een operationeel aandachtspunt gebleken vanwege het risico op putverstopping (Drijver & Van de Ridder, 2021). In dit kader is ook de mogelijke mobilisatie van DOC relevant, een effect dat in de literatuur bij hogere temperaturen is waargenomen en ook sulfaatreductie en verstopping zou kunnen stimuleren. De DOC-concentratie blijft echter constant rond de 4 à 5 mg/l, en ook dit effect wordt hier dus niet waargenomen (Figuur 4-5).



Figuur 4-4. Verhouding tussen chloride en sulfaat concentraties. Gestreepte zwarte lijn geeft de SO_4/Cl verhouding in zeewater weer ($\sim 0,14$). Grote symbolen (wit, rood en blauw) geven de nieuwe metingen uit 2025 weer, de kleinere (geelachtige) symbolen de metingen uit de eerdere studie.

De concentraties ijzer (Fe) en mangaan (Mn) bij de bronnen blijven gedurende de hele meetreeks relatief constant (Figuur 4-5). Ook hier lijkt dus een initiële menging plaats te hebben gevonden direct na ingebruikname van het systeem, net als zichtbaar in de chlorideconcentraties. In de peilbuizen nemen de concentraties daarentegen over een periode van ruim 10 jaar geleidelijk af richting de waarden van de bronnen. De Fe en Mn concentraties in het ondiepe grondwater waren dus initieel aanzienlijk hoger dan in het diepe grondwater. Tegelijkertijd blijven de Fe/Cl en Mn/Cl verhoudingen bij de peilbuizen niet constant, wat erop wijst dat hier behalve menging ook andere processen een rol spelen. Precipitatie van bijvoorbeeld ijzersulfiden of ijzerhydroxiden is echter een onwaarschijnlijke verklaring voor de afname in ijzerconcentratie, gezien er geen aanwijzingen zijn voor actieve sulfaatreductie (Figuur 4-4). Mogelijk speelt het incidenteel indringen van zuurstof nog een rol in de verdere afname van ijzer door neerslag van ijzerhydroxiden, al zijn ook hiervoor geen directe aanwijzingen.



Figuur 4-5. Ontwikkeling van de concentraties ijzer, mangaan, methaan en DOC over de hele meetreeks.

Microchemische effecten

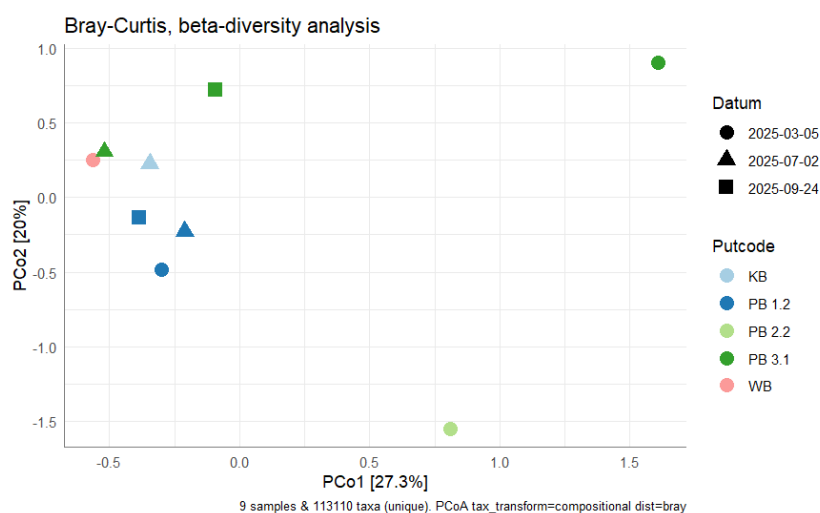
Bij de gemeten sporenelementen is overwegend hetzelfde patroon zichtbaar als bij Fe en Mn: de meeste elementen vertonen bij de peilbuizen een geleidelijke afname richting de lagere concentraties die al bij de bronnen worden gemeten. In 2025 lagen de concentraties van het merdendeel van de gemeten sporenelementen zelfs onder de detectielimiet (arsen, cadmium, cobalt, chroom, koper, lood, molybdeen, nikkel, vanadium: zie Bijlage I). In enkele gevallen is het patroon omgekeerd, zoals voor boor, waarvan de concentraties bij de peilbuizen juist toenamen richting dat van de bronnen, wat erop wijst dat de concentratie boor aanvankelijk dus hoger was in de diepe aquifer.

Alleen voor arsen is een duidelijk afwijkend patroon te zien: de concentraties namen bij zowel de bronnen als peilbuizen gelijktijdig af in de eerste jaren na. Deze afname was voltrok zich al ruim voor het eind van het onderzoek in 2020 en de nieuwe arsen metingen waren allen onder de detectielimiet. Een mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat de arsenconcentraties initieel verhoogd waren als gevolg van het boren en ontwikkelen van de bronnen. Een door temperatuur geïnduceerde mobilisatie zoals in laboratoriumstudies is dus ook bij de nieuwe metingen niet waargenomen.

4.2 Microbiologische effecten

De ontwikkeling in microbiologische activiteit is ingeschat aan de hand van ATP metingen (Adenosinetrifosfaat, een universele energiedrager die door alle levende cellen gebruikt wordt). Bij de metingen nieuwe metingen in 2025 lag de ATP concentratie echter alleen bij het monster uit de koude bron boven de detectielimiet van <5,5 ng/L met een activiteit van 6,8 ng/L (zie Bijlage I). Deze lage activiteit is niet onverwacht gezien het diep, anoxisch grondwater betreft met lage concentraties organische stof en nutriënten. Ook de temperatuur is niet wezenlijk hoger geworden dan in de voorgaande jaren. De gevonden waarden liggen dan ook in dezelfde range als de metingen uit het eerdere onderzoek (Bloemendal et al., 2020). Het systeem lijkt de microbiologische activiteit dus niet verder gestimuleerd te hebben.

Om de diversiteit in de microbiële gemeenschappen te bepalen zijn de watermonsters uit 2025 geanalyseerd met next-generation sequencing (NGS). Hiermee kan bepaald worden welke micro-organismen er aanwezig waren en in welke relatieve verhouding ze gevonden zijn. Op basis van deze data is ten eerste met een 'principal coordinate analyse' gekeken hoe vergelijkbaar de microbiële gemeenschappen zijn tussen de verschillende monsters (Figuur 4-6). Elk watermonster wordt weergegeven met één punt in de grafiek. De afstand tussen de monsters op de assen geeft weer hoe vergelijkbaar microbiële gemeenschappen zijn: hoe kleiner de afstand tussen de punten in de grafiek, hoe vergelijkbaarder de microbiële gemeenschappen zijn. De monsters van de koude bron, de warme bron (WB), 3 monsters uit PB 1.2 en 2 van de 3 monsters van PB 3.1 liggen bij elkaar geclusterd, wat een indicatie is voor vergelijkbare microbiële gemeenschappen. Gezien deze meetpunten dicht bij elkaar liggen en het grondwater vermengd is geraakt door het bedrijven van het systeem is dit een logisch resultaat. Alleen de metingen PB 2.2 en de eerste meting bij PB 3.1 liggen ruim buiten dit cluster. Voor PB 2.2 kan dit veroorzaakt zijn door de grotere afstand tot de bronnen, waardoor deze locatie pas later onder invloed van menging door het systeem is komen te staan. Voor PB 3.1 (de monitoringsput die het dichtst bij de bronnen ligt) is dit geen logische verklaring.

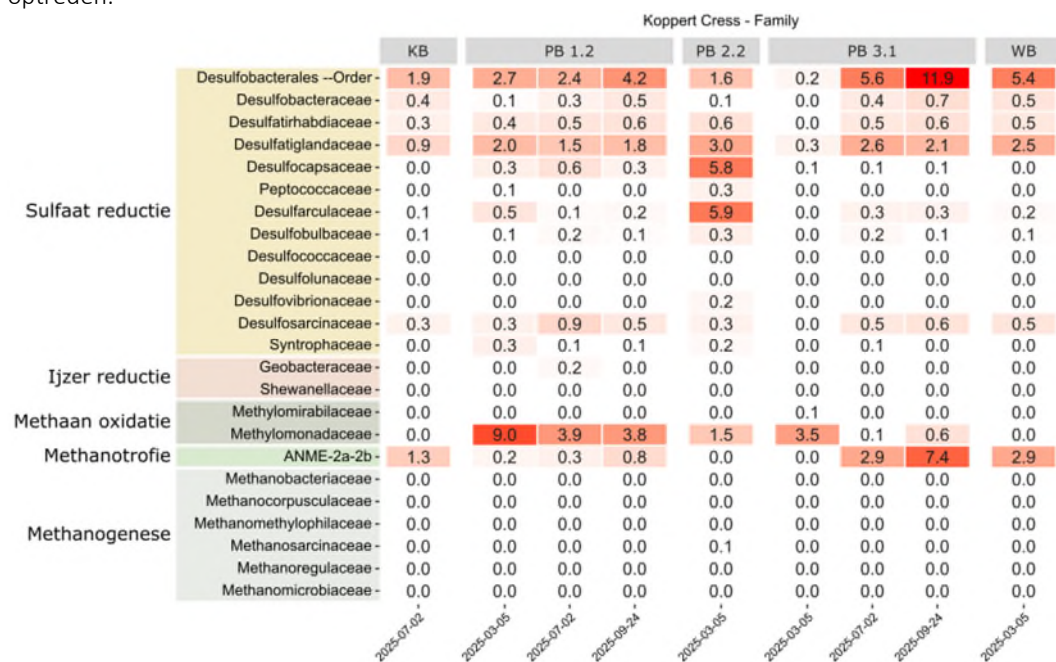


Figuur 4-6. Principal coordinate analyse van de microbiële gemeenschappen bij de nieuwe metingen uit 2025. De afstand tussen de monsters geeft weer hoe verschillend de microbiële gemeenschappen zijn. Principal coordinate 1 en 2 verklaren samen 47,3% van de verschillen.

Naast de diversiteit tussen de monsters is gekeken naar welke taxonomische groepen van micro-organismen het meest veelvoorkomend zijn (**Error! Reference source not found.**). Van de drie meest abundante groepen, de familie Omnitrophaceae en orders Woeseearchaeales en Pacearchaeales is nog veel onduidelijk over potentiële metabole functies. Wel is bekend dat deze groepen inderdaad voorkomen in nutriënt gelimiteerde systemen en anaerobe waters, inclusief grondwater (Probst, Ladd et al. 2018, Dopson, Rezaei Somee et al. 2024).

Microbiële metabolismen die verwacht kunnen worden in het zuurstofloze grondwater zijn sulfaatreductie, ijzerreductie, methaan oxidatie en methanogenese (methaanvorming). In Figuur 4-7 is een overzicht gegeven van het relatieve voorkomen van de microbiële families die potentieel bij deze metabolismen betrokken zijn. Daarbij is bij alle metingen inderdaad potentieel geconstateerd voor zowel sulfaat reductie als methaan oxidatie. Relatief het meest voorkomend zijn sulfaat reducerende micro-organismen van de order Desulfobacterales, waarbinnen ook de aanwezige families Desulfobacteraceae en Desulfatirhabdiaceae vallen. Ook methaanoxiderende organismen zijn aanwezig in de monsters (families Methylomonadaceae en ANME-2a-2b).

Het voorkomen van deze organismen is daarmee in lijn met de chemische samenstelling van het grondwater, waar door de hoge concentraties sulfaat en de aanwezigheid van methaan in theorie inderdaad sulfaat reductie en gekoppeld hieraan methaanoxidatie kan plaatsvinden. De lage microbiologische activiteit, de toename i.p.v. afname in sulfaatconcentraties, en de relatief constante methaanconcentraties duiden er echter niet op dat dit proces door het OBES systeem wordt gestimuleerd, noch dat deze überhaupt op een significante snelheid plaatsvinden. Er is in de microbiologische samenstelling vrijwel geen potentieel voor methaanvorming of ijzerreductie gevonden. Dit sluit echter niet uit dat er bijvoorbeeld geen methaan geproduceerd kan worden door nog niet geïdentificeerde groepen micro-organismen, maar de chemische data duiden er ook niet op dat deze processen significant optreden.



Figuur 4-7. Heatmap met microbiologische taxonomische families geselecteerd voor gerelateerde metabolismen. Getallen in de cellen zijn de relatieve abundanties (%). Relatieve abundanties zijn berekend vanuit de gehele microbiële gemeenschap. Voor de organismen die niet tot op familie-niveau geïdentificeerd konden worden, is de best mogelijke classificatie weergegeven (bijv. Desulfobacterales – Order). Methanotrofen en methanogenen vallen in het domein Archaea, overige families vallen in het domein Bacteriën.

In zowel het monster uit de koude bron als het PB 3.1-monster uit maart (die op basis van de diversiteitsanalyse al als afwijkend naar voren kwamen) zijn hoge abundanties gevonden van micro-organismen die normaal uitsluitend in oxische condities worden verwacht en dus in principe niet in dergelijk diep grondwater. In de koude bron betreft dit o.a. Gallionellaceae (Hoover Rene, Keffer Jessica et al. 2023), Candidatus Nitrotoga (Kitzinger, Koch et al. 2018) en Sulfurimonadaceae (Han and Perner 2015), en in PB 3.1 de families Nitrosopumilaceae en Nitrosomonadaceae (Könneke, Bernhard et al. 2005, Martens-Habbena, Berube et al. 2009, Mori, Chen et al. 2019). Omdat deze groepen metabolisch gekoppeld zijn aan aerobe processen, die niet passen bij het anaeroob karakter van dit grondwater, duidt hun aanwezigheid op enige vervuiling van deze monsters. Een volledig overzicht van de 20 meest abundante families bij alle metingen is opgenomen in Bijlage III.

5 Conclusies

5.1 Gemeten effecten

Op basis van de drie bemonsteringsrondes in 2025 – in aanvulling op de metingen uitgevoerd tussen 2010 en 2020 – uitgevoerd in de bronnen en monitoringsputten rondom het OBES-systeem van Koppert Cress, kan het volgende worden geconcludeerd:

- Geen significante temperatuurverhoging sinds 2020
Ondanks de verwachting dat de opslagtemperatuur in de tussenliggende jaren zou zijn toegenomen, blijkt de gemiddelde temperatuur van het geïnfiltreerde warme water vergelijkbaar met voorgaande jaren. Er zijn dus wel pieken geïnfiltreerd boven de 25 °C maar niet hoger dan 30 °C.
- Omslag in jaarlijkse energie- en volumebalans
Wel wordt er inmiddels meer warmte geïnfiltreerd. Waar het systeem tot circa 2022 werd gekenmerkt door een koudeoverschot, is er inmiddels sprake van een warmteoverschot. Hierdoor groeit de warme bel nu jaarlijks in omvang en wordt het over de jaren opgebouwde overschot aan koude in de ondergrond verkleind.
- Menging domineert effecten op grondwaterkwaliteit, stabiele situatie lijkt na ruim 10 bereikt
Voor diverse parameters blijkt dat het meer dan 10 jaar duurt voordat de waarden in monitoringsputten (met korte putfilters) vergelijkbaar is met het grondwatersamenstelling in de bronnen, die water verpompen over de hele diepte van het filtertraject en waarbij de menging vrijwel instantaan is.
- Geen indicaties voor door temperatuur veroorzaakte veranderingen in waterkwaliteit
Waar verschuivingen zichtbaar zijn, blijken deze verklaart te kunnen worden door de menging van dieper (o.a. zouter) en ondiep (o.a. minder zout) grondwater en niet door thermische effecten, wat in overeenstemming is met de slechts beperkte incidentele temperatuurverhogingen (< 30°C) tot nu toe.
- Microbiologische activiteit blijft laag
In overeenstemming met de beperkte incidentele temperatuurverhogingen (< 30°C) zijn er geen indicaties dat de microbiologische activiteit door het systeem is veranderd; de ATP concentraties zijn zeer laag (<5–6 ng/L) en blijven vergelijkbaar met de eerdere studie (2020). De microbiologische samenstelling van de monsters is vergelijkbaar, en hierin zijn zowel sulfaatreducerende als methaanoxiderende micro-organismen dominant aanwezig, wat overeenkomstig is met de chemische samenstelling van het water.

5.2 Aanbevelingen voor site-operator

Uit de resultaten blijkt niet dat er op korte termijn risico's zijn voor putcapaciteit of technische betrouwbaarheid van het OBES-systeem. Er zijn geen aanwijzingen gevonden voor kalkneerslag, microbiologische aangroei of vergelijkbare processen die typisch bijdragen aan putverstopping. Wel wordt geconstateerd dat binnen de bronnen menging plaatsvindt tussen methaanhoudend en sulfaathoudend water en dat ijzerconcentraties afnemen. In andere OBES systemen heeft dit soms geleid tot verstopping door de vorming van ijzersulfiden of microbiologische processen. Ondanks het ontbreken van acute signalen, is het sowieso raadzaam om de capaciteit van de bronnen regelmatig te monitoren. Mocht een afname in pompcapaciteit optreden dan kan tijdige regeneratie worden ingezet om problemen te voorkomen.

5.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

De situatie bij Koppert Cress biedt een uitgelezen kans voor toekomstig onderzoek omdat de effecten van menging – die jarenlang domineerden – nu grotendeels lijken te zijn uitgewerkt. Hierdoor kan wanneer de infiltratietemperaturen wel significant verhoogd zullen de effecten van temperatuur eenduidiger bepaald kunnen worden. Omdat Koppert Cress in 2026 een aansluiting op aardwarmte krijgt, zal het systeem naar verwachting daadwerkelijk hogere temperaturen gaan hanteren dan in de afgelopen jaren. Wel moet hierbij aangetekend

worden dat een nieuwe verandering in de jaarlijkse waterbalans ook weer verschuiving kan veroorzaken in de gemeten grondwatersamenstelling, met name bij de peilbuizen op grotere afstand van de bronnen.

De bevindingen van dit onderzoek bevestigen de waarde van lange termijn monitoring bij MT- en HT-OBES, gezien de grondwatersamenstelling door het initiële effect van menging er bij sommige meetpunten meer dan tien jaar over doet om een nieuw evenwicht te bereiken. Om de direct thermisch veroorzaakte effecten zuiverder in beeld te brengen en op basis daarvan beter de effecten van MTO- en HTO systemen te kunnen voorspellen is het aanvullend op dit type monitoring zinvol om (1) zoals in het KEEN-onderzoek voor de locatie Middenmeer gedaan is (Hoving et al., 2026) metingen te doen in bovenliggende lagen waar geen menging door actieve verpompings van het systeem plaatsvindt maar waar rond de bronnen wél een toename in temperatuur plaatsvindt en (2) praktijkmetingen te integreren met model- en laboratoriumexperimenten. Onder dergelijk gecontroleerde omstandigheden kan de specifieke invloed van temperatuur op waterkwaliteit nauwkeuriger en zonder versturende omgevingsfactoren worden vastgesteld.

5.4 Aanbevelingen voor beleid

Bij Koppert Cress zijn in de afgelopen jaren geregeld piektemperaturen van boven de 25 °C geïnfiltreerd. Er zijn geen aanwijzingen gevonden dat deze beperkte incidentele hogere temperaturen (tot max 30 °C) hebben geleid tot verslechtering van de grondwaterkwaliteit die groter is dan bij reguliere OBES systemen, wat conform verwachting is. Dit wijst erop dat OBES systemen die tijdelijk deze beperkt hogere temperaturen (<30 °C) toepassen potentie bieden om duurzame warmtebronnen efficiënter te benutten, zonder dat dit op basis van de huidige kennis tot extra risico's leidt.

Tegelijkertijd kunnen er op basis van deze casus geen harde conclusies worden getrokken over de effecten van volwaardig MT- of HT-OBES, waarbij structureel hogere temperaturen dan tot nu toe bij Koppert Cress worden geïnfiltreerd. Kennis en inzichten uit meerdere casussen, gecombineerd met lab- en lange termijn modelstudies zijn noodzakelijk om een volledig beeld te krijgen, toepasbaar op verschillende chemische, microbiologische en temperatuurcondities.

Referenties

Dinkla, I., Lieten, S., Hartog, N., & Drijver. (2012). *Meer met bodemenergie: Rapport 3 & 4 - Effecten op de ondergrond*. [https://soilpedia.nl/Bikiviki_documenten/Meer met Bodemenergie/](https://soilpedia.nl/Bikiviki_documenten/Meer_met_Bodemenergie/)

Bonte, M., van Breukelen, B. M., & Stuyfzand, P. J. (2013). Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Research*, 47(14), 5088–5100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>

Bloemendal, M., Beernink, S., van Bel, N., Hockin, A., & Schout, G. (2020). *KWR 2020.156. Transitie open bodemenergiesysteem Koppert-Cress naar verhoogde opslagtemperatuur Evaluatie van energiebesparingen en grondwatereffecten*. KWR Water Research, Nieuwegein. <https://library.kwrwater.nl/publication/61755396/transitie-open-bodemenergiesysteem-koppertcress-naar-verhoogde-opslagtemperatuur-evaluatie-van-energiebesparingen-en-grondwatereffecten/>

Bloemendal, M., & Hartog, N. (2018). Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems. *Geothermics*, 71, 306–319. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.10.009>

Dopson, M., et al. (2024). "Novel candidate taxa contribute to key metabolic processes in Fennoscandian Shield deep groundwaters." *ISME Communications* 4(1).

Han, Y. and M. Perner (2015). "The globally widespread genus *Sulfurimonas*: versatile energy metabolisms and adaptations to redox clines." *Frontiers in Microbiology* 6.

Hoover Rene, L., et al. (2023). "Gallionellaceae pangenomic analysis reveals insight into phylogeny, metabolic flexibility, and iron oxidation mechanisms." *mSystems* 8(6): e00038-00023.

Kitzinger, K., et al. (2018). "Characterization of the First "Candidatus Nitrotoga" Isolate Reveals Metabolic Versatility and Separate Evolution of Widespread Nitrite-Oxidizing Bacteria." *mBio* 9(4): 10.1128/mbio.01186-01118.

Lüders, K., Dahmke, A., Fiedler, M., & 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, 115266. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115266>

Probst, A. J., et al. (2018). "Differential depth distribution of microbial function and putative symbionts through sediment-hosted aquifers in the deep terrestrial subsurface." *Nature Microbiology* 3(3): 328-336.

Schout, G., & Hartog, N. (2020). *KWR 2020.147 | Effecten van hoge temperatuur warmteopslag op grondwaterkwaliteit*. KWR Water Research, Nieuwegein. <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---c3---effecten-van-hoge-temperatuur-warmteopslag-op-grondwaterkwaliteit.pdf>

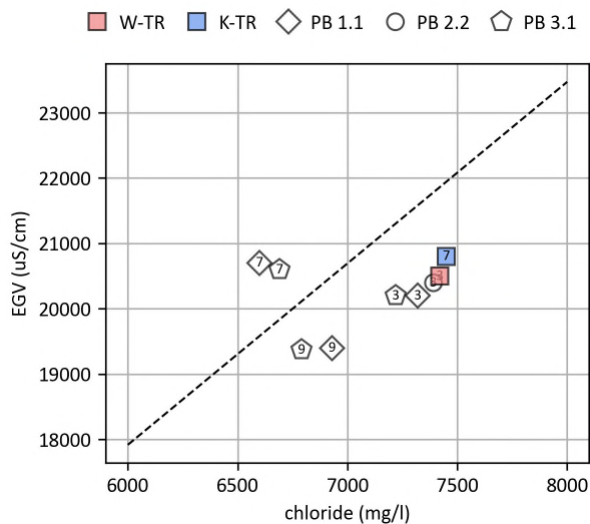
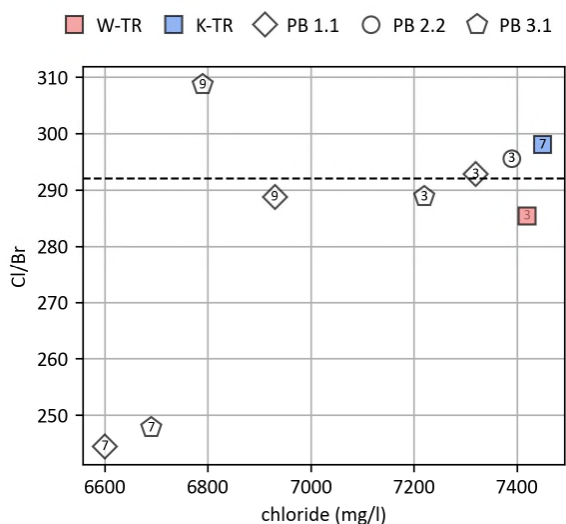
Schout, G., Hartog, N., & Timmers, P. (2023). *KWR 2023.120 | Waterkwaliteitseffecten bij en monitoring van HTO systemen: Synthese en update op basis van de monitoring bij HTO Middenmeer*. KWR Water Research, Nieuwegein. <https://library.kwrwater.nl/publication/71265759/waterkwaliteitseffecten-bij-en-monitoring-van-hto-systemen-synthese-en-update-op-basis-van-de-monitoring-bij-hto-middenmeer/>

I Overzichtstabel meetresultaten

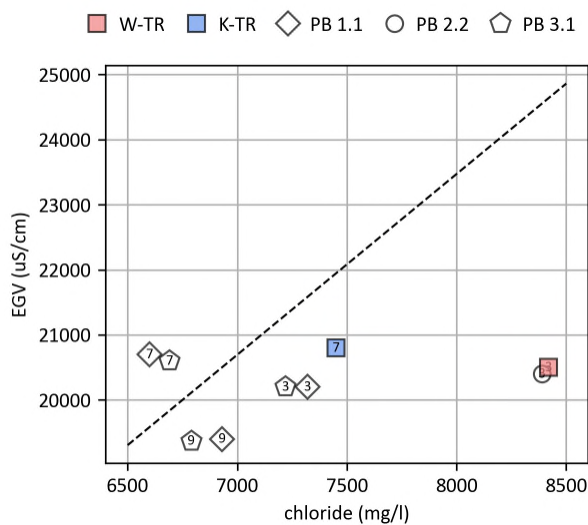
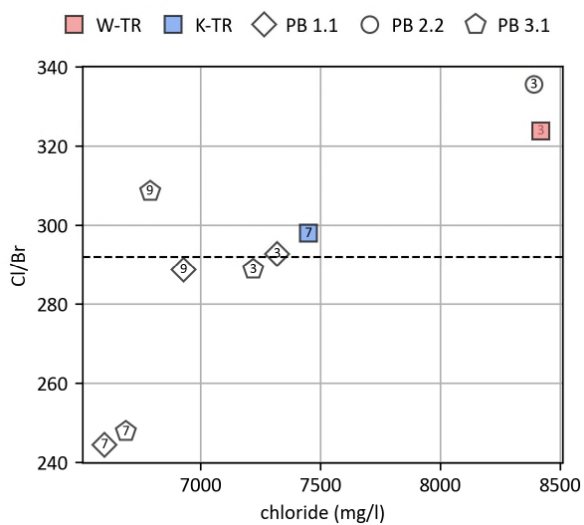
Overzicht van de meetresultaten van de nieuwe bemonsteringsrondes in 2025. WB en KB staan voor de monsternamen vanuit de technische ruimte tijdens verpompings uit de warme bronnen (WB, 's winters) en de koude bronnen (KB, 's zomers).

Monsterpunt	WB	KB	PB 1.2	PB 1.2	PB 1.2	PB 2.2	PB 3.1	PB 3.1	PB 3.1
Datum	5-3-2025	2-7-2025	5-3-2025	2-7-2025	24-9-2025	5-3-2025	5-3-2025	2-7-2025	24-9-2025
T veld (°C)	7	9,8	17,2	18,2	17,1	14,4	17,2	18,1	17,3
EGV (uS/cm)	20500	20800	20200	20700	19400	20400	20200	20600	19370
pH veld (-)	7	7,1	6,9	7	7,02	7	6,9	7	7,07
chloride (mg/l)	7420	7450	7320	6600	6930	7390	7220	6690	6790
sulfaat (mg/l)	690	680	680	780	610	690	670	760	630
bicarbonaat (mg/l)	410	380	390	410	370	370	410	370	370
bromide (mg/l)	26	25	25	27	24	25	25	27	22
nitraat (mg/l)	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,2	0,24	<0,20	<0,20	<0,20
ammonium (mg/l)	17	18	17	17	17	18	18	18	18
(ortho) fosfaat (mgP/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
fosfor (totaal) mgP/l	0,68	0,53	0,58	0,52	0,58	0,64	0,6	0,47	0,54
calcium (mg/l)	520	550	490	550	540	530	500	550	540
natrium (mg/l)	3100	3000	3100	3100	3000	3100	3100	3000	3100
magnesium (mg/l)	530	530	510	530	550	510	510	520	550
kalium (mg/l)	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10
ijzer (mg/l)	9,4	9,1	9,5	9,3	10	14	9,1	9,1	10
mangaan (mg/l)	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,41	0,23	0,24	0,25
DOC (mg/l)	5,6	4,3	5,3	4,5	4,7	5,7	4,9	4,3	4,6
methaan (mg/l)	0,31	0,24	0,26	0,35	0,32	0,05	0,33	0,24	0,36
ATP (ng/L)	<5,5	6,8	<5,2	<1,2	<5,9	<5,7	<5,5	<5,6	<5,7
arseen (µg/l)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
barium (µg/l)	320	330	350	350	340	1000	320	330	390
boor (µg/l)	660	620	660	630	630	540	660	610	640
cadmium (µg/l)	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
kobalt (µg/l)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
chromium (µg/l)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
koper (µg/l)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
lood (µg/l)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
molybdeen (µg/l)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
nikkel (µg/l)	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
silicium (µg/l)	12000	12000	12000	12000	12000	13000	12000	12000	12000
vanadium (µg/l)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
zink (µg/l)	18	<10	14	<10	<10	<10	<10	<10	22

II Aanvullend figuren datakwaliteitscontrole

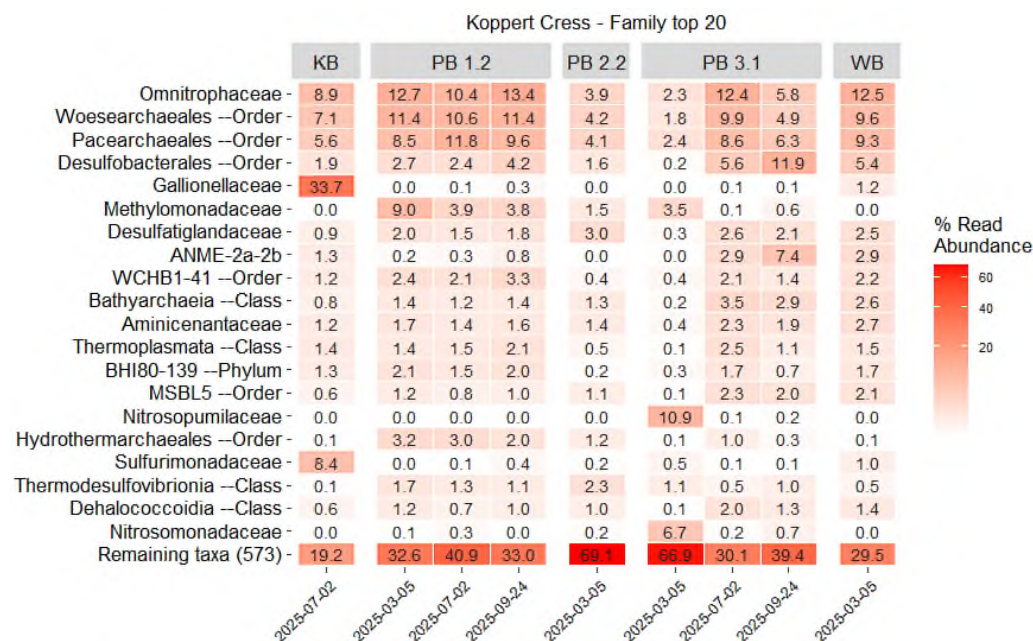


Verhouding Cl/Br en Cl/EGV na aanpassingen o.b.v. kwaliteitscontrole.



Verhouding Cl/Br en Cl/EGV voor aanpassingen o.b.v. kwaliteitscontrole.

III Microbiële samenstelling (top 20 families)



Heatmap van de top 20 meest abundante families. Getallen in de cellen zijn de relatieve abundanties (%). Voor de organismen die niet tot op familie-niveau geassocieerd konden worden, is de best mogelijke classificatie weergegeven (bijv. Woesearchaeales – Order).