## KWR 2019.117 | December 2019

Prestaties en effecten van ondergrondse warmteopslag: Een verkenning voor het P2X project



KWR 2019.117 | December 2019

Prestaties en effecten van ondergrondse warmteopslag: P2X verkenning

Prestaties en effecten van ondergrondse warmteopslag: Een verkenning voor het P2X project

## KWR 2019.117 | December 2019

Opdrachtnummer 402256

Projectmanager ir. L. (Luc) Palmen MTD

Opdrachtgever TKI Urban Energy & BTO WiCE

Kwaliteitsborger(s) Dr. N. (Niels) Hartog (KWR)

### Auteur(s)

T.C.G.W. (Teun) van Dooren MSc (KWR) S.T.W. (Stijn) Beernink MSc (KWR) Dr. P.H.A. (Peer) Timmers (KWR) Dr. ir. J.M. (Martin) Bloemendal (KWR)

Verzonden aan

Projectgroep P2X

### Verantwoording

Deze activiteit is gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken en Klimaat met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) en uit het collectieve onderzoeksprogramma Water in de Circulaire Economie (WiCE) van de Nederlandse en Vlaamse drinkwaterbedrijven en KWR.

Jaar van publicatie

2019

Meer informatie ir. L. (Luc) Palmen MTD T +31621704402

E luc.palmen@kwrwater.nl

Postbus 1072 3430 BB Nieuwegein The Netherlands

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



### 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 voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.



# Samenvatting

Binnen het TKI-project P2X is de opslag van warmte bij hogere temperaturen (50/65°C) onderzocht, op basis van de condities voor het WRK terrein in Nieuwegein (projectlocatie). De redenen hiervoor zijn:

- Het effect van temperatuurverandering door warmteopslag (>30°C) op microbiologie en chemie in de ondergrond is sterk conditie-afhankelijk en daardoor locatie-specifiek. Daarnaast ontbreekt er inzicht in generieke processen die optreden bij deze temperaturen;
- 2. Door de hoge temperatuur verandert de dichtheid van het grondwater. Het water wordt een stuk lichter dan het grondwater met de oorspronkelijke temperatuur, waardoor het gedurende opslag gaat opdrijven. Dit leidt tot een verminderde terugwinefficiëntie en dus tot toenemende uitstraling van warmte naar bovenliggende lagen en mogelijke convectie in het watervoerend pakket.

Voorafgaand aan toepassing van de warmteopslag kan op basis van modelmatige berekeningen, laboratorium tests en analyses inzicht worden verkregen in de effecten van eventuele ondergrondse warmteopslag op de projectlocatie. De verkenning van de risico's en effecten van warmteopslag binnen het P2X-project is opgedeeld in drie onderdelen:

- Verspreiding van warmte door voor verschillende opslagcondities van een ondergrondse warmteopslag systeem;
- B. Bepaling van de integriteit van scheidende laag 1;
- C. Inzicht in de verandering van de waterkwaliteit.

### A. Verspreiding van warmte door ondergrondse warmteopslag

Allereerst is er bepaald welke lagen in aanmerking komen voor ondergrondse warmteopslag in dit gebied. Tot ca. 200m diepte zijn er 3 watervoerende pakketten (WVP) te onderscheiden. WVP 1 en WVP 3 zijn gekwalificeerd als geschikte lagen voor warmteopslag. WVP 2, gesitueerd op een diepte van 80 tot 130m, is uitgesloten omdat daar een calamiteitengrondwaterwinning van Waternet zit. Bij opslag in WVP 1 of WVP 3 is daarom de mate van opwarming van grondwater in WVP 2 van belang. De geohydrologische eigenschappen (o.a. doorlatendheid, laagdikte) van WVP 1 en WVP 3 zijn beiden geschikt voor warmteopslag. WVP 1 heeft de voorkeur omdat deze door de onderliggende kleilaag beter is afgesloten van WVP 2 en er minder negatieve effecten van opdrijving zijn te verwachten tijdens opslag (kleinere verticale permeabiliteit en dunnere laag).

De verspreiding van de warmte door de warmteopslag is in kaart gebracht met een analytische oplossing en met een dynamisch grondwatermodel voor de opslag in WVP 1 of WVP 3. Op basis van de verwachtte maximale grootte van de warmteopslag zijn er twee scenario's bepaald. Een scenario waarbij de injectie temperatuur 'hoog' is (65°C) met een opslagvolume van 300.000 m<sup>3</sup> per jaar en een scenario waarbij 50°C wordt geïnjecteerd met een opslag volume van 500.000 m<sup>3</sup>. De analytische vergelijking laat zien dat bij opslag in WVP 3 op den duur de temperatuur in WVP 2 groter zal zijn dan 25°C. Met het grondwatermodel zijn beide scenario's 50 jaar gesimuleerd om inzicht te krijgen in de lange termijn effecten. Bij opslag in WVP 1 is de maximale waargenomen temperatuur 27 °C in WVP 2 na 50 jaar, terwijl bij opslag in WVP 3 de temperatuur in WVP 2 oploopt tot maximaal 61 °C (bij 65 °C injectie) of 48 °C (bij 50 °C injectie). De impact van de warmteopslag op de temperatuur in WVP 2 is dus kleiner bij opslag in WVP 1 t.o.v. WVP 3. De efficiëntie van de warmteopslag is het hoogste voor opslag in WVP 1, voornamelijk omdat de effecten van opdrijving hier kleiner zijn. Omdat er gebruik is gemaakt van vereenvoudigde geohydrologische condities, geven deze een worst-case benadering van de temperatuureffecten en moet verdere detaillering van het systeem uitwijzen hoe opslag efficiëntie geoptimaliseerd en thermische effecten geminimaliseerd kunnen worden.

Vanuit de risico's voor de winning van Waternet verdient het dus de voorkeur om de warmteopslag in WVP 1 te doen met het scenario waarbij water van 50 °C wordt geïnjecteerd. Opslag in WVP 1 heeft daarnaast een hogere terugwinefficiëntie.

### B. Bepaling integriteit scheidende laag 1

Bij opslag in WVP 1 is de integriteit van de scheidende laag tussen WVP 1 en WVP 2 belangrijk vanwege de bronnen die zijn aangelegd voor de calamiteitengrondwaterwinning van Waternet. Vooraf kan worden gesteld dat vanwege de dikte van de scheidende laag (20m) het zeer onwaarschijnlijk is dat de afdichting in dat diktetraject onvoldoende is. Vanwege de grote belangen is hierover geprobeerd aanvullende zekerheid te verkrijgen. Om te zien of er een lek door de afdichting van het boorgat kan worden gedetecteerd, is een proef uitgevoerd met de beschikbare bronnen en de peilbuizen die in de omstorting van de bronnen staan afgesteld. Tijdens deze proef is gekeken of in de peilfilters, die zijn afgesteld in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket in de omstorting van de bron, een stijghoogteverlaging kon worden gedetecteerd die zou duiden op mogelijke lek via het boorgat. Een bron aanwezig op terrein van waternet, gelegen op korte afstand van het lekkanaal, bleek het meest geschikt voor de proef.

De stijghoogteveranderingen in WVP 1 ten gevolge van het aan- en uitschakelen van de grondwateronttrekking in WVP 2 werden gedurende een 2 uur durende test gemonitord. Tijdens de test is een zeer snelle stijging van de stijghoogtes in WVP 1 waargenomen. Dit komt door het plotseling sterk verlagen van de stijghoogte en daardoor opgewekte horizontale compressie in het afgepompte pakket (WVP 2), waardoor boven- en onderliggende watervoerende pakketten ietsje worden "meeuitgeknepen". Dit wordt ook wel het "Noordbergum effect" genoemd. In WVP 1 is geen reactie waargenomen die zou wijzen op een eventuele lekkage van WVP 1 naar WVP 2 via de omstorting van de putten. Tevens, als de omstorting van de hier aanwezige putten erg lek was geweest (geen goede kleiprop aangebracht), was het Noordbergumeffect niet zo sterk aanwezig geweest. De resultaten van deze test laten dus zien dat er geen significante lekkages langs putten optreden tussen WVP 1 en WVP 2. Dat de aanwezige omstortingen een even grote weerstand hebben als de originele scheidende laag kan niet worden aangetoond, dit is ook met andere tests erg lastig aan te tonen.

### C. Inzicht in de mogelijke veranderingen van de grondwaterkwaliteit

### Referentiesituatie

Allereerst is de huidige sedimentsamenstelling, de grondwaterkwaliteit, en de microbiologische samenstelling in het eerste watervoerende pakket bij de beoogde projectlocatie bepaald. Het grondwater is zoet in zowel WVP 1 en WVP 2 en heeft een calcium-bicarbonaat type. Verder heersen er ijzer-reducerende omstandigheden en overschrijden **Fe**, **Mn**, **As** en **NH**<sub>4</sub> van nature de eisen die zijn gesteld in het Drinkwaterbesluit (2018). Het sediment in het eerste watervoerend pakket bestaat met name uit middel grof tot grof kwartshoudend zand, met lokaal fijn zandig materiaal of klei met relatief hoge concentraties kalk. De microbiologische populatie die is aangetroffen in het sediment in het eerste watervoerend pakket bestaat voornamelijk uit bacteriën behorend tot de genera *Thiobacillus* (>20%), *Comamonadaceae* (5-15%), *Rhodoferax* (5-7%), *Methylotenera* (~7%), *Mycoplana* (~2%), *Perlucidibaca*, en *Gallionellaceae* (1.5-2.5%).

### **Batch experimenten**

Voor de batch experimenten is sediment afkomstig uit WVP 1 in het lab van KWR samengevoegd met het grondwater dat afkomstig is van een vergelijkbare diepte. Dit is gedaan in een met stikstof gevulde glovebox om blootstelling aan zuurstof zoveel mogelijk te voorkomen. Er zijn een aantal mengsels geprepareerd om op verschillende tijdstippen voor verschillende temperaturen te bepalen wat het effect is op de waterkwaliteit en op de samenstelling en grootte van de microbiologische populatie, om zo de leidende geochemische processen te kunnen identificeren.

- De verschillende temperaturen die zijn onderzocht, zijn:
  - 5°C, 11°C, 23°C, 40°C, 60°C, en 85°C.
- De tijdstippen waarop is bemonsterd, zijn:
  - t0 = 0 uur, t1 = 1 uur, t2 = 1 week, en t3 = 2 weken.

Vervolgens zijn een aantal mengsels teruggebracht naar de oorspronkelijke grondwatertemperatuur (11°C) en is een extra bemonstering uitgevoerd op **t4 = 4 weken** om te bepalen hoe reversibel de veranderingen van de waterkwaliteit en van de microbiologische populatie in het sediment zijn. Verschillende onderzoeksvragen zijn gehanteerd bij de batch experimenten, welke hieronder zullen worden toegelicht op basis van de resultaten van het onderzoek.

## Wat zijn de temperatuureffecten op chemische en microbiële processen, en dus op de chemische waterkwaliteit en de microbiële populatie, bij ondergrondse warmteopslag?

Chemische waterkwaliteit:

- DOC (opgelost organisch koolstof) neemt toe in concentratie bij temperaturen >40°C door chemische hydrolyse, desorptie van DOC vanaf ijzeroxiden, of sterfte van micro-organismen. De toename lijkt niet volledig reversibel bij temperatuurafname.
- De concentraties calcium, magnesium, mangaan, barium, en strontium in het grondwater, en de alkaliniteit ervan, nemen tijdens de experimenten af met de tijd door neerslag van kalk (carbonaten). Bij hogere temperaturen worden lagere concentraties bereikt dan bij relatief lage temperaturen, wat overeenkomt met de lagere oplosbaarheid van kalk bij hogere temperaturen. Kalkoplossing, m.a.w. reversibiliteit van kalkneerslag, is niet aangetoond bij de experimenten.
- Natrium, kalium, en silica nemen mogelijk toe in concentratie door (kali-) veldspaatverwering. Dit proces wordt gestimuleerd door een verhoging van de

temperatuur. De concentratie **silica** neemt naar verloop van tijd af door oververzadiging en neerslag van silicaten.

- Mobilisatie van microparameters, mogelijk als gevolg van desorptie van oxyanionen vanaf ijzer(hydr)oxides, vindt plaats vanaf verschillende temperaturen. Hierbij moet men in acht nemen dat deze microparameters reeds aanwezig moeten zijn in sediment alvorens deze kunnen mobiliseren:
  - o 23°C: As, PO₄, Ti, en V (reversibel) en W (mogelijk reversibel >2 weken);
  - 40°C: Ge (reversibel);
  - o 60°C: Cs, Cu, Li, Mo, en Rb (irreversibel);
  - 85°C: Cr, Nd, Ce, Dy, Er, Gd, La, Pr, Sm, Y, Yb, (reversibel) en Zr (mogelijk reversibel >2 weken), en mogelijk Ag, Be, Hf, Ho, Lu, Tb, en Th (reversibel);
- Voor NO<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, Bi, In, Pt, Ru, Ta, Te, en Tm zijn geen metingen gedaan boven de detectielimiet, en voor Al, Au, Cd, Co, Eu, Ga, Hg, Nb, NH<sub>4</sub>, Ni, NO<sub>2</sub>, U, Pd, Re, Rh, Sb, Sc, Se, Sn, Tl, en Zn is om verschillende redenen geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid waargenomen.
- Tijdens de batchexperimenten hebben er ook processen plaats gevonden die in het veld niet zouden plaatsvinden zoals het binnendringen van zuurstof in de experimentele flessen waardoor enige pyrietoxidatie plaatsvond. Dit heeft gezorgd voor mobilisatie van sulfaat en neerslag van ijzerhydroxiden. Daarnaast zijn er verschillende componenten tijdens de experimenten uit het glaswerk geloogd, waaronder boor, natrium, kalium, en silica.

### Microbiologische samenstelling:

- Temperaturen van 5 11°C hebben geen duidelijk effect op de microbiële populatie.
- Het verhogen van de temperatuur naar 23 en 40°C resulteert in een verlaging van de microbiële diversiteit en in groei en dominantie van specifieke micro-organismen.
  Deze micro-organismen nemen weer af in abundantie wanneer de temperatuur weer wordt teruggebracht naar 11°C, wat laat zien dat de populatieverandering bij deze temperaturen reversibel kan zijn op een langere termijn dan twee weken.
- Bij het verhogen van de temperatuur naar 60°C bestaat de microbiële populatie voor ongeveer 40% uit *Caldinitratiruptor microaerophilus*. De andere 60% heeft een grote diversiteit. Deze verandering lijkt niet reversibel, mede omdat alleen sporevormende, thermofiele micro-organismen overleven.
- Bij 85°C is er vrijwel geen microbieel leven meer aanwezig. In een veldsituatie zou de continue instroom van grondwater na afkoeling zorgen voor herkolonisering van het sediment met een vergelijkbare microbiologische populatie.

# Wat zijn vanuit grondwaterbeschermingsoogpunt de belangrijkste parameters bij ondergrondse warmteopslag?

De experimentele resultaten geven aan dat **As** bij temperaturen >40°C kan mobiliseren tot concentraties boven de hier, slechts als referentie gebruikte, norm van het Drinkwaterbesluit (2018). Daarnaast kunnen **Cu** en **Cr** mobiliseren bij respectievelijk 60°C en 85°C, maar resulteerden tijdens de experimenten niet tot overschrijdingen van de drinkwaternorm. Voor de overige parameters uit het Drinkwaterbesluit (2018) is er geen temperatuurafhankelijkheid duidelijk geworden op basis van de experimenten.

### Vervolg

De experimenten hebben inzicht gegeven in welke processen bij ondergrondse warmteopslag beïnvloed worden door temperatuurverhogingen en welke waterkwaliteitsveranderingen die kunnen veroorzaken. Aanbevolen wordt om bij het eventuele realiseren van een ondergrondse warmteopslag deze als basis te gebruiken voor het ontwikkelen van een grondwatermonitoringsprogramma. Al met al, geeft deze verkenning van de mogelijkheden voor, en de prestaties en impact van, een ondergronds warmteopslagsysteem met de ondergrondcondities in Nieuwegein, zoals bepaald voor het WRK-terrein van Waternet, aan dat van de aanwezige watervoerende pakketten (WVP 1, 2 en 3), WVP 1 het meest geschikt lijkt vanwege de te verwachten hogere prestaties (capaciteit en terugwinrendementen) en geringere thermische impact (temperatuurverhoging) op WVP 2, waar de noodwinning van Waternet zich bevindt. Ook geven de resultaten van dit onderzoek geen aanleiding te twijfelen aan de scheidendheid van de dikke kleilaag tussen WVP 1 en WVP 2. De resultaten van de labexperimenten van dit verkennende onderzoek, waarin de effecten van de geteste temperatuurverhogingen verklaarbaar waren en binnen de verwachting vielen, geven geen aanleiding zorgwekkende of onoverkoombare grondwaterkwaliteitseffecten te verwachten bij veldrealisatie. Een veldtest op de beoogde uiteindelijke locatie van een ondergronds warmteopslagsysteem kan daar nog

meer zekerheid in verschaffen.

# Inhoud

1	Inleiding	10		
1.1	Aanleiding	10		
1.2	vragen bij ondergrondse warmteopslag bij	10		
1 2		10		
1.5	Doel	10		
2	Situatiebeschrijving	12		
2.1	Beschrijving warmte systeem	12		
2.2	Situatiebeschrijving lokale ondergrond	12		
3	Verspreiding van warmte door			
	warmteopslag	17		
3.1	Scenario warmtevraag en aanbod/productie	17		
3.2	Analytische berekening temperatuurverloop	18		
3.3	SEAWAT simulaties	18		
3.4	Discussie	24		
3.5	Conclusies verspreiding van warmte	25		
4	Integriteit eerste scheidende laag	26		
4.1	Risico voor lek naar het 2e watervoerend			
	pakket	26		
4.Z	Opzet van het veldonderzoek	26		
4.3	Uitvoering	27		
4.4	Ruwe meetresultaten	28		
4.5	Verwerking van de metingen	30		
4.6	Conclusies integriteit scheidende laag	32		
5	Effecten op de chemische			
	grondwaterkwaliteit en de microbiologische			
	populatie	33		
5.1	Doel en onderzoeksvragen	33		
5.2	Monitorings- en analyseplan	34		
5.3	Grondwaterkwaliteit en sedimentsamenstelling	42		
5.4	Resultaten experimenten: leidende processen	50		
5.5	Conclusies temperatuureffecten	75		
5.6	Aanbevelingen	76		
6	Conclusies	78		
7	Referenties	81		
Bijla	ge I Solar Power to the People: korte			
oms	chrijving	87		
Bijlage II Model beschrijving				

Bijlage III Grondwaterkwaliteit	91
Bijlage IV LC-OCD analyse grondwater 29-11-2018 (DOC-Labor)	93
Bijlage V Korrelgrootteverdeling van sediment (VU Amsterdam en LMA cv Sleeuwijk)	97
Bijlage VI Chemische samenstelling sediment	99
Bijlage VII Resultaten experimenten: Chemie en ATP en SSRC	101
Bijlage VIII DNA-extracties	106
Bijlage IX Relatieve abundantie van micro- organismen op klasse-niveau	107

# 1 Inleiding

### 1.1 Aanleiding

In Nieuwegein wordt een uniek energiesysteem beoogd met als doel de woningen in de nabijgelegen herontwikkelingswijk Rijnhuizen (Figuur 1-1) te voorzien van energie uit zonnepanelen ter plaatse van het WRK-terrein van Waternet. Power-to-heat zal eventueel kunnen voorzien in (een deel van) de energievraag voor verwarming (Bijlage I). In de wintermaanden is zonne-energie echter niet toereikend om aan de energievraag van de woningen te voldoen. Tijdelijke opslag van energie kan de levering van voldoende warmte voor de totale warmtevraag vergroten en verlengen. Het standaardbeleid voor lage-temperatuur warmte-koude opslag (WKO systemen) staat een maximum opslagtemperatuur van 25°C toe (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2013), maar de provincie staat "pilot"-projecten met opslag van hoge temperatuur toe op basis van maatwerkvoorschriften (Provincie Utrecht, 2013).

### 1.2 Vragen bij ondergrondse warmteopslag bij hogere temperaturen

Er is slechts beperkt inzicht in de grondwaterkwaliteitsveranderingen die plaats kunnen vinden bij ondergrondse opslag van warmte boven de 25 à 30°C. Bovendien variëren deze veranderingen bij verschillende opslagtemperaturen en hangt het af van locatie-specifieke omstandigheden.

Daarnaast is bekend dat met hogere opslagtemperaturen ook de dichtheid van het grondwater lager wordt ten opzichte van het omringende grondwater waardoor het opgeslagen warme water gedurende opslag zal gaan opdrijven. In aanvulling op verliezen die door conductie optreden leidt deze dichtheidsstroming tot warmteverliezen en verlaging van de algehele terugwinefficiëntie van het warmteopslagsysteem. Vooralsnog is echter onbekend in welke mate de algehele terugwinefficiëntie wordt bepaald door verliezen door conductie en dichtheidsstroming, in welke mate dit afhangt van locatie-specifieke opslagcondities, en welk effect deze verliezen hebben op de verspreiding van warmte naar boven-(en onder)liggende grondwaterlagen.

In het gebied van de beoogde ondergrondse warmteopslag is de provincie Utrecht op verzoek van Waternet ook in de afrondende fase van het aanwijzen van een boringsvrije zone voor de calamiteitengrondwaterwinning van Waternet. Dit houdt in dat in het waterwingebied en een ruime zone rondom het WRK terrein niet door de eerste scheidende laag mag worden geboord. Vraag hierbij is dus in hoeverre dit de mogelijkheid van een optimale ondergrondse warmteopslag op of nabij het WRK terrein op basis van (toekomstige) regelgeving en provinciaal beleid mogelijk maakt.

### 1.3 Doel

Het doel van het onderzoek is om voorafgaand aan eventuele toepassing van ondergrondse warmteopslag inzicht te krijgen in de mogelijkheden voor, en werking van, een ondergronds warmteopslag systeem op basis van de aanwezige ondergrondcondities. De effecten en veranderingen die in verschillende mate zijn te verwachten als gevolg van een temperatuurverandering zijn onderzocht op basis van modelmatige berekeningen en laboratoriumtests en waterkwaliteitsanalyses, afhankelijk van het voor opslag gebruikte watervoerende pakket. Deze verkenning van de mogelijke effecten van ondergrondse warmteopslag is opgedeeld in drie onderdelen:

- A. Verspreiding van warmte door warmteopslag (hoofdstuk 3);
- B. Bepaling van de integriteit van de eerste scheidende laag (hoofdstuk 4);
- C. Inzicht in de effecten op de chemische grondwaterkwaliteit en de microbiologische populatie (hoofdstuk 5).

In de volgende hoofdstukken van deze rapportage wordt per onderdeel ingegaan op het doel, de aanpak, de resultaten, en de conclusies met betrekking tot de effecten van de beschouwde varianten voor ondergrondse warmteopslag.



Figuur 1-1 Overzicht van locaties rondom Nieuwegein die onderdeel zijn van het SPttP project.

# 2 Situatiebeschrijving

### 2.1 Beschrijving warmte systeem

In het P2X project wordt warmte geproduceerd met een warmtepomp, die wordt gevoed met de groene stroom uit de zonnepanelen van Waternet. Het idee is om met deze warmte te kunnen voldoen aan de vraag van nog te bouwen woningen in de wijk Rijnhuizen. Voor een nadere omschrijving van het project wordt verwezen naar Bijlage I. De omvang van het aantal aan te sluiten woningen varieert tussen 900 - 3000 en er worden twee verwarmingsconcepten overwogen:

- Opslag van warmte op ca. 50°C in de bodem gecombineerd met het leveren van ruimteverwarming aan woningen op ca 40°C, met een boosterwarmtepomp in iedere woning voor tapwater. (koude bron is ca 25°C). Jaarlijkse opslagvolume in de bodem ca 200.000 – 500.000 m<sup>3</sup> voor 1500 woningen.
- Opslag van warmte op 65 °C in de bodem gecombineerd met het leveren van zowel ruimteverwarming als warm tapwater aan woningen op 55°C. (koude bron is ca 30°C). Jaarlijkse opslagvolume in de bodem ca. 100.000 – 300.000 m<sup>3</sup> voor 1500 woningen.

In termen van primaire energie is de verwachtte jaarlijkse energiebesparing minimaal 500 MWh, oplopend tot boven de 3500 MWh (in beide gevallen 100% besparing t.o.v. conventioneel). Ook op basis van de economische analyse is de conclusie dat een warmteopslagsysteem haalbaar is (Van der Roest et al., 2018). Hoe meer woningen er uiteindelijk worden aangesloten hoe groter het economische en energetische voordeel wordt. Voor de eventuele realisatie van een ondergronds warmteopslagsysteem in een vervolgtraject is er nog geen locatie vastgesteld.

### 2.2 Situatiebeschrijving lokale ondergrond

In het gebied waar het WRK-terrein ligt worden er globaal 3 watervoerende lagen onderscheiden (Tabel 2-1).

Bovenkant	Onderkant	Dikte	Eenheid
m tov mv	m tov mv	т	
0	-10	10	Deklaag
-10	-65	55	WVP 1
-65	-85	20	SDL 1
-85	-130	45	WVP 2
-130	-135	5	SDL 2
-135	-210	75	
-210	-270	60	WVP 3
-270	-		Basis

Tabel 2-1 Hydrogeologische karakterisatie ter plaatse van het WRK-terrein tot 270 meter diepte.

De winning van Waternet zit in het 2<sup>de</sup> watervoerende pakket (WVP 2), die hydrologisch goed is gescheiden van het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket (WVP 1) (Leunk & Bonte, 2012). De scheidende laag (SDL) tussen WVP 2 en WVP 3 is erg dun en uit verschillende diepe

boringen uit de omgeving blijkt dat zowel WVP 2 als WVP 3 bestaat uit grove zanden afgewisseld met dunne kleilagen/lenzen die niet continu zijn. Op basis van gemeten stijghoogte veranderingen in WVP 2 en WVP 3 tijdens pompproeven, ziet Waternet dan ook vrijwel geen verschil tussen de meetpunten in WVP 2 en WVP 3.

### 2.3.1 Proefboring ter karakterisering WVP 1

Op 23 juli 2018 is door Grondboorbedrijf Haitjema B.V. een zuigboring verricht op de oude slibvelden van Waternet in Nieuwegein, circa 275 meter ten noorden van het gebouw van KWR (Figuur 2-1; RD-coördinaten: X = 135864,64, Y = 448208,91). Tijdens de zuigboring is de lokale bodemopbouw bepaald tot een einddiepte van 55 meter. Tevens zijn sedimentkernen genomen en zijn peilbuisfilters geplaatst in het boorgat ten behoeve van de experimenten (hoofdstuk 5).



Figuur 2-1: Projectlocatie Solar Power to the People, nabij het terrein van KWR in Nieuwegein.

Met behulp van de boring die is verricht op de projectlocatie is allereerst de lokale bodemopbouw gekarakteriseerd tot een diepte van 55 meter (Figuur 2-1 en Figuur 2-2). Aanvullende gegevens van de bodemopbouw zijn beschikbaar vanuit de modellen GeoTOP v1.3 en REGIS II v2.2 (Figuur 2-3). De geohydrologische bodemopbouw is op basis van deze gegevens samengevat weergegeven in Tabel 2-2. Het maaiveld op deze locatie heeft een hoogte van +1,44 mNAP.

De beoogde projectlocatie is gevestigd op oude slibvelden van Waternet, waardoor de bovenste meter van de ondergrond uit slib en leem bestaat. Daaronder bevindt zich een 4 meter dikke slecht doorlatende klei, die samen met het slib en leem de deklaag vormt. Het beoogde watervoerend pakket (WVP 1) voor opslag van thermische energie bevindt zich daaronder en wordt door twee kleilagen van 5 meter dik opgedeeld in drie sub-lagen. Alle drie deze lagen worden gekenmerkt door matig grof tot uiterst grof zand. Op basis van de gegevens van REGIS II v2.2 heeft WVP 1a een dikte van 21 meter en een doorlatend vermogen van ca. 1250 m²/dag, WVP 1b een dikte van 19 meter en een doorlatend vermogen van ca. 750 m²/dag, en WVP 1c een dikte van 5 meter en een doorlatend vermogen van ca. 155 m²/dag. De twee scheidende kleilagen hebben een weerstand van respectievelijk 150 en 83 dagen. De basis van WVP 1 wordt gevormd door de top van de 21 meter dikke Waalreklei, welke een weerstand heeft van ca. 7500 dagen. Het is echter de vraag of deze geïnterpoleerde geohydrologische parameters en bodemopbouw ook in de praktijk op de projectlocatie van toepassing zijn.

diepte in meters - maaiveld		omschrijving grondlagen volgens NEN 5104	M-waarde (µm)
0.00	1.00	LEEM uppet hervie/agie	
0,00	1,00	LEEM, vast, bruingrijs	
1,00	2,00	KLEI, vast, donkergrijs	
2,00	3,00	KLEI, vast, donkergnjs	
3,00	4,00	KLEI, vast, grijs	
4,00	5,00	KLEI, Vast, grijs	
5,00	6,00	ZAND, matig grot, donkergrijs, zwak siltig, enkele kleibrokken,	220
		veensporen	
6,00	7,00	ZAND, matig grof, donkergrijs, zwak siltig, enkele kleibrokken	220
7,00	8,00	ZAND, matig grof, donkergrijs, zwak siltig	240
8,00	9,00	ZAND, matig grof, grijs	270
9,00	10,00	ZAND, matig grof, grijs, enkel kleibrokje	270
10,00	11,00	ZAND, zeer grof, grijs	300
11,00	12,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
12,00	13,00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	350
13,00	14,00	ZAND, zeer grof, grijs, zwak grindig	380
14,00	15,00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	380
15,00	16,00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	320
16,00	17,00	ZAND, matig grof, grijs	280
17,00	18,00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	320
18,00	19,00	ZAND, uiterst grof, grijs, zwak grindig	450
19,00	20,00	ZAND, uiterst grof, grijs, zwak grindig	500
20,00	21,00	ZAND, uiterst grof, grijs, zwak grindig	500
21.00	22.00	ZAND, uiterst grof, griis, zwak grindig	500
22.00	23.00	ZAND, uiterst grof, grijs, zwak grindig	500
23.00	24.00	ZAND, uiterst grof, grijs, zwak grindig	500
24.00	25.00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	320
25.00	26.00	ZAND zeer grof, grijs	350
26,00	27,00	KI EL vast donkergrijs	000
27,00	28.00	KI EI vast donkergrijs	
29,00	20,00	ZAND mor and aris spor arisd	290
20,00	20,00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	290
29,00	30,00	ZAND, zeer grot, grijs	300
30,00	31,00	ZAND witerst aref, aris, much arisdia	500
31,00	32,00	ZAND, utterst grof, grijs, zwak grindig	500
32,00	33,00	ZAND, uterst grof, grijs, zwak grindig	600
33,00	34,00	ZAND, ulterst grof, grijs, zwak grindig, enkel kleilaagje	600
34,00	35,00	ZAND, matig grot, grijs	230
35,00	36,00	ZAND, matig grof, grijs	250
36,00	37,00	ZAND, matig grof, grijs	250
37,00	38,00	ZAND, matig grof, grijs	280
38,00	39,00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	350
39,00	40,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
40,00	41,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
41,00	42,00	ZAND, zeer grof, grijs, spoor grind	380
42,00	43,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
43,00	44,00	ZAND, zeer grof, grijs, enkel kleibrokje	320
44,00	45,00	ZAND, matig grof, donkergrijs, veensporen	280
45,00	46,00	ZAND, matig grof, donkergrijs	230
46,00	47,00	ZAND, matig grof, donkergrijs	230
47,00	48,00	ZAND, matig grof, donkergrijs	260
48,00	49,00	ZAND, matig grof, donkergrijs	260
49,00	50,00	ZAND, matig grof, donkergrijs	260
50,00	51,00	KLEI, vast, donkergrijs	
51,00	52,00	KLEI, vast, donkergrijs	
52.00	53.00	KLEI, vast, donkergrijs	
53.00	54.00	KLEI, vast, donkergrijs	
54.00	55.00	KLEI, vast, donkergrijs	

Figuur 2-2: Boorstaat van de peilbuisboring nabij het terrein van KWR (RD-coördinaten: X = 135864,64, Y = 448208,91). Het maaiveld heeft hier een hoogte van 1.44 m+NAP.

## Appelboor REGIS II v2.2



Figuur 2-3: Bodemopbouw ter plaatse van de beoogde projectlocatie op basis van GeoTOP v1.3 (links) en REGIS II v2.2 (rechts).

16

Tabel 2-2: Hydrogeologische bodemopbouw volgens GeoTOP v1.3, REGIS II v2.2, en een lokale boring.

Hydrogeologie	Boorstaat &	Boorstaat & GeoTOP v1.3			REC	REGIS II v2.2			Boorstaat; GeoTOP v1.3; REGIS II v2.2		
	Lithologie	тор	Bodem	Dikte	Geologie	Formatie	SUB	kh m/daa	kv m/daa	kD m²/daa	C dagen
Deklaag	Klei, leem, en veen	1,44	-3,56	5	0	Holoceen		in uug	in uug	in youg	uugen
	Matig grof zand	-3,56	-8,56	5		Boxtel	zand 2/3/4	5,3		15,9	
	Zeer grof zand	-8,56	-10,56	2	-10		zand 2	77		154	
WVP 1a	Zeer grof – uiterst grof zand met grindsporen	-10,56	-24,56	14	-20 -	Kreftenheye 20 –	zand 3	77		1078	
Slecht doorlatende laag	Klei en matig grof zand	-24,56	-29,56	5	W	Urk	klei 1 & zand 4	59 (zand)	0,02 (klei)	118	150
	Uiterst grof zand	-29,56	-32,56	3	ř.	zand 5	61		183		
WVP 1b	Matig grof - uiterst grof zand met grindsporen	-32,56	-48,56	16	gte in meter	Sterksel	zand 1	35,5		568	
Slecht doorlatende laag	Klei	-48,56	-53,56	5	아 - <b>50</b>		klei 1		0,06		83
WVP 1c	Zand (REGIS II v2.2)	-53.56	-58,79	5,23			zand 2	29,7		155	
Hydrologische basis WVP 1	Klei (REGIS II v2.2)	-58,79	-80,77	21,98	-60 - -70 - -80	Waalre	Klei 1		0,003		7598

# 3 Verspreiding van warmte door warmteopslag

### 3.1 Scenario warmtevraag en aanbod/productie

Om inzicht te krijgen in de maximale effecten van een mogelijke warmteopslag zijn twee scenario's gesimuleerd, waarbij het volume en de maximale temperatuur varieert, maar een vergelijkbare hoeveelheid energie wordt opgeslagen per seizoen (6.5 TJ/jaar). De volumes zijn sinusoïdaal verdeeld met maximale onttrekking in maand 12 en maximale injectie in maand 6 (Figuur 3-1).

• Scenario 1: T=65°C, V=300,000 m<sup>3</sup>

Bij scenario 1 is de maximale temperatuur gesimuleerd die wordt beschouwd, jaarlijks wordt er 300,00 m<sup>3</sup> opgeslagen. Bij dit scenario verwachten we de meeste invloed van opdrijving en dus verticale verplaatsing van warmte.

• Scenario 2: T=50°C, V=500,000 m<sup>3</sup>

Bij scenario 2 is het temperatuurniveau verlaagt, maar de volumes vergroot. Jaarlijks ontstaat in scenario 2 daarom een grotere thermische straal rondom de injectieput maar wordt er ongeveer dezelfde hoeveelheid energie (TJ) opgeslagen als in scenario 1.



Figuur 3-1: Debiet (m<sup>3</sup>/maand) van de warmteopslag bij de twee scenario's.

### 3.2 Analytische berekening temperatuurverloop

Op basis van de analytische vergelijking van Fourier, die de snelheid van warmtegeleiding beschrijft, kan het temperatuur verloop tussen het opslagpakket en maaiveld inzichtelijk worden gemaakt, Figuur 3-2.

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

 $q_x$  is de warmteflux in W/m<sup>2</sup>,  $\lambda$  is de conductie coëfficiënt van het materiaal en dT/dX is de temperatuur gradiënt in de x-richting.

Dit is een worst-case benadering, omdat de temperatuur in het opslagpakket nooit het gehele jaar door de opslagtemperatuur is, waar in deze versimpeling wel vanuit wordt gegaan. Op basis hiervan blijkt al dat bij toepassing van warmteopslag in WVP 3 de temperatuur in WVP 2 groter zal zijn dan 25°C. Het effect van dichtheidsstroming zal de warmte echter ook verder verspreiden en naar verwachting ook in temperatuur doen laten afnemen.





Voor het temperatuurverloop naar onderliggende pakketten kan dit niet worden gedaan omdat er aan de onderkant van het model dan geen randvoorwaarde kan worden aangenomen, en omdat door de opdrijving de temperatuur aan de onderkant van het opslag pakket een veel kleiner deel van de tijd op de opslag temperatuur zit. Met deze analytische methode wordt dus het effect op WVP 2 alleen inzichtelijk gemaakt voor opslag in WVP 3.

### 3.3 SEAWAT simulaties

De analytische oplossing geeft al aardig inzicht in de lange termijneffecten bij warmteopslag in WVP 3. Dynamische processen spelen echter ook een rol, daarom is met een axisymmetrisch grondwatermodel (SEAWAT, zie Bijlage II) voor 50 jaar doorgerekend wat de warmteverspreiding zal zijn bij toepassing van de warmteopslag 1 en in WVP 2 om de temperatuurontwikkeling op die locaties gedurende de simulatie te registreren (Figuur 3-3).



Figuur 3-3. Bodemprofiel met temperatuur observatiepunten en bronfilter in WVP 1 (boven) en WVP 3 (onder). Voor beide scenario's wordt iedere tijdstap de temperatuur gemeten in het bovenste en onderste deel van WVP 1 en in WVP 3 op 3 locaties (afstand 0, 10 en 110m), totaal 12 locaties.



Figuur 3-4. Resultaten scenario 1: Temperatuur verdeling in de bodem bij maximale warmteopslag in WVP 1 (links) en WVP 3 (rechts) bij 65°C in het 50° jaar.



Figuur 3-5. Resultaten scenario 2: Temperatuur verdeling in de bodem bij maximale warmteopslag in WVP 1 (links) en WVP 3 (rechts) bij 50°C in het 50° jaar.



Figuur 3-6. Temperatuur verloop in de temperatuur observatiepunten bij warmteopslag in WVP 1 (links) en WVP 3 (rechts) voor beide scenario's (boven scenario 1, onder scenario 2). Kleur van de lijnen in de vier plots komt overeen met de locatie zoals gegeven in plaatje rechtsboven en Figuur 3-3.

De temperatuurcontouren zijn bij opslag in WVP 1 en WVP 3 verder verspreid voor scenario 1 dan scenario 2 (Figuur 3-4 en Figuur 3-5). De hogere temperatuur (scenario 1) heeft dus meer invloed op de verspreiding van de temperatuur contour dan het grotere volume in scenario 2. Figuur 3-6 laat zien dat bij toepassing van de warmteopslag in WVP 3 t.o.v. opslag in WVP 1 de temperatuur toename in WVP 2 groter is. Dit geldt voor zowel scenario 1 als scenario 2. De grootste temperatuurtoename vindt plaats gedurende de eerste 15 jaar, daarna vlakt het af en kruipt de temperatuur verdeling richting steady-state. Bij opslag in WVP 3 wordt het onderin WVP 2 voor scenario 1 maximaal 61°C en voor scenario 2 maximaal 48 °C na 50 jaar gebruik (zwarte lijn).

Bij opslag in WVP 1 wordt de temperatuur in WVP 2 niet hoger dan circa 27°C in beide scenario's.

opslag pakket	WV	/P 1	WVP 3			
scenario	η(%) jaar1	η (%) jaar50	η (%) jaar1	η (%) jaar50		
1: 65°C:	64	82	47	61		
2: 50°C	69	86	66	79		

Tabel 3-1 Efficiënties (ŋ) van het eerste en laatste gesimuleerde jaar voor scenario 1 en scenario 2.

Warmteopslag met kortere filters (in minder dikke aquifers) heeft over het algemeen minder nadeel van opdrijving, dat effect is te zien in de efficiëntie die wordt behaald bij opslag in WVP 1 (20m) versus WVP 3 (50m) (Tabel 3-1). Dit is ook goed te zien in het verschil in efficiëntie die kleiner is bij opslag in WVP 3 dan in WVP 1 (Tabel 3-1). Daarnaast is de opdrijving ook meer van invloed bij een hogere injectie temperatuur (scenario 1). Bij deze (simpele) filterstelling wordt de hoogste efficiëntie dus behaald bij opslag in WVP 1 met een relatief lage temperatuur (Tabel 3-1).

### 3.4 Discussie

Tijdens injectie en onttrekking is de buitenkant van de put/putten warm en geeft het warmte af aan de omliggende bodemlagen. Dit kan leiden tot menging en opwaartse verspreiding van grondwater binnen een aquifer (van Lopik et al., 2015) (bijvoorbeeld WVP 2). Dit is in deze eerste verkenning naar de effecten niet meegenomen in de simulaties omdat de hoeveelheid warmte die wordt afgegeven door de put relatief klein is ten opzichte van de warmte die wordt verspreid door de opslag zelf.

Wanneer dit systeem wordt gerealiseerd, is monitoring essentieel om inzicht te krijgen in de daadwerkelijke warmteverspreiding tijdens de verschillende opslagcycli. Dit kan onder meer gedaan worden door glasvezelkabels te plaatsen op verschillende afstanden van de warme bron en daarmee de warmteverspreiding in de bodem continu te meten. Daarnaast kunnen ook peilbuizen geplaatst worden in de gewenste pakketten (bijv. WVP 1 en WVP 2) op de gewenste locatie om de waterkwaliteit op specifieke momenten te analyseren.

Verdere detaillering van het systeem moet uitwijzen hoeveel putten er nodig zijn, op welke dieptes de filters exact worden geplaatst en wat daarbij de beste configuratie van de bronnen is. Hiervoor moeten gebied specifieke 3D simulaties uitgevoerd worden waarbij de warme en 'koude' bronnen gezamenlijk worden gesimuleerd om te bepalen wat de optimale putopstelling is qua e.g. efficiëntie, kosten en impact. Het toepassen van technieken als MPPW (Zuurbier et al., 2014) om de efficiëntie te verhogen en de impact te verminderen worden daarbij ook meegenomen. In de praktijk is het pompregime complexer dan in deze verkenning is uitgevoerd, dit hangt o.a. af van beschikbare warmte en de warmtevraag. De vraag naar warmte kan sterk variëren per seizoen/jaar, met (tijdelijke) onbalans van de bronnen tot gevolg. Het effect hiervan op de impact en efficiëntie kan in een nader ontwerp en detaillering ook worden meegenomen.

Indien nodig kunnen effecten/impact van de warmteopslag worden gemitigeerd. Als er warmte wordt opgeslagen in WVP 1, kan het bovenste deel van WVP 1 gebruikt worden om thermische effecten te verkleinen door stroming te forceren in deze laag. Daardoor wordt de warmte afgevoerd en zijn temperatuur effecten relatief klein. Hoewel het onwaarschijnlijk lijkt dat dit nodig zal zijn, kan met relatief beperkte aanpassingen de ondergrond actief worden gekoeld door 's winters koude in te vangen (bijvoorbeeld middels droge koelers of oppervlaktewater) en daarmee de gewenste temperatuur in de ondergrond te herstellen.

Deze simulaties maken niet goed inzichtelijk wat het effect is van een relatief ondiepe warmteopslag op de ondiepe bodem (+/- bovenste 20m). Een verhoogde temperatuur kan negatieve effecten hebben op het ondiepe bodemleven en de ecologie. Vervolg onderzoek, d.m.v. een gedetailleerd ondiep model, moet uitwijzen wat de temperatuurverdeling is in deze laag gedurende het jaar, en, wat hiervan de effecten kunnen zijn.

### 3.5 Conclusies verspreiding van warmte

Er is gebruik gemaakt van een vereenvoudigde maar worst-case benadering van de temperatuureffecten van warmteopslag in WVP 1 of WVP 3 op basis van de ondergrond gegevens bij het WRK-terrein in Nieuwegein.

De impact van de warmteopslag op de temperatuur in WVP 2 is kleiner bij opslag in WVP 1 t.o.v. WVP 3 en is ook kleiner bij scenario 2 t.o.v. scenario 1. Het verschil in keuze van opslag pakket heeft daarbij een grotere invloed dan het verschil tussen de twee scenario's. Vanuit de risico's voor de winning van Waternet verdient het dus de voorkeur om de warmteopslag in WVP 1 te doen met scenario 2 ( $T_{inj}$ =50 °C). Opslag in WVP 1 resulteert daarnaast in een hogere terugwinefficiëntie dan opslag in WVP 3.

## 4 Integriteit eerste scheidende laag

### 4.1 Risico voor lek naar het 2e watervoerend pakket

Een aandachtspunt zijn de afdichtingen van de bronnen van Waternet door de scheidende laag (SDL1) tussen WVP 1 en WVP 2: dit betreft de 16 calamiteitengrondwaterwinputten (hierna: "bronnen' of "putten") en een aantal diepe waarnemingsputten. Al deze putten bevatten meerdere peilfilters, hetgeen tijdens de afwerkingsfase een goede afdichting met bentonietklei van boorgaten mogelijk heeft verminderd (bijvoorbeeld door het blijven "hangen" van bentonietkorrels achter centreerringen of tussen stijgbuizen).

Verder wordt in het Kennisdocument Putten (KWR, 2010) aangegeven dat kleiafdichtingen beter niet over grotere dieptetrajecten dan 5 meter dienen te worden aangebracht. In langere dieptetrajecten, zoals hier in SDL1, dienen lengtes van 5 m bentoniet te worden afgewisseld met een of enkele meters filtergrind om eventuele gevolgen van overmatige verticale zwelling op te vangen. Onbekend is of tijdens de aanleg van de winputten volgens deze procedure is gewerkt. De putten zijn aangelegd in het begin van de jaren '90, voordat een eerste versie van het Kennisdocument is opgesteld (2000).

Vooraf kan worden gesteld dat vanwege de dikte van SDL1 (~20 m) het zeer onwaarschijnlijk is dat de afdichting in dat diktetraject onvoldoende zou zijn. Vanwege de grote belangen is hier echter nader naar gekeken<sup>1</sup>. In 2012 is soortgelijk onderzoek uitgevoerd in bron 8 Zuid, naast het nieuwe KWR-gebouw. Die test duurde ruim 2 dagen; bij die test kon geen lek worden vastgesteld (Leunk, Bonte 2012).

### 4.2 Opzet van het veldonderzoek

Ten behoeve van het andere doel van de puttest (vaststellen referentiesituatie voor putverstopping) is een onttrekkingsduur nodig van minimaal enkele uren. Dit laat zich goed combineren met een test voor detecteren van lek door de omstorting.

Om te zien of er lek door de afdichting van het boorgat kan worden gedetecteerd is een puttest ontworpen met de beschikbare bronnen en de peilbuizen die in de omstorting van de bronnen staan afgesteld (dus in de oorspronkelijke boorgaten, zie Figuur 4-1).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Deze tests zijn gedaan door Waternet i.s.m. KWR in 2018 en 2019. De resultaten zijn beschreven in een notitie (Waternet, 09.0003/021). Dit hoofdstuk is voornamelijk op dat onderzoek gebaseerd.



### Figuur 4-1. Opzet puttests

Door de pomp ~2 uur in werking te stellen treedt een stijghoogtedaling op van enkele meters in het afgepompte 2<sup>e</sup> watervoerende pakket. Tijdens de test wordt gekeken of in de peilfilters in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket die zijn afgesteld in de omstorting van de put, een stijghoogteverlaging kan worden gedetecteerd die duidt op mogelijke lek via het boorgat.

Omdat de haalbaarheid van de tests niet vaststond, is ervoor gekozen om eerst twee proeven uit te voeren. Indien de resultaten daartoe aanleiding gaven, kon het testprogramma worden uitgebreid naar de andere bronnen.

## 4.3 Uitvoering

Waternet en KWR hebben de bronnen 5 Zuid en 1 Zuid geselecteerd om de tests in uit te voeren. Van een aantal bronnen zijn de filterstellingen e.d. onbekend. Mede daarom zijn op 21 maart 2018 van alle peilbuizen van de betrokken bronnen de dieptes nagemeten ("doorgeklokt") en gecontroleerd op correcte labels, afwerking en onderhoudstoestand. Dit betreft voor de test in bron 5 Zuid de bronnen 6 Zuid en 4 Zuid; en voor de test in 1 Zuid de bronnen 2 Zuid en 1 Noord. Bij die controles stuitten we op enkele problemen.



Figuur 4-2. Bronlocatie bemeten calamiteitengrondwaterput Zuid 5.

Het bleek dat bron 1 Zuid slechts twee peilfilters heeft die beide staan afgesteld in het 2<sup>e</sup> watervoerend pakket. Daarmee is deze bron zelf niet bruikbaar voor de test. Vervolgens is gekeken of bron 1 Noord geschikt is. Dat bleek voor bron 1 Noord zelf wel het geval, maar omdat de "naastliggende" bronnen 1 Zuid en 2 Noord geen van beide peilfilters in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket bleken te hebben viel een puttest in bron 1 Noord ook af. Uiteindelijk is besloten om alleen een test uit te voeren in bron 5 Zuid. Voor het doel van de test levert dit voldoende informatie op. In Figuur 4-2 is aangegeven in welke bronnen peilfilters zijn bemeten. Enkele jaren geleden is al een soortgelijke test uitgevoerd in bron 8 Zuid (Leunk & Bonte, 2012) zodat het gebied voldoende gedekt is.

De test in bron 5 Zuid is uitgevoerd in de ochtend van maandag 26 maart 2018. Daaraan voorafgaande zijn op woensdag 21 maart 2018 dataloggers ingehangen die op zondag 25 maart 2018 om 11:00 in de ochtend (zomertijd) zijn gestart met een meetinterval variërend van 1 tot 5 minuten. De dataloggers zijn op dinsdag 27 maart 2018 verwijderd en uitgelezen.

### 4.4 Ruwe meetresultaten

Ruwe tijdreeksen van gemeten stijghoogtes in de peilbuizen van bronnen 4, 5 en 6 Zuid zijn weergegeven in Figuur 4-3. Deze tijdreeksen geven de veranderingen van de stijghoogtes weer sinds de start van de metingen op zondag 25 maart 10:00u.



Figuur 4-3. Ruwe gemeten tijdstijghoogtelijnen

In Figuur 4-3 is de invloed van de pomp duidelijk zichtbaar. Ook is een regelmatige stijging en daling te zien die zou kunnen komen door getij op de Lek en die in het 2° watervoerend pakket op zijn beurt mogelijk wordt beïnvloed door inzet van de naburige Vitens pompstations Tull en 't Waal en Nieuwegein.

Bij inzoomen op de reeksen rondom de start van het pompen (Figuur 4-3) vallen twee zaken op:

- 1. Een zeer snelle stijging van de stijghoogtes in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket, direct na aanzetten van de pomp, die geleidelijk weg ebt en dito een zeer snelle daling bij uitzetten van de pomp (zie lichtblauwe ovaaltje in figuur 4). Dit is een fenomeen bekend onder de naam "Noordbergum effect", naar de plaats waar het is ontdekt. Deze kortstondige stijging van stijghoogte in de bovenliggende laag door dit fenomeen duidt <u>niet</u> op slechte afdichting van doorboorde scheidende lagen, maar wordt veroorzaakt door het plotseling sterk verlagen van de stijghoogte en daardoor opgewekte horizontale compressie in het afgepompte pakket, waardoor boven- en onderliggende watervoerende pakketten ietsje worden "meeuitgeknepen". De tijdelijke verhoging zakt na verloop van tijd weg naar de oorspronkelijke stijghoogte terwijl er nog wel wordt gepompt in het 2<sup>de</sup> watervoerend pakket. Als er kortsluitstroming zo zijn, zouden er ook in het 1<sup>ste</sup> watervoerend pakket verlagingen optreden
- 2. Een regelmatige fluctuatie met een periode van ~22 minuten en een amplitude van circa 2 à 3 cm (zie Figuur 4-4). In alle watervoerende pakketten heeft deze fluctuatie een vrijwel gelijke amplitude en is hij in fase. Dat kan dan alleen maar veroorzaakt worden door een proces dat over een relatief grote oppervlakte werkt waarbij drukveranderingen via veranderende belasting van het korrelskelet worden overgebracht in plaats van via Darcystroming. Eigenlijk komen dan alleen waterpeilveranderingen zeer waarschijnlijk een staande golf in het Lekkanaal waarvan de periode kennelijk circa 25 minuten bedraagt en die wellicht wordt aangedreven door het schutten van de Beatrixsluizen.



Figuur 4-4. Kortdurende fluctuaties ten gevolge van staande golf in Lekkanaal

### 4.5 Verwerking van de metingen

Omdat het gaat om analyse van wat er in het 1<sup>e</sup> watervoerende pakket gebeurt, is de analyse alleen op de metingen in dat pakket gericht.

De stijghoogtereeksen kunnen worden gecorrigeerd voor bovengenoemde fluctuaties door die fluctuaties eruit te filteren, te middelen en ze af te trekken van alle stijghoogtereeksen. Vanwege de kortdurende test (2 uur) hoeven praktisch gezien alleen de stijghoogtefluctuaties van de staande golf in het Lekkanaal en het Noordbergumeffect te worden weggefilterd. Maar daarbij zijn er enkele complicaties:

- De Lekkanaalfluctuaties kunnen in principe worden gecorrigeerd met filtering ("digital signal processing"), op basis van een laagdoorlaatfilter met een kantelpunt overeenkomend met een periode van 25 à 30 minuten. Het nadeel van zo'n laagdoorlaatfilter is dat daarmee ook frequentiecomponenten worden weggefilterd die juist wel wat meer aandacht behoeven, onder meer het Noordbergumeffect.
- 2. Uit de ruwe tijdstijghoogtelijnen blijkt al direct dat het Noordbergumeffect kennelijk gedurende langere tijd (1-2 uur) de stijghoogteveranderingen in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket domineert. Vraag is of überhaupt nog iets zichtbaar zou kunnen zijn van stijghoogteverlagingen via eventuele lek in de omstorting. Daarvoor dient de analyse iets verder te worden uitgewerkt.



Figuur 4-5. Ruwe en afgevlakte tijdstijghoogtelijn in bron 5 Zuid- filter 2

Ter illustratie zijn in Figuur 4-5 ruwe tijdstijghoogtelijnen weergegeven van peilfilter 2 in bron 5 Zuid (de afgepompte bron) en daarin een paarse kromme die een "afgevlakt" stijghoogteverloop voorstelt waarin de Lekkanaalfluctuaties zijn weggefilterd.

Met de twee verticale lichtblauwe lijnen zijn de start- en stoptijd van de pomp aangegeven. Duidelijk blijkt dat het afgevlakte stijghoogteverloop de discontinuïteiten (zeer snelle stijging en daling) ten gevolge van het Noordbergumeffect niet goed kan volgen, zoals al verwacht in punt 1 hierboven. Waar de gemiddelde stijghoogte nog geleidelijk daalt tot het moment dat de pomp start, wijkt de paarse lijn al af om de plotselinge stijghoogteverhoging door het Noordbergumeffect te kunnen volgen.

Met de gestippelde rode lijn is getracht op basis van interpolatie een doorlopend "ongestoord" afgevlakt stijghoogteverloop te creëren waar de invloeden van het Noordbergumeffect niet in meespelen.

Door die gecorrigeerde afgevlakte tijdstijghoogtereeks af te trekken van de ruwe tijdstijghoogtereeks blijven puur de effecten over van kortdurende fluctuaties (zie Figuur 4-6).

Uit die effecten blijkt inderdaad duidelijk dat de stijghoogteveranderingen in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket ten gevolge van de pomp gedomineerd worden door het Noordbergumeffect. Dat effect blijkt de volle 2 uur van de puttest aan te houden (wel steeds minder sterk); dat zal deels komen doordat de stijghoogte in het afgepompte 2<sup>e</sup> watervoerend pakket nog steeds relatief snel aan het dalen was en daarmee het mechanisme achter het Noorbergumeffect (toenemende compressie in de watervoerende pakketten) nog steeds actief is.





### 4.6 Conclusies integriteit scheidende laag

De stijghoogteveranderingen in het 1° watervoerend pakket ten gevolge van het aan- en afschakelen van de grondwateronttrekking in het 2° watervoerend pakket werden gedurende de gehele twee uur durende puttest gedomineerd door het Noordbergumeffect. Eventuele door de puttest veroorzaakte stijghoogteverlagingen in het 1° watervoerend pakket worden daardoor overschaduwd.

In het geval van een veel langer durende puttest zou deze verstoring uiteindelijk voldoende kunnen uitwerken en niet meer van invloed zijn. Maar bij zo'n langer durende onttrekking zouden naar verwachting de stijghoogtes in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket ook via stroming door de kleilaag over een veel grotere oppervlakte rondom de put worden beïnvloed, dus niet alleen via de putomstorting zelf. Zo'n test is in 2012 uitgevoerd in bron 8 Zuid (Leunk en Bonte, 2012); daar bleken geen effecten van lek door de omstorting vastgesteld te kunnen worden.

Al met al is geven de metingen in het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket geen indicatie van eventuele lekkage van het 1<sup>e</sup> naar het 2<sup>e</sup> watervoerend pakket via de omstorting van putten in de nabijheid van bron 5 Zuid.

Als de omstorting van de hier aanwezige putten erg lek was geweest (geen goede kleiprop aangebracht) had het Noordbergumeffect niet zo sterk gedomineerd. Dat de omstortingen in SDL1 significant zouden kunnen lekken was al niet te verwachten en het vaststellen van eventuele lek werd al van te voren als lastig ingeschat. Met deze test is nu de onzekerheid weggenomen dat er grote lekkages zijn. Dat de aanwezige omstortingen ook een even grote weerstand hebben als SDL1 kon niet worden aangetoond, dit is ook met andere tests erg lastig te aan te tonen.

Gezien de resterende onzekerheden en de effecten door conductie van warmte door SDL1 wordt geadviseerd om eventuele warmteopslag in te richten zo ver mogelijk verwijderd van de winputten en installaties op het WRK-terrein.

# 5 Effecten op de chemische grondwaterkwaliteit en de microbiologische populatie

### 5.1 Doel en onderzoeksvragen

Doordat de temperatuur van het grondwater door een ondergrondse warmteopslag systeem lokaal verandert, heeft dat invloed op de geochemische en microbiologische processen die, in interactie met het sediment, plaatsvinden. Dit kan leiden tot een verandering van de samenstelling van het grondwater. Het doel van dit onderdeel is om te voorspellen welke geochemische processen plaats zullen vinden in de ondergrond van de beoogde projectlocatie als gevolg van temperatuurveranderingen, en welke, mogelijk ongewenste, gevolgen dat kan hebben voor de grondwaterkwaliteit.

De lokale bodemopbouw is in kaart gebracht tijdens de proefboring die is verricht op 23 juli 2018 (sectie 2.3.1). Tevens zijn uit het boorgat enkele steekmonsters genomen en zijn vier peilbuisfilters geplaatst. Met de steekmonsters en het grondwater ter hoogte van deze peilbuisfilters zijn verschillende experimenten uitgevoerd in het laboratorium van KWR en zijn gedurende de experimenten diverse parameters geanalyseerd.

De concrete onderzoeksvragen die bij de batch experimenten zijn gehanteerd, zijn als volgt:

- Wat zijn de temperatuureffecten op chemische en microbiële processen, en dus op de chemische waterkwaliteit en de microbiële populatie, bij ondergrondse warmteopslag?
- Wat zijn vanuit grondwaterbeschermingsoogpunt de belangrijkste parameters bij ondergrondse warmteopslag?

### 5.1.1 Leeswijzer

Het monitorings- en analyseplan van deze studie is beschreven in 5.2. De referentiesituatie is in 5.3 in kaart gebracht met behulp van geochemische en microbiologische analyses op sedimentkernen en grondwatermonsters. Met deze sedimentkernen en grondwatermonsters zijn batch experimenten uitgevoerd in het lab om de effecten van temperatuurveranderingen op de geochemische processen te onderzoeken. De resultaten van deze experimenten zijn opgenomen in hoofdstuk 5.4 en worden bediscussieerd in 5.4.6. De geochemische processen die in het veld worden verwacht en de implicaties voor warmteopslag in het algemeen zijn tevens geschetst in 5.4.6.

## 5.2 Monitorings- en analyseplan

## 5.2.1 Monitoring referentiesituatie

### <u>Grondwaterkwaliteit</u>

Tijdens de proefboring zijn op vier verschillende dieptes peilbuisfilters geplaatst voor de monitoring van de grondwaterkwaliteit en -stand. De dieptes van deze peilbuisfilters zijn gegeven in Figuur 5-1. Alle filters staan in het eerste watervoerend pakket (Figuur 2-3). *GW1* staat in WVP 1a, direct boven een slecht doorlatende laag. De overige drie peilbuisfilters zijn geplaatst in WVP 1b: één direct onder de afsluitende slecht doorlatende laag (*GW2*), één in het midden van WVP 1b (*GW3*), en één aan de bodem van WVP 1b (*GW4*). Zodoende kan de waterkwaliteit in het beoogde watervoerend pakket (WVP 1) uitgebreid worden gemonitord. Alle peilbuisfilters zijn gemaakt van PVC en hebben een lengte van 2 meter en een buitendiameter van 32 mm en een binnendiameter van 28 mm.

	Peilbuis- filter	Diepte top peilbuisfilter		Diepte bodem peilbuisfilter		
		m-mv	mNAP	m-mv	mNAP	
	GW1	24	-22.56	26	-24.56	
	GW2	31	-29.56	33	-31.56	
	GW3	40	-38.56	42	-40.56	
Mar an	GW4	48	-46.56	50	-48.56	

Figuur 5-1: Bovenaanzicht boorgat met de vier peilbuisfilters en bijbehorende diepte-intervallen.

Op 29 november 2018 en 14 januari 2019 is de grondwaterkwaliteit ter hoogte van alle vier de peilbuisfilters bemonsterd (Figuur 5-2) en geanalyseerd (Tabel 5-1). De bemonsterde grondwaterkwaliteit dient als referentiesituatie, waarmee de te verwachten geochemische processen kunnen worden bepaald.



Figuur 5-2: Monstername van grondwater op 29 november 2018.
#### Tabel 5-1: Analysepakket grondwater

Parameters	Uitvoering analyse		
	29 november 2018	14 januari 2019	
pH, temperatuur, EC, O <sub>2</sub>	KWR (veld)	KWR (veld)	
Alkaliniteit en TOC	KWR (lab)	KWR (lab)	
Elementen met ICP/MS-scan	KWR (lab)	Bureau Veritas	
Anionen, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , o-PO <sub>4</sub> , SO4, CH <sub>4</sub>	Aqualab Zuid	Aqualab Zuid	
DOC	DOC-Labor	KWR (lab)	

#### <u>Sedimentsamenstelling</u>

Tijdens de proefboring zijn op 25 juli 2018 twee ongeroerde steekmonsters (sedimentkernen) van het sediment genomen. Sedimentkern 1(*S1*) is genomen op een diepte van 25 tot 25,82 m-mv en sedimentkern 2 (*S2*) op een diepte van 42 tot 42,86 m-mv. Deze diepte-intervallen komen overeen met respectievelijk *GW1* (in WVP 1a) en *GW3* (in WVP 1b). De kernen hebben een diameter van 75 mm en de bovenkanten zijn in het veld afgedopt met paraffine om oxidatie van het sediment te voorkomen.

*S2* is op 15 januari 2019 in het lab van KWR geopend in een met stikstof gevulde glovebox ter minimalisatie van blootstelling aan de atmosfeer. Op 13 februari 2019 is *S1* op dezelfde wijze geopend. Uit iedere kern zijn ter karakterisering van het sediment enkele deelmonsters genomen, waarvan bij VU Amsterdam en LMA CV Sleeuwijk de korrelgroottedistributie is bepaald, en de chemische samenstelling is geanalyseerd met XRF (röntgenfluorescentiespectrometrie) en met TGA (thermogravimetrische analyse) middels de LOI (loss on ignition) methode.

De volgende microbiologische parameters van het sediment uit de kernen zijn in het microbiologisch lab van KWR geanalyseerd (Italiaander, 2019):

- SSRC (sporen van sulfiet-reducerende Clostridia). SSRC komen voor (onder anaerobe omstandigheden) in bodem en sediment, en kunnen sulfiet reduceren tot waterstofsulfide (Watertool, 2011). SSRC hebben een hoge resistentie tegen natuurlijke inactivering en desinfectie (Italiaander, 2019). De invloed van temperatuur op de overleving van deze groep resistente micro-organismen kan aan de hand van deze parameter worden bepaald. Indien er bij 11°C veel SSRC voorkomen en bij 85°C weinig, geeft dat bijvoorbeeld aan dat weinig microorganismen in staat zijn te overleven bij deze hoge temperaturen.
- *ATP (adenosine trifosfaat).* **ATP** is de belangrijkste energiedrager voor cellulaire functies in alle organismen. Het meten van **ATP** geeft, via een eenvoudig en snel uitvoerbare meting (Italiaander, 2019), een beeld van de hoeveelheid actieve biomassa in een watermonster (Heijnen, 2016), en is dus een maat voor de biologische activiteit.
- De bacteriële gemeenschap met behulp van 16SrRNA gen sequencing. Met 16SrRNA gen sequencing kan de DNA-sequentie van een groot aantal DNAfragmenten in korte tijd en tegen beperkte kosten worden bepaald (Heijnen, 2016). Voor het karakteriseren van de bacteriële gemeenschap wordt gebruik gemaakt van sequentieanalyse van het 16S ribosomaal RNA gen (16S rRNA), welke voorkomt in én verschilt tussen alle bacteriegroepen. De resultaten van een 16S rRNA sequentie analyse zijn semi kwantitatief. De analyse geeft informatie over welke bacteriegroepen aanwezig zijn in een monster maar ook hoeveel van de 16S rRNA sequentie per bacteriegroep aanwezig is per monster. De hoeveelheid van deze sequenties wordt uitgedrukt in een aantal 'reads'. Dit aantal wordt semi-

kwantitatief gepresenteerd omdat het aantal reads van een bacteriegroep relatief ten opzichte van het aantal reads in 1 monster gegeven wordt. Door het karakteriseren van de bacteriële gemeenschap kunnen geochemische processen die worden beïnvloed door microbiologie (en andersom) beter worden geplaatst. Uit de NGS-analyses kunnen verschillende resultaten worden gehaald:

- De relatieve abundantie (% reads) van alle micro-organismen in een monster; dit wordt getoond in staafdiagrammen waar de relatieve abundantie per bacteriegroep weergegeven wordt. Bacteriegroepen kunnen ingedeeld worden in verschillende taxonomische niveaus (Figuur 5-3). In dit rapport wordt dat op klasse of genus niveau gedaan.
- De mate waarmee de microbiologische gemeenschappen van verschillende monsters op elkaar lijken, middels een 'principal component analysis' (PCA).
  Voor uitleg, zie box 'Principal Component Analysis'.
- De microbiële diversiteit in alle monsters, bepaald met Faith's Phylogenetic Diversity (PD) (Faith 1992). Faith's PD is de fylogenetische analoog van 'taxon richness' en wordt uitgedrukt als het aantal fylogenetische boomeenheden die gevonden zijn in een monster. Hoe hoger de waarde voor Faith's PD, hoe meer takken de boom heeft en dus hoe diverser het monster is (Ramette et al., 2007).



Figuur 5-3: De taxonomische niveaus van organismen. Microbiële gemeenschappen kunnen op verschillende taxonomische niveaus weergegeven worden, in dit rapport op klasse en genus niveau.

## Principal Component Analysis (PCA)

Principal Component Analysis (PCA) is een analyse methode die gebruikt wordt om het verschil tussen microbiële gemeenschappen van monsters te visualiseren. Het is een multivariate analysemethode waarmee de microbiële gemeenschappen in monsters worden gerangschikt op grond van waarnemingen (waarden) aan meerdere afhankelijke variabelen. In dit geval zijn deze variabelen de bacteriegroepen en hun abundantie in 'reads'. Deze methode is gebaseerd op een dissimilariteitsmatrix van alle variabelen en maakt hier een matrix van, dat teruggebracht wordt tot een tweedimensionale figuur (Ramette et al., 2007). In dit figuur worden de componenten die het grootste deel van de variatie in de data verklaren getoond op de assen, de zogenaamde principal components (PC's). In een PCA plot staan op elkaar gelijkende microbiële gemeenschappen dicht bij elkaar en sterk verschillende microbiële gemeenschappen ver van elkaar af.

In het geval van NGS data stelt dus elk punt in een PCA plot een microbiële gemeenschap van een monster voor. De waarnemingen die bij elk punt horen zijn de relatieve abundanties van de bacteriegroepen (uitgedrukt in reads) die de grootste variatie in de data verklaren. Omdat deze bacteriegroepen de grootste variatie in de data verklaren, gaat het meestal om de meest abundante bacteriegroepen. Hieronder is een voorbeeld gegeven waarin de x- en y-as samen 28.4% van de variatie in de data verklaren. Er is duidelijk te zien hoe de verschillende microbiële gemeenschappen met elkaar in verhouding staan; de punten met dezelfde kleur zijn microbiële gemeenschappen die uit hetzelfde soort water afkomstig zijn.



## 5.2.2 Sediment-experimenten

Aanvullende grondwatermonsters zijn genomen van *GW1* en *GW3* en zijn voor de batch experimenten in een met stikstof gevulde glovebox in schottflessen samengevoegd met sedimentmonsters afkomstig uit respectievelijk *S1* en *S2* (Figuur 5-4; links). De dieptes van de twee peilbuisfilters komen overeen met de dieptes van de twee sedimentkernen, waardoor het bemonsterde grondwater opnieuw in contact komt met het lokale sediment van dezelfde diepte. De verhouding sediment-grondwater die is aangehouden in de schottflessen is gelijk aan 250 gr : 500 mL voor de experimenten met *S1* en *GW1*, en aan 200 gr : 400 mL voor de experimenten met *S2* en *GW3*. De schottflessen zijn gemaakt van Duran® borosilicaatglas 3.3 (Tabel 5-2).

Volledige naam	Formule	Gewichtspercentage (w%)	Element	mol/kg
siliciumdioxide	SiO <sub>2</sub>	81	Si	13,5
boortrioxide	<b>B</b> <sub>2</sub> <b>O</b> <sub>3</sub>	13	В	3,7
kalium-/natriumoxide	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	4	K / Na	0,85 - 1,3
aluminiumoxide	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	AI	0,39

Tabel 5-2: Geschatte chemische samenstelling van het gebruikte glaswerk (Duran® borosilicaatglas 3.3; glasatelier-saillart.be/borosilicaatglas/over-borosilicaatglas/).

Verschillende temperaturen zijn onderzocht tijdens de experimenten: 5°C, 11°C, 23°C, 40°C, 60°C, en 85°C. Het totale overzicht van de bemonsteringen, experimenten, en chemische en microbiologische analyses is weergegeven in Tabel 5-3 en wordt in de volgende secties toegelicht. Tijdens de chemische en microbiologische bemonsteringen zijn 5 tijdstippen gehanteerd, welke ook in de volgende secties worden toegelicht:

-	t0 = 0:	direct na samenbrengen sediment en grondwater.
-	t1 = 1 uur:	1 uur na samenbrengen sediment en grondwater en
		veranderen temperatuur.
-	t2 = 1 week:	1 week na samenbrengen sediment en grondwater en
		veranderen temperatuur. Dit meetpunt levert extra data op om
		trends te kunnen herkennen in de resultaten van t1 en t3.
-	t3 = 2 weken:	2 weken na samenbrengen van sediment en grondwater en
		veranderen temperatuur. Vanaf t3 is één sediment grondwater
		mengsel nogmaals twee weken bewaard op 11°C, de
		oorspronkelijke grondwatertemperatuur, om reversibiliteit van
		geochemische processen te onderzoeken.
-	t4 = 4 weken:	2 weken na terugbrengen temperatuur naar 11°C.

#### <u>Chemische analyse</u>

Per sedimentkern zijn in totaal 24 2L-schottflessen met sediment-grondwater mengsels geprepareerd: vier voor ieder temperatuurniveau. Na preparatie zijn de monsters ter homogenisering op roerplaten bewaard in de koeling (5°C en 11°C), in een aparte kamer (23°C; Figuur 5-4), of in ovens (40°C, 60°C, en 85°C). Hierbij is rekening gehouden met de intensiteit van roeren om fysische desintegratie van sediment te voorkomen. Op **t1**, **t2**, **t3**, en **t4** is per temperatuurniveau één van de vier schottflesen anoxisch geopend in de glovebox en is het supernatant van dit sediment-grondwater monster bemonsterd voor een chemische analyse. Het analysepakket van deze chemische analyse is gelijk aan dat van de tweede veldbemonstering op 14 januari 2019 (Tabel 5-1).

Het voordeel van aparte schottflessen ('sacrificial sampling') t.o.v. een enkele schottfles ('aliquot sampling') voor de bemonstering op meerdere tijdstippen, is dat de verhouding sediment:water in een monster gelijk is bij iedere analyse (OECD, 2008). De kans op ongelijke monsters door heterogeniteit in sediment is echter wel groter.

#### **Heterogeniteit**

Heterogeniteit in de geprepareerde sediment-grondwater monsters is vastgesteld aan de hand van de concentratie **CI** die is waargenomen in de experimenten bij 11°C, de grondwatertemperatuur. **CI** wordt beschouwd als conservatief ion, en is dus niet onderhevig aan chemische of biologische reacties. 11°C wordt als referentie genomen omdat ook temperatuur zodoende geen invloed heeft op de samenstelling van de sediment-grondwater mengsels. De rest van de resultaten kan worden beschouwd t.o.v. deze heterogeniteit.





Figuur 5-4: Zes sediment-grondwater monsters die op verschillende temperaturen zijn bewaard (links) en sediment-grondwater mengsels bij bewaring op 23°C op roerplaten (rechts).

### Microbiologische analyse

Per temperatuurniveau is op t1, t3, en t4 het mengsel dat overblijft in de schottfles na bemonstering van het supernatant geanalyseerd op ATP en SSRC in het microbiologisch laboratorium van KWR.

Voor de bepaling van de microbiologische populatie met NGS zijn aanvullende experimenten uitgevoerd vanaf 16 juli 2019. Daarvoor is extra grondwater bemonsterd en is sediment gebruikt dat, na bemonstering voor bovengenoemde experimenten, anaeroob is bewaard op 3 ±2°C. Voor deze experimenten zijn per sedimentkern 18 100mL-schottflessen gebruikt en is een sediment-grondwater-verhouding van 5 gr : 10 mL aangehouden. Op **t0**, **t2**, **t3**, en **t4** is één monster per temperatuurniveau gecentrifugeerd en is het overgebleven pellet zonder supernatant ingevroren. Deze ingevroren monsters zijn op 10 september 2019 geëxtraheerd op het microbiologisch laboratorium van KWR en vervolgens geanalyseerd middels een NGS-analyse voor de bepaling van de microbiologische populatie (sectie 5.2.1).

Bij deze NGS-analyse zijn tevens blanco's (PCR blanco's) en twee 'mock communities' (ZymoCel en ZymoDNAPCR) meegenomen. PCR blanco's zijn opgewerkte watermonsters die geanalyseerd zijn met NGS zonder toevoeging van sedimentmateriaal en gelden dus als negatieve controle. Wanneer de microbiële populatie van een experimenteel monster lijkt op die van een PCR blanco, dan zat er niet genoeg DNA in het experimentele monster en is het DNA van het opgewerkte watermonster geanalyseerd. Mock communities zijn microbiële gemeenschappen waarvan de samenstelling bekend is en dienen dus als interne controle. Van deze 'artificiële' (='mock' in het Engels) communities is het monster vóór de analyse verdund. Tabel 5-3: Overzicht van bemonsteringen, experimenten, en chemische en microbiologische analyses. GW# = grondwater uit peilbuisfilter #, S# = sediment uit sedimentkern #. Op tijdstip  $t_{s_2} = 1$  uur en  $t_{s_2} = 2$  weken is de microbiologie niet van het volledige monster geanalyseerd maar enkel dat van het bezinksel.

Fase	Voorbe	ereiding	Expe	riment S2 er	1 GW3 (du	ur: 4 weken,	)	Expe	Experiment S1 en GW1 (duur: 4 weken)		)	
Datum	29/11/2018	14/1/2019	15/1/2019	15/1/2019	22/1/2019	29/1/2019	12/2/2019	13/2/2019	13/2/2019	20/2/2019	27/2/2019	13/3/2019
Monstername GW												
Peilbuisfilter 1 (GW1)	$\checkmark$	√					√ (extra)					
Peilbuisfilter 2 (GW2)	$\checkmark$	√										
Peilbuisfilter 3 (GW3)	$\checkmark$	√ (extra)										
Peilbuisfilter 4 (GW4)	$\checkmark$	√										
Monstername S												
Sedimentkern 1 (S1)							√					
Sedimentkern 2 (S2)			√									
Experimenten			-							-		
Tijdstap		-	t <sub>s2</sub> = 0	t <sub>s2</sub> = 1 u	$t_{s_2} = 1 \ wk$	$t_{s_2} = 2 \ wk$	$t_{s_2} = 4 \ wk$	t <sub>s1</sub> = 0	$t_{s_1} = 1  u$	$t_{s_1} = 1 \ wk$	$t_{s_1} = 2 \ wk$	$t_{s1} = 4 \text{ wk}$
Temperatuur van			5	5	5	5	11	5	5	5	5	11
S+GW mengsels (°C)			11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
J (,			23	23	23	23	11	23	23	23	23	11
			40	40	40	40	11	40	40	40	40	11
			60	60	60	60	11	60	60	60	60	11
			85	85	85	85	11	85	85	85	85	11
Chemische analyse		CIVIL CIVIA	62	6x	6x	6x	6x	<b>C1</b>	6x	6x	6x	6x
	GW1-GW-4	GW1-GW4	52	supernatant	supernatant	supernatant	supernatant	51	supernatant	supernatant	supernatant	supernatant
660.6 AT0				32+01/3	32+6113	52+0115	32+01/3		31+011	51+0101	51+0101	51+6101
SSRC + ATP			S2	6x		6x	6x S2+GW3	51		6x S1+GW1	6x S1+GW1	6x S1+GW1
				bezinksel		Dezifiksei						
Microbiologische			3x S2		6x pellet	6x pellet	6x pellet	3x S1		6x pellet	6x pellet	6x pellet
populatie*			3x pellet S2+GW3		S2+GW3	S2+GW3	S2+GW3	3x pellet S1+GW1		\$1+GW1	\$1+GW1	\$1+GW1
Toelichting		Referentie GW	Referentie S2			Veranderen	Einde exp. 1	Referentie S1			Veranderen	Finda avr. 2
	Referentie GW	Extra GW voor	Mengen S2+GW3			T (°C) naar	Extra GW	Mengen S1+GW1			T (°C) naar	Elliue exp. 2
		exp. 1	Veranderen T (°C)			11°C	voor exp. 2	Veranderen T (°C)			11°C	
*De microbioloaische popula	atie is met separa	ate experimenten	bepaald. waarbii t =	0 = 16/7/2019	). t = 1 wk	= 23/7/2019.	t = 2 v	vk = 30/7/2019.	t = 4 wk = 1	3/8/2019.		

\*De microbiologische populatie is met separate experimenten bepaald, waarbij t = 0 = 16/7/2019,

t = 1 wk = 23/7/2019,

 $t = 4 \ wk = 13/8/2019.$ 

40

# **Drinkwaterbesluit**

De chemische waterkwaliteitsparameters die zijn opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018) zijn in deze studie als referentiekader gebruikt waarmee het oorspronkelijke grondwater en het supernatant van de experimenten kan worden vergeleken. Dit referentiekader is nodig om te kunnen bepalen of een verandering van de temperatuur een significante (negatieve) invloed heeft op de grondwaterkwaliteit. De parameters uit het Drinkwaterbesluit, die ook zijn gemeten in deze studie, zijn opgenomen in Tabel 5-4 met de bijbehorende normen voor de concentratie drinkwater.

Tabel 5-4: Drinkwaterkwaliteitsnormen die zijn opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018;https://wetten.overheid.nl/BWBR0030111/2018-07-01) en in deze studie zijn gemeten.

Parameter	Symbool	Maximale concentratie in drinkwater	Eenheid
	Chemische parameters	5	
Antimoon	Sb	5,0	µg/L
Arseen	As	10	µg/L
Boor	В	0,5	mg/L
Cadmium	Cd	5,0	µg/L
Chroom	Cr	50	µg/L
Koper	Cu	2,0	mg/L
Kwik	Hg	1,0	µg/L
Lood	Pb	10	µg/L
Nikkel	Ni	20	µg/L
Nitraat	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	mg/L
Nitriet	NO <sub>2</sub> -	0,1	mg/L
Seleen	Se	10	µg/L
	Bedrijfstechnische parame	eters	
Ammonium	$NH_4^+$	0,2	mg/L
Chloride	CI	150	mg/L
Opgelost/totaal organisch koolstof	DOC/TOC	Geen abnormale verandering	mg/L
Geleidingsvermogen	EC	125	mS/m
Hardheid	-	>1	mmol/L
Temperatuur	Т	25	°C
Waterstofcarbonaat	HCO3 <sup>-</sup> / Alkaliniteit (CaCO3)	>60 / >49	mg/L
Zuurgraad	pH	7 < pH < 9,5	-
Zuurstof	O <sub>2</sub>	>2	mg/L
Orga	anoleptische / esthetische p	arameters	
Aluminium	AI	200	µg/L
lJzer	Fe	200	µg/L
Mangaan	Mn	50	µg/L
Natrium	Na	150	mg/L
Sulfaat	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	150	mg/L
Zink	Zn	3	ma/L

# 5.3 Grondwaterkwaliteit en sedimentsamenstelling

## 5.3.1 Grondwaterkwaliteit

De grondwaterkwaliteit is gegeven in Figuur 5-5, Figuur 5-6, Bijlage I, en Bijlage IV. De resultaten van **pH**- en **EC**-metingen die tijdens de proefboring op 23 juli 2018 zijn verricht, zijn tevens opgenomen in Bijlage I.

Het bemonsterde grondwater had op 29 november 2018 een erg hoge concentratie **DOC**, waarvan een groot deel bestond uit 'biopolymeren', welke doorgaans afwezig zijn in grondwater (Bijlage IV). Mogelijk betreft dit synthetische polymeren die afkomstig zijn van organische additieven gebruikt in de boorspoeling. Bovendien was het grondwater tijdens het voorspoelen van de filters vóór de monstername erg troebel (Figuur 5-7). Mogelijk zijn de filters niet voldoende gespoeld direct na de realisatie van de peilbuizen. Daarom zijn de peilbuisfilters vóór de tweede bemonstering op 14 januari 2019 uitvoerig doorgespoeld tot het water helder genoeg was voor monstername. Als gevolg hiervan zijn tijdens de eerste en tweede bemonstering met name bij *GW3* verschillen waargenomen tussen de concentraties **DOC**, **Na**, **PO**<sub>4</sub>, en **EC**. De grondwaterkwaliteit van de tweede bemonstering op 14 januari 2019 wordt als meest betrouwbaar en representatief gezien en wordt als referentiesamenstelling gebruikt bij de sediment-experimenten.

Het grondwater ter hoogte van alle vier de peilbuisfilters is zoet, met een concentratie van maximaal 54 mg/L **CI**. De lage concentratie  $O_2$ , de afwezigheid van  $NO_3$ , en de aanwezigheid van  $NH_4$  duiden op **Fe**-reducerende omstandigheden (Figuur 5-5 & Bijlage I). Het grondwater heeft een **Ca-HCO**<sub>3</sub>-type (Figuur 5-6; Piper, 1944; Kumar, 2013). De gemeten concentraties **Ca** verschillen sterk per laboratorium, en de metingen van Bureau Veritas zijn het meest betrouwbaar in dat opzicht omdat. Van de overige stoffen treden enkel bij **Ni** significante verschillen op tussen de concentraties die zijn gemeten bij verschillende labs. De reden voor deze verschillen is onbekend.

Alkaliniteit, hardheid, EC, en de concentraties Cl, NH<sub>4</sub>, Fe, Mn, SO<sub>4</sub>, As, Zn, Cu, Cr, en Ni zijn hoger in *GW1* dan in het grondwater van de drie diepste filters, terwijl het tegenovergestelde juist waar is voor TOC, DOC, Al, B, en Na (Figuur 5-5 en Bijlage I). De pH is lager in *GW1* dan in het diepere grondwater en voldoet niet aan de ondergrens van de eis die is opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018). *GW1* en *GW3* voldoen beiden niet aan de eisen die in het Drinkwaterbesluit (2018) zijn opgenomen voor Fe, Mn, As, NH<sub>4</sub>, en O<sub>2</sub>.

Wel wordt voldaan aan de eisen die zijn gesteld voor Alkaliniteit, Cl, EC, Na, SO<sub>4</sub>. en de bovengrens van de pH. De temperatuur van het grondwater blijft bovendien onder de drinkwaternorm van 25°C. De concentraties Al, B, Cr, Cu, Ni, zijn zeer laag ten opzichte van de eisen die in het Drinkwaterbesluit (2018) zijn gesteld (Tabel 5-4) en zijn daarom niet weergegeven in Figuur 5-5. De concentraties Cd, Hg, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, Pb, Sb, Se, en Zn blijven onder de detectielimiet. DOC en TOC hebben geen strenge eis en vertonen bij de tweede bemonstering ook geen vreemde concentraties voor grondwater. Voor de overige parameters die zijn gemeten (Bijlage I), zijn geen eisen opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018).



Figuur 5-5: Grondwaterkwaliteit ter hoogte van de vier peilbuisfilters. De eisen van het Drinkwaterbesluit (2018) zijn opgenomen als deze worden benaderd of overschreden.



Figuur 5-6: Piper plot van de grondwaterkwaliteit in WVP 1a (rood) en WVP 1b (blauw) ter hoogte van de vier peilbuisfilters, bemonsterd op 29-11-2018 en 14-01-2019, en waarbij de **Ca**-concentraties van KWR (open symbool) en Bureau Veritas (BV: gevuld symbool) als leidend zijn beschouwd.



Figuur 5-7: Troebel water afkomstig van peilbuisfilter 3 (40-42 m-mv) tijdens het voorspoelen vóór de monstername op 29 november 2018.

# 5.3.2 Sedimentsamenstelling

# Lithologie

De lithologie van het sediment uit *S1* en *S2* is gegeven in Tabel 5-5 en in Bijlage V. Op basis van de bodemopbouw (Figuur 2-3) werd verwacht dat het sediment uit beide sedimentkernen uit zeer grof zand zou bestaan. *S1* voldeed aan deze verwachting en bestaat uit zeer grof zand met sporen van grind (Figuur 5-8 en Tabel 5-5). Het grofste grind is apart gehouden en niet meegenomen bij de experimenten.

*S2* bestaat juist uit erg kleiig materiaal met fijn zand (Figuur 5-8 en Tabel 5-5). Het voorkomen van kleiig sediment kan deels de verklaring zijn voor het troebele water dat in eerste instantie is waargenomen bij het voorspoelen van het derde peilbuisfilter. De exacte reden voor het voorkomen van kleiig sediment in *S2* is echter onbekend. De grootste stukken klei uit de sedimentkern zijn apart gehouden en niet meegenomen bij de experimenten.

Beide sedimentkernen bevatten tevens wat water, voornamelijk aan de bovenkant van de monsters. Het sediment uit beide kernen is zo goed mogelijk met de hand gehomogeniseerd voordat het verdeeld werd over de verschillende monsters.

			Eenheid	S	1	S2		
		Diepte	m-mv	25 - 2	25,82	42 - 4	42,86	
				Monster	Monster	Monster	Monster	
				1	2	1	2	
	Korre	lgroottedistributie	e (VU Amst	erdam en L	MA cv - Slee	euwijk)		
Klei		< 8 µm	%	0,69	0.69	13.53	13.53	
	Zeer fijn	8 – 16 µm	%	0.23		6.44		
Silt	Fijn	16 – 32 µm	%	0.25	0,79	6.39	27.98	
	Grof	32 – 63 µm	%	0.31		15.15		
	Zeer fijn	63 – 125 µm	%	0.96		24.46		
	Fijn	125 – 250 µm	%	7.67		14.01		
Zand	Middel grof	250 – 500 µm	%	47.34	98.53	12.73	58.49	
	Grof	500 – 1000 µm	%	40.83		7.29		
	Zeer grof	1000 - 2000 µm	%	1.72		0		

Tabel 5-5: Korrelgroottedistributie van de twee sedimentkernen (zie ook Bijlage V).



Figuur 5-8: Zandig sediment uit *S1* (links) en kleiig sediment uit *S2* (rechts).

#### Chemie

De chemische samenstelling van het sediment (Bijlage VI) is omgerekend naar mol/kg sediment en is samengevat in Tabel 5-6. De metingen van VU Amsterdam en LMA Sleeuwijk wijken meer van elkaar af bij *S2* dan bij *S1* (Bijlage VI), wat kan duiden op een grotere invloed van heterogeniteit in de experimenten van *S2*, wat ook verklaard kan worden doordat kleiig materiaal mogelijk minder goed is gehomogeniseerd dan zand.

Tabel 5-6: Chemische samenstelling van het sediment afkomstig uit de twee sedimentkernen op basis van de XRF-analyse van LMA Sleeuwijk. Co, Cr, Nb, Ni, Pb, Sn, Ta, V, en Zn zijn gemeten maar hadden concentraties beneden de detectielimiet.

	Eenheid	S1	S2
Diepte	m-mv	25 - 25,82 m	42 - 42,86 m
Element			
AI	mol/kg	0,545	1,032
Ва	mol/kg	0,003	0,003
Са	mol/kg	0,036	1,352
Си	mol/kg	0,004	0,003
Fe	mol/kg	0,073	0,281
K	mol/kg	0,221	0,302
Mg	mol/kg	0,050	0,305
Mn	mol/kg	0,004	0,010
Мо	mol/kg	0,002	0,001
Na	mol/kg	0,161	0,239
Р	mol/kg	0,003	0,011
S	mol/kg	<0.002	0,030
Si	mol/kg	15,59	11,972
Sr	mol/kg	<0.002	0,002
Ti	mol/kg	0,01	0,040
W	mol/kg	0,001	0,001
Zr	mol/kg	<0.002	0,003

**S1** bestaat grotendeels (~93%) uit kwartshoudend zand (**SiO**<sub>2</sub>). Er is zeer weinig organisch materiaal (0,38%) en kalk (0,32% volgens TGA) aangetroffen. **S1** bestaat slechts voor een fractie uit kleiig materiaal (2,7% aluminiumoxiden;  $Al_2O_3$ , en 0,5% ijzeroxiden;  $Fe_2O_3$ ), wat ook al bleek uit de lithologie. K en Na komen in relatief hogere concentraties voor, en kunnen duiden op de aanwezigheid van (kali-)veldspaten. De verhouding K:Na bedraagt ca. 1,4.

*S2* bestaat uit een relatief lagere concentratie zand (~75% SiO<sub>2</sub>). Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,3%) en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.5%) komen in hogere concentraties voor, wat duidt op een hoger kleigehalte van het sediment, zoals ook al bleek uit de lithologie. *S2* bevat een relatief hoge concentratie kalk (15,2% volgens TGA). Daarnaast is er in *S2* relatief meer organisch materiaal aangetroffen dan in *S1* (1,63%). Dit komt overeen met de hogere concentraties DOC aangetroffen in grondwater. K en Na komen ook in *S2* in relatief hoge concentraties voor, en kunnen duiden op de aanwezigheid van veldspaten. De verhouding K:Na bedraagt ca. 1,3. In *S2* is tevens S aangetroffen, wat kan duiden op de aanwezigheid van pyriet in het sediment.

Vanzelfsprekend kunnen stoffen enkel in het grondwater komen door geochemische interactie als daarvoor zich een bron in het sediment bevindt. Bovendien kunnen elementen die niet zijn gemeten of die zijn gemeten in concentraties lager dan de detectielimiet van de XRF-analyse wel voorkomen in het sediment.

### Microbiologie

De concentraties van ATP en SSRC zijn hoger in *S1* dan in *S2* (Tabel 5-5), wat duidt op een hogere biologische activiteit en een gunstiger leefklimaat ter hoogte van *S1*. Dit kan de hogere concentraties van producten van reductiereacties verklaren in ondiepere sediment, zoals die van mangaan en ijzer. De hogere concentraties ATP en SSRC voor *S1* komen ook overeen met de hoeveelheid DNA in de monsters. Voor de analyse van de microbiologische populatie met NGS is getracht van beide kernen DNA te extraheren. Van de monsters van *S1* is voldoende DNA aanwezig voor extractie en een microbiologische analyse, terwijl dat voor *S2* niet het geval is (Bijlage VIII).

	Eenheid	<b>S</b> 1	S2
Diepte	m-mv	25 - 25,82	42 - 42,86
А	TP en SSR	C (KWR)	
SSRC	cfu/g	54	3.29
ATP op droog materiaal	pg/g	1200	
ATP op nat materiaal	pg/g	937	123

Tabel 5-7: Microbiologische samenstelling van de twee sedimentkernen.

De microbiologische populaties die resulteren uit de NGS-analyse van *S1* en van de mengsels van het experiment met *S1* en *GW1* op t0 zijn gegeven in Figuur 5-9. Zoals eerder beschreven, wordt met NGS de *relatieve* hoeveelheid van bacteriegroepen bepaald. De totale microbiële gemeenschap komt dus altijd uit op 100%. De reden dat de populatie in figuur 6-11 niet uitkomt op 100%, is omdat alleen de dominante bacteriegroepen getoond zijn. Dit is gedaan om een overzichtelijk beeld te geven van de relevante populatie op genus-niveau. In Bijlage IX is de totale populatie (dus 100%) van alle monsters met daarin de relatieve abundantie weergegeven ter referentie. Dit is gedaan op klasse-niveau om de data overzichtelijk en leesbaar te houden.



Figuur 5-9: Resultaten van de NGS analyses op de monsters van *S1* en van de mengsels van het experiment met *S1* en *GW1* (t=0), met daarin de relatieve abundanties (%) van de meest dominante bacteriegroepen (ca. 65-70%). De triplo's zijn apart opgewerkt voor DNA extractie en NGS analyse. 25M\_inoculum = sediment van *S1* vóór incubatie; 25M\_T0= sediment van *S1* direct na samenvoegen met *GW1* op t=0.

De microbiële populatie in het sediment van SI bestaat voornamelijk uit Thiobacillus (>20%), Comamonadaceae (5-15%), Rhodoferax (5-7%), Methylotenera (~7%), Mycoplana (~2%), Perlucidibaca, en Gallionellaceae (1.5-2.5%) (Figuur 5-9). Thiobacillus is een genus van micro-organismen dat obligaat autotroof is, en dus CO2 gebruikt als koolstofbron (Beijerinck, 1904a; 1904b; Taylor & Hoare, 1971; Boden, 2017). Dit genus kan elementair zwavel, thiosulfaat, organo-zwavelverbindingen en polythionaten als energiebron (elektrondonor) gebruiken met zuurstof (aeroob metabolisme) of nitraat, nitriet of stikstofoxides (anaeroob metabolisme) als elektronacceptor (Kelly & Wood, 2000; Friedrich et al., 2001; Ghosh & Dam, 2009). Sommige soorten kunnen ook waterstof als energiebron gebruiken (Drobner et al., 1992). Comamonadaceae is een familie van aerobe micro-organismen. Deze familie bevat zeer veel genera en omdat onze resultaten niet dieper gaan dan genus niveau, kunnen we helaas niet meer zeggen over de functie van deze familie. Het Rhodoferax genus bevat soorten die facultatief fotoheterotroof zijn en anaeroob kunnen groeien bij blootstelling aan licht (Imhoff, 2006). In het donker kunnen ze aeroob groeien. Eén soort binnen dit genus, R. ferrireducens, is facultatief anaeroob en kan ijzer(III) reduceren (Finneran et al., 2003). Methylotenera bevat soorten die aeroob methylamine kunnen oxideren (Kalyuzhnaya et al., 2012). Mycoplana bevat soorten die zijn aeroob zijn en suikers gebruiken als

energiebron (Urakami et al., 1990). *Perlucidibaca* bevat soorten die chemoheterotroof en facultatief aeroob zijn (Song et al., 2008). *Gallionellaceae* is een familie die chemolithoautotrofe aerobe ijzer (II) oxideerders bevat (Hallbeck & Pedersen, 2014).

Het is dus duidelijk dat het sediment voornamelijk bestaat uit micro-organismen met een (facultatief) aeroob metabolisme. Verder komt deze data overeen met de geochemische metingen van het grondwater. De concentraties **Fe**, **SO**<sub>4</sub>, en **DOC** ter hoogte van *GW1* waren hoog, terwijl die van **CH**<sub>4</sub> juist zeer laag was. De microbiële gemeenschap wordt gedomineerd door zwavelbacteriën, ijzer-oxideerders en reduceerders, en heterotrofen (i.e. organismen die organische koolstof gebruiken als energie en koolstofbron, zoals **DOC** en methylamine). *Archaea*, micro-organismen die methaan produceren, komen vrijwel niet voor.

Dat er aerobe en heterotrofe micro-organismen (en een hoog **DOC**) werden aangetroffen is niet volgens de verwachting in deze diepe lagen. In diepere bodems verwacht men een gereduceerde omgeving met weinig organisch materiaal waar vooral een anaeroob en autotroof metabolisme domineert. De aanwezigheid van aerobe en heterotrofe micro-organismen kan veroorzaakt zijn door de volgende aspecten:

- Introductie van zuurstof en organisch materiaal in de sedimenten tijdens het boren. Het boren van putten kan de diepere lagen verstoren door inbreng van ondieper materiaal dat zuurstof, organisch materiaal, etc. bevat. De boorvloeistof is zelf ook aeroob en rijk aan organisch materiaal. Met name bij het open boorgat van een zuigboring lekt dit weg naar de omliggende grond.
- Lekkage van zuurstof in de sedimentkernen tijdens bemonstering en opslag. Het is alleen onwaarschijnlijk dat lekkage van zuurstof voor veranderingen van deze orde van grootte in de microbiële gemeenschap zorgen.
- 3. Zuurstof komt van nature voor, waardoor er ook aerobe micro-organismen aanwezig zijn in het sediment. De concentratie zuurstof in bemonsterd grondwater is echter zeer laag, waardoor dit onwaarschijnlijk is.
- 4. De micro-organismen in *S1* hebben naast het aeroob metabolisme ook vaak een anaeroob metabolisme (facultatief aeroob). Dit geldt bijvoorbeeld voor *Thiobacillus, Rhodoferax*, en *Perlucidibaca*. Het is daarom mogelijk dat deze organismen in het sediment een anaeroob metabolisme hanteren en bij introductie van zuurstof overgaan naar een aeroob metabolisme.

## 5.4 Resultaten experimenten: leidende processen

Omdat de grondwaterkwaliteit in WVP 1a (*GW1*) en de samenstelling van *S1* verschillen van die in respectievelijk WVP 1b (*GW2*, *GW3*, en *GW4*) en *S2*, zijn er experimenten uitgevoerd met de twee verschillende grondwatertypes en bijbehorende sedimentkernen. Alle resultaten van de twee experimenten zijn opgenomen in Bijlage VII. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste resultaten nader toegelicht.

## 5.4.1 Conservatieve referentie en heterogeniteit

De concentraties **Cl** en **Br** die tijdens de experimenten zijn gemeten, zijn opgenomen in respectievelijk Figuur 5-10 en Figuur 5-11. Uit Figuur 5-12 blijkt dat het gedrag van de stoffen vergelijkbaar is en de relatieve molverhouding **Cl:Br** ca. 270:1 en ca. 150:1 bedraagt voor respectievelijk experiment 1 en 2. Dit komt overeen met de bandbreedte van 50 - 650 die door Alcalá en Custodio (2004) en door Naily en Sudaryanto (2018) wordt beschreven voor grondwater met continentale neerslag als herkomst.

De concentraties **CI** en **Br** nemen geleidelijk toe met de tijd bij een constante temperatuur van 11°C. Ervan uitgaande dat deze stoffen zich conservatief gedragen, is deze afwijking het resultaat van indikking of van heterogeniteit van het sediment en/of grondwater (paragraaf 5.2.2). Deze heterogeniteit heeft bij experiment 1 voor een onzekerheid van ±4 mg/L Cl (±12%) en ±5 mg/L Cl (±20%) gezorgd in de monsters die door respectievelijk Aqualab Zuid en Bureau Veritas zijn geanalyseerd. Bij experiment 2 bedraagt deze onzekerheid respectievelijk ±5 mg/L Cl (±9%) en ±7,5 mg/L Cl (±16%). Voor **Br** bedraagt de onzekerheid ca. 37,5 µg/L (±44%) en ca. 64 µg/L (±43%) voor respectievelijk experiment 1 en 2. De mengsels die zijn bewaard bij 5°C, 23°C, en 40°C vallen binnen of nét buiten deze onzekerheid (Figuur 5-10 en Figuur 5-11).

De mengsels die zijn bewaard bij 60°C en 85°C en die zijn geanalyseerd door Aqualab Zuid (Figuur 5-10) vertonen een sterke toename van **CI** tijdens de experimenten en een significante overschrijding van de onzekerheid die verklaard kan worden door de heterogeniteit. Indikking door verdamping en verlies van waterdamp bij de monstername kan hier een bijdrage aan hebben gehad, maar kan niet de totale toename verklaren. Daarvoor zou 25% tot 75% van het supernatant moeten zijn verdampt. Bij de monstername is dit significante verlies niet waargenomen, aangezien het volume was berekend op de uit te voeren analyses en er tijdens monstername voldoende water beschikbaar was. Daarom is het aannemelijker dat het hier om onbetrouwbare metingen gaat. Een dergelijke significante toename van **CI** en **Br** is niet waargenomen bij de mengsels die zijn geanalyseerd door Bureau Veritas.

Voor de interpretatie van mogelijke temperatuureffecten wordt met name ingegaan op de resultaten van het experiment met *S1* en *GW1*, aangezien daar minder pyrietoxidatie, een artefact van de experimenten dat is beschreven in paragraaf 5.4.6, heeft plaatsgevonden dan in het experiment met *S2* en *GW3*. Bovendien is het sedimenttype van *S1* representatiever voor sedimenten die worden gekozen voor de plaatsing van putfilters voor warmteopslag.



Figuur 5-10: **CI**, gemeten door Aqualab Zuid (AZ: boven) en Bureau Veritas (BV: onder), tijdens de experimenten met *SI* en *GW1* (links) en *S2* en *GW3* (rechts). De stippellijnen geven de onzekerheid die verklaard kan worden door heterogeniteit in mengsels.



Figuur 5-11: **Br** gemeten tijdens de experimenten met *S1* en *GW1* (links) en *S2* en *GW3* (rechts). De stippellijnen geven de onzekerheid die verklaard kan worden door heterogeniteit in mengsels.



Figuur 5-12: Verhouding **Br:Cl**, gemeten tijdensj de experimenten met **S1** en **GW1** (links) en **S2** en **GW3** (rechts). De stippellijnen geven de concentraties weer die zijn gemeten nadat de temperatuur is teruggebracht naar 11°C.

# 5.4.2 Macrochemie

# Mobilisatie van TOC & DOC

De resultaten van **DOC** en **TOC** van het experiment met *S1* en *GW1* zijn weergegeven in Figuur 5-13. Een temperatuurverandering tussen 5°C en 23°C heeft geen duidelijk effect op de concentraties **DOC** en **TOC**. Ook 40°C heeft geen significant effect. De concentraties **TOC** en **DOC** nemen bij 60°C wel significant toe met de tijd, en deze toename is nog sterker bij 85°C. De mobilisatie lijkt gedeeltelijk reversibel (Figuur 5-13). **TOC** en **DOC** bereiken bij het experiment met *S2* en *GW3* vergelijkbare waarden, maar doen daar relatief minder lang over door de hogere initiële concentraties.

De toename van **DOC** en **TOC** bij hogere temperaturen kan door verschillende processen zijn veroorzaakt (Bonte et al., 2013; 2015):

- Desorptie van organische zuren van ijzeroxiden (Evanko & Dzombak, 1998; Fillius et al., 2000). Dit betreft met name grote fulvinezuren en humuszuren, welke bij lagere temperaturen zijn geadsorbeerd aan ijzeroxiden (Xu & Saiers, 2010).
- Microbiologische respiratie van organisch materiaal (Brons et al., 1991), een stapsgewijs proces van hydrolyse en fermentatie, waarbij DOC wordt geproduceerd, en definitieve oxidatie, waarbij DOC door bijvoorbeeld sulfaat reducerende microben wordt omgezet tot anorganisch koolstof. DOC heeft bij insitu temperaturen van sediment en grondwater relatief lage concentraties, en zal enkel accumuleren bij verhoogde temperaturen als de snelheid van DOC consumptie kleiner is dan van DOC productie (Weston & Joye, 2005; Robador et al., 2010). Robador et al. (2010) concluderen dat dit kan worden veroorzaakt doordat de groei van een fermenterende microbiologische populatie wordt belemmerd of doordat DOC minder goed beschikbaar is voor microben bij hogere temperaturen. Brons et al. (1991) concludeerde echter dat de productie van DOC bij temperaturen boven 30°C pure chemische mineralisatie van organisch materiaal betreft, en dus een abiotisch proces (hydrolyse) betreft. Op basis van de microbiologische resultaten is het bovendien niet aannemelijk dat mobilisatie van DOC bij hogere temperaturen (>60 °C) wordt veroorzaakt door microbiologische respiratie. Bij deze temperaturen neemt ATP namelijk af, wat een maat is voor microbiologische activiteit, en vertoont het microbiële profiel bij 60°C een grote verschuiving in de populatie en een verlaging van de diversiteit (sectie 5.4.4). Sterfte van de microbiële populatie door te hoge temperaturen, waarbij DOC vrijkomt. Dit is lastig in te schatten omdat er geen absolute tellingen van de microbiologische populatie zijn gedaan. Wel correspondeert dit goed met de afname van ATP, en dus een mogelijke afname van microbiologie (sectie 5.4.4).



Figuur 5-13: Concentraties **DOC** (links) en **TOC** (rechts) tijdens het experiment met *S1* en *GW1*. De stippellijnen geven de onzekerheid die verklaard kan worden door heterogeniteit van de mengsels.

#### Kalkneerslag

Het oorspronkelijke grondwater heeft een **Ca-HCO**<sub>3</sub>-type en **Ca**- en/of **Mg**-carbonaat is in relatief hoge concentraties aanwezig in het sediment. De oplosbaarheid van kalk hoort af te nemen bij hogere temperaturen als temperatuur de enige invloed zou zijn. Bij het experiment met *S2* en *GW3* neemt de concentratie **Ca** in supernatant juist toe bij hogere temperaturen, wat waarschijnlijk is veroorzaakt door een thermisch gecontroleerd proces waarbij zuur vrijkomt en kalk oplost, zoals pyrietoxidatie, en de directe temperatuurafhankelijkheid van kalkoplossing van ondergeschikt belang is. Bij kalkneerslag/oplossing zonder externe invloeden zou men verwachten dat de molverhouding **alkaliniteit:Ca** de 1:1-lijn zou volgen. Door de zuurproductie, die het gevolg is van pyrietoxidatie, komt er bij het experiment met *S2* en *GW3* echter meer **Ca** in oplossing dan **alkaliniteit** (Figuur 5-14).

Bij het experiment met *S1* en *GW1* vertonen **Ca** en alkaliniteit wel een molverhouding van ca. 1:1 (Figuur 5-14), die verklaard kan worden door de neerslag van kalk vanuit het oorspronkelijke grondwater. De sterkere afname van de concentratie **Ca** en van de **alkaliniteit** bij hogere temperaturen hangt samen met het lagere oplossingsproduct en dus met meer kalkneerslag. De directe temperatuurafhankelijkheid van kalkneerslag is in het experiment met *S1* en *GW1* dominanter dan de zuurbuffering die plaatsvindt als respons op pyrietoxidatie, aangezien de toename van **SO**<sub>4</sub> met de tijd en bij hogere temperaturen juist correspondeert met *S2* en *GW3*. Dit is begrijpelijk, aangezien **GW1** een relatief hogere concentratie **Ca** bevat en een hogere alkaliniteit heeft dan **GW3**, terwijl **S1** uit minder pyriet bestaat dan **S2**.



Figuur 5-14: Alkaliniteit versus Ca voor experiment 1 (links) en 2 (rechts).

#### Veldspaatverwering en silicaatneerslag

Zoals in paragraaf 5.4.6 wordt gesteld, nemen de concentraties van K, Na, en Si waarschijnlijk deels toe gedurende de experimenten en bij hogere temperaturen door uitloging van glascomponenten. De verhouding B:(Na+K) in het supernatant is echter lager dan in het glas, waardoor mogelijk ook een ander proces bijdraagt aan de mobilisatie van Na en K. De meest waarschijnlijke verklaring hiervoor is incongruente zuurverwering van kaliveldspaten (Na,K)(AlSi<sub>3</sub>)O<sub>8</sub>) uit sediment tot het secundaire silicaatmineraal kaoliniet (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>):

 $2(Na,K)(AlSi_3)O_8 + 2H^+ + 9H_2O \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2(Na,K)^+ + 4H_4SiO_4$ 

Velspaatverwering resulteert in mobilisatie van K, Na, en Si, en wordt gestimuleerd door hogere temperaturen. Een deel van de toename van de concentratie Si in de eerste week van de experimenten kan dus ook verklaard worden door verwering van veldspaten. Bovendien bedroeg de verhouding **Si:(Na+K)** gedurende de eerste week ca. 2:1, overeenkomstig met bovenstaande reactievergelijking. De mobilisatie van **K** en **Si** bij de experimenten van Bonte et al. (2013) werd tevens toegeschreven aan dit proces.

De concentraties **Si** blijven na 1 week stabiel of nemen zelfs af, terwijl de concentraties **B**, **Na**, en **K** wel blijven toenemen. Mogelijk zorgt oververzadiging ervoor dat silicaten (**SiO**<sub>2</sub>) neerslaan uit het supernatant. De oplosbaarheid van **SiO**<sub>2</sub> varieert voor verschillende vormen van het mineraal (Figuur 5-15). Voor kwarts, de meest stabiele vorm van **SiO**<sub>2</sub>, bedraagt de oplosbaarheid 0,18 mmol/L bij 25°C. Voor amorfe silica, de minst stabiele vorm van **SiO**<sub>2</sub>, bedraagt de oplosbaarheid ca. 2,0 mmol/L. Deze oplosbaarheden nemen toe met de temperatuur tot respectievelijk ca. 0,9 mmol/L en 5,5 mmol/L bij 85°C (Rimstidt & Cole, 1983, en Figuur 5-15). Deze toename is in overeenstemming met de experimenten. De concentraties **Si** in het supernatant van de mengsels die op hogere temperaturen zijn bewaard vertonen namelijk de grootste toename en nemen weer af zodra deze mengsels worden teruggebracht naar 11°C.

Uit de experimenten blijkt dat de concentraties **Si** niet de oplosbaarheid van amorfe silica halen. Wel vindt er verzadiging plaats m.b.t. kwarts. Kwarts staat bekend als een mineraal met extreem trage reactiekinetiek, waardoor de oplossing sterk oververzadigd raakt m.b.t. kwarts. Uit de experimenten blijkt dat na 1 week op temperatuur de concentratie **Si** afneemt, en neerslag van silicaten dus sneller plaatsvindt dan de mobilisatie van **Si** uit sediment en glas. Dit is relatief snel voor de reactiekinetiek van kwarts. Daarom is het aannemelijker dat intermediaire mineralen met een snellere reactiekinetiek, zoals chalcedoon, cristobaliet, of opaal-CT, neerslaan uit het supernatant. waardoor de concentratie Si in het supernatant afneemt.



Figuur 5-15: Oplosbaarheid van verschillende vormen van **SiO**<sup>2</sup> in mg/L bij neutrale pH en temperaturen van 0 tot 40°C (links; Cioni et al., 2003) en van 0 tot 300°C (rechts; Brown, 2005).

#### 5.4.3 Microchemie

Uit de resultaten (Bijlage VII) zijn drie groepen microparameters te onderscheiden:

- Microparameters zonder metingen of met metingen onder de detectielimiet;
- Microparameters zonder duidelijke temperatuurafhankelijkheid;
- Microparameters die mobiliseren bij hogere temperaturen.

## Microparameters zonder metingen of met metingen onder de detectielimiet

De concentraties **NO**<sub>3</sub> en **CH**<sub>4</sub> bleven bij de eerste twee metingen van de experimenten onder de detectielimiet, waardoor de metingen van deze parameters zijn geschrapt voor de rest van de experimenten. De parameters waarvoor tijdens de experimenten geen concentraties boven de detectielimiet zijn waargenomen, zijn **Bi**, **In**, **Pt**, **Ru**, **Ta**, **Te**, en **Tm**. De microparameters waarvoor geen metingen meer zijn gedaan na het vaststellen van de grondwaterkwaliteit, zijn **Ir** en **Os**. Voor al deze parameters kunnen op basis van deze studie daarom geen conclusies worden getrokken.

#### Microparameters zonder duidelijke temperatuurafhankelijkheid

Voor verschillende microparameters zijn wel metingen gedaan boven de detectielimiet maar is er op basis van de resultaten geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid vast te stellen. Deze groep betreft Al, Au, Cd, Co, Eu, Ga, Hg, Nb, NH<sub>4</sub>, Ni, NO<sub>2</sub>, U, Pd, Re, Rh, Sb, Sc, Se, Sn, Tl, en Zn. Bonte et al. (2013) hebben voor Al, Co, Eu, Ga, Ni, Pb, Sb, Sc, en Zn ook geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid vastgesteld.

Cd, Ga, Hg, NO<sub>2</sub>, Pb, Pd, en Sn hebben te weinig metingen met concentraties boven de detectielimiet. De metingen van Cd, Hg, NO<sub>2</sub>, en Pb met concentraties boven de detectielimiet voldoen tijdens de experimenten wel aan de normen van het Drinkwaterbesluit (2018).

Een toename of afname van de concentraties **Eu**, **NH**<sub>4</sub>, **Re**, **Rh**, **Se**, **Tl**, en **Zn** met de tijd is waargenomen tijdens de experimenten maar niet consequent als gevolg van temperatuur. De concentratie **Zn** overschrijdt niet de norm van het Drinkwaterbesluit (2018). Voor **Se** en voor het grootste deel van de metingen van **NH**<sub>4</sub> is dit wel het geval.

Een duidelijk effect van temperatuur kan ook niet worden vastgesteld voor **AI**, **Nb**, **Sb**, **Sc**, en **U**, door de onzekerheid door heterogeniteit van de mengsels. **AI** is opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018) en overschrijdt tijdens de experimenten niet de norm (Figuur 5-16). Dit is wel het geval voor **Sb**. Een hogere temperatuur lijkt op het eerste gezicht te resulteren in een lagere concentratie **U** (Figuur 5-16). Dit is echter niet met zekerheid te stellen, aangezien enkel de concentraties die zijn gemeten bij 85°C buiten de onzekerheidsmarge vallen die het gevolg is van heterogeniteit.

Ni en Co vertonen geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid, maar zijn wel duidelijk aan elkaar gerelateerd met een molverhouding Co:Ni van 2:1 (Figuur 5-17). Beide elementen mobiliseren gedurende de experimenten. Co en Ni zijn elementen die doorgaans in pyriet zijn ingebouwd. Er is echter geen duidelijke relatie met SO₄, waardoor mobilisatie van Co en Ni door pyrietoxidatie niet aannemelijk is (Figuur 5-17). De Co:Ni-molverhouding van 2:1 kan niet worden herleid uit het sediment, aangezien de concentraties van deze elementen daarin beneden de detectielimiet bleven. Bij de laatste bemonsteringsronde overschrijdt Ni de norm van het Drinkwaterbesluit (2018).







Figuur 5-17: Ni vs. Co (links) en vs. SO4 (rechts) voor het experiment met S1 & GW1.

# Mobilisatie

De laatste groep microparameters betreft de parameters die mobiliseren door een temperatuurtoename: Ag, As, Be, Ce, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Gd, Ge, Hf, Ho, La, Lu, Nd, PO4, Pr, Rb, Sm, Tb, Th, Ti, V, W, Y, Yb, en Zr. De mobilisatie van al deze parameters vindt plaats bij verschillende temperaturen, welke zijn weergegeven in Tabel 5-8. De parameters zijn in deze tabel gegroepeerd naar de patronen die zijn waargenomen tijdens de experimenten, welke nader worden toegelicht na de tabel. Van deze groep zijn As, Cu, en Cr opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018).

Reversibel?	Maximale concentratie <sup>1</sup>		atie bij¹	Mobilis	
	(µg/L)	85°C	60°C	40°C	23°C
Deels	15	W	W	W	W
Ja	2600	PO₄	PO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	PO₄
Ja	23	Ti	Ti	Ti	Ti
Ja	67	V	V	V	V
Ja	189	As <sup>2</sup>	As <sup>2</sup>	As <sup>2</sup>	
Ja	0,8	Ge	Ge	Ge	
Nee	119		Li		
Nee	197		Мо		
Nee	63	Cu²	Cu <sup>2</sup>		
Nee	0,3	Cs	Cs		
Nee	32	Rb	Rb		
Ja	3,2	Cr <sup>2</sup>	Cr <sup>2</sup>		
Ja	0,9	Nd	Nd		
Ja	1,6	Ce			
Ja	0,2	Dy			
Ja	0,06	Er			
Ja	0,2	Gd			
Ja	0,8	La			
Ja	0,2	Pr			
Ja	0,2	Sm			
Ja	0,8	Y			
Ja	0,06	Yb			
Deels	0,8	Zr			
Ja	0,08	Ag			
Ja	0,05	Be			
Ja	0,02	Hf			
Ja	0,03	Ho			
Ja	0,01	Lu			
Ja	0,02	Tb			
Ja	0,2	Th			

Tabel 5-8: Mobilisatie van microparameters door een temperatuurverhoging. De kolom 'Reversibel?' geeft aan of de mobilisatie reversibel was binnen de 2 weken dat de monsters op de 11°C zijn bewaard. De horizontale lijnen verdelen de parameters in groepen

<sup>1</sup> De parameter is dikgedrukt bij de temperatuur waarbij de maximale concentratie is waargenomen.

<sup>2</sup> Parameter die is opgenomen in het Drinkwaterbesluit en de norm wel (rood) of niet (groen) overschrijdt.

# Irreversibele mobilisatie vanaf 23°C

In het experiment met *S1* en *GW1* vindt mobilisatie van *W* plaats vanaf 23°C en zijn de hoogste concentraties waargenomen bij 60°C (Figuur 5-18). Slechts een gedeeltelijke reversibiliteit is waargenomen. Bij het experiment met *S2* en *GW3* vindt mobilisatie enkel plaats vanaf 60°C en is geen reversibiliteit waargenomen (Bijlage VII).



Figuur 5-18: Concentratieverloop van W bij het experiment met *S1* & *GW1*.

# Reversibele mobilisatie vanaf 23°C

Voor As, PO<sub>4</sub>, Ti, en V zijn vergelijkbare trends waargenomen als voor Si (Figuur 5-19). Significante mobilisatie van PO<sub>4</sub>, Ti, en V vindt in het experiment met *S1* en *GW1* al vanaf 23°C plaats, terwijl de concentratie As vanaf 40°C toeneemt en de norm van het Drinkwaterbesluit daarbij overschrijdt. De meeste mobilisatie van As, PO<sub>4</sub>, Ti, en V is waargenomen bij 85°C. Bij het experiment met *S2* en *GW3* vond mobilisatie enkel plaats bij 85°C (Bijlage VII). De mobilisatie is volledig reversibel, waardoor As weer voldoet aan de norm van het Drinkwaterbesluit (2018) nadat de mengsels zijn teruggebracht naar 11°C. Voor de mengsels van 40°C en 60°C treedt deze reversibiliteit al (deels) op na 1 week. Bij de experimenten van Bonte et al. (2013) vond mobilisatie van As plaats vanaf 25°C, terwijl dat voor V en PO<sub>4</sub> geldt vanaf 60°C. Bonte et al. (2013) schreven deze mobilisatie bij verhoogde temperaturen toe aan desorptie van oxyanionen vanaf ijzer(hydr)oxides (Dzombak en Morel, 1990).

#### *Reversibele mobilisatie vanaf 40°C*

Het concentratieverloop van **Ge** vertoont een duidelijke temperatuurafhankelijkheid, waarbij mobilisatie plaatsvindt vanaf 40°C en volledige reversibiliteit is waargenomen (Figuur 5-19). Hogere temperaturen zorgen voor meer mobilisatie.



Figuur 5-19: Concentratieverloop van V, PO4, Ti, As, en Ge bij het experiment met S1 & GW1.

# Irreversibele mobilisatie vanaf 60°C

De concentraties **Cs**, **Cu**, **Li**, **Mo**, en **Rb** nemen toe met de tijd (Figuur 5-20). Significant meer mobilisatie treedt op bij temperaturen >60°C. De hoogste concentraties **Cu**, **Li**, en **Mo** zijn bij 60°C waargenomen, en de hoogste concentraties **Cs** en **Rb** bij 85°C. Bij het experiment met *S2* en *GW3* was het omgekeerde waar (Bijlage VII). Bonte et al. (2013) namen mobilisatie van **Mo** waar vanaf 60°C en schreven dit toe aan desorptie van oxyanionen vanaf ijzer(hydr)oxides (Dzombak en Morel, 1990). Het Drinkwaterbesluit (2018) stelt geen eisen aan **Cs**, **Li**, **Mo**, en **Rb**. Voor **Cu** is dit wel het geval, maar de waargenomen concentraties voldoen aan de norm. In de experimenten van Bonte et al. (2013) is voor **Cu** geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid vastgesteld.

Reversibiliteit is niet waargenomen tijdens de experimenten. Cs, Cu, Li, Mo, en Rb laten zodoende een vergelijkbaar patroon zien als B, K, Na, en SO<sub>4</sub>. Het is echter niet met zekerheid te stellen of Cs, Cu, Li, Mo, en Rb ook gekoppeld zijn aan de artefacten die eerder zijn beschreven en invloed hebben op de concentraties van B, K, Na, en SO<sub>4</sub>.



Figuur 5-20: Concentratieverloop van Cu, Li, Rb, en Cs bij het experiment met S1 & GW1.

### Reversibele mobilisatie vanaf 85°C

De concentraties **Cr**, **Nd**, **Ce**, **Dy**, **Er**, **Gd**, **La**, **Pr**, **Sm**, **Y**, **Yb**, en **Zr** blijven bij 5-60°C binnen de onzekerheidsmarge die kan worden verklaard door heterogeniteit. Bij 85°C is echter een duidelijke toename waargenomen (Figuur 5-21). Bij het experiment met *S2* en *GW3* zijn bij 85°C ook verhoogde concentraties van deze parameters aangetroffen (Bijlage VII). Dergelijk hoge temperaturen zorgen dus voor mobilisatie van deze parameters. Deze mobilisatie blijkt echter reversibel, aangezien de concentraties zich weer binnen de onzekerheidsmarge bevinden nadat de temperatuur is teruggebracht naar de oorspronkelijke grondwatertemperatuur. Voor **Zr** is volledige reversibiliteit na 2 weken niet aangetoond in het experiment met *S1* en *GW1*, hoewel dat bij het experiment met *S2* en *GW3* wel het geval was (Bijlage VII). De concentratie **Cr** blijft gedurende het experiment voldoen aan de norm van het Drinkwaterbesluit (2018). Bonte et al. (2013) hebben voor **La** en **Yb** geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid vastgesteld, terwijl dat bij het experiment met *S1* en *GW1* wel het geval is.





De concentraties **Ag**, **Be**, **Hf**, **Ho**, **Lu**, **Tb**, en **Th** blijven gedurende de experimenten beneden de detectielimiet bij 5-60°C. Na 2 weken op 85°C blijken deze stoffen wel aanwezig te zijn in het supernatant met concentraties hoger dan de detectielimiet (Figuur 5-22). Deze temperatuurafhankelijkheid is echter arbitrair, aangezien dit slechts een enkel meetpunt betreft. Bovendien is in de experimenten van Bonte et al. (2013) voor **Ho** en **Th** geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid vastgesteld. Daarnaast werden bij het experiment met *S2* en *GW3* enkel verhoogde concentraties **Ag** waargenomen bij 60°C, en bleven de concentraties **Be**, **Hf**, en **Lu** onder de detectielimiet (Bijlage VII). Verhoogde concentraties **Ho**, **Tb**, en **Th** zijn bij 23°C waargenomen, waarschijnlijk door een heterogeen monster. Veel andere elementen vertoonden bij 23°C namelijk ook een onverklaarbare verhoogde concentratie.



Figuur 5-22: Concentratieverloop van Ag bij het experiment S1 & GW1.

# 5.4.4 Microbiologie

## ATP en SSRC

De kleiige samenstelling van *S2* zorgde ervoor dat het te analyseren supernatant erg troebel werd tijdens het experiment met *S2* en *GW3* (Figuur 5-23). Het is aannemelijk dat een deel van het fijne sediment, dat als troebelheid in het supernatant aanwezig was (Figuur 5-23), bij de monstername voor de chemische analyse van het supernatant is verwijderd. Het gevolg hiervan is dat de concentraties **ATP** en **SSRC** in het resterende te analyseren sediment mogelijk niet meer representatief zijn voor de daadwerkelijke samenstelling in de monsters. Bovendien blijkt uit de resultaten dat het sediment niet homogeen is, mogelijk door het lastig te homogeniseren kleiige materiaal. Daarnaast kan de microbiologie ook zijn losgekomen van het sediment tijdens het roeren van de mengsels en daardoor deels in de waterfase terecht zijn gekomen.

Bij aanvang van het experiment met *S1* en *GW1* is daarom besloten om juist ook de waterfase van de mengsels te analyseren op ATP en SSRC. De concentraties die zijn waargenomen in de waterfase zijn vervolgens omgerekend naar concentraties in de sedimentfase met behulp van de sediment-grondwater verhouding die is gebruikt bij de experimenten (1 gram : 2 mL).



Figuur 5-23: Troebel monster van het supernatant van de experimenten met S2 en GW3.

Bij aanvang van het experiment met *S2* en *GW3* zijn de totale concentraties ATP en SSRC zeer laag en bedragen respectievelijk 123 pg/g en 3.29 cfu/g (Figuur 5-24; Bijlage VII). bij aanvang van het experiment met *S1* en *GW1* bedragen de concentraties ATP en SSRC daarentegen respectievelijk 937 pg/g en 54 cfu/g (Figuur 5-24; Bijlage VII). De microbiologische activiteit in *S1* is dus groter dan in *S2*. Mogelijk heeft dit te maken met de ondiepere herkomst van *S1*. Het experiment met *S1* en *GW1* is daardoor geschikter voor de microbiologische analyse.

De concentraties **ATP** en **SSRC** zijn na verwarmen tot 60°C en 85°C bij het experiment met **S1** en **GW1** sterk verlaagd (Figuur 5-24). De microbiologische activiteit is dus sterk afgenomen door het toepassen van deze verhoogde temperaturen, en er is weinig overleving. Het verwarmen van de monsters tot 40°C lijkt daarentegen juist een positief effect te hebben op de microbiologische activiteit (**ATP**).



Figuur 5-24: Concentraties **ATP** (boven) en **SSRC (onder)** in sediment tijdens het experiment met **SI** en **GWI**.

# Microbiële populatie

Van de experimenten met *S2* en *GW3* was van slechts drie monsters de hoeveelheid DNA groot genoeg voor extractie en voor een NGS-analyse van de microbiële populatie (Bijlage VIII). Bij de mengsels van het experiment met *S1* en *GW1* was wel voldoende DNA materiaal beschikbaar, met uitzondering van de monsters die op 85°C zijn geïncubeerd. Een NGS-analyse is uitgevoerd voor alle monsters van het experiment met *S1* en *GW1*, en de drie geschikte monsters van het experiment van *S2* en *GW3*. De data van de PCA laat duidelijke resultaten zien (Figuur 5-25):

- PCR blanco monsters (watermonsters zonder toevoeging van sedimentmateriaal) scheiden zich duidelijk van de meeste sedimentmonsters. Alleen de sedimentmonsters van *S1* die geïncubeerd zijn bij 85°C scheiden zich hier niet van. Dit is logisch, aangezien de opbrengst van het DNA van deze drie monsters onder de detectielimiet lag.
- De originele sedimentmonsters (inoculum) en de monsters van t=0 clusteren zeer goed samen. Dat betekent dat er op t₀=0 nog geen verandering in de gemeenschap heeft plaatsgevonden door het sediment samen te voegen met het grondwater. Dit betekent ook dat alle veranderingen in de microbiële populatie

na de monstername in het veld en na de opslag in het lab door experimentele condities zullen komen en niet door voorbehandeling.

- 3. De monsters van *S1* clusteren op basis van de incubatietemperatuur. Bij elke verschillende temperatuur is er een duidelijke verschuiving in de microbiële gemeenschap. Deze verschuiving is kleiner in de eerste week van monstername en wordt groter gedurende de tijd voor de meeste temperaturen (behalve 11°C). Bij lagere temperaturen (5°C en 11°C) is deze verschuiving over de gehele incubatieperiode kleiner dan bij hogere temperaturen. Ook dit is volgens verwachting omdat bij lagere temperaturen de microbiële gemeenschap minder actief is en dus minder zal veranderen dan bij hogere temperaturen als 23°C en 40°C. Bij nog hogere temperaturen wordt verwacht dat de gehele microbiële gemeenschap verandert door afsterving en spore-vorming\*.
- 4. De monsters van 60°C liggen ongeveer even ver van de inoculum en t=0 monsters af als de 5°C monsters, Ze lijken dus meer op de monsters van het inoculum en t=0 dan andere hoge temperaturen boven de 11°C (23, 40, 85°C). Dit kan komen doordat er maar een beperkte populatie kan groeien en overleven bij 60°C, terwijl de rest van het DNA dat al aanwezig was niet verandert en stabiel is. Bij 23 en 40°C wordt groei van meer organismen verwacht.
- 5. De monsters van S2 clusteren samen en liggen het dichtst bij de monsters van S1 die bij dezelfde temperatuur zijn geïncubeerd. Dat zou betekenen dat de temperatuur ervoor zorgt dat de microbiologische samenstelling van beide kernen meer op elkaar gaat lijken. Dit moet nog wel bevestigd worden met meer monsters van het experiment met S2 en GW3, maar met de huidige methode kon daarvoor niet voldoende DNA geëxtraheerd worden.

De monsters van *S2* en *GW3* die bij 11 en 23°C zijn geïncubeerd, zijn minder divers dan de meeste monsters van *S1* en *GW1* (Figuur 5-26). De monsters van *S1* en *GW1* die bij 5, 11 en 60°C zijn geïncubeerd, hebben een soortgelijke diversiteit. De monsters van 23 en 40°C zijn veel minder divers, en de monsters van 85°C hebben een zeer lage diversiteit die gelijk is aan die van de PCR blanco's. De meeste verschillen zijn ook significant (Kruskall Wallis, p<0.05). Deze waarnemingen komen overeen met de eerder genoemde bevindingen van de verschillen in microbiële gemeenschappen (Figuur 5-25)

\* Spore-vorming houdt in dat micro-organismen zich inkapselen en zogenaamde sporen vormen. De micro-organismen zijn dan niet meer metabool actief en zijn beschermd tegen de buitenwereld. Spore-vorming zal bijvoorbeeld optreden wanneer omstandigheden verslechten, zoals hogere temperaturen, minder voedingstoffen, hogere pH, etc. Wanneer omstandigheden weer beter zijn (in dit geval lagere temperaturen of toename van substraat) zullen de cellen weer metabool actief worden. Niet alle micro-organismen zijn in staat sporen te vormen. Het zijn vooral microorganismen in het phylum van de Firmicutes die in staat zijn sporen te vormen. Bij DNA-metingen van een spore-vormend organisme wordt geen onderscheid gemaakt tussen de metabool actieve organismen of sporen.



Figuur 5-25: Driedimensionaal beeld van de Principal Component Analysis (PCA) die is uitgevoerd op basis van de NGS analyses van de verschillende monsters. In deze figuur is elk punt representatief voor de gehele microbiologische gemeenschap van een monster. De percentages op de assen staan voor de hoeveelheid variatie in de data die verklaard wordt door deze assen. De assen verklaren dus samen ~57% van de variatie in de data.



Figuur 5-26: Diversiteit van de verschillende mengsels, uitgedrukt op de y-as in Faith's PD (zie sectie 5.2.1).

De relatieve abundantie van alle bacteriegroepen in alle monsters is weergegeven in Bijlage IX op klasse-niveau. In Figuur 5-28 zijn de bacteriegroepen op genus niveau weergegeven die het meest verschillen tussen de incubaties. In Figuur 5-29 zijn de bacteriegroepen op genus niveau weergegeven die het meest voorkomen in de PCR blanco's en de mock communities. Aan de hand van deze informatie is hieronder samengevat welke micro-organismen het meest verschillen in relatieve abundantie tussen de verschillende temperaturen voor het experiment met *S1* en *GW1*, en voor de enkele monsters van *S2* en *GW3*.

#### S1 en GW1

Thiobacillus is dominant in alle monsters van S1 en GW1, zoals ook het geval was in de monsters van S1. Het aandeel Thiobacillus neemt toe met hogere temperaturen en neemt bij 40°C af. Wanneer bij 40°C de temperatuur teruggebracht wordt naar 11°C neemt Thiobacillus weer sterk toe. Bij 60°C is het aandeel Thiobacillus juist weer hoger dan bij 40°C. Omdat met NGS gekeken wordt naar de relatieve abundantie van microorganismen, kan het zijn dat de relatieve abundantie van Thiobacillus bij 40°C lager lag, omdat andere micro-organismen sterk toenamen (Figuur 5-28). Dit wil dus niet zeggen dat de absolute abundantie van Thiobacillus afnam. Het lijkt dus dat de optimale groeitemperatuur van Thiobacillus tussen 23 en 40°C ligt. T. denitrificans vertoont inderdaad een optimale groei bij 28-32°C (Kelly & Wood, 2000). Zoals eerder aangegeven kan Thiobacillus sulfide oxideren met behulp van zuurstof, nitraat of ijzeroxides. Ze zijn autotroof en kunnen ook elementair zwavel, thiosulfaat, en polythianten als energiebron gebruiken. Ook is *Sulfuricurvum* in alle monsters aanwezig tot 40°C. Dit is ook een zwavelbacterie die sulfide met zuurstof (aeroob) of nitraat (anaeroob) kan oxideren, en ook waterstof als energiebron kan gebruiken (Ghosh & Dam, 2009; Kodama & Watanabe, 2004). De optimale groei is bij 25 °C. Dit kan de toename van sulfaat in de meeste experimenten verklaren. Pyrietoxidatie wordt namelijk gekatalyseerd door zwavel bacteriën die sulfide oxideren. Te zien is dat bij temperaturen boven de 11°C de sulfaatconcentraties omhoog gaan, en vooral na 2 weken incubatie. Bij 40 en 60°C wordt het aandeel Thiobacillus en Sulfuricurvum lager, terwijl de sulfaatconcentratie juist het hoogt is. Dit toont aan dat pyrietoxidatie bij hogere temperaturen vooral chemisch plaatsvind, en waarschijnlijk gedeeltelijk microbiologisch bij lagere temperaturen. Dit blijkt vooral uit de correlatie tussen de abundantie van *Thiobacillus* en de concentratie **SO**<sup>4</sup> tot 60°C (Figuur 5-27).

In het algemeen zijn er weinig tot geen methaanproduceerders (*Archaea*) gevonden. Een genus dat methaan produceert, *Methanomicrobia* (<0.5%) (Garrity & Holt, 2001), is aanwezig in *S1* en bij de t=0 monsters maar neemt af in alle condities. Dit komt overeen met methaanconcentraties die tijdens de experimenten onder de detectiegrens bleven, maar juist daarboven zaten in het grondwater.



Figuur 5-27: De relatieve abundantie (%reeads) van de genera *Sulfuricurvum* en *Thiobacillus* in de verschillende incubaties gedurende 0,1 en 4 weken incubatie van kern *S1* en de gemeten concentratie sulfaat (mg/L).

Bij verschillende temperaturen zijn verschillende soorten dominant ten opzichte van de oorspronkelijke microbiologische samenstelling:

#### 4℃ en 11℃

Croceimarina litoralis. Van dit organisme is (nog) niets bekend in de literatuur.

23℃

- De klasse *Betaproteobacteria*. De abundantie van deze klasse neemt weer af bij lagere temperatuur. De abundantie lijkt daarom reversibel wanneer de temperatuur weer naar beneden wordt gebracht. Bij 23°C treedt in week 1 en 2 ook productie van nitriet op, wat weer afneemt bij week 4. Dit is ook het geval bij 11°C, waar ook meer van de klasse *Betaproteobacteria* aanwezig is. De abundantie is dus mogelijk gecorreleerd aan nitriet. Deze klasse bevat zeer veel genera, waardoor we helaas niet meer kunnen concluderen over de functie van de klasse,
- *Thiobacillus.* Zie de vorige pagina voor uitleg.

#### 40℃

- Hydrogenophaga, een genus met aerobe, chemolithoautotrofe of chemoorganotrofe organismen die koolwaterstoffen en waterstof als energiebron kunnen oxideren met zuurstof of nitraat als elektron acceptor. Het genus kan geen sporen vormen (Willems et al., 1989). *H. bisanensis* groeit optimaal tussen 30-37°C (Yoon et al., 2008). Deze neemt weer af als temperatuur afneemt. De groei lijkt dus reversibel.
- Arenimonas, een gram-negatieve, non-motiele, non-spore-vormende (facultatieve) aerobe bacterie waarvan één soort nitraat kan reduceren (Huy et al., 2013; Yuan et al., 2014). A. maotainensis groeit optimaal tussen 25-42°C (Yuan et al., 2014). Deze neemt weer af als temperatuur afneemt. De groei lijkt dus reversibel.
- Roseomonas lacus, een strikt aeroob micro-organisme met optimale groei bij 30°C. Het kan nitraat reduceren en suikers als energiebron gebruiken (Jiang et al., 2006). Deze neemt weer af als temperatuur afneemt. Groei lijkt dus reversibel.
- De familie *Methylophilaceae*, met aerobe en methylotrofe leden, die methanol en methylamines als enige koolstof en energiebron kunnen gebruiken. Ze kunnen geen methaan oxideren (Doronina et al., 2014).

#### 60°C

• Caldinitratiruptor microaerophilus. Deze is ook aanwezig bij 85°C. Dit betreft een facultatief microaerofiel/anaeroob thermofiel (groeit tussen 50-75°C met optimum bij 65°C) dat alleen nitraat kan reduceren. Alleen in aanwezigheid van nitraat kan het lactaat, pyruvaat, glucose, mannose, fructose, en aminozuren gebruiken als elektrondonor (Fardeau et al., 2010). Het vormt waarschijnlijk sporen omdat de meeste *Firmicutes* hiertoe in staat zijn. Nitraat is altijd onder de detectielimiet gebleven. Deze soort kan dus dominant geworden zijn omdat het sporen kan vormen en andere organismen afsterven. De **ATP** concentraties zijn bij 60 en 85°C lager en die van **DOC** juist hoger, wat kan duiden op sterfte van de microbiële populatie of door chemische mobilisatie van **DOC** (zie 5.4.2).

#### 85°C

• Er is vrijwel geen microbiële populatie afkomstig uit het oorspronkelijke sediment aanwezig. Dit correspondeert met het feit dat er geen DNA geëxtraheerd kon worden van deze incubaties. Hierdoor zal het DNA dat in het PCR water aanwezig is vooral het microbieel profiel bepalen. De PCR blanco's die ook gesequenced zijn bevatten alleen PCR water. De monsters van 85°C lijken inderdaad veel op de PCR blanco's omdat de micro-organismen die voorkomen in de PCR blanco's dominant zijn bij de NGS-analyse (Figuur 5-28 en Figuur 5-29, sectie 5.2.2). Wel is een extra genus aanwezig dat alleen in de 85°C incubaties voorkomt: *Rastonia*. Deze wordt vaker aangetroffen als contaminatie uit DNA kits, wat ook hier aannemelijk is. Normaal wordt ook een blanco meegenomen van de DNA kit, maar dat was hier niet het geval.

### S2 en GW3

- Omdat er van het experiment met *S2* en *GW3* maar 3 monsters gesequenced zijn, kunnen we geen uitspraken doen over de verschillen tussen de temperaturen, maar wel over de verschillen met het experiment met *S1* en *GW1*:
- *Methylophilales*. Deze orde bevat de familie *Methylophilaceae*, die aerobe methylotrofen bevat (zie 40°C) (Doronina et al., 2014).
- Alphaproteobacteria. Deze klasse bevat zeer veel genera en omdat dit resultaat niet dieper gaat dan klasse niveau, kunnen helaas geen conclusies worden getrokken over de functie van deze klasse.



Figuur 5-28: Microbiële populatie analyse waarbij alleen de relatieve abundantie (%) van reads van de groepen van micro-organismen die het meest verschillen tussen de monsters gegeven is (daarom komt de totale microbiele populatie niet uit op 100%). Inoculum = Kern *S1*, t=0: Kern *S1* na menging met grondwater, t=1: 1 week incubatie, t=2: 2 weken incubatie, t=4: 4 weken incubatie, waarbij monsters na 2 weken teruggebracht zijn naar 11°C voor 2 weken. Ook de Mock communities en PCR blanco's zijn getoond.



Figuur 5-29: Microbiële populatie analyse waarbij alleen de relatieve abundantie (%) van reads van de groepen van micro-organismen die het meest voorkomen in de PCR blanco's en de Mock communities gegeven is (daarom komt de totale microbiele populatie niet uit op 100%). Inoculum = Kern *S1*, t=0: Kern *S1* na menging met grondwater, t=1: 1 week incubatie, t=2: 2 weken incubatie, t=4: 4 weken incubatie, waarbij monsters na 2 weken teruggebracht zijn naar 11°C voor 2 weken. Ook de Mock communities en PCR blanco's zijn getoond.

## 5.4.5 Drinkwaterbesluit

Het Drinkwaterbesluit (2018) is in deze studie slechts als referentiekader gebruikt. De stoffen die hierin zijn opgenomen en die in deze studie zijn onderzocht zijn weergegeven in Figuur 5-30.

Cl is in deze studie enkel gebruikt als conservatieve parameter, en blijft in het grondwater en gedurende de experimenten beneden de drinkwaternorm. Fe, SO<sub>4</sub>, en B worden beïnvloed door artefacten van de experimenten en de concentraties die zijn waargenomen zijn dus niet direct te vertalen naar het veld. Dit geldt ook deels voor Na, maar de concentratie Na neemt ook deels toe met temperatuur en tijd door (kali-) veldspaatverwering.

Een toename van de temperatuur zorgt ervoor dat de oplosbaarheid van carbonaten afneemt, kalk neerslaat, en **Mn**, **Hardheid** en **Alkaliniteit** afnemen. De concentratie **Mn** voldeed niet aan de norm van het Drinkwaterbesluit (2018) in grondwater, maar wel na het experiment met 85°C. Voor **Hardheid** en **Alkaliniteit** wordt een minimale (en geen maximale) waarde gehanteerd in het Drinkwaterbesluit (2018), waardoor de afname tijdens van beide parameters bij verhoogde temperaturen minder gunstig is. Opharding van water is echter een relatief eenvoudig proces, waardoor dit niet als een groot probleem wordt beschouwd.

**As** en **NH**₄ voldoen in het grondwater niet aan de norm van het Drinkwaterbesluit. Bij **NH**₄ zijn geen duidelijke temperatuurafhankelijke veranderingen waargenomen. Hoewel mobilisatie van **As** bij hogere temperaturen de waterkwaliteit wel verslechtert, is dit een reversibel proces.

Voor **Ni**, **Sb**, en **Se** voldoet het grondwater aan de norm van het Drinkwaterbesluit (2018), maar is dit gedurende de experimenten niet meer het geval. Een duidelijke temperatuurafhankelijkheid is echter niet waargenomen. De concentraties van **Cu** en **Cr** nemen daarentegen wel toe bij hogere temperaturen, maar blijven voldoen aan de norm van het Drinkwaterbesluit (2018).

Voor **Pb**, **Hg**, **Al**, **Zn**, **NO**<sub>3</sub>, **NO**<sub>2</sub>, en **Cd** is geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid vastgesteld en voldoen de concentraties in het grondwater en tijdens de experimenten aan de norm van het Drinkwaterbesluit (2018).


Figuur 5-30: Verhouding van de concentraties van parameters t.o.v. de eisen die zijn opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018). DWB = Drinkwaterbesluit, GW = grondwaterkwaliteit, Max XX = maximale concentratie waargenomen bij temperatuur XX, Max Tijd = maximale concentratie waargenomen na 4 weken (voor **Mn, Hardheid**, en **Alkaliniteit** zijn geen maximale maar juist minimale concentraties weergegeven).

## 5.4.6 Artefacten van experimenten

# Pyrietoxidatie door contact met O2

Vrijwel alle **S** die is aangetroffen in het supernatant van beide experimenten is aanwezig in de vorm van **SO**<sub>4</sub>, aangezien de molverhouding **S**:**SO**<sub>4</sub> de 1:1-lijn benadert (Figuur 5-31). **SO**<sub>4</sub> gedraagt zich niet conservatief ten opzichte van **CI** en de concentratie in het supernatant neemt tijdens de experimenten toe (Figuur 5-31). Deze toename is over het algemeen sterker bij hogere temperaturen, en lijkt niet reversibel. **SO**<sub>4</sub> overschrijdt de norm van het Drinkwaterbesluit (2018) bij temperaturen >40°C na 2 weken, terwijl dit bij de lagere temperaturen pas na 4 weken het geval is. Aangezien **S** niet in dergelijke concentraties afkomstig kan zijn van het glaswerk of van de atmosfeer, wordt verondersteld dat **S** aanwezig is in het sediment, hoewel dit niet blijkt uit de chemische samenstelling van het sediment van beide kernen (Tabel 5-2).



Figuur 5-31: **SO**₄ versus **S** (boven), **CI** (miden), en **Ca** (onder) voor de experimenten met *SI* en *GWI* (links) en *S2* en *GW3* (rechts).

De molverhouding Ca:SO<sub>4</sub> bedraagt ca. 1:1 bij het experiment met S2 en GW3, en de concentraties van beide stoffen nemen toe met de temperatuur en met de tijd (Figuur 5-31). Deze toename is bovendien niet reversibel. Oplossing van gips ( $CaSO_4 \rightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-}$ ) is onwaarschijnlijk, aangezien de oplosbaarheid van gips juist afneemt met de temperatuur. De meest waarschijnlijke verklaring is dat het vrijgekomen SO<sub>4</sub> afkomstig is van de oxidatie van sedimentair pyriet (FeS<sub>2</sub>), wat wordt bevorderd door hogere temperaturen, en dat het gevormde zuur gebufferd wordt door oplossing van kalk (CaCO<sub>3</sub>), wat resulteert in mobilisatie van Ca en in de volgende reactievergelijking:  $4 FeS_2 + 15O_2 + 6H_2O + 8CaCO_3 \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8SO_4^{2-} + 8Ca^+ + 8CO_2$ 

De concentraties **Fe** zijn tijdens het experiment doorgaans lager dan de detectielimiet, wat kan duiden op neerslagvorming van ijzerhydroxiden (**Fe(OH)**<sub>3</sub>) door oxidatie. Dit is tevens opgenomen in bovenstaande reactievergelijking.

Oxidatie door NO<sub>3</sub> is onwaarschijnlijk, aangezien NO<sub>3</sub> continu onder de detectielimiet blijft. Hoewel is getracht de monsters anaeroob te houden, is O<sub>2</sub> mogelijk de oxidator die verantwoordelijk is voor pyrietoxidatie. Het feit dat bij hogere temperaturen en meer tijd de concentratie SO<sub>4</sub> blijft toenemen, geeft aan dat O<sub>2</sub> niet de beperkende factor is voor pyrietoxidatie en er dus voldoende beschikbaar moet zijn geweest. De toename van SO<sub>4</sub> en Ca bij 11°C bedraagt ca. 2 mmol/L na 4 weken. Dit komt overeen met een O<sub>2</sub>-consumptie van: 2 mmol/L \*  $\frac{15 \text{ mmol O}_2}{8 \text{ mmol SO}_4}$  \* 0,4 L = 1.5 mmol O<sub>2</sub> (48 mg O<sub>2</sub>). Voor 85°C zou zelfs minimaal ca. 130 mg O<sub>2</sub> beschikbaar moeten zijn geweest.

Het oorspronkelijke grondwater kan an sich niet de verklaring zijn voor de pyrietoxidatie, aangezien daarin een concentratie van slechts 0,53 mg/L  $O_2$  is gemeten. Bij ontvangst van de grondwatermonsters vóór experiment 1 bleek dat een headspace (een luchtinsluiting) aanwezig was in de monsterflessen, en het grondwater dus is blootgesteld aan lucht. Water dat in evenwicht is met de atmosfeer kan bij 11 tot 20°C ca. 10 mg/L  $O_2$  bevatten. Aangezien er ca. 0,4 L grondwater aanwezig is in de mengsels, en dus maximaal 4 mg  $O_2$ , kan ook dit niet de complete verklaring zijn voor de pyrietoxidatie.

De glovebox is bij de preparatie van de mengsels en bij monsternames te allen tijden met overdruk van  $N_2$ -gas gesloten gebleven, waardoor een dergelijke hoeveelheid  $O_2$ niet in de schottflessen terecht kan zijn gekomen. Aannemelijker is dat de mengsels zijn blootgesteld aan  $O_2$  gedurende het verblijf buiten de glovebox tijdens de experimenten, mogelijk als gevolg van een slecht afsluitende dop.

Bij het experiment met *S1* en *GW1* is geen headspace waargenomen in de monsterflessen van het grondwater, en is extra aandacht besteedt aan het stevig aandraaien van de doppen van de schottflessen. De concentratie van **SO**<sub>4</sub> neemt toe met de tijd maar bereikt niet de concentratie die is waargenomen in het experiment met *S2* en *GW3* (Figuur 5-31). Dit duidt op oxidatie van pyriet, maar in mindere mate dan bij het experiment met *S2* en *GW3*. Mogelijk is minder O<sub>2</sub> de schottflessen ingekomen. Bij 11°C is er minimaal 24 mg O<sub>2</sub> beschikbaar geweest, en bij 85°C bedraagt dit ca. 48 mg. Daarnaast is er geen **S** aangetroffen in *S1*, terwijl een zeer lage concentratie **S** wel aanwezig was in *S2*. De molverhouding **Ca**:**SO**<sub>4</sub> bij experiment 2 is tevens negatief, waaruit blijkt dat andere processen dominant zijn ten opzichte van de pyrietoxidatie.

## Uitloging van glas-componenten

De concentratie **B** bedraagt in lokaal grondwater slechts ca. 2  $\mu$ mol/L (16  $\mu$ g/L), terwijl deze gedurende de experimenten en bij verhoogde temperaturen sterke toeneemt (Bijlage VII). Bij het experiment met *S1* en *GW1* bedraagt de concentratie **B** na 4 weken op 11°C ca. 2 <u>mmol/L</u> (21 mg/L) en na 2 weken op 60°C-85°C zelfs ca. 7,5 mmol/L (81 mg/L). Bij de experimenten van Bonte et al. (2013) bedroeg de concentratie **B** in het oorspronkelijke water ca. 4  $\mu$ g/L, en liepen de concentraties bij 60°C slechts op tot 100  $\mu$ g/L. Een deel van de waargenomen toename kan door mobilisatie van **B** uit sediment zijn veroorzaakt, maar de extreme toename van **B** in dit experiment is opvallend. Ook bij het experiment met *S2* en *GW3* is mobilisatie van **B** waargenomen.

Het glaswerk dat is gebruikt bij de experimenten wordt volgens de fabrikant gekenmerkt door een zeer hoge chemische weerstand, een hoge gebruikstemperatuur, minimale thermische uitzetting, en een hoge weerstand tegen thermische schokken (Tabel 5-2; <u>glasatelier-saillart.be/borosilicaatglas/over-borosilicaatglas/</u>). Uitloging van de alkalimetaaloxiden kan echter wel plaats vinden. Het roeren van de mengsels tijdens de experimenten kan de uitloging versterken, doordat abrasie met het zand plaats kan vinden en/of het contactoppervlak van het glas steeds wordt ververst.

De concentraties **B** zijn uitgezet tegen andere componenten van het glas (**Na+K** en **Si**) om te onderzoeken of uitloging inderdaad optreedt (Figuur 5-32). Hieruit blijkt dat er inderdaad een verband bestaat tussen enerzijds de toename van de concentratie **B** en anderzijds de toename van de concentraties **Na+K** en **Si**. **Na** overschrijdt daarbij de eis van het Drinkwaterbesluit enkel bij de laatste metingen van 85°C.

De verhouding **B**:**Si** bedraagt in de eerste week van het experiment met *S1* en *GW1* ca. 0,5 - 0,6, wat ongeveer 2 keer zo groot is als wat men zou verwachten op basis van de samenstelling van het glas (0,28; Tabel 5-2). Dit kan zijn veroorzaakt doordat de oplossing verzadigd raakt t.o.v. **Si**, en silicaten direct kunnen neerslaan uit het supernatant. Oververzadiging kan tevens verklaren waarom de concentratie **Si** na de eerste week van de experimenten afneemt, terwijl de concentratie **B** juist verder toeneemt. Dit wordt nader besproken in paragraaf 5.4.6.

De verhouding **B**:(**Na+K**) bedraagt ca. 1,4, wat kleiner is dan men zou verwachten op basis van de samenstelling van het glas (2,8 – 4,4; Tabel 5-2). Mogelijk is de weerstand van **Na**- en **K**-oxides tegen uitloging lager dan die van boortrioxides, of wijkt de daadwerkelijke samenstelling van het glas af van de samenstelling in Tabel 5-2. Een waarschijnlijkere verklaring is echter dat **Na** en **K** gedurende de experimenten niet alleen vrijkomen uit glas, maar ook uit het sediment. Dit kan bijvoorbeeld plaatsvinden door verwering van veldspaten. Dit wordt nader besproken in paragraaf 5.4.6.



Figuur 5-32: B versus Na+K (links) en versus Si (rechts) voor S1 & GW1.

## 5.5 Conclusies temperatuureffecten

Wat zijn de temperatuureffecten op chemische en microbiële processen, en dus op de chemische waterkwaliteit en de microbiële populatie, bij ondergrondse warmteopslag?

- DOC en TOC nemen toe in concentratie >40°C door chemische hydrolyse, desorptie van DOC vanaf ijzeroxiden, of sterfte van micro-organismen. De toename lijkt niet volledig reversibel bij temperatuurafname;
- Ca, Mg, Mn, Ba, Sr, en Alkaliniteit zijn aanwezig in het grondwater en nemen tijdens de experimenten af met de tijd door neerslag van kalk (carbonaten).
  Hogere temperaturen zorgen ervoor dat lagere concentraties worden bereikt, wat overeenkomt met de lagere oplosbaarheid van kalk. Kalkoplossing, m.a.w. reversibiliteit van kalkneerslag, is niet aangetoond bij de experimenten;
- Na, K, en Si nemen mogelijk toe in concentratie door veldspaatverwering. Dit proces wordt gestimuleerd door een temperatuurverhoging. De concentratie Si neemt naar verloop van tijd af door oververzadiging en neerslag van silicaten.
- Mobilisatie van microparameters, mogelijk als gevolg van desorptie van oxyanionen vanaf ijzer(hydr)oxides, kan vanaf verschillende temperaturen plaatsvinden. Hierbij moet men in acht nemen dat deze microparameters reeds aanwezig moeten zijn in sediment alvorens deze kunnen mobiliseren:
  - 23°C: As, PO4, Ti, en V (reversibel) en W (deels reversibel);
  - 40°C: Ge (reversibel);
  - o 60°C: Cs, Cu, Li, Mo, en Rb (irreversibel);
  - 85°C: Cr, Nd, Ce, Dy, Er, Gd, La, Pr, Sm, Y, Yb, (reversibel) en Zr (deels reversibel), en mogelijk Ag, Be, Hf, Ho, Lu, Tb, en Th (reversibel);
- Voor NO<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, Bi, In, Pt, Ru, Ta, Te, en Tm zijn geen metingen gedaan boven de detectielimiet, en voor Al, Au, Cd, Co, Eu, Ga, Hg, Nb, NH<sub>4</sub>, Ni, NO<sub>2</sub>, U, Pd, Re, Rh, Sb, Sc, Se, Sn, Tl, en Zn is om verschillende redenen geen duidelijke temperatuurafhankelijkheid waargenomen.

Microbiële populatie gegevens laten zien dat het verhogen van de temperatuur grote gevolgen heeft voor de microbiële gemeenschap in de bodem:

- Temperaturen van 5 en 11°C laten geen duidelijk effect zien op de microbiële populatie.
- Het verhogen van de temperatuur naar 23 en 40°C resulteert in een verlaging van de microbiële diversiteit en in groei en dominantie van specifieke microorganismen. Deze organismen hebben vooral een aeroob metabolisme, wat mogelijk te verklaren is door zuurstoflekkage. Deze micro-organismen nemen weer af in abundantie wanneer de temperatuur weer wordt teruggebracht naar 11°C. De verschuiving in de microbiële populatie is dus mogelijk reversibel op een termijn langer dan twee weken.
- De microbiële populatie bij 60°C bestaat voor ongeveer 40% uit *Caldinitratiruptor* microaerophilus. De andere 60% van de populatie heeft een grote diversiteit. De verschuiving in de populatie richting enkele dominante soorten is sterker bij 23 en 40°C dan bij 60°C. De verschuiving bij 60°C lijkt niet reversibel, mede omdat bij 60°C alleen spore-vormende, thermofiele micro-organismen overleven.
- Bij 85°C is er vrijwel geen microbieel leven meer aanwezig. De micro-organismen die gevonden worden zijn afkomstig uit de DNA extractie kit en het PCR water.

# Wat zijn vanuit grondwaterbeschermingsoogpunt de belangrijkste parameters bij ondergrondse warmteopslag?

As kan blijkens de resultaten van de experimenten bij temperaturen >40°C mobiliseren tot concentraties boven de norm van het Drinkwaterbesluit (2018). Volgens Bonte et al. (2013) kan dit vanaf 23°C al plaatsvinden. Daarnaast kunnen **Cu** en **Cr** mobiliseren bij respectievelijk 60°C en 85°C, maar vormden tijdens de experimenten geen bedreiging m.b.t. de drinkwaternorm. Op andere locaties kan dit wel het geval zijn. Het niet voldoen aan de normen voor **Hardheid** en **Alkaliniteit** vormt geen groot probleem. De temperatuurafhankelijkheid van overige parameters uit het Drinkwaterbesluit (2018) is onduidelijk op basis van de experimenten.

Naast de drinkwaternorm is (ir)reversibiliteit van geochemische processen ook belangrijk. **W**, **Cs**, **Cu**, **Li**, **Mo**, **Rb**, en **Zr** vereisen daarom ook aandacht. Als een temperatuurtoename door warmteopslag namelijk voor mobilisatie van deze stoffen zorgt, vormt dit mogelijk problemen voor de omgeving. De concentraties van deze elementen nemen niet of slechts deels af bij een temperatuurafname.

## <u>Artefacten</u>

Tijdens de experimenten zijn artefacten waargenomen die bij toepassing van warmteopslag in het veld onwaarschijnlijk zijn:

- Meerdere monsters zijn ingezet bij een bepaalde temperatuur en geanalyseerd op verschillende tijdstippen ('sacrificial sampling'). Heterogeniteit tussen monsters kan daardoor invloed hebben gehad op de resultaten van de experimenten;
- Zuurstof is in de monsterflessen terechtgekomen tijdens de experimenten. Hierdoor vond pyrietoxidatie plaats, wat voor mobilisatie van SO₄ en neerslag van ijzerhydroxiden heeft gezorgd. Zuurstof zorgt ook voor een microbiële populatie met vooral een aeroob metabolisme waardoor het lastig wordt om de experimentele situatie te vertalen naar het veld. In het veld zou zuurstof namelijk niet in dergelijke concentraties in contact komen met sediment en grondwater.
- Verschillende componenten logen tijdens de experimenten uit het glaswerk, waaronder B, Na, K, en Si. Dit gebeurt niet in het veld, hoewel bodemvreemde stoffen wel kunnen vrijkomen uit bijvoorbeeld boorgatdichtingen, casings, etc.
- In de experimenten treedt een situatie op waarbij de micro-organismen in een afgesloten ruimte terecht komen waarbij nutriënten afnemen en de microorganismen uiteindelijk zullen sterven. In veldsituaties treedt aanvoer van nutriënten op die microbiologische processen beïnvloeden. Om de lange termijn en reversibiliteit van warmteopslag in te schatten is daarom een experiment gewenst dat de veldsituatie beter nabootst.

## 5.6 Aanbevelingen

- Uitvoering van grondwatermonitoring in het veld kan gebaseerd worden op de inzichten verkregen in deze studie, rekening houdend met de volgende aspecten:
  - Bij een veldexperiment wordt ook de aanvoer van nieuwe nutriënten voor microbiologische processen meegenomen. De mate van verstoring van de natuurlijke nutriëntencycli (van C, N, P, en Fe) in de ondergrond zou indicatief kunnen zijn voor het effect van warmteopslag op processen die microbiologisch worden gekatalyseerd.
  - Bij een veldexperiment hebben de gepresenteerde artefacten geen invloed op de uitkomsten van het onderzoek en kunnen ook scherpere conclusies worden getrokken voor parameters als SO<sub>4</sub>, Fe, B, Na, K, en Si.

• Bij realisatie en bedrijfsvoering van warmteopslag wordt aanbevolen om te blijven monitoren, met name de aandachtparameters.

# 6 Conclusies

Binnen het project P2X zijn als casus de zonnepanelen op het WRK-terrein in Nieuwegein beschouwd, waarmee (voor een deel) de warmtevoorziening in de ontwikkeling zijnde wijk Rijnhuizen mogelijk geleverd wordt. Om dat mogelijk te maken, zou er ook een ondergronds warmteopslagsysteem gerealiseerd moeten worden. In dit rapport wordt een eerste inventarisatie gedaan naar de prestaties en effecten van een dergelijk ondergronds warmteopslagsysteem, op basis van de verwachtte hoeveelheid warmtevraag en warmtelevering, en de ondergrondse condities in dit gebied.

Watervoerende pakketten 1 en 3 (WVP 1 en WVP 3) zijn ter plaatse van de projectlocatie onderzocht als mogelijk geschikte lagen voor de warmteopslag. Voor de toepassing van een warmteopslag in beide pakketten is middels een numerieke grondwatermodellering separaat inzichtelijk gemaakt wat de effecten zijn van de warmteopslag. Voor toepassing van de warmteopslag in WVP 1 is met lab-experimenten verkend wat de geochemische effecten zijn. Daarnaast is onderzocht of er risico is op lekstromen van WVP 1 naar WVP 2.

## Temperatuureffecten

Op basis van de simulaties is een schatting gedaan van horizontale en verticale verspreiding van de warmte. Dit betekent dat er bij de hoogst geteste opslagtemperatuur van 65°C na 50 jaar op ongeveer 380, 300 en 220 meter van de warme bron een temperatuurverhoging van respectievelijk 0.5, 3 en 13 °C kan zijn. De impact van een warmteopslag op de calamiteitengrondwaterwinning van Waternet is het grootst bij opslag in WVP 3. De temperatuurverhoging van de ondiepe bodem en het maaiveld zal het grootste zijn bij opslag in WVP 1.

De resultaten geven aan dat naarmate de gebruikte opslagtemperatuur lager is, dit resulteert in een hogere efficiëntie en minder opwarming van omringende lagen. Wel resulteert het gebruik van een lagere opslagtemperatuur logischerwijs in een groter volume verpompt grondwater voor dezelfde energie.

## Lekstromen

Door middel van pompproeven is er geen lekkage ontdekt in de kleilaag tussen WVP 1 en WVP 2. Alle aanwezige scheidende lagen tussen maaiveld en WVP 3 zijn als integer beoordeeld. Lekstromen zijn dus niet te verwachten.

## Geochemische effecten

Op basis van de grondwatermonsters die voor deze studie zijn genomen uit WVP 1 bij het WRK-terrein van Waternet, is te verwachten dat de concentraties van **Fe**, **Mn**, **As** en **NH**<sub>4</sub> in het natuurlijke grondwater verhoogd zijn ten opzichte van de normen van het Drinkwaterbesluit (2018). Deze normen worden zijn hier slechts ter vergelijking gebruikt. Indien een opslagtemperatuur tot ca. 60°C wordt gehanteerd, is op basis van de experimenten te verwachten dat in het grondwater direct rondom het systeem de concentraties van **DOC**, **TOC**, **Na**, **K**, **Si**, en verschillende microparameters zullen toenemen. Van deze micro-parameters zijn de concentratietoenames voor **As** en **Cu** het meest relevant, en **W**, **Cs**, **Li**, **Mo**, en **Rb** in termen van irreversibiliteit. Daarnaast kan deze temperatuurverhoging zorgen voor lagere concentraties van **Ca**, **Mg**, **Mn**, **Ba**, en **Sr**, en een lagere **alkaliniteit** door de neerslag van carbonaten. Deze bevindingen zijn in overeenstemming met de resultaten van Bonte et al. (2013). Een opslagtemperatuur tot ca. 60°C zal tevens resulteren in een verschuiving van de microbiële populatie, welke op basis van de experimenten zal worden gedomineerd door *Caldinitratiruptor microaerophilus*. Deze verschuiving lijkt niet reversibel, mede doordat alleen spore-vormende, thermofiele micro-organismen overleven. In de praktijk zal de bacteriële populatie, in tegenstelling tot de proeven in de schottflessen, bij afkoeling wel reversibel zijn omdat het systeem open is voor rekolonisatie.

Op ca. 200 meter horizontale afstand van de warme bron wordt op basis van de modellering verwacht dat de temperatuur bij opslag van de hoogst geteste temperatuur (65°C) na 50 jaar kan toenemen tot 25°C. Bij deze temperatuur lijken, vanwege de waargenomen concentratietoename, enkel **As** en **W** (irreversibiliteit) aandachtparameters te zijn. Een temperatuurverhoging tot 25°C kan tevens leiden tot meer kalkneerslag, veldspaatverwering, en mobilisatie van **DOC** en **TOC**. Het kan daarnaast resulteren in een verlaging van de microbiële diversiteit en in een verschuiving van de populatie naar specifieke micro-organismen. Deze verschuiving is op basis van de experimenten mogelijk reversibel. Bovendien bevordert de continue toevoer van grondwater de herkolonisering van micro-organismen in het veld.

Bij eventueel verdere tests of ontwikkeling van een ondergrondse warmteopslag in de praktijk, moet de thermische verspreiding nader worden onderzocht met een gedetailleerder model om de precieze locatie zodanig te kiezen dat andere grondwatergebruikers daar geen nadelige effecten van ondervinden. Hierbij zal ook rekening gehouden moeten worden met de lokale grondwaterstroming. Uiteindelijk is de terugwinefficiëntie, en daarmee ook de thermische impact, afhankelijk van de warmte (volume en temperatuur) die daadwerkelijk zal worden opgeslagen. Voor een locatie waar realisatie uiteindelijk daadwerkelijk overwogen zal worden, hebben ook de hoeveelheid daarvoor benodigde bronnen, het opslagvolume, de geohydrologische condities en de ruimtelijke inpassing van de bronnen een belangrijke invloed. Deze aspecten vragen om een uitgebreidere modelstudie voor de beoogde locatie om tot investerings- en/of vergunningsbesluiten te komen.

Daarnaast wordt aanbevolen om de daadwerkelijk optredende temperaturen en waterkwaliteitsveranderingen in de praktijk te monitoren (bijvoorbeeld met DTS en grondwateranalyses). Dit om a) te controleren of de op voorhand in beeld gebrachte effecten overeenkomen met de werkelijke effecten, en b) om onderzoek te kunnen doen naar en een beter inzicht te krijgen in het gedrag van een warmteopslag onder verschillende condities. De resultaten van deze studie kunnen gebruikt worden als basis voor de ontwikkeling van een grondwatermonitoringsprogramma.

Al met al, geeft deze verkenning van de mogelijkheden voor, en de prestaties en impact van, een ondergronds warmteopslagsysteem met de ondergrondcondities in Nieuwegein, zoals bepaald voor het WRK-terrein van Waternet, aan dat van de aanwezige watervoerende pakketten (WVP 1, 2 en 3), WVP 1 het meest geschikt lijkt vanwege de te verwachten hogere prestaties (capaciteit en terugwinrendementen) en geringere thermische impact (temperatuurverhoging) op WVP 2, waar de noodwinning van Waternet zich bevindt. Ook geven de resultaten van dit onderzoek geen aanleiding te twijfelen aan de scheidendheid van de dikke kleilaag tussen WVP 1 en WVP 2. De resultaten van de labexperimenten van dit verkennende onderzoek, waarin de effecten van de geteste temperatuurverhogingen verklaarbaar waren en binnen de verwachting vielen, geven geen aanleiding zorgwekkende of onoverkoombare grondwaterkwaliteitseffecten te verwachten bij veldrealisatie. Een veldtest op de beoogde uiteindelijke locatie van een ondergronds warmteopslagsysteem kan daar nog meer zekerheid in verschaffen.

# 7 Referenties

Alcalá, F. J., & Custodio, E. (2005). Use of the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in some coastal aquifers of Spain. In 18<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting, IGME y IAH, Cartagena (pp. 481-497).

Beijerinck MW (1904a). "Phénomènes de réduction produits par les microbes". Arch Neel Sci Exact Nat (Section 2). 9: 131-157.

Beijerinck MW (1904b). "Ueber die Bakterien, welche sich im Dunkeln mit Kohlensäure als Kohlenstoffquelle ernähren können". Centralbl Bakteriol Parasitenkd Infektionskr Hyg Abt II. 11: 592–599.

Boden R (2017). "115 years of sulfur metabolism". FEMS Microbiology Letters. 364: fnx043. doi:10.1093/femsle/fnx043.

Bonte, M., van Breukelen, B. M., & Stuyfzand, P. J. (2013). Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. Water research, 47(14), 5088-5100.

Bonte, M., 2013. Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality, geo sciences. Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam. https://doi.org/10.2166/9781780406824

Bonte, M. (2015). Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality. Iwa Publishing, Londen, UK. Geraadpleegd van:

https://books.google.nl/books?hl=nl&lr=&id=JJAYBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=WSG DJPpV9Q&sig=ITvIB98DzQjHw1S1T-IIB5Lwdpl&redir\_esc=y#v=onepage&q=doc&f=false. Geraadpleegd op: 18-7-2019.

Breznak, J. A., and Costilow, R. N. 1994. Physicochemical factors in growth, pp. 137-154. In P. Gerhardt (ed.), Methods for general and molecular bacteriology. American Society for Microbiology, Washington.

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. Geraadpleegd van: <u>http://edepot.wur.nl/201141</u>. Geraadpleegd op: 18-7-2019.

Brown, L. D. (2005). Characterisation of Australian opals (Doctoral dissertation).

Chen, J. L., Steele, T. W., & Stuckey, D. C. (2015). Modeling and application of a rapid fluorescence-based assay for biotoxicity in anaerobic digestion. Environmental science & technology, 49(22), 13463-13471.

Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., Marini, L., & Gambardella, B. (2003). Water chemistry of Lake Albano (Italy). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 120(3-4), 179-195.

Drobner, E., Huber, H., Rachel, R., & Stetter, K. O. (1992). Thiobacillus plumbophilus spec. nov., a novel galena and hydrogen oxidizer. Archives of microbiology, 157(3), 213-217.

Doronina, N., Kaparullina, E., & Trotsenko, Y. (2014). The family methylophilaceae. The Prokaryotes: Alphaproteobacteria and Betaproteobacteria, 869-880.

Dzombak, D. A., & Morel, F. M. (1990). Surface complexation modeling: hydrous ferric oxide. John Wiley & Sons.

Evanko, C. R., & Dzombak, D. A. (1998). Influence of structural features on sorption of NOM-analogue organic acids to goethite. Environmental science & technology, 32(19), 2846-2855. DOI: <u>https://doi.org/10.1021/es980256t</u>.

Faith, D. P. (1992). Conservation evaluation and phylogenetic diversity. Biological conservation, 61(1), 1-10. doi: <u>https://doi.org/10.1016/0006-3207(92)91201-3</u>

Fardeau, M. L., Barsotti, V., Cayol, J. L., Guasco, S., Michotey, V., Joseph, M., ... & Ollivier, B. (2010). Caldinitratiruptor microaerophilus, gen. nov., sp. nov. isolated from a French hot spring (Chaudes-Aigues, Massif Central): a novel cultivated facultative microaerophilic anaerobic thermophile pertaining to the Symbiobacterium branch within the Firmicutes. Extremophiles, 14(3), 241-247.

Filius, J. D., Lumsdon, D. G., Meeussen, J. C., Hiemstra, T., & Van Riemsdijk, W. H. (2000). Adsorption of fulvic acid on goethite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(1), 51-60. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00176-3</u>.

Finneran, K. T., Johnsen, C. V., & Lovley, D. R. (2003). Rhodoferax ferrireducens sp. nov., a psychrotolerant, facultatively anaerobic bacterium that oxidizes acetate with the reduction of Fe (III). International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 53(3), 669-673.

Friedrich, C. G., Rother, D., Bardischewsky, F., Quentmeier, A., & Fischer, J. (2001). Oxidation of reduced inorganic sulfur compounds by bacteria: emergence of a common mechanism?. Appl. Environ. Microbiol., 67(7), 2873-2882. doi: https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.2873-2882.2001

Garrity, G.M., Holt J.G. (2001). "Phylum All. Euryarchaeota phy. nov.". In DR Boone; RW Castenholz (eds.). Bergey's Manual of Systematic Bacteriology Volume 1: The Archaea and the deeply branching and phototrophic Bacteria (2nd ed.). New York: Springer Verlag. p. 169. ISBN 978-0-387-98771-2.

Ghosh, W., & Dam, B. (2009). Biochemistry and molecular biology of lithotrophic sulfur oxidation by taxonomically and ecologically diverse bacteria and archaea. FEMS microbiology reviews, 33(6), 999-1043. doi: <u>https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2009.00187.x</u>

Hallbeck, L., & Pedersen, K. (2014). The family gallionellaceae. The prokaryotes: Alphaproteobacteria and betaproteobacteria, 853-858.

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.

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.

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.

Heijnen, L. (2016). Meetprogramma voor het bepalen van het effect van toepassing van AOP op de (micro)biologie in de duinen. BTO-Speerpuntonderzoek. Rapportnummer BTO 2016.201(s).

Huy, H., Jin, L., Lee, Y. K., Lee, K. C., Lee, J. S., Yoon, J. H., ... & Oh, H. M. (2013). Arenimonasdaechungensis sp. nov., isolated from the sediment of a eutrophic reservoir. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 63(2), 484-489.

Imhoff, J. F. (2006). The phototrophic beta-proteobacteria. The Prokaryotes: Volume 5: Proteobacteria: Alpha and Beta Subclasses, 593-601.

Italiaander, R. (2019). Laboratoriumanalyses LMB 2019. Achtergronden, beschrijving van de uitvoering en prestatiekenmerken. Geraadpleegd van: <u>https://www.kwrwater.nl/wp-content/uploads/2016/05/Laboratoriumanalyses-LMB-2019.pdf</u>. Geraadpleegd op 18-4-2019.

Jiang, C. Y., Dai, X., Wang, B. J., Zhou, Y. G., & Liu, S. J. (2006). Roseomonas lacus sp. nov., isolated from freshwater lake sediment. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 56(1), 25-28.

Kalyuzhnaya, M. G., Beck, D. A., Vorobev, A., Smalley, N., Kunkel, D. D., Lidstrom, M. E., & Chistoserdova, L. (2012). Novel methylotrophic isolates from lake sediment, description of Methylotenera versatilis sp. nov. and emended description of the genus Methylotenera. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 62(1), 106-111.

Kelly, D. P., & Wood, A. P. (2000). Confirmation of Thiobacillus denitrificans as a species of the genus Thiobacillus, in the beta-subclass of the Proteobacteria, with strain NCIMB 9548 as the type strain. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 50(2), 547-550. doi: <u>https://doi.org/10.1099/00207713-50-2-547</u>

Kodama, Y., & Watanabe, K. (2004). Sulfuricurvum kujiense gen. nov., sp. nov., a facultatively anaerobic, chemolithoautotrophic, sulfur-oxidizing bacterium isolated from an underground crude-oil storage cavity. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 54(6), 2297-2300.

Kumar, P. S. (2013). Interpretation of groundwater chemistry using piper and Chadha's diagrams: a comparative study from Perambalur Taluk. Elixir Geosci, 54, 12208-12211.

KWR (2010) Kennisdocument Putten(velden). Ontwerp, aanleg en exploitatie van pompputten. Update 2010; KWR 2011.014

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.

Leunk, I. and M. Bonte (2012). Relatie WRK grondwateronttrekking en WKO systeem voor nieuwbouw KWR kantoor: resultaten proefonttrekking WRK. KWR, Nieuwegein.

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 hightemperature aquifer thermal energy storage systems. Hydrogeology Journal. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2013). Waterregeling (WaterAct). Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Den Haag.

Ministry-of-Infrastructure-and-Environment, 2013. Waterregeling (WaterAct), in: Ministry-of-Infrastructure-and-Environment (Ed.), Den Haag.

Naily, W., Sudaryanto (2017). Cl/Br Ratio to Determine Groundwater Quality. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 118, No. 1, p. 012020). IOP Publishing. Geraadpleegd van: <u>https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/118/1/012020/pdf</u>. Geraadpleegd op: 25-6-2019.

OECD (2008). OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Organisation for Economic Cooperation and Development, 316, p. 13.

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water - analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union, 25(6), 914-928.

Polyakova, I. G. (2014). The main silica phases and some of their properties. Glass: Selected Properties and Crystallization, 197-268.

Provincie Utrecht (2013). Provinciale milieu Verordening. P.o. Utrecht, Utrecht.

Ramette, A. (2007). Multivariate analyses in microbial ecology. FEMS Microbiol Ecol 62(2): 142-160

Rimstidt, J. D. & Cole, D. R. 1983. Geothermal mineralization, I. The mechanism of formation of the Beowawe, Nevada, siliceous sinter deposit. American Journal of Science, 283: 861-875.

Robador, A., Brüchert, V., Steen, A. D., & Arnosti, C. (2010). Temperature induced decoupling of enzymatic hydrolysis and carbon remineralization in long-term incubations of Arctic and temperate sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74(8), 2316-2326. DOI: <u>https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.01.022</u>.

Rothe, O., & Thomm, M. (2000). A simplified method for the cultivation of extreme anaerobic Archaea based on the use of sodium sulfite as reducing agent. Extremophiles, 4(4), 247-252.

Rymovicz, A. U. M., Souza, R. D., Gursky, L. C., Rosa, R. T., Trevilatto, P. C., Groppo, F. C., & Rosa, E. A. R. (2011). Screening of reducing agents for anaerobic growth of Candida albicans SC5314. Journal of microbiological methods, 84(3), 461-466. doi: https://doi.org/10.1016/j.mimet.2011.01.020

Smith, M. V., & Pierson, M. D. (1979). Effect of reducing agents on oxidation-reduction potential and the outgrowth of Clostridium botulinum type E spores. Appl. Environ. Microbiol., 37(5), 978-984.

Song, J., Choo, Y. J., & Cho, J. C. (2008). Perlucidibaca piscinae gen. nov., sp. nov., a freshwater bacterium belonging to the family Moraxellaceae. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 58(1), 97-102.

Stuyfzand, P. J. (2008, June). Base exchange indices as indicators of salinization or freshening of (coastal) aquifers. In 20<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting, Naples, Florida, USA.

Taylor, B. F., & Hoare, D. S. (1971). Thiobacillus denitrificans as an obligate chemolithotroph. Archives of Microbiology, 80(3), 262-276.

Tratnyek, P. G., Reilkoff, T. E., Lemon, A. W., Scherer, M. M., Balko, B. A., Feik, L. M., & Henegar, B. D. (2001). Visualizing redox chemistry: probing environmental oxidation-reduction reactions with indicator dyes. The Chemical Educator, 6(3), 172-179.

URAKAMI, T., OYANAGI, H., ARAKI, H., SUZUKI, K. I., & KOMAGATA, K. (1990). Recharacterization and emended description of the genus Mycoplana and description of two new species, Mycoplana ramosa and Mycoplana segnis. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 40(4), 434-442. doi: https://doi.org/10.1099/00207713-40-4-434

Van der Roest, E., Snip, L., Bloemendal, M., & Van Wijk, A. (2018). "Power-to-X," Nieuwegein, KWR 2018.032, 2018 [Online]. Available: <u>https://www.kwrwater.nl/wp-content/uploads/2017/05/Power\_to\_X.pdf</u>

van Lopik, J.H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W.J., Cirkel, D.G., Raoof, A., 2015. Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. Advances in Water Resources 86, 32-45.

Watertool (2011). Sporen van sulfiet reducerende clostridia. Geraadpleegd van: <a href="http://www.watertool.be/interface/Pagina\_Opvragen.aspx?parameterID=127">http://www.watertool.be/interface/Pagina\_Opvragen.aspx?parameterID=127</a>. Geraadpleegd op: 18-4-2019.

Weston, N. B., & Joye, S. B. (2005). Temperature-driven decoupling of key phases of organic matter degradation in marine sediments. Proceedings of the National Academy of Sciences, 102(47), 17036-17040. DOI: <u>https://doi.org/10.1073/pnas.0508798102</u>.

Willems, A., Busse, J., Goor, M., Pot, B., Falsen, E., Jantzen, E., ... & De Ley, J. (1989). Hydrogenophaga, a new genus of hydrogen-oxidizing bacteria that includes Hydrogenophaga flava comb. nov.(formerly Pseudomonas flava), Hydrogenophaga palleronii (formerly Pseudomonas palleronii), Hydrogenophaga pseudoflava (formerly Pseudomonas pseudoflava and "Pseudomonas carboxydoflava"), and Hydrogenophaga taeniospiralis (formerly Pseudomonas taeniospiralis). International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 39(3), 319-333. doi: https://doi.org/10.1099/00207713-39-3-319

Xu, N., & Saiers, J. E. (2010). Temperature and hydrologic controls on dissolved organic matter mobilization and transport within a forest topsoil. Environmental science & technology, 44(14), 5423-5429. DOI: <u>https://doi.org/10.1021/es1002296</u>.

Yoon, J. H., Kang, S. J., Ryu, S. H., Jeon, C. O., & Oh, T. K. (2008). Hydrogenophaga bisanensis sp. nov., isolated from wastewater of a textile dye works. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 58(2), 393-397. doi: <a href="https://doi.org/10.1099/ijs.0.65271-0">https://doi.org/10.1099/ijs.0.65271-0</a>

Yuan, X., Nogi, Y., Tan, X., Zhang, R. G., & Lv, J. (2014). Arenimonas maotaiensis sp. nov., isolated from fresh water. International journal of systematic and evolutionary microbiology, 64(12), 3994-4000. doi: <u>https://doi.org/10.1099/ijs.0.067769-0</u>.

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.

# Bijlage I Solar Power to the People: korte omschrijving

Bij de verdere omschakeling naar hernieuwbare energiebronnen vormt de opslag van energie een grote uitdaging. Mede in dit licht zullen in de toekomst naar verwachting waterstof en warmte een cruciale rol gaan spelen als een belangrijke energiedragers in duurzame energiesystemen.

In Nieuwegein wordt op het WRK terrein in de komende jaren een 8,7 MWp zonnecentrale geïnstalleerd. TU Delft en KWR hebben op basis daarvan een integraal concept ontwikkeld, waarbij met behulp van de zonne-energie en regenwater een viertal producten kan worden geleverd :

- Elektriciteitslevering aan het net
- Omzetting van elektriciteit in waterstof
- Omzetting van elektriciteit in 40-60°C warmte
- Omzetting van regenwater (van zonnepanelen) tot demi-water en drinkwater.

De conversie van met name elektriciteit uit zonne-energie naar andere energiedragers, waterstof en warmte, kan zorgdragen voor een betere balancering van het elektriciteitsnet en een sterke uitbreiding van het elektriciteitsnet voorkomen. Het project omvat het onderzoek naar het systeemdesign van de diverse deelsystemen in relatie tot het totale systeem, middels dynamische systeemmodellering en analyse. Daarnaast worden de technische-economische en duurzaamheidstechnische aspecten van Solar Power to the People onderzocht. In een vervolg fase wordt de realisatie voorzien op de WRK locatie in Nieuwegein waar dan ook een 8,7 MWp PV installatie gerealiseerd zal worden. Naast WRK/Waternet zijn ook partners uit andere sectoren betrokken: Stedin (warmte en elektriciteit), waterstof (Pitpoint) en systeem ontwerp (VolkerWessels/Aveco de Bondt).

De projectdoelen voor de eerste fase zijn:

- Systeem ontwerp van alle verschillende componenten en systeem integratie op het WRK terrein.
- Inzicht in economische, technische en duurzaamheidsaspecten van het systeem.
- Ontwikkeling van een dynamisch model om op Solar Power to the People gebaseerde systemen te analyseren die ook in andere omstandigheden en situaties kunnen worden toegepast.
- Ontwikkeling van een warmte- en waterstofmarkt rond het WRK terrein, samen met de partners in het consortium en de gemeente Nieuwegein, de provincie Utrecht en andere partijen.

Bij realisatie zou dit project uniek zijn in Europa en kan dienen als een voorbeeld voor vergelijkbare projecten op andere plekken ter wereld.

# Bijlage II Model beschrijving

Verliezen door vrije convectie van grondwaterstroming door dichtheidsverschillen tussen geïnfiltreerd en lokaal aanwezige grondwater treden gelijktijdig op met verliezen door conductie, diffusie en dispersie, zie Figuur II-I.







Figuur II-1. Principe van vrij en geforceerde convectie stroming in grondwater met verschillen in dichtheid.

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. Er is gekozen voor een axisymmetrisch model (Figuur II-III) om rekentijden acceptabel te houden voor de zeer lange simulatietijd (50 jaar). Doordat er relatief hoge temperaturen worden opgeslagen wordt er verwacht dat zowel horizontale als verticale distributie van opgeslagen warmte van invloed is, dit vraagt daarom om een fijn gediscretiseerd grid in zowel de z (verticale) als de r (radiale) richting (Figuur II-II).

- 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 II-II). Zowel een celgrootte van 1m en 2.5m zijn getest. Hierbij waren verschillen niet significant, er is dus gekozen voor een Δr =2.5m in de radiale richting. Op een afstand van 100m van de bronnen worden de cellen langzaam groter (2.5m -> 100nstepm) richting de rand van het model volgens een logaritmisch profiel in minimaal 20 stappen.
- Model lagen. Omdat de injectie-temperaturen relatief hoog zijn wordt er verwacht dat verticaal transpoort aanwezig is, een fijne resolutie is daarom vereist. Er is daarom gekozen voor ∆z=0.5.
- Er is geen grondwater aanvulling en aan de modelrand (boven, onder en aan de rand van het radiale domein) is er een constante stijghoogte en temperatuur.
  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 aangepast voor de eigenschappen bepaald uit de boringen (§2.3.1) opgenomen in tabel II-I. 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 advection package.
- Het model wordt berekent met tijdstappen van een maand. De simulatie van 50 jaar heeft dus 600 tijdstappen.



Figuur II-II. Axisymmetrisch grid gebruikt voor de simulaties, alle punten zijn cellhoeken. Cellen in de verticale richting zijn niet goed te onderscheiden doordat de resolutie hoog is ( $\Delta z=0.5m$ ).

# Tabel II-1. SEAWAT simulatie parameters

Parameter	Waarde	Package
Water warmte capaciteit	4.183 kJ/kg/°C	RCT
Solid warmte capaciteit	710 kJ/kg °C	RCT
Water dichtheid	1,000 kg/m³	RCT
Zand dichtheid <sup>®</sup>	2,640kg/m <sup>3</sup>	RCT
Water thermische geleidbaarheid	0.58 W/m/°C	RCT
Solid thermische geleidbaarheid	2 W/m/°C	RCT
Thermische distributie coefficient <sup>#</sup>	1.7 ·10⁻⁴ m³/kg	RCT
Thermische retardatie⁺	2.21	RCT
Porositeit	0.3	BTN
Specifieke berging aquifer	6 · 10⁴ /m	LPF
Longitudinale dispersie	0.5 m	DSP
Transversael dispersie	0.05 m	DSP
Verticale dispersie	0.005 m	DSP
Effectieve moleculaire diffusie warmte#	0.108 m²/day	DSP



Figuur II-III. Overzicht van een axisymmetrische grid structuur. Van: Langevin (2008).

# **Bijlage III Grondwaterkwaliteit**

De oorspronkelijke grondwaterkwaliteit is opgenomen in onderstaande tabellen, waarin de verschillende kleuren van cellen de elk een betekenis hebben:

Lichtgrijze vakken : Oranje vakken : Rode tekst: Concentratie is gemeten beneden de detectielimiet;

Opvallend resultaat;

Concentratie voldoet niet aan de norm van het Drinkwaterbesluit (DWB).

Parameter	Eenheid				Peilbui	sfilters				DWB		
Nummering	#		1		2		3		4			
Diepte top filter	m-mv		24		31		40		48			
Diepte bodem filter	m-mv		26		33		42		50			
WVP	-		WVP 1a		WVP 1b		WVP 1b		WVP 1b			
			Metingen	tijdens proefbor	ing (23 juli 20	18)						
EC (gem. van 4x)	µS/cm		450		350		300		250	<1250		
pH (gem. van 4x)	-		7,24		7,61		7,63		7,65	>7; <9,5		
			Bemonste									
Bemonsteringsdatum	dd/mm/jjjj	29/11/2018	14/1/2019	29/11/2018	14/1/2019	29/11/2018	14/1/2019	29/11/2018	14/1/2019			
		١	/eldmetinge	n en directe lab-	metingen doo	r KWR						
EC (veld)	μS/cm	984	511	684	404	664	354	481	356	<1250		
pH (veld)	-	7,47	6,74	7,21	7,2	7,38	7,12	7,26	7,03	>7; <9,5		
рН (lab)	-	7,2	7,1	7,5	7,5	7,5	7,4	7,4	7,4	>7; <9,5		
Temperatuur (veld)	°C	12	10,5	11,8	10,7	11,4	10,4	11,8	11,7	< 25		
Temperatuur (lab)	°C	20	20,4	20	20,5	20	20,5	20	20,5	< 25		
$O_2$ (veld)	mg/L	0,36	0,56	0,18	0,42	0,21	0,54	0,17	0,54	>2		
Alkaliniteit (lab)	mg CaCO <sub>3</sub> /L	275	265	185	165	190	160	165	160	> 49		
Metingen door Aqualab Zuid												
NH.	ma/LNH.	11	12	0.66	0.72	0.69	0.77	0.77	0.79	< 0.2		
NO <sub>2</sub>	mg/L NO <sub>3</sub>	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	< 50		
NO <sub>3</sub>	mg/L NO <sub>3</sub>	<0.01	<0,2	<0.01	<0.01	<0.01	<0,2	<0.01	<0.01	< 0.1		
o-PO, aefiltreerd	mg/L PO	0.055	<0.01	0.22	0.011	0.21	0.019	0.59	0.043	× 0,1		
SO <sub>4</sub>	mg/L SO₄	82	87	45	43	54	41	41	37	< 150		
СН	mg/L CH	0.036	0.031	0.033	0.034	0.028	0.022	0.021	0.02			
Cl	mg/L	0,000	49	.,	54	0,010	31		7,9	< 150		
	тс	DC & DOC bepal	ing door DO	C-Labor (29/11/	2018; Bijlage	IV) en KWR (14/1,	/2019)					
TOC (totaal organisch stof)	mg C/L	4,5	3,7	4,7	2,4	10	6,4	6,3	5,0			
DOC (opgelost organisch stof)	mg C/L	3,9	3,9	3,6	3,2	8,7	4,5	5,5	5,0			
- HOC (hydrofoob DOC)	mg C/L	0,3		0,2		0,4		0,5				
- CDOC (hydrofiel DOC)	mg C/L	3,6		3,5		8,3		5,1				
• BP (Biopolymeren)	mg C/L	0,1		0,5		2,5		1,1				
• HS (Humic)	mg C/L	2,5		2,2		4,7		3,2				
ICP-MS metingen door K	WR (29/11/20	018) / Bureau Ve	eritas (29/11	/2018 en 14/1/	2019): macro	parameters en pa	rameters in	het Drinkwater	besluit (2018	5)		
Br	µg∕l	- / 78	- / 75	- / 68	- / 67	- / 50	- / 43	- / 20	- / 20			
Cl	mg/L	- / 42	- / 42	- / 47	- / 45	- / 25	- / 26	- / 6	- / 7	< 150		
Na	mg/l	20,0 / 23,8	- / 19,9	33,2 / 38,6	- / 28,9	59,0 / 69,6	- / 35,5	17,9 / 22,4	- / 23,5	< 150		
Са	mg/l	8,9 / 131	- / 131	5,0 / 74	- / 77	3,5 / 49	- / 61	4,1 / 64	- / 61			
Κ	mg/l	1,7 / 1,8	- / 1,5	1,5 / 1,8	- / 1,3	1,5 / 1,5	- / 1,4	1,0 / 1,1	- / 1,0			
Mg	mg/l	13,1 / 13,9	- / 13,5	9,4 / 10,0	-/10,5	5,7 / 6,5	- / 6,8	4,9 / 5,7	- / 5,1			
Hardheid (Ca+Mg)	mmol/L	<mark>0,8</mark> / 3,8	- / 3,8	0,5 / 2,3	-/2,4	0,3 / <b>1,5</b>	- / 1,8	0,3 / 1,8	- / 1,7	> 1		
Si		- / 9112	- / 8617	- / 6341	- / 6358	- / 7383	- / 7701	- / 9158	- / 9535			
Fe	µg/l	9185 / 9509	- / 10167	1170 / 1197	- / 1739	2500 / 2409	- / 3510	2795 / 2856	- / 2867	< 200		
Mn	µg/l	1055 / 1089	- / 1151	455 / 459	- / 513	340 / 333	- / 456	315 / 336	- / 330	< 50		

Al	µg/l	1,4 / 2	- / 3	2,1 / 2	- / 2	2,9 / 3	- / 4	2,8/3	- / 3	< 200
As	µg∕l	45 / 52	- / 30,7	28 / 29,6	- / 20,9	19 / 20,4	- / 10,4	15 / 17,2	- / 10,1	< 10
Cd	µg/l	<0,01 / <0,05	- / <0,05	<0,01 / <0,05	- / <0,05	<0,01 / <0,05	- / <0,05	<0,01 / <0,05	- / <0,05	< 5
Си	µg/l	<0,5 / 0,6	- / 0,8	<0,5 / 0,4	- / 0,4	<0,5 / 0,4	- / 0,5	<0,5 / 0,4	- / 0,3	< 2000
Pb	µg/l	0,01 / <0,2	- / <0,2	0,01 / <0,2	- / <0,2	0,11 / <0,2	- / <0,2	0,03 / <0,2	- / <0,2	< 10
Ni	µg/l	2,9 / 2,1	- / 1	1,5 / 0,8	- / 0,5	1,6 / 0,9	- / 0,6	1,0 / 0,6	- / <0,2	< 20
Zn	µg/l	2,3 / 2,9	- / 4,4	1,4 / 1,1	- / 1,3	<0,5 / 0,8	- / 1,7	1,8 / 0,8	- / 1	< 3000
В	µg/l	19 / 22	- / 16	19 / 22	- / 13	28 / 31	- / 19	17 / 18	- / 13	< 500
Cr	µg/l	<0,5 / <0,5	- / 0,6	<0,5 / <0,5	- / <0,5	- / 0,8	- / <0,5	0,55 / 0,5	<0,5 / 0,5	< 50
Нд	µg/l	- / <0,1	- / <0,1	- / <0,1	- / <0,1	- / <0,1	- / <0,1	- / <0,1	- / <0,1	< 1
Sb	µg/l	0,07 / <0,05	- / <0,05	0,05 / <0,05	- / <0,05	0,05 / <0,05	- / <0,05	0,03 / <0,05	- / <0,05	< 5
Se	µg/l	<0,5 / <0,5	- / <0,5	<0,5 / <0,5	- / <0,5	<0,5 / <0,5	- / <0,5	<0,5 / <0,5	- / <0,5	< 10
Overige parameters berekend met metingen van KWR (29/11/2018) / Bureau Veritas (29/11/2018 en 14/1/2019)										
BEX (Stuyfzand, 2008)	meq/L	0.7/1.0	- / 0.7	0.8/1.1	- / 0.8	2.3/2.8	- / 1.4	1.0/1.3	- / 1.3	
Na:Cl (molair)	meg/L	0.7/0.9	- / 0.7	1.1/1.3	- / 1.0	3.6/4.3	- / 2.1	4.6/5.8	- 5.2	

\*Lichtgrijze cellen zijn metingen beneden de detectielimiet, oranje cellen zijn opvallende metingen.

μg/l <0,02 / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0,05 · / <0

Ag

Аи	µg∕l	- / <0,05	- / <0,05	- / <0,05	- / <0,05	- / <0,05	- / <0,05	- / <0,05	- / <0,05
Ва	µg/l	145 / 150	- / 157	105 / 109	- / 115	78 / 77	- / 84	52 / 53	- / 52,8
Ве	µg/l	<0,01 / <0,05	- / <0,05	<0,01 / <0,05	- / <0,05	0,01 / <0,05	- / <0,05	<0,01 / <0,05	- / <0,05
Ві	µg/l	<0,05 / <0,05	- / <0,05	<0,05 / <0,05	- / <0,05	<0,05 / <0,05	- / <0,05	<0,05 / <0,05	- / <0,05
Ce	µg/l	0,09 / 0,09	- / 0,16	0,06 / 0,07	- / 0,05	0,17 / 0,17	- / 0,09	0,11 / 0,11	- / 0,1
Со	µg/l	1,9 / 2,0	- / 0,7	1,0 / 1,1	- / 0,6	0,6 / 0,6	- / 0,5	0,5 / 0,6	- / 0,3
Cs	ua/l	0.02 / 0.01	- / 0.02	0.02 / 0.02	- / 0.02	0.02 / 0.01	- / 0.01	0.01 / <0.01	- / <0.01
Dv	ua/l	0.01 / 0.01	- / 0.02	0.01 / 0.01	- / <0.01	0.02 / 0.02	- / 0.01	0.01 / <0.01	- / <0.01
_, Fr	ua/l	0.01 / 0.01	- / 0.01	<0.01 / <0.01	- / <0.01	0.01 / <0.01	- / <0.01	0.01 / <0.01	- / <0.01
 Fu	µg/!	0.03 / < 0.01	- / <0.01	0.02 / < 0.01	- / <0.01	0.02 / < 0.01	- / <0.01	0.01 / <0.01	- / <0.01
Ca	µg/1	0.03 / < 0.05	- / <0.05	0.02 / < 0.05	- / <0.05	0.02 / < 0.05	- / <0.05	0.02 / <0.05	- / <0.05
Cd	µg/1		, (0.01		- / <0.01	0.02 / 0.02	, (0.01		- / 0.02
Ca	µg/1	0.17 / <0.05	/ <0.05	0.04 / <0.05	/ <0,01	0.06 / <0.05	- / <0.05	0.07 / 0.05	- / <0.05
Uf	µg/l	0,17 / <0,03	- / <0,03	0,07 / < 0,03	- / <0,03	0,00 / <0,03	- / <0.03		- / <0,03
	µg/i	0,03 / <0,02	- / <0,02		- / <0,02		- / <0,02	<0,02 / <0,02	- / <0,02
	µg/1	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
	µg/1	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
ir	µg/I	<0,01 / -	- / -	- / <0,01	- / -	<0,01 / -	- / -	<0,01 / -	- / -
La	µg/I	0,04 / 0,04	- / 0,09	0,02 / 0,03	- / 0,02	0,06 / 0,06	- / 0,03	0,04 / 0,04	- / 0,04
Li	µg/l	2,9 / 3,5	- / 3,5	1,9 / 2,2	- / 2,2	1,6 / 1,8	- / 2,1	1,7 / 2	- / 2
Lu	µg/l	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
Мо	µg/l	1,3 / 1,4	- / 0,9	2,1 / 2,3	- / 1,2	4,2 / 4,2	- / 2	2,1 / 2,4	- / 1,6
Nb	µg/l	<0,05 / 0,01	- / 0,01	<0,05 / <0,01	- / <0,01	<0,05 / <0,01	- / <0,01	<0,05 / <0,01	- / <0,01
Nd	µg/l	0,04 / 0,05	- / 0,05	0,03 / 0,03	- / 0,03	0,07 / 0,09	- / 0,03	0,04 / 0,06	- / 0,040
Os	µg/l	0,01 / -	- / -	0,01 / -	- / -	0,01 / -	- / -	0,01 / -	- / -
Pd	µg/l	0,71 / <0,01	- / <0,01	0,43 / <0,01	- / <0,01	0,28 / 0,02	- / <0,01	0,30 / <0,01	- / <0,01
Pr	µg/l	0,01 / <0,01	- / 0,01	0,01 / <0,01	- / <0,01	0,02 / 0,02	- / <0,01	0,01 / 0,01	- / <0,01
Pt	µg/l	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
Rb	µg/l	2,5 / 2,52	- / 2,27	2,7 / 2,68	- / 2,15	2,1 / 2	- / 1,72	1,5 / 1,48	- / 1,29
Re	µg/l	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	0,01 / <0,01	- / <0,01
Rh	µg/l	- / 0,02	- / 0,02	- / <0,01	- / <0,01	- / <0,01	- / <0,01	- / <0,01	- / <0,01
Ru	µg∕l	0,01 / <0,05	- / <0,05	0,01 / <0,05	- / <0,05	0,01 / <0,05	- / <0,05	<0,01 / <0,05	- / <0,05
Sc	µg/l	<1 / <1	- / <1	<1 / <1	- / <1	<1 / <1	- / <1	<1 / <1	- / <1
Sm	µg/l	0,01 / <0,02	- / <0,02	0,01 / <0,02	- / <0,02	0,02 / <0,02	- / <0,02	0,01 / <0,02	- / <0,02
Sn	µg/l	<0.05 / <0.05	- / <0.05	<0.05 / <0.05	- / <0.05	<0.05 / <0.05	- / <0.05	<0.05 / <0.05	- / <0.05
Sr	ua/l	590 / 552	- / 580	360 / 375	- / 352	240 / 220	- / 262	260 / 246	- / 241
Ta	µg/l	<0.02 / <0.02	- / <0.02	<0.02 / <0.02	- / <0.02	<0.02 / <0.02	- / <0.02	<0.02 / <0.02	- / <0.02
Th	µg/l		- / <0.01	<0.01 / <0.01	- / <0.01	<0,02 / <0,02	- / <0.01		- / <0.01
To	µg/l		- / <0.05		- / <0.05		- / <0.05		- / <0.05
Th	µg/l		- / <0.05		- / <0,05		- / <0.05		- / <0,05
Ti	µg/l	<0,1 / <0,03	- / <10	<0,1 / <0,03	- / <10	0.79 / <10	- / <10	0.63 / <10	- / <0,05
TI	µg/i		-/<10		-/<10	0,797 <10	-/<10		- / < 0.01
11 Tura	µg/i	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
1 m	µg/i	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
U	µg/I	2,1 / 2,39	- / 0,59	2,7 / 3,06	- / 1,14	3,1 / 3,13	- / 1,19	0,85 / 0,93	- / 0,34
V	µg/I	0,64 / 0,7	- / 0,8	0,77 / 0,8	- / 0,8	1,7 / 1,8	- / 1	0,96 / 1	- / 1
W	µg/I	0,18 / 0,23	- / 0,19	0,31/0,3	- / 0,35	0,51 / 0,53	- / 0,29	0,37 / 0,39	- / 0,31
Y	µg/l	0,1 / 0,09	- / 0,1	0,06 / 0,07	- / 0,05	0,11 / 0,1	- / 0,06	0,08 / 0,07	- / 0,08
Yb	µg/l	0,01 / 0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	0,01 / <0,01	- / <0,01	0,01 / <0,01	- / <0,01
Zr	µg/l	0,24 / 0,18	- / 0,13	0,15 / 0,13	- / 0,08	0,4 / 0,37	- / 0,2	0,24 / 0,21	- / 0,19
	µg/l	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
Тт	µg/l	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01
U	µg/l	2,1 / 2,39	- / 0,59	2,7 / 3,06	-/1,14	3,1 / 3,13	- / 1,19	0,85 / 0,93	- / 0,34
V	µg/l	0,64 / 0,7	- / 0,8	0,77 / 0,8	- / 0,8	1,7 / 1,8	- / 1	0,96 / 1	- / 1
W	µg/l	0,18 / 0,23	- / 0,19	0,31 / 0,3	- / 0,35	0,51 / 0,53	- / 0,29	0,37 / 0,39	- / 0,31
Y	µg/l	0,1 / 0,09	- / 0,1	0,06 / 0,07	- / 0,05	0,11 / 0,1	- / 0,06	0,08 / 0,07	- / 0,08
Yb	µg/l	0,01 / 0,01	- / <0,01	<0,01 / <0,01	- / <0,01	0,01 / <0,01	- / <0,01	0,01 / <0,01	- / <0,01
Zr	µg/l	0,24 / 0,18	- / 0,13	0,15 / 0,13	- / 0,08	0,4 / 0,37	- / 0,2	0,24 / 0,21	- / 0,19

\*Lichtgrijze cellen zijn metingen beneden de detectielimiet.

# **Bijlage IV LC-OCD analyse** grondwater 29-11-2018 (DOC-Labor)

( and the second second

DOC-Labor Dr. Hu	iber	Uctbest	ecting 1 9-11-118	482 www.doc-labor.de
LC-OCD Analyses of	of 4 Water Sam	oles	~	
Project IDs: yours / ours: Contact:	GW WKR - 1482 / I Nanda.Berg@kwn	wr_43 (A6650) water.nl		
# std.diff / # UPW: Measuring Conditions:	4 / 0 System: 015, Colu	mn: 50720 , Mobile Pha	ise: Std. x 1, Fl	ow rate: 1,0 mL/min
Sampling date: Incoming date:	29 NOV 2018 30 NOV 2018			
Measuring date: Date of Report:	30 NOV 2018 03 DEC 2018	data processing: report generation:	DiplIng. / Dr. S. Hub	A. Baiz er

Disclaimer: We guarantee the correctness of analytical data according to the actual state of science and technology. All interpretations are based on the assumption that samples are representative for a situation under investigation. We do not take responsibility for any action that is taken on the basis of our reports, irrespective of whether such action has been recommended by us or nat. Reports are treated confidentially and are property of customer. Anonymized data may be used for scientific papers if no agreements were made. Technical notes:

LC-OCD stands for "Liquid Chromatography - Organic Carbon Detection".

Separation is based on size-exclusion chromatography (SEC) followed by multidetection with organic carbon (OCD), UVabsorbance at 254 nm (UVD), and Nitrogen (OND).

All concentration values refer to mass of organic carbon (OC), or mass in organic nitrogen (ON).

Chromatograms are processed by area integration using custom software ChromCALC

In natural water samples, the acid fraction contains also humics which are automatically subtracted. Thus, acids may not be present, despite an acid peak is visible.

LC-OCD distinguishes between Natural Organic Matter (NOM) and Specific Organic Matter (SOM). NOM refers to classes of compounds (e.g. biopolymers, humics), while SOM refers to individual peaks, given as "X", followed by the retention time in minutes. SOM is often of technical origin but may also be natural (e.g. amino acids). Urea stands between NOM and SOM.

#### SUMMARIC DATA:

DOC (Dissolved OC): Organic Carbon (OC) value obtained column in bypass line after In-line 0.45µm filtration.

HOC (Hydrophobic DOC): OC value obtained by difference DOC minus CDOC = OC adsorbed on column.

CDOC (Chromatographic DOC): OC value obtained by area integration of the total chromatogram.

SUVA (SAC/DOC): Additional parameter derived from the ratio of SAC and DOC (bypass line).

#### CHROMATOGRAPHIC DATA:

Inorganic Colloids (UV-detection): Inorganic colloidal matter eluting just before the biopolymer fraction. Includes amorphous silica, Fe/Al oxidhydrates and colloidal sulfur.

Nitrate/Ammonium: Measured with OND at high sensitivity. Nitrate elutes quite early and may appear as a double peak (as samples are measured non-buffered). Ammonium elutes late (ionic attraction of cations to anionic column material).

#### NOM (Natural Organic Matter):

Biopolymors (BP): High in molecular weight (> 100,000 g/mol), hydrophilic, not UV-absorbing, responds to OND, includes polysaccharides and proteinic matter (quantified by OND). Found only in surface waters. The HMW sub-fraction of BP, called cTEP (colloidal Transparent Exopolymer Particles) is assumed to be responsible for membrane fouling (UF, RO).

Humics (HS): Quantification for HS is based on retention time, peak shape and SAC/OC ratio. Calibration of molar masses is based on "Suwannee River" Standard IHSS-FA and IHSS-HA. Data for molecular mass [Mn] and aromaticity (HS-SAC/HS-OC) are shown in HS-Diagram (for expl. see S.A. Huber, A. Bolz, M. Abert, W. Pronk, Water Research 2011, 45, 879-885).

Building Blocks (BB): Ass med breakdown products of HS with molecular weights of 300-500 g/mol. Cannot be removed by flocculation. Also, di- and triprotic acids (oxalic, citric) appear in this fraction.

LIMW Organic Acids (LIMWOA): All alighatic LMW monoprotic acids elute here prematurely due to anionic regulation icolumn is weakly anionic). A small amount of HS co-elutes and is subtracted based on the SAC/OC ratio of HS-peak

LMW Neutrals (LMWN): A complex fraction dominated by LMWs of weakly, or uncharged hydrophilic, or slightly hydrophobic ("amphiphilic") compounds which slowly approach baseline. Fraction is dominated by non-biodegradable, branched natural LMWs.

#### SOM (Specific Organic Matter):

With LC-OCD all water-soluble organic compounds can be quantified on basis of DC. Sometimes specific compounds "sit on top" of the LMW-Neutrals fraction (e.g. alcohols, sugars, aldehydes, ketones, amino acids, urea). This material is biodegradable and is classified as Specific Organic Matter (SOM) in Tables. In some cases, suggestions for identification are given and are listed in the report tables.

~	-		-	
	u	-	•	
			-	

w.doc-labor.de

Results NON = Natural SON = Specific LSW = log mol	Organic Organic Acutar w	Mutter Mutter stight	*1	(= «L0 n.= net	noosu	ștăți red	14.00	Giraty co	iour in le grees	HOC: I	ing dicasta that all any	vectory A to the B	Capet yorker	hacture	orignat	na thurs y	rotains	ĩ		
eTEP = celloida Tabio 1	Tramp	drent Exc	spolymer	Participe	ine	nbrain	fouring p	kitential	8-8 p	pb C: i	ow 5-20 p	pB-C: mod	eratia > 25	ppb-C:	Righ					
D-0-C			-			_		-			NCM		_		_			-		-
	Ĩ	HOCT	cooc -	- 36 -	1	-		nest Mat	1	10	Anumaticity	Mul. Westger	Particula	Rating Roots	1 1.10WA	-	HOX	HR."	Sac.	-
Project. Inc.,43	Deather (wh-6	Hotopick April 6	Hydraphi, Aph-G	1984			S Atlant	(IRI) Delege	, the g	-	(5.7%-H3) 6.8%(%)	2009 genus	Hi-ciger	ant-t	188-0	44-C	-	-	-	-
LINE-MADINE EN MOV UNITE	8825	387	3586	10		-	-	2019		1.01	1.00	181		415	41	486	41	***	- 620	8,0
LINE 40227 21 MOV 2010	8079 1005	388 6,255	3468 66,7%	847 14,8%	-	8.62	1	2388	-	-	3.42	883	÷.	318	-	309 8.7%	+1	-	-	-
LINE 460322 AD MOV 2018	8077	288	4019 80.8%	3483	-	841	-	4005 14,15	*	1.6	4,10	487	-	304 8.25	-1	525	12	-	-	
LINE 40330 30 MOV 2818	1005	463	3894	1000		11	-	3136		1.63	4.87		0	454	*1	200	45	424	1.81	-

· LMC-60330 - Foller 24-26 09.30 40 1202 . LINE- 66331 - Feller \$1.55 toto un 19.0'C a Line- 66332 - Felter 60-62 10.30 mer 11.8'C o Line. 66333 + Fulter 42.50 11.00 00 11.00

	3	
	Dac	
	D-0-C	
DOC-Labor Dr. Huber	$\sim$	www.doc-labor.de

#### Discussion

These ground waters are very unusual.

DOC is high, in part very high, which is not unusual in areas where fossil soils are in contact with the aquifer.

Waters are free in nitrate but contain ammonium. This is not unusual and reflects reducing environments.

Humics are high in molecular weight, which is not unusual for fossile soils. Flocculation (if planned) would be very efficient in removing DOC.

Very unusual is the presence of "biopolymers"! These are extremely high in some samples. In groundwaters biopolymers should not be present, or only present in traces. In addition, natural "Biopolymers" contain nitrogen (proteins) which is not the case here. In addition, "biopolymers" normally elute earlier, the "biopolymers" found are only in the range of 5000-10000 daltons.

We therefore assume that the "biopolymers" are in fact synthetic polymers which are not part of the natural water, perhaps these originate from organic additives used to construct the wells? (e.g. polyphosphonates?).

End of report



Fig. 1: LC-OCD Chromatograms

4

96

![](_page_97_Figure_3.jpeg)

Fig. 2: HS-Diagram

# Bijlage V Korrelgrootteverdeling van sediment (VU Amsterdam en LMA cv Sleeuwijk)

## V.1 Sedimentkern S1 (25-25.82 m-mv)

![](_page_98_Figure_4.jpeg)

# V.2 Sedimentkern S2 (42-42.86 m-mv)

![](_page_99_Figure_3.jpeg)

# Bijlage VI Chemische samenstelling sediment

	Eenheid	Sedimentk	(ern 1 (S1)	Sedimentkern 2 (S2)			
Diepte	m-mv	25 - 2	25,82	42 - 42,86			
TGA &	CNS (VU /	Amsterdar	n)				
Monster		1	2	1	2		
Vocht	%	0.066	0.042	0.326	0.183		
ОМ (330°C)	%	0.103	0.097	0.439	0.352		
ОМ (550°С)	%	0.279	0.284	1.279	1.204		
CaCO <sub>3</sub>	%	0.309	0.329	15.18	15.07		
%C	%	0.053	0.053	0.264	0.276		
%N	%	0.006	0.008	0.012	0.013		
%S	%	<mark>0</mark>	<mark>0</mark>	<mark>0</mark>	<mark>0</mark>		
	XRF						
Laboratorium		VU	LMA	VU	LMA		
$AI_2O_3$	%	2.608	2.78	5.779	5.26		
ВаО	%	0.024	0.04	0.029	0.05		
CaO	%	0.180	0.2	8.383	7.58		
CoO	%		<0.02		<0.02		
$Cr_2O_3$	%		<0.02		<0.02		
CuO	%		0.03		0.02		
$Fe_2O_3$	%	0.487	0.58	2.349	2.24		
K <sub>2</sub> O	%	1.033	1.04	1.560	1.42		
MgO	%	0.173	0.2	1.340	1.23		
$MnO(VU) / Mn_3O_4(LMA)$	%	0.006	0.03	0.068	0.08		
MoO₃	%		0.03		0.02		
Na <sub>2</sub> O	%	0.413	0.5	0.775	0.74		
$Nb_2O_5$	%		<0.02		<0.02		
NiO	%		<0.02		<0.02		
$P_2O_5$	%	0.021	0.02	0.080	0.08		
PbO	%		<0.02		<0.02		
SO₃	%		<0.02		0.24		
SiO <sub>2</sub>	%	92.566	93.67	77.255	71.93		
SnO <sub>2</sub>	%		<0.02		<0.02		
SrO	%		<0.02		0.02		
$Ta_2O_5$	%		<0.02		<0.02		
TiO <sub>2</sub>	%	0.075	0.08	0.350	0.32		
$V_2O_5$	%		<0.02		<0.02		
WO <sub>3</sub>	%		0.02		0.02		
ZnO	%		<0.02		<0.02		
ZrO <sub>2</sub>	%		<0.02		0.04		

## VI.1 Overzicht van chemische samenstelling sediment

Faculteit der / Resultate	open	Labo	ratori vrije	um Se	diment	tanaly: amstei	se rdam		ŧ			
Projectinden	tificat	tienummer	1997			Projec	tnaan	КИ	VR	_	-	
Aanvrager		N. Berg			Veld	werk	gebied	N.)	V.T			
Afdeling		Extern				A	nalist	Ha	igen, M	1		
Monsternr. Se	rie nr.	Veldcode		1	% Koo	lstof		% Stik	stof	3	% Zwa	ivel
-				a	b	gem	a	b	gem	a	b	gem
200058	1	LMC-74018		0.264	0.276	0.27	0.0122	0.0133	0.013	0.000	0.000	0.00
200059	2	LMC-71137		0.053	0.053	0.05	0.0060	0.0081	0.007	0.000	0.000	0.00
Standaardafw	ijking	Koolstof:	0.006	(n=	2)							
Standaardafw	ijking	Stikstof:	0.0012	(n=	2)							
Standaardafw	ijking	Zwavel:	0.000	(n=	2)							

In the case of publication of data from this report authors are kindly requested:

-To include in the acknowledgements: the name of the analyst and the following sentence:

- Facilities for .... analyses were provided by the Vrije Universiteit Amsterdam.
- -To consider offering a co- authorship to the analyst in case of substantial contributions.
- -To send one copy to M.Hagen for the archive of the Laboratory of Sedimentanalyses.

Text Id	LMC-71137-GROND
Sample Id	Sediment kern 2
C Origin	Bodemmonster
Sampled Date	13-02-2019 10:00:00

Text id	LMC-74018-GROND
Sample 1d	Sediment kern 1
C Origin	Bodemmonster
Sampled Date	15-01-2019 11:00:00

# **Bijlage VII Resultaten experimenten: Chemie en ATP en SSRC**

De resultaten van de experimenten m.b.t. de chemie, ATP, en SSRC zijn opgenomen in de tabellen op de volgende pagina's. In deze tabellen zijn verschillende kleuren opgenomen met een bepaalde betekenis:

Lichtgrijze vakken : Oranje vakken : Rode tekst: Concentratie is gemeten beneden de detectielimiet; Opvallend resultaat; Concentratie voldoet niet aan de norm van het drinkwaterbesluit (DWB).

# VII.1 Experiment 1: S2 (42 - 42,86 m-mv) en GW3 (40 - 42 m-mv)

		1== , =																										
	Temperatuur		GW3- Referentie		T =	5°C			T = 1	I 1ºC			T = 2	23°C			Τ=	40°C		T = 60°C				T = 85°C				DWB
	Tijdstap		t = 0	t = 1	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	
ĺ	Parameter	Fonhoid		uui	WK	WK	WK	uui	WK	WK	WK.	uui	WK	WK	WK	uui	WK	WK		uui	WK		WK	uui	WK	W K	WK	
	rarameter	Lenneid										Metinge	n KWR															
	nH (lah)	_	74	78	7 0	7 9	7 8	8.0	76	77	76		7.8	78	78	<u>8</u> 1	77	7 0	83	79	77	78	73	80	7 /	7 /	7.6	<u>&gt;7'∠05</u>
	Temperatuur	۰ <u>۲</u>	10.4	7.0	7.5	7.9	11	11	11	11	11	23	7.0	7.0	11	40	40	40	11	60	60	60	11	85	7. <del>4</del> 85	7. <del>4</del> 85	11	~ 25
	Analysetemperatuur	د •د	20.5	20.4	20.5	20.7	10.4	21	20.3	21	10.6	207	20.5	20.5	20.1	21 1	20.4	20.6	20	20.8	20.5	21.4	20.2	20.8	20.8	21	20	< 2J
	Anurysetemperatuur		20,5	165	20.3	160	205	165	20.5	155	200	160	20.3	20.3	170	160	140	20.0	150	20.0	20.3	175	675	125	20.8	415	20	> 10
	Aikuimiteit	mg C/L	100 6.4	2.0	2 2	2 2	203	2 4	3.0	24	290	2 1	103	2 4	170	2 /	2 7	143	27	34	10	173	20	133	273	413	523	> 49
	DOC (orgalast organisch stof)	mg C/L	0,4	2.0	2.2	2.2 7 C	2.0	2.4	3.0	2.4	2.0	2.1	7.2	2.4	4.9	2.1	رد د د	4.J 2 E	J.7 4 1	2.4	20	23	10	4.0	25	22	54 64	
	DOC (opgelost organisch stof)	nig C/L	4,5	5.2	5.5	2.7	5.0	5.5	2.0	2.5	D.9 Moti		5./ ualah <b>7</b> :	2.9	2.1	5.1	5.2	5.5	4.1	5.2	20	25	19	5.5	20	22	04	
	NH		0.77	1 1	1.0	1 1	0.47	1.0	0.08	0.97	0 E 2	ngen Aq			0.26	11	1.1	1.0	0.25	1.2	0.085	14	1.4	1 2	17	1.0	1 0	< 0.2
	NH4 NO	mg/LN⊓₄	0,77	1.1	1.U	1.1	0,47	1,0 <0.2	0.90 <0.2	0.07	0,32	-0.2	0.40	0.00	0,20	1,1 <0.2	-0.2	1.0	0,55	1, <b>2</b>	0.083 <0.2	1.4	1,4	<b>1,2</b>	-0.2	1.0	1,0	< 0,2
	NO3	mg/LNO₃	<0,2	<0,2	<0,2	-	-	<0,2	<0,2	-	-	<0,2	<0,2	-	-	<0,2	<0,2	-	-	<0,2	<0,2	-	-	<0,2	<0,2	-	-	< 50
	nV <sub>2</sub>	mg/L NO <sub>2</sub>	<0,01	0.025	<0,01	<0,01	<0,01	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	0.020	<0,01	<0,01	<0,01	0,057	<0,01	<0,01	<0,01	0,059	<0,01	<0,01	<0,01	0,015	<0,01	<0,01	<0,01	< 0,1
	0-PO₄, gejiitreera	mg/L PO₄	0,019	0.024	0.02	0.02	0.015	0.022	0.014	100	0.015	0.020	0.028	0.017	110	0.041	0.017	0.016	0.017	0.021	0.029	0.055	0.018	0.05	0.20	0.0	0.047	. 150
	30 <sub>4</sub>	mg/L SU₄	41	45	45	49	210	44	10 02	100	210	44	44	54	110	44	14	75	270	44	250	400	550	44	200	100	290	< 150
	CH₄	mg/L CH₄	0,022	<0,02	<0,02	-	-	<0,02	<0,02	- 20	-	<0,02	<0,02	-	- 20	<0,02	<0,02	-	-	<0,02	<0,02	-	-	<0,02	<0,02	- 50	-	. 150
	Ci	mg/1	51	29	29	29	30	29	29	29	37	29	29	29	39	29	29	29	30	29	110	88	22	29	66	52	40	< 150
	Metingen Microbiologie       ΔTP     pg/g     123     640     194     2500     140     1100     48     977     240     380     3     <6     <2																											
	AIP	pg/g	2 20			040	194			2300	0.4			0.2	40			977	240			20.00	-0.4			< <u>0</u>	<0.4	
	SSRC	ciu/g	5.29			0.0	2			0.4	0.4			0.2	U.O	luunteuk	haaluit (	0.4	0.0			<0.28	<0.4			0.2	<0.4	
	Metingen Bureau Veritas: macroparameters en parameters in het Drinkwaterbesluit (2018)																											
	Br	µg/1	45	42	45 25		100	45	42	21	100	40	44	40	155	42	45	52	100	41	102	142	115	24	120	142	*	. 150
		mg/L	26	26	25	25	53	24	24	25	54	24	24	23	36	25	25	26	34 50.0	20	55	34	34 00 F	28	35	40	200	< 150
	Na Ga	mg/l	35,5	51,0	51,4	51,4	52,9	55,9	51,4	51,7	54,8	51,4	51,5	51,9	72,6	51,2	51,2	51,9	59,0	51,7	04,8	95,7	96,5	51,2	115,5	105,5	209	< 150
	Ca	mg/l	61,2	63,1	66,0	66,2	118,5	61,7	69,6	85,6	140,1	60,6	67,3	66,0	41,0	57,8	70,8	71,0	1/1,3	59,8	136,6	202,7	208,5	53,2	146,2	91,7	336,4	
	ĸ	mg/I	1,4	3,4	2,2	3,1	13,2	3,1	3,0	3,1	13,9	3,3	2,0	2,9	16,7	3,5	2,7	3,0	15,2	3,4	13,4	17,7	16,7	4,1	14,3	11,6	31	
	Mg	mg/I	6,8	5,9	5,9	5,8	15,7	5,9	6,0	6,9	17,6	5,7	5,9	5,7	9,7	5,5	5,9	5,8	20,2	5,8	10,9	16,2	16,9	5,4	4,0	1,3	11	_
	Haraneia	mmol/L	1,81	1,82	1,89	1,89	3,60	1,78	1,98	2,42	4,22	1,75	1,92	1,99	1,42	1,67	2,01	2,01	5,11	1,73	3,86	5,72	5,90	1,55	3,81	2,34	8,85	>1
	51	µg/I	7701	6896	6270	4470	5458	6924	2826	1800	6881	6128	/555	4900	3433	6965	2770	3363	8595	/160	1,8 E*	1,9 E*	7468	6541	6,I E*	6,6 E*	10000	200
	Fe	µg/I	3510	63	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	55	50	661	<10	84	<10	<10	<10	110	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10000	< 200
	Mn	µg/I	455,6	228,8	201,3	126,5	158,9	186,6	154,5	290,1	218,7	155,8	216,3	155,2	37,7	141,3	356,4	222,4	347,2	144,0	1034	736,5	848,7	83,2	625,6	277,2	1295	< 50
	Al	µg/I	4	13	3	3	9	9	3	2	8		3	276	32	16	3	4	8	24	9		13	21	19	26	<600	< 200
	As	µg/I	10,4	7,8	4,6	3,3	2,6	/,/	2,2	1,4	2	7,5	3,7	2,1	1,2	9,5	1,8	2,6	1,9	10,7	3,2	4,5	2,2	11,7	31,7	68,7	<3000	< 10
	Ca	µg/I	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	00</td <td>&lt; 5</td>	< 5
	Cu	µg/I	0,5	1,6	0,6	1,2	6,1	2,4	1,1	1,2	3,5	1,6	1	2,5	10	1,9	1,5	1,7	6,1	1,8	34,3	34,8	26,8	3,1	/3,3	37,9	131	< 2000
	Pb	µg/I	<0,2	0,4	<0,2	<0,2	<0,2	0,3	<0,2	<0,2	<0,2	0,3	<0,2	0,6	0,2	0,5	<0,2	<0,2	<0,2	0,4	<0,2	<0,2	<0,2	0,6	<0,2	0,3	<4000	< 10
	Ni _	µg/I	0,6	<0,2	<0,2	<0,2	716,7	<0,2	<0,2	0,2	1306	<0,2	0,3	0,7	111,7	<0,2	<0,2	<0,2	1923	<0,2	396,4	428,1	990,5	<0,2	271,2	172,6	/009	< 20
	Zn	µg/I	1,7	1,6	0,7	0,7	3,3	1,6	0,7	1	2	2,1	0,6	3,5	1,9	2,4	0,8	1,2	2,9	1,9	4,2	2,9	2,7	1,9	2,4	1,4	<300	< 3000
	В	µg/I	19	35	23	134	1,4 E <sup>4</sup>	20	53	35	1,6 E⁴	45	25	22	2,6 E⁴	68	30	29	1,9 E⁴	27	2,8 E <sup>4</sup>	5,6 E⁴	5,8 E⁴	48	1,0 E <sup>s</sup>	1,9 E <sup>s</sup>	3,0 E <sup>s</sup>	< 500
	Cr	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,8	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,5	2	<300	< 50
	Hg	µg/I	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	2005	< 1
	Sb	µg/l	<0,05	0,29	0,23	0,45	4,56	0,34	1,75	1,66	2,69	0,27	0,37	0,42	1,38	0,32	1,31	0,90	2,88	0,37	0,76	0,87	1,59	0,48	2,41	2,44	<2000	< 5
	Se	µg/l	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,5	<0,5	<0,5	<0,5	3,4	<0,5	<0,5	<0,5	2,1	<0,5	<0,5	<0,5	4,2	<0,5	4,4	5,7	3,6	<0,5	21,3	11,4	*	< 10
*	Resultaat kon niet word	on acaonoroor	d door Rurea	u Verita	as door	to vool i	ntorfor	ontio m	ot ando	re nara	motors																	

Resultaat kon niet worden gegenereerd door Bureau Veritas door te veel interferentie met andere parameters.

103

	Temperatuur		GW3- Referentie		T =	5°C			T = 1	11°C			T = 2	23°C			T = 4	40°C			T = 6	50°C			T =	= 85°C	
	Tijdstap		t = 0	t = 1 uur	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1 uur	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1 uur	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1 uur	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1 uur	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk	t = 1 uur	t = 1 wk	t = 2 wk	t = 4 wk
	Parameter	Eenheid																									
	Metingen Bureau Veritas: microparameters die niet zijn opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018)																										
	Ag	µg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,3	0,57	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<100
	Аи	µg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,26	0,4	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<500
	Ва	µg/l	84,1	78,9	86,0	90,5	72,0	86,0	98,5	113,4	72,8	74,6	90,4	82,4	52,8	70,7	82,7	86,2	78,2	77,2	75,0	97,2	96,7	73,8	99,1	119,9	140
	Ве	µg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**
	Ві	µg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<3000
	Се	µg/l	0,09	0,33	0,04	0,05	<0,01	0,19	0,03	0,02	<0,01	0,22	0,06	0,68	0,02	0,28	0,02	0,09	<0,01	0,26	0,05	0,01	<0,01	0,63	0,12	0,38	**
	Со	µg/l	0,46	0,07	0,05	0,11	1085	0,07	0,26	0,5	2602	0,06	0,13	0,38	220,4	0,09	0,32	0,14	4687	0,07	511,9	671,3	2289	0,06	188,5	85,4	8978
	Cs	µg/l	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,06	0,05	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,06	0,06	0,06	0,02	0,06	0,03	**
	Dy	µg/l	0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,06	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,02	0,03	**
	Er	µg/I	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	××
	Eu	µg/I	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,01	<0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	X X 4-4
	Ga	µg/1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,1	0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,1	**
	Gu	µg/i	0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,07	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,02	0,04	**
	Ge Hf	μg/1 μg/l	<0,05	<0,03	<0,05	<0,05	0,00	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	0,05	<0,03	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,00	<0,05	0,09	0,11	0,07	<0,05	0,51	0,10	**
	Ho	μg/1 μg/l	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0.01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	**
	In	µg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0.01	<0,01	<0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0.01	<0,01	<0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0.01	<0.01	<0.01	**
	la la	μg/1 μα/Ι	0.03	0.16	0.02	0.02	<0.01	0.08	0.01	<0.01	<0.01	0.1	0.02	0.3	<0.01	0.12	0.01	0.04	<0.01	0.12	0.03	0.01	<0.01	0.25	0.05	0.17	<200
	Li	ua/l	2.1	3.3	3.1	4.1	27.9	2.7	3.3	3.3	32.1	3.4	3.5	3.5	34.2	3.3	3.8	3.9	40.7	3.6	31.5	50	49.3	3.8	53	56.8	<1000
	 	ua/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	**
	Мо	µg/l	2	4,6	4,3	8,6	108,7	3,8	14,3	17,2	76,2	4,7	6,8	8,2	348,9	4,3	14	13,9	88,6	4,6	83,6	114,7	176,5	6	154,2	167,4	<300
	Nb	μg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,46	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,08	**
	Nd	µg/l	0,03	0,16	0,03	0,02	<0,01	0,09	<0,01	0,01	<0,01	0,12	0,02	0,34	<0,01	0,16	<0,01	0,04	<0,01	0,14	0,03	<0,01	<0,01	0,31	0,06	0,18	**
	Pd	µg/l	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,04	<0,01	0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,06	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,07	0,05	0,08	<0,01	0,07	0,08	**
	Pr	µg/l	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,01	0,08	<0,01	0,04	<0,01	0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	0,07	0,01	0,04	**
	Pt	µg∕l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	**
	Rb	µg/l	1,72	1,9	1,74	2,44	8,37	2,17	2,78	2,81	8,83	2,09	1,47	2,44	11,79	2,02	3,05	2,27	9,14	2,21	13,24	15,89	14,86	2,58	13	8,01	**
	Re	µg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3,76	<0,01	<0,01	<0,01	0,54	<0,01	<0,01	<0,01	5,25	<0,01	0,01	<0,01	0,4	<0,01	0,57	2,36	4,75	<0,01	0,87	0,54	**
	Rh	µg∕l	<0,01	0,01	<0,01	0,01	0,02	<0,01	0,01	0,01	0,03	<0,01	0,02	0,01	0,01	<0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	**
	Ru	µg/l	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,32	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	**
	Sc	µg/l	<1	<1	<1	<1	1	<1	<1	<1	2	<1	1	<1	1	<1	<1	<1	2	<1	4	3	2	<1	9	11	**
	Sr	µg/l	261,6	277,5	272,2	270,6	546,2	270,2	279,6	338,9	567,9	253,9	282,2	280,8	256,9	233,8	263,7	285,3	688,6	262,6	502,8	716,9	698,7	232,4	587,9	414,1	1136
	Sm	µg/l	<0,02	0,04	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	0,1	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	0,05	<0,02	0,03	**
	Sn	µg/I	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,09	<0,05	<0,05	××
	la Ti	µg/I	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	**
	16	µg/I	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	× × 4-4
	le Th	µg/I	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	××
	in Ti	µg/1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	<500
	11 T/	µg/1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	14	17	<100
	11	µg/i	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	0,04	0,04	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	**
	1 m	µg/i	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	< 0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<2000
	U	µg/1	1,19	1,21	1,07	1,45	2,24	1,25	1,95	2,00	0,71	1,09	0,00	0,90	0,09	0,00	1,59	0,95	0,07	0,65	2,05 1 2	3,19	0,07	0,72	2,00	126	<200
	V 14/	µg/1 µg/l	0.20	0.36	0,8	035	0.26	0.31	0,9	0,3	0.46	0.43	0,9	0.1.8	0.17	0.47	0,8	0,0	0,3	0.52	0.67	0.50	1.03	0.68	1 9 1	4 04	<200
	V	на/I	0,29	0,50	0,00	0,03	0.01	0.05	0.02	0.02	0,40	0.07	0.03	0.31	0.01	0.08	0.02	0.03	0.03	0.07	0.05	0.03	0.03	0.16	0.11	0.17	×*
	Yh	ug/l	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	0.02	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	**
	 7r	ug/l	0.2	0.05	0.02	< 0.02	< 0.02	0.05	< 0.02	<0.02	0 1 1	0.03	0.02	0.14	0.02	0.06	< 0.02	< 0.02	0.15	0.02	0.05	0.04	0.04	0.07	0.16	0.64	**
	<b>_</b> ,	F-3/ -	0,2	-,	.,	, . L	, . L	2,00	, J L	, . L	•,••		5,52	æ,	5,52	0,00	, . L	, J L	-,. J		2,35	, <b>.</b> .	.,	2,31	2,10	.,	

\*\* Resultaat kon niet worden gegenereerd door Bureau Veritas door te veel interferentie met andere parameters.

# VII.2 Experiment 2: S1 (25 - 25,82 m-mv) en GW1 (24 - 26 m-mv)

Temperatuur		GW1- Referentie		T =	5°C			T = 1	I 1ºC			T = 2	23°C			T = 4	40°C			T = (	60°C			T =	85°C		DWB
Tiidstap		t = 0	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	
- J			uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	
Parameter	Eenheid										Moting	n KWD															
nH (lah)	-	71	76	7.6	74	82	76	76	78	78	7 5	7 5	76	79	76	79	77	8.0	78	79	73	78	7.8	78	75	77	>7' <9 5
Temperatuur	°C	10,5	5	5	5	11	11	11	11	11	23	23	23	11	40	40	40	11	60	60	60	11	85	85	85	11	< 25
Analysetemperatuur	°C	20,4	19.9	20.7	19.1	19.5	20.0	20.7	19.2	19.2	20.1	20.7	19.1	19.4	20.3	20.7	19.2	19.2	20.4	20.5	19.7	19.4	20.5	20.7	19.7	19.6	
Alkaliniteit	mg CaCO₃/L	265	240	230	230	145	240	225	180	180	240	205	170	230	240	170	130	120	235	150	145	160	235	67	38	71	> 49
TOC (totaal organisch stof)	mg C/L	3,7	4.1	4.0	3.4	2.8	4.0	4.3	7.4	2.1	4.2	4.5	7.4	4.0	4.2	7.5	8.2	4.4	4.4	14	17	12	4.8	27	37	24	
DOC (opgelost organisch stof)	mg C/L	3,9	4.1	4.0	3.4	3.2	3.9	4.2	5.0	2.3	3.9	4.4	4.3	4.3	4.3	7.1	6.9	4.9	4.5	13	16	13	4.9	27	36	24	
	<i></i>									Meti	ngen Ao	qualab Z	Luid														
NH₄	mg/L NH₄	1,2	,    .0 2	1.0	0.88	0.53	1,1	0.77	0.62	0.42	1,2	0.50	0.076	0.27	1,2	0.48	<0,03	0.11	1,2	0.72	0.70	0.57	1,2	1.5	1.4	1.0	< 0,2
NO₃ NO	mg/LNO₃	<0,2	<0,2	<0,2	-	- <0.01	<0,2	<0,2	-	-	<0,2	<0,2	- 0.1	-	<0,2	<0,2	-	-	<0,2	<0,2	-	- 0.01	<0,2	<0,2	-	- -0.01	< 50
o-PO, apfiltreerd	mg/L NO2	<0.01	0.026	0.021	0.023	0.014	0.028	<0.01	0.046	0.024	0.024	0.02	0.13	<0.01	0.032	0.25	0.16	0.022	0.046	0.29	0.042	0.01	0.064	0.68	26	0.022	< 0,1
SO4	mg/L I O₄ mg/L SO₄	87	88	100	120	53	90	130	160	150	90	130	160	140	91	150	200	190	90	140	330	260	90	180	250	270	< 150
CH <sub>4</sub>	mg/L CH₄	0,031	<0,02	<0,02	-		<0,02	<0,02	-	-	<0,02	<0,02	-	-	<0,02	<0,02	-	-	<0,02	<0,02			<0,02	<0,02	-	-	
CI	mg/l	49	48	49	51	59	48	57	58	52	48	49	54	59	48	51	53	53	48	70	60	71	49	75	82	72	< 150
Metingen Microbiologie																											
ATP	pg/g	937	480		360	320	520		240	176	400		820	68	320		980	164	186		116	<2	32		<2	<2	
SSRC	cfu/g	54	80		54	0.44	70		74	0.048	26		28	0.066	16		42	0.066	10		0.4	60	48		<0.05	<0.066	
	"			100		Meting	en Bure	au Verit	as: mac	roparam	eters ei	1 param	eters in	het Dri	nkwater	besluit (	2018)				105	105					
Br	µg/l	/5	76	106	120	207	/3	183	52	140	20	114	150	186	83	100	126	118	80	99 41	185	185	81	115	132	167	. 150
	mg/l	42	40	40	47	54 76 0	38 20.4	23 420	52	12 5	20.6	40 27.8	36.4	57 80.2	38 20 6	42 28.8	44 27 8	43 57.6	39	41 32.4	100.5	145.2	40 20.0	43	45 67.8	5U 87 3	< 150
Ca	mg/l	130.7	124.0	123.5	122.7	36.1	124.7	110 5	103.6	97.5	125.9	121.3	110.2	91.0	124.4	1103	1114	84 7	125.8	108.3	129.0	62 7	123.1	88.4	88.7	92.8	< 130
K	mg/l	1.5	1.9	3.8	4.4	15.8	1.9	11.7	12.2	7.8	2.0	5.3	12.4	17.8	2.1	6.6	8.0	8.8	2.2	6.1	18.9	20.2	2.2	13.3	19.4	16.6	
Мд	mg/l	13.5	13.2	13.6	14.2	6.3	13.6	14.4	14.0	13.3	13.2	13.4	13.5	12.7	12.9	12.2	12.4	10.9	12.9	10.3	12.3	7.9	12.7	4.1	4.5	3.9	
Hardheid	mmol/L	3,82	3,64	3,64	3,64	1,16	3,67	3,35	3,16	2,98	3,68	3,58	3,31	2,79	3,63	3,26	3,29	2,56	3,67	3,12	3,72	1,89	3,60	2,37	2,40	2,48	> 1
Si	µg∕l	8617	8106	2,3 E4	1,6 E⁴	4647	7950	1,8 E⁴	2,1 E4	8197	8199	4,0 E⁴	3,7 E⁴	5475	7697	6,3 E⁴	4,4 E <sup>4</sup>	1,2 E⁴	7807	6,5 E4	3,9 E⁴	1,7 E⁴	7674	1,2 E⁵	1,2 E⁵	1,4 E⁴	
Fe	µg/l	10167	<10	<10	<10	<10	124	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	< 200
Mn	µg/l	1150.8	611.2	540.9	830.3	138.0	643.3	573.3	335.8	204.6	662.1	431.3	520.1	249.6	556.9	147.3	378.0	65.8	467.6	91.2	414.0	126.0	376.3	24.9	87.2	300.9	< 50
Al	µg/l	3	6	11	5	15	50	11	13	11	6	13	28	25	6	15	12	8	8	11	37	40	10	23	35	16	< 200
As	µg/I	30.7	12.2	8.8	3.2	1.3	11.9	4.4	4.8	1.8	13.3	14.2		1.2	16.5	61.1	14.8	2.2	19.9	61.8	4.2	2.8	25.7	150.5	189.4	2.8	< 10
Cu	µg/l	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03 2 Q	13.6	<0.03	2.0	0.08	<0.03 4 7	<0.03	1.6	3.2	<0.03	<0.03 0.8	×0.03 3	<0.03 4 Q	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03 62 5	26.4	<0.03 0 Q	<0.03 8.8	12 5	<0.03 40.9	< 2000
Pb	ua/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.3	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.4	<0.2	< 10
Ni	µg/l	1	2	57.6	1934	392.9	<0.2	2538	1492	2637	1.1	9.1	81.8	1265	0.8	7.1	420.5	2087	0.7	7.2	2912	2699	0.9	4.9	9.1	4065	< 20
Zn	µg/l	4.4	1.5	1.9	7.7	0.8	1.8	2.8	2.7	1.4	1.5	1.8	7.7	1.2	0.9	0.8	1.9	1	0.8	0.9	2.8	2.7	1.1	0.7	1.5	1.9	< 3000
В	µg/l	16	26	4353	5208	3,6 E⁴	42	1,8 E4	1,7 E <sup>4</sup>	2,1 E <sup>4</sup>	18	6799	1,1 E <sup>4</sup>	4,0 E <sup>4</sup>	14	1,9 E4	1,6 E4	3,6 E <sup>4</sup>	25	1,2 E4	8,1 E <sup>4</sup>	1,2 E <sup>s</sup>	23	2,9 E <sup>4</sup>	4,4 E <sup>4</sup>	5,9 E <sup>4</sup>	< 500
Cr	µg/l	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,5	<0,5	<0,5	0,6	<0,5	<0,5	<0,5	0,9	0,8	0,7	<0,5	2	3,2	0,6	< 50
Hg	µg/l	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	< 1
Sb	µg/l	<0,05	0,66	2,96	2,88	1,69	0,57	4,44	6,54	2,24	0,7	4,2	5,03	0,23	0,63	5,54	5,6	3,97	0,73	4,45	4,53	2,85	0,92	4,62	5,18	4,6	< 5
Se	µg/l	<0,5	<0,5	1,6	1,5	6,7	<0,5	4,9	3,8	4,3	<0,5	2,6	3,2	8,4	<0,5	4,9	3,9	5,2	<0,5	4	17,3	10	0,8	2,8	3,6	6,7	< 10

105

	Temperatuur		GW3- Referentie		T = 5°C			T = 11°C						T = 23°C				T = 40°C				T = 60°C				T = 85°C			
	Tiidstan		t = 0	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4	t = 1	t = 1	t = 2	t = 4		
	- Justup			uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk	uur	wk	wk	wk		
Metingen Bureau Veritas: microparameters die niet zijn opgenomen in het Drinkwaterbesluit (2018)																													
	Aa	ug/l	<0.05	<0.05	<0.05				<0.05					<0.05	<0.05	$\sim 0.05$		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.08	<0.05		
	Ay Ay	μg/1 μα/Ι	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.03	<0.05	< 0.05	<0.00	<0.05		
	Ba	µg/!	156.7	176.2	185.8	173.2	52.7	185.5	163.2	122.5	91.6	208.6	186.3	147 7	93.7	181 1	131.7	138.9	70.0	191 9	117.6	114 1	80.0	188.9	99.0	96.9	80.1		
	Ве	µg/l	<0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05	< 0.05		
	Bi	μg/l	<0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05		
	Се	µg/l	0.16	<0.01	0.02	0.01	<0.01	0.14	0.02	0.02	<0.01	0.01	0.03	0.11	<0.01	0.01	0.02	0.03	<0.01	0.01	0.02	0.09	0.05	0.01	0.21	1.62	0.03		
	Cs	µg∕l	0.02	0.03	0.07	0.06	0.16	0.04	0.15	0.12	0.09	0.03	0.05	0.05	0.12	0.03	0.05	0.04	0.08	0.03	0.07	0.18	0.2	0.04	0.27	0.2	0.2		
	Со	µg∕l	0.7	0.3	106.8	4582	897.5	0.3	6324	4181	5878	0.3	3.0	128.0	3488	0.2	1.1	840.3	4635	0.2	0.7	5662	5876	0.3	0.3	0.9	7415		
	Dy	µg∕l	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.03	0.17	<0.01		
	Er	µg/l	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.06	<0.01		
	Еи	µg∕l	<0.01	0.04	0.03	0.01	<0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.04	<0.01		
	Ga	µg∕l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	0.08	<0.05	<0.05	<0.05		
	Gd	µg∕I	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.17	<0.01		
	Ge	µg/l	<0.05	<0.05	0.09	0.15	0.09	< 0.05	0.15	0.18	0.09	<0.05	0.16	0.18	0.12	<0.05	0.29	0.26	0.11	<0.05	0.27	0.59	0.16	<0.05	0.7	0.78	0.13		
	Hf	µg/l	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	< 0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	< 0.02	<0.02	< 0.02	<0.02	< 0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	< 0.02	0.02	<0.02		
	Но	µg/I	< 0.01	< 0.01	<0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	<0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	<0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01		
	In	µg/I	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01		
	La	µg/I	0.09	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.07	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.01	0.04	0.02	<0.01	20.0	0.79	0.01		
		µg/i	5.5 <0.01	5.4	/./	10.0	00.0	5.5 <0.01	57.0	54.9 <0.01	22.9 20.01	5.0 <0.01	10.5	25.1	101.0	5.9	15.5	21.0	29 29	4.2	0.9	119.5	-0.01	4.2	20.9	52.0	57.0 <0.01		
	Eu	µg/1	<0.01	10.01	20.01	28.8	<0.01 835 3	<0.01 0.6	<0.01 66.0	51.1	<0.01 70.8	10.5	24.0	36	20.01	11.2	<0.01 20.2	45.5	<0.01 Q/	133	<0.01 33.7	1073	182	1/1 8	10.8	0.01	108.8		
	Nh	µg/l	0.9	0.01	0.02	20.0	<0.01	0.02	00.9	0.09	0.03	0.01	0.01	0.02	20.0	0.01	<0.01	45.5	0.02	<0.01	0.01	0.00	0.05	<0.01	0.01	0.04	0.05		
	Nd	μg/1 μα/Ι	0.01	< 0.01	<0.02	<0.00	<0.01	0.02	0.07	< 0.05	< 0.05	<0.01	0.07	0.02	< 0.01	<0.01	0.02	0.02	0.02	<0.01	0.01	0.05	0.03	< 0.01	0.01	0.04	0.03		
	Pd	µg/1 µg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.17	<0.05	0.02	0.03	0.01	<0.01	<0.02	<0.00	0.02	<0.01	< 0.02	0.01	<0.01	<0.01	< 0.02	<0.01	0.05	0.01	< 0.01	<0.01	<0.02		
	Pr	ua/l	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	0.02	<0.01	< 0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	< 0.01	< 0.01	0.03	0.24	< 0.01		
	Pt	ua/l	<0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01		
	Rb	µg/l	2.27	2.34	5.87	6	19.39	2.54	15.92	15.98	10.54	2.52	7.33	11.49	17.81	2.99	9.18	8.35	10.18	3.33	10.52	23.52	24.54	3.71	27.72	31.8	23.68		
	Re	μg/l	<0.01	<0.01	0.02	0.33	3.41	<0.01	0.86	0.25	2.8	<0.01	0.01	0.03	0.2	<0.01	0.02	0.23	2.09	<0.01	0.02	2.5	4.39	<0.01	0.03	0.04	1.98		
	Rh	µg/l	0.02	0.02	0.02	0.02	<0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.02	<0.01	0.02	0.01	0.01	0.01		
	Ru	µg∕l	<0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05		
	Sc	µg∕l	<1	1	4	3	1	1	5	6	2	1	5	5	2	<1	3	2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1		
	Sm	µg/l	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.21	0.02		
	Sn	µg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	0.05	< 0.05	0.07	<0.05	0.06	<0.05	< 0.05	<0.05		
	Sr	µg∕l	580.2	506.6	528.2	543.1	152.0	503.3	532.9	452.1	400.4	558.1	546.1	527.1	381.5	538.1	480.9	535.7	332.4	540.7	445.8	489.2	248.1	537.6	367.3	343.7	342.1		
	Та	µg∕I	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02		
	ТЬ	µg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01		
	Te	µg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05		
	Th	µg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.18	<0.05		
	Ti	µg/l	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	12	<10	<10	11	<10	<10	<10	10	<10	<10	<10	20	23	<10		
	ТІ -	µg/I	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	0.03	< 0.01	0.05	0.04	0.03	<0.01	0.01	0.05	< 0.01	<0.01	< 0.01	0.03	0.02	< 0.01	< 0.01	0.06	0.05	< 0.01	0.03	0.05	0.03		
	Im	µg/i	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	<0.01	<0.01	< 0.01	< 0.01	<0.01	< 0.01	<0.01	< 0.01	<0.01		
	U	μg/I	0.59	1.52	4.52	4.42	<0.02	1.31	7.99	9.82	0.98	1.35	4.99	7.34	0.02	1.36	5./I	5.85 10.9	3.15	1.6	3.75	2.61	2.27	1.89	61 7	0.27	0.93		
	V	µg/1	0.8	0.20	4.4	1.1	0.5	0.41	2.26	2.8	0.4	1.5	9.5	0.5 2 00	0.4	0.52	2 50	10.8	0.0	3.1	45.5	2.3	1.5	4.0	5 1 2	00.5			
	W v	µg/1	0.19	0.59	0.00	0.07	<0.11	0.41	0.08	0.07	0.02	0.5	0.07	0.09	0.02	0.33	0.08	0.06	4.17	0.59	0.08	9.93	0.05	0.72	0.10	0.70	0.03		
	r Vh	µg/1	<0.01	<0.03	<0.07	0.01	<0.01	0.01	<0.00	<0.07	< 0.03	<0.03	<0.07	0.03	<0.02	<0.03	<0.00	<0.00	<0.03	<0.03	<0.00	0.09	<0.03	< 0.05	0.01	0.06	<0.03		
	77	µg/l	0.13	0.08	0.2	0.17	<0.07	0.13	0.06	0.09	0.05	0.06	0.14	0.18	<0.07	0.06	0.19	0.15	0.03	0.05	0.18	0.19	0.21	0.04	0.27	0.81	0.01		
	<b>L</b> 1	r-5/ '	0.15	0.00	0.2			0.10	0.00	0.00	0.05	0.00		0.10		0.00	0.15	0.10	0.00	0.00	0.10	0.15		0.01		0.01	0.25		

# **Bijlage VIII DNA-extracties**

Monster	Gewicht	Volume	Temperatuur	Tijdstip	DNA
	Sealment	grondwater	ەر		na /ul
-	gram	IIIL		ZIE 5.2.2	ng/µi
51	5,0				0.73
51	4,9				0.357
SI	4,9				0.358
51	5,0				0.408
S1+GW1	4,9	10		t0	0.44
<i>S1+GW1</i>	5,0	10		t0	0.311
S1+GW1	5,1	10		t0	0.294
S1+GW1	4,9	10	5	t2	0.72
S1+GW1	4,9	10	5	t3	0.656
S1+GW1	4,9	10	5-11	t4	1.07
S1+GW1	5,1	10	11	t2	0.888
S1+GW1	4,9	10	11	t3	0.468
S1+GW1	4,9	10	11	t4	0.812
S1+GW1	5,0	10	23	t2	0.544
S1+GW1	5,1	10	23	t3	0.0216
S1+GW1	5,1	10	23-11	t4	0.0716
S1+GW1	5,0	10	40	t2	0.0376
S1+GW1	4,9	10	40	t3	-
S1+GW1	4,9	10	40-11	t4	0.864
S1+GW1	4,9	10	60	t2	0.251
S1+GW1	5,0	10	60	t3	0.21
S1+GW1	5,0	10	60-11	t4	0.216
S1+GW1	4,9	10	85	t2	-
S1+GW1	5,0	10	85	t3	-
S1+GW1	5,0	10	85-11	t4	-
S2+GW3	4,9	10	11	t3	0.0268
S2+GW3	5,1	10	23-11	t4	0.0296
S2+GW3	5,1	10	23	t3	0.096
PCRBlanco					-
ZymoCel					NA
PCRBlanco					-
ZymoDNA					NA
## Bijlage IX Relatieve abundantie van micro-organismen op klasse-niveau

De NGS profielen van de microbiële populatie van alle monsters van kern *S1*: inoculum (kern *S1* vóór incubatie), T=0 (kern *S1* na toevoeging van grondwater *GW1*) en de incubaties bij verschillende temperaturen (1,2,en 4 weken incubatie). Ook zijn de enkele monsters van kern *S2*, de PCR blanco's (B) en de mock communities (M) weergegeven.

