



KWR 2020.156 | December 2020

Transitie open bodemenergiesysteem Koppert-Cress naar verhoogde opslagtemperatuur

**Evaluatie van energiebesparingen en
grondwatereffecten**

Open bodemenergiesysteem Koppert-Cress met verhoogde opslagtemperatuur

Evaluatie van energiebesparingen en grondwatereffecten

KWR 2020.156 | December 2020

Opdrachtnummer

401845

Projectmanager

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

Opdrachtgever

TKI Watertechnologie

Auteurs

dr.ir. J.M. (Martin) Bloemendal, ir. S. (Stijn) Beernink,
dr.ir. N. (Nikki) van Bel, ir. (Alex) Hockin, dr. (Gilian) Schout

Kwaliteitsborger

dr. N. (Niels) Hartog

Cover foto: "Vene Cress" in de kas van Koppert-Cress, J.M.Bloemendal

Dit rapport is openbaar. Dit onderzoek is mede gefinancierd uit de toeslag voor Topconsortia voor kennis en innovatie (TKI) van het ministerie van Economische zaken. Daarnaast is financiële steun geleverd door de Provincie Zuid Holland.



Keywords

Open Bodemenergie, warmteopslag, Hoge temperatuur, aardgas vrij verwarmen, kassen



Jaar van publicatie
2020

Meer informatie

dr.ir. J.M. (Martin) Bloemendal
T 030-6069606
E martin.bloemendal@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR brabant Water

December 2020 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag 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, zonder

Samenvatting

Aanleiding en doel

Open bodemenergie (OBES) is een techniek waarbij grondwater en de ondergrond worden gebruikt voor de tijdelijke opslag van warmte- en/ of koude overschotten. Omdat ongeveer 25% van alle energieverbruik in Nederland nodig is voor het verwarmen en koelen van gebouwen kan OBES een belangrijke bijdrage leveren aan de energietransitie. Volgens de reguliere beleidskaders mag grondwater alleen geïnjecteerd worden bij een temperatuur van maximaal 25°C. Warmteopslag bij hogere temperaturen is vanwege beperkte kennis over de effecten op de omgeving alleen toegestaan als pilot project. Echter, op veel plekken zoals tuinbouwbedrijf Koppert-Cress is in de zomer veel warmer water beschikbaar. Er kan dan in potentie veel meer energiewinst worden behaald door het water ook met deze hogere temperatuur te injecteren. De Provincie Zuid-Holland heeft Koppert-Cress via een “green deal” toestemming gegeven om water met een temperatuur tot maximaal 45 °C te infiltreren in haar bestaande OBES. De bij dit onderzoek betrokken partijen, Koppert-Cress, Vyverberg, Bart van Meurs, Provincie Zuid-Holland, Brabant Water en KWR hebben deze proef afgelopen jaren gezamenlijk gemonitord. Het doel van deze monitoring was om antwoord te geven op de volgende vragen:

1. Hoe kan een OBES het beste worden aangestuurd als de injectietemperatuur van de warme bron wordt verhoogd tot boven de 25 °C?
2. Wat is het effect van de hogere temperaturen op het thermisch rendement van de installatie?
3. Wat zijn de operationele risico's van verhoogde temperaturen, en hoe kun je deze het beste monitoren?
4. Wat zijn de milieurisico's voor de omgeving, en hoe kun je deze het beste voorspellen en monitoren?

1. Hoe kan een OBES het beste worden aangestuurd als de injectietemperatuur van de warme bron wordt verhoogd tot boven de 25 °C?

Een belangrijk energetisch voordeel van het injecteren bij hogere temperaturen is dat de installatie warmte kan uitwisselen met het gebouw zonder gebruik van een actieve warmtepomp. Maar om de passieve technieken voor warmte-uitwisseling optimaal te laten verlopen, is een zo groot mogelijk temperatuurverschil nodig tussen het grondwater en de warmtebronnen in het gebouw. Hiertoe dient het water te worden “gecascadeerd”, wat inhoudt dat de warmtebronnen in serie worden geschakeld en achter elkaar warmte afgeven/ onttrekken aan het grondwater. Het beheer van de OBES werd bij Koppert Cress echter bemoeilijkt doordat er, als gevolg van het weer of bedrijfsvoering, fluctuaties optraden in de temperatuur van de verschillende bronnen van warmte. Bovendien waren deze bronnen vaak op vergelijkbaar temperatuurniveau. In zulke situaties is het beter om het grondwater niet in serie maar juist in parallelle deelstromen langs de verschillende warmtebronnen te leiden. Dit zorgt namelijk voor een langere contacttijd tussen grondwater en warmtebron en dus een betere warmte-uitwisseling.

2. Wat is het effect van de hogere temperaturen op het thermisch rendement van de installatie?

Door infiltratie met hogere temperaturen werd de beschikbare duurzame restwarmte vanuit het bedrijf Koppert-Cress beter benut. Hierdoor waren de operationele kosten afgelopen 4 jaar ca. 10% lager dan wanneer er gebruik was gemaakt van een conventioneel bodemenergiesysteem, tegelijkertijd was de CO₂ uitstoot 30 tot 70% lager (afhankelijk van de bron van elektriciteit).

De reductie in uitstoot en kosten wordt deels verklaard doordat bij de hogere injectietemperaturen in combinatie met korte opslag cycli, het OBES een groter deel van de warmtevraag kon invullen; tot 100% voor de kasdelen

waarvan het verwarmingssysteem is aangepast. Bovendien verliep de omzetting van energie vanuit de OBES naar de kas veel efficiënter doordat er bij hogere temperaturen de warmtepomp meer werd ingezet dan voorheen en die warmtepomp ook nog eens efficiënter draaide. Het mes snijdt dus aan 2 kanten. Verdere verhoging van de opslagtemperatuur in de warme bron (en daarmee vergroting van de hoeveelheid ingevangen warmte en verbetering prestaties van de warmtepomp) zal de energieprestatie nog verder versterken. Verder maakte Koppert-Cress ook vaak gebruik van kort-cyclische opslag van warmte. Dat is een efficiënte manier van warmteopslag, en daarmee een effectieve manier om de inzet van het OBES te optimaliseren, zonder dat dat de verspreiding van warmte vergroot. De resterende CO₂ emissie is met name het gevolg van het elektriciteitsgebruik van de warmtepomp en het deel van de kassen dat nog op een gasketel is aangesloten. Deze emissie kan in de toekomst verlaagd worden door betere benutting van de beschikbare (rest)warmte binnen het bedrijf en het gebruik van aanvullende externe duurzame warmtebronnen.

3. Wat zijn de operationele risico's van verhoogde temperaturen, en hoe kun je deze het beste monitoren?

Een belangrijk operationeel risico bij het verhogen van de temperaturen in grondwater is dat de putten verstopt raken door het neerslaan van kalk. De verhoogde temperaturen hebben bij Koppert Cress geleid tot een verhoging van de kalkverzadigingsgraad (SI) van 0 in het oorspronkelijke grondwater naar circa 0.3. Deze toename was zodanig beperkt dat er geen verstopping significante verstopping is optreden. Dit is in lijn met de uitkomsten van andere studies waaruit blijkt dat kalkneerslag pas optreedt bij nog hogere oververzadiging. Het is belangrijk om bij toepassing van hogere injectietemperaturen de kalkverzadigingsgraad en concentraties Calcium en Magnesium regelmatig te monitoren.

4. Wat zijn de milieurisico's voor de omgeving, en hoe kun je deze het beste monitoren?

Uit de analyse van de monitoringgegevens blijkt dat de verhoogde injectietemperatuur bij Koppert-Cress een beperkt effect heeft op de omgeving:

- De warmteverspreiding vanuit de warme bronnen is zowel horizontaal als verticaal beperkt. Dit komt door de relatief kleine opslagvolumes en de onbalans van het systeem. Aan het eind van de winter is de warme bron leeg en is de brontemperatuur slechts een enkele graad hoger dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Hierdoor staat een beperkt deel van de aquifer onder invloed van temperaturen boven 25 °C en bovendien maar tijdelijk.
- Er is geen groei waargenomen binnen de set onderzochte opportunistische pathogenen in het onttrokken water en de aanwezigheid is niet gerelateerd aan de hogere opslagtemperaturen. Verder zijn deze ziekteverwekkers in zodanig beperkte concentratie aangetroffen dat ze geen significante humane risico's veroorzaken.
- De bij Koppert-Cress waargenomen veranderingen in de chemische samenstelling van het grondwater worden gedomineerd door mengeffecten, waarbij water onttrokken wordt uit zowel een diepe, zoutere laag als een ondiepe, brakke laag. Deze twee watertypen worden in het OBES vermengd en bij herinfiltratie verdeeld over de beide formaties. Verschillende sporenelementen zijn als gevolg van deze menging in de loop van de tijd in concentratie afgenomen. De eventuele invloed van de temperatuurveranderingen waren zodanig gering dat het niet mogelijk was om deze te onderscheiden van andere processen.

De bij Koppert Cress gehanteerde set waterkwaliteitsparameters is geschikt om chemische en microbiologische effecten van hogere temperaturen op het omliggende grondwater vast te stellen. Een belangrijk aandachtspunt blijkt om de locatie van peilbuizen zodanig dicht bij de bron te kiezen dat deze ook opwarmen wanneer er een veel kleinere bel met warmwater wordt opgeslagen in de bodem dan vooraf is geanticipeerd.

Conclusies en aanbevelingen

- De toepassing van hogere temperaturen heeft geleid tot een aanzienlijke verbetering van de prestaties van het OBES systeem bij Koppert-Cress (minder emissies en minder energiegebruik en daardoor lagere kosten) en verkleinen van de thermische onbalans en reductie van de CO₂ emissies.
- De verwachting is dat vergelijkbare prestatieverbeteringen ook bij andere OBES projecten met een grote warmte vraag haalbaar zijn met het verhogen van de injectietemperatuur in de warme bron.
- Op basis van dit onderzoek lijkt de verhoging van de injectietemperaturen van een OBES tot 40 °C geen significante effecten te hebben op de chemische en biologische waterkwaliteit.
- Het bevoegd gezag wordt geadviseerd om na te gaan of, en onder welke condities, ze opslag bij hogere temperaturen ook wil toestaan op andere locaties. In hoofdstuk 6 staan aanbevelingen voor hoe de monitoring van dergelijke systemen in de toekomst vorm te geven.
- De belangrijkste aanbevelingen ten aanzien van monitoring bij vergelijkbare projecten is dat de thermische verspreiding adequaat kan worden gemeten met DTS, hoewel de verpompte debieten daar ook een goed beeld over geven. Voor de chemische en microbiologische grondwaterkwaliteit is het vooral van belang om de locatie van het bemonsteringspunt zorgvuldig te kiezen en in de analyse ook rekening te houden met mengeffecten.

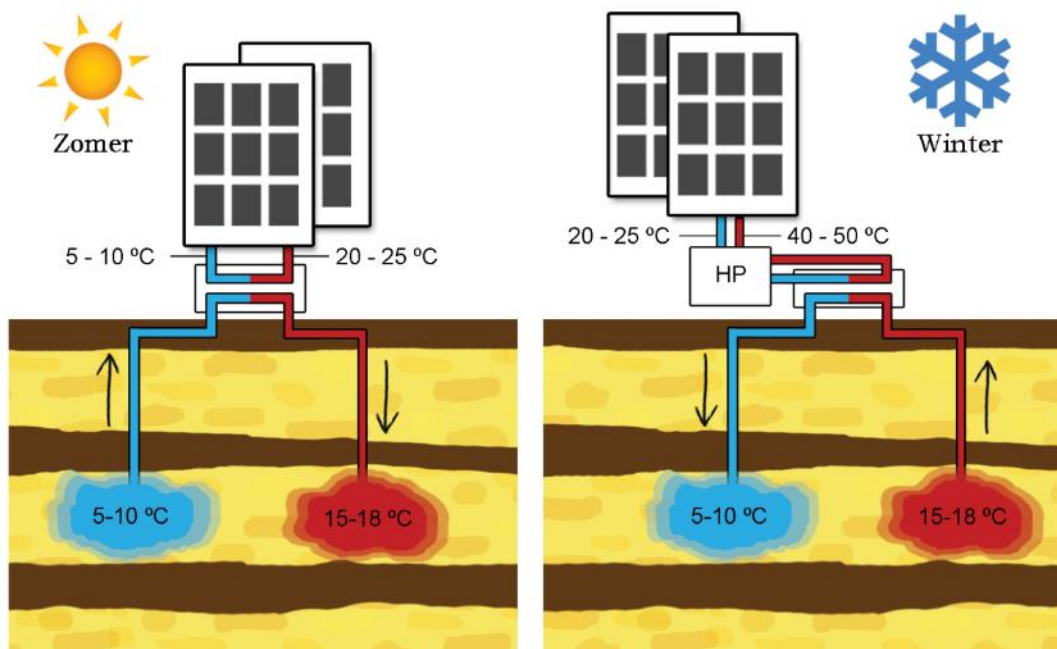
Inhoud

Samenvatting	iv
Inhoudvii	
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding en Doel	1
1.2 Aanpak – Leeswijzer	2
1.3 Samenwerkingsverband en motivatie van participerende deelnemers	2
2 Beschrijving van de installatie en het monitoringsysteem	4
2.1 Situatie beschrijving	4
2.2 Klimaatinstallatie	7
2.3 Beschrijving en methode monitoring	10
3 Analyse en optimalisatie van het bodemenergiesysteem	20
3.1 Analyse energiestromen gebouwinstallatie	20
3.2 Analyse temperatuur en energiestromen bronnen	24
3.3 Optimalisatie milieu-economisch rendement	36
4 Effecten hogere temperatuur opslag	40
4.1 Verwachte impact op basis van analyse volume- en energiestromen	40
4.2 Monitoring temperatuur verdeling ondergrond	41
4.3 Grondwaterkwaliteitsveranderingen in OBES systeem	48
4.4 Microbiologische effecten hogere temperatuur	56
5 Risico bronverstopping door kalkneerslag	70
5.1 Achtergrond van het risico	70
5.2 Evaluatie bronverstoppingsrisico door kalkneerslag bij KC	70
6 Handreikingen voor monitoring	72
6.1 Thermische verspreiding met DTS/logger	72
6.2 Chemie/microbiologie met grondwatersamples	72
6.3 Vereenvoudigde voorspellingsmodule thermische verspreiding	73
7 Discussie	77
8 Conclusies	80
Afkortingen	82
Referenties	82
Bijlagen	86

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en Doel

Koppert-Cress (KC) is een tuinbouwbedrijf in het Westland dat kiemgroenten produceert. Het bedrijf heeft afgelopen jaren een forse besparing op haar fossiele energiegebruik gerealiseerd door warmte te winnen uit bedrijfsprocessen en de omgeving en deze in de bodem op te slaan en later terug te winnen. Dit gebeurde tot 2015 met een "normaal" open bodemenergiesysteem (Figuur 1-1) waarbij de maximale infiltratie temperatuur niet hoger was dan 25°C. Echter, als er in de zomermaanden veel warmte beschikbaar is, loopt de temperatuur van de warmte die in de warme bron moet worden opgeslagen op richting de 45°C. Om de hoge kwaliteit warmte toch te kunnen benutten is het nodig om met hogere temperatuur in de warme bron te kunnen infiltreren.



Figuur 1-1. Werkingsprincipe open bodemenergie (OBES)

De beleidsmatige beperking om tot 25°C te mogen infiltreren is vanwege beperkte kennis over effecten hiervan op het grondwater, met name op de chemische en microbiologische samenstelling van de ondergrond.

Een andere uitdaging waar KC tegenaan liep was dat alleen kennis beschikbaar is voor de aansturing en onderhoud van bodemenergiesystemen met een relatief lage watertemperatuur (< 25 °C) en niet voor installaties met een temperatuur tot 45 °C of hoger. Dit compliceert de a-priori inschatting van energierendement (CO₂-emissiereductie) en kosten/baten.

Om deze 2 aspecten te kunnen onderzoeken heeft de Provincie Zuid-Holland (PZH) KC in 2015 toestemming gegeven om water met een temperatuur tot maximaal 45 °C te infiltreren. Voorwaarde voor deze in Nederland unieke pilot is dat het milieurendement en effecten in de ondergrond omgeving goed worden gemonitord, om zo in beeld te krijgen of warmteopslag beleidsmatig toegestaan kan worden in Zuid-Holland. Het TKI-project waarvan dit de rapportage is, geeft invulling aan deze voorwaarden.

In dit rapport staan de bevindingen van het onderzoek naar de effecten en optimalisatie van energierendement dat is uitgevoerd vanaf de omschakeling naar infiltratietemperaturen > 25°C. Bijzonder aan het project is dat het zich

richt op de transitie van een bestaand conventioneel lage temperatuur open bodemenergiesysteem naar een systeem met een hogere temperatuur van de warme bron¹.

Het doel van het onderzoek is om:

- Met monitoring inzicht te krijgen in de verspreiding van warmte en impact op de waterkwaliteit als gevolg van de hogere opslag temperaturen.
- Kennis te ontwikkelen die nodig is voor aansturing van het bodemenergiesysteem met een zo hoog mogelijk energie-rendement (in termen van CO₂-emissiereductie)

1.2 Aanpak – Leeswijzer

Het onderzoeksproject heeft gelopen van 2017 tot en met 2020. Gedurende dit project voerde KC veranderingen door in haar bodemenergiesysteem en complementaire installaties, zowel om meer warmte te kunnen invangen en ook om meer kas areaal te kunnen aansluiten op het bodemenergiesysteem en van duurzame verwarming/koeling te kunnen voorzien. Daarnaast is een monitoringssysteem aangelegd die gedurende de looptijd van het project is uitgebreid. In hoofdstuk 2 is een algemene beschrijving gegeven van de eigenschappen van de installatie, de geohydrologische omstandigheden en het monitoringssysteem.

Gedurende de looptijd van het project is op verschillende plekken in de ondergrond de temperatuur gemeten en de waterkwaliteit van het grondwater bemonsterd en geanalyseerd. De resultaten en de analyse van deze metingen zijn beschreven in hoofdstuk 3.

De energiestromen van/naar de verschillende componenten van het bodemenergiesysteem (inclusief de regeneratie voorzieningen (waarmee de warmte wordt gewonnen) zijn gepresenteerd en geanalyseerd in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk is energetische optimalisatie beschreven.

Op basis van de ervaringen en resultaten van het onderzoek aan het bodemenergiesysteem van Koppert-Cress zijn er 3 handreikingen ontwikkeld die bij andere OBES met hogere bron temperatuur kunnen worden toegepast. Deze handreikingen zijn gepresenteerd in hoofdstuk 5 en 6 en gaan over: verstoppingspotentie van de bronnen, monitoring en voorspelling van warmte verspreiding.

Het rapport sluit af met een discussie en conclusie in hoofdstuk 7 en 8.

1.3 Samenwerkingsverband en motivatie van participerende deelnemers

Koppert-Cress (KC) is een tuinbedrijf dat kiemgroenten produceert. Ze wil dat volledig duurzaam doen, d.w.z. zoveel mogelijk zonder emissies van stoffen en warmte naar de omgeving en heeft afgelopen jaren daarom geïnvesteerd in verduurzaming van haar energievoorziening. KC investeert in het opslaan op hogere temperatuur omdat ze de ambitie heeft om de beschikbare energie uit haar kassen nog beter te benutten voor hergebruik. Ze levert een in-kind bijdrage door het aanleggen van de installatie en het testen van beheer en onderhoud strategieën en investeert uren.

Bart van Meurs en Vyverberg Advies zijn ontwikkelings-, installatie- en adviesbureau's werkzaam in de glastuinbouwsector. Deze bedrijven dragen bij aan het onderzoek als huisadviseurs van KC omdat ze ervaring hebben met OBES, de potentie zien in de hogere opslag temperaturen en dit ook elders binnen de glastuinbouwsector willen toepassen.

Provincie Zuid Holland neemt deel in het consortium, omdat zij vooral geïnteresseerd is in praktische mogelijkheden van warmteopslag om op basis van praktijkinformatie te kunnen bepalen of warmteopslag onder voorwaarden beleidsmatig structureel kan worden toegestaan.

¹ Het is dus ook geen warmteopslag systeem, dat alleen wordt gebruikt voor verwarmen, KC koelt ook nog met de koude bronnen.

Brabant water ziet OBES een belangrijke bijdrage leveren aan de toekomstige energievoorziening. Omdat Brabant water hun drinkwater uit grondwater produceert is zij geïnteresseerd in ontwikkelingen van OBES en hoe die impact kunnen hebben op grondwaterkwaliteitsveranderingen.

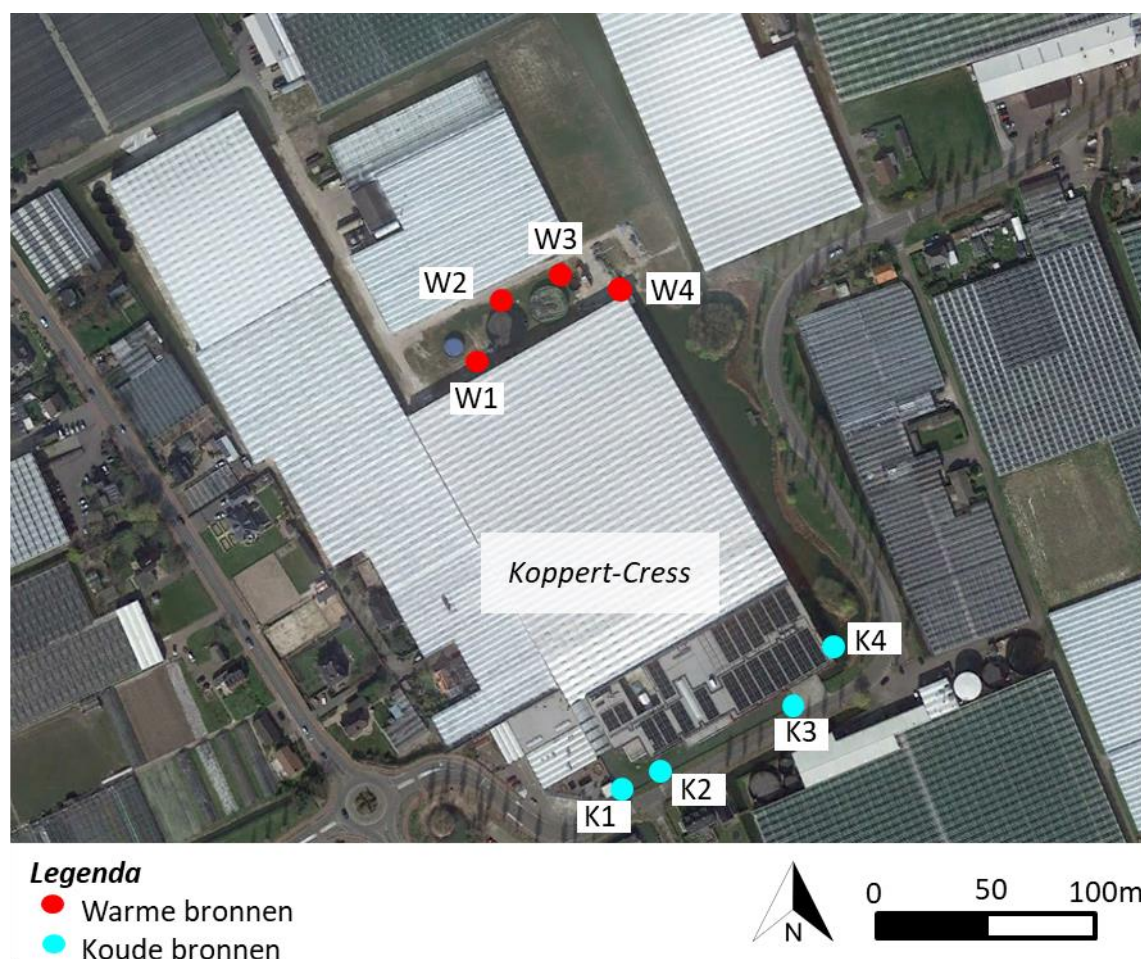
KWR heeft verschillende concepten voor toepassing van bodemenergie / warmteopslag ontwikkeld en uitgewerkt. Ze wil deze concepten verder door ontwikkelen en toepasbaar maken in de praktijk.

2 Beschrijving van de installatie en het monitoringsysteem

2.1 Situatie beschrijving

2.1.1 Beschrijving bodemenergiesysteem

Het glastuinbouwbedrijf Koppert-Cress gebruikt sinds 2012 een bodemenergiesysteem voor de klimaatbeheersing van hun kassen in Monster. Koppert-Cress heeft een vergunning voor het opslaan en terugwinnen van thermische energie in de bodem. Hiervoor heeft zij 4 warme en 4 koude bronnen. De bronnen liggen op het terrein van Koppert-Cress, Figuur 2-1. De filters van de bronnen zijn afgesteld in watervoerend pakket (WVP) 2 en 3 tussen circa 55-75 en 135-160 m-mv, de exacte filterstelling varieert van bron tot bron (Hogervorst, 2015).



Figuur 2-1. Bron locaties op het terrein van Koppert-Cress

De provincie Zuid-Holland heeft in 2015 toestemming gegeven om hogere temperaturen op te slaan. Dit houdt in dat water met een temperatuur tot 45°C wordt opgeslagen met als doel om veel meer energie te besparen dan bij reguliere bodemenergiesystemen met een maximale temperatuur van 25°C.

2.1.2 Geohydrologische situatie

De maaiveldhoogte ter plaatse van Koppert-Cress (KC) is ongeveer NAP +0.5m (AHN, 2017). De bodemopbouw is schematische weergegeven in Tabel 2-1. Ter plaatse van KC is de deklaag circa 20 m. Het eerste watervoerende pakket (WVP) direct daaronder bestaat uit fijne tot matige grove zanden. Het eerste watervoerende pakket loopt tot circa 50m diepte en de daaronder gelegen eerste scheidende laag loopt tot circa 60m. Vanaf 60m begint het gecombineerde 2^{de} en 3^{de} watervoerende pakket met een circa 45m dikke zandlaag die wordt onderbroken door een aantal klei lagen van de formatie van Waarle en Maassluis. De globale beschrijving van de bodemopbouw is afgeleid op basis van de (digitale) grondwaterkaart, boringen van Dinoloket en de bronnen van Koppert-Cress en REGIS II (TNO, 2017). De filters van de bronnen zijn afgesteld in het bovenste deel van WVP 2/3 tussen 55 en 75 m-mv (in de Formatie van Peize-Waalre) en in WVP 2/3 in de Formatie van Maassluis tussen 135 en 160 m-mv.

Tabel 2-1. Globale bodemopbouw o.b.v. Regis (TNO, 2002, 2017) en boorbeschrijving bronnen Koppert-Cress (Hogervorst, 2015)

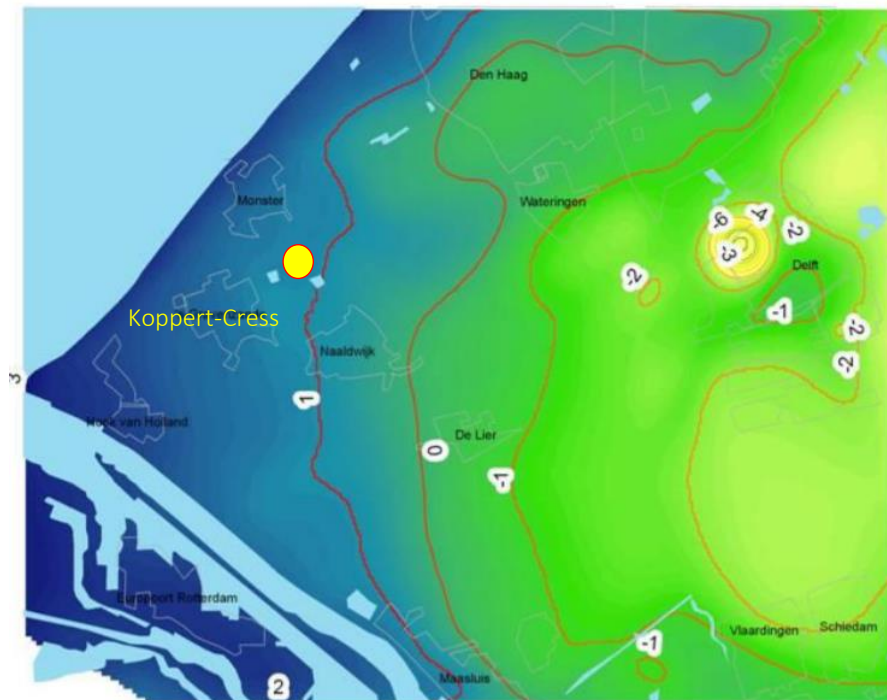
bovenkant m tov mv	onderkant m tov mv	Dikte m	Eenheid -	Materiaal -	formatie -	Kh m/d	Kv m/d
0	-20	20	hol. deklaag	klei, veen		1	0.2
-20	-50	30	WVP 1	fijn matg grof zand	Kreftenheye	16.7	3.3
-50	-60	10	SDL 1	klei, zandige klei	Waalre	0.1	0.02
-60	-75	15	wvp2/3	fijn tot grof zand, grind, schelpen	Peize, waalre	33.3	6.7
-75	-85	10	SDL 2	klei, zandige klei	Waalre	1.0	0.2
-85	-95	10	wvp2/3	fijn tot grof zand, grind, schelpen	Peize, waalre	20.0	10.0
-85	-100	15	SDL 3	klei, zandige klei	Waalre	1.5	0.3
-100	-110	10	wvp2/3	fijn tot grof zand, grind, schelpen	Maassluis	5.0	1.0
-110	-140	30	SDL 4	zandige en kleiige afzettingen	Maassluis	0.0	0.01
-140	-160	20	wvp2/3	zandige en kleiige afzettingen	Maassluis	30.0	0.00
-160	-220	60	Basis	zandige en kleiige afzettingen	Maassluis	0.0	0.00

Grondwaterstroming

Ter plaatse van KC is de grondwaterstroming in het 2/3^{de} watervoerende pakket beperkt. Op basis van het stijghoogte patroon uit analyse van Deltares en KWR (Sanchez et al., 2012) is ten oosten van Koppert-Cress de stroming in oostelijke richting, i.v.m. de onttrekking van DSM in Delft. Door de nabijheid van de zee ten noord westen van Koppert-Cress is het verhang ten noordwesten van KC noordwestelijk gericht. Daardoor is het stijghoogte verhang is ter plaatse van Koppert-Cress erg klein wat erop wijst dat het grondwater vrijwel niet of heel langzaam (<1m/jaar) in oostelijke dan wel westelijke richting stroomt. Verder is het zo dat de grondwateronttrekking van DSM langzaam wordt afgebouwd². Het exacte effect hiervan op de stijghoogten is niet bekend, het is aannemelijk dat de gradiënt in oostelijke richting minder steil wordt of verdwijnt. Waardoor het grondwater ter plaatse van Koppert-Cress in de toekomst alleen in (noord)westelijke richting zal gaan stromen richting de zee. Over de grondwaterstromingssnelheid kan echter geen uitspraak worden gedaan op basis van de beschikbare gegevens. Op basis van de grondwaterstroming in vergelijkbare gebieden langs de Nederlandse kust, zonder versturende onttrekkingen in de nabijheid, kan redelijkerwijs worden verwacht dat ook in deze situatie de grondwaterstromingssnelheid in de orde grootte van enkele meters per jaar is (Wimmers, 2019) en daarmee nog

² <https://www.delft.nl/milieu/bodem/grondwateronttrekking-delft-noord>

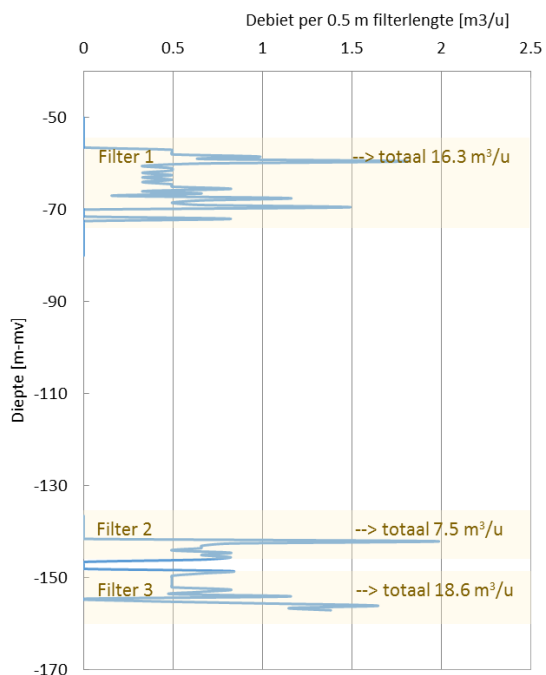
steeds verwaarloosbaar klein is het voor het functioneren van het bodemenergiesysteem (Bloemendal and Hartog, 2018). In deze studie is uitgegaan van stilstaand grondwater van de situatie gedurende de looptijd van het project.



Figuur 2-2. Stijghoogten in gecombineerde 2/3^{de} watervoerende pakket. (Sanchez et al., 2012)

2.1.3 Verdeling van volumestroom over de filterdelen

Omdat de bronfilters zijn afgesteld in verschillende watervoerende pakketten, met verschillende eigenschappen zullen beide filterdelen niet evenredig veel bijdragen aan de volumestromen in en uit de bronnen. Dit heeft effect op de verspreiding van de warmte in elk van de pakketten. Om indicatie te krijgen van de verdeling van de volumestroom over de verschillende filter delen is op woensdag 1 augustus 2018 een flow meting uitgevoerd op de meest oostelijk gelegen warme bron (W4 in Figuur 2-1). Dit was mogelijk omdat de bronpomp van deze put wegens defect verwijderd moest worden. Het meetrapport is opgenomen in Bijlage 0, de grafiek met de flow verdeling staat in Figuur 2-3.

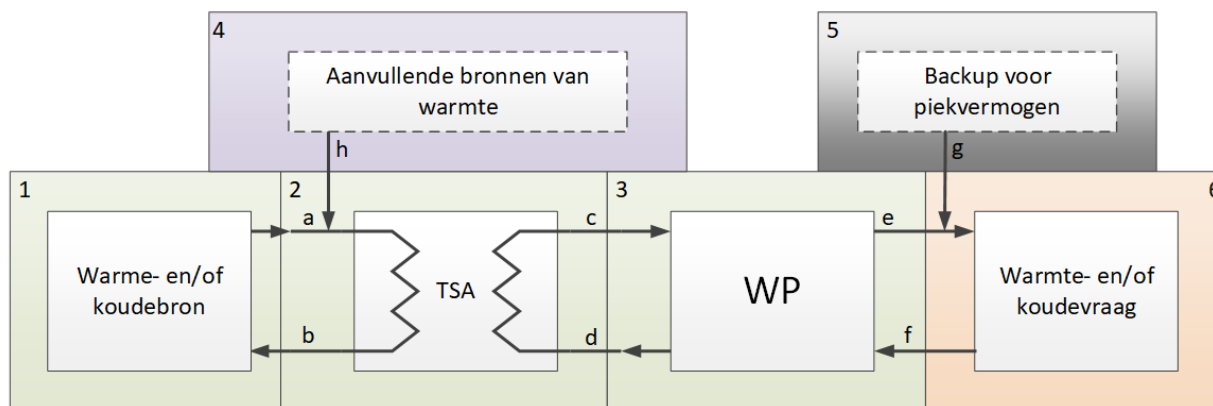


Figuur 2-3. Debiet per halve meter filterlengte

Uit de meetresultaten blijkt dat circa 26 m³/uur uit de filterdelen in de Fm. Maassluis komen (diep) en circa 16 m³/uur uit Fm. Peize-Waalre (ondiep). Dat betekent dat 60% van de totale capaciteit wordt onttrokken uit de diepste filterdelen.

2.2 Klimaatinstallatie

De klimaatinstallatie van KC is een complex systeem geworden, dat komt door verschillende modernisering, uitbreidingen van het teeltareaal en de aankoop van aanpalende kassen en koppeling van de installaties. Verschillende componenten leveren verwarming en koeling naar verschillende teelt- en gebouwafdelingen. Voor het analyseren van de werking van het bodemenergiesysteem is het van belang om zo goed mogelijk inzicht te krijgen in hoe de installatie de bronnen inzet en kan inzetten om zo tot een optimale inzet van het bodemenergiesysteem te komen. Om dit te doen zijn de verschillende opwekkers en afnemers van warmte die zijn gekoppeld aan de bronnen beschouwd. In Figuur 2-4 zijn deze hoofdcomponenten van het bodemenergiesysteem aangegeven. De distributie van de koeling en verwarming naar de verschillende teeltarealen is buiten beschouwing gelaten.



Figuur 2-4. Hoofdcomponenten van een bodemenergiesysteem

Koppert-Cress heeft een netto warmtevraag, waardoor de focus van de installatie ligt op warmte opwekking. Voor de klimatisering van de cressen is het van cruciaal belang dat er een gelijkmatig klimaat is in de kassen, zowel ruimtelijk als in de tijd. KC heeft 2 warmtepompen die hun warmte krijgen uit het bodemenergiesysteem. Er zijn gasketels en een warmtekrachtkoppeling (WKK) die warmte leveren aan de teeltarealen die nog niet geschikt zijn voor lage temperatuur verwarming en die als back-up/piekvoorziening dienen voor de warmtepompen. Door het bodemenergiesysteem zo optimaal mogelijk in te zetten wordt inzet van de WKK en gasketel zo veel mogelijk beperkt.

2.2.1 Ontwikkeling toename areaal en gebruik van de bronnen

Door de uitbreidingen van het kas areaal in de afgelopen jaren is er meer water verpompt dan was voorzien in de vergunning. Koppert-Cress verwacht nog meer uitbreidingen te doen de komende jaren, in deze paragraaf zijn uitgevoerde aanpassingen en de verwachte veranderingen beschreven en de implicaties daarvan voor het gebruik van de bronnen in beeld gebracht. Eind 2020 is het kas areaal van Koppert-Cress circa 40,000 m², de helft daarvan wordt volledig door het OBES van Warmte voorzien, 25% door OBES en de pieken met gasketel/WKK en resterende 25% volledig door gasketel/WKK.

Beschrijving van de wijzigingen in de gebruikssituatie

Reeds doorgevoerde wijzigingen in de gebruikssituatie sinds 2012:

- Sinds 2013 is het teeltareaal van Koppert-Cress, dat is gekoppeld aan de bodemenergie installatie, toegenomen met 8,000 m². De teeltafdeling is voorzien van vloer- en luchtkoeling/-verwarming. Daarnaast is er een verwerkingsruimte van circa 5,000 m² in gebruik genomen. Deze ruimte is voorzien van vloerverwarming/-koeling die worden gevoed door het bodemenergiesysteem.
- Om het toegenomen kasareaal te verwarmen/koelen, een hogere temperatuur en meer energie in de bodem te kunnen opslaan, heeft Koppert-Cress eind 2016 een tweede warmtepomp geïnstalleerd. Deze staat in serie geschakeld met de eerste warmtepomp, de warmte pompen hebben een condensor vermogen van resp. 1.8 en 1.3 MW. Warmtepomp 1 warmt het circuliatiemedium in de kas op tot ca 38°C, de 2^{de} tot 63°C.
- Eind 2018 is een nieuwe kasafdeling van ca. 7,100 m² in gebruik genomen, voorzien van vloer- en luchtverwarming/-koeling en watergekoelde LED lampen. De beschikbare warmte van de LED lampen komt ten goede aan het bodemenergiesysteem.

Geplande/in gang gezette wijzigingen gebruikssituatie:

- In 2020 neemt Koppert-Cress een grootschalige, meerlaagse kiemcel in gebruik. De netto warmte vraag van deze kiemcel is naar verwachting negatief, en moet de netto warmtevraag van KC enigszins compenseren.
- De verwerkingsruimte, waar de cressen worden ingepakt (5.000 m²) wordt voorzien van een koelinstallatie. Ook de onttrokken warmte uit deze installatie zal ten goede komen aan het bodemenergiesysteem.

Verwachte energiestromen en gebruik van de bronnen

De bovengenoemde aanpassingen hebben gevolgen voor de energiestromen in de klimaatinstallaties van Koppert-Cress en daarmee ook voor de benodigde opslagcapaciteit van het bodemenergiesysteem. Vyverberg en van Meurs zijn de klimaatadviseurs van Koppert-Cress; in overleg met hen is de te verwachten energievraag bepaald van de volgende scenario's:

-1 = Energievraag waar de vergunning van 2011 op is gebaseerd

0 = situatie in 2017/2018

1 = scenario 0 + uitbreidingen 2019/2020

Tabel 2-2. Verwachte energievraag voor verwarming en koeling per scenario per jaar

scenario	Warmtevraag			Koelvraag	
	totaal	voor WP	bron*	totaal	bron
	[TJ]	[TJ]	[TJ]	[TJ]	[TJ]
-1	22	10	8	15	6
0	37	22	18	21	10
1	45	28	23	31	16

*o.b.v. COP van 6

Uit Tabel 2-2 blijkt dat er een grote stijging in warmte en koude vraag in scenario 0 en 1 ten opzichte van de vergunning uit 2011 (scenario -1), deze stijging is in lijn met het gebruik van de bronnen in 2018 en 2019. De netto warmtevraag van de kassen aan de bronnen blijft in de toekomst groter dan de koelvraag (scenario 2). Het verschil wordt echter wel kleiner door de grotere koelvraag in de nieuwe kassen.

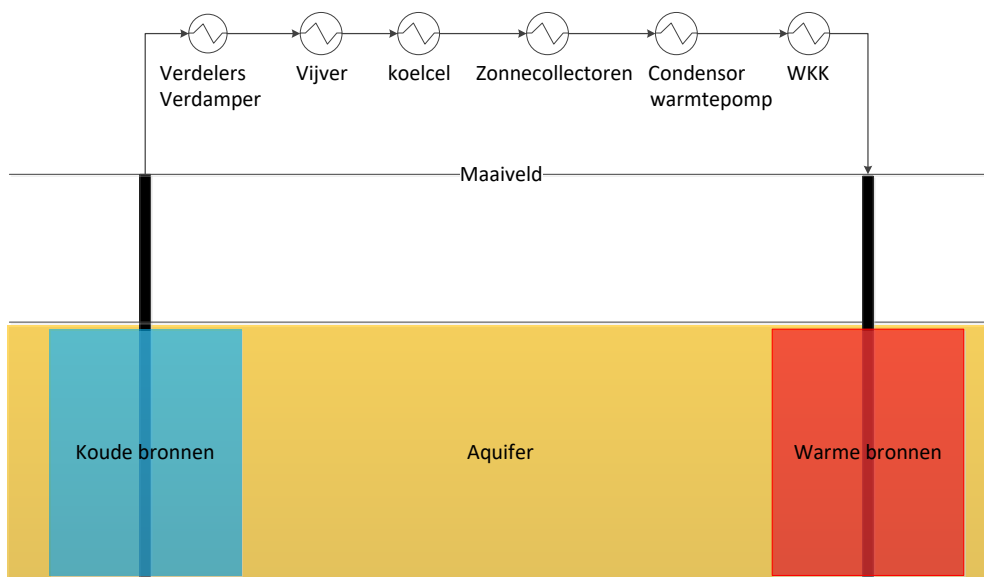
2.2.2 Potentiele warmte aanbod uit aanvullende warmte bronnen

Koppert-Cress heeft een grotere warmte dan koude vraag. Omdat Koppert-Cress de eerste jaren onvoldoende mogelijkheid had om extra warmte in te vangen is er een groot koude-overschot in de bodem ontstaan. Door extra omgevingswarmte in de bronnen op te slaan kan de onbalans worden weggewerkt en na normalisatie in balans worden geëxploiteerd.

De bodemenergiebronnen zijn in serie gekoppeld aan warmtewisselaars van verschillende bronnen van warmte, zie Figuur 2-5. Via de verdelers en warmtepompen leveren de bronnen koeling of verwarming aan de gebouwen. Als er wordt gekoeld of als er geen energievraag is kan water uit de koude bron langs een serie van aanvullende warmte bronnen worden geleid om extra warmte aan de warme bron toe te voegen. Deze componenten zijn:

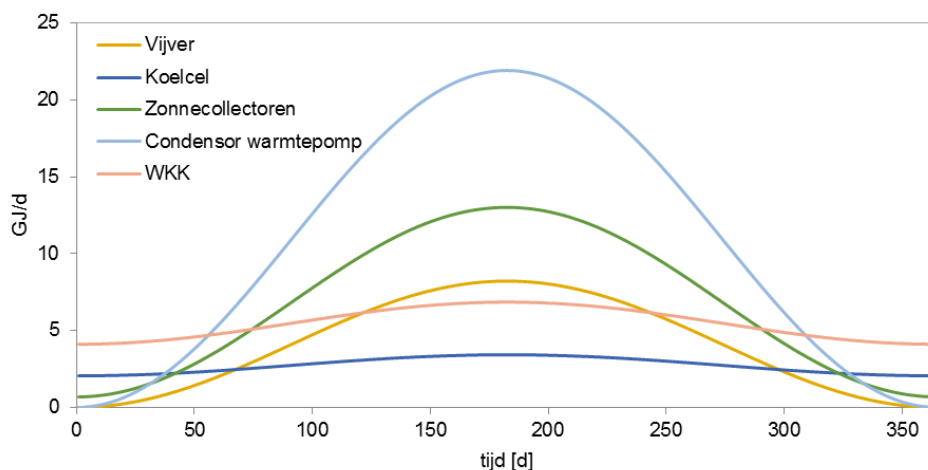
- Vijver: nabijgelegen oppervlakte water, dat in de zomer warm wordt en waar dus warmte uit kan worden geoogst. Tijdens koelbedrijf wordt grondwater via slootwater verwarmd. In 2016 is er ca 1,300 GJ aan warmte gewonnen. In potentie had er nog ca 350 GJ kunnen worden gewonnen, totaal ca 1.5 TJ/j
- Koelcel, die restwarmte heeft uit het koelproces, via de condensor van de koelinstallatie. Het koelvermogen is 0.1 MW en de COP = 3 → warmte productie = 4/3 van koude productie. Equivalente vollasturen = 2,000 u, totaal ca 1 TJ/j.
- Zonnecollectoren op het dak van kantoren verwerking- en andere logistieke ruimten, stralingsenergie wordt omgezet in warmte, totale oppervlakte is 1,650 m². De efficiency van collectoren (omzetten straling in warmte) = 0.5, het zonnedak werkt alleen als straling > 300 W/m², gemiddeld per dag is de straling 600W/m². Toegepaste correctiefactor =0.8, de instraling: 3.7 GJ/m²/y (KNMI, 2020), totaal ca 2.5 TJ/j.
- Condensoren van de warmtepomp, als de warmtepompen worden ingezet om te koelen wordt de condensor warmte in de bronnen opgeslagen. Uit de monitoringsdata van 2016 blijkt dat de warmtepomp nog regelmatig wordt ingezet voor koeling. de condensor warmte die daarbij vrijkomt kan in de bron worden opgeslagen, in 2016 was dat circa 4,500 GJ. Vanwege de klimaatverandering is de verwachting dat dit vaker nodig zal zijn, ca 5 TJ/j
- WKK van aangekochte naastgelegen kas. De WKK produceert elektriciteit, CO₂ en warmte. Soms is de warmte als restproduct over als er vraag is naar CO₂ en/of elektriciteit voor belichting. Op basis van de draaiuren van de WKK blijkt dat er in 2016 ca 1,000 GJ aan restwarmte is geproduceerd. De verwachting is dat de WKK wel significant meer gaat draaien komende jaren. Hoeveel meer is nog onduidelijk, we gaan hier nu uit van 2x zoveel, dus 2 TJ/j.

Samen leveren deze bronnen dus ca 12 TJ/j aan warmte op, waarbij de meeste warmte in de zomermaanden beschikbaar is, Figuur 2-6.



Figuur 2-5. Schematische weergave in serie geschakelde bronnen van warmte, gekoppeld aan de bodemenergiebronnen.

Rekening houdend met het extra invangen van warmte (maximaal ca 12 TJ/jaar) ontstaat er warmte overschot in de bodemenergiebronnen (Tabel 2-2), waarmee de bestaande onbalans kan worden opgeheven. Op de lange termijn kan daardoor naar een balanssituatie worden toegewerkt.



Figuur 2-6. Capaciteit voor warmteinvang gedurende het jaar met aanvullende bronnen voor warmte.

2.3 Beschrijving en methode monitoring

Strategieën om operationele risico's en omgevingseffecten te monitoren.

Voor de aansturing en onderhoud van het systeem is het belangrijk om actueel inzicht te hebben in de temperatuur van het grondwater en verstopping van de bronnen. Het betreft bovendien een systeeminnovatie waarbij vanuit het oogpunt van vergunningverlening en maatschappelijke acceptatie inzicht nodig is in de effecten op de omgevingstemperatuur, -chemie en microbiologie in de ondergrond

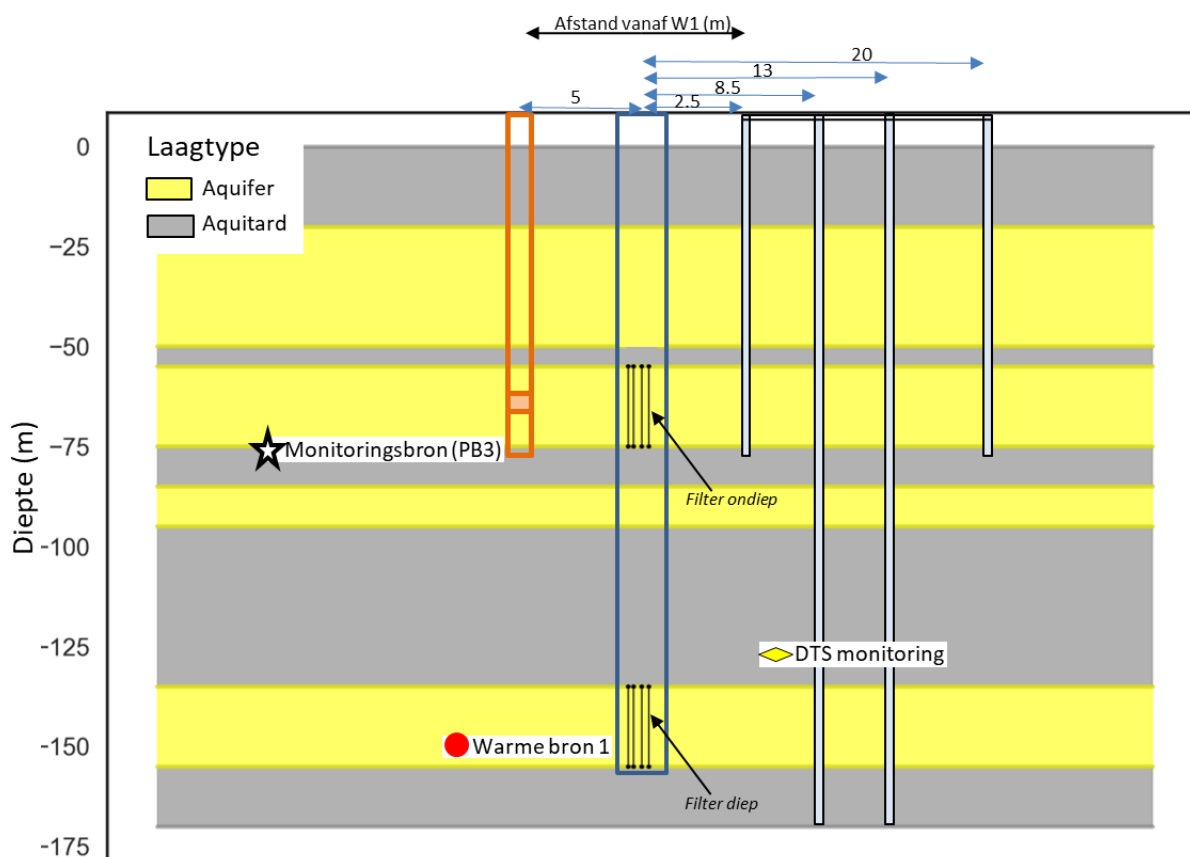
2.3.1 Temperatuurmonitoring

Om een goed beeld te krijgen van de ruimtelijke verspreiding van de warmte zijn er op verschillende afstanden van warme bron 1 in 4 boorgaten glasvezelkabels geïnstalleerd. Met de glasvezelkabels kan een hoge resolutie temperatuur profiel worden verkregen over het hele bodemkolom, deze techniek heet Distributed Temperature Sensing (DTS), zie kader. Eind 2017 zijn er twee DTS lussen geplaatst op 2.5m en 20m vanaf warme bron 1, deze

reiken tot de onderkant van het bovenste filter (ca 75 m-mv) . In September 2019 zijn daar twee aanvullende DTS locaties aan toegevoegd op een afstand van 8.5 m en 13 m vanaf warme bron 1. De glasvezelkabels meten continu de temperatuur in de ondergrond en geven dus een duidelijk beeld van de verdeling van de warmte in beide opslagpakketten (Figuur 2-8). Tijdens de monitoringsperiode zijn er door kabelbreuken verschillende periodes geweest dat er geen data is verzameld, de resultaten laten daarom gaten zien. De reden dat de eerste DTS boringen niet tot de volledige diepte zijn aangelegd was een budgetkwestie. Later is via een ander project (Heatstore) aanvullend budget beschikbaar gekomen om wel dieper te kunnen meten.



Figuur 2-7 Overzicht van het gebied rondom warme bron 1 en de daaromheen liggende monitoringsapparatuur.



Figuur 2-8 Doorsnede van de ondergrond rondom warme bron 1 en de daaromheen liggende monitoringsapparatuur (1 monitoringsbron, 4x DTS). De gebruikte symbolen komen overeen met symbolen in Figuur 2-7.

Kader: Distributed Temperature Sensing

DTS is een techniek die gebruik maakt van laserpuls die door een glasvezelkabels wordt gestuurd. Doordat het licht op verschillende wijzen wordt gebroken tijdens de beweging door de kabel geeft dit informatie over de condities op plek X. Doordat de snelheid van de laser bekend is en de reistijd ($< \mu\text{s}$) heel nauwkeurig wordt gemonitord kan worden bepaald op welke locatie bepaalde condities gelden. Op deze wijze kunnen bijvoorbeeld de temperatuur van de kabel en de druk/stress op de kabel gemeten worden. Voor dit onderzoek is het gebruik van deze glasvezelkabels alleen voor het meten van de temperatuur in de ondergrond. Met een meetfout van $< 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ kan op deze wijze worden bepaald wat de temperatuur is voor iedere locatie van de glasvezelkabel (Selker et al., 2006).

Het uitzenden van de laserpuls, het verwerken van de informatie en het opslaan van de resultaten wordt gedaan met een ORYX DTS apparaat. De temperatuur van de kabel is iedere 3 uur en op elke meter gemeten, zodat een voldoende nauwkeurig diepte profiel kan worden gegenereerd. Op de locaties van de DTS kabels veranderd het temperatuurprofiel niet dusdanig dat een hogere tijd-resolutie dan 3 uur meer inzicht geeft in de verspreiding van warmte in de ondergrond.



Figuur 2-9 De glasvezel kabel wordt hier geknipt en vervolgens geprepareerd voor gebruik.

2.3.2 Chemische en microbiologische monitoring

Bij de start van dit TKI onderzoek was de monitoring bij Koppert-Cress als volgt ingericht: op 2 locaties waren peilbuizen geïnstalleerd waaruit grondwatersamples konden worden genomen, voor waterkwaliteitsanalyse. De locaties van deze peilbuizen zijn pb1: 20 m t.o.v. warme bron 3 en pb2: 75 m t.o.v. warme bron 4 (Figuur 2-7).

Vanaf begin 2017 zijn hier ook temperatuur sensoren geïnstalleerd (PT100), zodat bekend is wat de optredende temperatuur in de ondergrond is, ter plaatse van de monsternamen. Halverwege 2019 is er nog een derde peilbuis toegevoegd op 5m afstand van warme bron 1, zodat ook op kleinere afstand en met grotere temperatuur verandering van het grondwater de samenstelling kan worden geanalyseerd (Figuur 2-8).

De grondwaterkwaliteit is met vaste regelmaat gesampled in de beschikbare monitoringsbronnen. Tot september 2019 zijn er twee bronnen bemonsterd (peilbuis 1: 20m van warme bron 3 en peilbuis 2: 75m van warme bron 4). Uit de temperatuurmonitoring bleek in 2018 dat het warme water peilbuis 1 niet of nauwelijks bereikt en bijna geen invloed heeft op de grondwatertemperatuur. Er is daarom een extra monitoringsbron geboord in September 2019 (peilbuis 3) om ook dichterbij het warme opgeslagen water (in de warm bel) te kunnen bemonsteren, deze nieuwe bron is daarom op 5m afstand van warme bron 1 geboord (zie ook Figuur 2-8). Verder is er een watermonster genomen in de technische ruimte, waarbij grondwater dat tussen de warme en koude bron heen en weer wordt gepompt is afgetapt. Deze monsters zijn geanalyseerd en beschreven in hoofdstuk 0.

In de periode 2015 – 2020 is het water in de warme bel en het water in de technische ruimte van het OBES-systeem op verschillende momenten bemonsterd. De metingen t/m 16 maart 2016 zijn geen onderdeel van dit TKI-project, maar zijn uitgevoerd in eerder onderzoek in opdracht van de provincie Zuid-Holland (Bel et al., 2016). Voor de volledigheid zijn deze resultaten opgenomen in dit rapport.

Tabel 2-3. Overzicht van monsternamedatums en de heersende condities in het bodemenergie systeem.

Datum monstername		Warme bel*	Opmerkingen
9 maart 2015	Einde koude laden	Leeg	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
19 mei 2015	50% warmte laden	Halfvol	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
23 september 2015	Einde warmte laden	Vol	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
5 januari 2016	50% koude laden	Halfleeg	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
16 maart 2016	Einde koude laden	Leeg	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
27 november 2017	25% koude laden	75% vol	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
9 april 2018	Einde koude laden	Leeg	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
11 juni 2018	50% warmte laden	Halfvol	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
17 september 2018	Einde warmte laden	Vol	Nulmeting, geen warm water bij PB1 en PB2
3 februari 2020	50% koude laden	25% vol	Meting bij peilbuizen 1-3 en technische ruimte
16 maart 2020	Einde koude laden	Leeg	Meting bij peilbuizen 1-3 en technische ruimte
10 augustus 2020	75% warmte laden	75% vol	Meting bij peilbuizen 1-3 en technische ruimte
14 september 2020	Einde warmte laden	Vol	Meting bij peilbuizen 1-3 en technische ruimte

* Bij benadering, indicatieve waarde

Monitoring van de grondwatertemperatuur laat inderdaad zien dat het warme water niet of nauwelijks peilbuis 1 (op 20 meter) bereikt (Tabel 2-4). Het grondwater bij peilbuis 3 warmt in de zomer wel op.

Tabel 2-4. Grondwatertemperatuur van het opgepompte water tijdens de monsternamen ('monstername').

	Temperatuur bij monstername			
	Technische ruimte	PB3 (5m)	PB1 (20m)	PB2 (75m)
9-mrt-15	17.1		15.8	17.4
19-mei-15	18.5		18.6	18.8
23-sep-15	17.1		16.6	17.4
6-jan-16	17		16.3	14.9
16-mrt-16	18.1		17.8	17.3
27-nov-17	19.3		13.1	13.7
9-apr-18	15.3		12.9	14.1
11-jun-18	13.6		14.4	13.7
17-sep-18	26.6		15.5	13.6
3-feb-20	26.4	15.9	13.3	13
16-mrt-20	18.3	13.4	13.2	12.8
10-aug-20	36.9	24.6	16.1	13.6
14-sept-20	22.9	18.5	16.4	16

2.3.2.1 Bemonsteringsprocedure

In dit rapport worden de resultaten van vijf jaar monitoring (2015 – 2020) beschreven. Gedurende deze periode zijn verschillende bemonsteringsprotocollen toegepast en getest. Deze protocollen zijn hieronder in chronologische volgorde beschreven.

Periode 2015 – 2017

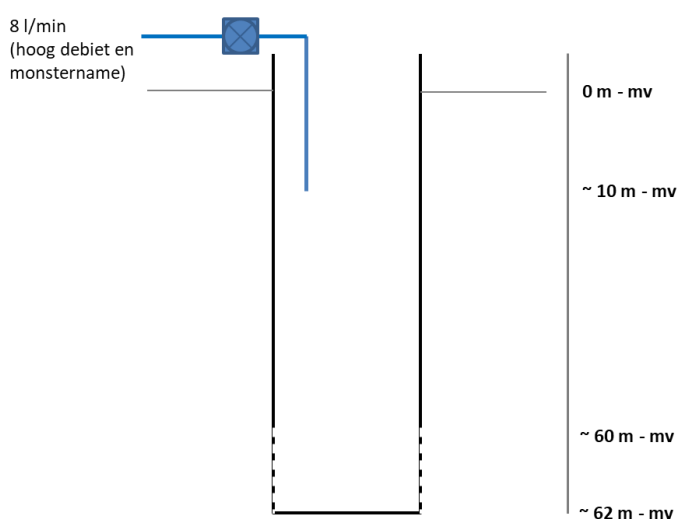
De bemonstering van de peilbuizen is uitgevoerd volgens NEN 5744. Hierbij wordt aangenomen dat na het drie keer voorspoelen van de peilbuis grondwater uit het 2^e watervoerende pakket wordt bemonsterd door een slang op 10m – mv.

Peilbuis 1 en 2 (Figuur 2-10):

- Peilbuis 3x spoelen met hoog debiet (circa 8 l/min) op 10m –mv.
- Monsternamen op 10m – mv (circa 0.25 l/min)

Technische ruimte:

Het water uit de tapkraan heeft gedurende 30 seconden een constante watertemperatuur voordat het watermonster is genomen.



Figuur 2-10. Bemonstering van peilbuis 1 en 2 in de periode maart 2015 – november 2017

Test monsternamenprotocol op 27 november 2017

Op 27 november is de bemonsteringsmethode op peilbuis 1 getest, op basis van resultaten uit andere onderzoeken waarin bronnen (voor drinkwaterproductie) zijn bemonsterd. Doel was om te controleren hoe het grondwater zo bemonsterd kan worden dat het zo goed mogelijk overeenkomt met het grondwater in het 2^e watervoerende pakket, met zo min mogelijk invloed van de peilbuis, het spoelen en andere processen. Vanwege beschikbare tijd en middelen is deze nieuwe methode alleen getest op peilbuis 1 en niet op peilbuis 2.

Peilbuis 1 (Figuur 2-11):

- 1 uur voorspoelen met hoog debiet (circa 8 l/min) op 10m –mv. Dit is gelijk aan NEN 5477 (Figuur 2-10).
 - *Dit is de standaard bemonsteringsmethode zoals deze tot nu toe is uitgevoerd.*
- Monsternamen op 10m -mv (bovenkant peilbuis): alle microbiologische en chemische parameters
 - *Watermonsters zijn vergelijkbaar met de watermonsters genomen in paragraaf 0.*
- 1 uur voorspoelen met hoog debiet (circa 8 l/min) op 10m –mv. Elke 15 minuten monsternamen op 62 m-mv.
 - *Door het grondwater vlak boven het filter in het tweede watervoerende pakket te bemonsteren, wordt eventuele invloed van het water in de peilbuis en de biofilm op de wand van de peilbuis, zoveel mogelijk uitgesloten. Deze watermonsters zijn getest op algemene microbiologische parameters: ATP en KG22 om inzicht te krijgen in de dynamiek gedurende de tijd.*

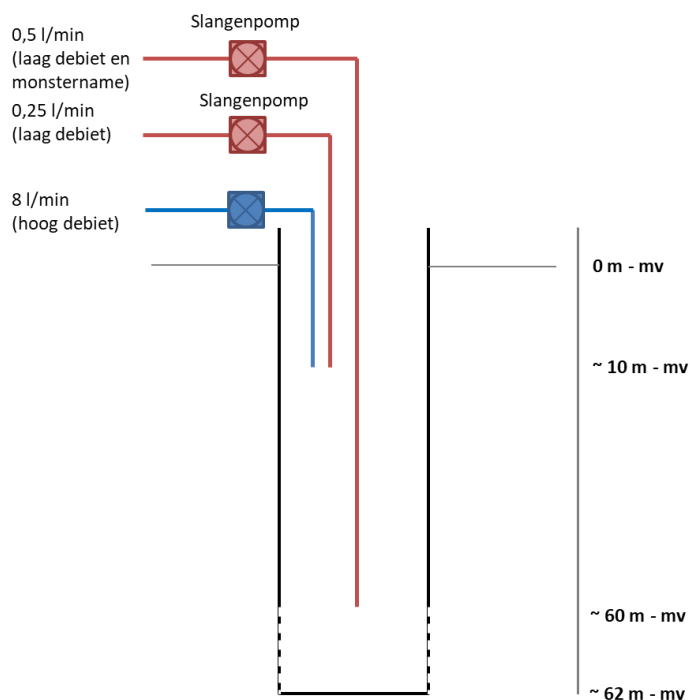
- 2 uur spoelen laag debiet (circa 0,5 l/min op 62 m –mv en 0.25 l/min op 10m –mv). Elke 15 minuten monstername op 62 m –mv.
 - *Omdat tijdens het spoelen met hoog debiet mogelijk biofilm en andere deeltjes loskomen van de buiswand en zo de meting verstoren, is het effect van spoelen met een laag debiet op de monstername getest. Door monstername vlak boven het filter in het tweede watervoerende pakket, wordt een eventuele invloed van het water in de peilbuis en de biofilm op de wand van de peilbuis, zoveel mogelijk uitgesloten. Deze watermonsters zijn getest op algemene microbiologische parameters: ATP en KG22 om inzicht te krijgen in de dynamiek gedurende de tijd.*
- 1 uur naspoelen met hoog debiet (circa 8 l/min) op 10 m –mv.
- Monstername op 10m -mv (bovenkant peilbuis): alle microbiologische en chemische parameters

Tijdens het spoelen zijn elk kwartier de volgende parameters gemeten: ATP, kolonietal bij 22°C, pH (sensor), EGV (sensor), O₂ (sensor), temperatuur (sensor)

Peilbuis 2, conform NEN 5477 (Figuur 2-10) en vergelijkbaar met paragraaf 0:

- Peilbuis 3x spoelen met hoog debiet (circa 8 l/min) op 10 m –mv.
- Monstername op 10 m – mv (circa 0,25 l/min)

Technische ruimte: Het water uit de tapkraan heeft gedurende 30 seconden een constante watertemperatuur voordat het watermonster is genomen.



Figuur 2-11. Bemonstering van peilbuis 1, 2 en 3 in de periode april 2018 – september 2020

Periode april 2018 – september 2020

Naar aanleiding van de test van 27 november 2017 is vanaf april 2018 de bemonsteringsmethode van de peilbuizen aangepast. Uit de resultaten (beschreven in paragraaf 0) blijkt dat bemonstering vlak boven het filter in het 2^e watervoerende pakket de betrouwbaardere resultaten lijkt te geven dan bij monstername op 10 m – mv. De duur van het voorspoelen lijkt niet uit te maken. Om deze reden wordt niet langer bovenaan de peilbuis (10m –mv)

bemonsterd, maar vlak boven het filter in het 2^e watervoerende pakket (-62m –mv) en is de spoeltijd gelijk gebleven.

Peilbuis 1, 2 en 3:

- 1 uur voorspoelen met hoog debiet (circa 8 l/min) op 10m –mv.
- Slang verwijderen en 2 nieuwe slangen inhangen:
 - circa 0.25 l/min op 10m –mv.
 - circa 0.5 l/min op 62m –mv.
- Monsternamen op 62m –mv: alle microbiologische en chemische parameters

Technische ruimte: Het water uit de tapkraan heeft gedurende 30 seconden een constante watertemperatuur voordat het watermonster is genomen.

2.3.2.2 Microbiologische analyses

ATP

ATP is een energierijke verbinding die in alle levende cellen voorkomt en wordt gebruikt als maat voor de aanwezige hoeveelheid actieve biomassa. De bepaling is gebaseerd op een enzymreactie van luciferine met luciferase die alleen plaats vindt in de aanwezigheid van ATP. Het hierbij geproduceerde licht (in Relatieve Licht Eenheden) wordt omgerekend naar de concentratie ng/l ATP in het watermonster. ATP is bepaald volgens huisvoorschrift LMB-002 en conform NEN-EN 16421:2014.

DNA-isolatie en qPCR

Het bemonsterde water is gefiltreerd over een 0.22 µm polycarbonaatfilter om de micro-organismen uit het water te isoleren. Om de micro-organismen stabiel te kunnen bewaren, zijn toevoegen van de eerste buffer (BF1) uit de PowerBiofilm™ DNA isolatie kit van MoBio en de interne controle de filters met micro-organismen opgeslagen bij -20°C. Van alle watermonsters is tegelijk het DNA geïsoleerd volgens de handleiding van de PowerBiofilm™ kit.

De bacteriën *S. maltophilia*, NTM en de protozo *Acanthamoeba* zijn gekwantificeerd door het tellen van het aantal genkopieën met de qPCR methode. Hiermee wordt een soort specifiek stukje DNA vermenigvuldigd en hiervan wordt de concentratie gemeten. Op basis hiervan kan de oorspronkelijke concentratie/aantallen van deze bacteriën/protozo worden bepaald. De analyses zijn uitgevoerd volgens KWR-protocollen LMB-065 en LMB-068. Het aantal genkopieën is gecorrigeerd voor de opbrengst van de interne controle (rendement van de DNA isolatie).

De DNA isolatie en qPCR zijn gevoelig voor de samenstelling van het water. Zo kunnen bijvoorbeeld ijzer en zout de methode storen waardoor het rendement (R) onbetrouwbaar laag is. Deze storende stoffen worden zo veel mogelijk geneutraliseerd tijdens de procedure, maar hebben in sommige gevallen toch onbetrouwbare resultaten veroorzaakt. Dit is in de resultaten aangegeven bij de betrokken monsters.

Bacteriën van de coligroep en *E. coli*

Het aantal bacteriën van de coligroep en *E. coli* bacteriën is bepaald met de kweekmethode volgens LMB-042, conform NEN-EN-ISO 9308-1. Hiervoor is het watermonster gefiltreerd op 0.45 µm filters en geïncubeerd op LSA-platen. Alle platen zijn geïncubeerd bij 36°C. Alle lactose-positieve kolonies zijn rein gestreken om deze vervolgens te bevestigen met een oxidase bepaling. Bacteriën van de coligroep zijn lactose-positief en oxidase-negatief in de bepaling. Ter bevestiging van *E. coli* wordt van de oxidase negatieve kolonies een Indol test ingezet (incubatie bij 44°C gedurende 24 uur).

KG22

Koloniegetal bij 22°C (KG22) werd aangetoond conform NEN-EN-ISO 6222 en LMB-032 op yeast extract agar en incubatie bij 22°C gedurende drie dagen.

Legionella pneumophila

Het aantal *Legionella*-bacteriën is bepaald met de kweekmethode volgens LMB-080, conform NEN-EN-ISO 11731. Concentratie van het monster geschiedt door middel van een geschikt membraanfilter. Het concentraat wordt bij 37°C geïncubeerd op een vaste, selectieve BCYE voedingsbodem met zodanige eigenschappen dat *Legionella* bacteriën karakteristieke kolonies vormen. Dezelfde analyse wordt uitgevoerd op een BCYE voedingsbodem zonder cysteïne, een essentiële voedingsstof voor *Legionella*. Met dit medium wordt onderscheid gemaakt tussen *Legionella* (groeit wel op BCYE, maar niet op een BCYE voedingsbodem zonder cysteïne) en andere niet-*Legionella* bacteriesoorten (die zowel op een BCYE voedingsbodem als BCYE voedingsbodem zonder cysteïne kunnen groeien). Een voorafgaande behandeling door hitte en/of zuur van een deel van het geconcentreerde monster kan storende bijgroei voorkomen.

Vibrio spp.

De detectie van *Vibrio* bacteriën is uitbesteed aan het RIVM en is gebaseerd op de MPN-methode (Most Probable Number). Resultaten zijn gegeven in MPN/liter.

SSRC

Het aantal sporen van sulfiet reducerende clostridia (SSRC) is bepaald volgens LMB-033, conform NEN 6567 (1985). Het watermonster wordt gepasteuriseerd gedurende 30 minuten bij 70°C en geconcentreerd over een membraanfilter. Het filter wordt onder anoxische condities geïncubeerd in PAB-agar (Perfringens Agar Base) gedurende 48 uur bij 36°C.

2.3.2.3 Chemische analyses

Waterstofcarbonaat

De concentratie waterstofcarbonaat is uitgevoerd volgens huisvoorschrift LAM-042 conform NEN 6532. Aan het watermonsters wordt zoutzuur toegevoegd tot een pH van 4.4. De concentratie waterstofcarbonaat is berekend op basis van de toegevoegd hoeveelheid zoutzuur om een pH 4.4 te bereiken.

DOC

De DOC-analyse is uitgevoerd volgens huisvoorschrift LAM-068, conform NEN-EN 1484 en ISO 8245. Na filtratie over een 0.45 µm membraanfilter is het watermonster aangezuurd met zoutzuur, doorgeblazen om stikstof te verwijderen en gemeten met een Shimadzu TOC-V_{CPH} analyser.

Methaan

De analyse van het methaangehalte is uitgevoerd door het laboratorium van Vitens volgens de eigen methode VL-W-OC05. Het monster wordt hierbij geanalyseerd met een GC-FID (Gas Chromatography met Flame Ionization Detector).

Chloride, sulfaat, nitraat

De analyse van het chloride-, sulfaat en nitraatgehalte is uitgevoerd door het laboratorium van Aqualab Zuid.

Ortho-fosfaat-P

De ortho-fosfaatconcentratie in het water is bepaald volgens huisvoorschrift LAM-040, conform NEN-EN-ISO 6878. Na filtratie over een 0.45 µm membraanfilter is het watermonster gemengd met ascorbinezuur en molybdaatreagens. Het reagens vormt in een zuur milieu met fosfaationen een blauwgekleurde verbinding die wordt gemeten met een spectrofotometer.

Ammonium N

De ammoniumconcentratie is gemeten volgens huisvoorschrift LAM-036. Na filtratie over een 0.45 µm membraanfilter wordt het watermonster gemengd met salicylaatpentacyanonitrosylferraat(II) en

natriumhypochloriet. De ammoniumionen reageren tot een groengekleurde verbinding waarvan de intensiteit met een spectrofotometer wordt bepaald.

ICP-MS

Met ICP-MS (inductief gekoppelde plasma massaspectrometer) is in water de concentratie van een grote set aan metalen en andere elementen bepaald (Bijlage Bijlage VI). Dit is uitgevoerd volgens huisvoorschrift LAM-058.

2.3.2.4 Statistische analyses microbiologie

Op de microbiologische resultaten is een ANOVA-single factor met gepaarde T-test uitgevoerd. Hiermee is getest of de gemiddelden van groepen (technische ruimte, peilbuis 1, 2 of 3) statistisch van elkaar verschillen. Met een Bonferroni post hoc test is gecorrigeerd voor het aantal statistische testen dat is uitgevoerd. De ANOVA-test is alleen uitgevoerd op de ATP, SSRC en NTM resultaten. Voor de andere microbiologische parameters zijn te weinig positieve resultaten (waarde boven de detectiegrens) beschikbaar om een statistische test uit te kunnen voeren.

Op de SSRC- en NTM-resultaten is eerst een log-transformatie toegepast voordat de ANOVA-test is uitgevoerd. Voor de parameters waarvoor een qPCR is uitgevoerd is soms alleen 'aangetoond' of 'niet aangetoond' als resultaat gegeven en geen absoluut getal. Deze resultaten zijn weggelaten uit de dataset om de ANOVA-test uit te kunnen voeren. De waarden onder de detectielimiet zijn vervangen door een waarde gelijk aan de helft van de detectielimiet (b.v. < 1 ng ATP/l is vervangen door 0.5 ng/l).

Voor de statistische test zijn 4 groepen met elkaar vergeleken: technische ruimte, peilbuis 1, 2 en 3. Deze groepen zijn in twee perioden met elkaar vergeleken: 2015 – 2020 (alle resultaten van de technische ruimte, peilbuis 1 en 2) of alleen 2020 (technische ruimte, peilbuis 1, 2 en 3).

Peilbuis 3 is pas in september 2019 geslagen en is vanaf 2020 opgenomen in het meetprogramma. Bij deze peilbuis zijn twee metingen uitgevoerd als de warme bel veel warm water bevat (augustus en september). Omdat twee metingen te weinig is om een statistische analyse op uit te voeren, is het verschil tussen het niet opgewarmde grondwater (peilbuis 1 en 2) en opgewarmde grondwater (peilbuis 3) niet statistisch getest maar alleen beschreven.

2.3.3 Monitoring installatie voor energetische analyse

De energiestromen van verschillende componenten van de klimaatinstallatie die de bronnen aansturen zijn:

- Warmtepomp: verdampers en condensator: gemiddelde thermische vermogen per uur
- Vijver, koelcel, zonnecollectoren: gemiddelde thermische vermogen per uur
- WKK: gemiddelde thermische vermogen per uur op Lage en Hoge Temperatuur
- Gasketel: m³ gas per uur. De geleverde warmte wordt omgerekend naar kW/uur via een ketel rendement van 95% en een energetische waarde van gas van 31.65 MJ/m³.

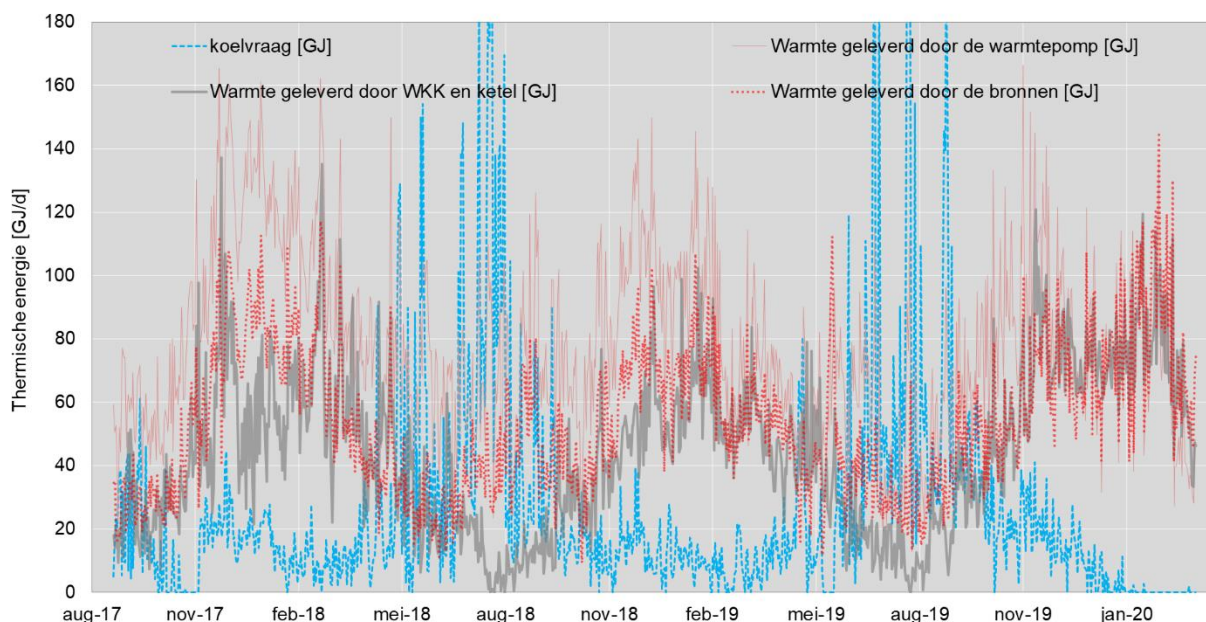
Van al deze gegevens is de data compleet van 1-9-2017 tot 30-3-2020. De analyse is daarom uitgevoerd over deze periode.

3 Analyse en optimalisatie van het bodemenergiesysteem

3.1 Analyse energiestromen gebouwinstallatie

3.1.1 Warmte-/koudevraag KC

Op basis van het gasverbruik en inzet van de warmtepomp van Koppert-Cress is over de periode 9-17 tot 3-20 inzichtelijk gemaakt wat het verloop van de warmtevraag vraag is, Figuur 3-1. Over de volledige jaren 2018 en 2019 is de warmtevraag respectievelijk 45 en 42.5 TJ, waarvan respectievelijk 31 en 27 TJ wordt ingevuld door het bodemenergiesysteem. Van de koelvraag wordt 100%³ vanuit de bronnen ingevuld. De koelvraag is over dezelfde jaren in beide gevallen ca 11 TJ. Wat opvalt zijn de grote pieken in de koelvraag, dat waren erg warme zomerdagen, gedurende de warme zomers van 2018 en 2019.



Figuur 3-1. Geleverde warmte en koude (aug 2017 – Maart 2020). Op basis van het maximale uur debiet van de bronnen en maximale optredende ΔT (voornamelijk optredend in de zomer) tussen de bronnen is de maximale hoeveelheid warmte die kan worden geleverd uit of opgeslagen in de bronnen circa 300 GJ/d. Bij maximale debiet en jaargemiddelde ΔT is dat 160 GJ/d. De y-as is afgekapt op 180 GJ/d voor de leesbaarheid van het figuur, de pieken in koel vraag schieten door naar 200/220 en 1 naar 270 GJ/d (juli 2019).

De werkelijke warmtevraag en hoeveel daarvan wordt geleverd door het bodemenergiesysteem, komt overeen met de geprognostiseerde totale warmtevraag (Tabel 2-2). De hoeveelheid warmte die met het bodemenergiesysteem wordt geleverd is 19 TJ in 2018 en 2019, en blijft daarmee achter bij de geprognostiseerde waarde van 22 naar 28 TJ/j. De koelvraag blijft echter veel meer achter, wat een risico is voor de energiebalans van het OBES.

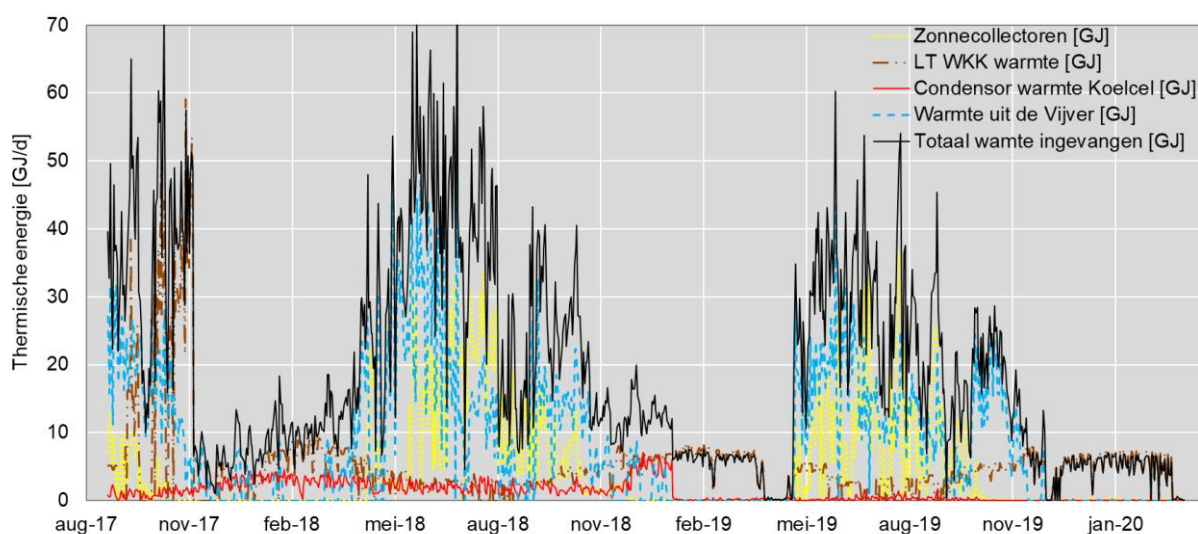
³ In de praktijk zal er op de allerwarmste dagen een enkele keer de warmtepomp ook als koelmachine worden ingezet als het koelvermogen uit de bronnen niet toereikend is. Dit onderscheid in warmtepomp bedrijf is echter niet uit de data te halen. In overleg met de beheerders van de OBES van KC is vastgesteld dat dit om te verwaarlozen hoeveelheid draaiuren van de warmtepomp gaat. Daarom is hier niet voor gecorrigeerd.

3.1.2 Invangen van rest/omgevingswarmte

Op basis van de gemonitorde energiestromen (Figuur 3-1) blijkt dat de jaarlijkse gemiddelde energie die wordt gewonnen/geproduceerd circa 7.5 TJ per jaar is. Dat is 4.5 TJ minder dan beoogd, en verklaart ook de kleinere bijdrage van de warme bronnen aan de totale warmte levering §3.1.1.

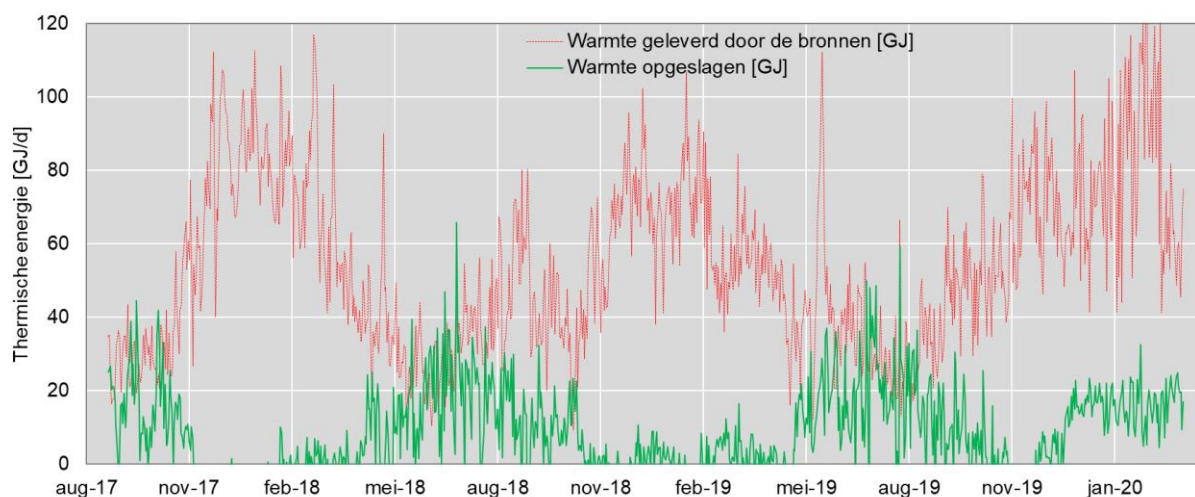
- Vijver: 3.2 TJ/j gemiddeld over 2018 en 2019, waarbij het gemiddelde waarschijnlijk iets wordt opgekrikt door de relatief warme zomer van 2018. Maar dit laat een goede opbrengst zien, die hoger is dan geprognostiseerd.
- Koelcel: 0.9 TJ/j in 2018. Sinds begin 2019 wordt er nog maar weinig opbrengst gemeten, na onderzoek blijkt dat er iets mis gaat met het loggen van de data, eind 2018 is er een nieuwe PC geplaatst in de technische ruimte voor de regelsoftware van de hele installatie. Bij het overzetten van alle verschillende software pakketten en instellingen is er wat misgegaan voor het loggen van de warmte die vrij komt uit de koelcel. Er is aan de installatie en de lokale regelaars niets veranderd. Er is geen reden om aan te nemen dat de condensorwarmte in 2019 niet ten goede is gekomen aan de bronnen, Figuur 3-2. De opbrengst in 2018 komt goed overeen met geprognostiseerd. Voor vervolganalyses is het aanbevolen om de logging van de condensorwarmte van de koelcel wel weer op orde te brengen.
- Zonnecollectoren: 2 TJ/jaar gemiddeld over 2018 en 2019. Iets minder dan geprognostiseerd, terwijl dat beide toch relatief warme jaren waren. Omdat alle warmte passief uit de omgeving wordt gewonnen, is er voor de zonnecollectoren wellicht te weinig ruimte om de temperatuur van het bronwater te verhogen. Als het erg warm is, is het vijverwater ook al erg warm, waardoor de zonnecollectoren nog maar weinig extra warmte kunnen toevoegen. Advies is dan ook om te verkennen of de aansturing hiervan kan worden geoptimaliseerd, om te beginnen door niet alleen de energiehoeveelheden te monitoren, maar ook de temperatuursprongen van het circulatiewater tussen de verschillende warmtewisselaars waar warmte uit andere bronnen wordt gewonnen. Wellicht dat parallelle stromen langs de verschillende bronnen van warmte kan komen, in plaats van in serie.
- WKK-LT: 1.5 TJ/jaar, iets minder dan geprognostiseerd, en duidelijk minder sinds eind 2017, hoewel de periode daarvoor niet inzichtelijk is. Vanuit het oogpunt van CO₂ emissie positief dat de WKK minder wordt ingezet, maar voor het bodemenergiesysteem jammer dat er niet meer warmte beschikbaar is.
- Condensor warmte van de warmtepompen tijdens koelbedrijf: onbekend omdat warmtepomp inzet niet is gespecificeerd voor verwarmen of koelen. Inschatting van de operationeel beheerders dat dat verwaarloosbaar kleine hoeveelheid is.

Figuur 3-2 geeft het verloop van de ingevangen warmte weer. Hieruit blijkt dat de vijver en zonnecollectoren vooral in de zomer warmte leveren en het voor de andere onderdelen meer evenredig is verspreid over het jaar. Bij de koelcel lijkt de toegevoerde warmte juist te pieken in de wintermaanden, dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat in die maanden de productie van KC op het hoogst is en er continu nieuwe teeltbakken (grotendeels water gevuld) moeten met 20°C worden terug gekoeld. Echter, de variatie is beperkt en ook alleen zichtbaar in 2018 i.v.m. ontbreken data van 2019.



Figuur 3-2. Monitoringsdata bronnen van (omgevings-)warmte op dagbasis

De ingevangen warmte die direct kan worden ingezet wordt direct gebruikt, de rest verdwijnt in de warme bronnen. In Figuur 3-3 is weergegeven hoeveel warmte er per dag in de bronnen wordt opgeslagen, afgezet tegen hoeveel er per dag uit wordt terug gewonnen. Hieruit blijkt dat er veel warmte binnen een dag wordt terug gewonnen. Het verschilt een beetje per jaar, maar gemiddeld genomen is 30% van de warmte die de bronnen leveren, warmte die een dag eerder in de bron is opgeslagen. Het OBES van KC werkt dus voor een belangrijk deel met een korte opslagcyclus. Dat komt vooral omdat er in de zomermaanden 's nachts toch vaak verwarming van de kas nodig is.

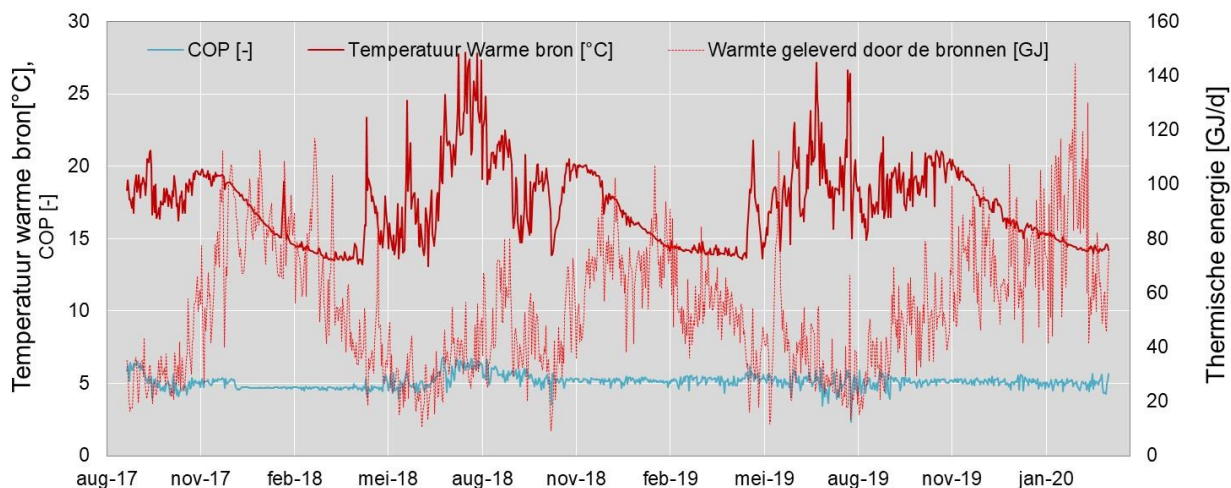


Figuur 3-3. Opgeslagen warmte en teruggewonnen warmte op dagbasis

3.1.3 Inzet warmtepomp

Uit het verloop van de energielevering door de warmtepompen en gasketels in Figuur 3-1 blijkt dat de warmtepomp gedurende het hele jaar in de basis-verwarmingvraag voorziet en in de wintermaanden duidelijk meer verwarming levert. Ook de gasketel en WKK laten een seizoenaal verloop zien, met bijna geen inzet gedurende de zomer en veel inzet in de wintermaanden, waarbij de warmtepomp altijd nog het meeste wordt ingezet, 65% van alle warmte komt van de warmtepomp en de bronnen, 12% van de WKK-HT en 23% van de ketels.

De warmtepompen functioneren op een gezamenlijke COP van gemiddeld 5.1 gedurende evaluatie periode, dat is 0.9 lager dan geprognostiseerd. Uit Figuur 3-4 blijkt dat de COP van de warmtepomp relatief laag is als er veel warmte wordt onttrokken en vice-versa. Het aansluiten van nieuw teeltareaal begin 2019, zonder het laten meegroeien van de warmte-Invang zorgt ervoor dat de warmtepomp minder goed gaat presteren. In 2017 en 2018 zijn de COP's nog >5.5 aan het einde van de zomer en in de herfst. In 2019 is die piek in de COP niet meer zichtbaar. In 2017 en 2018 zouden de warmtepompprestaties al kunnen worden verbeterd door grotere warmte-Invang, dat geldt in nog sterkere mate voor 2019 en daarna.



Figuur 3-4. Dag gemiddelde COP en warmte bron temperatuur en dagelijks onttrokken warmte uit de warme bron.

In de lente en herfst draaien de warmtepompen vaak niet op volle capaciteit, terwijl de ketel en WKK dan al wel warmte leveren. Analyse van de uurlijkse meetwaarden wijst uit dat de gedurende 7,000 uur (bijna een heel jaar) van de monitoringsperiode van 2.5 jaar, er gas wordt verstoekt terwijl de warmtepomp nog niet op het volle vermogen draait. Dit zijn vaak uren aan het einde van de nacht en in de vroege ochtend. Dit komt omdat 25% van het kas areaal niet is aangesloten op het OBES. Om het gasverbruik terug te dringen kan worden verkend hoe de inzet van de warmtepomp kan worden verbeterd gedurende de nacht en ochtend. Zeker in deel-last situaties moet het mogelijk zijn om het bodemenergiesysteem op hogere capaciteit in te zetten, toepassen van extra bovengrondse warmte buffers kan daarbij helpen. Helemaal terugdringen van gas gebruik kan onder de huidige omstandigheden echter niet omdat een deel van het teeltareaal alleen door de ketel en WKK wordt verwarmd, omdat dat ofwel oude kasdelen zijn, of omdat die niet zijn aangesloten op de warmtepomp.

De broncapaciteit is een beperkende factor op de allerkoudste dagen van het jaar. Maar de meeste dagen wordt de maximale dagcapaciteit nooit gehaald, op de koudste uren van die dag draaien de bronnen echter wel op maximale capaciteit, het toepassen van bovengrondse buffers kan de inzet van de bronnen gedurende die pieken vergroten, mits de capaciteit van warmtepompen daar ook op is berekend.

3.1.4 Discussie en Conclusie.

Ondanks dat KC circa 35% van haar energievraag nog met gas invult lijkt het bodemenergiesysteem goed te functioneren, 25% van de kassen is immers niet aangesloten op het bodemenergiesysteem. De resterende 10% van het gas gebruik wordt door voor de pieken van 25% van de kas gebruikt, dat deel heeft dus circa 40% van de warmte afkomstig van de gasketel. Er zijn echter wel mogelijkheden om het aandeel gas inzet te verminderen door het bodemenergiesysteem beter aan te sturen

- Het feit dat een groot deel van de warmte die wordt ingevangen snel weer wordt ingezet is op zich niet erg, de ingevangen warmte wordt immers weer nuttig ingezet, het zorgt er echter wel voor dat de seizoensopslag te klein is om tot het einde van de winter op voldoende hoog temperatuurniveau uit de

bronnen warmte te kunnen leveren. Dit zorgt voor een veel lagere aanvoer temperatuur aan de warmtepomp, wat de lagere COP van de warmtepomp verklaard.

een belangrijk advies is daarom ook het optimaliseren en/of vergroten van de warmteinvang. Die blijft te veel achter ten opzichte van de toegenomen warmtevraag,

- De inzet van het bodemenergiesysteem kan worden vergroot door:
 - o meer kas areaal er op aan te sluiten, mits temperatuur niveau aansluit. Dit is wellicht niet kostenefficiënt, omdat de warmtepomp dan beperkte hoeveelheid warmte kan leveren aan dat specifieke kas deel.
 - o Gezien de randvoorwaarden in capaciteit zou de inzet van het OBES enigszins kunnen worden verbeterd door de bovengrondse buffers toe te passen.
 - o Vergroten van bron- en warmtepompcapaciteit.

3.2 Analyse temperatuur en energiestromen bronnen

Van de 8 bronnen van het OBES van Koppert-Cress worden de onttrekking en infiltratie debieten en temperaturen gemonitord per 8 min en het gemiddelde per uur opgeslagen. Er is een meetreeks beschikbaar van 2012 tot September 2020 die is gebruikt om het temperatuurprofiel en de energiestromen te analyseren.

3.2.1 Temperatuurverloop in de bronnen: opslag van hogere temperatuur

In Figuur 3-5 en Figuur 3-6 zijn de brontemperaturen van de warme en koude bronnen weergegeven. Zowel de uurlijkse (ruwe) data en de dagelijkse gemiddelde temperaturen zijn weergegeven. Dit is de gewogen gemiddelde brontemperatuur:

$$T_{dag} = T_{natuurlijk} + \frac{\sum_{n=24} (T_{uur} - T_{natuurlijk}) * V_{uur}}{\sum_{n=24} (V_{uur})} \quad (0.1)$$

Het dagelijkse temperatuurniveau in de bronnen laat een minder extreem beeld van opgeslagen temperaturen zien t.o.v. de uurlijkse brontemperatuur. Dit komt doordat er een sterk dagelijkse (dag-nacht) variatie is voor het gebruik van het bodemenergiesysteem. Dit zorgt ervoor dat op één dag de bron geladen kan worden met een hoge temperatuur, terwijl deze warmte dezelfde nacht weer wordt onttrokken. Dit zorgt er voor dat de warmte die seizoenaal wordt opgeslagen een lagere temperatuur heeft. Ook heeft dit te maken met de variatie in opslagtemperaturen gedurende de dag. Het ene uur kan een temperatuur van 40 °C worden opgeslagen (door bijv. invang van de zonnepanelen), terwijl het volgende uur het weer omslaat en er slechts water met 20 °C wordt opgeslagen. Dit zorgt er ook voor dat de temperatuur sterk uitmiddelt in de ondergrond (Zie ook kader: maximale bron temperatuur).

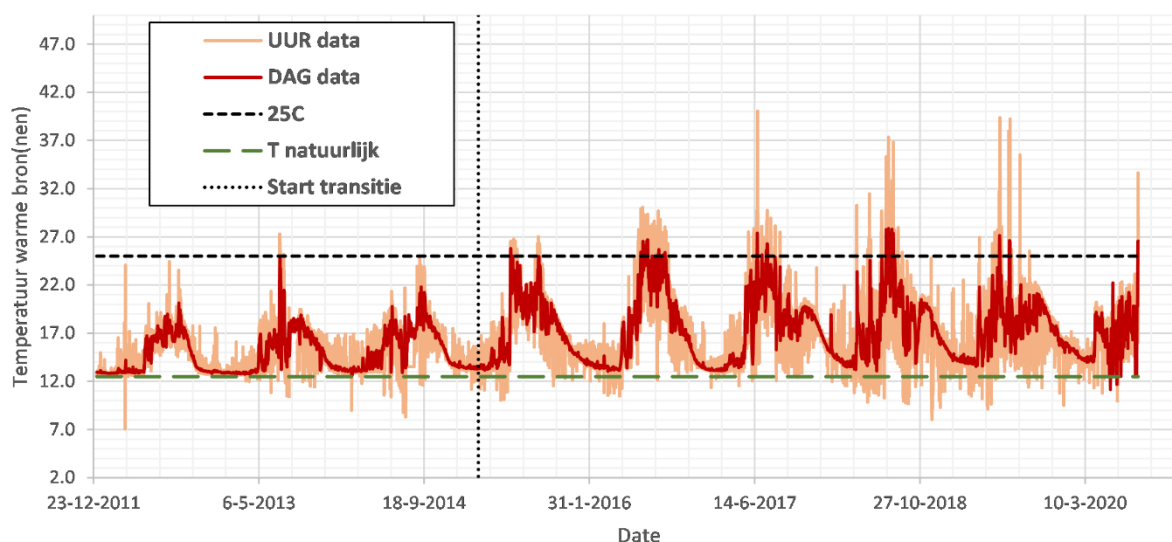
De gemonitorde temperatuur van de warme en koude bronnen kan sterk fluctueren, en vooral voor uren waar er een heel klein volume wordt verpompt kunnen relatief hoge of lage temperaturen worden gemeten. Om deze (foutieve) waardes er uit te halen zijn de temperatuur waarnemingen meegenomen als er minimaal 20 m³/uur is onttrokken. Het gaat hier bij de warme bronnen om temperaturen onder de natuurlijke grondwatertemperatuur en voor de koude bronnen om temperaturen boven de natuurlijke grondwatertemperatuur. De gemiddelde natuurlijke grondwatertemperatuur is ingeschat op 12.5 °C. Het is moeilijk te achterhalen wat de natuurlijke grondwatertemperatuur is van de aquifer(s) omdat de metingen zijn gestart nadat het OBES systeem van KC al een ruime tijd werd gebruikt.

Warme bron(nen)

De overgang van gewone OBES naar hogere warme bron temperatuur in 2015 is zichtbaar in Figuur 3-5. Vanaf 2015 gaat het OBES iedere zomerperiode warmte opslaan met temperaturen > 25 °C. Dit resulteert echter alleen

sporadisch in een gemiddelde dagtemperatuur van de bron > 25 °C (zie ook kader maximale brontemperatuur). In de zomer van 2015 en 2016 wordt water met maximaal 30 °C opgeslagen, en vanaf de zomer van 2017 wordt sporadisch > 40 °C opgeslagen. De reden dat er niet structureel met hogere temperatuur dan 40 °C wordt opgeslagen is dat een groot deel van de warmte die wordt ingevangen uit de omgeving wordt gewonnen. Veelal zijn dat bronnen van warmte op beperkt temperatuur niveau, die sterk samenhangt met de buitenlucht temperatuur (m.u.v. de restwarmte van de WKK en de zonnecollectoren, zie §2.2.2).

Het komt ook regelmatig voor dat er een warme bron temperatuur wordt gemeten die lager is dan de natuurlijke grondwatertemperatuur (zie Figuur 3-5). Zoals eerder genoemd kan dit te maken hebben met het volume ieder specifieke uur is verpompt. Ook met een volume > 20 m³ per uur kunnen dus foute waarden worden gemeten. Een andere verklaring van deze relatief lage temperaturen is de invloed van de koude bronnen. Zoals eerder genoemd is er een grote onbalans. Het is dus ook een mogelijkheid dat het water uit de koude bronnen in de ondergrond rijkt aan de warme bronnen en er daarom dus, wanneer de warme bron relatief leeg is, koud water onttrokken kan worden. Dit kan ook verklaren waarom er met de tijd meer relatief lage temperaturen wordt onttrokken. Echter, ondanks dat dit voor enkele uren voorkomt, is de gemiddelde dagtemperatuur van de warme bron over het algemeen ruim hoger dan de natuurlijke grondwatertemperatuur ($T_{\text{natuurlijk}} = 12.5 \text{ °C}$).



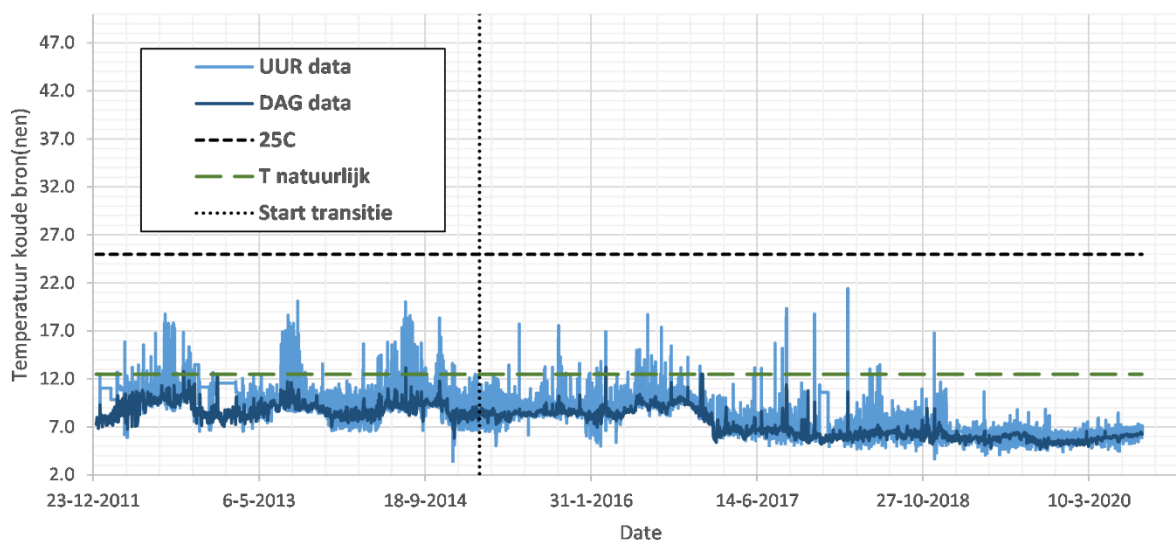
Figuur 3-5 gemiddelde brontemperatuur van de vier warme bronnen van het OBES systeem van Koppert-Cress (2012-sept 2020). Transitie naar hogere opslag temperaturen vanaf 2015.

Koude bron(nen)

Het temperatuurverloop van koude bron is in het verloop van de gebruik van het OBES relatief weinig veranderd (Figuur 3-6). Voor en na 2015 lijkt het temperatuurprofiel hetzelfde te blijven. Echter, vanaf begin 2017 wordt er met lagere temperaturen opgeslagen in de bodem. De energie kan dus vanaf dit moment tijdens warmtelevering beter worden uitgeoeld. Dit komt doordat eind 2016 de 2^e warmtepomp is aangesloten. De uur-data laat zien dat er ook regelmatig uren zijn in de zomer dat de temperatuur relatief hoog is. Echter, dit zijn waarschijnlijk uren dat de installatie niet of nauwelijks wordt gebruikt en de temperatuur van het water dus opwarmt in de leiding in de technische ruimte.

De gemeten koude brontemperaturen van het OBES systeem van KC laat met regelmaat hogere temperaturen zien dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Er wordt per jaar meer koud water opgeslagen in de ondergrond dan warm water. Het is dus niet te verwachten dat er een invloed is van de warme bronnen op de koude brontemperatuur. De relatief hoge waardes die voor sommige uren wordt gemeten, is dus waarschijnlijk te wijden aan meetfouten die ontstaan wanneer er slechts een klein volume wordt onttrokken uit de koude bron(nen).

Echter, de gemiddelde koude brontemperatuur die per dag wordt gemeten is ruim lager dan de natuurlijke grondwatertemperatuur.



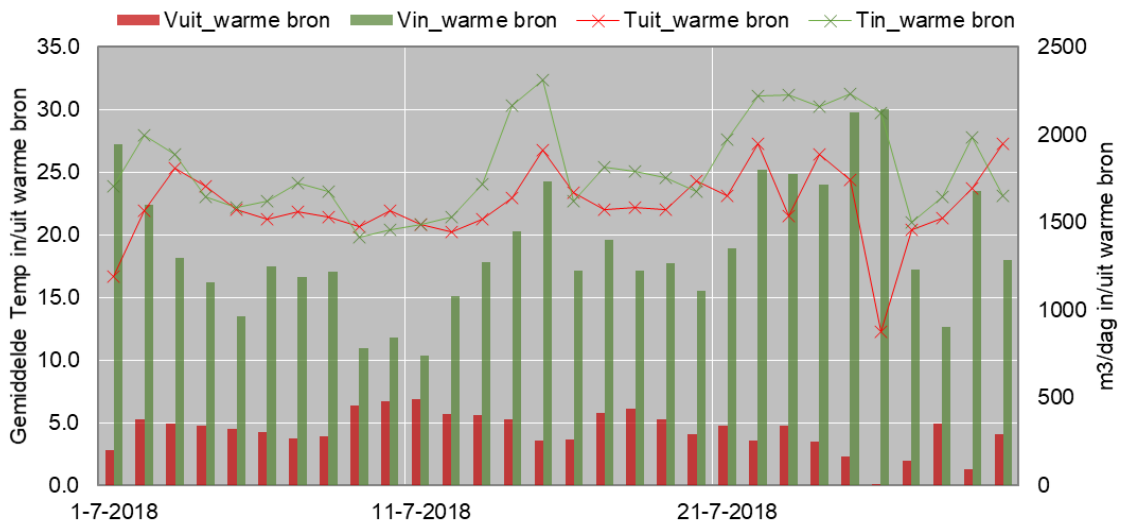
Figuur 3-6 gemiddelde brontemperatuur van de vier koude bronnen van het OBES van Koppert-Cress (2012-sept 2020). Transitie naar hogere opslag temperaturen vanaf 2015.

Algemeen beeld verloop brontemperatuur:

Nadat het systeem de vergunning om hogere temperaturen op te mogen slaan wordt hier direct gebruik van gemaakt. Vanaf de zomer van 2015 wordt iedere zomer energie opgeslagen met een temperatuur >25 °C. Echter, doordat de opslagtemperatuur sterk varieert door de dagelijkse variatie aan warmte-beschikbaarheid en -vraag. Bijvoorbeeld, als de zon sterk schijnt neem de beschikbaarheid van thermische energie toe, en de vraag af, resulterend in een snelle stijging in het aandeel energie dat kan worden opgeslagen met een hoge temperatuur. Hierdoor is de gemiddelde (dagelijkse) temperatuur van het water dat wordt opgeslagen slechts sporadisch hoger dan 25°C. Door thermische retardatie en de hoge dispersie in de directe nabijheid van de bron (Bloemendal and Hartog, 2018) is de onttrekkingstemperatuur zien we de pieken in infiltratie temperatuur ook maar beperkt terug in de onttrekkingstemperatuur. Dit geldt zowel bij de lange als ook bij korte opslag cycli. Dit zorgt ervoor dat er slechts heel af en toe water met een relatief hoge temperatuur (e.g. >30 °C) kan worden onttrokken.

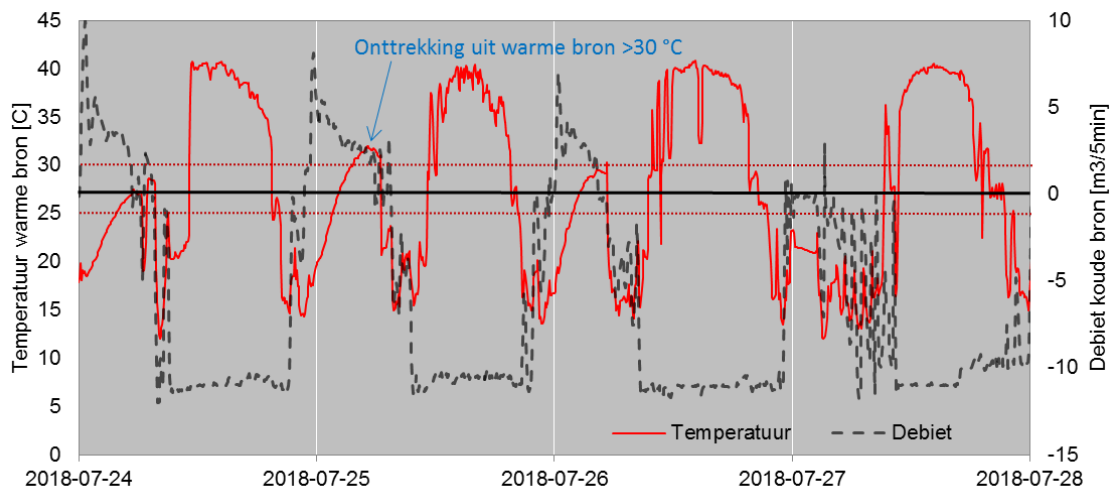
Kader maximale bron temperatuur

Ter illustratie van de maximale infiltratietemperatuur zijn de infiltratie- en onttrekingsdata van de bronnen geanalyseerd. Juli 2018 was de warmste maand van de afgelopen jaren. In Figuur 3-7 zijn de dagtotalen van de debieten in en uit de warme bronnen weergegeven, en de daggemiddelde infiltratie- en onttrekkingstemperaturen. Hieruit blijkt dat de daggemiddelde infiltratietemperaturen op enkele dagen groter zijn dan 30°C, maar de daggemiddelde onttrekkingstemperaturen uit de warme bronnen liggen vrijwel altijd onder de 25°C en komen nooit boven de 30°C uit. De reden dat op enkele dagen de onttrekkingstemperatuur hoger is dan de infiltratietemperatuur komt omdat op de voorgaande dagen de infiltratietemperatuur (een stuk) hoger is. De sterke variatie in infiltratietemperatuur wordt veroorzaakt door de manier van warmte invangen met zonnecollectoren, zie Figuur 3-8. Het behaalde temperatuurniveau, en daarmee de grootte van de ΔT tussen de bronnen, hangt sterk af van de mate van zoninstraling, wat van dag tot dag sterk kan variëren.



Figuur 3-7. Dag totalen voor debiet en gewogen gemiddelde van onttrekkings- en infiltratie temperatuur van de warme bronnen

In Figuur 3-8 zijn de geregistreerde 5minuten waarden van debiet en temperatuur van de 4 warmste dagen opgenomen. Hieruit blijkt dat als de warme bronnen infiltreren (negatief debiet koude bron in Figuur 3-8), gedurende de dag water met een hoge temperatuur in de warme bron worden geïnjecteerd, $>40^{\circ}\text{C}$. Als er weer grondwater uit de warme bron wordt onttrokken (positief debiet koude bron in Figuur 3-8) is de momentane maximale onttrekkingstemperatuur uit de warme bron $>30^{\circ}\text{C}$. Uit Figuur 3-7 bleek al dat de daggemiddelde onttrekkingstemperatuur een enkele keer boven de 25°C uitkomt. Uit Figuur 3-8. blijkt dat vroeg in de ochtend de onttrekkingstemperatuur incidenteel boven de 30°C uitkomt.



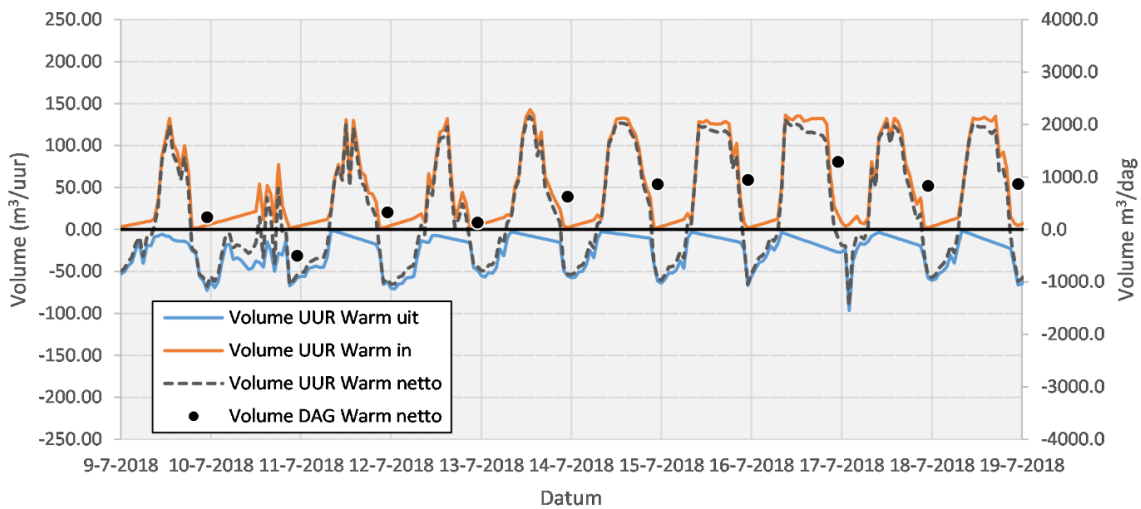
Figuur 3-8. Debiet koude bron en temperatuur warme bron 24-7-2018 tot 28-7-2018.

3.2.2 Volume- en energiebalans

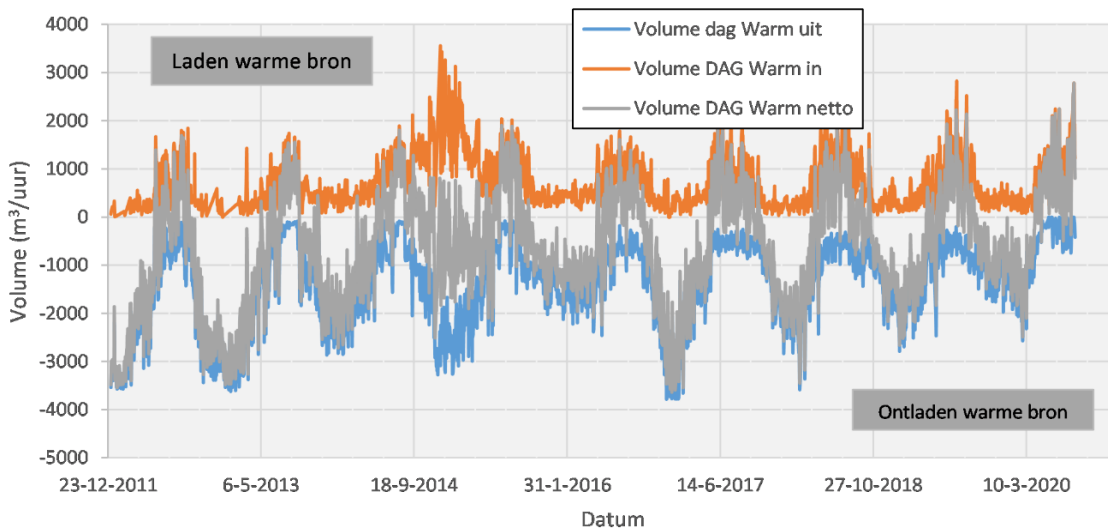
Een bron van het OBES systeem kan ongeveer $40\text{ m}^3/\text{uur}$ verpompen. Per uur kan de OBES bron (meerdere keren) schakelen van onttrekken naar injecteren. De volumestroom kan dus voor een gegeven tijdseenheid bruto of netto worden bepaald. Een bron kan dus o.b.v. de bruto data zowel een geïnjecteerd en een onttrokken volume hebben. Het resultaat van deze twee stromen is het netto volume.

$$V_{netto} = V_{in} - V_{uit} \quad (0.2)$$

Een negatief netto volume betekent dus dat er wordt onttrokken, een positief netto volume dat er wordt geïnjecteerd (Figuur 3-9). Het verpompen van grondwater wordt hier bekeken vanuit het perspectief van de warme bronnen: bij de koude bronnen gebeurt exact hetzelfde maar dan omgekeerd. Op basis van de bruto uur volumes kan dus het netto uur volume worden berekend. Op basis van het netto uur volume berekenen we vervolgens het dag volume (Figuur 3-9). Dit voorbeeld van Juli 2018 laat zien dat voor deze periode er per dag voornamelijk wordt opgeslagen in de warme bron (laden), maar er gedurende iedere nacht ook wordt ontladen om de kassen te verwarmen.



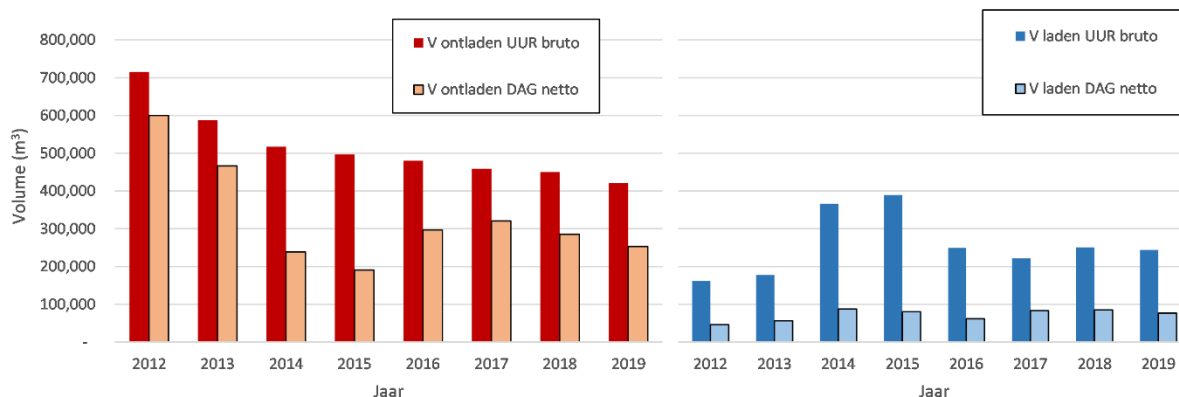
Figuur 3-9. Volume per uur bruto, netto uurlijkse volume en het daaruit resulterende dagelijkse netto volume.



Figuur 3-10. Dagelijkse bruto en netto volumes voor de lengte van de gehele dataset.

Dit kort-cyclische gedrag, het volume dat gebruikt wordt voor de dag-nacht cyclus, van de OBES is typerend voor het Koppert-Cress systeem en is het sterkst aanwezig in de lente en herfst. Dit zien we goed terug in Figuur 3-11. Door alleen te kijken naar het netto volume dat wordt opgeslagen of onttrokken op dag basis krijgen we inzicht in wat er daadwerkelijk langdurig wordt opgeslagen in de ondergrond en eventueel gebruikt kan worden in een ander deel van het jaar. Het verschil tussen het uurlijkse bruto volume in Figuur 3-11 en het netto dagelijks volume is het

deel dat niet gebruikt wordt voor langdurige opslag, en enkel wordt gebruikt voor kort-cyclische opslag. Dit verschil is gelijk voor zowel ontladen en laden. Uit deze analyse blijkt dus dat er slechts een relatief klein volume beschikbaar is voor het daadwerkelijk laden van de warme bronnen van de OBES voor het warmtelevering seizoen (herfst - winter).

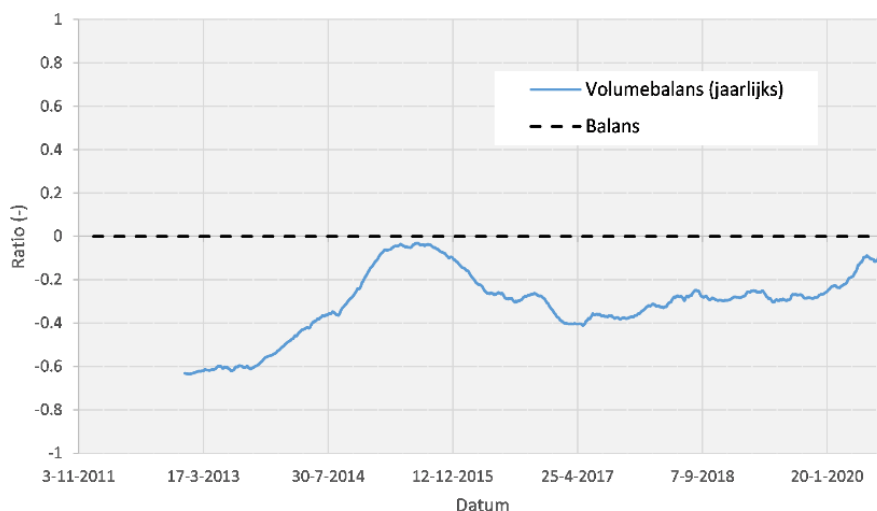


Figuur 3-11 De volumestroom gebruikt voor ontladen van de warme bronnen (verwarmen) en het van de warme bronnen (koelen). Het verschil tussen het bruto volume en het netto dag volume is te wijden aan het dagelijkse kort-cyclische gedrag van de OBES.

Op basis van de bruto data is de volumebalans uitgerekend (Figuur 3-12) volgens Beernink et al. (2019):

$$V_{ratio} = \frac{V_{laden} - V_{ontladen}}{V_{laden} + V_{ontladen}} \quad (0.3)$$

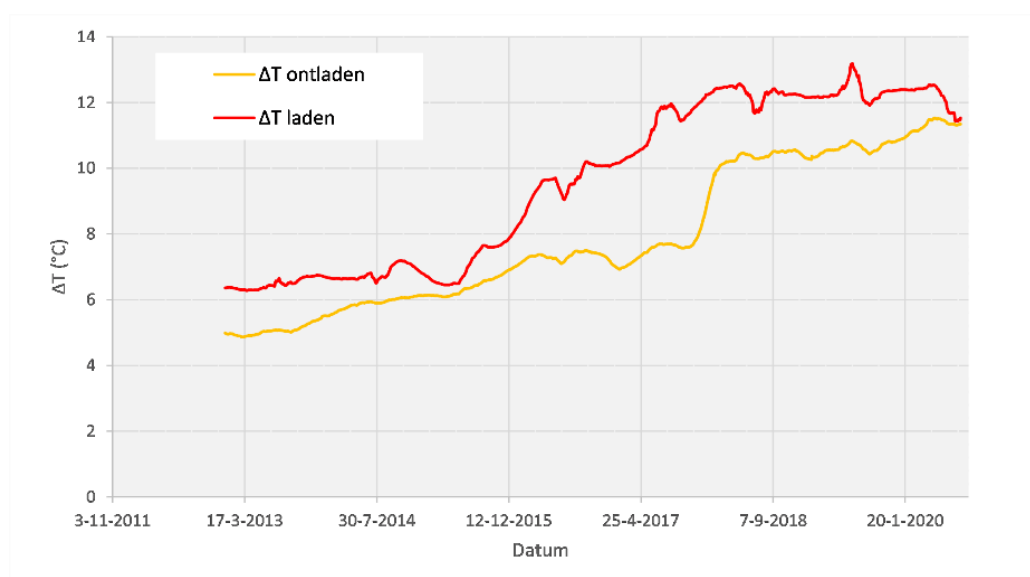
Het systeem in onbalans, er wordt meer volume gebruikt voor het ontladen van het systeem t.o.v. het laden van het systeem (Figuur 3-12). De volumebalans die hier is weergegeven is de jaargemiddelde volumebalans. Ieder punt op deze lijn weerspiegelt dus de volumebalans voor het voorafgaande jaar. De volumebalans is op jaarbasis negatief, wat dus wil zeggen dat het volume in de koude bronnen blijft groeien, en het volume in de warme bronnen ieder jaar ‘leeg’ raakt. In de zomer van 2015 is er een relatief kleine onbalans, dit komt doordat er in de winter van 2014/2015 relatief weinig water is verpompt voor de warmtelevering. Het valt verder op dat de volumeonbalans gemiddeld kleiner wordt met de tijd (vanaf 2016).



Figuur 3-12 De jaarlijkse volumebalans voor het OBES systeem (afgelopen 365 dagen) o.b.v. de bruto data.

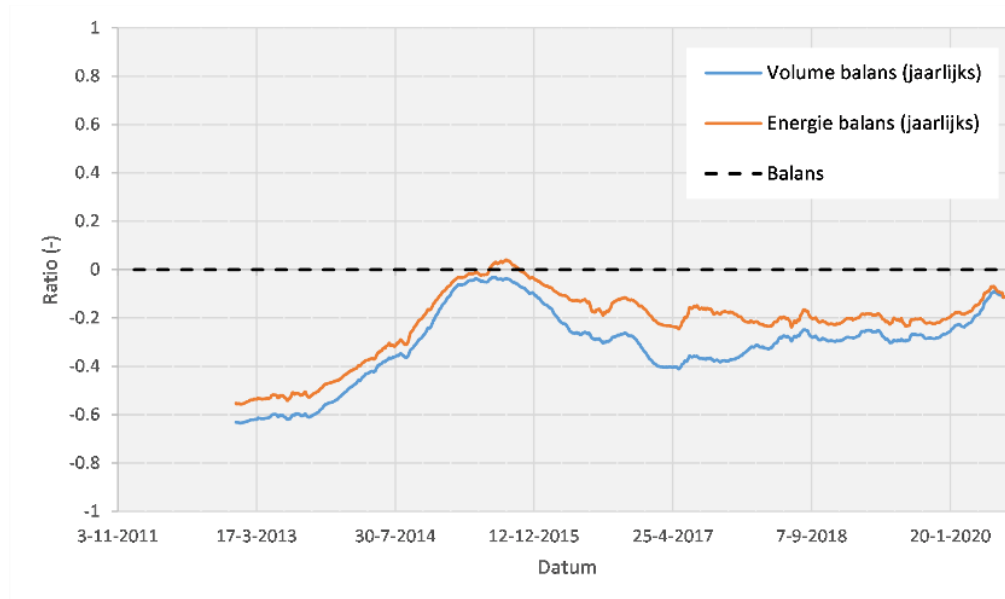
De energiebalans is naast de volumebalans ook afhankelijk van de ΔT van het systeem. Dit is het temperatuurverschil tussen de warme bron en de koude bron tijdens laden/ontladen. De gewogen gemiddelde ΔT is weergegeven in Figuur 3-13. Het is duidelijk te zien dat de ΔT van het systeem sterk toeneemt met de jaren. In het begin is de ΔT 5 a 6 °C, vergelijkbaar met een gewoon OBES (Beernink et al., 2019). Echter, naarmate het systeem steeds meer gebruik gaat maken van de hogere temperaturen die mogen worden opgeslagen en er steeds meer extra warmte wordt ingevangen zoals beschreven in §3.1, gaat de ΔT omhoog. Vanaf 2019 wordt er gemiddeld over het jaar gebruikt gemaakt van een ΔT tussen de 10 en 13 °C.

De ΔT is hoger tijdens het laden van warmte, t.o.v. het ontladen van warmte. Dit heeft invloed op de energiebalans die wordt bewerkstelligd in de ondergrond.



Figuur 3-13 De gewogen gemiddelde ΔT tijdens ontladen en laden voor het OBES systeem berekent per jaar (afgelopen 365 dagen) o.b.v de bruto data.

In Figuur 3-14 is de energiebalans samen met de volumebalans weergegeven voor het OBES systeem van Koppert-Cress. Zoals te zien is er energetisch een betere balans met de ondergrond t.o.v. volumetrische. Dit verschil is er omdat er wel aanzienlijk minder volume wordt opgeslagen voor het laden van het systeem, maar dit gebeurt met een grotere ΔT . Energetisch is het systeem dus vanaf 2019 slechts 20% in onbalans (per jaar). Indien er in de toekomst meer warmte kan worden ingevangen en/of dit gebeurt met een hogere temperatuur zal de energetische onbalans verder verkleinen.



Figuur 3-14 De jaarlijkse volumebalans en jaarlijkse energiebalans voor het OBES systeem (afgelopen 365 dagen) o.b.v. de uurlijkse volume data.

3.2.3 Rendement warme en koude bronnen

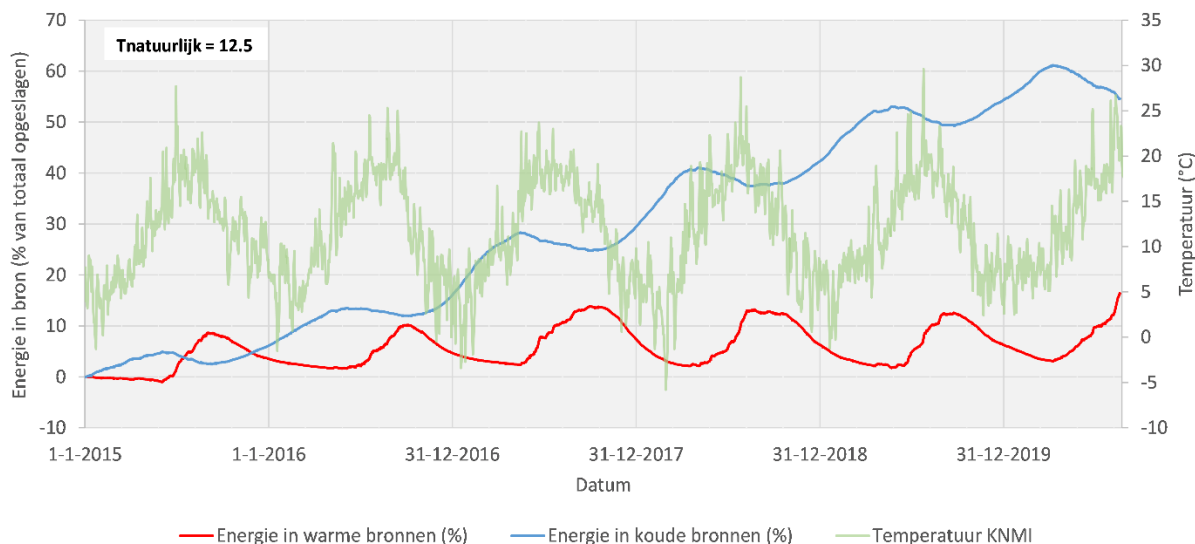
De terugwinefficiëntie (η_{th}) van de warme en koude bronnen wordt berekend o.b.v. de brontemperatuur (t.o.v. de natuurlijke temperatuur van de ondergrond), het verpompte volume en de warmtecapaciteit van water:

$$\eta_{th} = \frac{(T_{bron} - T_{natuurlijk})_{uit} \cdot V_{uit} \cdot C_w}{(T_{bron} - T_{natuurlijk})_{in} \cdot V_{in} \cdot C_w} \quad (0.4)$$

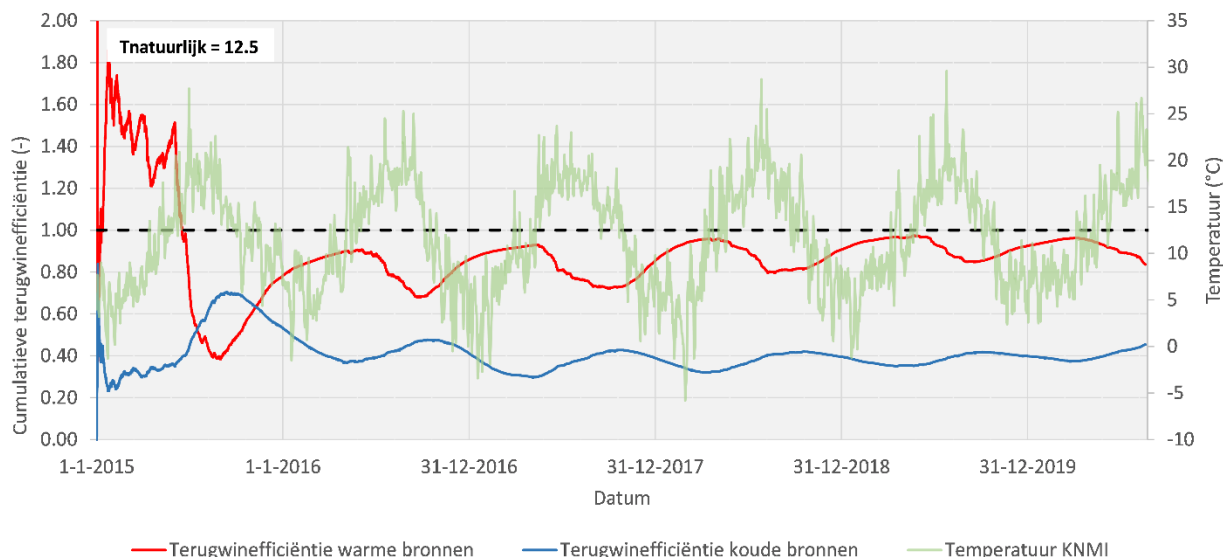
Waarbij V_{uit} het volume is in m^3 is en C_w de volumetrische warmtecapaciteit van water ($4,2 \text{ MJ/C/m}^3$). Het rendement van de warme bronnen is groter dan het rendement voor de koude bronnen. De energie die in totaal is opgeslagen in de ondergrond in de warme en koude bronnen na verloop van tijd is weergegeven in Figuur 3-15. Door de onbalans van het systeem blijft er ieder jaar relatief meer energie achter in de koude bronnen t.o.v. de warme bronnen. De koude bel groeit dus ieder jaar. De hoeveelheid energie in de warme bron raakt aan het einde van het warmteleveringsseizoen ieder jaar vrijwel uitgeput. Echter, een klein percentage van de geïnjecteerde energie kan niet meer worden teruggewonnen. Deze energie blijft dus achter in de ondergrond, of is vernietigd doordat het is gemengd met relatief koud water in de ondergrond. Dit gaat echter slechts om een paar procent ($\sim 3\%$) van de totale opgeslagen hoeveelheid in de ondergrond. Op basis van deze gegevens kan ook de cumulatieve terugwinefficiëntie worden weergegeven (Figuur 3-16). De cumulatieve terugwinefficiëntie van de warme bronnen is dus ongeveer $\sim 97\%$. Wanneer de bronnen maximaal geladen zijn daalt de cumulatieve terugwinefficiëntie iets, nadat de bronnen maximaal ontladend zijn is de maximale terugwinefficiëntie behaalt. Dit laat zien dat bijna alle warmte die wordt opgeslagen weer wordt teruggewonnen. Bij de koude bronnen daarentegen blijft bijna 60% van de energie achter in de ondergrond. Zoals eerder bepaald, wordt de terugwinefficiëntie van het OBES systeem van Koppert-Cress in grote mate bepaald door de volume (on)balans van het systeem.

De jaarlijkse terugwinefficiëntie van de bronnen van het OBES systeem bepaalt in welke mate er thermische impact te verwachten is vanuit de warme (en/of koude) bronnen. De warmte die achter blijft in de ondergrond is voor het OBES systeem van KC relatief klein. Tussen 2015 en September 2020 blijft er in totaal in de warme bronnen 1.1 TJ onbenut, in de koude bronnen blijft 22.9 TJ achter in de bodem (berekend t.o.v. de natuurlijke grondwatertemperatuur). De meeste thermische impact kan dus worden verwacht van de koude bronnen aangezien daar veel meer energie in de bodem achterblijft (verloren gaat). Indien de thermische straal van de

koude bronnen ver genoeg rijken om de warme bronnen te bereiken, is er ongeveer 20x zoveel (koude)energie beschikbaar om de verspreide energie uit de warme bron te vernietigen. Bij een OBES systeem dat meer in balans is zal er meer warmte en minder koude in de ondergrond achterblijven. De verwachte thermische impact van warme bronnen zal in die gevallen groter zijn dan we o.b.v. deze gegevens verwachten voor het OBES systeem van KC.



Figuur 3-15 Totale opgeslagen energie door de tijd heen in de warme bronnen en de koude bronnen als percentage van de totale opgeslagen energie (van 2015 tot Sept 2020) in de respectievelijke bron.

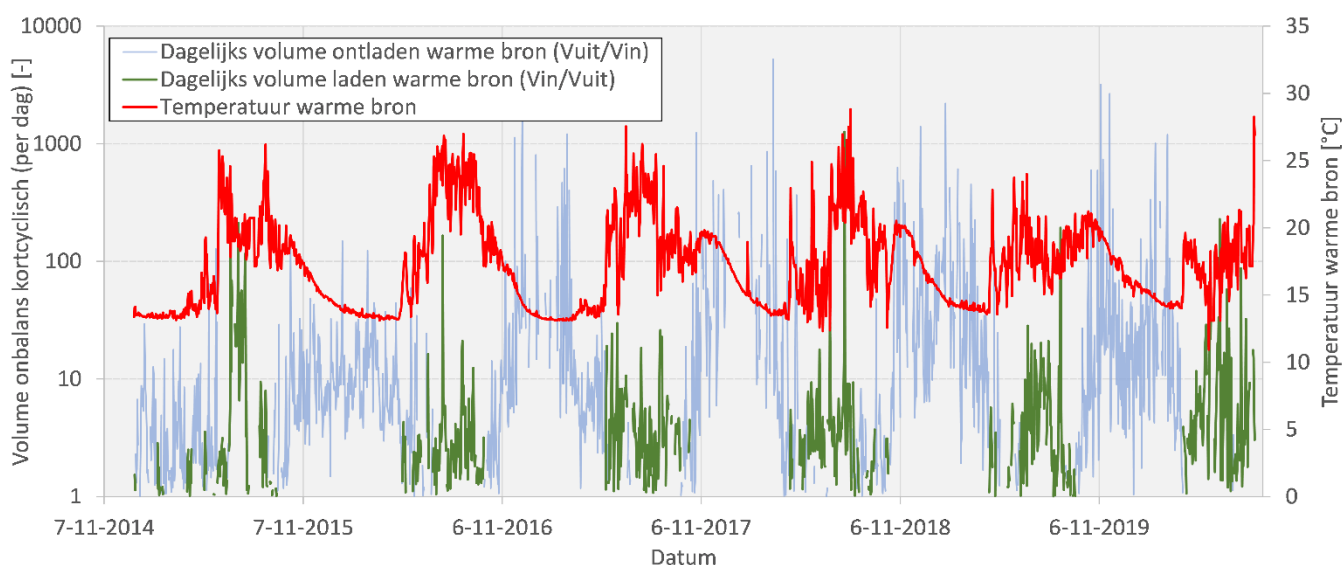


Figuur 3-16 Cumulatieve terugwinefficiëntie voor de warme en koude bronnen. Het rendement van de warme bronnen is ieder jaar bijna 100%. De koude bronnen onttrekken slechts ~40% van de opgeslagen koude energie.

Rendement kort cyclisch

Door het jaar heen wordt een relatief groot deel van het verpompte volume gebruikt voor het kort-cyclisch opslaan en onttrekken van energie in de warme en koude bronnen. Voor warmtelevering (netto dagelijkse onttrekking uit warme bronnen) wordt gemiddeld tussen de jaren 2015 en 2019 27% van de energie kort-cyclisch gebruikt (18/68 TJ). Tijdens het laden van het systeem (netto dagelijks onttrekking uit koude bel) wordt 48% van de energie kort-cyclisch gebruikt (24/50 TJ). Of er kort-cyclisch wordt opgeslagen en verpompt heeft voornamelijk te maken met de

dagelijkse variatie aan energievraag en –beschikbaarheid (bijv. dag-nacht temperatuur verschil en zon-instraling). Het kort-cyclische rendement wordt bekeken van de warme bronnen. Tijdens de kort-cyclische opslag is het verschil tussen het opgeslagen en onttrokken volume vaak groot (Figuur 3-17). Als voorbeeld: in de zomer wordt er een kleine hoeveelheid warmte onttrokken in de nacht, terwijl er overdag weer een veel groter volume wordt opgeslagen. Het omgekeerde gebeurt ook in de winter; een relatief klein volume wordt overdag opgeslagen in de warme bronnen, een veel groter volume wordt onttrokken gedurende de koudere momenten (bv. 's nachts). In de winter is het volume dat kort-cyclisch wordt opgeslagen bij KC vaak tussen de 10x en 100x kleiner dan het onttrokken volume. Dit verschil lijkt iets kleiner te zijn in de zomer, daar is het verschil in volume meestal tussen de 3x en 10x (zie Figuur 3-17).



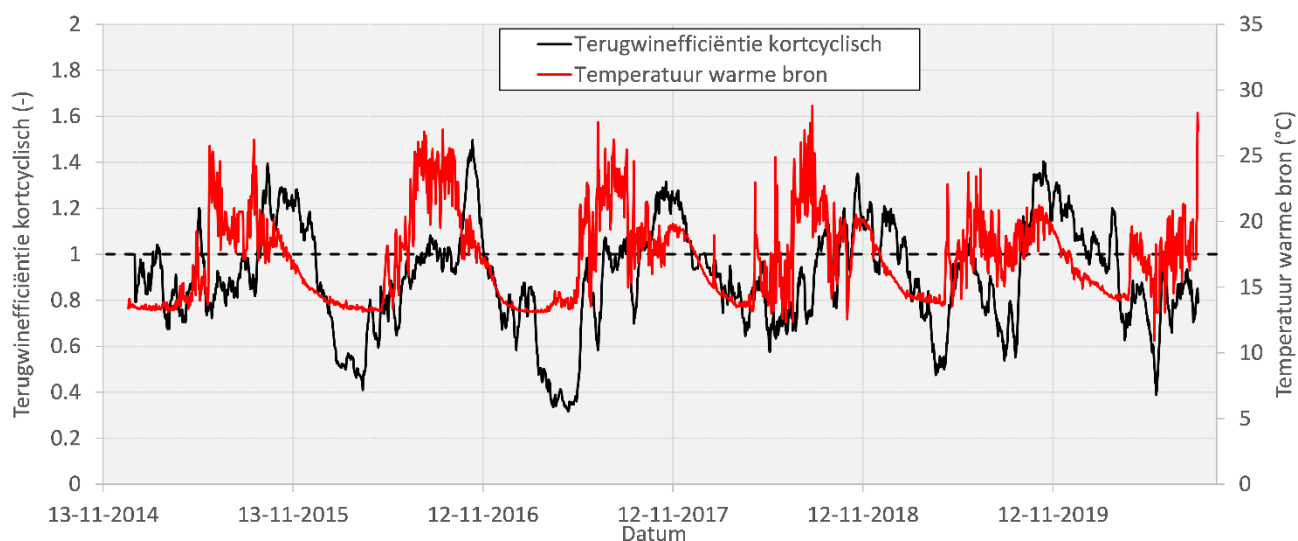
Figuur 3-17 kort-cyclische volume onbalans tijdens laden (groter volume warme bron in per dag) en tijdens ontladen (groter volume bron uit per dag).

Tijdens deze kort-cyclische opslag kan er warmte verloren gaan aan de omgeving indien de omgeving kouder is dan de opgeslagen warmte en kan er extra energie worden geleverd wanneer de omgeving warmer is dan de opgeslagen warmte. De temperatuur van de warme bron, en daarmee dus het moment in het jaar, heeft effect op de terugwinefficiëntie van het kort-cyclische opslagvolume (Figuur 3-18). Bij een positief effect is de terugwinefficiëntie >1 , dit wil zeggen dat er voor hetzelfde onttrokken volume een even grote of grotere hoeveelheid energie wordt onttrokken uit de warme bronnen dan er die dag is ingestopt (gemiddeld over de dag). Bij een negatief effect gebeurt het omgekeerde; het kort-cyclisch opgeslagen volume wordt teruggewonnen met een lagere temperatuur dan tijdens injectie (gemiddeld over de dag). Het kort-cyclisch rendement wordt berekend als:

$$\eta_{\text{kort-cyclisch}} = \frac{\left(\frac{E_{\text{uit}}^{\text{dag}}}{E_{\text{in}}^{\text{dag}}}\right)}{\left(\frac{V_{\text{uit}}^{\text{dag}}}{V_{\text{in}}^{\text{dag}}}\right)}$$

Figuur 3-18 laat zien dat er een positief effect is tijdens de 1^e fase van het ontladen van de warme bron (herfst en start winter). De opgeslagen warmte in de warme bronnen is dan nog relatief warm door de geladen warmte in de zomer, de opslagtemperatuur daalt naarmate minder warmte beschikbaar is voor opslag in de warme bron. Dit zorgt ervoor dat het kort-cyclisch rendement relatief hoog is tijdens deze fase, variërend tussen 100 en 150%.

Echter, naarmate de temperatuur van de warme bronnen daalt, vervalt het positieve effect van de relatief warme ondergrond, en neemt juist de kort-cyclische terugwinefficiëntie af, variërend tussen ongeveer 40 en 80%. Hetzelfde patroon wordt waargenomen bij aanvullende simulaties die zijn uitgevoerd om de kort-cyclische terugwinefficiënties te berekenen voor generieke situaties voor verschillende warme-bron condities (bijv. leeg, halfvol, vol), zie Bijlage Bijlage V. Bij deze simulaties is er uitgegaan van volumebalans tussen kort-cyclische injectie en onttrekking en een constante opslagtemperatuur. Dit zorgt er voor dat de terugwinefficiëntie voor deze aanvullende simulaties over het algemeen lager is dan de kort-cyclische terugwinefficiënties die volgt uit de monitoringsdata. Het algemene beeld dat de kort-cyclische terugwinefficiëntie hoger is na de zomer en lager is aan het eind van de winter en in het voorjaar komt goed overeen.



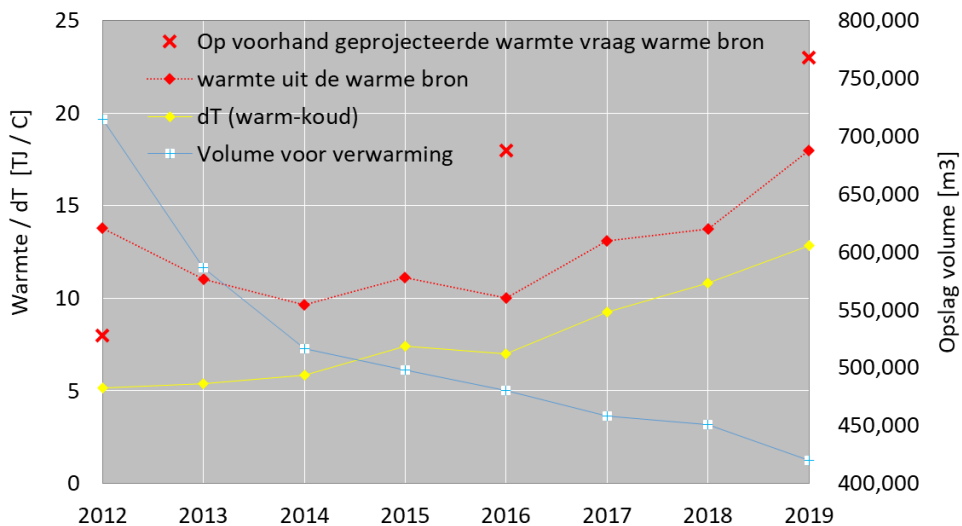
Figuur 3-18 Kort-cyclisch dagelijkse terugwinefficiëntie en de temperatuur van de warme bron (dagelijks gemiddelde). De gepresenteerde terugwinefficiëntie is een wekelijks lopend gemiddelde.

3.2.4 Discussie en Conclusie

Vanaf 2015 is de transitie van een gewone OBES naar opslag met hogere temperaturen ingezet. Vanaf dat moment worden hogere temperaturen gebruikt voor opslag van warmte in de warme bronnen. Dit gebeurt sporadisch met temperaturen > 30 °C. Doordat de temperatuur aan de warme bron kant stijgt, stijgt ook de gemiddelde ΔT (temperatuurverschil tussen warm – koud tijdens laden/ontladen). Vanaf 2019 is de gemiddelde $\Delta T > 12$ °C (Figuur 3-19). Dit is uitzonderlijk hoog in vergelijking met een gewoon OBES systeem bij toepassing in kassen. Daar is de ΔT gemiddeld 6°C (Beernink et al., 2019; Willemsen, 2016). Dit zorgt er dus voor dat er per m^3 verpompt grondwater 2x zoveel warmte/koude kan worden opgeslagen.

De onbalans van het OBES systeem heeft een alles bepalende rol in het rendement van de koude en warme bronnen. Omdat er meer wordt onttrokken dan geïnjecteerd in de warme bronnen kan er bijna geen energie verloren gaan resulterend in een gemiddelde terugwinefficiëntie van ~ 1 (0.97). In de koude bronnen blijft een relatief groot deel van het geïnjecteerde volume achter in de ondergrond.. Het kort cyclische gedrag van de OBES van Koppert-Cress zorgt er voor dat het grootste deel van de warmte die wordt opgeslagen zich slechts kort in de bodem bevindt. Dit zorgt er voor dat er een relatief kleine buffer ontstaat rondom de warme bronnen die gebruikt kan worden in de winter. In de loop van de winter daalt de temperatuur van de warme bron dus sterk. Dit heeft ook een nadelig effect op de kort-cyclische terugwinefficiëntie. Deze is dus het hoogst als de warme bron temperatuur nog relatief hoog is (herfst) en daalt naarmate de warme brontemperatuur afneemt (gedurende de winter en in de herfst).

Uit deze analyse van de temperatuur en volume data blijkt dat er te weinig warmte beschikbaar is om de warme bronnen voldoende te laden. Dit zorgt A) voor de jaarlijkse onbalans en B) voor de lege warme bron in de winter. Door de aanpassingen van Koppert-Cress vanaf 2015 verbetert de prestatie het systeem echter wel. De laatste jaren wordt het verschil tussen het ontladen en het laden kleiner. Echter, de warmtevraag stijgt ook de komende jaren. Om het systeem meer in balans te brengen is er dus een aanvullende bron van warmte nodig.



Figuur 3-19 Kenmerkende eigenschappen van het OBES systeem van Koppert-Cress gemiddeld per jaar van 2012 t/m 2019.

3.3 Optimalisatie milieu-economisch rendement

3.3.1 Aanpak

Op basis van de gemonitorde energiestromen van het OBES van KC is in beeld gebracht welke kosten en CO₂ uitstoot gemoeid is bij het leveren van de warmte en koelvraag. Deze zelfde energiestromen zijn ook gebruikt om in te schatten wat de kosten en CO₂-uistoot zijn wanneer er andere typen systemen zouden worden toegepast. Het energiegebruik en de daarmee samenhangende uitstoot en kosten zijn in beeld gebracht voor 4 situaties: 1) Het “oude normaal”: gasketel en koelmachine (KM), 2) OBES met “normale” temperatuur warme bron, 3) de situatie zoals gemonitord bij Koppert-Cress en 4) OBES met warme bron temperatuur structureel op hoger temperatuur niveau dan nu het geval bij KC.

- 1) Ketel en koelmachine
De geleverde warmte en koude met het bestaande systeem wordt in dit geval geleverd met een ketel met een rendement van 95% en met een koelmachine met een COP van 3.
- 2) Normaal OBES
Om het energiegebruik van een OBES met lagere opslag temperatuur in de warme bron te kunnen berekenen zijn enkele aannamen gedaan:
 - a. Warmtepomp capaciteit schaaft mee met de hoeveelheid beschikbare warmte uit de bronnen. De volume stromen van het grondwater tussen de bronnen blijven gelijk.
 - b. De hoeveelheid warmte beschikbaar voor de verdamper van de warmtepomp daalt met een factor 2 omdat de werkelijke jaargemiddelde ΔT van KC circa 2x zo hoog is als het gemiddelde in de markt bij gelijke type toepassing. Het OBES van KC draait nu op een jaargemiddelde ΔT van circa 12°C, bij normale OBES bij kassen is dat 6°C (Willemsen, 2016).
 - c. De warmtepomp functioneert door de lagere aanvoer temperatuur op een lagere COP. Op basis van de Carnot efficiency verandert de COP van de warmtepomp met een factor 0.88 in het geval van een afname van de verdamper temperatuur van 6°C bij een condensor temperatuur van 63°C (Carnot, 1978). De warmte die op deze manier wordt geleverd door warmtepomp wordt afgetrokken van de totale energievraag die is gemonitord. Het resterende deel wordt geleverd door ketels
 - d. Er wordt uitgegaan dat koude geleverd kan blijven worden door de OBES, echter wel met een lagere COP door lagere ΔT tussen de bronnen.
 - e. Het stroomgebruik voor de circulatiepompen is bepaald met op basis van de COP waarden in Tabel 3-1.
- 3) KC
Het elektriciteitsgebruik van de verschillende componenten is in beeld gebracht op basis van aangenomen COP's, die zijn vastgesteld in overleg met de operationele beheerders van het OBES systeem van KC, Tabel 3-1. Het gas gebruik volgt direct uit de meetgegevens van de ketels en WKK.
- 4) KC⁺
Uit de meetgegevens van KC blijkt dat alleen op de allerwarmste uren in de zomermaanden er met een hogere temperatuur warmte wordt opgeslagen. In deze situatie wordt aangenomen dat verbeterde aansturing of andere zonnecollectoren of een andere bron van omgevingswarmte er voor zorgt dat de brontemperatuur structureel 6°C hoger is dan nu het geval is.
 - a. Warmtepomp capaciteit schaaft mee met de hoeveelheid beschikbare warmte uit de bronnen. De volume stromen van het grondwater tussen de bronnen blijven gelijk.
 - b. De hoeveelheid warmte beschikbaar voor de verdamper van de warmtepomp stijgt met een factor 1.5.
 - c. De warmtepomp functioneert door de lagere aanvoer temperatuur op een hogere COP. Op basis van Carnot efficiency verandert de COP van de warmtepomp met een factor 1.15 in het geval van een toename van de verdamper temperatuur van 6°C bij een condensor temperatuur van 63°C (Carnot, 1978). De warmte die op deze manier wordt geleverd door warmtepomp wordt afgetrokken van de totale energievraag. Het resterende deel wordt geleverd door ketels
 - d. Er wordt uitgegaan dat koude geleverd kan blijven worden door de OBES, echter wel met een hogere COP door grotere ΔT tussen de bronnen.
 - e. Het stroomgebruik voor de circulatiepompen is bepaald met op basis van de COP waarden in Tabel 3-1.

Overige randvoorwaarden en uitgangspunten:

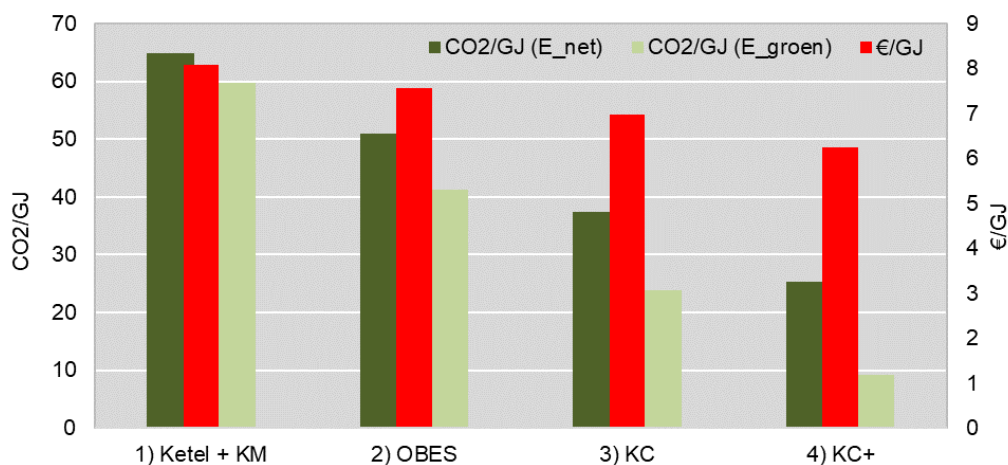
Koppert-Cress koopt elektriciteit duurzaam in voor €0.093/kWh en gas voor €0.19/m³. Voor gas wordt een emissie factor van 1.77 kg CO₂/m³ gehanteerd, voor elektriciteit wordt onderscheid gemaakt tussen de keten uitstoot van groene stroom zoals door KC ingekocht 0.05 kg CO₂/kWh en de mix op het Nederlandse net: 0.32 kg CO₂/kWh (Bloemendal et al., 2020; Vreede and Groot, 2010).

Tabel 3-1. Toegepaste COP –waarden voor verschillende scenario's

	1) ketel, KM	2) OBES	3) OBES KC	4) OBES KC ⁺
Vijver	-	10	20	20
Zonnecollector	-	15	30	45
Koelcel	-	5	10	10
Bronnen	-	12.5	25	37.5
ketel	0.95	0.95	0.95	0.95
Warmtepomp	-	4.5	5.1	5.9

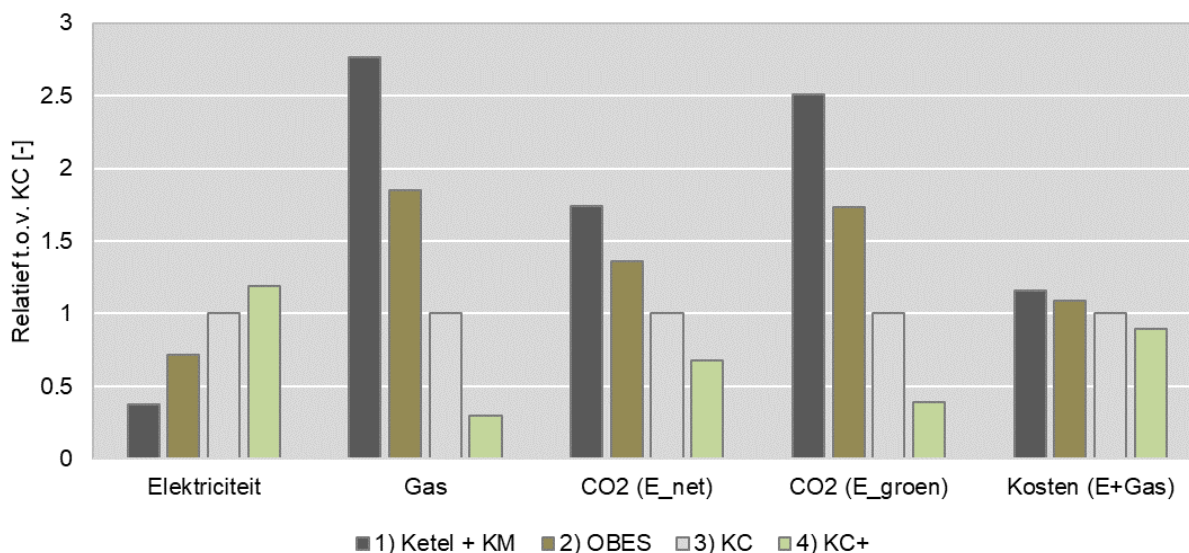
3.3.2 Resultaten

Scenario's 1), 2) en 4) zijn vergeleken met scenario 3), de huidige situatie zoals die is waargenomen bij Koppert-Cress. In volgens de waarnemingen stoot KC per jaar circa 1,1 kton CO₂ uit, dat zou 1,7 kton zijn geweest als ze elektriciteit van het net hadden betrokken. Dit komt neer op een uitstoot van 24 en respectievelijk 37 kg CO₂/GJ. De operationele kosten hiervoor bedragen jaarlijks circa 300k€, wat neer komt op een warmte prijs van 8 €/GJ. Figuur 3-20, toont de kosten en uitstoot per GJ voor alle 4 de scenario's. De operationele kosten verschillen zijn beperkt, terwijl de verschillen in uitstoot wel erg groot zijn. Hieruit blijkt dat het OBES van KC het beter doet dan een conventioneel OBES systeem en een gasketel en koelmachine. Het verder laten toenemen van de warme bron temperatuur zou voor nog meer besparing kunnen zorgen.



Figuur 3-20. Kosten en uitstoot per GJ geleverde warmte/koeling

In Figuur 3-21 is de relatieve verandering in energiegebruik en de daarmee samenhangende CO₂-uitstoot en kosten, t.o.v. de huidige situatie bij KC weergegeven. Uit de verandering van het gas gebruik blijkt dat het invangen van warmte op hogere temperatuur ook zorgt voor een grote toename in de hoeveelheid warmte die de warmtepomp levert, en daarmee het gas gebruik terug dringt. Tegelijkertijd levert die warmtepomp de warmte ook nog eens een stuk efficiënter, waardoor het elektriciteitsgebruik veel minder sterk toeneemt dan de CO₂ uitstoot afneemt.



Figuur 3-21. Relatieve verandering in energiegebruik en de daarmee samenhangende CO₂-uitstoot en OPEX, t.o.v. de huidige situatie bij KC (scenario 3)).

3.3.3 Discussie en Conclusie

Aannames bij scenario 2) en 4)

Voor scenario 2) en 4) geldt dat de verhouding tussen hoeveel warmte er precies door de warmtepomp en door de ketel wordt geleverd is erg bepalend voor de uitkomsten van de vergelijking. Er is aangenomen dat de warmtepomp mee schaal met de toegenomen of afgenomen bron temperatuur. Dat de warmtepomp capaciteit niet mee schaal met toegenomen of afgenomen brontemperatuur is niet realistisch aangezien er meer warmte beschikbaar komt door de grotere ΔT . Bovenstaande aanpak is daarom een voor de hand liggende benadering die aardig inzicht geeft in het verschil tussen de energetische prestatie van een bepaald systeem dat onder verschillende temperatuur condities werkt, maar kan niet zomaar worden gegeneraliseerd omdat ontwerpkeuzes t.a.v. capaciteit van de warmtepomp ook afhangen van uitgangspunt voor de optredende temperatuur niveaus en broncapaciteit en de daarbij behorende kosten.

Als zou zijn aangenomen dat bij scenario 2) en 4) de warmtepomp capaciteit wel gelijk blijft is het enige onderscheid tussen scenario's 2-3-4 dat het elektriciteit gebruik van de warmtepomp veranderd ten opzichte van scenario 3), respectievelijke 14% meer en 15% minder ten opzichte van de huidige situatie bij KC (scen. 3)). Daarnaast zou de benodigde energie voor de grondwater pompen met gelijk percentage toe/afnemen. Dat zou de resultaten van bovenstaande niet veranderen, maar wel een minder groot verschil in kosten en CO₂ uitstoot opleveren.

Bijdrage van de warmtepomp

Naarmate er een groter aandeel van de warmte door de warmtepomp wordt geleverd wordt de prestatie van de warmtepomp steeds bepalender voor de energieprestatie van het OBES. Tegelijkertijd zorgt het invangen van

warmte met hogere temperatuur er bij gelijkblijvende debieten voor dat er ook meer warmte beschikbaar is en de warmtepomp dus ook meer kan leveren.

Warmte invangen met hogere temperatuur helpt

Meer warmte op hogere temperatuur invangen verbeterd de milieu-economische prestaties van het OBES, omdat er meer warmte duurzaam wordt geleverd en het systeem daarbij efficiënter werkt.

Een nog hogere warme bron temperatuur dan geëvalueerd in scenario 4) zorgt daarmee voor verdere verbetering van het milieu-economisch rendement. Een omslag punt is in het geval van KC 40°C, omdat de eerste warmtepomp een condensor temperatuur van 38°C heeft. Als er altijd >40°C uit de warme bron kan worden geproduceerd, is er in het geval van KC 1 warmtepomp minder nodig. En voor sommige kasdelen wellicht helemaal geen warmtepomp meer. Het elektriciteitsgebruik zal daarmee flink afnemen. Bij een hogere warme bron temperatuur dan geëvalueerd in scenario 4) loopt KC echter tegen de grenzen aan van wat er binnen de vigerende vergunning mogelijk is. Daarnaast is het de vraag of het te verwachten is dat dat ook realiseerbaar is, gezien de moeite die KC er nu insteekt om een ΔT verbetering van 6°C te bewerkstelligen (verdubbeling van branche gemiddelde ΔT , en ver 3-voudiging landelijk gemiddelde ΔT van OBES-en). Structureel richting 40°C warme bron temperatuur, lijkt in de praktijk echter lastig om met passieve warmte invang technieken te realiseren. Structureel richting de 40°C is alleen mogelijk als er een constante stroom van warmte beschikbaar is die dan wel uit een duurzame bron moet komen. Dit zou geothermie kunnen zijn of grootschalige zonnecollectoren (bijv. met vacuümbuizen).

Opties voor KC om meer en hogere temperatuur warmte in te vangen en hun OBES rendement verder te verbeteren:

- Koppeling met Geothermie, retour van HT-buurkassen gebruiken om de warme bron te laden
- Warmtepomp aanbodkant (power-2-heat), bij overproductie van groene stroom, de warmtepomp inzetten om warmte op te slaan
- Huidige zonnecollectoren vervangen voor vacuümbuizen, zodat ook bij minder instraling, hogere temperaturen kunnen worden gemaakt, dit vraagt echter wel aanpassing van de installatie om te voorkomen dat er bij hoge instraling >45°C in de warme bron wordt opgeslagen

Investeringskosten

In dit onderzoek is alleen gekeken naar de effecten op operationele kosten. De benodigde investeringen zijn niet meegenomen, het is dus niet bekend in hoeverre een investering aanvullend op een normaal OBES zich terugverdiend als met een hogere infiltratietemperatuur wordt gewerkt. De jaarlijkse besparing aan energiekosten van Koppert-Cress t.o.v. een normaal OBES is circa € 25,000.- per jaar. Dus investeringen tot €250,000,- resulteren in een terugverdientijd die kleiner is dan 10 jaar.

4 Effecten hogere temperatuur opslag

De temperatuurveranderingen die ontstaan door de opslag van hogere temperaturen is in kaart gebracht d.m.v. temperatuurmonitoring en de simulatie van temperatuureffecten met een numeriek model. De uitkomsten van het numeriek model worden ook vergeleken met de monitoringsdata om de resultaten te valideren.

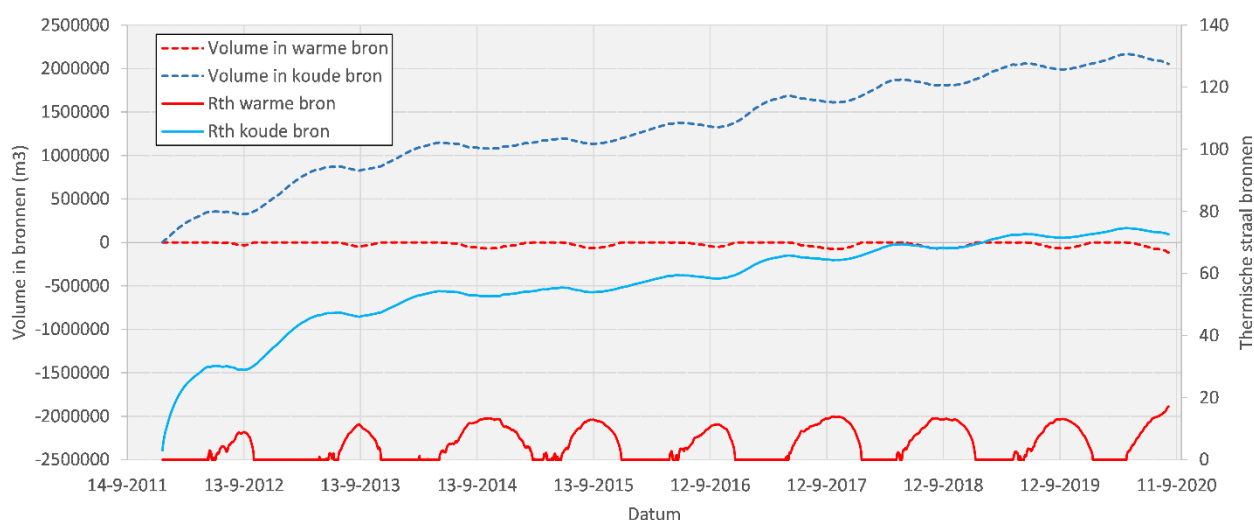
4.1 Verwachte impact op basis van analyse volume- en energiestromen

Op basis van de data van het OBES systeem van Koppert-Cress (zie §3.2) kan een inschatting worden gedaan van de verwachte minimale horizontale (radiale) verspreiding rondom de warme en koude bronnen. De thermische straal rondom een bron kan worden berekend als:

$$R_{th} = \sqrt{\frac{c_w V}{c_{aq} \pi L}}$$

Met de V het opgeslagen volume (m^3), C_w en C_{aq} de warmtecapaciteit van water ($4.2 MJ/m^3$) en de aquifer ($\sim 2.8 MJ/m^3$) en L de totale filterlengte. Door het volume dat op ieder moment in de ondergrond zit in de warme en/of koude bronnen te berekenen kan dus de thermische straal worden berekend. In Figuur 4-1 wordt het gemiddelde volume dat in één warme of koude bron zit door de jaren heen gepresenteerd. Het volume in de warm bron raakt ieder jaar 'leeg'. Het volume in de koude bron blijft ieder jaar groeien, en bereikt in 2020 een grote van meer dan 2,000,000 m^3 per koude bron. Dit resulteert erin dat er voor de koude bronnen een thermische straal van bijna 70m ontstaat in de ondergrond. Voor een warme bron ligt de maximale thermische straal per jaar aan het opgeslagen volume per jaar. Dit resulteert in een minimale thermische straal tussen de 13 en 15m voor de warme bron.

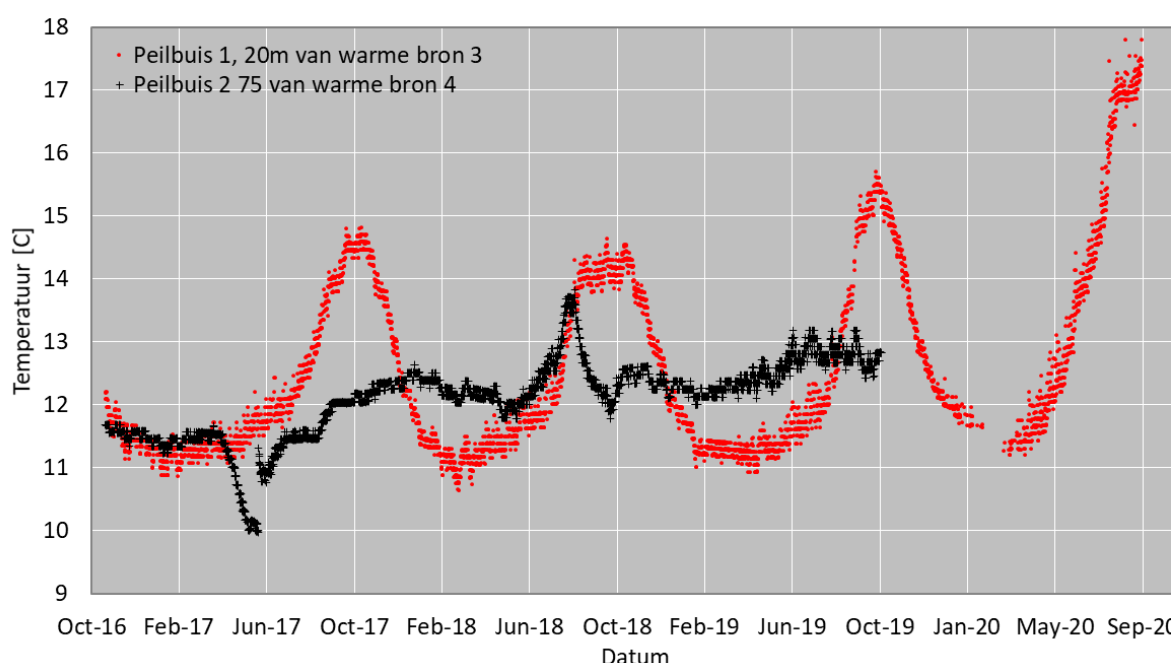
De hier gepresenteerde horizontale verspreiding gaat alleen uit van de verplaatsing van warmte en koude door het verpompen van het water (advectief transport). Echter, in werkelijkheid zal de warmte ook door onder andere conductie en dispersie verspreid worden naar de omgeving rondom de bronnen. De hier gepresenteerde thermische straal kan dus worden gebruikt als de minimale verspreiding rondom één van de warme of koude bronnen.



Figuur 4-1 Volume (gemiddeld) in één warme en koude bron van het OBES systeem, berekent vanaf de start van gebruik in 2012. Op basis van dit volume kan de thermische straal rondom die warme of koude bron worden berekend.

4.2 Monitoring temperatuur verdeling ondergrond

In Figuur 4-2 is het temperatuurverloop van het grondwater (ter hoogte bovenste bronfilter) in een peilbuis op circa 20m afstand van de warme bron weergegeven. Deze metingen zijn uitgevoerd met een PT100 temperatuursensor. Hieruit blijkt dat op enige afstand van de bron de hoge infiltratie temperaturen sterk zijn uitgedempt. De seizoenale invloed van de warmteopslag kan op 20m worden waargenomen, met een maximale verhoging van de temperatuur tot 18°C eind 2020. Ondanks de kort-cyclische opslag, wordt er ook nog steeds een groot deel van de warmte op seizoen basis opgeslagen. Op basis van de geïnfilterde volumes reikt de thermische straal wel verder dan 20m. Op 75m is het effect van de warme bronnen niet duidelijk meer zichtbaar. De daling in juni 2017 zou kunnen komen door invloed van de koud bron, dat komt namelijk goed overeen met de verwachte omvang van de koude bron. Het is echter onduidelijk waarom de temperatuur weer toeneemt en in aug 2018 piekt. Het is meest waarschijnlijk dat het vreemde gedrag komt door fouten die optreden in de logger die in de zeer vochtige putbehuizing van de peilbuis zit. Na oktober 2019, geeft de logger helemaal geen plausibele waarden meer.



Figuur 4-2. Temperatuurmeting met PT100 in peilbuis 1 op 20 m van warme bron 3, en peilbuis 2 op 75 m van warme bron 4, ter hoogte van het bovenste filter deel. De logger in referentie peilbuis 2 bevindt zich in de ondergrondse bronbehuizing van de peilbuis en heeft daardoor vochtige omstandigheden te verduren. Door corrosie gerelateerde problemen en het laatste jaar aan gegevens helaas niet bruikbaar.

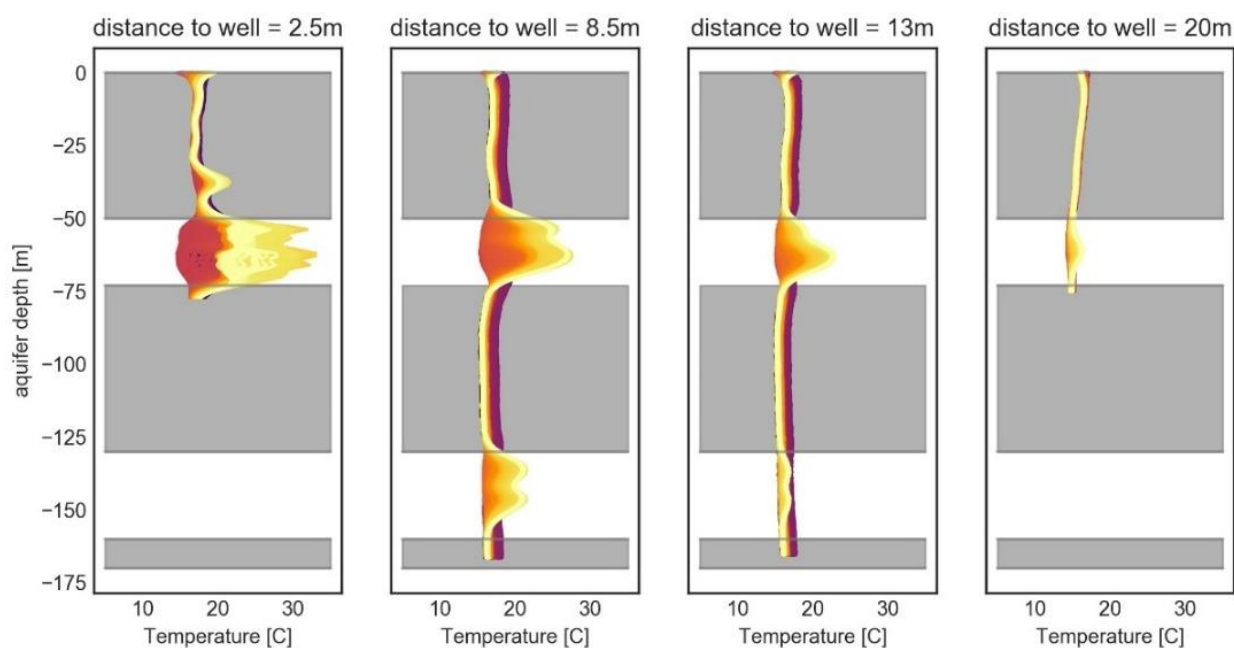
4.2.1 Temperatuurmonitoring met DTS

De doorsnede van de temperatuurmonitoring met DTS voor de 4 locaties van oktober 2019 t/m September 2020 is weergegeven in Figuur 4-3. De temperatuurverhoging is duidelijk in de twee aquifers waar warmte wordt opgeslagen. De locatie dicht bij de warme bron (2.5m) meet de hoogste temperatuur (op sommige dieptes in de opslag aquifer tot boven 30 °C). Het is daarbij duidelijk zichtbaar dat de temperatuur afneemt met afstand van de warme bron. Op een afstand van 20m is er slechts een opwarming van een paar graden meetbaar met de DTS. Dit komt redelijk goed overeen met de temperatuurtoename op 20m in Figuur 4-2 (logger) gedurende het jaar. Echter, de temperatuurtoename lijkt daar iets groter te zijn. Dit kan te maken hebben met de locatie van peilbuis 1 (ten zuiden van de bronnen) t.o.v. de locatie van de DTS kabel (ten noorden van de warme bronnen). De relatieve temperatuur veranderingen zijn nauwkeurig op 0.1°C, de absolute temperatuur kan 1 tot 1.5°C afwijken⁴.

⁴ Door de vele kabelbreuken die er zijn geweest, was het niet altijd mogelijk om de DTS o absolute temperatuur te kalibreren.

Er is een groot verschil zichtbaar tussen de bovenste en de onderste aquifer waar warmte wordt opgeslagen (Figuur 4-3). De opgeslagen warmte reikt verder in de bovenste aquifer, en, is van hogere temperatuur t.o.v. de zelfde locatie in de onderste aquifer. Dit kan er op wijzen dat dat er toch relatief meer warmte wordt opgeslagen in de ondiepe aquifer dan gedacht op basis van de flowmetingen (zie §2.1.3) of dat er andere geohydrologische condities zijn die voor een mindere verspreiding zorgen in noordelijke richting

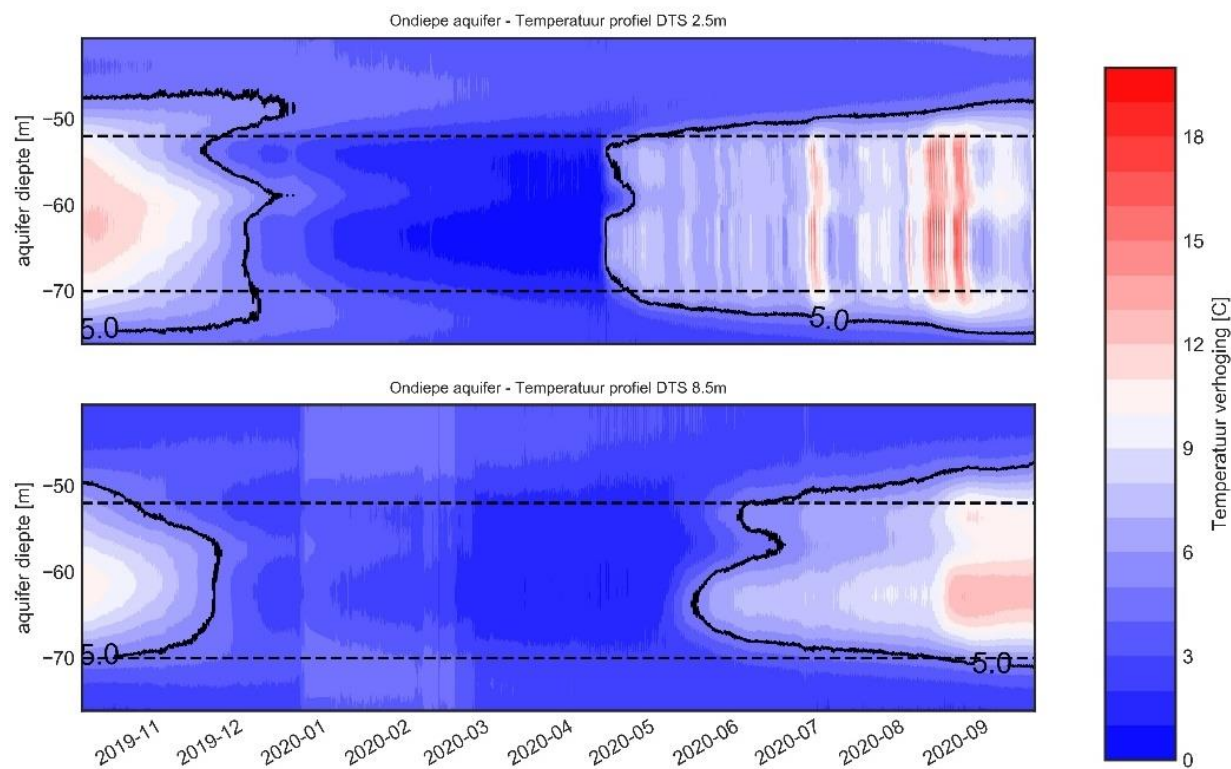
De opwarming in de lagen boven en onder de ondiepe en diepe opslag-aquifer lijkt op basis van Figuur 4-3 beperkt. De DTS op 2.5m laat een opwarming in het pakket boven de bovenste aquifer zien. De opwarming hier neemt op gelijke wijze met de warmte in het opslagpakket toe en af in de tijd. Maar, de temperatuur is wel lager. De laag boven de ondiepe aquifer is heterogeen en bestaat uit een afwisseling van klei, silt en zandlaagjes (zie §2.1.2). De waargenomen opwarming is waarschijnlijk warmte die door warmte-uitstraling van de bron (behuizing) wordt verspreid in een relatief goed doorlatend (zand)laagje. Aangezien de DTS kabels redelijk in lijn (stroomafwaarts) met de natuurlijke grondwaterstroming staat, kan dit ook meewerken aan de verdere verspreiding van de warmte. Het effect van verticale warmteverspreiding door warmtegeleiding (conductie) vanuit de opslag-aquifers door de afsluitende lagen opwaarts of benedenwaarts door de ondergrond lijkt niet of nauwelijks voor warmteverspreiding te zorgen. De temperatuurcontouren stoppen namelijk vrij abrupt kijkende naar de overgang van aquifer naar aquitard (onder en boven de opslagaquifer).



Figuur 4-3 Totale doorsnede van de vier locaties waar gemeten wordt met DTS van Oktober 2019 tot September 2020. De kleur van de lijn representeert een andere moment in de tijd, de variatie op de x-as representeert de gemeten temperatuur.

De opwarming van de ondergrond op 2.5m en 8.5m rondom de ondiepe opslag-aquifer is gepresenteerd in Figuur 4-4 van nov 2019 t/m sep 2020. De zwarte stippellijnen geven aan waar de kleilaag onder en boven de opslag-aquifer start. In dit figuur is de opwarming van de kleilagen boven en onder de aquifer goed zichtbaar door de 5 °C opwarming contour te volgen. Naarmate de opslag-aquifer warmer wordt (in de loop van de zomer) warmt de kleilaag op door warmtegeleiding (conductie), de afstand van de 5 °C neemt dus toe. Wanneer de warme bron leeg raakt (zie november en december 2019 in Figuur 4-4) daalt de temperatuur in de opslag-aquifer aanzienlijk, en wordt ook de kleilaag boven en onder de opslag-aquifer weer afgekoeld. Figuur 4-3 laat zien dat de temperatuur in de kleilagen vervolgens weer afkoelt. De gemeten temperatuur op 2.5m afstand van warme bron 1 in de opslag-aquifer tussen maart – mei 2020 is lager dan de temperatuur van de boven en onderliggende kleilagen. Dit kan erop wijzen dat er in de loop van de jaren een lichte opwarming (1 à 2 °C) optreedt van de kleilagen, of dat

temperatuur van het grondwater in de opslag-aquifer wordt afgekoeld door de interactie met de grote koude bel die is ontstaan door de grote onbalans van het KC systeem.



Figuur 4-4 Opwarming in de ondiepe aquifer op 2.5 en 8.5m van warme bron 1 van Nov 2019 t/m Sept 2020.

De ontwikkeling van de temperatuur over de tijd op de 4 afstanden in de bovenste aquifer en 2 in de onderste aquifer zijn getoond in Figuur 4-5. Helaas is er een groot gat in de data in 2019 doordat de DTS tijdelijk buiten gebruik is geweest door een kabelbreuk. Vanaf Oktober 2019 wordt er ook in de diepe aquifer gemonitord. We zien dat de meest dichtbij zijnde locatie (rode lijn) het meest varieert en over het algemeen ook de hoogste temperatuur heeft. Hier worden sporadisch temperaturen boven de 25 °C gemeten (in de zomer).

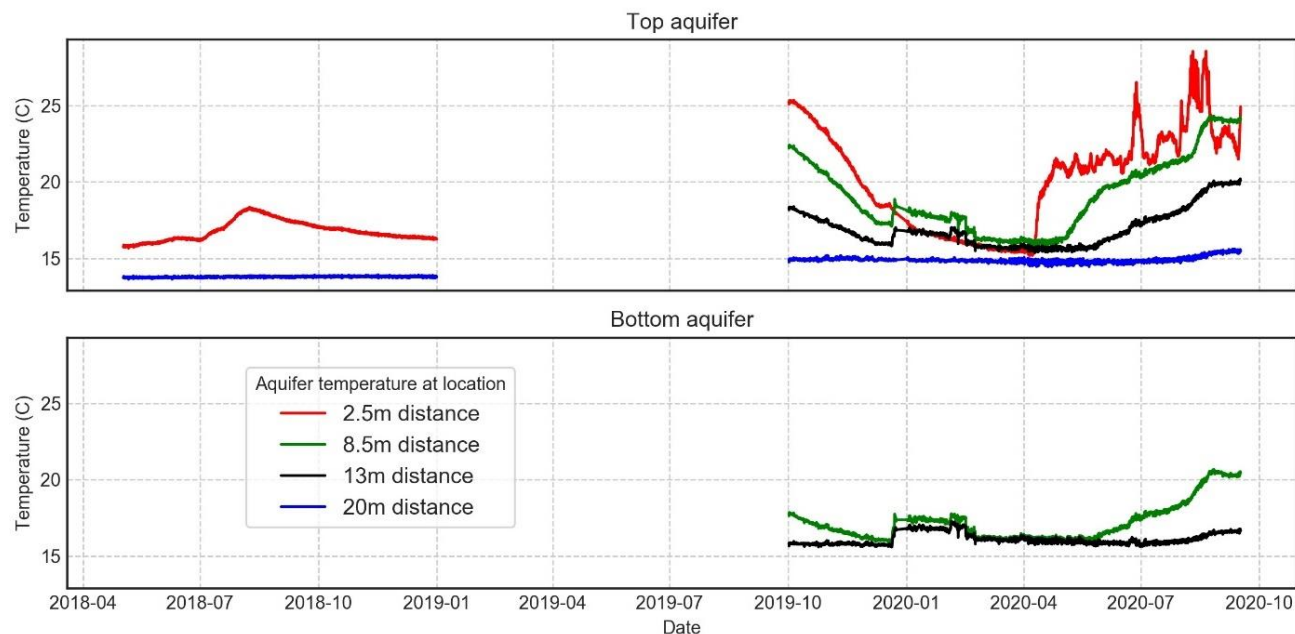
In het laatste deel van de winter en het begin van de lente van 2019/2020 is duidelijk zichtbaar dat de temperatuur in de ondergrond rondom de warme bronnen sterk afnam. De warme bronnen raakten dus leeg. Desalniettemin wordt er nog volop onttrokken uit de warme bronnen. De temperatuur daalt dus steeds meer richting de natuurlijk grondwatertemperatuur. Vanaf April 2020 zien we weer een sterke stijging in de temperatuur op 2.5m, en uiteindelijk wordt ook op 8.5m de ondergrond weer opgewarmd. In op de zomer van 2020 zien we een sterke temperatuurvariatie op 2.5m van de warme bron. Naarmate de zomer vordert stijgt op alle locaties de grondwater temperatuur. Op 20m afstand is ook een hele kleine stijging zichtbaar.

De sterke variatie bij de dichtstbijzijnde DTS locatie kan worden verklaard omdat de injectietemperatuur sterk varieert per uur (zie §3.2). Dit effect middelt naar buiten toe uit, en resulteert daar in een meer gematigde stijging van de temperatuur. Doordat injectietemperatuur sterk varieert kan het dus dicht bij de warme bron kouder zijn dan verder daar omheen. Dit is bijvoorbeeld aan het einde van de zomer in 2020 goed te zien. De temperatuur van de DTS op 8,5m blijft daar ~24 °C terwijl op een afstand van 2.5m de temperatuur slechts 20 °C bedraagt.

De temperatuur in de diepe aquifer laat een gematigder beeld zien t.o.v. de temperatuur gemeten op dezelfde locatie in het ondiepe pakket. De temperatuur is lager, en, de gemeten temperatuur lijkt ook later te volgen dan in

het ondiepere pakket. Het lijkt er dus op er relatief minder wordt opgeslagen in het diepere pakket in tegenstelling tot de indicatie met de flowmeting in de W4 bron (§2.1.3).

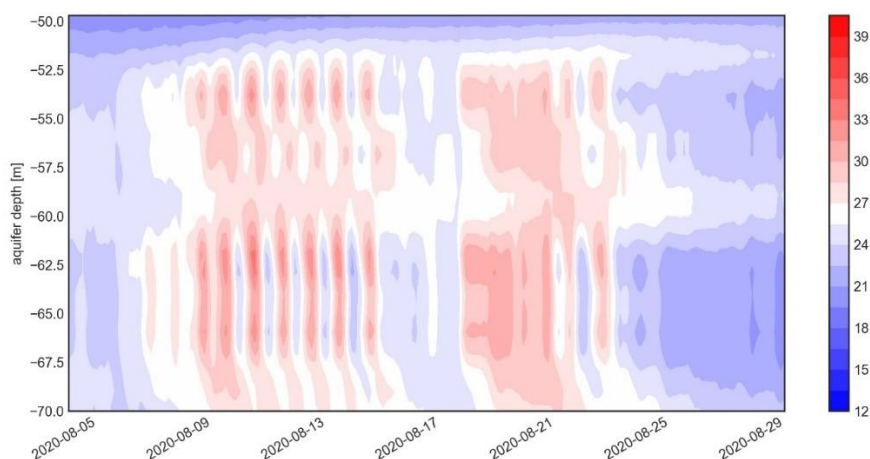
In Figuur 4-5 is een 'onregelmatigheid' zichtbaar in de temperatuur data voor locatie 8.5m en 13m in December 2019 en duurt 2.5 maand. Deze plotselinge temperatuurstoename kan niet worden toegeschreven aan de warmteopslag, maar heeft waarschijnlijk te maken met de dataverwerking van de DTS. Het gaat hier namelijk om één glasvezelkabel, waarbij de instelling nog kunnen worden geoptimaliseerd voor die periode.



Figuur 4-5 De met DTS gemeten gemiddelde verticale temperatuur in de bovenste en onderste aquifer op de verschillende locaties voor de periode 2018 – oktober 2020. Het gat in de meetreeks (2.5m en 20m) komt doordat de DTS installatie enkele keren is onderbroken. De metingen op de nieuwe locaties (8.5m en 13m) zijn pas gestart op 1 oktober.

4.2.2 Heterogeniteit ondergrond

De heterogeniteit van de ondergrond heeft invloed op de stroming van het grondwater rondom de bronnen. Doordat sommige lagen van de aquifer meer doorlaatbaar zijn t.o.v. andere lagen in de aquifer zijn er preferentiële lagen waar meer water wordt ingepompt tijdens de opslag van de warmte. De DTS kan de temperatuur in de ondergrond op een hoog detail niveau monitoren. Dit zorgt er voor dat de heterogeniteit goed zichtbaar is in de resultaten van de DTS, dit is goed zichtbaar in Figuur 4-3, Figuur 4-4en Figuur 4-6.



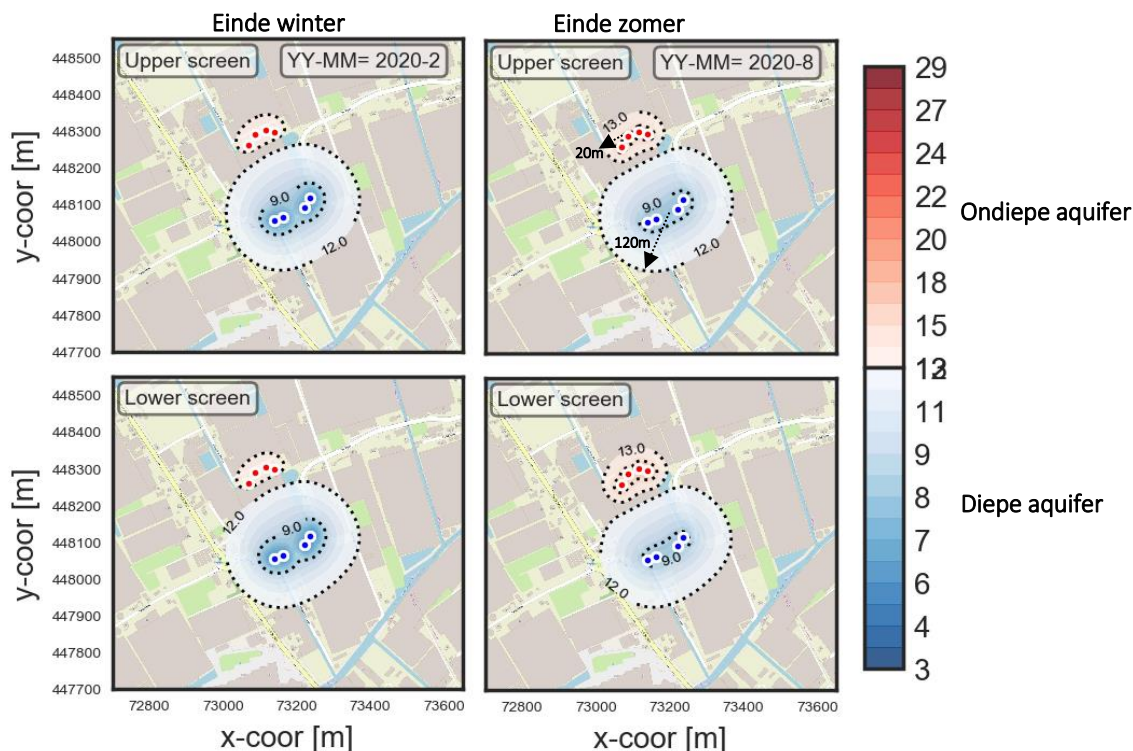
Figuur 4-6 Heterogeniteit van de ondergrond is duidelijk zichtbaar in het warmteverloop in de gehele diepte van de aquifer (2.5m afstand, bovenste aquifer).

4.2.3 Simulaties temperatuurverdeling in de ondergrond

In dit hoofdstuk zijn de ruimtelijke effecten van de temperatuurverandering in de ondergrond inzichtelijk gemaakt. Hiervoor is gebruik gemaakt van temperatuurmetingen van het bestaande systeem en het model instrumentarium van de USGS: MODFLOW, MT3DMS en SEAWAT (Harbaugh et al., 2000; Langevin et al., 2008; Zheng and Wang, 1999). Dit model neemt alle thermische processen mee die van toepassing zijn zoals conductie, diffusie, dispersie, en convectie. Details over het model zijn beschreven in Bijlage Bijlage II. Om de temperatuurverdeling in de ondergrond in kaart te brengen is gebruik gemaakt van een 3D model waarin alle 8 de bronnen in beide lagen (dus 16 filters) zijn gemodelleerd.

Op basis van de monitoringsdata is het model gerund met de netto dag-volumes en daggemiddelde temperaturen die zijn opgeslagen in de warme en koude bronnen van de OBES van Koppert-Cress (zie §3.2.2). Hierbij is voor de volumestroom verdeling in het onderste en bovenste bron filter uitgegaan van de verdeling zoals die bij de flow meting d.d. 1-8-2018 is vastgesteld, zie §2.1.3.

De resultaten van de simulatie is gegeven voor de situatie Februari (einde winter) en Augustus (einde zomer) van 2020 in Figuur 4-7. De grote onbalans is duidelijk zichtbaar in de grote van de koude bel rondom de koude bronnen. De afstand van de temperatuurcontour waar 0.5 °C afkoeling optreedt is maximaal 120m voor de koude bel. Voor de warme bel is dit slechts 20m. Op basis van het figuur lijkt het erop dat het thermische volume van de warme bronnen in contact staat met het thermische volume van de koude bronnen. Dit is zichtbaar omdat aan het eind van de winter de warme bel geen evenredige vorm heeft, maar aan de kant van de koude bronnen veel kleiner is. Op den duur kan dit er voor zorgen dat er relatief grotere verliezen optreden in de warme bronnen. Dit is echter nog niet zichtbaar in de temperatuur data analyse in §3.2. Echter, de terugwinefficiëntie van de warme bronnen is ieder jaar niet 100%, dit kan mogelijk worden verklaard door de vernietiging van warmte door de koude bel.



Figuur 4-7. Temperatuur in de ondiepe en diepe opslag aquifer einde winter (Links) en einde zomer (rechts) van 2020. De natuurlijke temperatuur van het grondwater is hier aangenomen als 12.5 °C.

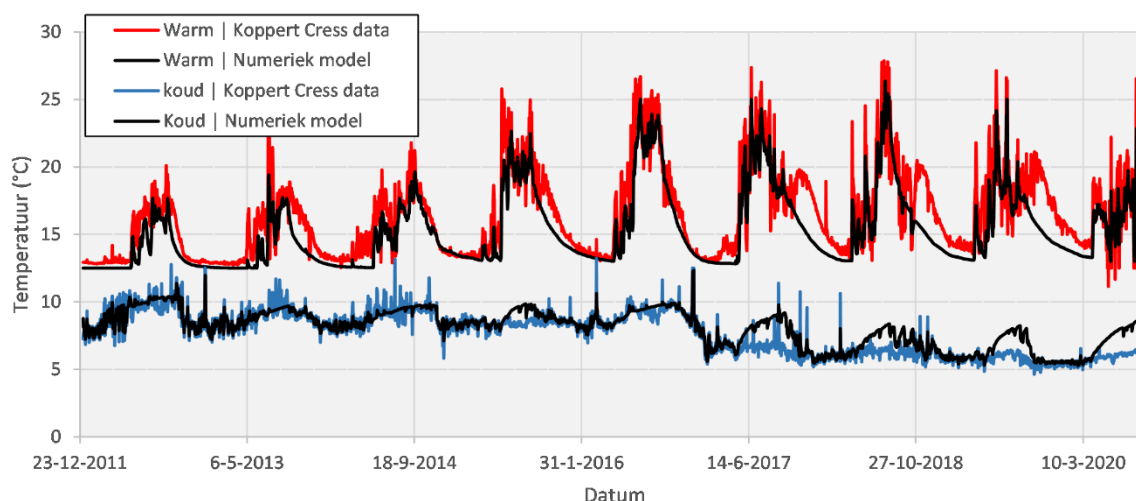
Het beeld dat wordt geschetst met het numerieke model is gelijk aan de resultaten van de monitoringdata. De temperatuurverandering die ontstaat door de warmte in de warme bronnen is relatief lokaal en voornamelijk van toepassing tijdens de zomer. Wat niet o.b.v. de DTS en de logger gemeten kon worden, is dat de grootste impact van het OBES van het Koppert-Cress systeem is te verwachten vanuit de koude bronnen. Dit is te wijten aan de grote onbalans van het OBES systeem van Koppert-Cress. Ondanks de hogere opslagtemperatuur bij KC lijkt er weinig tot geen langdurige thermische impact te zijn vanuit de warme bronnen.

4.2.4 Vergelijking metingen en numerieke model

In Figuur 4-8 is de gemodelleerde brontemperaturen van de warme en koude bronnen van het numerieke model vergeleken met de gemeten brontemperaturen. Het numerieke model volgt de temperatuurvariatie van de warme bron en de koude bron in sterke mate. Echter, het model laat een relatief lagere temperatuur zien ten opzichte van de gemeten waarden. Dit is vooral goed zichtbaar aan het eind van de winter voor de meeste jaren, de numeriek resultaten zijn daar gemiddeld 1 tot 2 °C lager dan is gemeten met het OBES systeem. Ook voor de koude bronnen is, vooral in de laatste 3 jaren, een sterke terugloop van de koude bron temperatuur te zien in vergelijking met de gemeten waarden.

Deze onderschatting van de brontemperatuur komt waarschijnlijk door twee processen:

- De kort-cyclische volumestroom wordt niet meegenomen met het numerieke model.
- Relatief grove discretisatie (5x5m). Dit zorgt er voor dat de relatief kleine volumes, die per dag kunnen worden opgeslagen als het ware 'verdunt' worden in de model cel, de temperatuur wordt hierdoor onderschat.

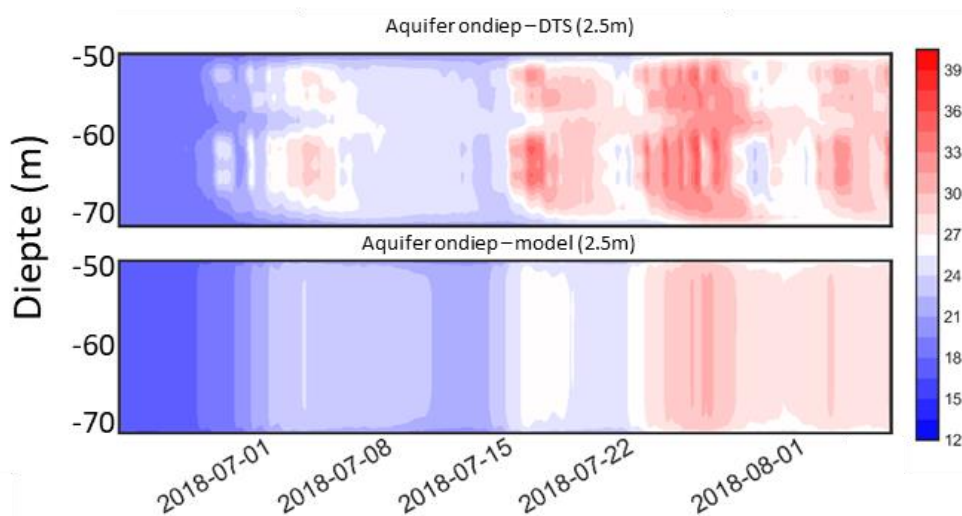


Figuur 4-8 Vergelijking van de temperatuur berekent volgens het numerieke model (zwarte lijnen) t.o.v. de gemeten temperatuur van de warme en koude bronnen.

Vergelijking met DTS

Om de verspreiding van de warmte rondom de warme bron dat berekent wordt met het SEAWATv4 model te kunnen valideren kan het worden vergeleken met de DTS data. In Figuur 4-9 is de temperatuur van de DTS op 2,5m vanaf bron W1 gebruikt om te vergelijken met het model. Het model is voor deze exercitie met een meer gedetailleerdere (axisymmetrisch, celgrootte 0.5m i.p.v. 5m, tijdseenheid uur i.p.v. dag) versie van het model gesimuleerd omdat het gepresenteerde model in Figuur 4-7 te grof is om de afstand op 2.5m goed inzichtelijk te kunnen maken⁵. Daarnaast is voor dit model ook alleen warme bron 1 gesimuleerd. Hoewel de modeluitkomsten de dynamiek van injectie en onttrekking goed weergeven, zijn de maximale temperaturen die in het model lager dan de temperaturen die gemeten zijn met de DTS. Deels zal dit te maken hebben met dat, ondanks de modelverfijning, de verticale en temporele resolutie van de DTS metingen nog steeds hoger is dan waar mee gemodelleerd kan worden, deels doordat er op basis van de DTS metingen meer geïnjecteerd lijkt in de ondiepe aquifer dan op basis van de flowmetingen waarmee gesimuleerd is. Maar ook de heterogeniteit van de ondergrond blijkt uit de DTS metingen een sterke invloed te hebben op de waargenomen temperatuurverdeling. Zo zorgt een relatief minder doorlatend deel in de ondiepe aquifer dat de temperatuurvariaties zich concentreren in een relatief dun deel aan de bovenkant en een relatief dikker deel aan de onderkant van de aquifer (Figuur 4-9). Verder blijkt uit Figuur 4-9 dat ondanks de mogelijke fout in de verdeling van de debieten over de verschillende filters (zie §4.2.1.) in de simulaties het verloop uit de metingen redelijk correspondeert met het verloop in het model. Het is te verwachten dat dit soort verschillend dichtbij de bron minder goed zichtbaar zijn.

⁵ De temperatuur is apart gemodelleerd met een axisymmetrisch model van de warme bron waar de DTS bij is geïnstalleerd (zie Bijlage II).



Figuur 4-9 Temperatuur verloop in Juli/Augustus 2018 in a) DTS-kabel, b) model bovenste laag en c) model onderste laag.

4.2.5 Conclusies thermische effecten

Uit dit hoofdstuk blijkt dat bij Koppert-Cress in de zomerperiode van 2018 periodiek temperaturen significant hoger dan 30°C in de warme bron zijn geïnfiltrerd, wat incidenteel tot een onttrekkingstemperatuur >30°C leidt. Echter, de thermische effecten zijn klein door de grote onbalans, waardoor aan het einde van de winter de warme bron leeg is en dus een warme bron temperatuur die richting de natuurlijke grondwatertemperatuur daalt (Figuur 4-1). Omdat de warme bron ieder jaar leeg raakt is er ook nauwelijks tot geen impact door de hogere temperatuur te verwachten (in zowel de horizontale en de verticale richting). Dit kan goed inzichtelijk worden gemaakt door te kijken naar een analyse van de energiestromen van het OBES systeem (Figuur 4-1).

4.3 Grondwaterkwaliteitsveranderingen in OBES systeem

De temperatuur kan van invloed zijn op de samenstelling van grondwater door de interactie van het water met in het sediment aanwezige mineralen, welke in zekere mate oplosbaar zijn in water. Andersom kunnen opgeloste bestanddelen in het grondwater ook neerslaan en daarmee onderdeel gaan uitmaken van de bodemmatrix, en immobiliseren door adsorptie aan het sediment. Vanzelfsprekend kunnen stoffen enkel in het grondwater komen door geochemische interactie als daarvoor zich een bron in het sediment bevindt. De temperatuur beïnvloedt deze processen doordat het tot verschuiving van geochemische evenwichtssituaties leidt en de snelheid (kinetiek) van reacties beïnvloedt die worden gedreven door een thermodynamische onbalans. De effecten op grondwater zijn echter vaak het gevolg van een complexe interactie tussen meerdere reacties. Bekende belangrijke processen zijn de impact op kalkchemie en neerslag van carbonaten; de versnelde afbraak van organisch materiaal; de effecten op de redoxchemie; en de mobilisatie van sporenelementen als arseen. Naast deze temperatuurseffecten kunnen in OBES systemen ook andere factoren een invloed hebben op de grondwaterkwaliteit zoals menging. Op basis van de analyses gedaan op het grondwater zijn de waargenomen veranderingen in grondwaterkwaliteit in de transitie van het conventionele lage temperaturen OBES naar een systeem met hogere injectietemperaturen beschreven en geduid.

4.3.1 Interpretatie veranderingen grondwaterkwaliteit

Verschillende factoren bemoeilijken de interpretatie van de invloed van het OBES systeem op de grondwaterkwaliteit, met name het ontbreken van achtergrondmonsters in de ondiepe en diepe watervoerende lagen vóór de OBES-installatie, het zeer dynamische karakter van het systeem, en de relatief geringe gerealiseerde temperatuurverhoging. Door het gebrek aan achtergrondmonsters is de initiële samenstelling in de ondiepe en diepe watervoerende laag niet met zekerheid vast te stellen. Daarnaast zijn maar beperkt monitoringsgegevens van

in de warme bubbel beschikbaar, aangezien Pb 3 pas eind 2019 is geïnstalleerd. Toch zijn er een aantal processen te onderscheiden die tot grondwaterkwaliteitsveranderingen in het systeem hebben geleid.

Effect van menging

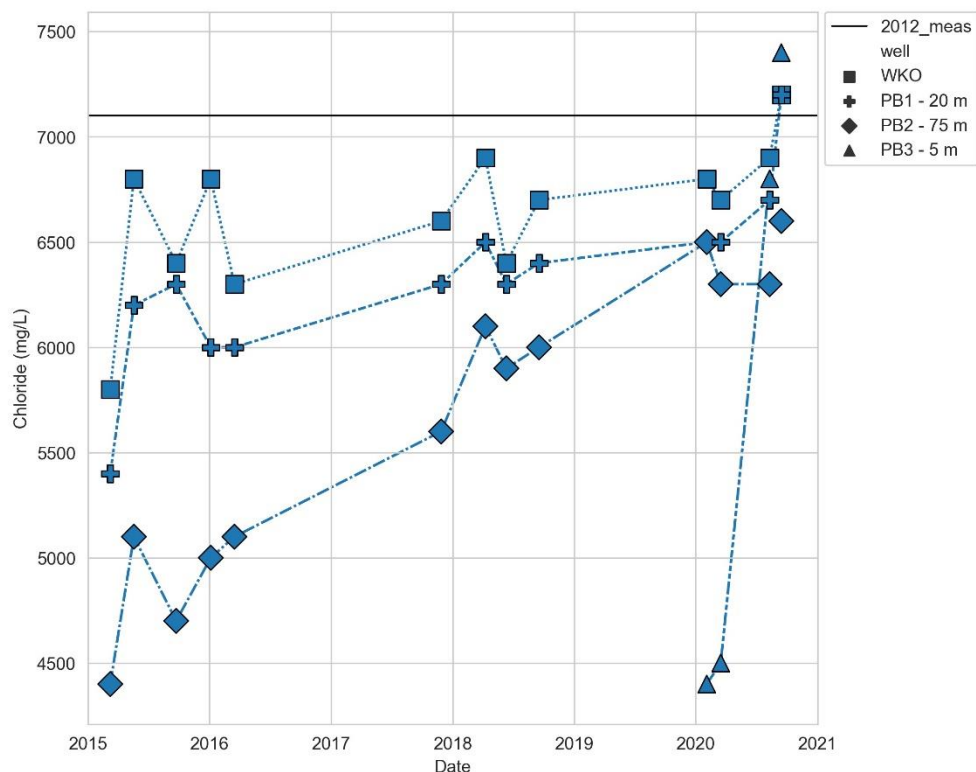
Het systeem onttrekt en injecteert water uit zowel het bovenste deel van wvp 2/3 tussen 55 en 75 m-mv (in de Formatie van Peize-Waalre, vanaf hier aangeduid als de *ondiepe wvp*) en in wvp 2/3 in de Formatie van Maassluis tussen 135 en 160 m-mv (het *diepe wvp*). Beide formaties bevatten zout grondwater, aangezien zowel het zoet/brak grensvlak (150 mg Cl/l) en het brak/zout grensvlak (1.000 mg Cl/l) ondieper gelegen zijn binnen wvp 1 (op respectievelijk -30 en -40m NAP, Hornstra et al., 2012). Bij eerdere metingen in 2012 werd een chlorideconcentratie in het effluent van de OBES (een mix van diep en ondiep grondwater) van 7.100 mg/L gemeten. De ondiepere formatie zal naar verwachting minder zout zijn dan de diepe en uit stromingsmetingen weten we dat 60% van het onttrokken water uit de diepe en 40% uit de ondiepe watervoerende laag komt.

Menging bleek dan ook het dominante mechanisme te zijn dat de veranderingen in de watersamenstelling in het systeem bepaalt. Figuur 4-10 toont de toename van de chlorideconcentraties in alle peilbuizen en het OBES water in de loop van de tijd. Deze toename is het gevolg van de vermenging van het diepere, meer zoute grondwater met het minder zoute, ondiepe grondwater. Het effect van menging is ook terug te zien in Pb2, welke eigenlijk bedoeld was als referentiebron. Het vermengde water is hier waarschijnlijk afkomstig van de koude bubbel, omdat er bij Koppert-Cress meer vraag is naar warm dan naar koud water blijft de warme bubbel relatief klein, terwijl de koude bubbel uitzet. De chlorideconcentraties in Pb 2 zijn van 2015 tot 2020 gestegen van 4.400 mg/L tot 6.600 mg/L (Figuur 4-10).

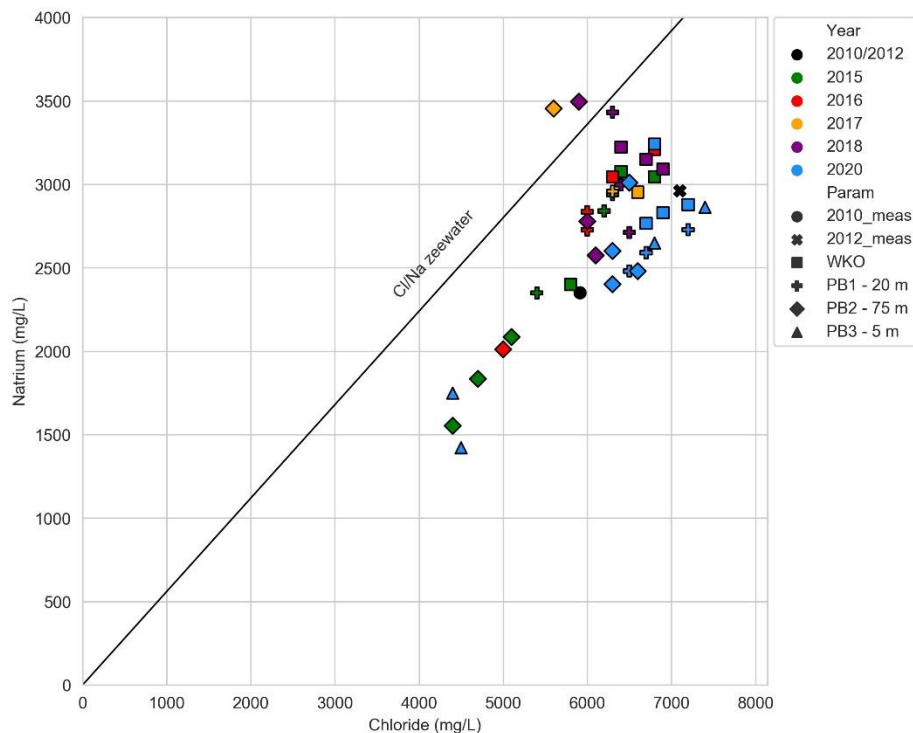
De sterke stijging van de chlorideconcentraties in Pb 3 is waarschijnlijk het gevolg van de toename van het water in de warme bel in de zomer van 2020. Dit toont ook de seizoensgebondenheid en het dynamische karakter van het systeem aan, waarbij de concentraties in de peilbuizen loop van enkele maanden sterk kunnen veranderen als gevolg van de variërende energievraag.

Het effect van vermenging is ook terug te zien in Figuur 4-11, waarin de gemeten chloride- en natriumconcentraties tegen elkaar zijn uitgezet. Uitgaande van een conservatieve menging en de eerste meting in de referentiebron Pb 2 vanaf 2015 als achtergrondconcentratie van natrium en chloride in de ondiepe watervoerende laag, zijn de concentraties natrium en chloride in de diepe watervoerende laag berekend. De natriumconcentratie ligt in de orde van 4.600 mg/L en de chlorideconcentratie 8.900 mg/L. De chlorideconcentratie neemt in de loop van de tijd toe in de richting van de diepe watervoerende laag, omdat een relatief groter deel (60%) van het grondwater hieruit wordt onttrokken. Naast natrium variëren de concentraties van sulfaat (Figuur 4-12), borium, kalium, lithium en magnesium ook met chloride. Deze zijn daarom ook puur te verklaren als gevolg van de vermenging van het verschillende grondwater uit de twee door de OBES voor opslag gebruikte aquifers.

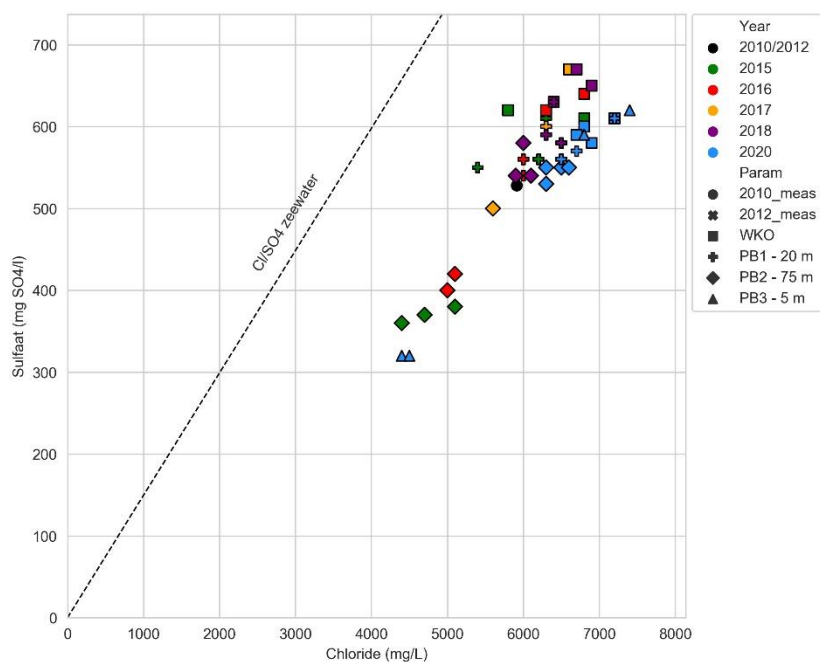
In de gegevens van 2015-2016 is al een aparte menglijn aanwezig, waarbij de chlorideconcentraties variëren van 4.400 - 6.800 mg/L en de natriumconcentraties van 1.500 - 3.400 mg/L. De menging werd verwacht, als gevolg van het bestaande OBES dat sinds 2012 bij Koppert-Cress in gebruik is.



Figuur 4-10 Concentratie van chloride in de loop van de tijd, waaruit de toenemende concentratie in alle bronnen blijkt. Vaste zwarte lijn geeft de eerder gemeten OBES effluentconcentratie vanaf 2012 aan.



Figuur 4-11 Chloride- en natriumconcentratie voor de peilbuizen (vormen) in de ondiepe watervoerende laag en het jaar van bemonstering (kleur). De vaste lijn geeft de chloride/natrium-verhouding in zeewater aan. De metingen in 2010 en 2012 worden gegeven als referentiewaarden van eerder gemeten OBES effluentmonsters (in zwart).

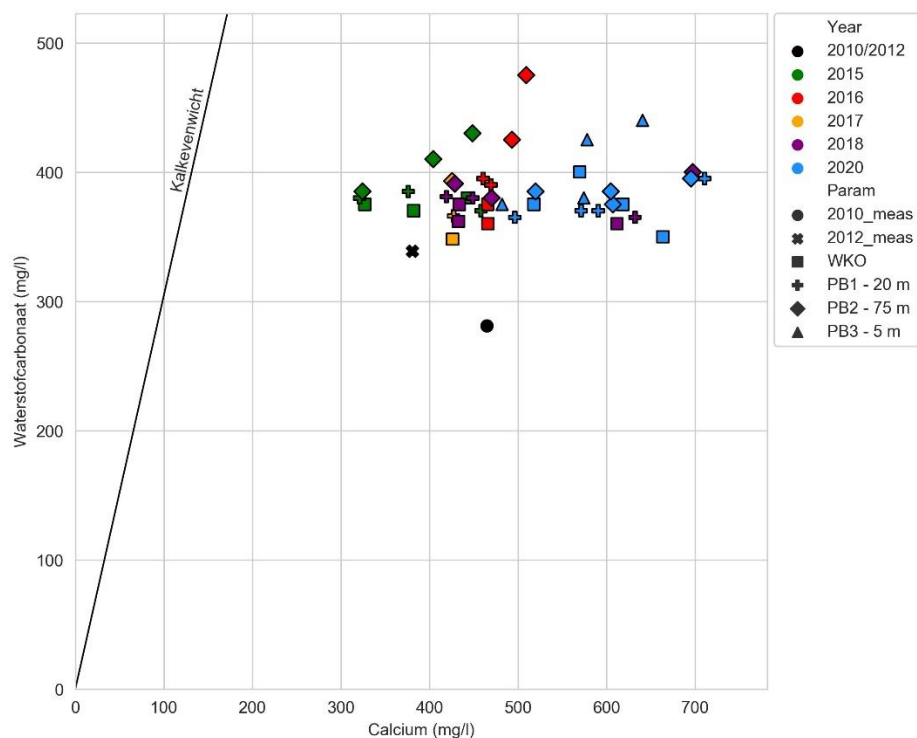


Figuur 4-12 Chloride tot sulfaatconcentratie, met de zeewaters evenwichtslijn. De sulfaatconcentratie neemt in de loop van de tijd in alle monsternemingslocaties toe met chloride. De metingen in 2010 en 2012 worden gegeven als referentiewaarden van eerder gemeten OBES effluentmonsters (in zwart).

Verzilting

Zoals te zien is in Figuur 4-11, ligt de vermenging van de twee watersamenstellingen uit de diepe en ondiepe watervoerende lagen onder de Cl/Na-lijn voor zeewater. Dit kan veroorzaakt worden door verzilting, omdat bij verplaatsing van zoet grondwater door zout grondwater het kation natrium, dat dominant is in het zeewater (op relatief korte afstand bij KC), uitwisselt met aan het sediment is geadsorbeerd calcium (dat dominant is in zoetwater), waardoor de natriumconcentratie ten opzichte van chloride afneemt (Appelo et al., 2005). Figuur 4-11 lijkt er op te duiden dat het grondwater in de twee watervoerende lagen al aan het verzilten was voordat vermenging optrad als gevolg van de OBES.

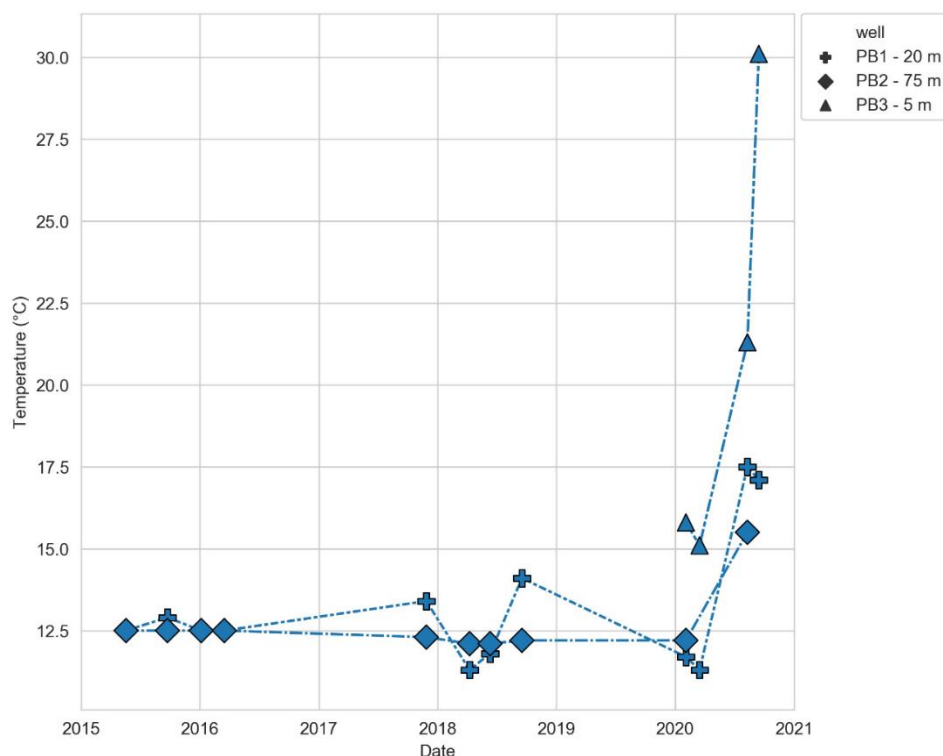
Daarnaast is in monsters vanaf 2020 een verdere afwijking te zien van de menglijn, met hogere chlorideconcentraties ten opzichte van natrium. De verschuiving in de Cl/Na-verhouding is dus indicatief voor een verdere verzilting van de ondiepe watervoerende laag door vermenging met de zoutere, diepere watervoerende laag. De in het grondwater opgeloste stoffen zijn nog altijd aan een chemisch evenwicht aan het instellen met de aan het sediment geadsorbeerde stoffen, waardoor natrium concentraties in het grondwater afnemen en calcium toeneemt. Verzilting van het ondiepe watervoerend pakket is dan ook duidelijk waargenomen in de verhouding tussen calcium en waterstofcarbonaat (Figuur 4-13), waarbij calcium toeneemt zonder dat de concentratie van waterstofcarbonaat navenant veranderd.



Figuur 4-13 Calcium- versus waterstofcarbonaatconcentratie, met de kalkevenwichtslijn (vaste lijn). De calciumconcentratie neemt toe als gevolg van verzilting, wat resulteert in een verschuiving in de Ca/HCO_3 -verhouding. De metingen in 2010 en 2012 worden gegeven als referentiewaarden van eerder gemeten OBES effluentmonsters.

Temperatuureffecten

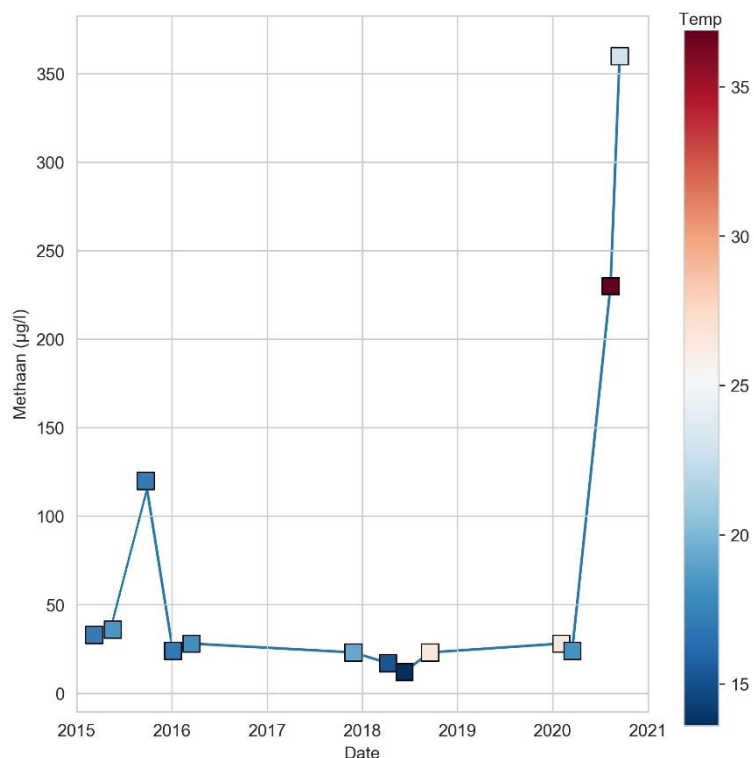
Naast veranderingen door het mengen van watersamenstellingen zouden ook de verhoogde temperaturen effect kunnen hebben op de geochemie, zoals bijvoorbeeld neerslag van kalk, veranderingen in redoxcondities, versnelde afbraak van organisch materiaal, en desorptie van sporenelementen uit het sediment. Bij Koppert-Cress domineerde mengingseffecten de veranderingen in de waterkwaliteit, waardoor het een uitdaging is om veranderingen als gevolg van temperatuur, indien aanwezig, te onderscheiden. In Pb 3 zijn pas vanaf augustus en september 2020 verhoogde temperaturen waargenomen (Figuur 4-14), waardoor er maar beperkt datapunten zijn waarin de effecten van hoge temperaturen mogelijk te onderscheiden zouden kunnen zijn.



Figuur 4-14 Temperatuurmetingen in bronnen in de loop van de tijd tonen de beperkte, hoge temperatuurmetingen die beschikbaar zijn.

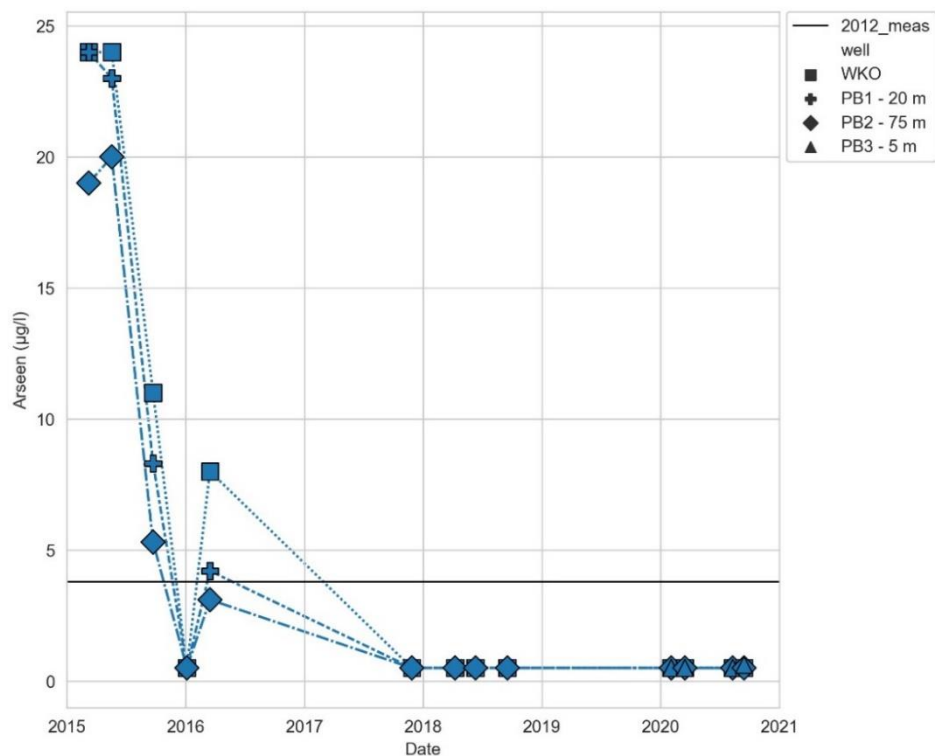
Bij hogere temperaturen kan bijvoorbeeld versterkte sulfaatreductie optreden (Bonte et al., 2013). Bij Koppert-Cress hebben we echter stijgende sulfaatconcentraties gemeten als gevolg van vermenging (Figuur 4-12) en geen correlatie met de temperatuur. Een vergelijkbare toename van de calciumconcentraties wordt ook verklaard door het mengen, en er lijkt dan ook geen sprake te zijn van kalkneerslag door temperatuur, wat theoretisch mogelijk is gezien de oplosbaarheid van carbonaat bij hogere temperaturen afneemt. Er is dan ook geen melding gemaakt van verstopping en er is geen bewijs voor kalkneerslag. Verder zijn er geen veranderingen in ijzer, DOC, fosfaat of ammonium in relatie tot de temperatuur gevonden; andere parameters waarbij op basis van de theorie mogelijke temperatuurseffecten te verwachten zijn.

Er zijn enige aanwijzingen voor een toename van methaan met temperatuur in de OBES-monster in augustus en september 2020, tot 360 $\mu\text{g/l}$ bij temperaturen van 36,9 en 22,9 °C (Figuur 4-15). Bonte et al. (2013) vonden een vergelijkbare kleine toename in methaanconcentraties in deze temperatuurrange. Echter, in deze experimenten waren de sulfaatconcentraties al sterk afgenomen. Bij de sulfaatconcentraties die in het OBES-monster werden gemeten (600 mg/L) treedt methanogenese normaal gesproken op. Daarom is het waarschijnlijker dat de kleine toename van de methaanconcentratie het gevolg is van natuurlijke variatie in de methaanconcentratie.

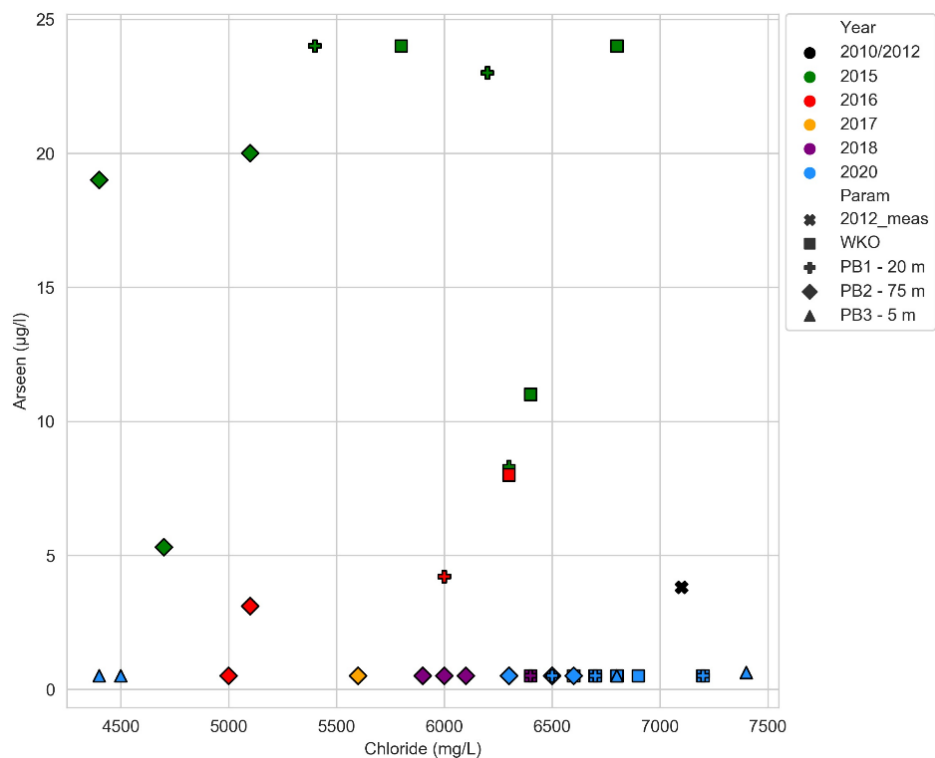


Figuur 4-15 Methaanconcentraties in het OBES-bemonsteringspunt in de loop van de tijd, gekleurd door de temperatuur.

In experimentele studies is ook een sterk effect van de temperatuur op de mobilisatie van arseen en andere sporenelementen waargenomen. Echter, bij Koppert-Cress zijn met name de concentraties van arseen (Figuur 4-16) maar ook andere sporenelementen (aluminium, chroom en kobalt) in de loop van de tijd juist sterk gedaald. In het geval van arseen daalden deze concentraties al in het begin van 2016 tot de detectielimiet. De daling is dus in ieder geval niet te relateren aan de verhoogde temperaturen, welke vanaf 2018 mochten worden toegepast. Arseen bleek echter ook niet te correleren met de chlorideconcentraties, en de daling in de concentratie lijkt dus ook niet een direct gevolg te zijn van vermenging. Ook is geen verband waargenomen tussen arseen en bijvoorbeeld de het Cl/Na ratio of de BEX-waarde, en de afname viel dus ook niet te correleren met verzilting van de watervoerende laag. Anders zou ook mineraalneerslag arseen uit oplossing kunnen verwijderen, bijvoorbeeld met ijzerhydroxiden en ijzersulfiden (Appelo, 2008). We zien echter geen bewijs voor ijzerneerslag en er werd geen correlatie gevonden tussen ijzer- en arseenconcentraties. Gezien het tijdsbestek waarin de concentratieafname plaatsvond lijkt de afname dus wel een indirect gevolg te zijn van de vermenging van verschillende watertypen, maar het precieze achterliggende proces wat de afname veroorzaakt blijft voornamelijk onduidelijk.



Figuur 4-16 Arseenconcentratie in de loop van de tijd. Na 2017 zijn alle metingen voor arseen minder dan het detectielimiet (0,5 µg/L). Een vaste zwarte lijn geeft de eerder gemeten OBES effluentconcentratie aan vanaf 2012.



Figuur 4-17 Voor de afnemende arseenconcentraties in de loop van de tijd werd geen verband tussen arseen en chloride gevonden, zodat vermenging als primaire oorzaak voor afnemende arseenconcentraties in de loop van de tijd uitgesloten is. Na 2017 zijn alle metingen voor arseen minder dan het detectie-limiet (0,5 µg/L). De metingen in 2010 en 2012 worden gegeven als referentiewaarden van eerder gemeten OBES effluentmonsters (in zwart).

4.3.1 Conclusie en aanbevelingen chemische effecten

De belangrijkste conclusie van de interpretatie van de waargenomen chemische grondwaterkwaliteitsverandering is dat de bij Koppert-Cress waargenomen veranderingen in de watersamenstelling worden gedomineerd door mengeffecten, waarbij water onttrokken wordt uit zowel een diepe, zoutere laag als een ondiepe, zoetere laag. Deze twee watertypen worden door het OBES vermengd/geherinfiltreerd over de beide formaties. In de ondiepe watervoerende laag leidt dit aantoonbaar tot sterke verzilting (chlorideconcentraties van 4.400 mg/L naar 7.400 mg/L), en in de diepe waarschijnlijk tot verzoeting, maar het ontbreekt ons aan gegevens in de diepe watervoerende laag om dit te bevestigen. Naast de chloride concentraties zijn ook veranderingen in de concentratie van calcium, natrium, waterstofcarbonaat en sulfaat allemaal te schrijven aan deze menging. Ook de referentiebron, Pb 2, lijkt te worden beïnvloed door de steeds groter wordende koude bel en kan daarom niet langer worden beschouwd als een betrouwbare referentie voor de ondiepe grondwatersamenstelling. Gezien de waargenomen lage temperatuurveranderingen is dit in overeenstemming met eerder onderzoek dat heeft aangetoond dat veranderingen in de watersamenstelling van lage temperatuur OBES systemen in Nederland voor een groot deel het gevolg zijn van veranderingen door vermenging (Dinkla et al., 2012).

Met name arseen, maar ook andere spoormetalen (aluminium, kobalt, chroom) zijn in de loop van de tijd in concentratie afgenomen, wat niet direct kan worden toegeschreven aan mengeffecten maar mogelijk het gevolg is proces dat optreedt als indirect gevolg van de vermenging. Zoals gezegd waren mogelijke temperaturen effecten minimaal en niet met zekerheid te onderscheiden van de mengeffecten. Mogelijk is een kleine toename in methaanconcentraties waargenomen welke gerelateerd is aan de temperatuur. Omdat de verhoogde temperaturen eigenlijk pas vanaf de zomer van 2020 zijn toegepast, is extra lange termijn monitoring nodig om of er temperatureffecten zullen optreden bij Koppert-Cress.

In kustgebieden, zoals Monster waar Koppert-Cress zich bevindt, is beperkt zoet grondwater beschikbaar en kan verzilting van het grondwater een potentieel risico vormen. Het risico bestaat dat zout grondwater van wvp 2/3 naar de zoetere wvp 1 lekt. Hoewel drinkwaterproductie in dit gebied onwaarschijnlijk is, kunnen andere grondwatergebruikers, zoals bijvoorbeeld de glastuinbouw, wel negatief worden beïnvloed door een verhoogde verzilting van de ondiepe watervoerende lagen (Raaijmakers et al., 2012).

4.4 Microbiologische effecten hogere temperatuur

4.4.1 Microbiologische risico's bij hogere temperatuur

Een mogelijk risico van OBES met hogere temperatuur is dat door opwarming van het water ongewenste, ziekteverwekkende micro-organismen in het water en/of de biofilm van het systeem kunnen gaan groeien. Ook kan de microbiële populatie in de ondergrond als gevolg van de hogere temperatuur veranderen, en dit kan mogelijk resulteren in de groei van voor de mens ziekteverwekkende micro-organismen. Blootstelling aan dit water, b.v. bij opening van de OBES-installatie voor werkzaamheden waarbij water vrijkomt, kan dan leiden tot een mogelijk risico voor de volksgezondheid. Van de mogelijke microbiologische risico's is eerder een uitgebreide risicoanalyse uitgevoerd, deze is hieronder kort beschreven (Kuiper, 2010).

In deze studie is de aanwezigheid en mogelijke groei van enteropathogenen en opportunistische pathogenen gemeten (zie paragraaf 4.4.1.1 voor uitleg). Een verhoogde grondwatertemperatuur zal ook de samenstelling van de microbiële populatie veranderen omdat micro-organismen onder verschillende omstandigheden, waaronder temperatuur, groeien (Bonte et al. 2013, Lienen et al. 2017). Het is niet bekend en ook niet de verwachting dat een verandering in de algehele microbiële populatie, een risico zal opleveren voor de volksgezondheid. Wel is het mogelijk dat pathogene micro-organismen door de veranderende condities in aantallen kunnen toenemen, en daarmee kunnen zorgen voor een toename van het risico besmet te raken met deze ziekteverwekkers. Daarom zijn

in deze studie pathogenen gemeten die zijn geselecteerd op basis van mogelijke groeipotentie in een OBES met hogere opslagtemperatuur.

4.4.1.1 Risicoanalyse en selectie micro-organismen voor meetprogramma

Er zijn twee groepen micro-organismen die mogelijk een volksgezondheidsrisico zouden kunnen gaan vormen:

- ziekteverwekkers van fecale herkomst (enteropathogenen) die via de fecaal-orale routen leiden tot darminfecties.
- opportunistische pathogenen, deze micro-organismen kunnen mensen infecteren, maar zijn vooral gevaarlijk voor mensen met een verzwakt afweersysteem. De belangrijkste blootstellingsroute is via verneveling, inhalatie of direct contact met de huid.

Voor de risicoanalyse zijn de volgende vier criteria gebruikt (Hornstra et al., 2012) :

- 1 Kan er introductie van de micro-organismen in het systeem optreden?
- 2 Kunnen de micro-organismen zich vermeerderen onder de condities van het OBES?
- 3 Kunnen de micro-organismen overleven in het OBES?
- 4 Is er sprake van blootstelling aan het water uit het OBES dat kan leiden tot infecties?

Enteropathogenen

De enteropathogenen, waaronder bijvoorbeeld *E. coli* bacteriën, worden in het milieu verspreid via fecaal materiaal van mensen en dieren. Introductie van enteropathogenen in het OBES is mogelijk tijdens onderhoud, vanuit oppervlaktewater met fecaliën van de natuurlijke fauna, of lekkage vanuit riolering in de nabije omgeving. De kans op een dergelijke besmetting lijkt erg klein. Enteropathogenen kunnen zich niet vermeerderen in grondwater en de meeste soorten micro-organismen van deze groep zullen bij hogere temperaturen snel afsterven. Ook is de blootstelling beperkt en kan dit nagenoeg alleen plaatsvinden tijdens het spuien van de bronnen, al is de kans op directe consumptie van dit spuiwater verwaarloosbaar klein. Om deze reden worden de enteropathogenen als minder relevant beschouwd. Om dit te verifiëren worden twee soorten enteropathogenen wel gemeten (Tabel 4-1):

- bacteriën van de coligroep
- sporen van sulfiet reducerende *clostridia* (SSRC).

In tegenstelling tot de bacteriën van de coligroep, kan de laatste groep goed overleven in warm water.

Opportunistische pathogenen

De hier geselecteerde opportunistische pathogenen zijn micro-organismen die kunnen groeien bij hogere watertemperaturen (15 – 40°C) mits de overige omstandigheden gunstig zijn. Een risicoanalyse is uitgevoerd voor opportunistische pathogenen waarvan is aangetoond dat deze zich in zoet (drinkwater) en/of brak water (heersende condities in het 2^e watervoerend pakket bij Koppert-Cress) kunnen vermeerderen (Hornstra et al., 2012, Wielen en Kooij, 2009). Op basis hiervan, en de bovenstaande criteria, is besloten om de volgende opportunistische pathogenen te meten in het OBES van Koppert-Cress (Tabel 4-1):

Legionella (pneumophila).

Er zijn veel verschillende soorten Legionellabacteriën, waarvan de *Legionella pneumophila* bacterie de veteranenziekte (levensbedreigende longontsteking) en andere griepachtige aandoeningen kan veroorzaken. Vermeerdering van *Legionella* vindt plaats in warme waterrijke milieus, b.v. in leidingen van warmtapwaterinstallatie, maar ook in de bodem (Heijnsbergen et al., 2014). De verwachting is dat *Legionella* niet in de heersende condities van het grondwater kan groeien, maar mogelijk wel in de leidingen van het OBES. Gezien enkele ernstige uitbraken in het verleden (niet OBES-gerelateerd) en de daardoor grote publieke belangstelling, is *Legionella* opgenomen in het meetprogramma.

Non-tuberculeuze mycobacteriën (NTM)

De non-tuberculeuze mycobacteriën veroorzaken voornamelijk longontstekingen, maar kunnen ook ontstekingen aan de huid en van lymfeknopen veroorzaken. NTM zijn aanwezig in de bodem en kunnen daarom geïntroduceerd worden in het OBES (Young et al., 2005). Daarnaast kunnen ze groeien in drinkwater en drinkwatergerelateerde biofilms, waarbij een duidelijke positieve relatie aanwezig is met de temperatuur (Wielen, 2020). De verwachting is dat NTM niet in de heersende condities van het grondwater kan groeien, maar mogelijk wel in het OBES.

Stenotrophomonas maltophilia

Deze bacterie kan meerdere ziekte veroorzaken, waaronder hartklepontsteking, bloedvergiftiging en longontsteking. *S. maltophilia* komt voor in de bodem en kan groeien in drinkwatergerelateerde biofilms waarbij er een positieve relatie met temperatuur is (Bollet et al., 1995, Wielen, 2020). Mogelijk kan deze bacteriesoort dus groeien in het OBES.

Vibrio spp.

Bacteriesoorten behorend tot deze groep kunnen onder andere bloedvergiftiging veroorzaken en ernstige huidinfecties en gastro-enteritis. Dit is de enige bacteriën in het meetprogramma waarvan bekend is dat het in grote aantallen voorkomt in zout en brak water en kan overleven in zoet water (Youngren-Grimes et al., 1988, Motes et al., 1998). Daarnaast lijkt de bacterie zich te kunnen vermeerderen bij verschillende milieucondities. Het lijkt daarom niet onwaarschijnlijk dat *Vibrio* bacteriën zich in een OBES kunnen handhaven en mogelijk vermeerderen.

Acanthamoeba

Deze protozo kan een hoornvliesontsteking en chronische hersenontsteking veroorzaken. Ze komen van nature voor in de bodem en het is aannemelijk dat ze kunnen groeien in (drink)water (Avery et al. 1995).

ATP

ATP is aanwezig in alle bacteriesoorten en daarmee een maat voor de hoeveelheid actieve biomassa in het water. Een verhoogde microbiologische activiteit in de bodem kan worden gebruikt als signaalfunctie en is daarom opgenomen in het meetprogramma.

Tabel 4-1. Geanalyseerde microbiologische parameters van het grondwater bij de MTO-installatie

Microbiologische parameters
ATP
<i>Vibrio spp.</i>
<i>Escherichia coli</i>
Bacteriën van de coligroep
SSRC (sporen van sulfiet reducerende <i>clostridia</i>)
<i>Legionella pneumophila</i>
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>
<i>Acanthamoeba spp.</i>
Nontuberculeuse Mycobacteriën

4.4.1.2 Condities in de bodem

De grondwatertemperatuur en de chemische samenstelling van het grondwater bepalen of een micro-organisme kan overleven en zich kan vermenigvuldigen in de grond of het OBES. Uit waterkwaliteitsanalyses in juni 2012 blijkt dat er bij Koppert-Cress sprake is van een anaeroob systeem zonder denitrificatie (Lieten et al., 2010). Het

grondwater van het tweede watervoerende pakket is brak. De heersende condities bepalen de overleving van micro-organismen en de vermenigvuldiging van de opportunistische pathogenen.

Een aantal van de hierboven beschreven opportunistische pathogenen zijn strikt aëroob en kunnen zich alleen vermeerderen in aanwezigheid van zuurstof (*Legionella pneumophila*, NTM). Sommige opportunistische pathogenen kunnen ook bij lage zuurstofconcentraties of in een zuurstofloos milieu overleven (*Pseudomonas*, *Aspergillus Stenotrophomonas*, *Acanthamoeba*, *Vibrio*), maar hebben dan vaak wel nitraat nodig voor vermeerdering (*Pseudomonas*, *Stenotrophomonas*). Ook speelt de samenstelling en concentratie van het beschikbare, organisch materiaal in de bodem een rol (Lieten et al, 2012, Hornstra et al., 2012). In het grondwater is naar verwachting nauwelijks tot geen zuurstof en nitraat aanwezig. In de leidingen van het OBES kunnen de omstandigheden veranderen bij langdurige stilstand van het water, zo kan er bijvoorbeeld mogelijk zuurstof in de leidingen diffunderen. In de praktijk zal dit echter niet of nauwelijks voorkomen door het intensieve gebruik en dynamische karakter van een OBES systeem in het algemeen en bij Koppert-Cress in het bijzonder. In het algemeen is er meer microbiële groei bij hogere temperaturen, maar hier zit een maximum aan. De minimale, optimale en maximale groeitemperatuur verschilt per micro-organisme.

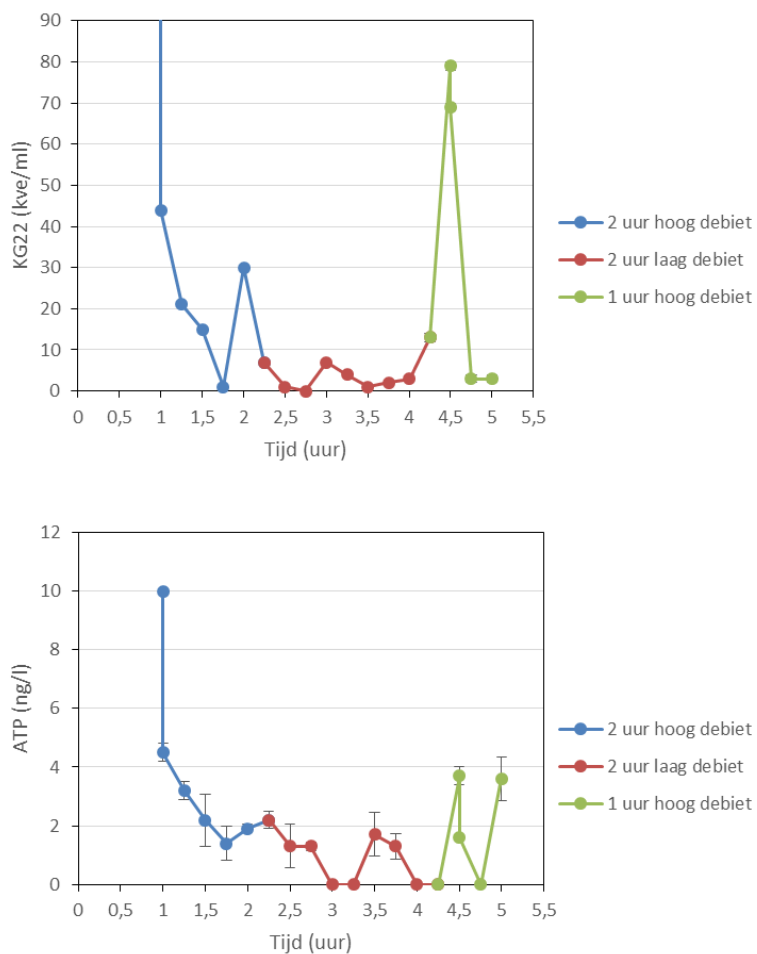
Van *Vibrio* spp. is bekend dat deze goed in zout en brak water kan groeien, van de andere micro-organismen is dit niet bekend of deze kunnen zich (voor zover bekend) alleen in zoet water vermenigvuldigen.

4.4.2 Resultaten monitoring

Test monsternameprotocol

Gedurende de meetperiode (2015 – 2020) zijn verschillende monsternameprotocollen gebruikt om het grondwater in de peilbuizen te bemonsteren (paragraaf 0). In eerste instantie is de NEN-norm hiervoor gevolgd, maar uit ander onderzoek waarin bronnen voor drinkwaterproductie zijn bemonsterd bleek dat een andere bemonsteringsmethode mogelijk beter en betrouwbaarder resultaat geeft. Bij de start van het TKI-project in 2017 is deze nieuwe methode getest en uiteindelijk gebruikt bij alle daarop volgende monsternames. Hieronder is beschreven waarop deze keuze is gebaseerd.

Bij de eerste meting zijn de ATP- en KG22-gehalten erg hoog na het eerste uur voorspoelen op hoog debiet (Figuur 4-18). Gedurende het tweede uur voorspoelen op hoog debiet zijn de ATP- en KG22-gehalten lager dan de eerste meting, maar deze zijn nog wel hoger dan tijdens de twee uur spoelen op laag debiet. Tijdens het naspoelen op hoog debiet stijgen de ATP- en KG22-aantallen weer. Dit doet vermoeden dat tijdens het voorspoelen met hoog debiet de biofilm op de wand van de peilbuis, met daarin micro-organismen, wordt losgemaakt en wordt bemonsterd tijdens de monstername bovenin de peilbuis. Een andere mogelijkheid is dat de biofilm rondom het filter en op de zand- en grindkorrels in de bodem loskomt. Hierin kan geen onderscheid worden gemaakt met deze metingen. Echter, in beide gevallen wordt met het water ook de losgekomen biofilm gemeten, en niet alleen het water. Tijdens het spoelen op laag debiet, en monstername op 62m –mv, is het ATP- en KG22-gehalte lager en stabiel. Bij het lage debiet lijkt de invloed van losgeraakte biofilm op het resultaat dus beperkt.



Figuur 4-18. Koloniegetal bij 22°C en ATP-gehalte in peilbuis 1 gedurende de uitgebreide monsternametechniek. In paragraaf 0 is beschreven hoe de monsternametechniek is uitgevoerd.

De andere microbiologische parameters zijn tweemaal gemeten tijdens het spoelen (Tabel 4-2). De verschillen die wel zichtbaar waren bij de ATP- en KG22-analyse, zijn niet zichtbaar voor de andere parameters waarvan de concentratie voor nagenoeg allemaal onder de detectielimiet ligt.

Op basis van de hoge getallen bij de ATP meting en de KG22 bepaling, en het hieruit voorkomende vermoeden dat bij monsternametechniek bovenin de peilbuis de meting (te sterk) beïnvloedt wordt door de biofilm op de wand van de peilbuis, is besloten om de monsternametechniek aan te passen en te bemonsteren bij laag debiet ter hoogte van het filter in het 2^e watervoerende pakket (62m –mv). Op deze wijze wordt beïnvloeding van het monster door de biofilm op de wand uitgesloten.

Tabel 4-2. Microbiologische resultaten van de technische ruimte (TR), peilbuizen 1 en 2 op 27 november 2017. * Rendement van qPCR analyse te laag, geen betrouwbaar resultaat; + Aangetoond, rendement qPCR-analyse te laag voor betrouwbare kwantificering; gk/l: genkopieën/liter.

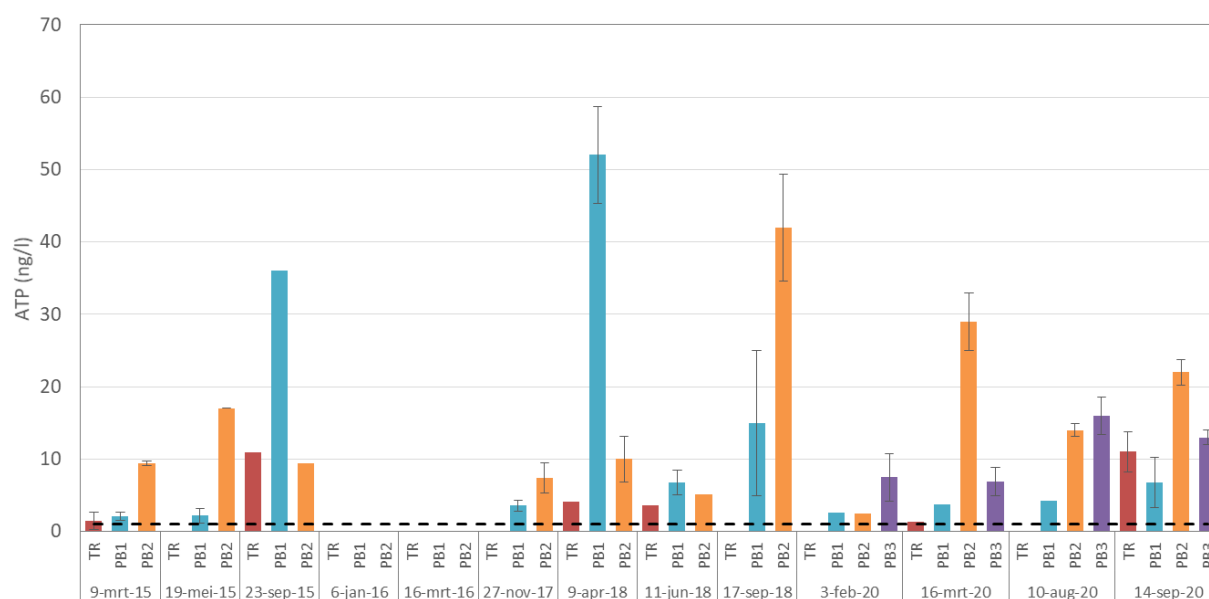
		TR	PB1, 1 uur	PB1, 5 uur	PB2
KG22	kve/ml	2	830	3	10
ATP	ng/l	<1	10±0	3,6±0,7	7,4±2,1
Bacteriën van de Coligroep	kve/l	<10	<10	<10	<10
<i>E. coli</i>	kve/l	<10	<10	<10	<10
<i>Legionella</i>	kve/l	<100	<100	<100	<100
SSRC	kve/l	<10	30	<10	10
<i>S. maltophilia</i>	gk/l	*	+	*	*
<i>Acanthamoeba</i>	gk/l	*	*	*	*
NTM	gk/l	+	+	+	+
<i>Vibrio spp.</i>	MPN/l	<2.1	<2.1	<2.1	<2.1

ATP

In de hele meetperiode (2015 – 2020) zijn ATP-analyses uitgevoerd op het bemonsterde grondwater. Het ATP-gehalte varieert sterk in de tijd (Figuur 4-19, Bijlage 0) voor alle meetpunten. Dit lijkt niet gerelateerd te zijn aan de aanpassing in het monsternameprotocol na 27 november 2017, aangezien zowel voor al na die datum veel variatie zichtbaar is.

Alleen het gemiddelde ATP-gehalte van de technische ruimte en peilbuis 2 zijn in de periode 2015 – 2020 significant verschillend van elkaar. Verder zijn er geen significante verschillen in het ATP-gehalte tussen de peilbuizen en de technische ruimte.

De verhoogde grondwatertemperatuur nabij peilbuis 3 zorgt dus niet voor een significante toename in de algehele biomassa. Voor peilbuis 3, de enige peilbuis waar de grondwatertemperatuur varieert met het seizoen, zijn in de winter en zomer van 2020 slechts twee metingen uitgevoerd waardoor een statistische analyse van de verschillen tussen de winter en zomer niet mogelijk is. Uit de grafiek blijkt echter wel dat de ATP-concentraties hoger zijn in de zomer dan in de winter, vermoedelijk neemt de biomassa dus toe in de zomer onder invloed van de hogere grondwatertemperatuur.



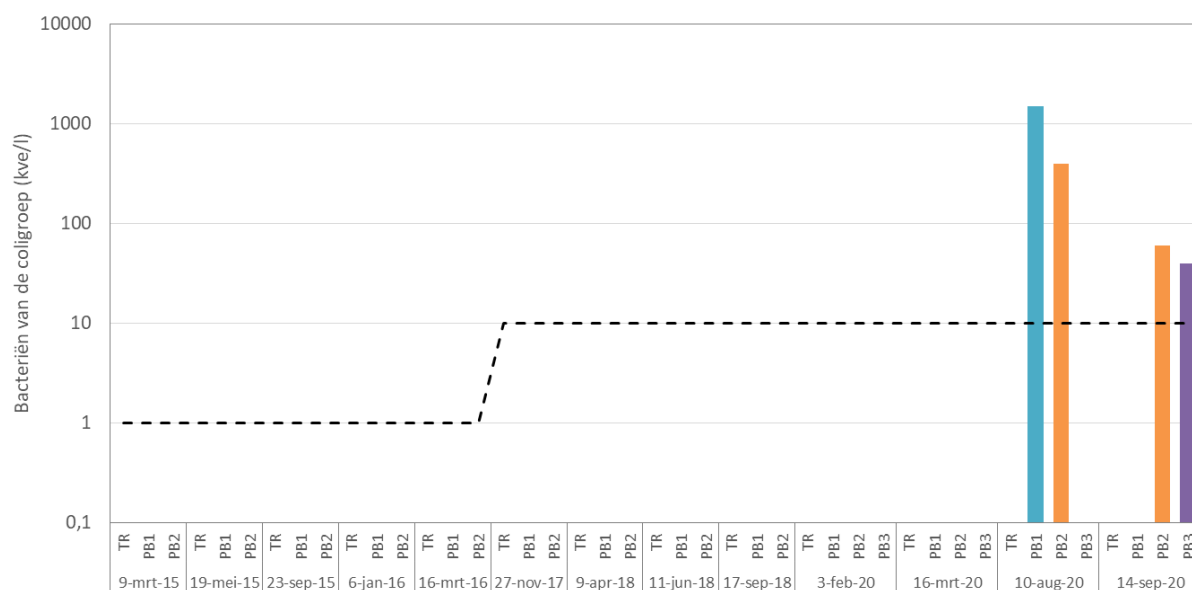
Figuur 4-19. ATP-gehalten in het OBES bij Koppert-Cress. TR: technische ruimte, peilbuis 1 en 2: onverwarmd grondwater, peilbuis 3: warme bel. Stippellijn: detectiegrens. De absolute waarden zijn opgenomen in Bijlage 0

Bacteriën van de coligroep en *E. coli*

Slechts in vier monsters, in peilbuis 1, 2 en 3 zijn in augustus en september 2020 bacteriën van de coligroep aangetroffen in het grondwater (Figuur 4-20, Bijlage Bijlage VII).). Deze bacteriën zijn een indicatie van een fecale besmetting van het grondwater. De bacteriën van de coligroep zijn in alle drie de peilbuizen aangetroffen, met grondwater met een normale en verhoogde temperatuur. Omdat slechts enkele monsters positief zijn, waaronder één monster van peilbuis 3 met verhoogde grondwatertemperatuur, kan niet geconcludeerd worden of er een relatie is tussen de bacteriën van de coligroep en de grondwatertemperatuur. Het is wel positief dat de bacteriën van de coligroep niet zijn aangetroffen in de technische ruimte.

Er zijn nergens *E. coli* bacteriën, een subgroep van de bacteriën van de coligroep, aangetroffen.

Er zijn nergens *E. coli* bacteriën, een subgroep van de bacteriën van de coligroep, aangetroffen.



Figuur 4-20. Aantallen bacteriën van de coligroep in het OBES bij Koppert-Cress. TR: technische ruimte, peilbuis 1 en 2: onverwarmd grondwater, peilbuis 3: warme bel. Stippellijn: detectiegrens. De absolute waarden zijn opgenomen in 0.

Legionella spp.

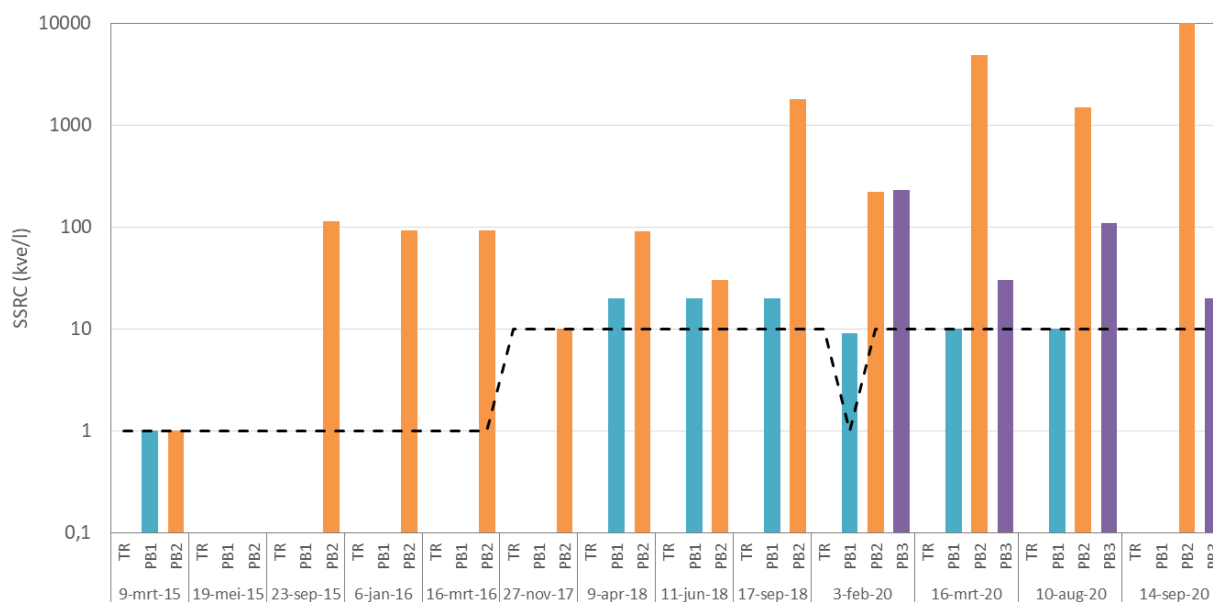
In geen van de watermonsters zijn *Legionella*-bacteriën aangetroffen (< 20 - < 250 MPN/l; Bijlage 0). Zoals beschreven in paragraaf 4.4.1.1 is uit de literatuur bekend dat *Legionella*-bacteriën niet kunnen overleven in het grondwater, maar mogelijk wel in de leidingen van het OBES. De afwezigheid van *Legionella*-bacteriën geeft aan dat ze niet, of slechts in zeer beperkte mate (met aantallen onder de detectiegrens), in staat zijn te groeien in de leidingen van het OBES tussen de warme en koude bel.

SSRC

Sporen van *Clostridium* bacteriën (SSRC) zijn regelmatig aangetroffen in het grondwater, met name bij peilbuis 2 (Figuur 4-21, 0). De *Clostridium* sporen zijn ook aangetroffen in peilbuis 1 en 3, maar niet in de technische ruimte. Dit is een indicatie van een fecale besmetting van het grondwater.

Statistische analyse van de log-getransformeerde getallen laat zien dat de aantallen SSRC in de periode 2015 – 2020 in peilbuis 2 en 3 significant verschillen ($p < 0,05$) van de technische ruimte en peilbuis 1. De SSRC-aantallen van 2020 zijn niet significant verschillend tussen de technische ruimte en de drie peilbuizen.

Het aantreffen van *Clostridium* sporen in alle drie de peilbuizen, en vooral in peilbuis 2 waar geen verhoging van de grondwatertemperatuur is gemeten, laat zien dat er geen verband zichtbaar met de grondwatertemperatuur.



Figuur 4-21. Aantallen SSRC in het OBES bij Koppert-Cress. OBES: technische ruimte, peilbuis 1 en 2: onverwarmd grondwater, peilbuis 3: warme bel. Stippellijn: detectiegrens. De absolute waarden zijn opgenomen in Bijlage 0.

Acanthamoeba

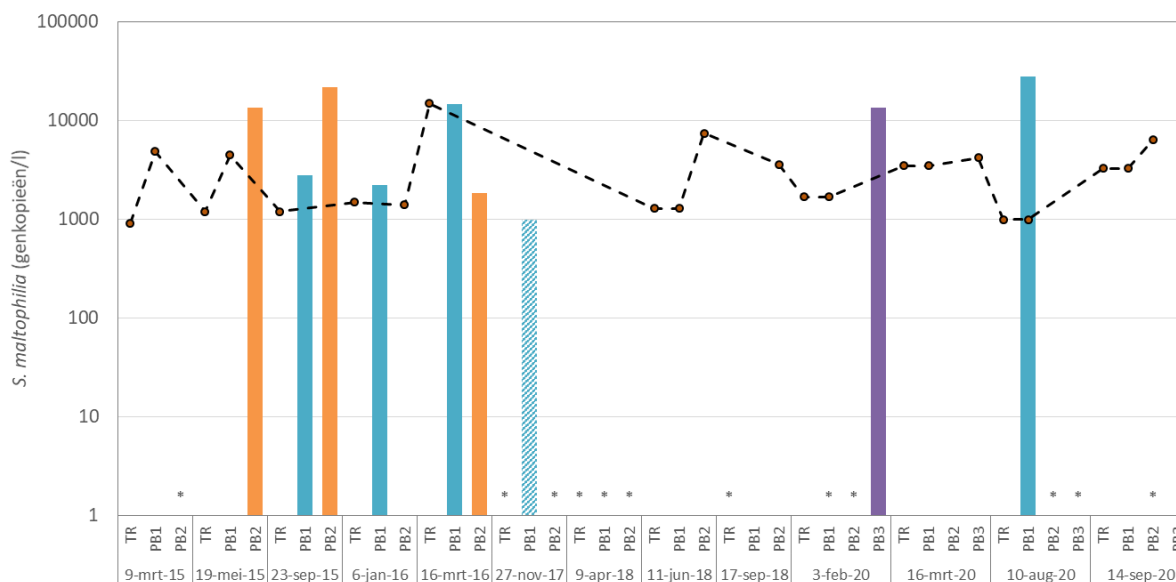
Acanthamoeba zijn sporadisch aangetroffen in het grondwater bemonsterd via de peilbuizen en in het water van de technische ruimte (Tabel 4-3, Bijlage 0). Het sporadische aantreffen van Acanthamoeba gecombineerd met dat ze niet duidelijk vaker voorkomen in één van de peilbuizen dan in een andere peilbuis, geeft aan dat Acanthamoeba zich hoogst waarschijnlijk niet kan vermeerderen in het grondwater. Daarnaast is er geen relatie met de grondwatertemperatuur.

Tabel 4-3. Aanwezigheid van Acanthamoeba in het OBES bij Koppert-Cress. TR: technische ruimte, peilbuis 1 en 2: onverwarmd grondwater, peilbuis 3: warme bel. * Rendement te laag, geen betrouwbaar resultaat. # Analyse niet uitgevoerd, geen resultaat beschikbaar.

	TR	PB1	PB2	PB3
9-mrt-15	Niet aangetoond	Niet aangetoond	*	#
19-mei-15	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Aangetoond	#
23-sep-15	Aangetoond	Niet aangetoond	Aangetoond	#
6-jan-16	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Aangetoond	#
16-mrt-16	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Niet aangetoond	#
27-nov-17	*	*	*	#
9-apr-18	*	*	*	#
11-jun-18	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Niet aangetoond	#
17-sep-18	*	*	Niet aangetoond	#
3-feb-20	Aangetoond	Aangetoond	*	Niet aangetoond
16-mrt-20	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Niet aangetoond
10-aug-20	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Niet aangetoond	*
14-sep-20	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Niet aangetoond	Niet aangetoond

Stenotrophomonas maltophilia

S. maltophilia bacteriën zijn slechts enkele malen aangetroffen (Figuur 4-22, Bijlage 0). De bacteriën zijn wel gedetecteerd in de peilbuizen maar niet in de technische ruimte. Ze zijn echter niet vaker aangetroffen in grondwater uit de warme bel (peilbuis 3) dan in de andere twee peilbuizen. Het aantal watermonsters waarin *S. maltophilia* is aangetroffen is te laag om mogelijke verschillen tussen de peilbuizen en technische ruimte statistisch te kunnen testen.



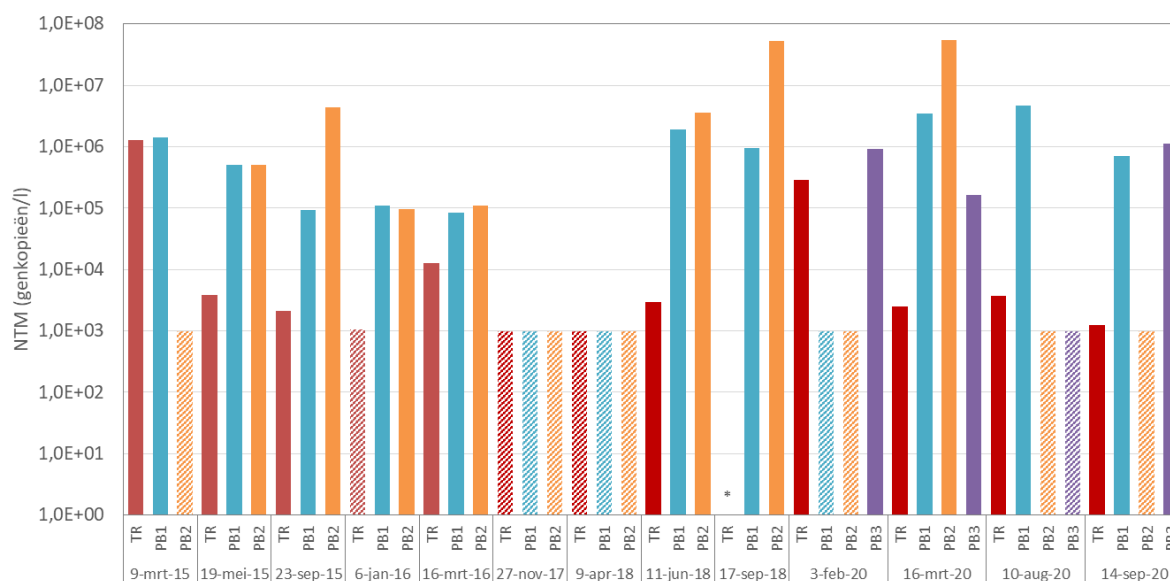
Figuur 4-22. Aantallen genkopieën van *S. maltophilia* bacteriën in het OBES bij Koppert-Cress. TR: technische ruimte, peilbuis 1 en 2: onverwarmd grondwater, peilbuis 3: warme bel. Gearceerd: *S. maltophilia* genen aangetoond, maar rendement is te laag voor betrouwbare kwantificering. * Rendement te laag, geen betrouwbaar resultaat. Zwarte stippellijn: detectielimiet. De absolute waarden zijn opgenomen in Bijlage 0

Non-tuberculoze mycobacteria (NTM)

Non-tuberculeuze mycobacteriën zijn in bijna alle watermonsters aangetroffen, zowel de watermonsters uit de technische ruimte als die uit de drie peilbuizen (Figuur 4-23, Bijlage 0).

In de periode 2015 – 2020 is de concentratie NTM in de technische ruimte en peilbuis 1 significant lager ($p < 0,05$) dan in peilbuis 2. In 2020 is de concentratie NTM in peilbuis 2 en 3 significant hoger dan in de technische ruimte en peilbuis 1. Peilbuis 2 en 3 verschillen echter niet significant van elkaar. Dit laat zien dat de NTM concentratie in het OBES niet gerelateerd is aan de grondwatertemperatuur.

Met de gebruikte qPCR methode worden alle verschillende NTM stammen gedetecteerd, zowel potentieel gevaarlijke als niet-gevaarlijke stammen. In drinkwater worden nagenoeg altijd NTM bacteriën aangetroffen met deze methode, hierbij gaat het om niet-gevaarlijke stammen en de concentratie in het grondwater is vergelijkbaar met de concentraties in drinkwater. Met de in dit onderzoek gebruikte methode kan geen onderscheid gemaakt worden tussen gevaarlijke en niet-gevaarlijke stammen, hiervoor zijn aanvullende analyses nodig.



Figuur 4-23. Aantallen genkopieën van non-tuberculeuze mycobacteriën bacteriën in het OBES bij Koppert-Cress. TR: technische ruimte, peilbuis 1 en 2: onverwarmd grondwater, peilbuis 3: warme bel. Gearceerd: NTM genen aangetoond, maar rendement is te laag voor betrouwbare kwantificering. * Rendement te laag, geen betrouwbaar resultaat. De absolute waarden zijn opgenomen in Bijlage 0.

Vibrio spp.

In geen van de watermonsters zijn *Vibrio*-bacteriën aangetroffen (< 2,1 of < 10 MPN/l, Bijlage 0). *Vibrio* bacteriën zijn dus niet, of in zeer lage aantallen onder de detectiegrens, aanwezig in het grondwater en groeien niet of slechts in zeer beperkte mate (met aantallen onder de detectiegrens) bij de huidige grondwatertemperaturen.

4.4.3 Discussie microbiologische effecten

Effect verwarming grondwater op microbiologie

Gedurende de meetperiode bij Koppert-Cress (2015–2020) is alleen in het laatste jaar via peilbuis 3 grondwater uit de warme bel bemonsterd. Het grondwater bij peilbuis 1 en 2 had nagenoeg de hele periode dezelfde temperatuur (11-15°C). De plaatsing van peilbuizen 1 en 2 bleek te ver weg van de warme bel te zijn, waardoor het warme water de peilbuizen niet bereikte. De in september 2019 geplaatste peilbuis 3 is één jaar gebruikt om het warme grondwater op 5 meter van de warme bron te bemonsteren. Ondanks dat peilbuis 3 alleen in 2020 is bemonsterd, staat het grondwater op die locatie wel al langere tijd onder invloed van het OBES-systeem. Door de injectie van warm water is de grondwatertemperatuur sinds 2015 al boven de 20°C wat de microbiologie in de bodem en de leidingen van het OBES-systeem heeft kunnen beïnvloeden. Het is daarom waarschijnlijk dat eventuele traag optredende effecten gedetecteerd worden. Doordat peilbuis 3 alleen in 2020 is bemonsterd zijn slechts twee monsters in de zomerperiode, met warm grondwater, geanalyseerd. De gevonden bevindingen zijn dus gebaseerd op een zeer beperkt aantal metingen.

Tabel 4-4, Temperaturen in de monitorings peilbuizen, tijdens monstername

	Pb 3 5m	Pb 1 20m	Pb 2 75m
9-mrt-15	x	x	x
19-mei-15	x	12.5	12.5
23-sep-15	x	12.9	12.5
6-jan-16	x	12.5	12.5
16-mrt-16	x	12.5	12.5
27-nov-17	x	13.4	12.3
9-apr-18	x	11.3	12.1
11-jun-18	x	11.8	12.1
17-sep-18	x	14.1	12.2
3-feb-20	15.8	11.7	12.2
16-mrt -20	15.1	11.3	x
10-aug-20	21.3	17.5	x
14-sept-20	30.1	17.1	x

Voor de geteste microbiologische parameters zijn er nauwelijks significante verschillen gevonden tussen het verwarmde en niet-verwarmde grondwater dat via de peilbuizen en technische ruimte is bemonsterd. Het gebruik van hogere injectietemperaturen in het OBES van Koppert-Cress vanaf 2017 leidt bij de huidige grondwatertemperatuur niet tot een microbiologisch risico. Wat opvalt is dat in de technische ruimte de meeste microbiologische parameters niet zijn aangetroffen, maar dat deze wel in meer of mindere mate aanwezig zijn in het grondwater dat via de peilbuizen wordt bemonsterd. Dit is bijzonder aangezien in de technische ruimte het grondwater wordt bemonsterd dat heen en weer wordt gepompt tussen de warme en koude bel. Het is onwaarschijnlijk dat de micro-organismen afsterven tijdens passage door de leidingen, waardoor ze niet worden aangetroffen in de technische ruimte. Andere mogelijkheden zijn dat in het water en/of de biofilm van de peilbuizen deze micro-organismen aanwezig zijn en dat niet alleen het grondwater maar ook het water in de peilbuis wordt bemonsterd. Dit is echter zo veel mogelijk tegen gegaan door vlak boven het filter van het 2^e watervoerende pakket te bemonsteren. Figuur 2-3 en Figuur 4-3 laten echter zien dat een groot deel van het warme water wordt geïnjecteerd in het 3^e watervoerende pakket, mogelijk beïnvloedt deze menging de microbiologische parameters. Al is niet duidelijk welke processen hieraan ten grondslag zouden liggen.

Potentieel toekomstig risico *Legionella* en NTM

NTM zijn regelmatig aangetroffen in het OBES, al zijn ze niet significant vaker aangetroffen in één van de peilbuizen of technische ruimte ten opzichte van de andere monsterpunten. Het regelmatig aantreffen van NTM bacteriën is bijzonder aangezien deze bacteriën aeroob zijn, en altijd zuurstof nodig hebben voor groei, terwijl het OBES-systeem wordt beschouwd als een anoxisch systeem (Hornstra et al., 2012). Uit de zuurstofmetingen bij de monstername blijkt dat in nagenoeg alle grondwatermonsters zuurstof in lage concentraties aanwezig is (gemiddeld 2,2 mg/l). Dit is echter zeer waarschijnlijk een artefact, veroorzaakt door atmosferische contaminatie van het opgepompte water met zuurstof. De aanwezigheid van NTM bacteriën is onverwacht vanwege de anaërobe condities in het grondwater. Van NTM bacteriën is bekend dat ze wel in staat zijn bij lage zuurstofconcentraties te groeien (George et al., 1980, Brooks et al., 1984, Kirschner et al., 1999). De afwezigheid van verschillen tussen de peilbuizen en de technische ruimte laten zien dat NTM niet sneller gaat vermeerderen bij de hogere grondwatertemperaturen in het OBES systeem van Koppert-Cress.

Aangezien NTM bacteriën in nagenoeg alle grondwatermonsters zijn aangetroffen toont dit aan dat de condities in ieder geval overleving en vermenigvuldiging van NTM kunnen ondersteunen. NTM zijn aangetoond met de qPCR methode waarmee DNA van NTM wordt aangetoond, dit DNA kan van zowel dode als levende bacteriën afkomstig zijn en van zowel gevaarlijke als niet-gevaarlijke NTM stammen. Het onderscheid tussen dood en levend kan niet worden gemaakt met de qPCR methode waardoor het niet met zekerheid te zeggen is of er dode en/of levende NTM bacteriën aanwezig zijn in het grondwater. Met aanvullende analyses kan wel het onderscheid gemaakt worden tussen gevaarlijke en niet-gevaarlijke stammen. Hiervoor kan op basis van variatie in het hsp65-gen bepaald worden welke stammen aanwezig zijn in het grondwater en of deze gevaarlijk zijn.

Voor zowel *Legionella* als NTM moet rekening worden gehouden met een potentieel gevaarlijke situatie als het water lang stil staat, en er geen stroming is in de leidingen van het OBES. Door stilstand, hogere temperaturen, groot leidingoppervlak met biofilm en mogelijke diffusie van zuurstof in het water zouden deze bacteriën toch kunnen gaan groeien. Deze situatie van lange stilstand is niet te verwachten gezien de dynamische en intensieve bedrijfsvoering van de OBES bronnen.

Fecale besmetting grondwater of peilbuizen

Bacteriën van de coligroep en met name *Clostridium* sporen (SSRC) zijn regelmatig aangetroffen in het grondwater dat via de peilbuizen is bemonsterd. Beiden zijn van fecale herkomst en kunnen niet groeien in grondwater, maar sterven juist af. De bacteriën van de coligroep sterven snel af in (grond)water, terwijl de SSRC langere tijd kunnen overleven.

Omdat beiden niet aangetroffen zijn in de watermonsters van de technische ruimte, lijkt de besmetting in de peilbuizen te zitten en niet in het grondwater. De aanwezigheid van deze micro-organismen suggereert dat het grondwater of het water in de peilbuizen af en toe wordt besmet met fecaal materiaal. Mogelijk wordt dit veroorzaakt doordat feces van vogels of andere dieren dat rondom de peilbuis ligt bij regenval de peilbuis in stroomt. Een andere mogelijkheid is dat tijdens andere monsternamen of het uitlezen van dataloggers, waarvoor de bron opengaat, het water besmet wordt. Door de korte overleving van bacteriën van de coligroep zullen zij meestal zijn afgestorven wanneer de monsternamen plaats vindt, waardoor ze dus minder vaak worden aangetroffen in de monitoring. Door de langere overleving van SSRC worden zij wel vaak aangetroffen.

De fecale besmetting van het grondwater, of water in de peilbuizen, is alleen een risico voor de volksgezondheid als water uit de peilbuizen bemonsterd wordt, of als er wordt gespuut en het water in het gezicht of via de handen op het gezicht komt. Dit risico is daarmee in de praktijk verwaarloosbaar klein.

4.4.4 Conclusie en aanbevelingen microbiologische effecten

Conclusies

De verhoogde grondwatertemperatuur leidt in de verkregen dataset niet tot groei van de onderzochte opportunistische pathogenen in het water. In de onderzochte monsters van de gemeten ziekteverwekkers zijn geen grote aantallen aanwezig die kunnen leiden tot risico's voor de volksgezondheid. De uitzondering hierop is NTM.

NTM bacteriën zijn in alle grondwatermonsters aangetroffen, ook buiten de invloed van verhoogde temperaturen, maar in concentraties als die in drinkwater aanwezig. Aanvullende analyses zouden nodig zijn om aan te geven of het hier eventueel gaat om gevaarlijke of niet-gevaarlijke stammen.

Het grondwater en/of het water in de peilbuizen is wel fecaal besmet wat alleen een humaan risico geeft als water uit de peilbuizen bemonsterd wordt, of als er wordt gespuut en het water in het gezicht of via de handen op het gezicht komt.

Aanbevelingen

Peilbuis 3 is recent aan het onderzoek toegevoegd, en in 2020 gedurende 4 keer gemeten. 2 metingen vonden plaats terwijl deze warme bel werd gevuld, of was gevuld met warm water. Dat betekent dat de conclusies voor een deel zijn gebaseerd op deze twee metingen. Het verdient de aanbeveling om het temperatuureffect in de bodem gedurende langere tijd te onderzoeken, om een meer consistent beeld te krijgen van de temperatuureffecten in de bodem, zeker als de temperaturen en opgeslagen volumes nog verder omhoog gaan.

Met Next Generation Sequencing (NGS) kan de microbiële populatie van het grondwater in kaart worden gebracht. Door de populatie van de verschillende peilbuizen in de warme en koude periode met elkaar te vergelijken wordt meer inzicht verkregen in populatieverandering van het grondwater, potentiële risicogroepen micro-organismen in het grondwater en of bijvoorbeeld bacteriën aanwezig zijn die betrokken zijn bij processen waarbij ijzer gebruikt wordt. Dit kan ook relevant zijn in verband met bijvoorbeeld eventuele microbiële bronverstoppingsrisico's.

5 Risico bronverstopping door kalkneerslag

5.1 Achtergrond van het risico

Carbonaten komen voor in allerlei sediment typen in de Nederlandse ondergrond (Griffioen et al., 2016). De aanwezigheid van kalkverzadigd grondwater in de meeste watervoerende pakketten in Nederland is dus aannemelijk (Drijver, 2012). Tabel 5-1 laat zien dat als gevolg van de hiervoor omschreven theorie de oplosbaarheid van calciet afneemt bij een temperatuuroptocht van 10 naar 75°C, terwijl dat van andere mineralen zoals bijvoorbeeld gips toeneemt. In kalkverzadigd grondwater kan carbonaatneerslag als gevolg van deze afname in oplosbaarheid dus voor bronverstoppingsproblematiek zorgen. Van alle omschreven effecten op de grondwaterchemie is dit het langst onderzochte aspect, gezien de directe impact op het operationele functioneren van een aantal van de eerste proeven met OBES.

Tabel 5-1 Effect van temperatuur op de oplosbaarheid van gips (CaSO_4) en calciet (CaCO_3). Bron: Deutsch, 1998

EFFECT OF TEMPERATURE ON GYPSUM AND CALCITE SOLUBILITY (PH = 7.5)		
Temperature (Degrees C)	Gypsum solubility (mg/L)	Calcite solubility (mg/L)
10	1460	250
25	1570	190
50	1720	120
75	1920	76

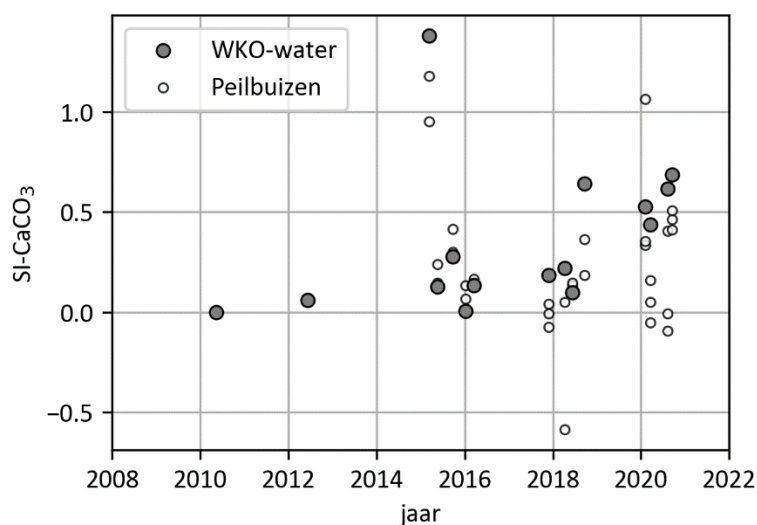
Uit experimenteel onderzoek blijkt echter dat de aanwezigheid van magnesium een zekere oververzadiging van carbonaat in stand kan houden, omdat adsorptie van magnesium aan het kristaloppervlak de groei van calciet blokkeert. Bij een verder toenemende verzadigingsgraad wordt het magnesium echter in de kristalstructuur opgenomen en kan calciet ontstaan met gehalten tot 30% aan MgCO_3 (Drijver, 2012).

5.2 Evaluatie bronverstoppingsrisico door kalkneerslag bij KC

Zoals omschreven zijn er tot nog toe geen duidelijke effecten op de grondwaterkwaliteit waargenomen welke veroorzaakt waren door de temperatuurstijging. Hieruit volgt dat er naar alle waarschijnlijkheid dan ook nog geen significante kalkneerslag heeft plaatsgevonden, wat een belangrijk risico is bij OBES met hogere opslagtemperatuur omdat het tot bronverstopping kan leiden. Indien kalkneerslag op zou treden zou dit resulteren in afnemende concentraties calcium en waterstofcarbonaat in het grondwater, doordat ze neerslaan als kalk (CaCO_3). Bij Koppert Cress zien we echter dat de calcium concentraties juist sterk toenemen met de tijd, als gevolg van de verzilting van het grondwater. In het OBES-water leidt dit tot een toename in concentratie van ~325 tot 660 mg/l (Figuur 4-13). Het effect van verzilting zou het optreden van kalkneerslag nog kunnen verbloemen, maar ook de concentraties waterstofcarbonaat nemen niet af met de tijd, maar blijven min of meer gelijk. Deze fluctueren tussen de 350 en 400 mg/l in het OBES water. Als bijgevolg van kalkneerslag zijn in experimenteel onderzoek ook afnamen in ijzer en mangaan concentraties waargenomen, doordat ze co-precipiteren met het gevormde kalk (Griffioen et al., 1993), maar ook in de concentraties ijzer en mangaan zijn geen trends te zien welke duiden op precipitatie van bijvoorbeeld sideriet (FeCO_3) of rhodochrosiet (MnCO_3). Geconcludeerd mag worden dat er tot nog toe geen noemenswaardige kalkneerslag heeft plaatsgevonden.

Omdat de temperatuurverhoging van het systeem pas recent is doorgevoerd zou het evenwel toch kunnen dat er hierdoor een geochemisch onbalans is ontstaan welke op termijn tot significante kalkneerslag kan leiden. Om hier zicht op te krijgen is met het geochemisch dataverwerkings- en analysepakket HGC (Stuyfzand, 2012) de

verzadigingsindex (SI) voor carbonaat berekend (Figuur 5-1). Een verzadiging van boven de 0 betekent dat er geochemisch evenwicht is, en er dus netto geen neerslag of oplossing plaatsvindt. Tot 2019 lijkt de carbonaat verzadiging dan ook rond de 0 te liggen, en varieert die in zowel de peilbuizen als in het OBES-water tussen 0 en ~0.3, een enkele uitschieter in 2015 daargelaten die niet meteen te verklaren valt. Vanaf 2019 lijkt de verzadigingsindex van het OBES-water echter iets verder toegenomen te zijn, tot ~0.6. Uit zowel experimenteel als praktijk onderzoek blijkt echter dat inhibitie van kalkneerslag door bijvoorbeeld organische zuren of magnesium ervoor zorgt dat nog hogere oververzadiging nodig is voordat kalkneerslag een probleem wordt in de praktijk blijkt echter dat kalkneerslag vaak pas plaatsvindt bij nog hogere oververzadigingen, van bijvoorbeeld 2 of 3 (Griffioen et al., 1993). Verdere monitoring van de ontwikkelingen in grondwatersamenstelling na de temperatuurverhoging zijn dan ook noodzakelijk om vast te stellen of de toename in SI stand zal houden, en zo ja of dit een mogelijk een risico vormt voor het functioneren van de warmte opslag.



Figuur 5-1 Carbonaatverzadigingsindex in de loop van de tijd. Verzadigingsindexen berekend volgens de methode in Stuyfzand, 2012.

6 Handreikingen voor monitoring

Op basis van de inzichten die zijn opgedaan met het monitoren van het Koppert-Cress systeem is hier een handreiking gedaan voor monitoring van OBES systemen met hogere opslagtemperaturen.

Zowel de thermische verspreiding als de chemische en microbiologische veranderingen zijn bepaald met verschillende monitoringstechnieken. De monitoring bij Koppert-Cress heeft duidelijk geïllustreerd dat de effecten van een ondergronds warmteopslagsysteem van veel meer afhangen dan alleen de maximale injectietemperatuur. en in grote mate worden bepaald door de specifieke condities van het OBES systeem. De analyses in dit onderzoek laten namelijk zien dat een analyse van het OBES systeem (energiestromen, volumestromen, temperaturen) al veel inzicht kan geven in de te verwachten effecten van het OBES systeem. Dit bepaalt vervolgens onder meer op welke punten er moet worden gemeten, wanneer er moet worden gemeten en hoe vaak. De belangrijkste inzichten en “lessons-learned” worden hier per type monitoring verder besproken.

6.1 Thermische verspreiding met DTS/logger

De temperatuur in de ondergrond is gemonitord met DTS kabels en met temperatuur loggers. De temperatuurloggers hangen in een peilbuis ter hoogte van het filter. Indien er sowieso peilbuizen aanwezig zijn om de grondwaterkwaliteit te monitoren is het aan te raden om daar een temperatuurlogger in te hangen, zodat andere temperatuur metingen hiermee kunnen worden vergeleken. De DTS kabels geven veel meer detail in de verticaal, wat inzicht kan geven in de verticale variatie in permeabiliteit in de opslag-aquifer. Ook kan de temperatuurontwikkeling in boven, en eventueel onderliggende pakketten in beeld worden gebracht, ook waar deze niet doorlatend zijn. Een ander voordeel van DTS metingen is dat de benodigde glasvezelkabels, in tegenstelling tot peilbuizen, met goedkopere technieken kunnen worden geplaatst. Met DTS kan goed inzichtelijk worden gemaakt hoe de warmte zich met de tijd in de horizontale en verticale richting verspreidt. DTS kabels zijn kwetsbaar en gevoelig voor kabelbreuken en andere beschadigingen. Bij het aanleggen van de DTS kabels moet hier rekening mee worden gehouden, door adequate bescherming toe te passen.

6.2 Chemie/microbiologie met grondwatersamples

Het bemonsteren van het grondwater is op verschillende plekken in het OBES systeem gedaan. Om de (mogelijke) veranderingen door temperatuur te kunnen meten moet er een peilbuis relatief dicht bij de warme bron(nen) aanwezig zijn. Voor de casus KC was het extra lastig om op grotere afstand de temperatuurinvloed te bepalen door de hoge dynamiek met relatief kleine injectievolumes en de netto grote onttrekking van warmte met het systeem. Daarnaast is het aan te bevelen om voordat het OBES systeem in werking treedt een (of meerdere) samples te nemen van de het grondwater zodat het duidelijk is wat de startsituatie is van het systeem. Deze informatie ontbrak voor dit onderzoek.

Bij toepassing in verschillende of dikke aquifers, moet er voor worden gezorgd dat er representatieve monsternamenpunten zitten over de hoogte van het hele filter traject om de effecten van menging goed in beeld te kunnen brengen. Voor de casus KC weten we dat er menging optreedt, maar omdat de grondwaterkwaliteit van de diepe opslag-aquifer niet gemeten kon worden bleef het lastig om de effecten van menging scherp te bepalen en daarmee ook eventueel additionele temperatureffecten. Zoals geïllustreerd bij het Koppert-Cress systeem, zullen in de praktijk bij ondergrondse warmteopslag alleen temperatureffecten optreden, maar zal er rekening gehouden moeten worden met het (mede)optreden van andere oorzaken voor grondwaterkwaliteit veranderingen. Bij het bepalen van de chemische en microbiologische parameters is het daarom van belang om naast de parameters die gewenst zijn vanuit grondwaterkwaliteitsbeoordeling, ook de parameters te analyseren die kunnen helpen bij het vaststellen en onderscheiden van verschillende fysische en (bio)chemische processen die kunnen optreden. Voor het bepalen van processen zoals menging is het daarom bijvoorbeeld van belang een aantal

conservatieve parameters (zoals chloride en bromide) te bepalen. Verder kan er op basis van kennis van de ondergrond en nulmetingen geanticipeerd worden op welke processen er mogelijk zouden kunnen optreden zodat daar het analysepakket efficiënt op afgestemd kan worden.

6.3 Vereenvoudigde voorspellingsmodule thermische verspreiding

De observaties van de thermische verspreiding bij Koppert-Cress heeft bijgedragen om de te verwachten thermische effecten bij ondergrondse warmte opslag beter te kunnen anticiperen. Met een module hiervoor zou het bevoegd gezag af kunnen wegen of de thermische effecten in de omgeving van de OBES acceptabel zijn of niet. De belangrijkste onderdelen hiervoor zijn 1) de verspreiding van warmte in de horizontale richting (van de bron af in de opslag-aquifer) en 2) de verspreiding van warmte in de verticale richting (door de afsluitende laag naar boven/onderen). Deze mate waarin warmte zich verspreidt wordt in beide richtingen bepaald door verschillende processen. Een benadering voor een eerste inschatting voor het optreden van beiden wordt hieronder nader beschreven waarbij het Koppert-Cress systeem gebruikt wordt als referentie.

6.3.1 Horizontale verspreiding warmte

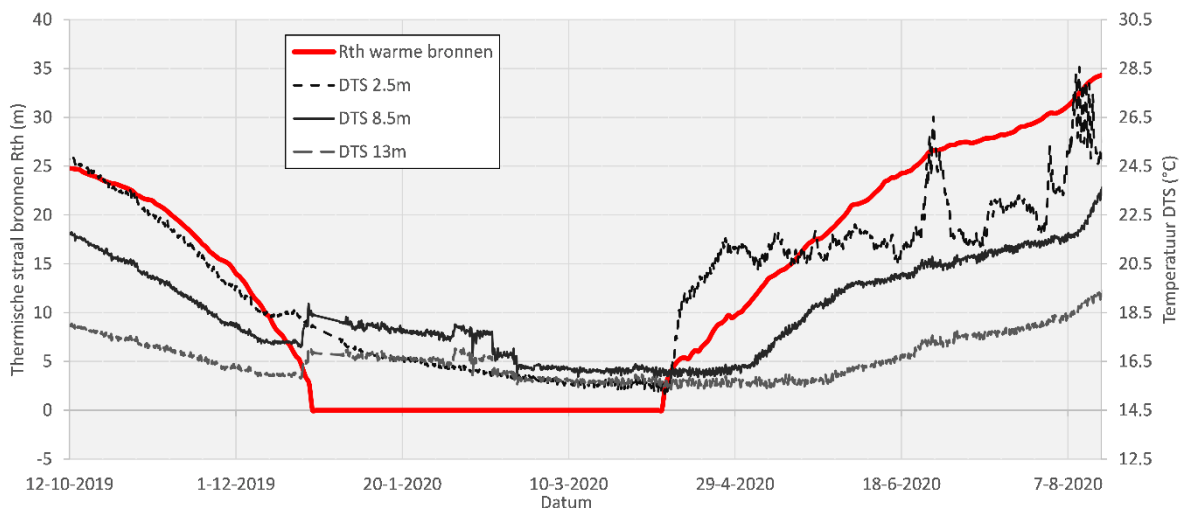
De minimale horizontale verspreiding wordt bepaald met het geïnjecteerde volume in de warme en/of koude bronnen. Op basis van het netto opgeslagen volume (vergelijking (0.2)) kan worden bepaald hoe groot de reikwijdte is van de warme of koude bel in de ondergrond. Deze thermische straal geeft daarbij de minimale verspreiding van de opgeslagen thermische energie weer rondom de bronnen. In §4.1 is de thermische straal voor één warme of koude bron bepaald o.b.v. het opgeslagen en onttrokken volume. Ervanuit gaande dat de bronnen zo dicht bij elkaar staan dat er één thermisch volume ontstaat rondom de bronnen kan zo ook de thermische straal van de warme en koude bronnen tezamen worden bepaald (rode lijn in Figuur 6-1). Zoals geobserveerd voor het KC systeem, raakt het volume in de warme bronnen ieder jaar 'op', terwijl het volume in de koude bronnen continu toeneemt. Dit komt goed overeen met de grote koude bel zichtbaar in Figuur 4-7. De thermische straal rondom de warme bronnen wordt ieder jaar tussen de 25 en de 35m groot volgens het netto verpompte volume. In de koude bronnen neemt dit toe tot meer dan 140m tussen 2012 en 2020. De thermische straal de mate van verspreiding van de warmte/koude in de bodem aan, de temperatuur binnen het thermische volume is vooral afhankelijk van de injectietemperatuur.

Het verloop van de thermische straal die wordt berekend op basis van het volume in de warme bronnen komt overeen met de temperatuur toe- en afname op de verschillende DTS locaties (op 2.5m, 8.5m en 13m afstand van warme bron 1), Figuur 6-1. Op een afstand van 20m, wordt slechts een kleine temperatuuroename gemeten <1 °C. Deze locatie is daarom niet weergegeven in Figuur 6-1. Dit komt goed overeen met Figuur 4-7 en de reikwijdte van de seizoens thermische invloed van de warme bron tot 20m afstand (fig. 4-1 en fig. 4-3). De berekende thermische straal op basis van het netto geïnfiltrerd volume is echter 25m tot 35m. De werkelijke verspreiding van de warmte in de aquifer reikt dus minder ver dan op basis van de thermische straal wordt verwacht, waarschijnlijk doordat de warme bronnen niet tot 1 thermisch volume groeien.

De DTS locatie (meest dichtbij) op 2.5m afstand van warme bron laat daarbij de snelste temperatuuroename zien bij een groter wordende thermische straal (begin April 2020). Hoe moment dat een duidelijke temperatuuroename wordt gemeten op iedere locatie komt overeen met de grote van de thermische straal op dat moment (hoogte van rode lijn). Echter, in hoeverre de temperatuur toeneemt, en op welk moment, is afhankelijk van de opslagtemperatuur in de warme bronnen. Dit kan zo dus niet inzichtelijk worden gemaakt. Daarnaast valt het ook op dat wanneer de warme bronnen 'leeg' zijn en de thermische straal dus 0 meter is (Jan-Maart 2020), er nog wel warmte in de aquifer zit. Naarmate de aquifer nog verder wordt leeg getrokken neemt deze temperatuur wel verder af.

De opgeslagen warmte in de warme bronnen zullen alleen als één thermisch volume interacteren wanneer het thermische volume rondom een bron aanzienlijk groter is dan de afstand tussen deze bronnen (zoals bij de koude bronnen). Voor de warme bronnen van KC is dat niet het geval, zoals ook kan worden gezien bij de numerieke

simulaties (Figuur 4-7). Desalniettemin is op basis van het KC systeem gebleken dat de thermische straal gebruikt kan worden als een goede eerste indicatie om de horizontale thermische verspreiding rondom warme of koude putten te kunnen voorspellen.



Figuur 6-1 Volume in de ondergrond rondom de warme en koude bronnen en de thermische straal (R_{th}) die wordt veroorzaakt door dat volume. De thermische straal van de warme bronnen wordt vergeleken met de 3 locaties met DTS (DTS is weergegeven indien opwarming op locatie >2.5°C is). Van Oktober 2019 tot Augustus 2020.

6.3.2 Verticale verspreiding warmte

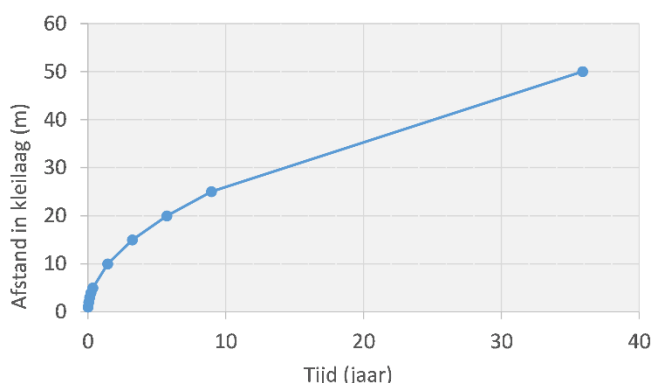
De opwarming van bovenliggende en onderliggende pakketten rondom de opslag-aquifer(s) kan ontstaan door voornamelijk twee processen: warmtegeleiding door de afsluitende laag of door warmteverliezen uit de bronbehuizing in bovenliggende watervoerende pakketten (eventueel versterkt door grondwaterstroming, zie ook §4.2). Dit laatste is dus locatie-specifiek en afhankelijk van de geohydrologische condities. De warmtegeleiding door conductie kan wel inzichtelijk worden gemaakt o.b.v. de steady state situatie die kan ontstaan indien alleen conductie zorgt voor de verticale verspreiding van warmte.

De afsluitende laag boven en onder het opslag-pakket zijn doorgaans bij alles OBES slecht doorlatend. Het geïnjecteerde volume wordt dus niet verspreid in de verticale richting buiten de opslag-aquifer. Dit betekent dat de verspreiding van warmte door deze afsluitende kleilagen alleen kan gebeuren via warmtegeleiding (conductie). Warmtegeleiding van warmte treedt op bij een temperatuurverschil (ΔT) over een lengte (L). De temperatuur tussen 2 punten met een verschillende maar constante temperaturen verloopt volgens een lineaire functie die afhankelijk is van de warmte capaciteit van de verschillende bodemlagen, naar een evenwichtssituatie. De tijd die de warmte er over doet op elke plek tussen de 2 punten te komen is afhankelijk van de afstand, tussen de punten van constante temperatuur en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal. De snelheid waarmee warmte door conductie door een materiaal reist is afhankelijk van de thermische dispersiviteit (α):

$$\alpha = \frac{\kappa}{n\rho c}$$

met κ de thermische geleidbaarheid [J/s/m/K] van het materiaal, n de porositeit [-], ρ de dichtheid [kg/m³] en c de warmte capaciteit [J/kg/K]. Bij een constante thermische geleidbaarheid (gelaagdheid en temperatuurafhankelijkheid van de geleidbaarheid niet meegenomen) kan de tijd die warmte nodig heeft om afstand L af te leggen wordt benaderd door

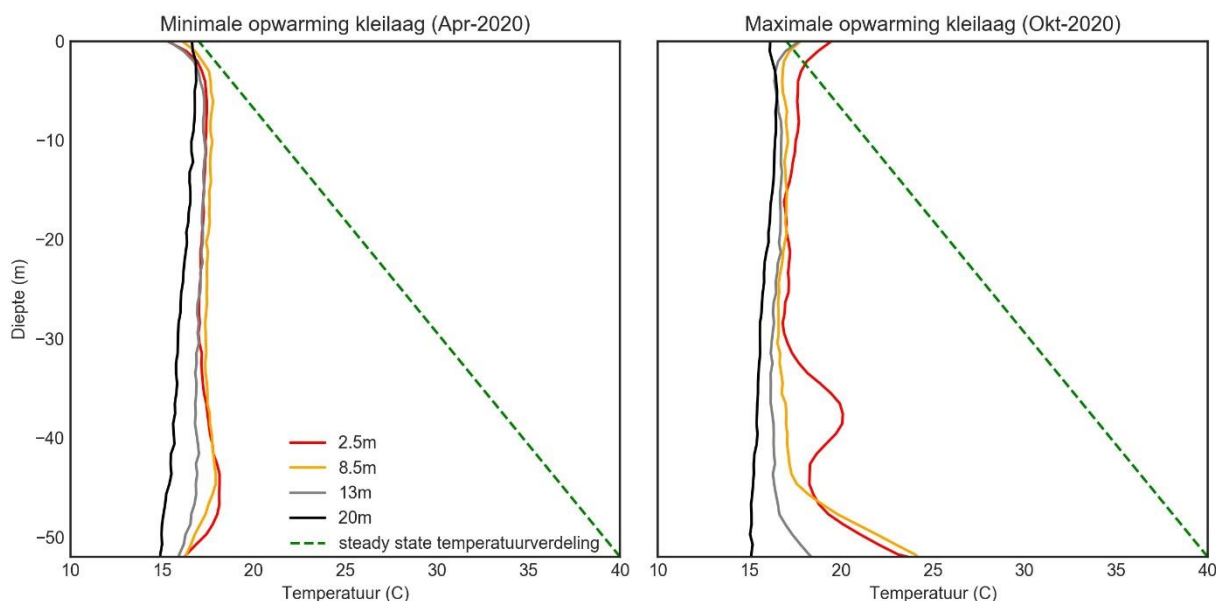
$$t = \frac{L^2}{2\alpha}, \text{ zodat de snelheid } u = \frac{2\alpha}{L} \text{ is.}$$



Figuur 6-2 Tijd tot steady-state (x-as) tot een gegeven afstand (y-as) in de bovenliggende kleilaag (bentoniet).

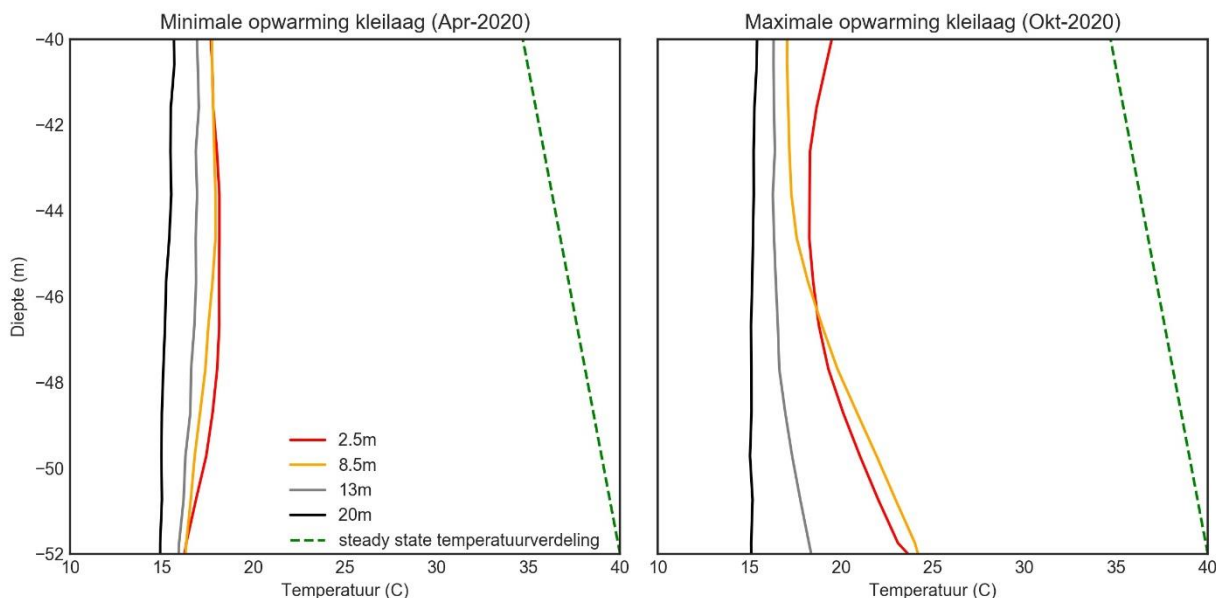
NB. deze steady-state warmteverspreiding is enkel gebaseerd op conductie door de kleilaag, in de praktijk zal ook diffusie en convectie en daarmee ook dispersie optreden indien er ook zandige lagen boven en/of onder de opslag-aquifer zijn. Waardoor de tijden korter kunnen uitpakken dan gebaseerd o.b.v. alleen conductie. Vooral voor gevallen waar een relatief hoge temperatuur wordt bereikt, en er dus een groot temperatuurverschil kan ontstaan, kan dichtheidsstroming (opdrrijving) optreden en de verticale opwaartse verspreiding van warmte erg versnellen in goed doorlaatbare lagen. Echter, voor de casus Koppert-Cress zijn er geen aanwijzingen dat opdrrijving al een effect kan hebben, de maximale opslagtemperaturen voor Koppert-Cress zijn nog steeds relatief laag (40 t.o.v. bijv. 80 tot 90 °C).

De theoretische, worst-case benadering van het temperatuurverloop tussen die 2 punten voor de situatie bij KC en de metingen door de DTS zijn beide weergegeven in Figuur 6-3 voor de minimale en maximale opwarming in 2020. Bij deze steady-state benadering wordt er vanuit gegaan dat de bovenkant van de opslag aquifer continu de maximale infiltratie temperatuur van de warme bron heeft (40 °C). Op ca 10m –mv is de ondergrond temperatuur constant, omdat op die diepte seizoensinvloeden van de buitenluchttemperatuur niet meer merkbaar zijn. Maar die constante temperatuur op die diepte volgt uit de gemiddelde atmosferische temperatuur. Daarom kan de steady state het beste op maaiveld wordt gesteld, hoewel de seizoensmatige variaties tussen maaiveld en 10 m-mv dan niet worden meegenomen. Hieruit blijkt dat de verticale opwarming in de ondergrond bij KC relatief klein is t.o.v. de steady-state opwarming. De meeste opwarming vindt plaats tot ongeveer 5 à 10m boven de opslag-aquifer. Echter, deze opwarming verdwijnt ook weer grotendeels door afkoeling in het voorjaar. De blijvende opwarming die ontstaat in de ondergrond is slechts een paar graden en bevindt zich ongeveer 5m in het kleipakket (Figuur 6-3 links).



Figuur 6-3 Opwarming van de ondergrond boven het ondiepe opslagpakket gemeten met de 4 DTS locaties en vergeleken met de steady-state situatie. Links: minimale opwarming in 2020 (April) en Rechts: maximale opwarming in 2020 (Oktober).

In Figuur 6-4 is er ingezoomd op alléén het kleipakket boven de ondiepe opslag-aquifer (tussen -40 en -52m). het is hier goed zichtbaar dat de daadwerkelijke opwarming door conductie lager is dan de maximale steady-state situatie. Dit komt doordat A) de warme bron voor KC ieder jaar ‘leeg’ raakt en er dus ook vaak weer afkoeling is van het kleipakket, B) de opslagtemperatuur van KC slechts sporadisch 40 °C bedraagt (gemiddeld 17 °C) en C) omdat het systeem slechts een aantal jaar (5 jaar met hogere temperatuur) wordt gebruikt. De steady-state temperatuurverdeling geeft dus duidelijk een worst-case benadering weer van de mogelijke verticale temperatuurverspreiding door conductie.



Figuur 6-4 Opwarming van de kleilaag direct boven het ondiepe opslagpakket gemeten met de 4 DTS locaties en vergeleken met de steady-state situatie. Links: minimale opwarming in 2020 (April) en Rechts: maximale opwarming in 2020 (Oktober).

7 Discussie

Verbetering energieprestaties van OBES bij kassen met hogere warme bron temperatuur

De ervaring bij Koppert-Cress geeft aan dat het met een hogere temperatuur opslaan van warmte in de warme bron zowel de energieprestatie van het OBES als ook de beschikbaarheid van duurzame warmte bevordert. In de kas delen die daar geschikt voor zijn kan 100% van de vraag worden ingevuld met het OBES.

Net als Koppert-Cress hebben andere tuinbouwbedrijven ook een grote warmtevraag, waardoor deze aanpak ook geschikt kan zijn voor veel andere kassen. Daarbij blijkt het goed mogelijk allerlei restwarmte stromen uit de interne bedrijfsvoering in te vangen. Koppert-Cress laat zien hoe groot die mogelijkheden zijn, door bijvoorbeeld zelfs de warmte van de verlichting in te vangen. In de praktijk blijkt het een uitdaging om alle intern beschikbare warmte optimaal te benutten. Wat daarbij helpt is goede monitoring om in beeld te brengen hoe bepaalde bronnen van warmte optimaal kunnen worden ingezet, door bijvoorbeeld hydraulische schakelingen of de inzet van buffervaten te verbeteren. Bij een hoge warmte vraag zoals bij KC, kan ook optimale benutting van interne warmtebronnen niet toereikend zijn en kan aanvullende warmte uit externe bronnen nodig zijn om voldoende warmte te kunnen opslaan. De mate van monitoring zoals toegepast bij KC is echter verre van standaard bij de toepassing van OBES. Bij het vergroten van warmte invang uit eigen bedrijfsvoering en/of externe bronnen van warmte is dat echter onontbeerlijk om die optimaal te kunnen benutten.

Door de strikte temperatuureisen die aan de teelt van cressen wordt gesteld, wordt het OBES van KC ook veel kort-cyclisch gebruikt: warmteopslag gedurende de dag en warmtelevering in de nacht. Dit helpt de beschikbare warmte optimaal te benutten, met minder grote verspreiding van warmte tot gevolg. Het kort-cyclisch verpompte grondwater draagt wel aan het jaarlijkse verpompte volume dat is vastgelegd in de vergunning. Door het kort-cyclisch weer onttrekken, dragen die kort-cyclisch verpompte m3 grondwater echter niet bij aan de grootte van de thermische straal/verspreiding. De thermische straal/verspreiding die je op basis van het jaarlijks verpompte debiet zou verwachten is veel groter dan bij Koppert-Cress het in de praktijk daadwerkelijk is. Bij andere teelten zal dat minder sterk het geval zijn, waardoor de warmtelevering minder kort-cyclisch is en de temperatuur effecten sterker aanwezig kunnen zijn.

Voor de lange termijn prestaties van het OBES is de structurele onbalans in de bronnen niet wenselijk, omdat de koude bron daardoor jaar na jaar groeit. Uit de simulaties blijkt duidelijk dat de koude bron inmiddels negatieve invloed uitoefent op de warme bron, waardoor een deel van de opgeslagen warmte verloren gaat. Omdat niet alleen de koude bron invloed heeft op de onttrekkingstemperatuur van de warme bron, kan het effect van deze negatieve interactie niet uit de monitoringsdata worden geïdentificeerd.

Tot besluit blijft een belangrijk aandachtspunt waar de gebruikte elektriciteit vandaan komt. Zelfs als alle warmte door het OBES wordt ingevuld blijkt dat de bron van elektriciteit nog grote invloed heeft op de CO₂ uitstoot.

Transitie van OBES naar hogere temperatuur warme bron

Er zijn zeer veel lage temperatuur open bodemenergiesystemen in Nederland. Daar waar deze systemen een te kort aan warmte hebben is de gevolgde aanpak van KC een goede mogelijkheid om de zowel de energieprestatie als de energiebalans te verbeteren. Uit de monitoringsdata van KC blijkt dat het niet eens perse noodzakelijk is om structureel met een veel hoger temperatuur dan 25C in de warme bron te infiltreren. Het is hierbij belangrijk dat zulke systemen de warmte mogen infiltreren die ze beschikbaar hebben. In het geval van KC zitten daar op de warmste zomerdagen pieken van 40C bij. Dat zijn echter kleine hoeveelheden en worden daarom ook niet terug gezien in de temperatuur in de ondergrond. In het geval van een netto warmte onttrekking zoals bij Koppert-Cress

vermindert nog verder de impact die deze opslag bij hogere temperaturen heeft omdat vrijwel alle opgeslagen warmte (0,97 bij KC) weer wordt teruggewonnen.

Ondanks dat beleidsmatig een koude overschot wel is toegestaan bij OBES, blijkt uit de resultaten bij KC dat daar toch voorzichtig mee moet worden omgegaan aangezien de energieefficiëntie van opslag in warme bron door temperatuurverlaging wel negatief onder invloed kan staan van de koude bron.

Bij de transitie van een conventioneel lage temperatuur OBES naar een systeem met hogere temperaturen is de is het toegepaste materiaal van de bron een belangrijk aspect voor de in hoeverre de infiltratietemperatuur kan worden verhoogd zonder bron of leidingwerk aanpassingen te vergen. Voor de relatief geringe verhoging naar maximale temperaturen van 40°C in het Koppert-Cress systeem bleek dat niet nodig.

Verspreiding van warmte en koude in de ondergrond

Bij het OBES van KC zijn zeer beperkte effecten van warmte verspreiding waargenomen door de grote onbalans in de bronnen als gevolg van het warmte tekort (de onbalans is wel kleiner geworden tijdens de looptijd van het onderzoek). Hierdoor is het met name koude die zich sterk verspreidt. Door de onbalans wordt alle warmte die is opgeslagen vrijwel volledig weer terug gewonnen wat de verspreiding van warmte in de ondergrond sterk beperkt zoals de gedetailleerde temperatuurmonitoring aangaven. Met de DTS zien we op 2.5m afstand echter wel seizoensaal indringing van warmte in bovenliggende kleilaag, maar omdat de warme bron elk jaar helemaal wordt leeg getrokken, koelt het telkens ook weer af en dringt de warmte niet ver de bovenliggende kleilaag in. Voor systemen die meer in balans draaien, of zelfs een warmte overschot hebben, zal de warmteverspreiding in de directe nabijheid van de bron groter zijn.

Het in beeld brengen van kleine temperatuureffecten is lastiger dan grote. Door de beperkte opslagtemperaturen en volumes in de warme bron zijn eventuele effecten niet of niet duidelijk zichtbaar in de monitoringsgegevens. Bij het inrichten van een temperatuurmonitoringsysteem is het daarom enerzijds van belang om voldoende dichtbij de warme bron te monitoren voor de effecten bij de hoogste temperaturen. Anderzijds bepaald het moment van monitoring in belangrijke mate de contacttijd tussen verhoogde temperaturen en de aquifer en dus in hoeverre temperatuureffecten hebben kunnen optreden. Dus met name voor kort-cyclische systemen zoals KC vergt de bepaling van een geschikt bemonsteringsmoment nauwlettendheid.

In dit project is een modelaanpak/infrastructuur ontwikkeld die het mogelijk maakt om met behulp van monitoringsdata van infiltratie en onttrekkingsdebieten en temperaturen en temperatuur monitoring op afstand de verspreiding van warmte in de ondergrond nauwkeurig in beeld te brengen. Deze aanpak kan bij vergelijkbare projecten worden ingezet en verbeterd.

Door grondwaterstroming in een ondiepe zandlaag wordt uit de DTS gegevens duidelijk dat warmteverlies vanuit de bron optreedt. Op 2.5 m wordt de warmte uitstraling door conductie niet evident zichtbaar in de temperatuur gegevens, het in beeld brengen van kleine temperatuur veranderingen vraagt een hoge nauwkeurigheid en in dit geval wellicht ook kleinere afstand.

Effecten op microbiologie in het grondwater

Naar aanleiding van injecteren van water met hogere temperaturen, en dus verdere opwarming van het grondwater, is er gekeken naar micro-organismen die mogelijk gevaarlijk kunnen zijn voor mensen. Met de huidige metingen, bij een maximale injectietemperatuur van 40°C is geen duidelijk effect gevonden van de door het OBES systeem lokaal verhoogde grondwatertemperatuur op de aanwezigheid van potentieel gevaarlijke micro-organismen. Kanttekening hierbij is dat er slechts twee metingen zijn uitgevoerd met duidelijk opgewarmd grondwater.

In het onderzoek is gebleken dat NTM bacteriën van nature aanwezig zijn in de bodem en de aantallen lijken niet gerelateerd te zijn aan de hogere temperatuur. Het is niet bekend welke soorten NTM bacteriën aanwezig zijn bij Koppert-Cress en of eventueel potentieel gevaarlijke soorten mogelijk sneller kunnen groeien bij de condities en temperatuur van het grondwater dan niet-gevaarlijke soorten. De te verwachte variatie in HTO installaties en/of OBES systemen op (toekomstige) locaties, bodemconditie, samenstelling grondwater en temperatuur, kan de groei van potentieel gevaarlijke micro-organismen beïnvloeden. Hoewel de resultaten van Koppert-Cress geen duidelijke groei van de potentieel gevaarlijke micro-organismen laten zien is het aan te bevelen bij toekomstige monitoring bij ander HTO systemen specifiek op deze bacteriën te letten.

Effecten op chemische samenstelling van het grondwater

De monitoring van chemische samenstelling van het grondwater bij KC maakt duidelijk dat er meer effecten optreden dan alleen door temperatuurveranderingen. Door de beperkte temperatuurveranderingen in de OBES van KC, worden de waargenomen veranderingen vooral veroorzaakt door vermenging. Bij beschouwing van chemische veranderingen in het grondwater bij een OBES is het daarom belangrijk om ook rekening te houden met deze effecten, zowel als de infiltratie temperatuur hoog als laag is.

De uitgangssituatie is reeds beïnvloed bij systemen die al langere tijd draaien voordat transitie naar hogere warme bron temperatuur plaatsvindt. Dit is een complicerende factor bij het interpreteren van de monitoringsdata. Bij KC werd dat verder gecompliceerd om er uit 2 verschillende pakketten werd gewonnen en dat in het diepere pakket de samenstelling van het grondwater niet beschikbaar was. De analyse resultaten geven echter wel aan beide gebruikte aquifers een verschillende watersamenstelling hebben. Als bij een OBES blijkt dat de gebruikte aquifers dusdanig gescheiden zijn, moet in beide pakketten de grondwaterkwaliteit gemonitord worden, en op zijn minst de uitgangssituatie bekend zijn.

De mate waarin de maximale injectietemperatuur zich in de ondergrond manifesteert is van invloed op de verstoppingspotentie a.g.v. neerslag producten bij de verschuiving van chemische evenwichten door temperatuur veranderingen. In het geval van KC is de maximale optredende temperatuur in de ondergrond beperkt en daarmee het risico op verstopping ook.

De resultaten van de monitoring van de samenstelling van het grondwater illustreert de complexiteit van dergelijke monitoring en evaluatie. Er treden veel verschillende processen op die van invloed zijn, en om de juiste oorzaak van eventuele veranderingen te kunnen vaststellen is gedetailleerde data/informatie nodig.

Monitoring van chemische en microbiologische veranderingen bij OBES

Op basis van de resultaten van de monitoringscampagne en analyse bij Koppert-Cress is niet te zeggen welke parameters perse wel of niet hoeven te worden gemonitord bij andere projecten. Advies is om vast te houden aan het toegepaste analyse pakket in deze studie.

Bij het vaststellen van de monitoringslocaties is het van belang rekening te houden met de onzekerheid in de mate van thermische verspreiding. Zorg er met voldoende veiligheidsmarges voor dat de peilbuizen zeker of (desgewenst zeker niet) onder thermische beïnvloeding staan. Net als uit landelijke evaluaties van bodemenergiesystemen blijkt, week bij KC ook de praktijk van verpompte volumes en infiltratie temperaturen af van wat voorhand was ingeschat. Het gevolg hiervan was dat in de peilbuit op 20m van de warme bron geen significante opwarming is waargenomen.

Omdat menging van een gestratificeerde aquifer, of uit verschillende aquifers in de OBES bronnen een groot effect hebben op de watersamenstelling is het van belang om ook inzicht te hebben in variatie in samenstelling van de achtergrond condities.

8 Conclusies

Doel van het onderzoek naar het OBES systeem bij Koppert-Cress was om met monitoring inzicht te krijgen in de verbetering van de energieprestaties en kennis te ontwikkelen die nodig is voor aansturing van het bodemenergiesysteem met een zo hoog mogelijk energie-rendement (in termen van CO₂-emissiereductie). Daarnaast was het van belang inzicht in de verspreiding van warmte en impact op de grondwaterkwaliteit als gevolg van de hogere opslagtemperaturen te krijgen.

Ten opzichte van een conventioneel bodemenergiesysteem met lage temperaturen presteert het systeem van KC bij hogere temperaturen een stuk beter. De operationele kosten zijn ca. 10% lager terwijl de uitstoot 30 tot 70% lager is (afhankelijk van de bron van elektriciteit). Het toestaan van een hogere temperatuur van de warme bron maakt het mogelijk meer duurzame (rest)warmte binnen het bedrijf in te vangen en in de warme bron op te slaan en te benutten. Deze twee aspecten hebben 2 belangrijke gevolgen die de reductie in uitstoot en kosten verklaren: 1) het OBES kan een groter deel van de warmtevraag invullen, tot 100% voor de kassen waarvan het verwarmingssysteem is aangepast en 2) doet dat met een hogere efficiëntie. Naarmate er een groter aandeel van de warmte door de warmtepomp wordt geleverd wordt de prestatie van de warmtepomp steeds bepalender voor de energieprestatie van het OBES, het mes snijdt dus aan 2 kanten. Verdere verhoging van de opslagtemperatuur in de warme bron (en daarmee vergroting van de hoeveelheid ingevangen warmte) zal de energieprestatie verder versterken. Koppert-Cress maakt ook vaak gebruik van kort-cyclische opslag van warmte, dat is een efficiënte manier van warmte opslag, en is daarmee een effectieve manier om de inzet van het OBES te optimaliseren. Het verder optimaal weten te benutten van de beschikbare (rest)warmte binnen het bedrijf en het gebruik van aanvullende externe duurzame warmtebronnen helpen om de resterende CO₂ emissie footprint door het gebruik van de warmtepomp verder te verlagen. De opgedane inzichten geven aan dat ook voor vergelijkbare bestaande OBES toepassingen met hoge warmtevraag, het verhogen van de opslag temperaturen sterk kan bijdragen aan het verbeteren van de energieprestaties, het verkleinen van de thermische onbalans en het sterk terugbrengen van de CO₂-emissies.

Uit het onderzoek bij Koppert-Cress OBES naar het effect van de verhoogde warme bron temperatuur op de verspreiding van de warmte in de ondergrond en chemie en microbiologie kwamen bleek het volgende:

- De warmteverspreiding vanuit de warme bronnen is zowel horizontaal als verticaal zeer beperkt. Dit komt de relatief kleine opslagvolumes en door de onbalans van het systeem. Aan het eind van de winter is de warme bron leeg en is de brontemperatuur slechts een enkele graad hoger dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Dit zorgt er voor dat geen effecten van de hogere opslag temperatuur te verwachten is.
- De verhoogde grondwatertemperatuur leidt in de verkregen dataset niet tot groei van de onderzochte opportunistische pathogenen in het water. In de onderzochte monsters van de gemeten ziekteverwekkers zijn geen grote aantallen aanwezig die kunnen leiden tot risico's voor de volksgezondheid.
- De bij Koppert-Cress waargenomen chemische veranderingen in de grondwatersamenstelling worden gedomineerd door mengeffecten, waarbij water onttrokken wordt uit zowel een diepe, zoutere laag als een ondiepe, zoetere laag. Deze twee watertypen worden door het OBES vermeng geherinfiltreerd over de beide formaties. Verschillende sporenelementen zijn in de loop van de tijd in concentratie afgenomen, wat een indirect gevolg is van menging van verschillende grondwatertypen. De eventuele invloed van de beperkte temperatuurveranderingen waren te beperkt om ze te kunnen onderscheiden van andere effecten.

Aanbevelingen

Aanbevelingen voor Koppert-Cress

Ondanks dat het systeem van KC goed functioneert zijn er mogelijkheden om de prestaties verder te verbeteren:

- Het optimaliseren en/of vergroten van de warmte invang. De grote onbalans in de bronnen zorgt er namelijk voor dat de seizoensopslag te klein is om tot het einde van de winter op voldoende hoog temperatuurniveau uit de bronnen warmte te kunnen leveren. Dit zorgt voor een veel lagere aanvoer temperatuur aan de warmtepomp, wat de lagere COP van de warmtepomp verklaart. Opties voor KC om meer en hogere temperatuur warmte in te vangen en hun OBES rendement verder te verbeteren:
 - o Koppeling met geothermie, retour van HT-buurkassen gebruiken om de warme bron te laden
 - o Warmtepomp aan de aanbodkant, bij overproductie van groene stroom, de warmtepomp inzetten om warmte op te slaan
 - o Huidige zonnecollectoren vervangen voor vacuümbuizen, zodat ook bij minder instraling, hogere temperaturen kunnen worden gemaakt, dit vraagt echter wel aanpassing van de installatie om te voorkomen dat er bij hoge instraling >45°C in de warme bron wordt opgeslagen
 - o De logging van de condensorwarmte van de koelcel moet weer op orde worden gebracht om bij toekomstige analyses van het OBES de bijdrage van de koelcel in beeld te hebben.
- Aan de ene kant is er te weinig warmte beschikbaar, maar aan de andere kant staat de ketel nog vaak aan terwijl de warmtepompen niet op volle capaciteit draaien. De inzet van het bodemenergiesysteem kan worden vergroot door:
 - o meer kas areaal er op aan te sluiten, mits temperatuur niveau aansluit, wellicht niet kosten efficiënt, omdat de warmtepomp dan beperkte hoeveelheid warmte kan leveren aan dat specifieke kas deel.
 - o Gezien de randvoorwaarden in capaciteit zou de inzet van het OBES enigszins kunnen worden verbeterd door de bovengrondse buffers toe te passen.
 - o Vergroten van bron en warmtepomp capaciteit.

Deze maatregelen zullen ervoor zorgen dat er een grotere aanspraak wordt gedaan op de bronnen en moeten daarom hand in hand gaan met het vergroten van de warmte invang capaciteit.

Peilbuis 3 is recent aan het onderzoek toegevoegd, en in 2020 gedurende 4 keer gemeten. 2 metingen vonden plaats terwijl deze warme bel werd gevuld, of was gevuld met warm water. Dat betekent dat de conclusies voor een deel zijn gebaseerd op deze twee metingen. Het verdient de aanbeveling om het temperatuureffect in de bodem gedurende langere tijd te onderzoeken, om een meer consistent beeld te krijgen van de temperatuureffecten in de bodem.

Aanbevelingen algemeen

Omdat het verhogen van de infiltratie temperatuur van warme bronnen van OBES gunstig blijkt voor de thermische balans van de bronnen, de hoeveelheid warmte die duurzaam kan worden geleverd en voor de energetische prestaties van het OBES. Het is daarom aanbevolen om te verkennen of het toestaan van verhoogde infiltratietemperaturen ook bij andere vergelijkbare (bestaande) OBES kan worden toegepast. De provincie en omgevingsdienst kunnen hierbij helpen door kennis en ervaring uit dit project te gebruiken bij de overweging om andere OBES die hun warme bron temperatuur willen verhogen te vergunnen. Wat daar verder bij kan helpen is het nogmaals uitvoeren van waterkwaliteitsanalyses bij een systeem waarbij de temperatuur in de ondergrond langduriger en significant hoger dan 25°C is. Verder kan het langer door analyseren van de waterkwaliteit bij Koppert-Cress helpen om met meer zekerheid uitspraken te kunnen doen over de lange termijn effecten op de waterkwaliteit bij milde en tijdelijke temperatuurverhoging zoals bij Koppert-Cress het geval was.. De conclusies ten aanzien van de monitoring uit dit onderzoek kunnen worden gebruikt voor het inrichten van een kosteneffectieve monitoring.

Afkortingen

COP	Coefficient of Performance
DTS	Distributer Temperature Sensing
KC	Koppert-Cress
NTM	Non-tuberculeuze mycobacteriën
OBES	Open Bodemenergiesysteem

Referenties

- AHN, 2017. Actueel hoogte bestand Nederland.
- Appelo, 2008. Arsenic in Groundwater: A world problem. Proceedings seminar Utrecht 29 November 2006. In Issue 5 of NNC-IAH publication. Utrecht, Netherlands: Secretariat Netherlands National Committee, IAH, 2008
- Appelo, C. A. J., Postma, D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution (2nd Editio). A.A. Balkema Publishers
- Avery, S.V., Harwood, J.L., Lloyd, D.. 1995. Quantification and Characterization of Phagocytosis in the Soil Amoeba *Acanthamoeba castellanii* by Flow Cytometry. *Applied and Environmental Microbiology*, vol 61, no 3, 1124-1132. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1388394/>
- Beek, C. G. E. M. v., Vasak, L., Nieuwaal, A., Stefess, G. C., Bakker, L. M. M., 1998. Ontwerp en onderhoud van infiltratie- en onttrekkingsmiddelen (NOBIS 96-3-06). Gouda.
- Beernink, S., Hartog, N., Bloemendal, M., Meer, M.v.d., 2019. ATEs systems performance in practice: analysis of operational data from ATEs systems in the province of Utrecht, The Netherlands, European Geothermal Congress, The Hague, Netherlands.
- Bloemendal, M., beernink, S., Valstar, J., Lugtenbelt, R., Brugge, R.v.d., 2020. Optimale ondergrondse inpassing van open bodemenergiesystemen in: KWR (Ed.). KWR Water research, Nieuwegein.
- Bloemendal, M., Hartog, N., 2018. Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems. *Geothermics* 17, 306-319.
- Bollet, C., Davin-Regli, a., Micco, P. de., 1995. A Simple Method for Selective Isolation of *Stenotrophomonas maltophilia* from Environmental Samples. *Applied and Environmental Microbiology*, vol 61, no 4, 1653-654. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1388425/>
- Bonte, M., 2013. Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality - A hydrochemical and geomicrobial study of the effects of ground source heat pumps and aquifer thermal energy storage. VU University Amsterdam. Retrieved from http://www.hydrology-amsterdam.nl/personalpages/PhDs/Bonte_PhD_thesis_2013.pdf
- Bonte, M., Röling, W. F. M., Zaura, E., Van Der Wielen, P. W. J. J., Stuyfzand, P. J., van Breukelen, B. M., 2013. Impacts of shallow geothermal energy production on redox processes and microbial communities. *Environmental Science and Technology*, 47(24), 14476–14484. <https://doi.org/10.1021/es4030244>
- Breukelen, B. M. van, & Bonte, M., 2016. Comment on “thermally Released Arsenic in Porewater from Sediments in the Cold Lake Area of Alberta, Canada.” *Environmental Science and Technology*, 50(13), 7263–7264. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02106>

- 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 Research*, 25(6), 729–736.
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90048-U](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90048-U)
- Brooks, R.W., George, K.L., Parker, B.C. Falkinham, 10., 1984. Recovery and survival of nontuberculous mycobacteria under various growth and decontamination conditions. *Can. J. Microbiol.* 30, 1112-1117.
- Carnot, S., 1978. Réflexions sur la puissance motrice du feu.
- Deutsch, W., 1998. Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination. *Choice Reviews Online*, 35(07), 35-3883-35–3883. <https://doi.org/10.5860/choice.35-3883>
- Dinkla, I., Lieten, S., Hartog, N., Drijver, B., 2012. Meer met Bodemenergie -Rapport 3/4. Effecten op de ondergrond. Effecten van bodemenergiesystemen op de geochemie en biologie in praktijk. Resultaat metingen op pilotlocaties en labtesten.
- Drijver, B., 2012. Meer met bodemenergie: Rapport 6 – Hoge temperatuuropslag. Retrieved from [https://soilpedia.nl/Bikiviki_documenten/Meer met Bodemenergie/](https://soilpedia.nl/Bikiviki_documenten/Meer_met_Bodemenergie/)
- George, K.L., Parker, B.C., Gruft, H., Falkinham, J.O., 1980. Epidemiology of infection by nontuberculous mycobacteria II. Growth and survival in natural waters. *Am. Rev. Respir. Dis.* 122,8~94
- Grift, B. van der, Stuyfzand, P. J., 2019. Uitloging geochemisch buffervermogen ondergrond. BTO Rapport 2019.036. Nieuwegein. Retrieved from <https://library.kwrwater.nl/publication/59953526>
- Griffioen, J., Klein, J., Van Gaans, P. F. M., 2012. Reaction capacity characterization of shallow sedimentary deposits in geologically different regions of the Netherlands. *Journal of Contaminant Hydrology*, 127(1–4), 30–46. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2011.04.001>
- Griffioen, J., Klaver, G., Westerhoff, W. E., 2016. The mineralogy of suspended matter, fresh and Cenozoic sediments in the fluvio-deltaic Rhine–Meuse–Scheldt–Ems area, the Netherlands: An overview and review.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G., 2000. Modflow-2000, the u.S. Geological survey modular ground-water model—user guide to modularization concepts and the ground-water flow process in: USGS (Ed.). US Geological Survey, Virginia.
- Hartog, N., Drijver, B., Dinkla, I., Bonte, M., 2013. Field assessment of the impacts of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems on chemical and microbial groundwater composition. *European Geothermal Congress 2013*, 8.
- Hecht-Mendez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., 2010. Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground water* 48, 741-756.
- Heijnsbergen, E. van, Roda Husman, A. M. de, Lodder, W. J., Bouwknecht, M., Docters van Leeuwen, A.E., Bruin, J.P., Euser, S.M., Boer, J.W. den, Schalk, J. A. C., 2014. Viable Legionella pneumophila bacteria in natural soil and rainwater puddles. *J Appl Microbiol*, Sep;117(3):882-90.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24888231/>
- Hogervorst, F.A.N., 2015. Wijziging vergunningaanvraag KWO+MTO Koppert-Cress. Fugro, Leidschendam.
- Hornstra, L.M., Bonte, M., Hijnen, W.A.M., Wielen, P.W.J.J. van der, 2012. Microbiologische en chemische risico's van een WKO systeem bij Koppert Cress. Juni 2012. KWR 2012.053.
<http://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/49515301>
- Kirschner, R.A., Jr., Parker, B.C and Falkinham, J.O., 1999. Humic and fulvic acids stimulate the growth of Mycobacterium avium. *FEMS Microbiol Ecol.* 30, 327-332
- KNMI, 2020. Uurgegevens 2010-2020 weerstation 330, Hoek van Holland.
- Kuiper, 2010, Occurrence of Legionella pneumophila and Hartmanella vermiformis in fresh water environments and their interactions in biofilm, 2010. PhD thesis. KWR 2012.053
- Langevin, C.D., Dausman, A.M., Sukop, M.C., 2010. Solute and heat transport model of the Henry and hilleke laboratory experiment. *Ground water* 48, 757-770.
- Langevin, C.D., Shoemaker, W.B., Guo, W., 2003. MODFLOW-2000, the USGS modular groundwater model - Documentation of the SEAWAT-2000 version with variable density flow process and integrated MT3DMS transport process. USGS, Tallahassee, Florida.

- Langevin, C.D., Thorne, D.T., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W., 2008. SEAWAT Version 4: A computer program for simulation of multi-Species Solute and heat transport. USGS, Reston, Virginia.
- Liene T, Lüders K, Halm H, Westphal A, Köber R, Würdemann H., 2017. Effects of thermal energy storage on shallow aerobic aquifer systems: temporary increase in abundance and activity of sulfate-reducing and sulfur-oxidizing bacteria. *Environ Earth Sci*, 76:261
- Lieten, S., de Vries, E., van Baaren, E., Bakr, M., Oude Essink, G., Hartog, N., 2012. Meer met bodemenergie: Rapport 2 – Literatuuronderzoek. Retrieved from [https://soilpedia.nl/Bikiwiki/documenten/Meer met Bodemenergie/](https://soilpedia.nl/Bikiwiki/documenten/Meer%20met%20Bodemenergie/)
- Lopik, J.H.v., Hartog, N., Zaadnoordijk, W.J., 2016. The use of salinity contrast for density difference compensation to improve the thermal recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems. *Hydrogeology Journal*.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115266>
- Motes, M.L., DePaola, A., Cook, D.W., Veazey, J.E., Hunsucker, J.C., Garthright, W.E., Blodgett, R.J., Chirtel, S.J., 1998. Influence of Water Temperature and Salinity on *Vibrio vulnificus* in Northern Gulf and Atlantic Coast Oysters (*Crassostrea virginica*). *Applied and Environmental Microbiology*, vol 64, no 4, 1459–1465. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC106170/>
- Raat, K., Kooiman, J. W., Groenendijk, M., Oosterhof, a T., 2012. Pleidooi voor gebruik brak grondwater voor productie drinkwater. *H2O*, 45, 11–13. Retrieved from <http://livelink.kwrwater.nl/livelink/livelink.exe/open/49432856>
- Sanchez, M.F., Klein, J., Essink, G.O., Raat, K., Paalman, M., 2012. Effecten van brijninjectie op de grondwaterkwaliteit en functies in het Westland Deltares / KWR, Delft / Nieuwegein.
- Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., van de Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M., Parlange, M.B., 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research* 42.
- Smedley, P. L., Kinniburgh, D. G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Sommer, W.T., Doornenbal, P.J., Drijver, B.C., van Gaans, P.F.M., Leusbrock, I., Grotenhuis, J.T.C., Rijnaarts, H.H.M., 2013. Thermal performance and heat transport in aquifer thermal energy storage. *Hydrogeology Journal*, 1-17.
- Stuyfzand, P.J., 2012. Hydrogeochemical (HGC 2.1), for Storage, Management, Control, Correction and Interpretation of Water Quality Data in Excel® Spread Sheet. BTO 2012.244(S). http://www.hydrology-amsterdam.nl/valorisation/HGCmanual_v2_1.pdf.
- TNO, 2002. Boringen uit Dinoloket, digitale grondwaterkaart, Utrecht.
- TNO, 2017. REGIS II, Utrecht.
- Vreede, G.v.d., Groot, M.I., 2010. Ketenemissies hernieuwbare elektriciteit CE Delft, Delft.
- Wielen, P.W.J.J. van der, Kooij D. van der., 2009. Literatuurstudie naar opportunistische-ziekteverwekkende micro-organismen die zich kunnen vermeerderen in drinkwater. KWR Watercycle Research Institute, BTO 2009.001.
- Wielen, P.W.J.J., 2020. Invloed van temperatuur op groei van opportunistische ziekteverwekkers in drinkwater. KWR Nieuwegein, BTO 2020.036.
- Willemsen, N., 2016. Rapportage bodemenergiesystemen in Nederland. RVO / IF technology, Arnhem.
- Wimmers, R., 2019. Spatial analysis of various storage conditions for ATES in the Netherlands. Utrecht University, Utrecht.
- Wu, R., 2009. Energy Efficiency Technologies - Air Source Heat Pum vs. Ground Source Heat Pump. *Journal of Sustainable Development* 2.

- Young, J.S., Gormley, E., Wellington, E.M.H., 2005. Molecular Detection of *Mycobacterium bovis* and *Mycobacterium bovis* BCG (Pasteur) in Soil. *Applied and Environmental Microbiology*, vol 71, no 4, 1946-1952. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1082502/>
- Youngren-Grimes, B.L., Grimes, D.J., Colwell, R.R., 1988. Growth of *Vibrio cholerae*, *Vibrio parahaemolyticus*, and *Vibrio vulnificus* Under Strict Anaerobic Conditions. *Systematic and Applied Microbiology*, vol 11, no 1, 13-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0723202088800420>
- Zheng, C., Wang, P.P., 1999. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide.

Bijlagen

Bijlage I Resultaten Flow meting



RAPPORTAGE PUTREGENERATIE MET FLOWSNELHEIDSBEPALING

Pompstation : **Koppert Cress**
 Putnummer : **K4**

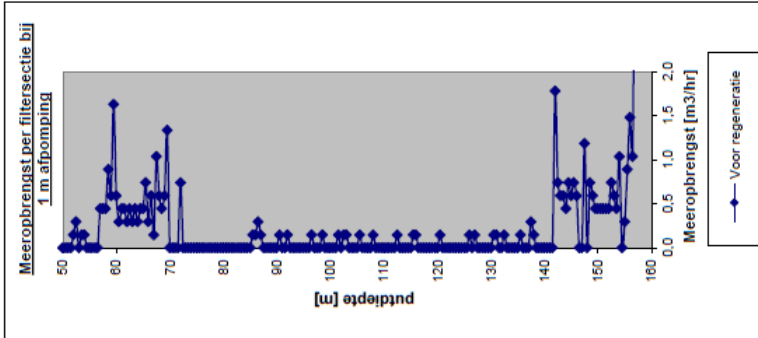
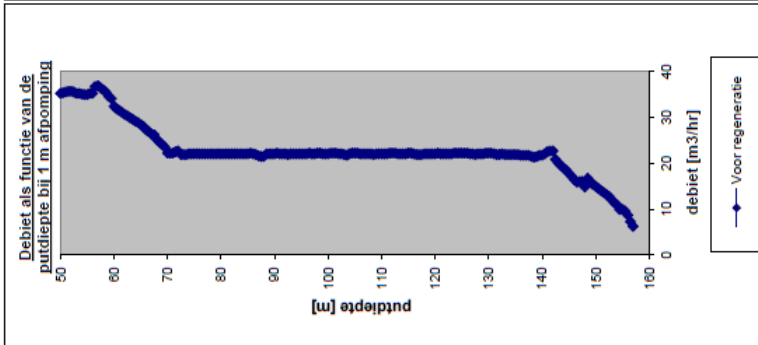
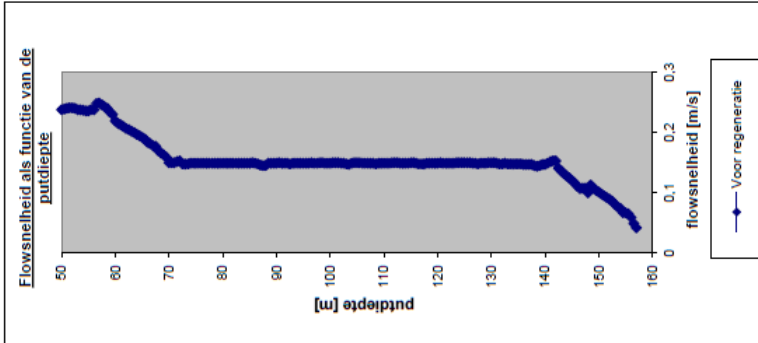
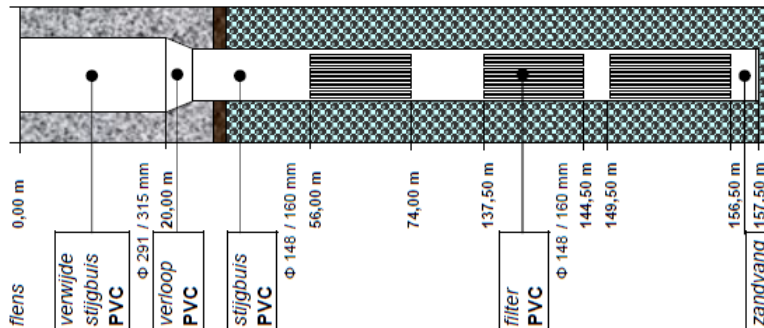
datum meting: **1-8-2018**
 datum meting:

Voor reinigen :

STOP	DRAAI	OMST	AFP	F.W.ST.	Q	Qspec	% NW
2,1	3,21	2,75	1,11	0,46	41	36,94	

Na reinigen :

STOP	DRAAI	OMST	AFP	F.W.ST.	Q	Qspec	% NW



Bijlage II Model beschrijving

Met SEAWAT (Langevin et al., 2003) kunnen MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) en MT3DMS (Zheng and Wang, 1999) dynamisch worden gekoppeld zodat de optredende processen van grondwaterstroming en stof en warmte transport (Hecht-Mendez et al., 2010; Langevin et al., 2010) simultaan worden meegenomen in de berekeningen. Dit is nodig om het effect van de dichtheidsstroming ook inzichtelijk te maken. Dichtheid en viscositeit hangen beide van de temperatuur en concentratie af en moeten daarom die iedere tijdstap worden bepaald inclusief de feedback op de grondwaterstroming. Sommer et al. (2013) laat zien dat een model met 5m x 5m resolutie in de horizontale richting voldoende nauwkeurig is om de thermische verspreiding inzichtelijk te maken, daarbij werd in dat geval echter geen onderscheid gemaakt in de verticale component. Omdat in deze effectenstudie zowel horizontale als verticale distributie van opgeslagen warmte van invloed is, is er in dit model gewerkt met meerdere cellen per laag in de verticale richting.

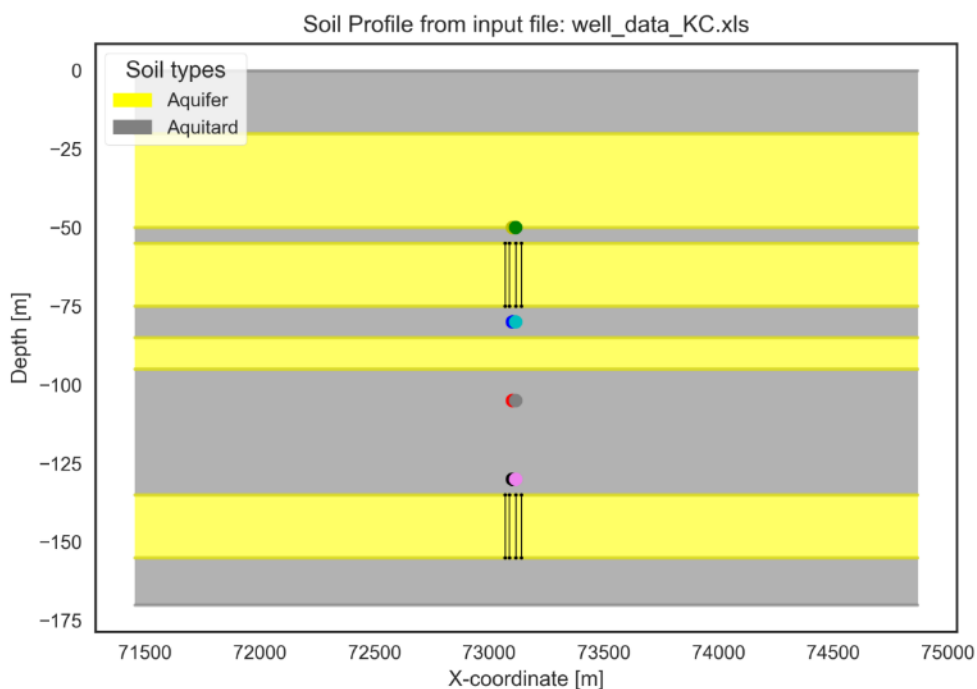
- De discretisatie in horizontale richting is gebaseerd op een vaste celgrootte die tot een bepaalde afstand van de gesimuleerde bronnen constant blijft en daarna logaritmisch toeneemt richting de buitenrand (Figuur 0-2). Zowel een celgrootte van 5 en 10m zijn getest. Hierbij waren verschillen niet significant, er is dus gekozen voor een $\Delta x, \Delta y = 10\text{m}$ in de horizontale richting. Op een afstand van 100m van de bronnen worden de cellen groter (10m - 200m) richting de rand van het model volgens een logaritmisch profiel in minimaal 15 stappen. De totale grootte van het model is circa 3x3km, Figuur 0-1 en Figuur 0-2.
- Model lagen. Omdat de injectie-temperaturen nog relatief laag zijn wordt er verwacht dat verticaal warmte transport door dichtheidsverschillen klein zijn, een fijn resolutie is daarom niet vereist. Zowel $\Delta z = 2.5\text{m}$ als $\Delta z = 5\text{m}$ is getest. Daartussen waren geen significante verschillen en een resolutie van 5m is dus gebruik om rekentijd te besparen. De dikte en eigenschappen van de lagen komen uit
- Tabel 2-1.
- Bovenrand: Er is geen grondwater aanvulling en een temperatuur randvoorwaarde die de jaarlijkse buitentemperatuur volgt. Aan de laterale modelrand is er een constante stijghoogte zonder verhang, temperatuur (12°C achtergrond). De onderrand van het model is een dichte modelrand, deze zit 10m onder de onderste aquifer waarin Koppert-Cress warmte opslaat, worst-case benadering van opwarming naar diepere lagen. De gesimuleerde bronnen bestaan uit meerdere lagen, de stroming in de lagen is in verhouding met de doorlatendheid van de verschillende modellagen.
- Parameter waarden. De parameter waarden die worden toegekend in het model volgen literatuur waarden uit Lopik et al. (2016) en zijn opgenomen in Tabel 0-1. De viscositeit en dichtheidsafhankelijkheid van temperatuur (en zout concentratie) volgt Langevin et al. (2008). De onttrekkingstemperatuur wordt voor elke bron berekend door SEAWAT.
- Solvers; MODFLOW gebruikt the Preconditioned Conjugate Gradient 2 package. MT3D gebruikt de standard eindige differentie methode met "upstream" of "central-in-space" weging in de de advection

Tabel 0-1. SEAWAT simulatie parameters

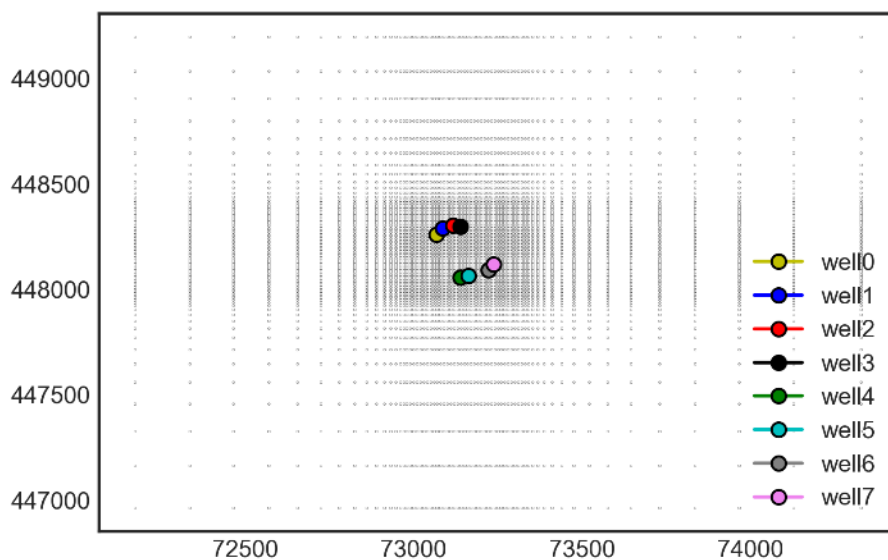
Parameter	Waarde	Package
Water warmte capaciteit	4.13 kJ/kg/°C	RCT
aquifer warmte capaciteit*	1.75 kJ/kg/°C	RCT
Water dichtheid	1,000 kg/m ³	RCT
Zand dichtheid*	2,640kg/m ³	RCT
Water thermische geleidbaarheid	0.58 W/m/°C	RCT
Aquifer thermische geleidbaarheid	2.2 W/m/°C	RCT
Aquitard thermische geleidbaarheid	0.9 W/m/°C	RCT
Thermische distributie coefficient [#]	1.7 · 10 ⁻⁴ m ³ /kg	RCT
Thermische retardatie ⁺	2.21	RCT
Porositeit	0.3	BTN
Specifieke berging aquifer	6 · 10 ⁻⁴ /m	LPF
Longitudinale dispersie	0.5 m	DSP

Transversale dispersie	0.05 m	DSP
Verticale dispersie	0.005 m	DSP
Effectieve moleculaire diffusie warmte [#]	0.108 m ² /day	DSP

[#] kwarts, [#] Berekend volgens Langevin et al. (2008), ⁺ Berekend volgens Hecht-Mendez et al. (2010)



Figuur 0-1. Schematische weergave bodemopbouw in het model met locatie van de warme bronnen en monitoringspunten voor temperatuurverandering.



Figuur 0-2. Schematische weergave model grid + locatie van de bronnen (dmin=10m). Iedere stip is een interesectie x,y.

Beoordelingskader

Terugwinefficiëntie

De thermische efficiëntie (η_{th}) van de bron is gedefinieerd als de ratio tussen onttrokken en geïnfilterde hoeveelheid energie: ($E_{in/uit}$) per bron:

$$\eta_{th} = \frac{E_{uit}}{E_{in}} = \frac{\int \Delta T Q_{uit} dt}{\int \Delta T Q_{in} dt} = \frac{\Delta \bar{T}_{uit} V_{uit}}{\Delta \bar{T}_{in} V_{in}} \quad (5)$$

De efficiëntie hangt af van de infiltratie en onttrekkingstemperaturen ($\Delta T_{in/out}$) in combinatie met opgeslagen en teruggewonnen volume grondwater ($V_{in/out}$). Waarbij Q het brondebiet is [m^3/u] gedurende tijdstap t en $\Delta \bar{T}$ het gewogen gemiddelde temperatuur verschil over de opslag cyclus. De infiltratie temperaturen zijn constant en als het opgeslagen volume ook volledig wordt onttrokken dan bepaald de onttrekkingstemperatuur dus de efficiëntie.

Electriciteitsgebruik warmtepomp

De energie balans van de warmtepomp wordt gebruikt om de hoeveelheid benodigde en geleverde energie in beeld te brengen. De totale hoeveelheid warmte die door de warmtepomp wordt geleverd is afhankelijk van de twee basis relaties (Wu, 2009):

$$P_h = P_{ATES} + P_e \quad \text{en} \quad COP_{hp} = \frac{P_h}{P_e} \quad (6),$$

waarin P_h [W] het vermogen is dat de warmtepomp levert aan het gebouw; P_{ATES} [W] de warmte onttrokken aan het grondwater, P_e [W] de elektriciteit gebruikt door de warmtepomp en COP_{hp} de coëfficiënt of performance van de warmtepomp. Vergelijking (6) laat zien dat alle elektriciteit die door de warmtepomp wordt gebruikt bijdraagt aan de warmte output. De totale hoeveelheid warmte die vanuit de bron wordt geleverd tussen t_0 en t berekend volgens:

$$E_{h,ATES}(t_0 \rightarrow t) = \int_{t_0}^t P_{ATES} dt = c_w \Delta \bar{T}_h \int_{t_0}^t Q dt = c_w V_h \Delta \bar{T}_h \quad (7)$$

met

$$P_{ATES} = c_w Q (T_w - T_c) = c_w Q \Delta T \quad (8).$$

De integratie wordt uitgevoerd voor een heel verwarmingsseizoen ($t_0 \rightarrow t$). V_h [m^3] is het verwachte seizoenale opslag volume voor verwarming. ΔT [K] is het momentane temperatuurverschil tussen de warme (T_w) en koude bron (T_c) well, $\Delta \bar{T}_h$ is het gemiddelde temperatuurverschil over de integratie periode. Q [m^3/h] is het uurdebiet van de warme naar de koude bron en c_w [$J/m^3/K$] is de volumetrische warmte capaciteit van het water. Door V_h in vergelijkingen (6) en (7) te substitueren, wordt de hoeveelheid warmte E_h [J] die het gebouw krijgt inzichtelijk:

$$E_h = c_w V_{h,T_w > 40} \Delta \bar{T}_h \frac{COP_{hp}}{COP_{hp} - 1} + c_w V_{h,T_w < 40} \Delta \bar{T}_h \quad (9).$$

Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de warmte die direct uit de bron wordt geleverd bij opslag en onttrekkingstemperaturen boven de 40°C en de warmte die via de warmtepomp wordt geleverd. De benodigde hoeveelheid energie wordt ook inzichtelijk gemaakt, zowel het elektriciteitsgebruik van de warmtepomp:

$$E_e = \frac{E_{h,T_w < 40}}{COP_{hp} - 1} \quad (10).$$

Ook de benodigde hoeveelheid warmte die in de warme bron wordt opgeslagen.

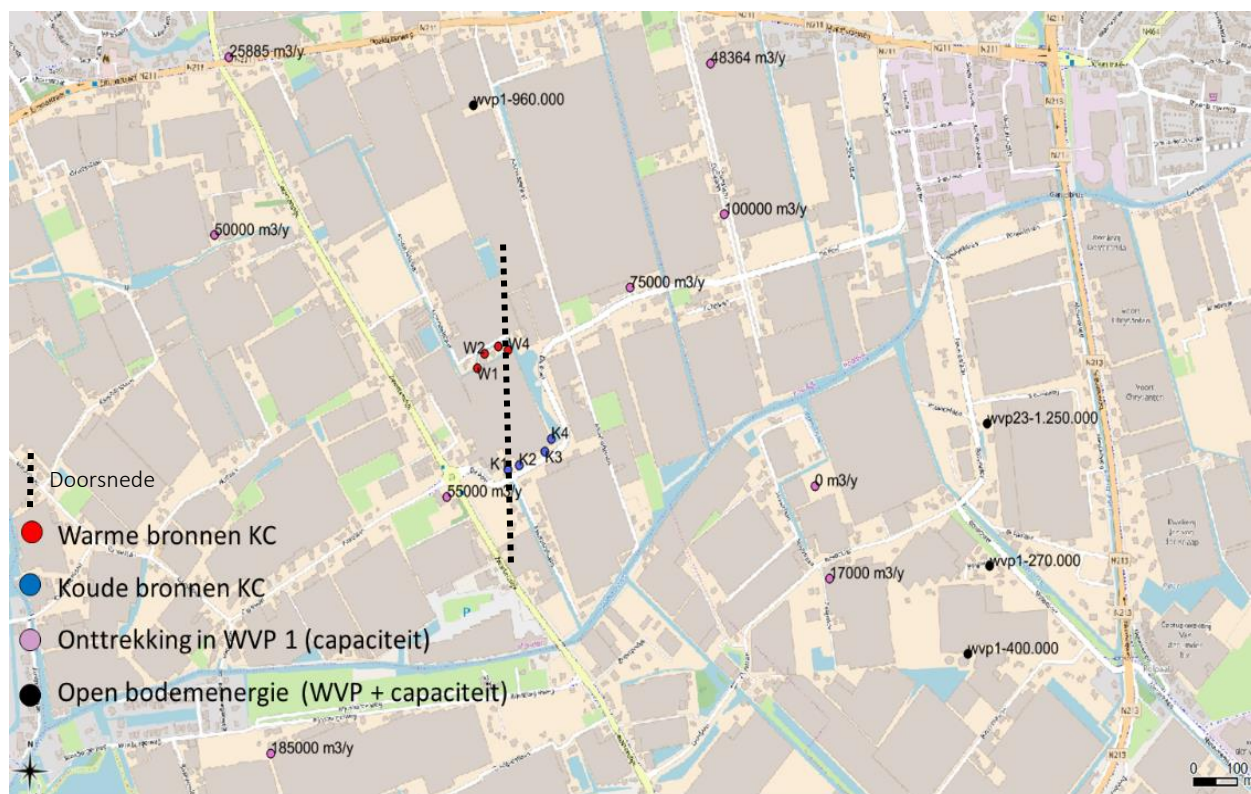
Bijlage III Overzichtskaart en monitoringslocaties

De monitoringsvoorschriften zijn erop gericht om de warmte opslag in WVP 2 te monitoren. De warmte opslag vindt echter plaats in WVP 2 en 3. Werkzaamheden in september 2019 moeten er voor zorgen dat de verspreiding van warmte en het effect op de waterkwaliteit beter gemeten kunnen worden. Voor het meten van verwarmd water is er een peilbuis geboord op korte afstand (5m) van warme bron 1 tot in WVP2. Daarnaast zijn er 2 diepe boringen gedaan om de temperatuur verdeling te meten tot in WVP3 d.m.v. DTS lussen. Binnen het lopende TKI-project zullen deze nieuwe monitoringspunten worden bemonsterd om het effect van de warmteopslag te onderzoeken. Daarnaast zijn er voor het monitoren van de waterkwaliteit monsterpunten in het bronwater bij de warmtewisselaar in de technische ruimte (1), de peilbuis op 20m van de warme bron (2) en de referentiepeilbuis (3) voorzien. Er zijn de afgelopen jaren al verschillende opslag cycli geweest, waardoor de verschillende waterkwaliteiten vanuit WVP 2 en 3 al met elkaar vermengd zijn geraakt. Dus bij alle locaties wordt er een monster onttrokken en geanalyseerd dat dan bestaat uit een mengsel van water uit WVP 2 en WVP 3. Het temperatuur effect op de waterkwaliteit van dit mengsel kan nog steeds representatief gemeten worden in de verschillende monsterpunten. Het effect op de waterkwaliteit in de bodem wordt gemeten in de peilbuizen. Omdat de monsternamen punten alleen in WVP 2 zitten wordt het effect van het bodemmateriaal van WVP 3 op deze waterkwaliteitsveranderingen niet inzichtelijk.

De temperatuurmonitoring d.m.v. DTS lussen wordt vanaf september 2019 op 4 locaties gemeten. De 2 originele DTS lussen die tot WVP2 gaan meten de temperatuur op 2.5m en 20m afstand van warme bron 1. De in september 2019 geboorde DTS lussen zijn tussen de twee originele DTS lussen geplaatst met een diepte van 170m –mv waardoor zowel WVP2 als WVP3 en de tussenliggende lagen gemonitord kunnen worden.

Overige gebruikers van grondwater

Er is geen drinkwaterbeschermingsgebied in de nabijheid van Koppert-Cress. De dichtstbijzijnde natuur waarde is de Monsterse vaart op circa 1200m, en de dichtstbijzijnde aardkundige waarde is de Grote Gantel op circa 300m (WKOtool), die ondervinden beiden geen negatieve thermische effecten van het bodemenergiesysteem van Koppert-Cress (WKOtool). Er zijn 3 gesloten bodemenergiesystemen bekend, de dichtstbijzijnde bevindt zich op 1200m en heeft zijn bodemwarmtewisselaars tot 105m diepte (LGR, via ODH). In Figuur 0-3 zijn de locaties van de overige grondwatergebruikers weergegeven (LGR via ODH). De dichtstbijzijnde grondwater gebruikers zijn 3 permanente grondwater onttrekkingen in WVP 1 op circa 150, 500 en 750m afstand (WKOtool en provinciale grondwater database).



Figuur 0-3. Locatie van overige grondwatergebruiken in de buurt van Koppert-Cress (bron: provinciale grondwater database)

Tabel 0-2. Overzicht van omgevingsbelangen binnen straal van 1500m (niet allemaal zichtbaar op kaart in Figuur 0-3)

Functie	Afstand* [m]	X	Y	Kenmerken
gietwater	149	73000	448000	wvp1-55000 m3/y
gietwater	304	73416	448422	wvp1-75000 m3/y
Obes	491	73060	448791	wvp1-960.000
gietwater	562	73630	448570	wvp1-100000 m3/y
gietwater	607	73837	448022	wvp1-0 m3/y
gietwater	655	72470	448528	wvp1-50000 m3/y
gietwater	693	73870	447835	wvp1-17000 m3/y
gietwater	739	73600	448875	wvp1-48364 m3/y
gietwater	787	72598	447482	wvp1-185000 m3/y
gietwater	835	72504	448888	wvp1-25885 m3/y
Obes	992	74229	448148	wvp23-1.250.000
Obes	1,031	74235	447860	wvp1-270.000
Obes	1,043	74185	447683	wvp1-400.000
Gbes	1,260	71916	447747	wvp1-4x105m
gietwater	1,297	72570	449480	wvp1-11000 m3/y
gietwater	1,322	71769	448013	wvp1-49104 m3/y
Gbes	1,333	71750	448059	3x90m
gietwater	1,461	74390	447215	wvp1-44000 m3/y

* Minimale afstand tot dichtstbijzijnde bron van Koppert-Cress

Bijlage IV Voorspelde thermische effecten

Temperatuurverdeling in de bodem in de toekomst

Op basis van het toekomstige energiegebruik van Koppert-Cress dat is vastgesteld in §2.2.1, is in deze paragraaf inzichtelijk gemaakt wat de temperatuur effecten in de bodem zijn van het toekomstige energiegebruik, met de huidige filterstelling. Hierbij is de berekende temperatuurverdeling in de ondergrond september 2019 als startpunt van de berekeningen genomen. Om de dynamiek van het bodemenergiesysteem van Koppert-Cress zo goed mogelijk mee te nemen in de simulaties, zijn de verpompte hoeveelheden en de infiltratie temperaturen van 2017-2018 als basis genomen en geschaald naar het benodigde opslag volume in de scenario's voor de effect bepaling. Daarbij wordt er vanuit gegaan dat de ΔT die wordt bewerkstelligd tijdens verwarmen en koelen gelijk blijft aan de huidige bedrijfsvoering. De volumes van 2017-2018 worden dus naar rato aangepast om de verwachte hoeveelheid volumes per seizoen te simuleren (Bijlage 2.2.1), daarbij worden twee scenario's gesimuleerd om rekening te houden met de toekomstige balanssituatie (A) en het koude overschot dat de eerste jaren nog zal optreden (B), Tabel 0-3. De jaar- en dag-gemiddelde infiltratie temperatuur in de simulaties zijn afgeleid uit de monitoringsdata van de laatste jaren van gebruik:

- Warme bron: $T_{\text{gem}} = 18.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. $T_{\text{max}} = 28^{\circ}\text{C}$

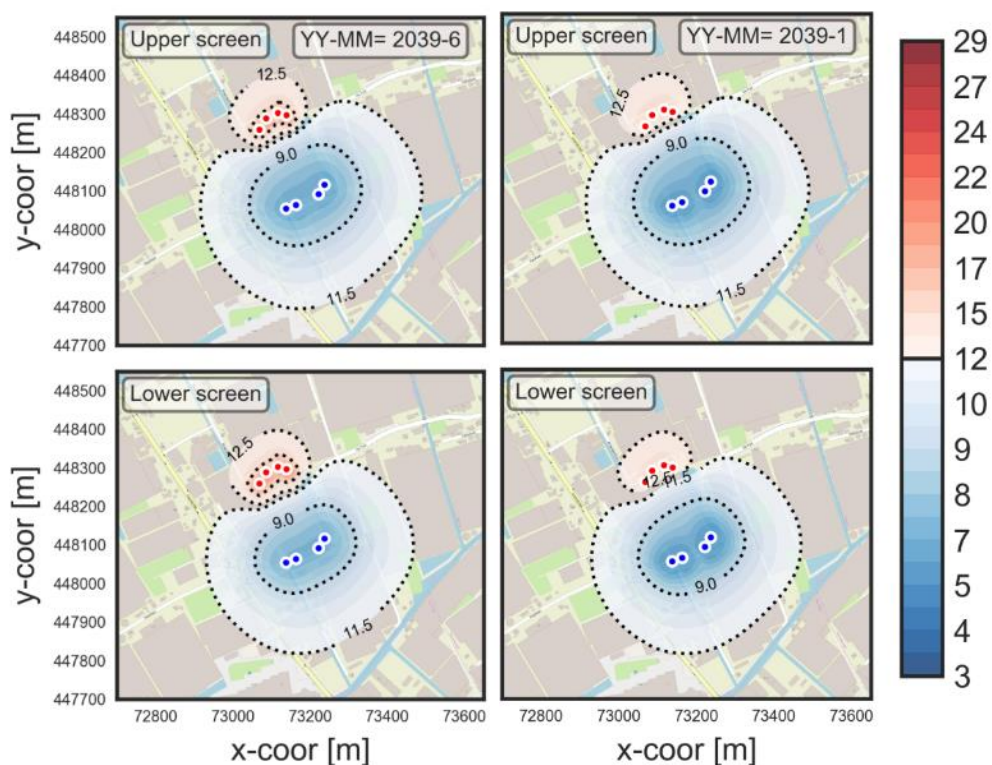
- Koude bron: $T_{\text{gem}} = 6.5^{\circ}\text{C}$. $T_{\text{min}} = 5^{\circ}\text{C}$

Tabel 0-3. Energie en grondwaterhoeveelheden zoals toegepast in het grondwatermodel

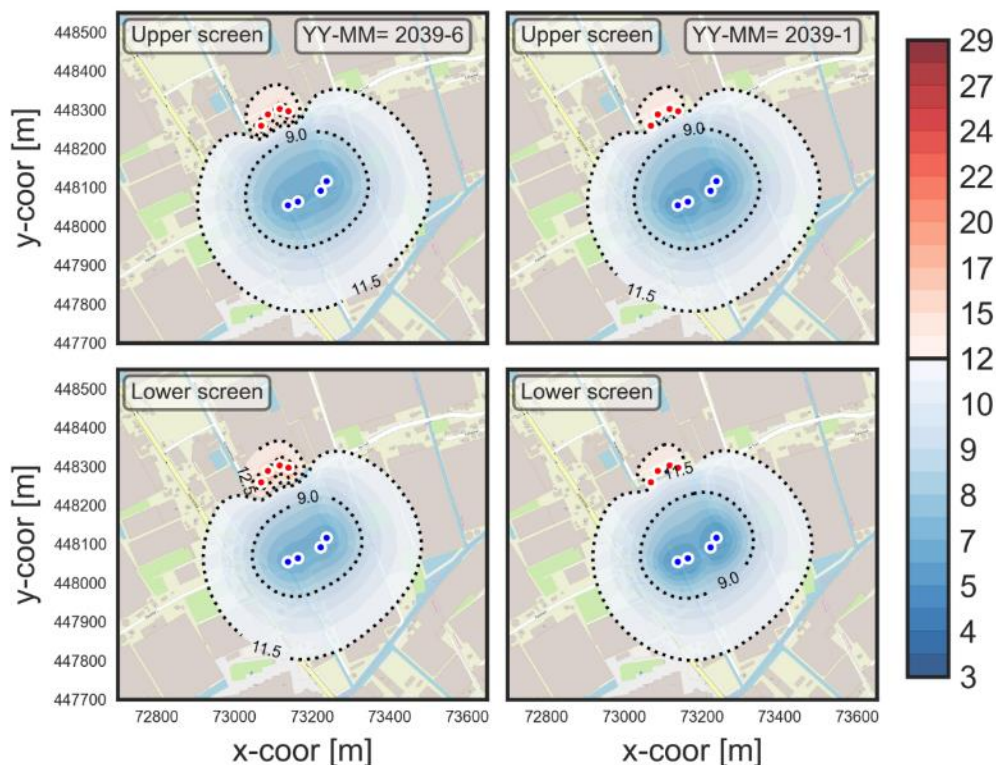
	Verwarmen			Koelen			Energie balans ⁶
	E	ΔT	Volume	E	ΔT	Volume	Koude overschot
	[TJ]	[$^{\circ}\text{C}$]	[m^3]	[TJ]	[$^{\circ}\text{C}$]	[m^3]	[%]
2012-2019	Conform data						
A: Balans	35	10	850.000	35	12	700.000	100%
B: Onbalans	35	10	850.000	24	12	480.000	146%

Koppert-Cress heeft een koude overschot opgebouwd, de verwachting is echter dat Koppert-Cress op de lange termijn in balans gaat opereren. Voordat alle aanpassingen in het systeem zijn verwerkt zal het huidige koude overschot van ca 150% echter nog blijven bestaan. Om dus ook de eerste jaren van de nieuwe vergunning situatie aan de vergunningsvoorschriften te kunnen voldoen wordt een koude overschot aangevraagd.

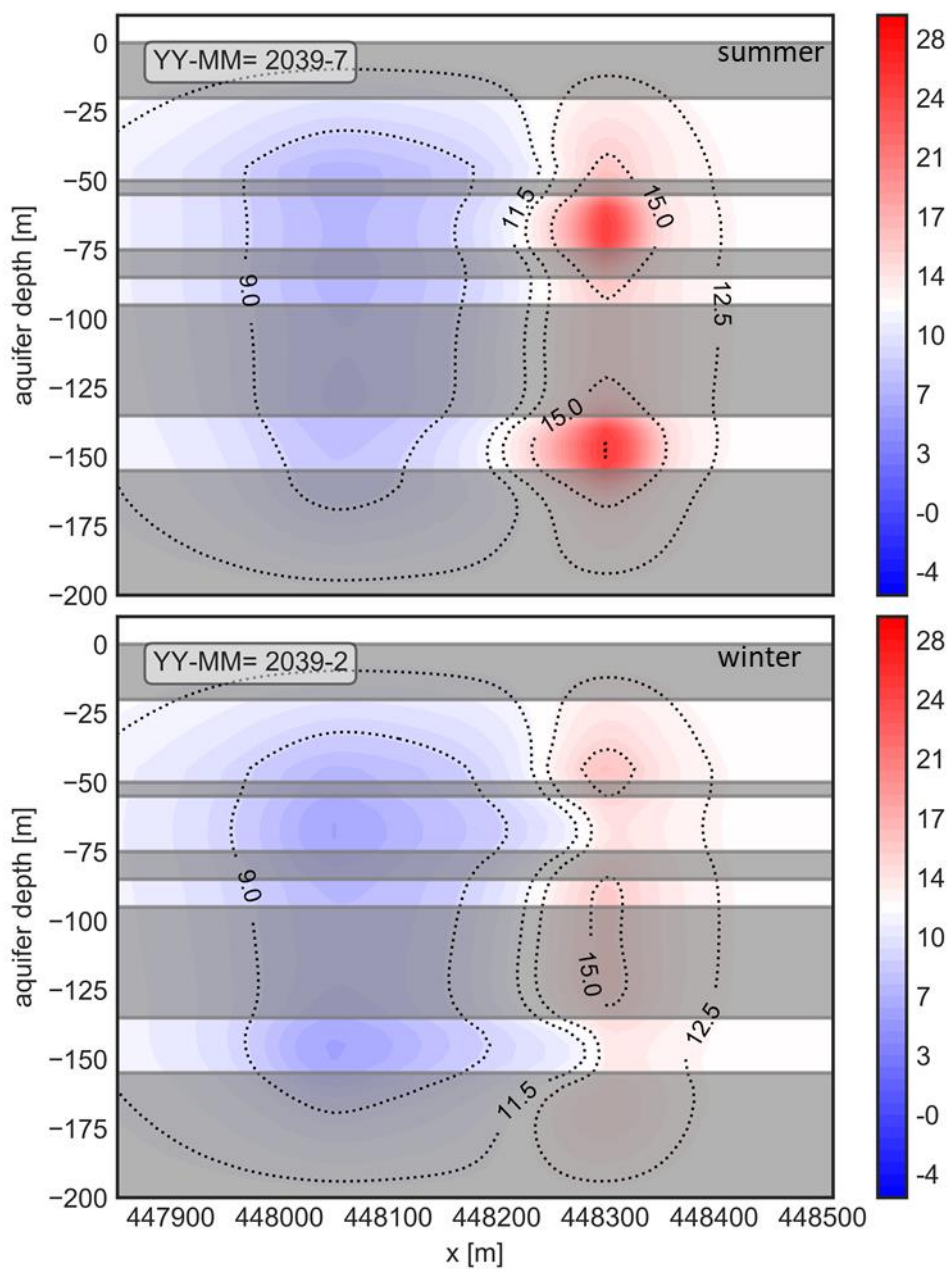
⁶ Bepaald conform berekeningswijze BUM-BE deel 1



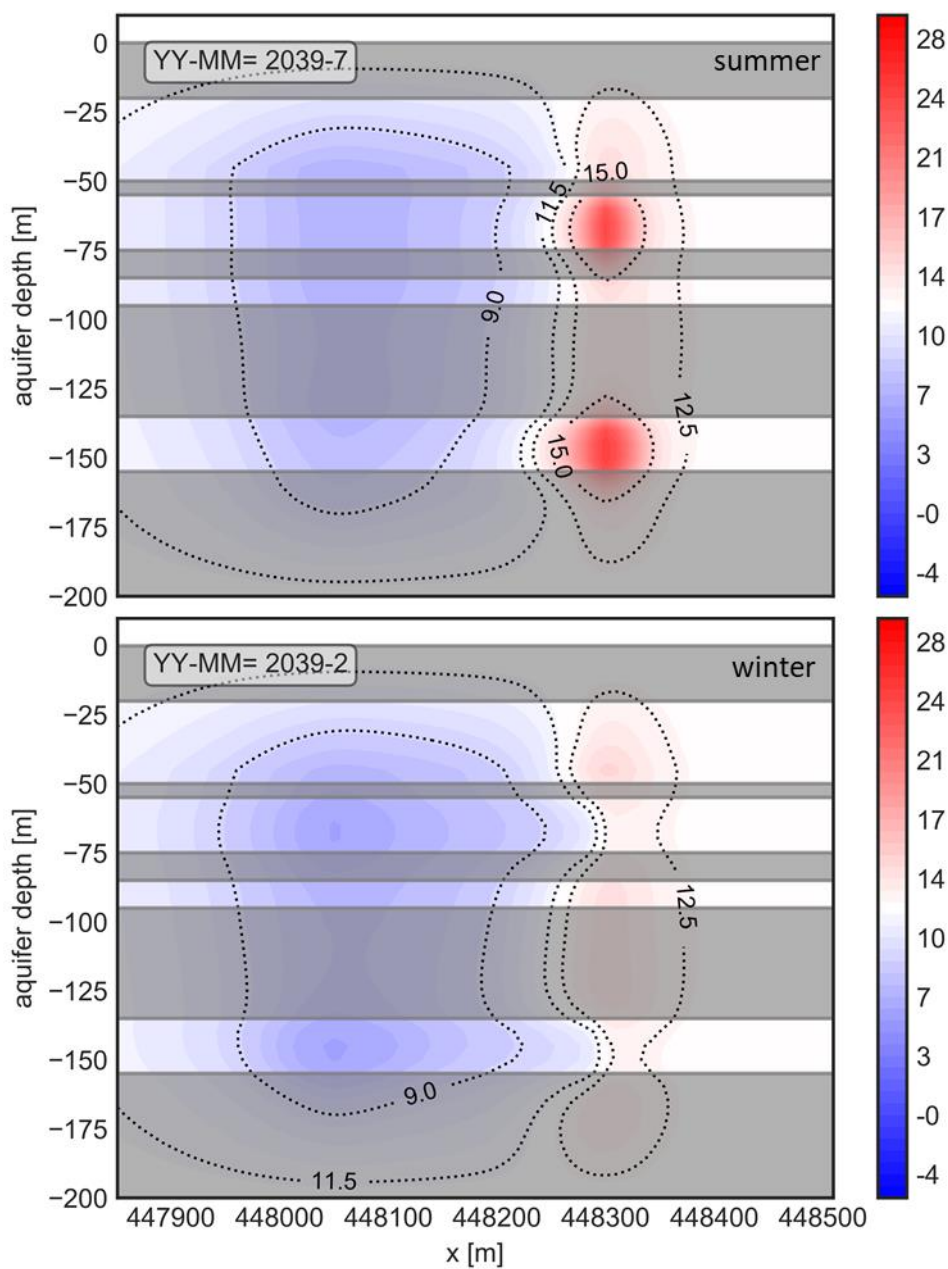
Figuur 0-4. Temperatuur in WVP 2 en 3 in de laatste zomer (links) en winter (rechts) van de simulatie (2039) met scenario A.



Figuur 0-5. Temperatuur in WVP 2 en 3 in de laatste zomer (links) en winter (rechts) van de simulatie (2039) met scenario B.

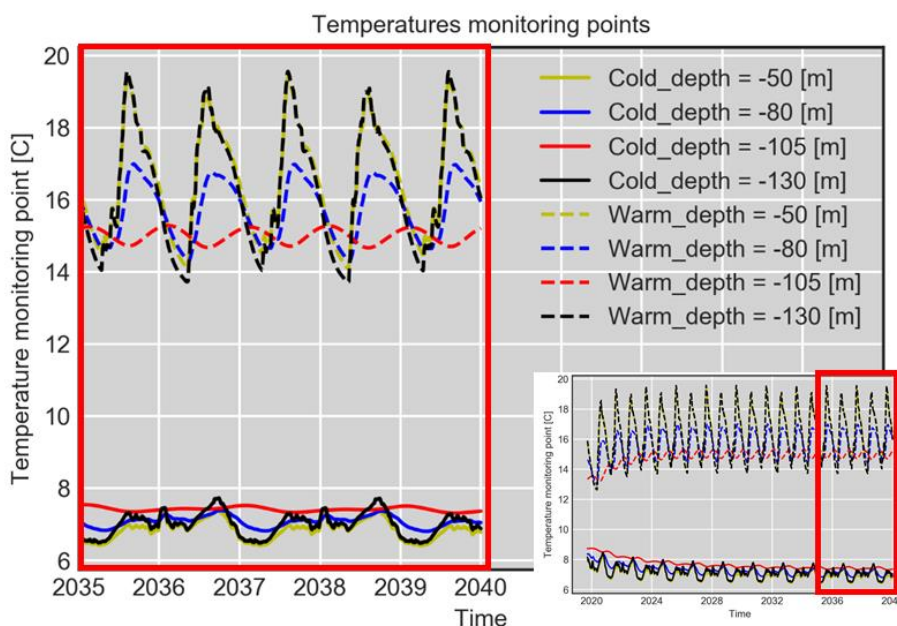


Figuur 0-6. Dwarsdoorsnede van temperatuur verdeling ter hoogte van oostelijke warme en westelijke koude bron (ligging doorsnede is weergegeven in Figuur 0-3) voor scenario A, boven: zomer 2039, onder: winter 2039. Kijkrichting: westelijk



Figuur 0-7. Dwarsdoorsnede van temperatuur verdeling ter hoogte van oostelijke warme en westelijke koude bron (ligging doorsnede is weergegeven in Figuur 0-3) voor scenario B, boven: zomer 2039, onder: winter 2039. Kijkrichting: westelijk

Temperatuur in boven- en onderliggende aquifers



Figuur 0-8. Temperatuurverloop op punten boven en onder warme bron 2 en koude bron 2, voor scenario A, ingezoomd op 2035-2040. Zie Figuur 2-8 **Error! Reference source not found.** voor exacte locatie van de monitoringspunten.

Uit de effectberekeningen blijkt dat de grootste temperatuur veranderingen buiten de opslag pakketten optreden in de lagen tussen filters. Figuur 0-8 laat zien dat de maximale temperatuur onderin WVP 1 (50m–mv) niet hoger wordt dan 20°C en dat na ca. 7-8 jaar het temperatuur verloop over de seizoenen stabiliseert. In Tabel 0-4 zijn voor scenario A en B enkele kentallen opgenomen voor de situatie dat de opslag in WVP 2/3 wordt gedaan zoals nu het geval is. Uit Tabel 0-4 blijkt dat de ruimtelijke verspreiding van de 25°C contour niet verder reikt dan enkele meters vanaf de bron, en dit gebeurt alleen een zeer korte periode per jaar (Juli / Augustus). Dit is het geval omdat er maar heel sporadisch gemiddeld voor de hele dag water met meer dan 25°C wordt geïnjecteerd. De temperatuur van het water dat wordt geïnjecteerd met hoge temperatuur wordt vervolgens relatief snel verspreid over a) het water wat er al zat en b) met het water dat de daaropvolgende injectie/onttrekkingscyclus wordt verpompt.

Ten opzichte van de effecten die in beeld zijn gebracht voor de vergunningsaanvraag in 2011 neemt de ruimtelijke verspreiding van de 12,5°C contour enkele tientallen meters toe in scenario A en af in scenario B. De 11,5°C contour is destijds niet inzichtelijk gemaakt, maar gezien de balanssituatie die toen is beschouwd was die naar verwachting ook 90m. De 11,5°C contour neemt dus wel fors toe in beide scenario's. Afkoeling leidt niet tot negatieve grondwaterkwaliteitseffecten. Ondanks het koude overschot in scenario B is de 11,5°C contour in beide scenario's gelijk, de koude bel lijkt niet meer te groeien. Dit geeft aan dat met het koude overschot van 150% waar Koppert-Cress nu al vele jaren op draait er in deze situaties een evenwicht is ontstaan tussen het surplus aan koude dat wordt geïnfiltrerd en de opwarming via conductie aan de randen van de koude bel.

Tabel 0-4. Resultaten scenario A en B in verschillende lagen

	Vergunning 2011 [2]	Scenario A	Scenario B
Max. temp in WVP 1 (°C)	n.b.	19.6	18.8
12.5°C contour^ (m)	90	102	73
25°C contour^ (m)	n.b.	10	10
11.5° contour^ (m)	90	210	210

^maximale afstand van de temperatuur contour t.o.v. de warme bron (12°C/25°C) of de koude bron (11.5°C) in WVP3.

Bijlage V Analyse kort-cyclisch rendement

Uit de analyse van de gebruiksdata van KC blijkt dat een belangrijk deel van de opslag en terugwinning (ca 10 TJ van de 14TJ) op basis van korte opslag-terugwin cycli plaats vindt. De 10TJ wordt verdeeld over 180 dagen, wat resulteert in een gemiddeld dag debiet voor de kort cyclische opslag van ca. 800 m³/d. Afhankelijk van de uitgangspunten van de temperatuurverschillen tussen de bronnen en variaties in vraag en aanbod van warmte kan dit debiet hoger of lager uitvallen.

Zoals redelijkerwijs kan worden verwacht is het rendement van de opslag erg laag bij een lege bron (scenario 2-1 in Tabel 0-5, 2-8 in Tabel 0-6). Zodra de bron enigszins is gevuld is het rendement van de kort cyclische opslag beter dan bij de seizoensopslag.

De week opslag is altijd efficiënter dan dag/nacht opslag. Maar bij een gevulde bron, zijn de verschillen in efficiëntie beperkt. Ook de hoeveelheid warmte die per cyclus wordt opgeslagen en teruggewonnen zorgt dan voor verwaarloosbaar kleine verschillen.

Alleen bij een lege bron zijn de verschillen in efficiëntie tussen week en dag erg groot, ook maakt het dan uit of er 400 m³ of 1600 m³ per dag wordt opgeslagen, hoe meer hoe beter.

Tabel 0-5. Resultaten Kort cyclische opslag bij 25°C opslag temperatuur

scenario - simulatie nr	[-]	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-1_1600
Warmte opslag	[T_warm]	25	25	25	25	25	25	25	25
Volume initieel in bron	[m3]	0	25000	150000	25000	25000	25000	150000	0
	Week								
Volume in / uit	[m3 / week]	2800	2800	2800	5600	8400	11200	11200	11200
rendement warme bron	[-]	0.66	0.93	0.99	0.90	0.89	0.88	0.98	0.71
stroom gebruik WP tov geleverde warmte	[GJe / GJw]	0.27	0.22	0.21	0.22	0.22	0.23	0.21	0.26
opgeslagen warmte t.o.v. geleverde warmte	[GJw / GJw]	0.95	1.66	4.97	1.33	1.22	1.17	2.01	0.96
	dag								
Volume in / uit	[m3 / dag]	400	400	400	800	1200	1600	1600	1600
rendement warme bron	[-]	0.64	0.88	0.98	0.85	0.84	0.83	0.97	0.71
stroom gebruik WP tov geleverde warmte	[GJe / GJw]	0.27	0.23	0.21	0.23	0.23	0.23	0.21	0.26

Tabel 0-6. Resultaten Kort cyclische opslag bij 45°C opslag temperatuur.

scenario - simulatie nr	[-]	2-8	2-9	2-10	2-11
Warmte opslag	[T_warm]	45	45	45	45
Volume initieel in bron	[m3]	0	25000	150000	25000
	Week				
Volume in / uit	[m3 / week]	2800	2800	2800	5600
rendement warme bron	[-]	0.56	0.86	0.98	0.83
stroom gebruik WP tov geleverde warmte	[GJe / GJw]	0.21	0.13	0.00	0.14
	dag				
Volume in / uit	[m3 / dag]	400	400	400	800
rendement warme bron	[-]	0.54	0.79	0.97	0.76
stroom gebruik WP tov geleverde warmte	[GJe / GJw]	0.21	0.16	0.00	0.16

Conclusie: vroeg in het voorjaar is kort cyclische opslag en winning minder effectief, maar op deze manier functioneert de OBES als prima dag-nacht buffer.

Bijlage VI Resultaten Chemische analyses

	Date	Chloride	Nitrat	Nitraat	Methaaron	DOC	PO4-P	HCO3	NH4-N	Sulfaat	Tem p	pH
Unit		mg/L	mg N/l	mg NO3/l	µg/l	mg C/l	mg PO4-P/l	mg/l	mg NH4-N/l	mg SO4/l	°C	
PB1	3/9/2015	5914		< 6.3			<1.3	281	14.0	528.0		7.0
	5/19/2015	7100	<0.2	<1	10	3.60	0.39	339	16.5			7.0
	9/23/2015	5400	< 0.2	< 1.0	280	5.20	0.84	380	14.5	550	15.8	8.2
	1/5/2016	6200	< 0.2	< 1.0	75	4.50	1.39	385	15.8	560	18.6	7.0
	3/16/2016	6300	< 0.2	<1.0	74	4.60	0.86	370	16.4	610	16.6	7.2
	11/27/2017	6000	< 0.2	<1.0	290	4.80	1.97	395	15.3	540	16.3	6.9
	4/9/2018	6000	<0.2	<1.0	95	4.70	0.97	390	15.3	560	17.8	6.9
	6/11/2018	6300	<0.2	<1.0	97	5.00	1.30	366	11.0	600	13.1	6.8
	9/17/2018	6500		<0.2	45	4.50	0.50	381	12.0	580	12.9	6.3
	2/3/2020	6300		<0.2	13	4.80	0.49	380	12.0	590	14.4	
	3/16/2020	6400		<0.2	25	5.30	0.49	365	9.9	630	15.5	6.9
	8/10/2020	6500		<0.2	30	4.80	0.49	395	12.0	560	13.3	7.0
9/14/2020	6500		<0.2	25	4.90	0.50	370	12.0	560	13.2	6.7	
PB2	3/9/2015	6700		<0.2	23	5.00	0.51	365	12.0	570	16.1	6.8
	5/19/2015	7200		<0.2	29	5.00	0.49	370	13.0	610	16.4	7.2
	9/23/2015	4400	< 0.2	< 1.0	76	8.20	0.67	385	13.8	360	17.4	7.9
	1/5/2016	5100	< 0.2	< 1.0	84	4.50	1.10	410	14.1	380	18.8	7.0
	3/16/2016	4700	< 0.2	<1.0	49	4.50	0.39	430	13.8	370	17.4	7.0
	11/27/2017	5000	< 0.2	<1.0	61	4.50	1.63	425	14.8	400	14.9	6.9
	4/9/2018	5100	<0.2	<1.0	61	4.70	0.70	475	14.5	420	17.3	6.8
	6/11/2018	5600	<0.2	<1.0	39	4.80	< 1	393	10.0	500	13.3	6.9
	9/17/2018	6100		<0.2	23	4.70	0.48	391	11.0	540	14.1	6.9
	2/3/2020	5900		<0.2	12	5.20	0.51	380	11.0	540	13.7	
	3/16/2020	6000		<0.2	30	6.30	0.48	400	11.0	580	13.6	7.0
	8/10/2020	6500		<0.2	27	5.00	0.50	395	12.0	550	13.0	7.0
9/14/2020	6300		<0.2	23	5.10	0.51	375	12.0	550	12.8	6.9	
PB3	2/3/2020	6300		<0.2	27	5.00	0.50	385	12.0	530	13.6	6.7
	3/16/2020	6600		<0.2	29	4.90	0.49	385	13.0	550	16.0	7.1
	8/10/2020	4400		<0.2	63	4.80	0.49	440	9.6	320	15.9	7.6
	9/14/2020	4500		<0.2	22	4.90	0.49	425	10.0	320	13.4	6.7
OBES	3/9/2015	6800		<0.2	190	4.80	0.38	375	13.0	590	24.6	7.1

Date	Chloride	Nitrat	Nitraat	Methaaron	DOC	PO4-P	HCO3	NH4-N	Sulfaat	Temperatuur	pH
5/19/2015	7400		<0.2	280	4.60	0.41	380	12.0	620	18.5	7.2
9/23/2015	5800	< 0.2	< 1.0	33	4.40	1.20	375	15.5	620	17.1	8.4
1/5/2016	6800	< 0.2	< 1.0	36	4.40	1.29	370	16.0	610	18.5	7.0
3/16/2016	6400	< 0.2	<1.0	120	4.20	1.28	380	15.9	630	17.1	7.1
11/27/2017	6800	< 0.2	<1.0	24	4.00	1.66	360	16.8	640	17.0	6.8
4/9/2018	6300	<0.2	<1.0	28	4.40	1.36	375	15.9	620	18.1	6.9
6/11/2018	6600	<0.2	<1.0	23	4.10	1.30	348	12.0	670	19.3	7.0
9/17/2018	6900		<0.2	17	4.20	0.37	362	12.0	650	15.3	7.1
2/3/2020	6400		<0.2	12	4.50	0.38	375	10.0	630	13.6	
3/16/2020	6700		<0.2	23	4.10	0.38	360	12.0	670	26.6	7.2
8/10/2020	6800		<0.2	28	4.10	0.37	350	12.0	600	26.4	7.1
9/14/2020	6700		<0.2	24	4.30	0.40	375	12.0	590	18.3	7.1

	Date	EGV	Zuurstof	Temp	Lithium	Beryllium	Boor	Natrium	Magnesium	Aluminium	Kalium	Calcium
Unit		mS/m	mg/l	°C	µg/l	µg/l	µg/l	mg/L	mg/L	µg/l	mg/l	mg/l
PB1	3/9/2015	18.5	5.0		76	< 0.01	370	2349	454	59.00	49	321
	5/19/2015	18.7	2.1	12.50	64	< 0.01	300	2840	525	54.00	88	376
	9/23/2015	19.0	1.7	12.90	115	<0.10	475	2939	525	<10	95	458
	1/5/2016	18.1	0.8	12.50	78	0.01	225	2727	495	15.00	83	461
	3/16/2016	18.6	1.3	12.50	88	<0.01	315	2835	529	<1.0	87	470
	11/27/2017	15.5	3.5	13.40	68	<0.01	510	2958	547	<1.0	98	427
	4/9/2018	18.6	2.9	11.30	71	0.04	475	2712	474	1.30	124	419
	6/11/2018			11.80	68	0.01	230	3432	559	5.00	115	449
	9/17/2018	15.4	0.6	14.10	96	<0.01	390	2997	559	1.00	106	632
	2/3/2020	19.5	0.3	11.70	120	0.01	540	3011	608	1.40	110	711
	3/16/2020	18.5		11.30	87	<0.01	395	2480	519	3.00	108	591
	8/10/2020		0.8	17.50	115	0.02	660	2591	468	5.10	89	496
9/14/2020	19.0	1.7	17.10	135	0.01	680	2728	569	2.70	101	571	
PB2	3/9/2015	14.8	2.1		70	< 0.01	295	1553	430	25.00	49	324
	5/19/2015	14.6	2.3	12.50	59	< 0.01	330	2085	495	40.00	84	404
	9/23/2015	14.7	0.9	12.50	100	<0.10	335	1834	479	<10	82	449
	1/5/2016	15.3	0.8	12.50	74	<0.01	190	2011	497	16.00	85	493
	3/16/2016	15.7	0.7	12.50	79	<0.01	230	7972	570	<1.0	78	509
	11/27/2017	16.4	4.4	12.30	67	<0.01	705	3454	588	1.70	117	426
	4/9/2018	18.9	2.8	12.10	69	0.07	375	2574	476	<1.0	104	429
	6/11/2018			12.10	67	0.01	185	3495	556	1.20	97	470
	9/17/2018	16.2	0.3	12.20	90	<0.01	215	2778	523	14.00	92	697
2/3/2020	18.8	2.2	12.20	115	<0.01	410	3010	565	1.30	91	695	

	Date	EGV	Zuurstof	Temp	Lithium	Beryllium	Boor	Natrium	Magnesium	Aluminium	Kalium	Calcium
PB3	3/16/2020	18.7			96	<0.01	375	2601	523	2.60	96	607
	8/10/2020		1.1	15.50	110	<0.01	425	2401	459	4.60	73	520
	9/14/2020	18.0	1.0		125	<0.01	445	2480	550	2.90	80	605
	2/3/2020	0.5	2.0	15.80	90	<0.01	325	1749	487	1.90	87	641
	3/16/2020	13.4		15.10	81	<0.01	280	1421	453	3.20	93	578
OBES	8/10/2020		5.9	21.30	115	0.02	775	2648	468	6.60	91	482
	9/14/2020	20.0	1.8	30.10	130	<0.01	710	2862	586	3.60	100	574
	3/9/2015	19.7	2.5		84	< 0.01	630	2400	472	18.00	54	327
	5/19/2015	19.7	1.6		80	< 0.01	595	3045	550	26.00	94	382
	9/23/2015	19.9	0.8		120	<0.10	640	3077	555	<10	96	443
	1/5/2016	20.0	4.9		100	0.01	520	3209	544	<1.0	107	466
	3/16/2016	20.0	2.9		100	<0.07	475	3044	545	<1.0	92	466
	11/27/2017	20.3	6.3		71	<0.01	535	2953	553	1.60	99	426
	4/9/2018	21.3	5.6		84	0.03	580	3091	499	<1.0	130	433
	6/11/2018				76	<0.01	295	3223	561	2.10	116	434
	9/17/2018	16.4	3.1		100	<0.01	435	3150	563	1.40	102	612
	2/3/2020	19.7	0.3		120	<0.01	660	3241	586	1.30	110	664
	3/16/2020	18.7			110	<0.01	570	2766	562	2.40	119	618
	8/10/2020	19.4	0.5		105	<0.01	675	2830	501	4.70	95	518
	9/14/2020	20.0	5.0		135	<0.01	730	2878	582	2.30	101	570

	Date	Scandium	Titanium	Vanadium	Chroom	Mangaan	Ijzer	Cobalt	Nikkel	Koper	Zink	Gallium
Unit		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/L	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
PB1	3/9/2015	6.20	9.10	< 0.05	3.30	560	16.95	2.10	11.00	2.20	35.00	0.04
	5/19/2015	6.70	11.00	< 0.05	3.50	460	15.88	1.80	11.00	2.10	6.20	0.03
	9/23/2015	< 1	< 5.0	< 0.50	< 5.0	650	8.83	0.88	8.70	< 5.0	< 5.0	<0.10
	1/5/2016	4.40	11.00	0.56	2.80	440	76.59	1.10	6.90	7.50	3.80	0.05
	3/16/2016	5.10	12.00	0.54	3.20	525	76.93	1.20	6.70	4.60	4.30	0.08
	11/27/2017	6.20	22.00	0.25	2.40	505	16.50	1.30	12.00	29.00	1.70	<0.01
	4/9/2018	3.10	15.00	<0.05	2.90	490	16.66	1.00	7.70	17.00	7.40	0.08
	6/11/2018	3.40	12.00	0.59	3.10	570	17.04	0.99	8.70	12.00	9.50	0.03
	9/17/2018	4.40	18.00	0.40	3.50	540	16.24	1.30	11.00	20.00	6.40	0.03
	2/3/2020	<1.0	<0.50	0.39	0.52	425	13.55	0.16	2.10	<0.50	2.80	0.02
	3/16/2020	<1.0	<0.50	0.30	0.78	380	11.25	0.08	0.62	<0.50	2.70	0.04
	8/10/2020	<1.0	<0.50	0.45	0.61	450	12.90	0.20	3.30	1.50	6.80	0.03
9/14/2020	<1.0	<0.50	0.34	<0.50	430	12.35	0.20	3.30	<0.50	2.60	0.02	
PB2	3/9/2015	6.40	8.20	< 0.05	3.40	540	19.00	2.70	12.00	2.20	96.00	0.04
	5/19/2015	7.40	10.00	< 0.05	3.90	585	21.09	2.10	12.00	2.40	12.00	0.04
	9/23/2015	< 1	< 5.0	< 0.50	< 5.0	530	0.58	0.92	8.40	< 5.0	< 5.0	<0.10
	1/5/2016	4.60	10.00	0.22	2.70	410	18.71	1.20	7.10	5.20	3.10	0.06
	3/16/2016	5.40	11.00	0.29	2.80	570	19.35	1.30	6.90	4.70	3.00	0.05
	11/27/2017	5.90	22.00	<0.05	2.30	260	13.51	1.20	12.00	30.00	9.00	<0.01
	4/9/2018	3.10	15.00	<0.05	2.90	515	18.83	1.10	7.40	17.00	4.40	0.12
	6/11/2018	3.70	11.00	0.62	3.20	620	19.34	1.00	8.10	11.00	4.10	0.03
	9/17/2018	4.50	18.00	0.53	3.50	585	18.54	1.40	10.00	18.00	6.60	0.03
	2/3/2020	<1.0	<0.50	0.37	<0.50	470	14.94	0.11	0.40	<0.50	1.20	0.03
	3/16/2020	<1.0	<0.50	0.34	0.88	445	13.59	0.08	0.38	0.53	2.70	0.05
	8/10/2020	<1.0	<0.50	0.43	0.60	535	15.31	0.14	1.30	1.10	4.10	0.03

	Date	Scandium	Titanium	Vanadium	Chroom	Mangaan	Ijzer	Cobalt	Nikkel	Koper	Zink	Gallium
PB3	9/14/2020	<1.0	<0.50	0.34	<0.50	495	14.87	0.13	0.26	<0.50	2.20	0.02
	2/3/2020	<1.0	0.54	0.29	<0.50	415	11.05	0.26	0.71	0.52	2.80	0.01
	3/16/2020	<1.0	<0.50	0.25	0.66	395	9.53	0.16	0.38	<0.50	0.92	0.03
	8/10/2020	<1.0	<0.50	0.37	0.56	310	10.04	0.19	0.90	0.74	3.20	0.02
OBES	9/14/2020	<1.0	<0.50	0.25	<0.50	295	9.99	0.23	0.67	<0.50	1.60	<0.01
	3/9/2015	5.80	7.70	< 0.05	2.30	290	9.28	1.40	9.40	1.80	17.00	0.02
	5/19/2015	6.40	9.70	< 0.05	2.60	275	10.62	1.50	9.80	1.90	11.00	0.03
	9/23/2015	< 1	< 5.0	< 0.50	< 5.0	310	2.88	0.85	7.80	< 5.0	< 5.0	<0.10
	1/5/2016	4.70	11.00	0.15		330	11.95	1.20	7.60	7.60	7.40	0.06
	3/16/2016	5.30	12.00	<0.05	3.70	325	12.36	1.40	7.90	3.60	8.00	0.74
	11/27/2017	6.20	23.00	<0.05	2.20	495	16.93	1.20	12.00	34.00	2.90	<0.01
	4/9/2018	3.50	11.00	<0.05	2.60	240	12.91	1.10	8.20	8.00	5.60	0.08
	6/11/2018	3.60	10.00	0.10	2.40	365	12.77	1.00	9.50	11.00	20.00	0.03
	9/17/2018	4.40	17.00	0.12	3.40	330	12.06	1.30	11.00	18.00	17.00	0.06
	2/3/2020	<1.0	<0.50	0.28	<0.50	270	10.00	0.11	1.30	<0.50	18.00	0.01
	3/16/2020	<1.0	<0.50	0.25	0.90	280	9.05	0.06	0.58	<0.50	13.00	0.03
	8/10/2020	<1.0	<0.50	0.37	<0.50	300	10.32	0.13	4.40	1.00	56.00	0.01
	9/14/2020	<1.0	<0.50	0.28	<0.50	280	9.87	0.12	0.84	<0.50	22.00	<0.01

	Date	Germanium	Arseen	Seleen	Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirkonium	Niobium	Molybdeen	Ruthenium	Palladium
Unit		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
PB1	3/9/2015	1.90	24.00	57	14	6960	0.11	< 0.50	< 0.50	1.70	0.09	9.80
	5/19/2015	1.60	23.00	62	11	6270	0.09	< 0.50	< 0.50	0.54	0.10	11.00
	9/23/2015	1.10	8.30	25	12	7310	< 0.10	< 0.50	< 0.50	0.59	0.57	10.00
	1/5/2016	7.80	<0.50	<0.50	11	6480	0.10	0.78	<0.05	0.58	0.48	7.00
	3/16/2016	2.20	4.20	13	10	6495	0.09	0.15	<0.05	1.10	0.19	7.80
	11/27/2017	1.40	<0.50	<0.50	11	8015	0.08	0.11	<0.05	1.50	3.50	9.90
	4/9/2018	1.90	<0.50	<0.50	9	5650	0.10	0.20	<0.05	1.10	2.00	6.20
	6/11/2018	0.87	<0.50	<0.50	11	7960	0.10	0.19	<0.05	0.76	0.98	7.20
	9/17/2018	1.10	<0.50	<0.50	12	7265	0.09	0.18	<0.05	1.00	1.00	10.00
	2/3/2020	0.34	<0.50	24	11	7225	0.09	0.09	<0.05	0.30	0.23	6.40
	3/16/2020	0.20	<0.50	31	10	6545	0.10	0.09	<0.05	0.26	0.38	6.80
	8/10/2020	0.33	<0.50	37	12	7630	0.11	0.24	<0.05	0.27	0.09	6.40
9/14/2020	0.21	<0.50	36	12	7370	0.08	0.06	<0.05	0.33	0.04	5.80	
PB2	3/9/2015	2.00	19.00	44	18	6885	0.13	< 0.50	< 0.50	1.60	0.09	9.90
	5/19/2015	2.00	20.00	50	16	6485	0.14	< 0.50	< 0.50	0.66	0.12	11.00
	9/23/2015	0.62	5.30	16	13	7150	< 0.10	< 0.50	< 0.50	< 0.50	0.38	9.60
	1/5/2016	2.00	<0.50	<0.50	13	7095	0.11	0.15	<0.05	0.56	0.40	7.40
	3/16/2016	1.60	3.10	8	72	7235	0.11	0.12	<0.05	1.00	0.26	8.40
	11/27/2017	1.00	<0.50	<0.50	17	8415	0.05	0.05	<0.05	1.60	4.00	9.80
	4/9/2018	1.80	<0.50	<0.50	10	5400	0.14	0.17	<0.05	0.92	2.10	6.10
	6/11/2018	0.92	<0.50	<0.50	12	7800	0.10	0.16	<0.05	0.64	0.96	7.00
	9/17/2018	1.20	<0.50	<0.50	12	7505	0.12	0.19	<0.05	0.78	0.95	10.00
	2/3/2020	0.29	<0.50	9	11	6610	0.10	0.09	<0.05	0.16	0.42	6.20
3/16/2020	0.27	<0.50	31	10	6180	0.10	0.10	<0.05	0.26	0.43	6.40	

	Date	Germanium	Arseen	Seleen	Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirkonium	Niobium	Molybdeen	Ruthenium	Palladium
PB3	8/10/2020	0.30	<0.50	36	11	7350	0.11	0.24	<0.05	0.12	0.14	6.20
	9/14/2020	0.34	<0.50	33	11	7065	0.09	0.07	<0.05	0.13	0.03	5.70
	2/3/2020	0.20	<0.50	7	9	6675	0.10	0.11	<0.05	0.11	0.42	6.00
	3/16/2020	0.26	<0.50	20	9	6145	0.11	0.09	<0.05	0.18	0.46	6.30
	8/10/2020	0.35	<0.50	39	20	7635	0.12	0.23	<0.05	0.27	0.22	6.50
OBES	9/14/2020	0.30	0.62	37	17	7285	0.09	0.05	<0.05	0.27	0.04	5.90
	3/9/2015	1.00	24.00	63	16	7445	0.06	< 0.50	< 0.50	0.45	0.08	10.00
	5/19/2015	1.20	24.00	65	16	6555	0.06	< 0.50	< 0.50	0.49	0.09	10.00
	9/23/2015	0.83	11.00	32	15	7395	< 0.10	< 0.50	< 0.50	0.52	0.19	10.00
	1/5/2016	2.30	<0.50	<0.50	18	7015	0.06	0.71	<0.05	0.70	0.45	7.70
	3/16/2016	3.20	8.00	21	16	6975	0.06	0.17	<0.05	0.77	0.05	8.20
	11/27/2017	1.50	<0.50	<0.50	11	7615	0.09	0.15	<0.05	1.70	3.30	9.80
	4/9/2018	1.90	<0.50	<0.50	16	5900	0.07	0.23	<0.05	1.70	0.79	5.60
	6/11/2018	1.10	<0.50	<0.50	18	7750	0.06	0.15	<0.05	0.80	0.84	7.20
	9/17/2018	1.90	<0.50	<0.50	18	7235	0.06	0.12	<0.05	1.20	0.95	9.90
	2/3/2020	0.31	<0.50	<0.50	17	6965	0.07	0.06	<0.05	0.26	0.62	7.30
	3/16/2020	0.26	<0.50	33	16	6515	0.06	0.05	<0.05	0.33	0.50	6.40
	8/10/2020	0.35	<0.50	38	19	7535	0.08	0.23	<0.05	0.23	0.24	6.50
9/14/2020	0.30	<0.50	37	19	7360	0.06	<0.05	<0.05	0.23	0.03	5.90	

	Date	Zilver	Cadmium	Indium	Tin	Antimoon	Telluur	Cesium	Barium	Lanthanum	Cerium	Praseodymium
Unit		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
PB1	3/9/2015	0.09	0.01	< 0.01	< 0.05	0.06	0.11	0.06	475	0.03	0.07	< 0.01
	5/19/2015	0.02	< 0.01	< 0.05	< 0.05	0.02	0.10	0.06	720	0.03	0.05	< 0.01
	9/23/2015	< 0.20	<0.10	<0.10	< 0.50	< 0.20	< 0.50	0.29	1085	<0.10	<0.10	<0.10
	1/5/2016	0.30	<0.01	0.01	<0.05	0.02	0.54	0.07	505	0.03	0.08	0.01
	3/16/2016	0.02	0.01	0.01	0.21	<0.02	0.41	0.20	800	0.04	0.09	0.01
	11/27/2017	<0.02	<0.01	<0.01	<0.05	0.07	1.40	0.01	915	<0.01	0.03	<0.01
	4/9/2018	0.02	0.05	0.01	<0.05	0.08	0.75	0.07	825	0.04	0.06	0.02
	6/11/2018	0.02	0.05	<0.01	<0.05	0.12	1.10	0.04	1065	0.05	0.07	0.01
	9/17/2018	<0.02	0.04	<0.01	<0.05	0.08	1.60	0.05	1135	0.03	0.04	0.01
	2/3/2020	0.85	<0.01	0.02	<0.05	0.02	0.55	0.46	925	0.04	0.04	<0.01
	3/16/2020	<0.02	0.03	<0.01	0.06	0.16	0.38	0.07	905	0.04	0.06	0.01
	8/10/2020	<0.02	0.04	0.41	<0.05	<0.02	0.17	0.19	385	0.03	0.06	<0.01
	9/14/2020	0.26	0.01	<0.01	<0.05	<0.02	0.09	0.16	930	0.04	0.05	<0.01
PB2	3/9/2015	0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.05	0.07	0.08	0.07	765	0.04	0.07	0.01
	5/19/2015	< 0.02	< 0.01	< 0.05	< 0.05	0.03	0.10	0.07	775	0.05	0.12	0.01
	9/23/2015	< 0.20	<0.10	<0.10	< 0.50	< 0.20	< 0.50	0.11	690	<0.10	<0.10	<0.10
	1/5/2016	0.21	<0.01	0.01	<0.05	0.02	0.43	0.10	1060	0.04	0.10	0.01
	3/16/2016	<0.02	0.01	0.01	0.18	<0.02	0.29	0.13	940	0.04	0.11	0.01
	11/27/2017	<0.02	<0.01	<0.01	<0.05	0.12	1.70	0.08	300	<0.01	<0.01	<0.01
	4/9/2018	<0.02	0.08	0.05	<0.05	0.09	0.87	0.13	945	0.08	0.10	0.06
	6/11/2018	<0.02	0.04	<0.01	<0.05	0.11	1.10	0.07	1010	0.04	0.07	<0.01
	9/17/2018	<0.02	0.03	<0.01	<0.05	0.07	1.40	0.09	995	0.06	0.10	0.02
	2/3/2020	0.57	0.01	<0.01	<0.05	0.03	0.52	0.31	1065	0.04	0.06	0.01
3/16/2020	<0.02	0.03	<0.01	0.10	0.21	0.49	0.15	1000	0.04	0.08	0.01	

	Date	Zilver	Cadmium	Indium	Tin	Antimoon	Telluur	Cesium	Barium	Lanthanum	Cerium	Praseodymium
PB3	8/10/2020	<0.02	0.04	0.14	<0.05	<0.02	0.18	0.34	425	0.03	0.05	<0.01
	9/14/2020	0.07	<0.01	<0.01	<0.05	<0.02	0.08	0.16	995	0.03	0.05	<0.01
	2/3/2020	0.29	<0.01	<0.01	0.11	0.02	0.26	0.10	845	0.09	0.03	<0.01
	3/16/2020	<0.02	0.03	<0.01	0.10	0.20	0.44	0.04	720	0.10	0.04	0.01
OBES	8/10/2020	<0.02	0.04	0.02	<0.05	<0.02	0.23	0.35	390	0.08	0.03	<0.01
	9/14/2020	0.22	<0.01	<0.01	<0.05	<0.02	0.07	0.12	395	0.08	0.03	<0.01
	3/9/2015	0.08	<0.01	<0.01	0.15	<0.02	0.07	0.12	465	0.01	<0.01	<0.01
	5/19/2015	0.05	<0.01	<0.05	0.24	<0.02	0.12	0.14	445	0.01	0.01	<0.01
	9/23/2015	<0.20	<0.10	<0.10	<0.50	<0.20	<0.50	0.38	395	<0.10	<0.10	<0.10
	1/5/2016	0.38	0.01	0.01	<0.05	<0.02	0.56	0.18	435	8.20	4.20	<0.07
	3/16/2016	0.07	0.01	0.01	0.32	<0.02	0.66	0.44	475	0.01	0.07	<0.01
	11/27/2017	<0.02	<0.01	<0.01	<0.05	0.09	1.40	0.03	765	<0.01	0.05	<0.01
	4/9/2018	0.04	0.04	0.02	<0.05	0.04	0.50	0.43	410	0.03	0.02	0.02
	6/11/2018	0.03	0.01	<0.01	<0.05	0.08	0.92	0.12	485	0.01	<0.01	<0.01
	9/17/2018	<0.02	0.04	<0.01	<0.05	0.06	1.40	0.13	390	0.01	0.01	<0.01
	2/3/2020	0.49	0.02	<0.01	<0.05	0.04	0.46	0.26	410	0.01	0.01	<0.01
	3/16/2020	<0.02	0.04	<0.01	0.12	0.24	0.60	0.16	405	0.01	0.01	<0.01
	8/10/2020	<0.02	0.05	<0.01	<0.05	<0.02	0.21	0.52	390	0.02	0.01	<0.01
9/14/2020	0.13	0.01	<0.01	<0.05	<0.02	0.07	0.22	400	<0.01	<0.01	<0.01	

	Date	Neodymium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutenfium
Unit		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
PB1	3/9/2015	0.02	0.01	0.06	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
	5/19/2015	0.02	< 0.01	0.14	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
	9/23/2015	<0.10	<0.10	0.17	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
	1/5/2016	0.06	0.01	0.08	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
	3/16/2016	0.04	0.02	0.13	0.02	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
	11/27/2017	<0.01	<0.01	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	4/9/2018	0.05	0.03	0.13	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
	6/11/2018	0.05	0.03	0.17	0.03	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01
	9/17/2018	0.04	0.02	0.22	0.02	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.02	0.01
	2/3/2020	0.02	0.01	0.22	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
	3/16/2020	0.04	0.02	0.22	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	8/10/2020	0.02	0.01	0.11	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	9/14/2020	0.02	0.01	0.23	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
PB2	3/9/2015	0.02	0.01	0.11	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
	5/19/2015	0.04	0.01	0.13	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
	9/23/2015	<0.10	<0.10	0.11	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
	1/5/2016	0.09	0.02	0.14	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.32	<0.01	0.01	<0.01
	3/16/2016	0.05	0.01	0.16	0.02	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
	11/27/2017	<0.01	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	4/9/2018	0.09	0.07	0.19	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05
	6/11/2018	0.05	0.02	0.15	0.02	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
	9/17/2018	0.06	0.02	0.20	0.03	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.02	0.01
	2/3/2020	0.02	0.02	0.25	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
3/16/2020	0.04	0.02	0.25	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01	

	Date	Hafnium	Tantalium	Wolfram	Renium	Osmium	Iridium	Platina	Thallium	Lood	Bismut	Thorium	Uranium
Unit		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
PB1	3/9/2015	< 0.05	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.27
	5/19/2015	< 0.05	< 0.02	0.06	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.01	< 0.05	< 0.10	0.08
	9/23/2015	0.80	< 0.20	< 0.20	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.20	< 0.50	< 1.0	0.15
	1/5/2016	0.03	< 0.02	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.13
	3/16/2016	0.04	< 0.02	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.12
	11/27/2017	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	< 0.01
	4/9/2018	0.08	< 0.02	0.04	0.02	0.01	< 0.01	0.01	0.01	0.05	< 0.05	0.78	0.06
	6/11/2018	0.04	< 0.02	< 0.02	< 0.01	0.02	0.01	0.02	< 0.01	0.11	< 0.05	0.11	< 0.01
	9/17/2018	0.03	< 0.02	< 0.02	< 0.01	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	0.10	0.04
	2/3/2020	< 0.02	< 0.02	0.12	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.01	< 0.05	< 0.10	0.03
	3/16/2020	< 0.02	< 0.02	0.09	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01	0.05	0.16	< 0.05	< 0.10	0.02
	8/10/2020	< 0.02	< 0.02	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.11	< 0.05	< 0.10	0.05
	9/14/2020	< 0.02	< 0.02	0.17	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	< 0.05	< 0.10	0.02
PB2	3/9/2015	< 0.05	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.47
	5/19/2015	0.01	< 0.02	0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.08
	9/23/2015	0.42	< 0.20	< 0.20	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.20	< 0.50	< 1.0	< 0.10
	1/5/2016	0.02	< 0.02	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.06
	3/16/2016	0.02	< 0.02	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.06
	11/27/2017	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	< 0.05	< 0.10	< 0.01
	4/9/2018	0.06	< 0.02	0.04	0.05	0.01	< 0.01	0.01	0.04	0.04	< 0.05	0.37	0.08
	6/11/2018	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.01	0.02	0.01	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	< 0.01
	9/17/2018	0.03	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	0.01	< 0.05	< 0.10	0.01
	2/3/2020	< 0.02	< 0.02	0.11	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.10	0.01
3/16/2020	< 0.02	< 0.02	0.07	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	0.04	0.10	< 0.05	< 0.10	0.01	
8/10/2020	< 0.02	< 0.02	0.04	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	< 0.05	< 0.10	0.01	

	Date	Hafnium	Tantalium	Wolfram	Renium	Osmium	Iridium	Platina	Thallium	Lood	Bismut	Thorium	Uranium
PB3	9/14/2020	<0.02	<0.02	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.05	<0.10	<0.01
	2/3/2020	<0.02	<0.02	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.05	<0.10	0.02
	3/16/2020	<0.02	<0.02	0.07	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.06	<0.05	<0.10	0.02
	8/10/2020	<0.02	<0.02	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.07	<0.05	<0.10	0.01
OBES	9/14/2020	<0.02	<0.02	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.05	<0.10	0.01
	3/9/2015	< 0.05	< 0.02	0.04	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05	0.10	< 0.01
	5/19/2015	< 0.05	< 0.02	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.05	< 0.05	0.10	0.01
	9/23/2015	1.20	0.71	< 0.20	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	< 0.20	0.80	< 1.0	<0.10
	1/5/2016	0.04	<0.02	0.13	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.09	<0.05	<0.10	0.01
	3/16/2016	0.04	<0.02	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.10	0.01
	11/27/2017	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	0.11	0.01
	4/9/2018	0.16	<0.02	0.06	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	0.14	0.10	4.60	0.03
	6/11/2018	0.04	<0.02	<0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.06	<0.05	0.28	<0.01
	9/17/2018	0.03	<0.02	<0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.35	<0.05	0.15	<0.01
	2/3/2020	<0.02	<0.02	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.09	<0.05	<0.10	0.01
	3/16/2020	<0.02	<0.02	0.08	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.03	0.14	<0.05	<0.10	0.01
	8/10/2020	<0.02	<0.02	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.18	<0.05	<0.10	0.01
	9/14/2020	<0.02	<0.02	0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.18	<0.05	<0.10	<0.01

Bijlage VII Resultaten microbiologische analyses

Tabel 0-7. Microbiologische resultaten van de technische ruimte (TR), peilbuizen 1, 2 en 3. * Rendement van qPCR analyse te laag, geen betrouwbaar resultaat; + Aangetoond, rendement qPCR-analyse te laag voor betrouwbare kwantificering, - Niet aangetoond, rendement qPCR-analyse te laag voor betrouwbare kwantificering van de detectielimiet; gk/l: genkopieën/liter, # Analyse niet uitgevoerd, geen resultaat beschikbaar.

		ATP	Bacteriën van de Coligroep	<i>E. coli</i>	<i>Legionella</i>	SSRC	<i>S. maltophilia</i>	<i>Acanthamoeba</i>	NTM	<i>Vibrio spp.</i>
		ng/l	kve/l	kve/l	kve/l	kve/l	gk/l	gk/l	gk/l	MPN/l
9-mrt-15	TR	1.5±1.2	<1	<1	<20	<1	<920	-	1.3x10 ⁶	#
	PB1	2.1±0.6	<1	<1	<20	1	<4.9x10 ³	-	1.4x10 ⁶	#
	PB2	9.5±0.3	<1	<1	<20	1	*	*	+	#
19-mei-15	TR	<1±<1	<1	<1	<20	<1	<1.2x10 ³	-	3.8x10 ³	<10
	PB1	2.2±1.0	<1	<1	<20	<1	<4.5x10 ³	-	5.1x10 ⁵	<10
	PB2	17.0±0.0	<1	<1	<20	<1	1.4x10 ⁴	2.1x10 ⁴	5.0x10 ⁵	<10
23-sep-15	TR	11.0*	<1	<1	<20	<1	<1.2x10 ³	1.4x10 ⁴	2.1x10 ³	<10
	PB1	36.1*	<1	<1	<20	<1	2.8x10 ³	-	9.2x10 ⁴	<10
	PB2	9.4*	<1	<1	<20	113	2.2x10 ⁴	9.95x10 ⁵	4.4x10 ⁶	<10
6-jan-16	TR	<1	<1	<1	<20	<1	<1.5x10 ³	-	1.0x10 ³	#
	PB1	<1	<1	<1	<20	<1	2.2x10 ³	-	1.1x10 ⁵	#
	PB2	<1	<1	<1	<20	93	<1.4x10 ³	4.4x10 ³	9.5x10 ⁴	#
16-mrt-16	TR	<1	<1	<1	<20	<1	<1.5x10 ³	-	1.3 x10 ⁴	<10
	PB1	<1	<1	<1	<20	<1	1.5x10 ⁴	-	8.5x10 ⁴	<10
	PB2	<1	<1	<1	<20	93	1.8x10 ³	-	1.1x10 ⁵	<10
27-nov-17	TR	<1	<10	<10	<100	<10	*	*	+	<2.1
	PB1	3.6±0.7	<10	<10	<100	<10	+	*	+	<2.1
	PB2	7.4±2.1	<10	<10	<100	10	*	*	+	<2.1
9-apr-18	TR	4.1±0	<10	<10	<100	<10	*	*	+	<2.1
	PB1	52±6.7	<10	<10	<100	20	*	*	+	<2.1
	PB2	10±3.2	<10	<10	<100	90	*	*	+	<2.1
11-jun-18	TR	3.6±0	<10	<10	<100	<10	<1.3x10 ³	-	3.0x10 ³	<2.1
	PB1	6.8±1.7	<10	<10	<100	20	<7.5x10 ³	-	1.9x10 ⁶	<2.1
	PB2	5.1±0	<10	<10	<100	30	<2.9x10 ³	-	3.6x10 ⁶	<2.1
17-sep-18	TR	<1	<10	<10	<100	<10	*	*	*	<2.1
	PB1	15±10	<10	<10	<100	20	<3.6E+03	-	9.4x10 ⁵	<2.1

		ATP	Bacteriën van de Coligroep	<i>E. coli</i>	<i>Legionella</i>	SSRC	<i>S. malto- philia</i>	<i>Acantha- moeba</i>	NTM	<i>Vibrio spp.</i>
	PB2	42±7.4	<10	<10	<100	1.8x10 ³	*	+	+	<2.1
3-feb-20	TR	<1	<10	<10	<100	<10	<1.7E+03	+	2.9x10 ⁵	<3
	PB1	2.6±0	<10	<10	<130	9.1	*	*	+	<3
	PB2	2.5±0	<10	<10	<100	220	*	+	+	<3
	PB3	7.5±3.3	<10	<10	-	230	1.3x10 ⁴	-	9.1x10 ⁵	<3
16-mrt-20	TR	1.4±0	<10	<10	<100	<10	<3.5x10 ³	-	2.5x10 ³	<2.1
	PB1	3.8±0	<10	<10	<100	10	-	-	+	<2.1
	PB2	29±4	<10	<10	<100	4.9x10 ³	*	*	+	<2.1
	PB3	6.9±2	<10	<10	<100	30	<4.2x10 ³	-	1.6x10 ⁵	<2.1
10-aug-20	TR	<1	<10	<10	<250	<10	<1.0x10 ³	-	3.7x10 ³	<2.1
	PB1	4.3±0	1.5x10 ³	200	<250	10	2.8x10 ⁴	-	4.6x10 ⁶	<2.1
	PB2	14±0.9	400	<100	<250	1.5x10 ³	*	*	+	<2.1
	PB3	16±2.6	<10	<10	<250	110	*	*	+	<2.1
14-sep-20	TR	11±2.8	<10	<10	<25	<10	<3.3x10 ³	-	1.3x10 ³	<2.1
	PB1	6.8±3.5	<10	<10	<25	<10	<6.4x10 ³	-	7.1x10 ⁵	<2.1
	PB2	22±1.8	60	10	<25	1.0x10 ⁴	*	+	+	<2.1
	PB3	13±1	40	<10	<25	20	4.8x10 ³	-	1.1x10 ⁶	<2.1