



Meer met Bodemenergie

Effecten op de ondergrond

Effecten van
bodemenergiesystemen op de
geochemie en biologie in
praktijk. Resultaat metingen
op pilotlocaties en labtesten



Rapport 3/4 – Effecten op de ondergrond

Effecten van bodemenergiesystemen op de geochemie en biologie in de praktijk. Resultaat metingen op pilotlocaties en labtesten

Eindrapport

Colofon

Dit is een gezamenlijk rapport van Bioclear, Deltares, IF Technology en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie.

Opdrachtgever

SKB duurzame ontwikkeling ondergrond
Postbus 420
2800 AK GOUDA
T 0182 – 54 06 90
E info@skbodem.nl
Contactpersoon: Arno Peekel

Auteurs

Inez Dinkla, Bioclear
Shakti Lieten, Bioclear
Niels Hartog, Deltares
Benno Drijver, IF Technology

Dank aan de volgende onafhankelijke wetenschappers en experts voor hun bijdrage aan de totstandkoming van dit rapport:

Hans Slenders, ARCADIS
Rachelle Verburg, ARCADIS
Mathijs Bonte, KWR
Philip Visser, KWR/ARCADIS
Patrick van Beelen, RIVM

Verder willen we graag de volgende personen bedanken voor het beschikbaar stellen van de onderzoekslocaties:

Beijum in Groningen; H. Stiekema en H. Hovink
Centrum Utrecht; A. de Vries (gemeente Utrecht)
De Bruggen in Zwammerdam; R. Teunisse en H. Stichter
Hederakwekerij in Luttelgeest; C. van der Berg
Heuvelgalerie in Eindhoven; G. Brugman
Maasstadziekenhuis in Rotterdam; P.T. van der Graaf
Rosmalen; C. van Rosmalen en H. Boukes (Brabant Water)
StrijpS in Eindhoven; J. Schreurs (Philips)
Uithof in Utrecht; H. Hellwich

Datum

25 juni 2012

Goedgekeurd door de Technische Commissie Meer met Bodemenergie

Maurice Henssen, Bioclear
Hans Gehrels, Deltares
Guido Bakema, IF Technology
Tim Grotenhuis, Wageningen Universiteit
Huub Rijnaarts, Wageningen Universiteit

Penvoerder

Marc Koenders, IF Technology

Secretariaat

Marion Hetterscheid, IF Technology

Website

www.meermetbodemenergie.nl

Copyright © cover Identim 2012

Copyright © MMB 2012

Delen uit dit rapport mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding:

'Meer met Bodemenergie (MMB), de titel van de publicatie en jaar van uitgave'.

Participanten

Agentschap NL / Bodem+
Arcadis
Brabant Water - Hydreco
Eneco
Essent
gemeente Almelo
gemeente Amersfoort
gemeente Apeldoorn
gemeente Den Bosch
gemeente Deventer
gemeente Haarlem
gemeente Hengelo
gemeente Tilburg
gemeente Utrecht
gemeente Zwolle
Havenbedrijf Rotterdam
NVOE
Productschap Tuinbouw
provincie Drenthe
provincie Flevoland
provincie Friesland
provincie Gelderland
provincie Groningen
provincie Limburg
provincie Noord-Brabant
provincie Noord-Holland
provincie Overijssel
provincie Utrecht
provincie Zeeland
provincie Zuid-Holland
SKB
Stichting Bodemsanering NS
Vewin
Vitens
Waterschap Groot Salland
Waterschap Regge en Dinkel

Inhoudsopgave

Samenvatting	7
1 Inleiding	10
1.1 Onderzoeksvragen	10
1.2 Aanpak	10
2 Uitgangpunten en pilot selectie	12
2.1 Effecten	12
2.2 Theoretisch kader geochemie	12
2.2.1 Te verwachten effecten van temperatuur	15
2.2.2 Effect van temperatuur op reactiesnelheden	16
2.2.3 Effect van menging	19
2.3 Theoretisch kader microbiologie	20
2.3.1 Te verwachten effect van temperatuur op de kinetiek van microbiologische reacties	21
2.3.2 Te verwachten effect van menging op de kinetiek van microbiologische reacties	23
2.3.3 Te verwachten effecten op de stabiliteit van een ecosysteem	23
2.4 Pilot selectie en interpretatiemethodiek	24
2.4.1 Data analyse	24
3 Locatie overstijgende analyse	25
3.1 Beoordeling fysische gegevens	25
3.1.1 Hydrologische effecten	25
3.1.2 Thermische effecten	26
3.1.3 Geleidbaarheid (EC)	28
3.1.4 Zettingen	28
3.2 Beoordeling geochemische gegevens	28
3.2.1 Effect van temperatuur	28
3.2.2 Effect van menging	29
3.2.3 Algemene conclusies geochemie	32
3.3 Biologische gegevens	32
3.3.1 Data analyse	33
3.3.2 Effecten van temperatuur	33
3.3.3 Aanwezigheid potentieel pathogene micro-organismen	39
3.3.4 Aantallen micro-organismen in relatie tot de concentratie organisch stof 40	
3.3.5 Aantallen functionele genen versus geochemische condities en temperatuur	41
3.3.6 Biodiversiteit	42
3.3.7 Algemene conclusies voor de biologie	43
3.4 Algemene conclusies per locatie	43
3.4.1 Beijum	43
3.4.2 Heuvelgalerie	44

3.4.3	Luttelgeest.....	44
3.4.4	Rosmalen	44
3.4.5	Rotterdam.....	44
3.4.6	Uithof	45
3.4.7	Zwammerdam	45
4	Labtesten: effecten van temperatuur en menging.....	46
4.1	Achtergrond en opzet labexperimenten	46
4.2	Grondmonsters labtesten	46
4.3	Schudproef voor het inschatten van potentiële mengingseffecten	47
4.3.1	Doel schudproef	47
4.3.2	Aanpak en metingen schudproef	47
4.3.3	Resultaten uitschudproef	48
4.3.4	Conclusie schudproef.....	50
4.3.5	Conclusie voor de praktijk	50
4.4	Effecten van temperatuur op de microbiële samenstelling	50
4.4.1	Inleiding	50
4.4.2	Doelstelling.....	51
4.4.3	Proefopzet.....	51
4.4.4	Aanpak	52
4.4.5	Uitvoering	52
4.4.6	Resultaten	53
4.4.7	Conclusies.....	59
5	Aandachtspunten in relatie tot specifieke vraagstelling	60
5.1	Effecten van temperatuur en dichtheidsstroming bij een gesloten systeem: locatie Beijum	60
5.1.1	Effecten op de geochemie	60
5.1.2	Effecten op de microbiologie.....	62
5.1.3	Conclusies met betrekking tot gesloten systemen.....	64
5.2	Effecten van open systeem met verschillende temperaturen: locatie Heuvelgalerie.....	65
5.2.1	Effect van temperatuur op kalkevenwicht	66
5.2.2	Conclusie met betrekking tot open systeem met verschillende temperaturen	69
5.3	Reversibiliteit van effecten van verhoogde temperaturen: locatie Zwammerdam.....	69
5.3.1	Conclusie reversibiliteit van hoge temperatuur systemen.....	70
5.4	Effecten van menging in relatie tot de kwaliteit van grondwater: locatie Rosmalen en locatie Strijp-S.....	70
5.4.1	Effecten van WKO op de locatie Rosmalen.....	71
5.4.2	Effecten van WKO op de locatie Strijp-S	76
5.4.3	Conclusies menging	82
6	Eindconclusies.....	84
6.1	Onderzoeksvragen.....	84

6.1.1	Wat is het effect van open bodemenergiesystemen op de geochemie (adsorptie/desorptie, chemische evenwichten)?	84
6.1.2	Wat zijn effecten op de microbiële ecologie (aantallen, samenstelling populaties, activiteit, voorkomen van pathogenen)?	85
6.1.3	Wat is het effect op de kwaliteit van het grondwater?.....	86
	Literatuur	87
	Bijlage I Afweging pilot keuze	LXXXVIII
	Bijlage II Fysische beschrijving per locatie	LXXXIX
	Bijlage III Resultaten per locatie	XC
	Bijlage IV Resultaten DGGE-gel	CXX

Samenvatting

Bij het toepassen van warmte en koude opslag systemen worden wijzigingen aangebracht in de bestaande bodem en grondwaterhuishouding. Deze wijzigingen kunnen een effect hebben op de chemische en/of (micro)biologische samenstelling en kwaliteit van het grondwater en de structuur van de bodem. Wijzigingen kunnen het gevolg zijn van veranderingen in temperatuur en/of ontstaan door het heen en weer pompen en mengen van water met verschillende samenstellingen.

Om vast te stellen welke effecten bij toepassing van WKO systemen in de praktijk optreden zijn fysische, chemische en biologische metingen uitgevoerd op 9 pilotlocaties. Deze locaties omvatten verschillende type bodemenergiesystemen waaronder een gesloten systeem, doubletsystemen, een monobron, een recirculatie systeem in niet verontreinigd grondwater en een recirculatie en een doubletsysteem in met gechloreerde koolwaterstoffen (VOC) verontreinigd grondwater.

Op basis van te verwachten geochemische effecten is gekeken naar veranderingen in chloridegradiënten (zoet-zout menging), pH- en hardheidgradiënten en redoxgradiënten. Op basis van te verwachten effecten op de biologie is gekeken naar veranderingen in de hoeveelheid, samenstelling, functioneren en biodiversiteit van micro-organismen in het betreffende grondwater. Daarnaast zijn fysische metingen uitgevoerd voor het bepalen van daadwerkelijk optredende temperaturen en het optreden van bijvoorbeeld dichtheidsstromen. Naast pilotmetingen in het veld zijn tevens labtesten uitgevoerd voor het beantwoorden van detailvragen rond de effecten van temperatuur.

Bij open systemen wordt vaak aangenomen dat de invloed van de temperatuur een belangrijke - zo niet de belangrijkste - parameter is die de chemische en microbiologische samenstelling van het grondwater beïnvloedt. Bij de onderzochte open systemen blijkt echter dat menging van grondwater als gevolg van het onttrekken en infiltreren van grondwater de meest bepalende factor is.

Bij open systemen kan deze menging op een aantal manieren plaatsvinden waaronder middels het onttrekken van grondwater van verschillende samenstelling, dat gemengd en vervolgens weer geretourneerd wordt. Dit effect is vooral van belang in het eerste jaar en/of bij een onbalans in de jaarlijks verpompte waterhoeveelheden. Menging van water met verschillende chloridegehalten en hardheidsprofielen is het meest voorkomend gebleken op de pilotlocaties.

Met betrekking tot temperatuurseffecten op de geochemie is zowel een uitwerking op theoretische basis uitgevoerd als mede metingen op de locatie. De snelheid van geochemische en biologische reacties neemt met een factor 2 tot 3 toe bij een temperatuurverhoging van 10°C naar 20°C. Voor open grondwatersystemen zijn de reactiesnelheden daarom in de koude bron lager en in de warme bron hoger dan bij de natuurlijke grondwatertemperatuur. Hoe groter de temperatuurverandering, hoe groter de veranderingen in de reactiesnelheden. Doordat bij bodemenergiesystemen met een energiebalans ongeveer evenveel opwarming als afkoeling optreedt, is het netto effect op de reactiesnelheden echter klein. De temperatuursverschillen hebben daarom een geringe invloed op de geochemische waterkwaliteit van de binnen MMB bestudeerde bodemenergiesystemen.

Het theoretisch kader geeft voor temperaturen lager dan 20 °C geen aanleiding tot het verwachten van significante temperatuurseffecten op een tijdschaal van 20 jaar. De waterkwaliteitsveranderingen die op theoretische gronden te verwachten zijn op basis van het minerale evenwicht voor kalk, komen goed overeen met de veldwaarnemingen bij locatie Heuvelgalerie.

In de labtesten is bij een temperatuur van 18 °C geen effect op de aantallen en het functioneren van de micro-organismen vastgesteld. Bij 30 °C zijn wel effecten op de activiteit van de micro-organismen gemeten. In het veld zijn deze effecten binnen het bemeten temperatuurbereik (tussen 11°C en 35 °C) niet gevonden. De gemeten hoeveelheden en samenstelling van de bacteriën vallen binnen de totale natuurlijke variatie in de Nederlandse ondergrond die zowel binnen als buiten het bodemenergiesysteem gemeten is. De aantallen en samenstelling van de bacteriën zijn primair afhankelijk van de bemonsterde locatie.

Bij temperaturen hoger dan 30 °C (in labtesten en op de warmste onderzoekslocatie Beijum, 39 °C) zijn wijzigingen in de samenstelling van de microbiologische populatie gevonden. Hier bleek dat de functies die de microbiologische populatie verzorgt intact blijven. Deze effecten komen overeen met de theoretische verwachting. Rond deze temperatuur heeft een andere groep micro-organismen een selectief voordeel. De specifieke soorten die de verschillende functies uitvoeren kunnen naar gelang de temperatuur wel veranderen. Blijkbaar worden de functies overgenomen door de nieuwe soorten. Ook zijn er binnen het bemeten temperatuurbereik in het veld (tot 39 °C) geen aanwijzingen gevonden voor toe- of afname van de biodiversiteit door de temperatuur. Dit is van belang voor de veerkracht van het microbiologische systeem.

Bij de pilot locaties werden geen of zeer lage aantallen potentieel pathogenen van de Enterobacteriaceae groep of *E. coli* bacteriën aangetroffen, wat er op duidt dat op deze locaties geen sprake is van contact met rioolwater of introductie van besmet ondiep grondwater. *Legionella pneumophila* werd op geen van de bemonsterde locaties aangetroffen terwijl *Clostridium perfringens* slechts in zeer lage aantallen werd aangetroffen in één monster op de locatie Beijum. Deze metingen bevestigen de eerdere observaties dat *Legionella* niet goed overleeft onder de condities waarop de WKO functioneert en dat er geen risicovolle hoeveelheden *Clostridium perfringens* op de onderzochte locaties zijn aangetroffen.

Op een aantal locaties is sprake van geweest van dichtheidsgedreven grondwaterstroming als gevolg van temperatuurverschillen (Heuvelgalerie, Hederakwekerij Luttelgeest, Beijum en Zwammerdam). Dichtheidsverschillen ten gevolge van verschillen in zoutgehalte hebben op de locatie Beijum (opslag van 60 °C) ook geleid tot dichtheidsstroming.

Voor het uiteindelijke effect van een lage temperatuur WKO systeem zijn dus vooral mengeffecten relevant. De mate waarin deze effecten optreden is afhankelijk van de kwaliteit van de waterlagen die worden gemengd. De uiteindelijke aanvaardbaarheid van deze effecten hangt af van de uiteindelijke omvang van deze effecten maar ook van de doelstellingen voor het gebruik. De resultaten uit dit rapport zijn daarom met name uitgangspunten voor verder verwerking naar implicaties voor beleid bijvoorbeeld op het gebied van gebiedsgericht grondwaterbeheer.

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de interpretatie van de resultaten behorende bij WP 2.1 van het onderzoeksvoorstel van Meer met Bodemenergie. Uitgangspunten voor het onderzoek zijn geformuleerd in hieronder genoemde onderzoeksvragen en uitgewerkt in een theoretisch kader. Voor de beantwoording van de onderzoeksvragen is gebruik gemaakt van pilotmetingen, labexperimenten en literatuur gegevens.

1.1 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen die in het onderhavige rapport worden behandeld zijn:

- Wat is het effect van open bodemenergiesystemen op de geochemie (adsorptie/desorptie, chemische evenwichten)?
- Wat zijn effecten op de microbiële ecologie (samenstelling populaties, activiteit, voorkomen van pathogenen)?
- Wat is het effect op de kwaliteit van het grondwater (chemische en (micro)biologische samenstelling)?

1.2 Aanpak

- Opstellen van theoretisch kader (Hoofdstuk 2)
- Selectie van praktijklocaties met verschillende bodemenergiesystemen (Hoofdstuk 2, Bijlage 1);
- Metingen van temperatuurprofielen rondom bodemenergiesystemen (Bijlage 2);
- Metingen en interpretatie van effecten in een bodemenergiegebied en in één of meerdere bijbehorend referentiemonster(s) op kwantiteit en samenstelling van de microbiële ecologie en de chemische samenstelling van het grondwater (Hoofdstuk 3);
- Labexperimenten voor het vaststellen van grenzen waarbinnen effecten optreden (bv. bij welke temperatuur en menging beginnen effecten op te treden) (Hoofdstuk 4);
- Beschouwing in relatie tot de vraagstelling (Hoofdstuk 5).

In bijlage 2 zijn de achtergrondgegevens en fysische interpretaties per locatie bijgevoegd.

In hoofdstuk 3 zijn de belangrijkste fysische observaties samengevat en zijn de effecten op de geochemie en biologie in relatie tot temperatuur en menging op hoofdlijnen beschreven waarbij de opvallendste effecten zijn uitgelicht. Tevens zijn de algemene effecten per locatie kort besproken.

In hoofdstuk 4 zijn de opzet en uitkomsten van de labexperimenten in relatie tot temperatuur en menging opgenomen.

Voor de deelvraagstellingen is in hoofdstuk 5 een verdieping van de interpretatie aangebracht. Hierbij is gebruik gemaakt van de meetresultaten van een of meerdere locaties gecombineerd met de uitkomsten van de labexperimenten, eventueel aanwezige historische data en kennis uit de literatuur.

In hoofdstuk 6 zijn de overkoepelende conclusies ten opzichte van de onderzoeksvragen opgenomen.

2 Uitgangpunten en pilot selectie

2.1 Effecten

Bij het toepassen van warmte en koude opslag systemen worden wijzigingen aangebracht in de bestaande bodem en grondwaterhuishouding. Deze wijzigingen hebben mogelijk een effect op de chemische en/of (micro)biologische samenstelling en kwaliteit van het grondwater en de structuur van de bodem. Mogelijke wijzigingen kunnen het gevolg zijn van veranderingen in temperatuur en/of ontstaan door het heen en weer pompen en mengen van water met verschillende samenstellingen.

In de onderstaande paragrafen is toegelicht welke veranderingen in de geochemie en microbiologie mogelijk op kunnen treden, welke omstandigheden of handelingen in die gevallen kunnen worden geïdentificeerd als oorzaak en welke parameters gebruikt kunnen worden voor het geven van uitsluitsel hierover.

2.2 Theoretisch kader geochemie

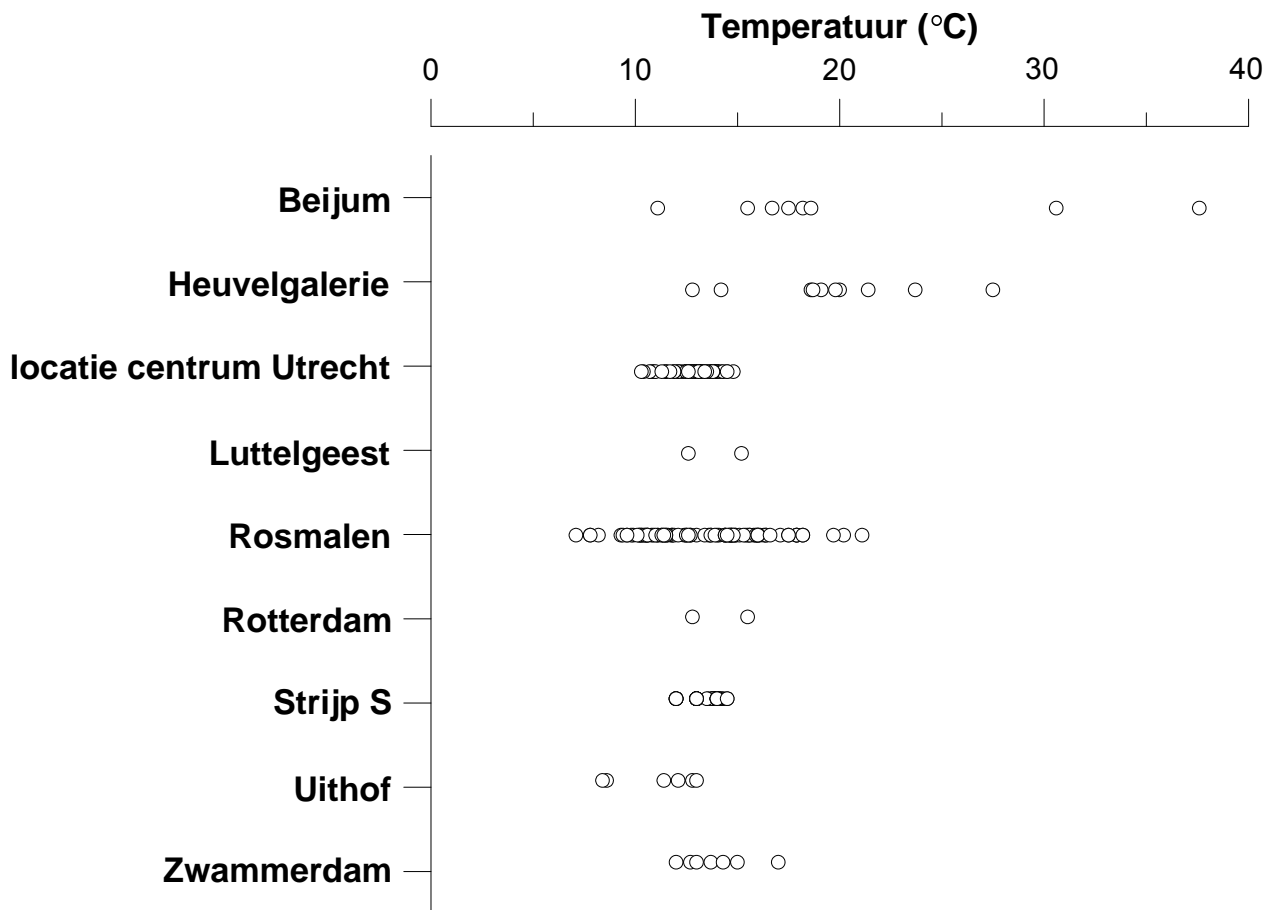
In deze paragraaf wordt het theoretische kader beschreven met betrekking tot de te verwachten effecten van temperatuur en menging op de geochemie. Hierbij wordt gekeken welke geochemische patronen te herkennen zijn in de samenstellingen van het grondwater op de verschillende WKO locaties. Hierbij zijn onder andere de volgende vragen in beschouwing genomen:

- In hoeverre verschilt de geochemie per WKO systeem?
- Welke factoren en processen zijn belangrijk?
- Welke aspecten verdienen verdere aandacht?

Als conceptueel model voor mogelijke geochemische effecten bij open WKO systemen is het schema uit de literatuurstudie gebruikt (figuur 2.1).

tabel 2.1 **Overzicht van voor MMB op geochemische aspecten onderzochte locaties**

Temperatuur	Type	Locatie	Locatie nr.	Verontreinigd	Opmerking
Laag	Doubletten	Zuiderziekenhuis, Rotterdam	6	Nee	
		TNO/Deltares, Uithof, Utrecht	8	Nee	
	Recirculatie	Utrecht Centrum	3	Ja	“Biowasmachine”
		Strijp S Eindhoven	7	Ja	“Sanergy”
	Monobron	Luttelgeest	4	Nee	Hederakwekerij
Hoog	Doubletten	Rosmalen	5	Nee	
		Heuvelgalerie, Eindhoven	2	Nee	
	Bodemwarmte-wisselaar	Zwammerdam	9	Nee	Niet meer actief sinds 2004
		Beijum, Groningen	1	Nee	



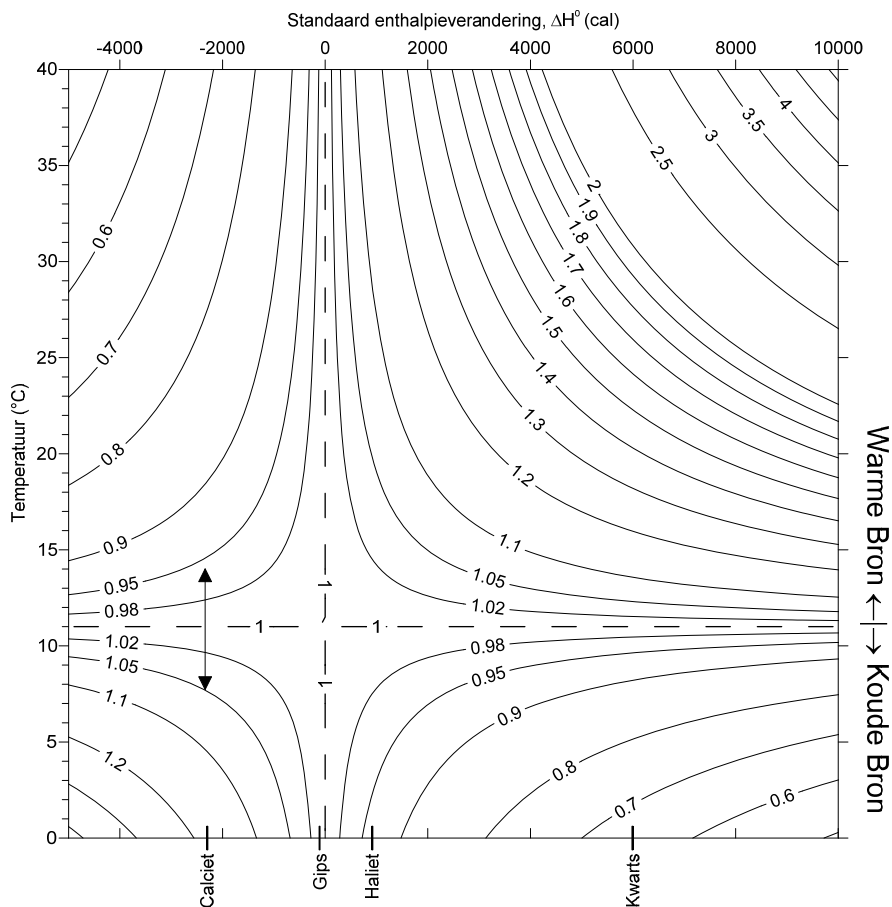
figuur 2.2 **Overzicht van temperatuurbereik voor de grondwatermonsters genomen op de pilotlocaties**

2.2.1 Te verwachten effecten van temperatuur

2.2.1.1 Evenwichtsreacties

Zoals beschreven en toegelicht in de literatuurstudie (Rapport 2), kan het effect van temperatuur op mineraalevenwichten beschreven worden door middel van de Van 't Hoff vergelijking:

$$\ln \left(\frac{K_2}{K_1} \right) = \frac{-\Delta H^\ominus}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$
, waarbij K_1 de evenwichtsconstante voor een mineraal is bij temperatuur T_1 in kelvin ($K = ^\circ\text{C} + 273,15\text{K}$) en K_2 bij temperatuur T_2 . ΔH^\ominus (cal) is de standaard enthalpie verandering voor de betreffende reactie en R is de gas constante (1,99 Cal/(mol K)). Als eenheden voor energie is hierbij niet gekozen voor de SI eenheid joules maar voor calorieën, omdat de energieën in de veel gebruikte geochemische database van PHREEQC in calorieën vermeldt staan. In figuur 2.3 zijn, met behulp van de Van 't Hoff vergelijking, de temperatuureffecten op mineraalevenwichten uitgewerkt voor een WKO met een referentietemperatuur van 11°C. Zo wordt daarin voor het mineraal calciet (~kalk) een afname van de evenwichtsconstante met een factor 0.95 voor een warme bron van 14°C en een toename met een factor 1.05 voor de koude bron van 8°C afgeleid.



figuur 2.3 Uitwerking van de Van 't Hoff vergelijking voor een WKO systeem met een referentietemperatuur van 11°C. De contourwaarden geven aan met welke factor de evenwichtsconstante, voor een mineraal met een bepaalde standaard enthalpieverandering bij oplossing, toeneemt (>1) of afneemt (<1). Een aantal bekende mineralen zijn op de onderste as weergegeven ter referentie. De gebruikte standaard enthalpieveranderingen hiervoor zijn afkomstig uit de PHREEQC database (Parkhurst, et al., 1999)

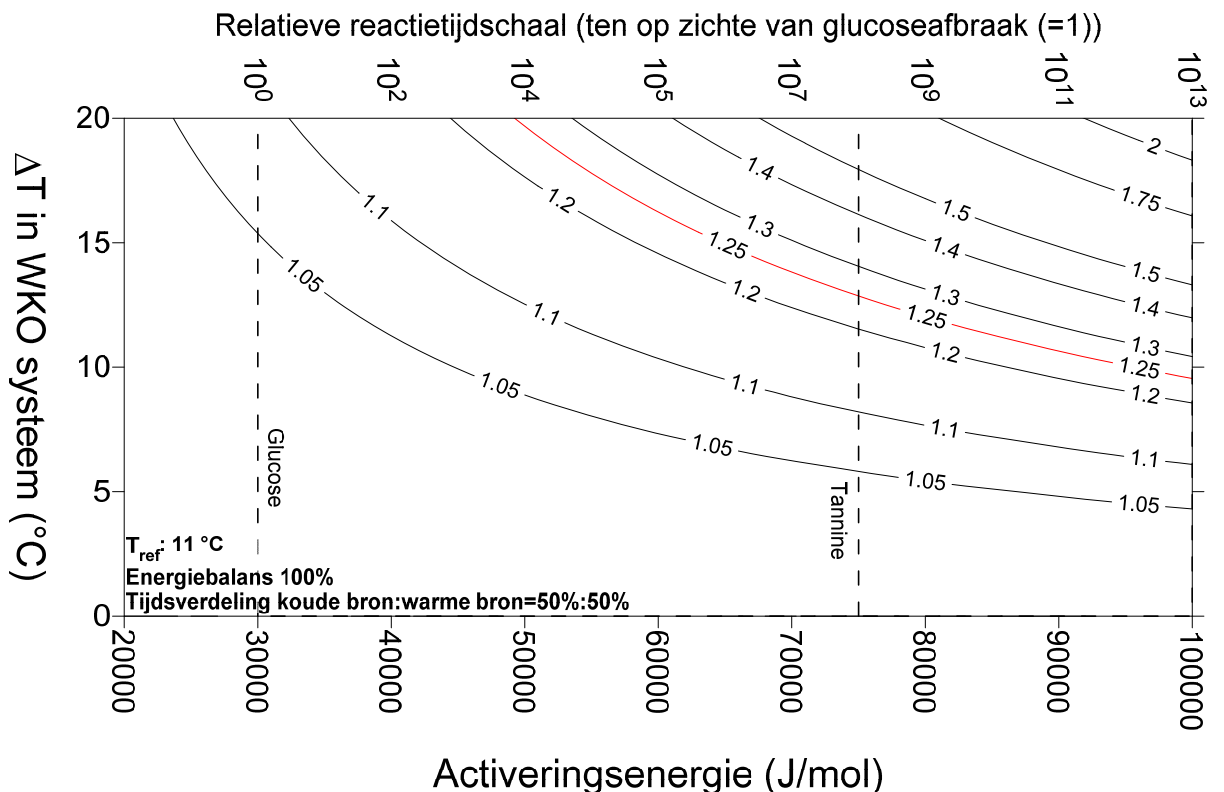
2.2.2 Effect van temperatuur op reactiesnelheden

Veel van de reacties die plaatsvinden in grondwatersystemen worden niet bepaald door chemisch evenwicht maar worden gedreven door een thermodynamische onbalans (bv. (Appelo and Postma, 1993)). Zo wordt onder pH neutrale condities het proces van oplossing in langsstromend grondwater van een slecht oplosbare mineraal als kwarts (figuur 2.3) niet gecontroleerd door het oplosbaarheidsproduct maar door kinetische factoren. De range in snelheden waarmee deze kinetisch gecontroleerde reacties plaatsvinden bestrijkt vele orden van grootte en is op verschillende manieren te beschrijven. Zoals beschreven en toegelicht in de literatuurstudie (Rapport 2), kan de Arrhenius vergelijking worden gebruikt, waarin de snelheidsconstante k exponentieel gerelateerd is aan de activeringsenergie E_a (J/mol) en de temperatuur T (K). Voor veel reacties, zowel biologische als puur chemische, nemen de reactieconstantes met een factor 2 tot 3 keer toe bij een verhoging van 10°C naar 20°C.

Voor WKO's met een thermische balans zijn de reactieconstanten in de koude bron lager en de reactieconstanten in de warme bron hoger dan bij de referentietemperatuur. Recentelijk is middels de Arrhenius vergelijking uitgewerkt wat dit netto voor reactiesnelheden in WKO systemen, die zowel een verlaging (koude bron) als verhoging (warme bron) ten opzichte van de referentie temperatuur van grondwater teweeg brengen, betekent (Hartog, 2011). Hierin zijn ook afhankelijkheid van verschillende temperatuursverhoudingen tussen de warme en koude bron meegenomen, volgens:

$$f_{ATES} = \frac{1}{2} e^{\frac{Ea}{RT_{ref}}} \left(e^{\frac{-Ea}{R(-0.5\Delta T + T_{ref})}} + e^{\frac{-Ea}{R(0.5\Delta T + T_{ref})}} \right)$$

Waarin de f_{ATES} de dimensieloze factor (-) is waarmee de reactieconstante voor een bepaalde reactie verandert ten opzichte van de referentietemperatuur (T_{ref} in K). Deze factor f_{ATES} is verder een functie van de activeringsenergie (Ea in J/mol) voor een bepaalde reactie, en het temperatuurverschil (ΔT , K of $^{\circ}C$) tussen de warme en koude bron. R is de gas constante in SI eenheden ($8.314 J/(K \cdot mol)$). Belangrijke opmerkingen die bij deze analyse gemaakt moeten worden is dat er van uitgegaan is dat de er een thermische balans heerst en dat het verpompte grondwater netto net zolang in de warme als in de koude bron verblijft. In figuur 2.4 is deze relatie grafisch afgebeeld voor een referentie temperatuur van $11^{\circ}C$.



figuur 2.4 Uitwerking van de Arrhenius vergelijking voor een WKO systeem met een thermische balans en een referentietemperatuur van 11°C (Hartog, 2011). De contourwaarden geven aan met welke factor de reactieconstante toeneemt (>1) bij een bepaalde ΔT in het WKO systeem, voor een reactie met een bepaalde activeringsenergie. Typische waarden en ranges voor activeringsenergieën voor biochemische reacties liggen in de range van 20 tot 75 kJ/mol (Appelo, et al.,1993)

Hieruit komt naar voren dat f_{ATES} toeneemt met toenemende ΔT van het WKO systeem en activeringsenergie voor een bepaalde reactie. Zo blijkt dat voor reacties die op de tijdschaal van de verwachte levensduur van WKO systeem (<20 yr, 10^4 dagen) plaatsvinden voor ΔT waarden tot 20°C, f_{ATES} kleiner is dan 1,25. Binnen de ΔT waarden voor de MMB pilots en de duur van de monitoring is de verwachte f_{ATES} kleiner dan 1.05. Voor reacties die niet plaatsvinden in het grondwater maar sediment-gebonden zijn, wisselt de temperatuur tussen de referentietemperatuur en de temperatuur van de warme of koude bron. Doordat dit temperatuurverschil kleiner is dan tussen de warme en koude bron, is daarmee ook het netto ondervonden temperatuureffect van een WKO systeem op reacties die sediment-gebonden zijn naar verwachting kleiner dan voor reacties die volkomen in het grondwater plaatsvinden. Bij grotere verschillen dan de genoemde f_{ATES} van 1.05 is onder de beschouwde condities de kans dus groot dat temperatuureffecten door natuurlijke variatie of door andere processen in een WKO systeem overschaduw worden.

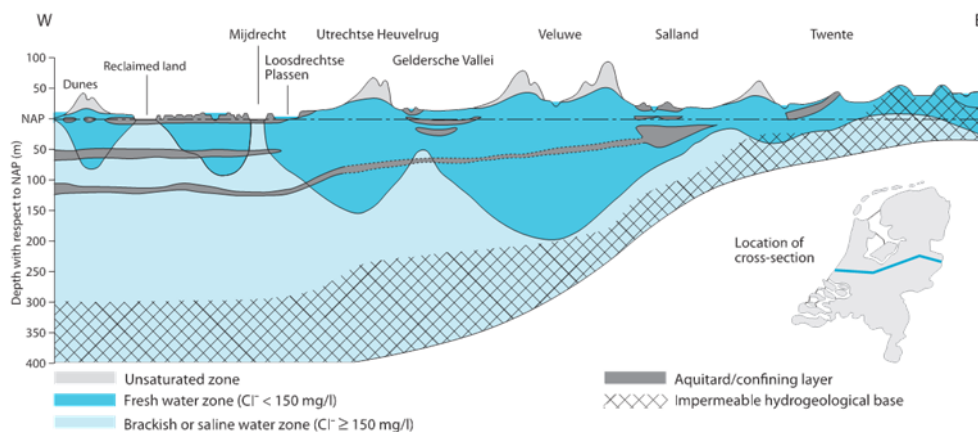
Oftewel, bij kleine verschillen in temperatuur van minder dan 20 graden tussen de warme en koude bron (een situatie die in de praktijk vaak niet wordt overschreden) en een looptijd van 20 jaar is de verwachte toename in snelheid van reacties in theorie niet meer dan 5% en vallen de effecten binnen de natuurlijke verschillen of zijn niet zichtbaar door invloeden van andere aard zoals bijvoorbeeld menging.

2.2.3 Effect van menging

Effecten van menging door open WKO systemen kunnen optreden als er verticale gradiënten aanwezig zijn. Voor de evaluatie van de effecten van menging zijn de volgende type gradiënten verkend, zoals die door de Technische Commissie Bodembescherming in relatie met WKO zijn benoemd (TCB, 2009):

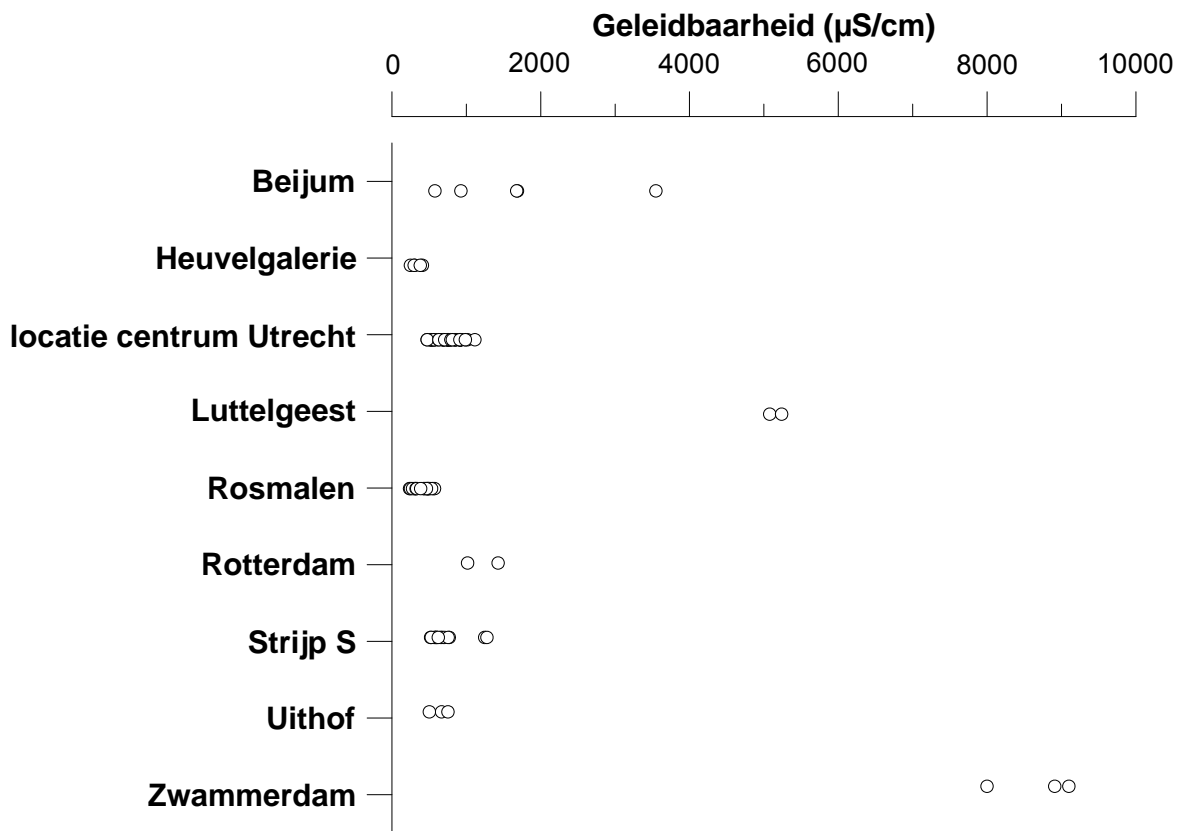
- chloridegradiënten (zoet-zout menging)
- pH- en hardheidgradiënten
- redoxgradiënten

In Nederland zijn er in de ondergrond overgangen in zoutgehalten van het grondwater. De mate waarin deze optreden hangt af van de locatie en diepte (zie figuur 2.5).



figuur 2.5 Schematische topografische hydrologische weergave van oost-westelijke doorsnede van Nederland

Afhankelijk van de locatie en het dieptetraject van het open WKO systeem, kan deze voor menging van grondwater met verschillende zoutgehalten zorgen. Voor een eerste beschouwing van de variatie van zoutgehalten tussen de verschillende WKO systemen en daarbinnen geeft onderstaand figuur een beeld van de range van elektrische geleidbaarheid van het grondwater per locatie (zie figuur 2.6).

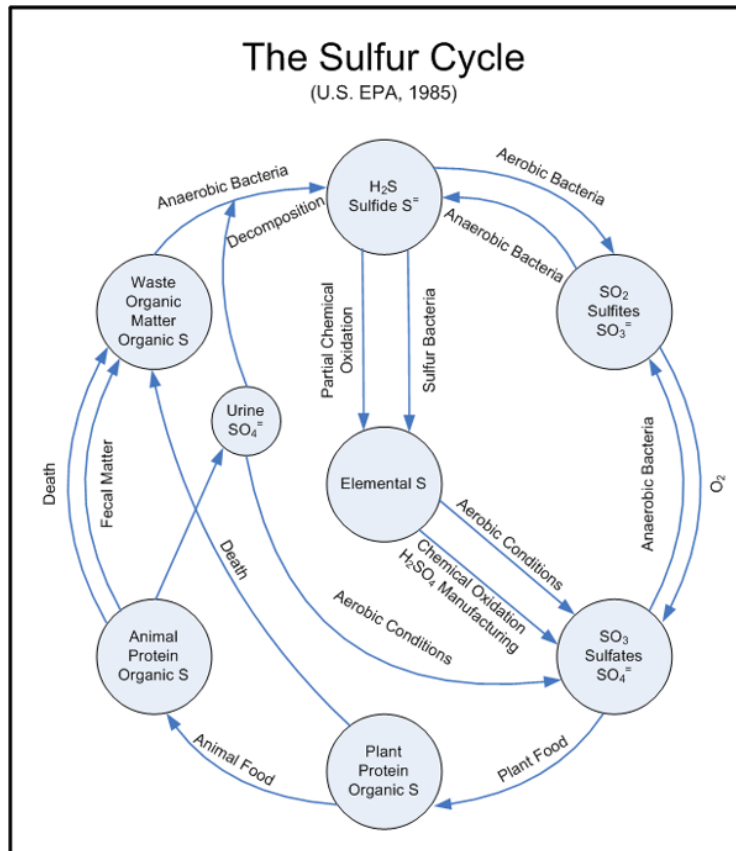


figuur 2.6 Overzicht van geleidbaarheid van het grondwater op de verschillende pilotlocaties in ronde 1

2.3 Theoretisch kader microbiologie

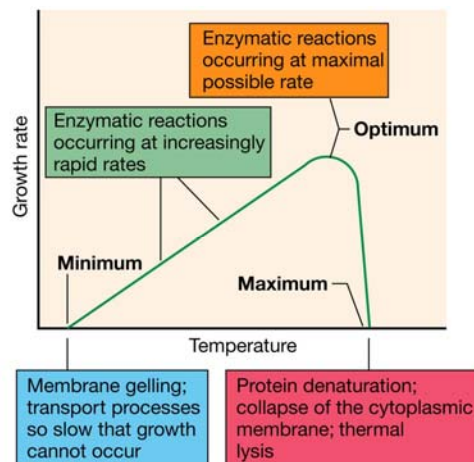
De samenstelling van grond en grondwater is een resultante van geochemische, fysische en biologische processen. Micro-organismen hebben voor hun groei en overleving een koolstofbron en een energiebron nodig. Deze energiebron is een te oxideren of te reduceren verbinding. De beschikbaarheid hiervan is bepalend voor het kunnen optreden van een bepaalde reactie en dus afhankelijk van de redoxcondities in de bodem. De oxidatie en reductieprocessen die door micro-organismen worden uitgevoerd maken deel uit van processen in de recycling van verschillende elementen, bijvoorbeeld middels de koolstofstikstof- of zwavelcyclus (zie kader).

Een aantal groepen micro-organismen specialiseert zich in een bepaald type omzetting terwijl een aantal andere groepen uit de voeten kan met een groot aantal verschillende verbindingen. Om inzichtelijk te krijgen welke type omzettingen door de toevoer van warmte of menging worden beïnvloed zijn de genetische eigenschappen voor een aantal van deze omzettingroutes gemeten. Op basis van deze genetische eigenschappen maken de micro-organismen namelijk de enzymen die voor deze omzettingen nodig zijn.



2.3.1 Te verwachten effect van temperatuur op de kinetiek van microbiologische reacties

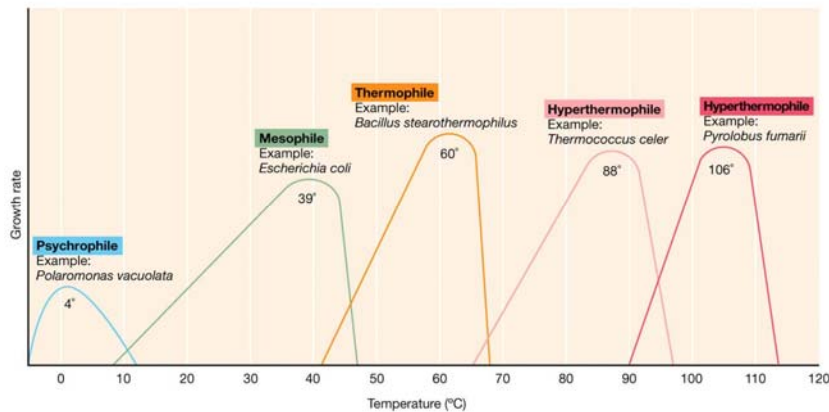
De enzymen in micro-organismen zorgen ervoor dat de activeringsenergie (zie ook uitleg over de chemische effecten) die nodig is om een reactie te laten lopen wordt verlaagd. De verlaging van deze activeringsenergie zorgt ervoor dat bepaalde omzettingen ook onder energetisch ongunstige condities mogelijk zijn. De snelheid van omzetting neemt toe met een toename in de temperatuur maar alleen als het substraat dat de micro-organismen nodig hebben niet gelimiteerd is en de optimale werkingstemperatuur van het betreffende enzym niet wordt overschreden. Wanneer een temperatuur bereikt wordt die boven het optimum van het enzym ligt wordt het eiwit snel instabiel en bij verdere verhoging van de temperatuur valt het zelfs uit elkaar (denaturatie, denk aan het stollen van een ei als je hem kookt). De activiteit neemt dan snel af tot nul. Bij een te lage temperatuur wordt de celmembranen van de cellen te star en kan deze de om te zetten stoffen niet meer opnemen (zie figuur 2.7).



figuur 2.7 Effect van de temperatuur op de groeisnelheid en consequenties voor de werking van een micro-organisme (Madigan, et al., 2006)

Het optimale temperatuur bereik van enzymen is gekoppeld aan het optimale temperatuurbereik van het soort organisme waarin het enzym actief is. Bij kleine veranderingen in temperatuur is het te verwachten dat dezelfde organismen processen blijven uitvoeren waarbij het proces mogelijk sneller (bij temperatuur verhoging) of juist langzamer (bij temperatuur verlaging) gaat omdat de thermodynamische condities veranderen. Bij grote veranderingen in temperatuur nemen andere groepen organismen met andere enzymen deze processen over, al dan niet met een beter omzettingsrendement (zie figuur 2.8). Dit gebeurt zowel bij verhoging als bij verlaging van de omgevingstemperatuur. Het effect van de temperatuur op de (micro)biologie volgt dus geen lineair verband. Bij steeds hoger wordende temperaturen moeten micro-organismen steeds meer energie investeren om hun eiwitten niet te laten denatureren en hun cellen te stabiliseren en neemt de totale omzettingssnelheid dus af.

Op het moment dat lokaal het temperatuurbereik van één van de groepen wordt overschreden kunnen irreversibele effecten ontstaan. Oftewel, verhoog je bijvoorbeeld de temperatuur naar meer dan 50 °C dan verlies of inactieveer je alle organismen die kunnen groeien tussen de 10 en 50 °C. Laat je de temperatuur weer dalen naar 30 °C dan zijn de juiste organismen niet meer voorradig. Wel kunnen en zullen deze met nieuw grondwater weer worden aangevoerd, waardoor de microbiologische populatie zich weer kan herstellen.



figuur 2.8 Relatie tussen de groeisnelheden en verschillende groepen microorganismen. Voor elke groep is de optimale groeitemperatuur van een voorbeeld organisme weergegeven (Madigan, et al., 2006)

2.3.2 Te verwachten effect van menging op de kinetiek van microbiologische reacties

In de praktijk is er geen sprake van één enkele reactie op hetzelfde moment, maar vinden veel verschillende reacties tegelijkertijd plaats. Dit geldt voor zowel de chemie als de microbiologie, de gemeten waarden zijn de netto resultante van zowel vormingsreacties als omzettingsreacties. Effecten van de biologie op chemische evenwichten zijn tevens gecompliceerd doordat organismen stoffen in hun cellen kunnen inbouwen en opslaan en in consortia en biofilms werken waarin zij hun eigen omgevingscondities kunnen beïnvloeden.

In het geval van menging zijn om deze reden meerdere effecten op de microbiologie te verwachten. Enerzijds kunnen voedingsstoffen (elektronendonoren en acceptoren en koolstofbronnen) worden aangevoerd (door water met hogere gehalten of door loslaten van bodemmateriaal) die anders buiten bereik van de micro-organismen liggen of juist worden afgevoerd. Dit geldt vooral voor de groep die aangehecht is aan bodemmateriaal en daarmee minder mobiel is. Hierdoor is versterking van de groei mogelijk en neemt het aantal micro-organismen toe. Anderzijds kunnen micromilieus (bv gevormd door biofilms of in poriën in bodemmateriaal) worden verstoord of nieuwe niches worden gecreëerd waardoor minder maar ook meer niches ontstaan, het aantal organismen neemt hierdoor niet specifiek toe of af maar de samenstelling kan wel worden beïnvloed.

2.3.3 Te verwachten effecten op de stabiliteit van een ecosysteem

In een stabiel ecosysteem worden alle mogelijke reacties uitgevoerd, veelal door een groot aantal verschillende organismen. Bij het uitvallen van een soort of functie wordt deze door andere soorten overgenomen. Over het algemeen geldt dat een systeem met een hoge biodiversiteit, dus met veel verschillende soorten organismen, beter in staat uitvallende functies over te nemen en wordt dus vaak als stabiel beschouwd.

De stabiliteit van het systeem, ook wel aangeduid als weerbaarheid tegen een verstoring, kan na deze verstoring wel een deel van haar biodiversiteit verloren hebben waardoor zij minder weerbaar is tegen een volgende verstoring. Het vaststellen van het effect van een WKO systeem op de biodiversiteit is dus relevant voor het vaststellen van het effect op het functioneren van het ecosysteem ter plaatse maar ook voor weerbaarheid van het systeem in relatie tot andere functies.

In hoeverre een verandering van een ecosysteem aanvaardbaar is hangt van de aard van de verandering en van de omvang hiervan. Hierbij is de uiteindelijke grootte van het WKO systeem in termen van thermische straal en debieten van belang maar ook het aantal systemen in een bepaald gebied. Met meerdere WKO's in een bepaald gebied kan er meer diversiteit in omstandigheden optreden terwijl de diversiteit in één bepaald WKO systeem lager wordt.

2.4 Pilot selectie en interpretatiemethodiek

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen is een selectie gemaakt voor monitoring op een aantal pilot locaties. Hierbij is tegemoet gekomen aan de wens om een aantal verschillende type systemen in de studie op te nemen. Voor de keuze van deze locaties is gebruik gemaakt van de volgende afwegingscriteria: type systeem (open of gesloten, doublet, monobron, etc.), redoxtoestand op de locatie, temperatuurniveau, beschikbaarheid van meetputten, ouderdom van het project, beschikbaarheid historische meetgegevens en medewerking eigenaar/beheerder. Voor een gedetailleerde beschrijving hiervan zie Bijlage 1.

2.4.1 Data analyse

Voor de interpretatie van de gegevens is gekeken naar 1 op 1 correlaties, bijvoorbeeld naar het aantal bacteriën dat bij elk temperatuurpunt gevonden wordt. Op basis van de gestelde hypothesen kan hiermee een eerste inzicht in een mogelijk effect worden verkregen.

Daar op veel verschillende locaties is bemonsterd, verschillende processen met elkaar samenhangen en er een zeer grote set aan verschillende parameters is gemeten, is een vergelijking van meerdere parameters tegelijk zeer wenselijk. Hiervoor is gebruik gemaakt van een zogenaamde *principal component analysis* (PCA). Deze methode wordt gebruikt om te kijken welke variabelen sterk met elkaar correleren (positief dan wel negatief).

Het gebruik van deze methodiek maakt het mogelijk in te zoomen op kleinere complexere effecten tussen monsterpunten. Daarnaast wordt zichtbaar welke metingen vergelijkbare informatie geven. Hiermee wordt het mogelijk om bijvoorbeeld voor een monitoringstraject in de toekomst gericht(er) (en dus minder) metingen uit te voeren.

3 Locatie overstijgende analyse

3.1 Beoordeling fysische gegevens

De fysische metingen zijn bedoeld om de directe effecten van WKO-systemen vast te stellen (stijghoogte en temperatuur) en tevens enkele afgeleide effecten die met fysische metingen meetbaar zijn (EC en maaiveldhoogte als indicatoren voor verzilting en zetting). De resultaten van de metingen kunnen worden vergeleken met de voorspellingen om na te gaan of hier sprake is van systematische afwijkingen die aanleiding zouden kunnen zijn om aanpassingen in de methodiek van voorspellen/modelleren door te voeren. Een andere belangrijke reden om fysische metingen uit te voeren is het vaststellen van de directe effecten als verklarende factoren voor andere effecten. Zo kan bijvoorbeeld de temperatuur een belangrijke verklarende factor zijn voor de invloed op de chemische en microbiologische grondwaterkwaliteit.

Onderstaande paragrafen gaan in op de belangrijkste bevindingen per type effect. Detail beschrijvingen per locatie zijn te vinden in Bijlage 2.

3.1.1 Hydrologische effecten

Effecten WKO versus achtergrondeffecten

Bij de pilot-projecten zijn divers geïnstalleerd om de stijghoogteveranderingen te meten. De divers meten de druk in de peilbuis op de diepte waarop ze zijn aangebracht, waaruit de stijghoogteveranderingen in het watervoerende pakket op de diepte van het filter kunnen worden afgeleid. Deze stijghoogte op de betreffende locatie en diepte wordt echter niet alleen door de WKO beïnvloed, maar ook door allerlei andere factoren. Uit de metingen blijkt dat de achtergrondfluctuatie van de stijghoogte aanzienlijk kan zijn. Als de invloed van de WKO klein is (bv. kleiner dan 10 à 20 cm), dan is de achtergrondfluctuatie vaak zodanig veel groter dan de invloed van de WKO dat het effect van de WKO niet terug te zien is in de metingen (bijvoorbeeld bij de Hederakwekerij in Luttelgeest, de Heuvelgalerie in Eindhoven en Mariaoord in Rosmalen). Alleen door de metingen in het meetpunt te vergelijken met metingen in een ander meetpunt waar de invloed van de WKO wel duidelijk is (bv. in de bronnen) kan de invloed van de WKO worden afgeleid. In dit onderzoek is dat gedaan door de metingen in de bron in dezelfde grafiek te plotten als de metingen in het te analyseren meetpunt en beide lijnen “over elkaar heen te leggen” (zie bijvoorbeeld de analyse van de metingen bij de Hederakwekerij). Dit geeft aan dat het niet alleen van belang is hoe groot de invloed van de WKO is, maar ook hoe die invloed zich verhoudt tot de achtergrondfluctuaties.

Bruikbaarheid metingen

Op basis van de analyse van de metingen kan worden geconcludeerd dat het meten van een stijghoogte op vooraf vastgestelde momenten (bv. één keer per kwartaal) weinig zinvol is. De variatie die optreedt is namelijk slechts voor een deel te relateren aan de WKO, waardoor het effect van de WKO onduidelijk blijft. Continue metingen met *divers* hebben een duidelijke meerwaarde, maar zijn ook moeilijk te interpreteren als er geen duidelijk effect van de WKO optreedt. Metingen op grotere afstand van de WKO zouden daarom altijd gecombineerd moeten worden met metingen op locaties waar sprake is van een duidelijke invloed van de WKO (in of nabij de bronnen).

Betrouwbaarheid voorspelde effecten

Bij de projecten waar in het kader van Meer Met Bodemenergie metingen zijn uitgevoerd, zijn de hydrologische effecten die zijn afgeleid uit de metingen kleiner of gelijk aan de voorspelde effecten. De maximaal te verwachten hydrologische effecten zijn met de veel toegepaste worst-case benadering dus goed te voorspellen.

3.1.2 Thermische effecten

Effecten WKO versus achtergrondeffecten

De temperatuur van het grondwater op de dieptes waarop WKO wordt toegepast (meestal >20 m-mv) is niet onderhevig aan dagelijkse of seizoenale temperatuursfluctuaties. In de bovenste 50 à 100 m van de ondergrond vindt wel een zekere opwarming plaats onder invloed van ontwikkelingen die plaatsvinden op langere tijdschalen, waarbij het gaat om klimaatverandering en verstedelijking of andere veranderingen in het landgebruik (zie ook MMB rapport 8 - Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur). Het gaat hierbij echter om een zeer geleidelijk proces. De effecten van WKO-systemen zijn aanmerkelijk groter dan deze achtergrondeffecten.

Bruikbaarheid metingen

Doordat de temperatuur in de ondergrond nagenoeg constant is, kunnen de temperatuurveranderingen als gevolg van WKO (in tegenstelling tot de stijghoogteveranderingen) wel goed worden vastgesteld door het meten van de temperatuur op vooraf vastgestelde momenten (bv. één keer per kwartaal).

Een belangrijk nadeel van de temperatuurmetingen is dat daarvoor kostbare meetputten nodig zijn. Belangrijke vraag is dan ook onder welke omstandigheden dergelijke temperatuurmetingen zinvol zijn, wat samenhangt met de aanwezigheid van belangen in de omgeving en de betrouwbaarheid van de voorspelde effecten en eventuele aanvullende modelberekeningen op basis van de werkelijke waterverplaatsing en infiltratietemperaturen.

Betrouwbaarheid voorspelde effecten

De bestaande kennis over warmtetransport en dichtheidstroming in de ondergrond is goed ontwikkeld (zie ook de Literatuurstudie in rapport 2). Als alle gegevens vooraf bekend zijn is het dus goed mogelijk om betrouwbare voorspellingen te doen.

Er is een aantal mogelijke redenen voor afwijkingen tussen de voorspellingen en de werkelijke effecten:

- Verschillen tussen het aangenomen en het werkelijke gebruikspatroon van het WKO-systeem. Het gaat hierbij om infiltratietemperaturen, verplaatste waterhoeveelheden en de mate waarin sprake is van een energiebalans. Bij een langdurige (en aanzienlijke) energie-onbalans kan het thermisch invloedsgebied flink in omvang toenemen, wat duidelijk blijkt uit de metingen bij de Hederakwekerij in Luttelgeest. Overigens blijkt uit de metingen bij hetzelfde project ook dat de effecten van een langdurige energie-onbalans kunnen worden teruggedraaid door langdurig te compenseren (warmteoverschot in de ondergrond compenseren door langdurig een koudeoverschot te infiltreren).
- Verschillen tussen de aangenomen bodemopbouw en de daadwerkelijke bodemopbouw. Vooral de heterogeniteit is vooraf moeilijk te voorspellen en wordt meestal niet meegenomen in de voorspellingen. De metingen die zijn uitgevoerd bij een aantal pilot projecten wijzen op de aanwezigheid van heterogeniteiten (Hederakwekerij Luttelgeest, Uithof Utrecht). De invloed van heterogeniteit is één van de onderwerpen binnen het promotieonderzoek van Wijnb Sommer (WUR). De eerste resultaten van zijn onderzoek zijn gepresenteerd op het 1^e Nationaal congres bodemenergie. Heterogeniteit blijkt te zorgen voor een bepaalde onzekerheidsmarge in het opslagrendement van WKO systemen, waarbij zowel sprake kan zijn van een verbetering van het opslagrendement als van een verslechtering. De mate van onzekerheid is beperkt als de bronnen volgens de NVOE richtlijnen ontworpen zijn (bronafstand 3 maal de thermische straal) en neemt toe als de bronnen dichter bij elkaar worden geplaatst.
- De modelschematisatie kan gevolgen hebben voor de voorspelde effecten. Zo zijn bij meerdere projecten aanwijzingen gevonden voor het optreden van dichtheidsgedreven grondwaterstroming (Beijum Groningen, Heuvelgalerie Eindhoven, Hederakwekerij Luttelgeest en De Bruggen Zwammerdam). Om deze effecten goed te kunnen voorspellen is een driedimensionaal model nodig. In de praktijk wordt meestal gerekend met tweedimensionale modellen. De vraag is daarom wanneer het nodig is om een driedimensionaal model te gebruiken: onder welke omstandigheden is dichtheidsgedreven grondwaterstroming van belang?

Dichtheidsgedreven grondwaterstroming treedt met name op in goed doorlatende watervoerende pakketten en/of als sprake is van aanzienlijke temperatuurverschillen tussen het infiltratiewater en het omgevingswater. In goed doorlatende watervoerende pakketten kan bij temperatuurverschillen van meer dan 10 °C al enige dichtheidsgedreven grondwaterstroming optreden (bv. in Luttelgeest), terwijl in watervoerende pakketten met een lagere doorlatendheid pas bij veel hogere temperaturen sprake is van dichtheidsstroming (zie ook MMB rapport 6 - Hoge temperatuur warmteopslag). Bij de meeste projecten blijven de temperatuurverschillen beperkt tot enkele graden en is dichtheidsgedreven grondwaterstroming niet van belang.

3.1.3 Geleidbaarheid (EC)

EC-metingen zijn alleen uitgevoerd bij projecten waarbij sprake was van brak of zout grondwater. Alleen bij Beijum duiden de EC-metingen in het verleden op verzilting, wat kan worden toegeschreven aan het optreden van dichtheidsstroming. Inmiddels is de EC bij dit project weer gedaald en is zelfs sprake van verzoeting. Bij de overige projecten zijn geen aanwijzingen gevonden voor het optreden van verzilting.

Opvallend zijn de metingen bij het provinciehuis Flevoland in Lelystad. Hier lijkt sprake te zijn van het opdrijven van relatief zoet grondwater van grotere diepte, wat mogelijk versneld optreedt door de invloed van de WKO. Ook bij het project Hederakwekerij in Luttelgeest is sprake van “vreemde metingen” die mogelijk gerelateerd zijn aan opdrijven van zoet grondwater van grotere diepte. Een dergelijk fenomeen is alleen mogelijk in gebieden waar sprake is van zogenaamde inversies: zoet water onder zouter grondwater, een situatie die instabiel is en daarom maar weinig voorkomt. Van Flevoland is bekend dat hier inversies voorkomen, die gerelateerd zijn aan de historische ontwikkeling in dit gebied. In de Romeinse tijd was sprake van een zoetwatermeer, vervolgens drong zout water door in de vorm van de Zuiderzee en tenslotte was weer sprake van zoet water (IJsselmeer). Na de inpoldering domineert de toestroming van zoet water vanuit de Veluwe, Utrechtse Heuvelrug en het IJsselmeer. Doordat inversies instabiel zijn, verdwijnen ze op de lange termijn onder natuurlijke omstandigheden. De metingen lijken aan te geven dat de aanwezigheid van een WKO dit proces ter plaatse kan versnellen.

3.1.4 Zettingen

De enige locatie waar zettingsmetingen zijn uitgevoerd is Beijum in Groningen. Hier is het maaiveld ongeveer 5 cm gedaald. Deze maaiveld daling is waarschijnlijk geheel of gedeeltelijk te relateren aan de thermische consolidatie van de kleilagen onder invloed van de opgetreden opwarming naar 60 °C. Vooral voor hoge temperatuur warmteopslagprojecten is het van belang rekening te houden met deze effecten (zie ook MMB rapport 6 - Hoge temperatuur warmteopslag).

3.2 Beoordeling geochemische gegevens

3.2.1 Effect van temperatuur

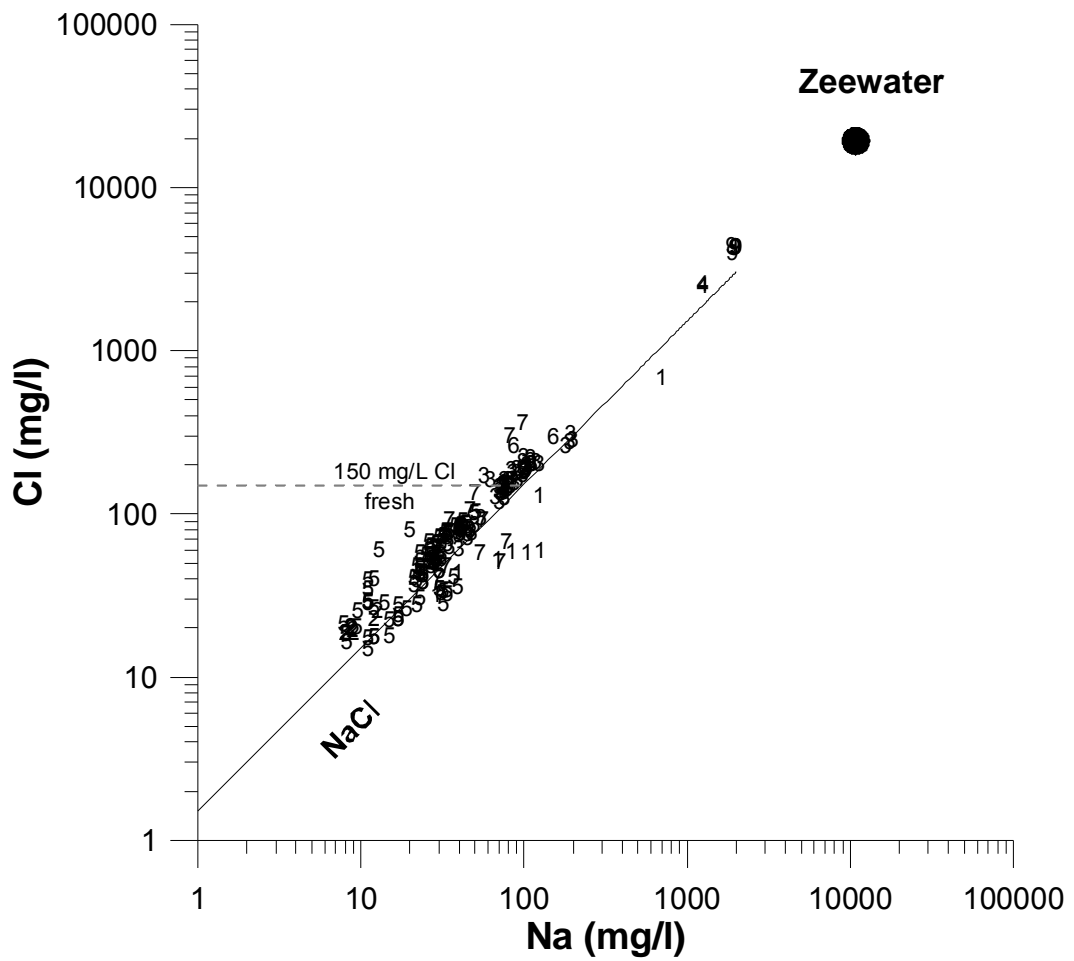
De effecten van temperatuur zijn gering binnen de temperatuursrange voor de MMB pilots. Op de locatie Heuvelgalerie waar sprake is van een range verschillende temperaturen kon wel naar de effecten van deze temperatuurverschillen op het kalkevenwicht gekeken worden omdat andere processen daar niet dominant waren. Deze relatie tussen het kalkevenwicht en de temperatuur volgde in grote mate de theoretisch voorspelde oplosbaarheid, zoals beschreven in paragraaf 2.2.1.1. Temperatuurseffecten op reactiesnelheden konden niet worden waargenomen, ook een uitwerking op theoretische gronden onderbouwt dat deze effecten te klein zijn om binnen de duur van MMB waar te nemen.

3.2.2 Effect van menging

Menging bleek de meest bepalende factor voor geochemische kwaliteitsveranderingen in het grondwater binnen een open WKO systeem. In de wijze van menging kunnen een drietal manieren onderscheiden worden:

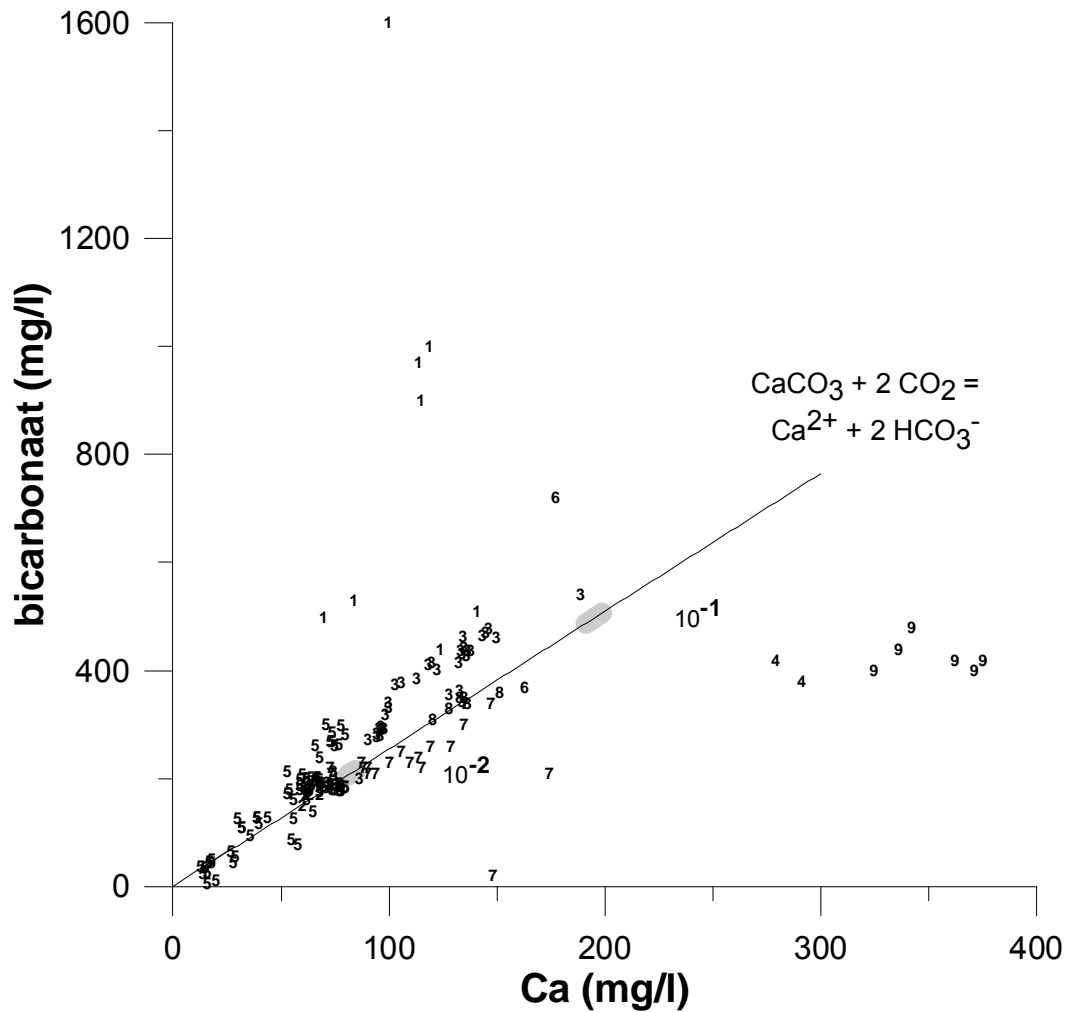
- De initiële menging van verschillende typen water die worden ingetrokken over de filterlengte bij opstarten van de WKO. Dit bepaalt de initiële samenstelling van het WKO water. Bij het aanwezig zijn van verticale verschillen wordt de bijdrage van deze kwaliteitsverschillen in het mengwater in hoge mate bepaald door de relatieve doorlaatbaarheid van de lagen die met deze kwaliteitsverschillen geassocieerd zijn. Bij het opstarten van Striip-S vond er duidelijk menging plaats met ondiep grondwater met een andere kwaliteit (o.a. inzichtelijk door verhoogde chlorideconcentraties).
- De continue instroom en vervanging van een deel van het WKO water door omringend achtergrondwater. Dit mengingstype wordt vooral bepaald door de relatieve snelheid van de regionale grondwaterstroming ten opzicht van de gebruikte pompdebieten. Ook hier zijn relatieve doorlatendheidsverschillen over het dieptetraject van het bronfilter van belang. Zo blijkt voor de langlopende WKO op de centrum locatie in Utrecht dat er relatief veel ondiep water, dat relatief sulfaat arm is, ingetrokken wordt.
- Menging die optreedt aan het front tussen het geïnjecteerde mengwater uit de WKO en het omringende grondwater tijdens infiltratie en onttrekking door longitudinale en transversale dispersieprocessen. Dit proces is vooral van belang bij voldoende contrast tussen de samenstelling van het mengwater in de WKO en de omringende grondwater kwaliteit. Dit proces is deels afhankelijk van de grondwaterstroomsnelheid en is afhankelijk van de, temporeel variërende, operationele condities van een WKO systeem. Dispersie draagt daarom bij aan de variatie van de mengwater samenstelling.

Van de drie door de TCB genoemde gradiënten (Paragraaf 2.2.3), wordt de significante menging van zoet met zout water (figuur 3.1) herkend op de locatie Beijum (hier gevolg van dichtheidstroming), Striip-S en locatie centrum Utrecht. Bij de laatste twee locaties is ondanks het algemeen zoete karakter van het water namelijk een merkbare verandering in de chloride concentraties gemeten. Daarnaast vind er ook significant menging plaats over hardheidsgradiënten (figuur 3.2) op de locatie centrum Utrecht en in mindere mate op de locaties Striip-S en Rosmalen. De geobserveerde watersamenstelling suggereert dat op de onderzochte locaties kalk in het sediment aanwezig is.



figuur 3.1

Zoet-zout plot: natrium concentraties tegen chloride concentraties, met aangegeven de samenstelling van zeewater en de veel gebruikte grens van 150 mg/L als overgang van zoet naar brak water. Nummers geven locaties weer: Beijum 1, Heuvelgalerie 2, Utrecht Centrum 3, Luttelgeest 4, Rosmalen 5, Rotterdam 6, Strijp-S 7, Uithof 8, Zwammerdam 9



figuur 3.2 Kalk plot: calcium concentraties tegen bicarbonaat concentraties, met aangegeven de samenstelling van de lijn van kalkoplossing bij verschillende koolzuurspanningen. De koolzuurspanning is aangegeven ter hoogte van 1% en 10% (10^{-2} en 10^{-1} atm). De grijs gearceerde gebieden zijn de gemodelleerde concentratieveranderingen door verschuiving van het kalkevenwicht (kalkneerslag) bij een temperatuur toename van 10 naar 20 graden bij deze koolzuurspanningen. Nummers geven locaties weer: Beijum 1, Heuvelgalerie 2, Utrecht Centrum 3, Luttelgeest 4, Rosmalen 5, Rotterdam 6, Strijp-S 7, Uithof 8, Zwammerdam 9

3.2.3 Algemene conclusies geochemie

Temperatuursverschillen hebben een geringe invloed op de geochemische waterkwaliteit van de bestudeerde WKO systemen en bijbehorende temperatuurranges. Daar waar de effecten op evenwichtschemie niet werden gemaskeerd door mengingseffecten, bleken gemodelleerde kwaliteitsveranderingen op basis van het theoretisch kader goed overeen te komen met de waarnemingen. Het theoretisch kader voor de kinetiek van reacties geeft voor de temperatuurranges van de beschouwde WKO systemen geen aanleiding tot het verwachten van significante kinetische temperatuurseffecten bij temperaturen < 20 °C en op een tijdschaal van <20 yr, met name als voor open systemen een thermische balans wordt verondersteld. Worden de temperatuurverschillen groter ($\Delta T > 20^\circ\text{C}$) of is er sprake van een onbalans in de temperatuur dan nemen de effecten van deze temperatuursverschillen toe. Zo zou bijvoorbeeld, bij een natuurlijke grondwater temperatuur van 10°C, een open WKO systeem met een verhoging in de warme bron van 10 naar 30 graden betekenen. Voor een energiebalans zou daar dan een afkoeling van 10 naar -10 graden moeten horen. Voor open systemen wordt in de praktijk de ondergrens van afkoeling echter beperkt door het vriespunt van water (0°C), en zal er dus een netto overschot aan warmte zijn. Met behulp van de theoretische modellen zijn ook hiervan de effecten op reactiesnelheden in te schatten.

Daar waar de effecten door temperatuurverschillen gering worden geacht in de beschouwde temperatuurranges voor de MMB locaties, is de potentie van mengeffecten aanzienlijk groter, met name aangezien deze effecten zich vrijwel instantaan na opstarten van een open WKO systeem kunnen presenteren. Hierbij kunnen ook a priori onbekende deelstromen met andere watersamenstellingen een bijdrage leveren aan de samenstelling van het mengwater (zoals bij Striip-S).

Het optreden van zoet-zout menging vindt redelijk conservatief plaats, afgezien van het optreden van kationuitwisseling. Voor het mengen over hardheidsgradiënten is dit echter anders. Vrijwel alle metingen in de verschillende MMB pilots wijzen op een grondwatersamenstelling die in evenwicht is met kalk. Voor een individuele locatie echter kunnen de bijbehorende koolzuurspanningen (pCO_2) in de vertikaal sterk uiteenlopen. Aangezien het mengen van grondwater met verschillende koolzuurspanningen altijd resulteert in water dat onderverzadigd is ten opzichte van kalk (zie Rapportage 2), leidt menging in deze gevallen tot het sneller oplossen van de in het aquifer sediment aanwezige kalkbuffer.

3.3 Biologische gegevens

In deze paragraaf wordt beschreven welke veranderingen in de microbiologie te vinden zijn in het grondwater op de verschillende WKO-locaties. Op basis van de moleculaire (DNA gebaseerde) analyses van de microbiologische (functionele) samenstelling worden de resultaten gepresenteerd. Hierbij zijn de volgende vragen gesteld:

- Zijn er verschillen in de aantallen en samenstelling van de microbiële populatie binnen en tussen WKO systemen?
- Zijn de verschillen het gevolg van verschillen in temperatuur en/of verschillen door menging?

- Zijn samenstelling en aantallen te koppelen aan specifieke condities (zowel fysisch als chemisch) op de meetlocaties?

3.3.1 Data analyse

Voor de interpretatie van de gegevens is gebruik gemaakt van een zogenaamde *principal component analyses* (PCA). Deze methode wordt gebruikt om te kijken welke variabelen sterk met elkaar correleren of tegenovergestelde effecten hebben. Bij de grafische weergave hiervan staat op de x-as de 1e *principal component*. Deze verklaart de meeste variatie tussen de punten. Lopen pijlen meer evenwijdig met de x-as, dan betekent dit dat de betreffende variabelen gecorreleerd zijn. Staan de pijlen haaks op de as, dan is er geen verband. Als pijlen in tegenovergestelde richtingen wijzen dan correleren ze negatief met elkaar.

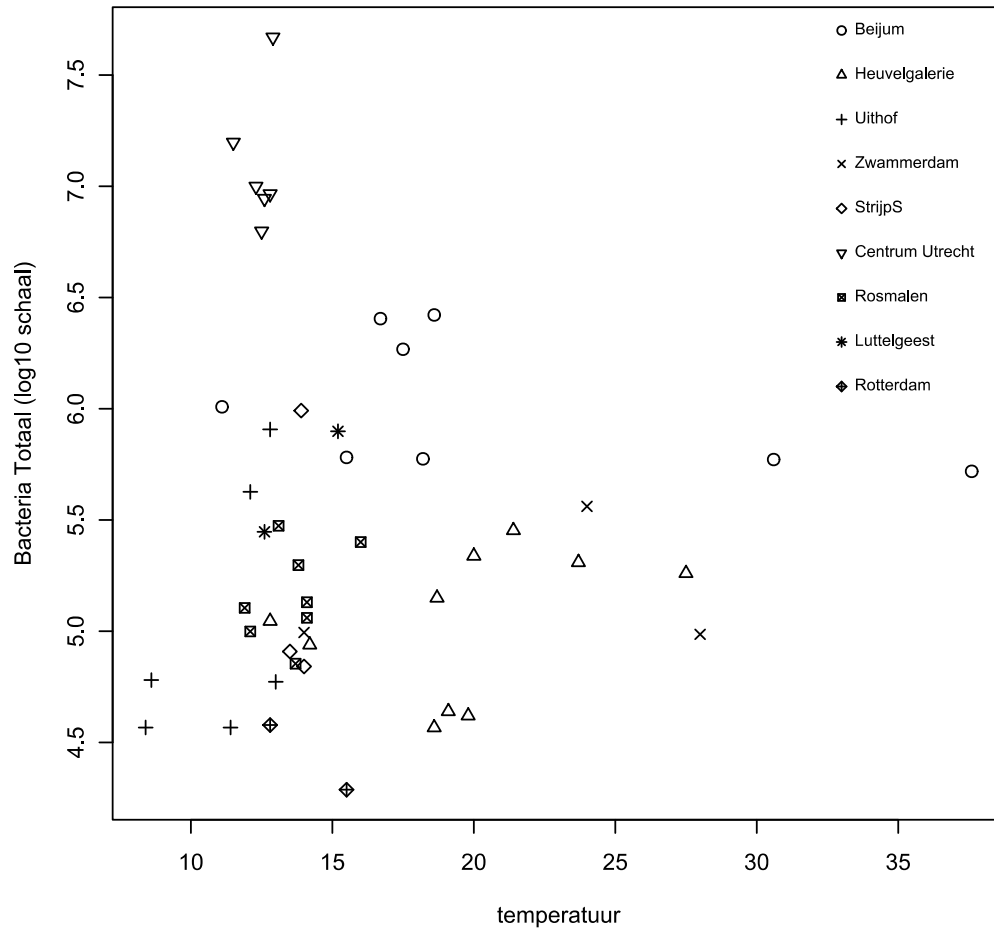
3.3.2 Effecten van temperatuur

Aantallen micro-organismen in relatie tot de temperatuur

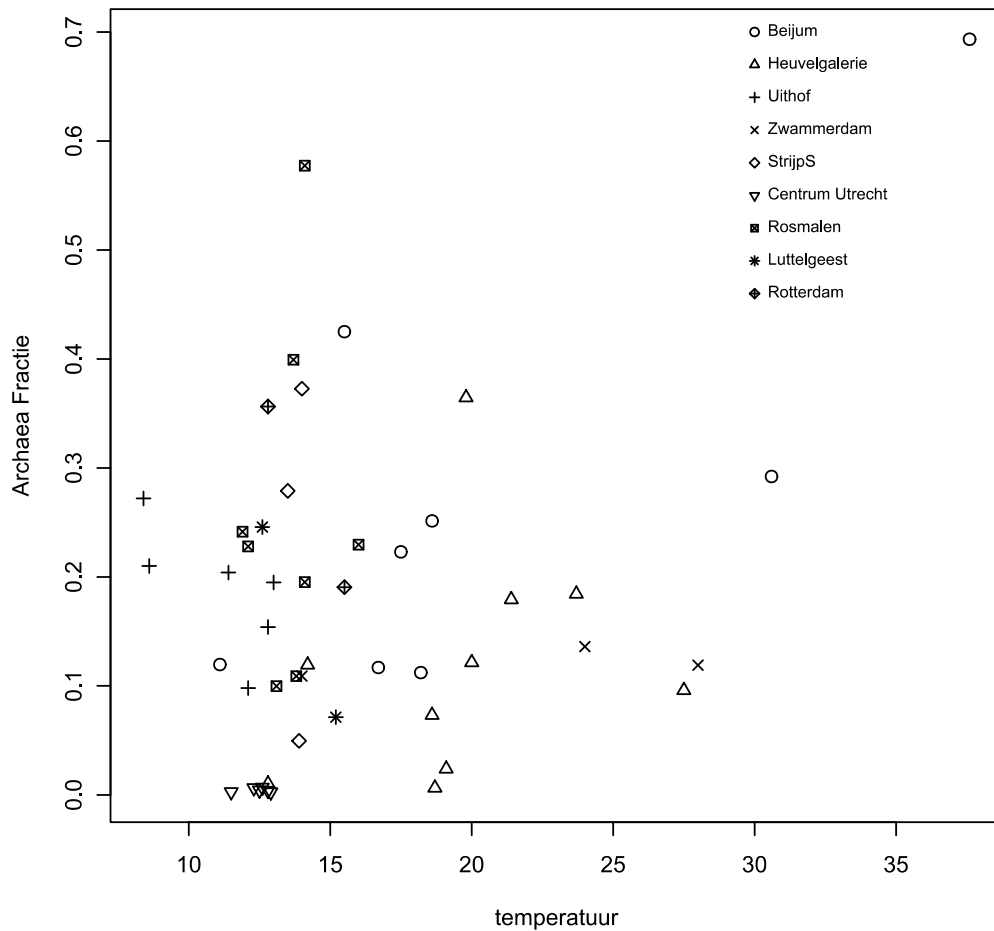
In theorie groeien bacteriën sneller als de temperatuur van hun omgeving wordt verhoogd. Daarbij hebben verschillende soorten bacteriën een optimale groeitemperatuur. Op basis van deze uitgangspunten is het mogelijk dat veranderingen in de temperatuur van de ondergrond leiden tot meer groei en dus meer biomassa. Daarnaast kan de verschuiving in temperatuur leiden tot een verandering van de samenstelling van de verschillende soorten micro-organismen. Daar verschillende soorten een verschillende functie in het ecosysteem vervullen kan deze verandering leiden tot verschuivingen in biologische omzettingen van stoffen. Dit kan gevolgen hebben voor de kwaliteit en stabiliteit van grond- en grondwater.

Binnen MMB is gekeken naar de effecten van temperatuur op de totale hoeveelheid micro-organismen (bacteriën en archaea) en de samenstelling van deze populatie.

De gevonden hoeveelheden bacteriën vertonen op basis van de nu beschikbare gegevens geen statistisch significante correlatie met de temperatuur, maar zijn primair afhankelijk van de bemonsterde locatie (zie figuur 3.3). Ook per locatie is geen statistisch significant verband te vinden tussen de temperatuur en de gevonden aantallen. In dit figuur zijn de gegevens van de bemonstering van beide meetronden opgenomen. Opvallend is dat de aantallen op de Centrumlocatie Utrecht erg hoog zijn. Dit is wellicht het gevolg van de aanwezigheid van verontreiniging op deze locatie. Verdere beschrijving van de resultaten op deze locatie zijn opgenomen in rapport 9. De aantallen op de locatie Rotterdam zijn erg laag, ondanks het feit dat hier voldoende TOC (organisch stof) wordt gemeten.

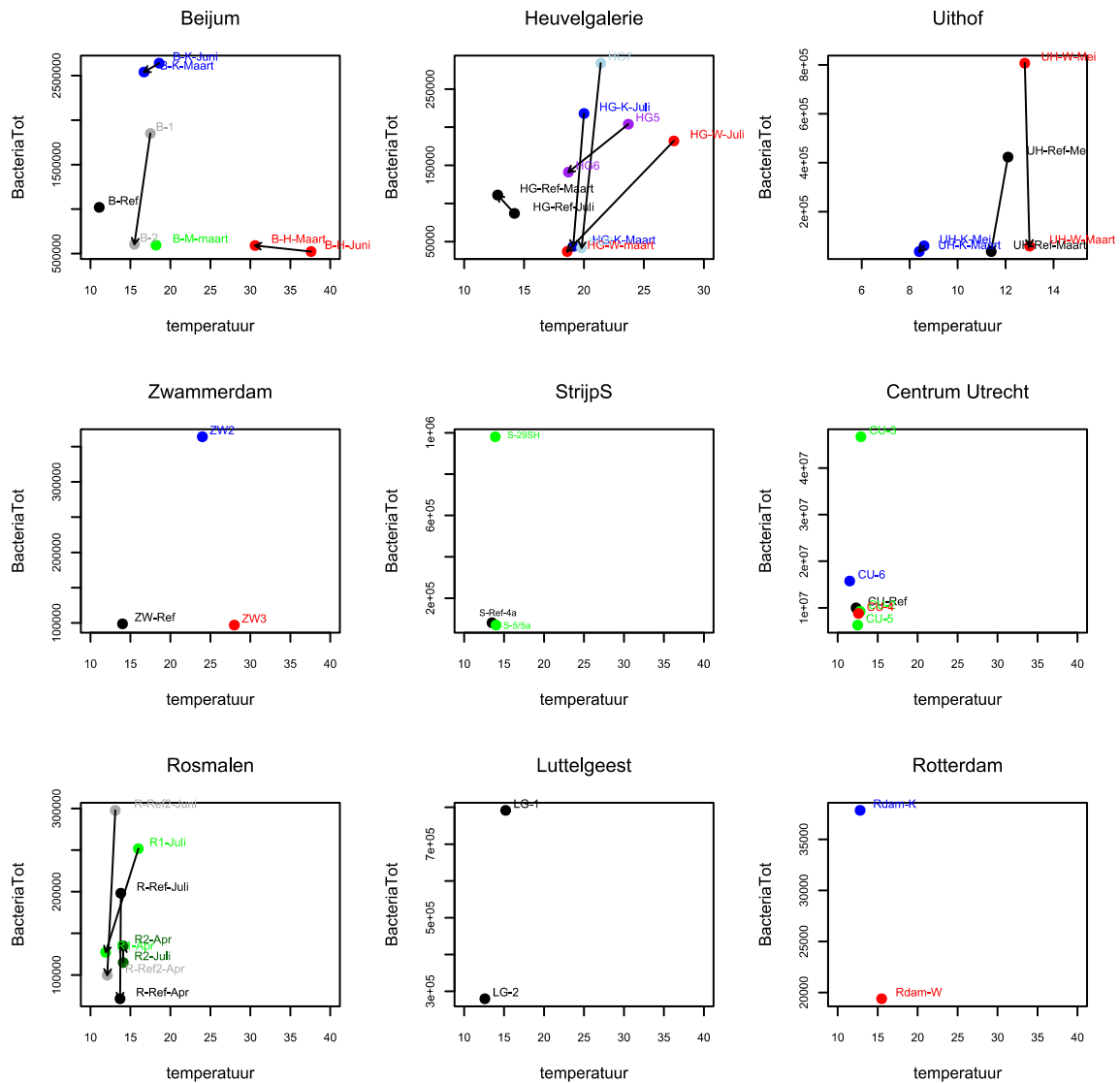


figuur 3.3 Totaal aantal bacteriën (log¹⁰ per ml grondwater) in relatie tot de temperatuur (°C) gemeten op de pilot locaties



figuur 3.4 Totaal relatieve aantal archaea ten opzichte van de temperatuur (°C) gemeten op de pilot locaties. Het relatieve aantal is gecorrigeerd ten opzichte van de concentraties bacteriën op de locatie

De relatieve hoeveelheid archaea (% ten opzichte van de totale hoeveelheid bacteriën) (figuur 3.4) ligt statistisch significant hoger bij een van de meetmomenten in de warme bron in Beijum. In figuur 3.5 is tevens een overzicht gegeven van de resultaten per locatie voor zowel de eerste als de tweede meetronde. In deze figuren is het verschil tussen meetrondes per peilbuis aangegeven met een zwarte lijn. Hoe langer de lijn hoe groter het verschil tussen de meetresultaten van de meetrondes.

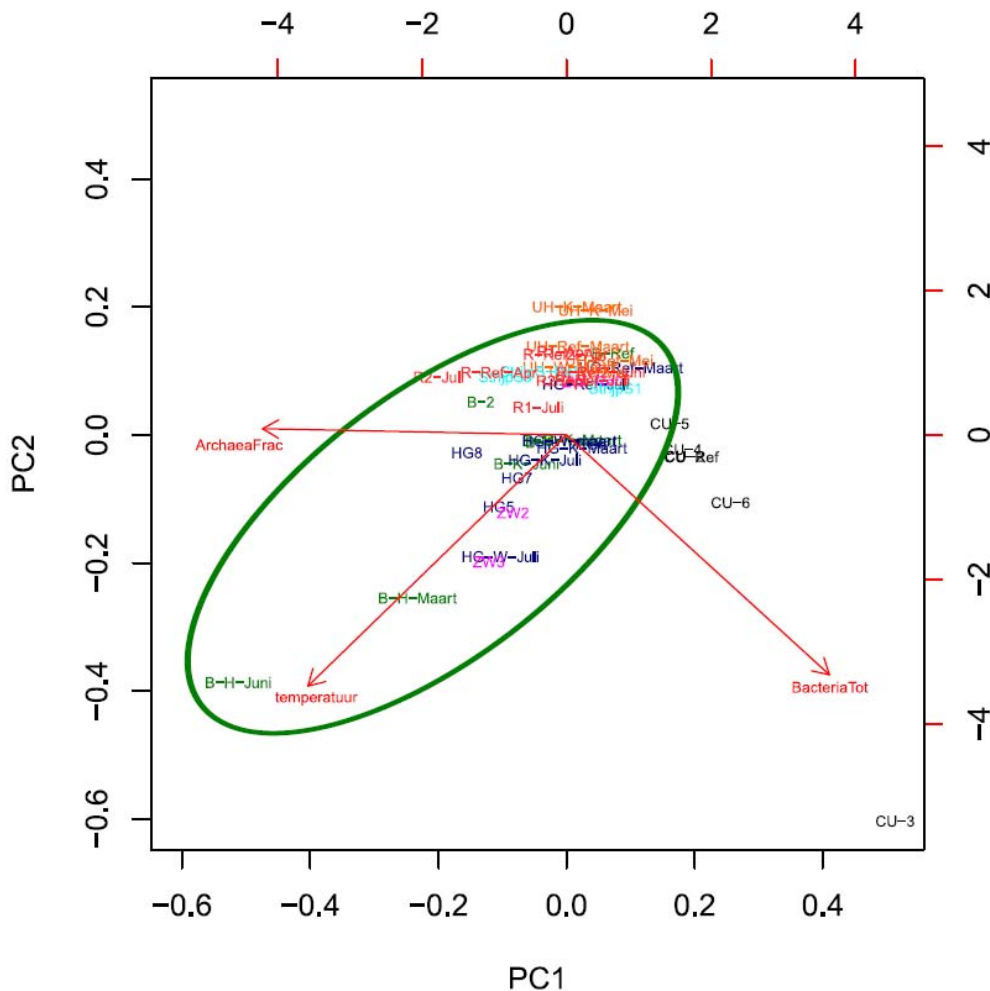


figuur 3.5 Overzicht van aantal bacteriën per locatie. In rood de warme bronnen, in blauwe de koude bronnen en in zwart de referentiepunten. De overige meetpunten zijn weergegeven in groen

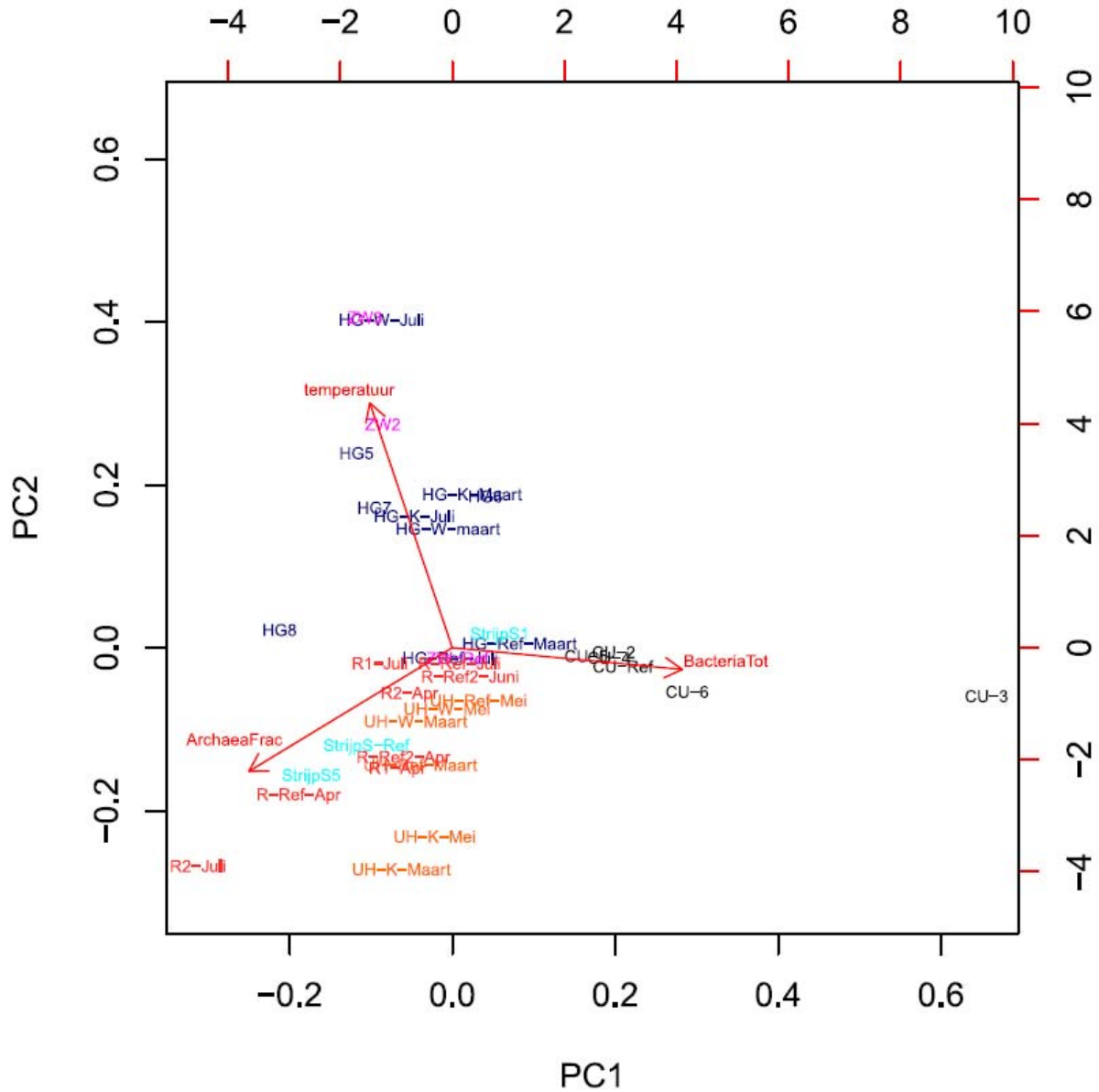
Meetresultaten van zowel de eerste als de tweede meetronde zijn geanalyseerd met de *principal component* (PCA) methode. In figuur 3.6 zijn de resultaten van alle locaties (ook verontreinigde) opgenomen. De uitkomsten van de analyse bevestigen het beeld na de eerste meetronde, namelijk dat er geen statistisch significante correlatie is tussen de temperatuur en het aantal bacteriën of archaea. Hierbij wordt duidelijk dat één meetpunt bij de hoogste temperatuur in het veld (Beijum, 39 graden bemonsterd in juni) een grote invloed heeft op de interpretatie van alle bacterie gegevens. Daarom is ook een analyse gemaakt zonder de gegevens van locatie Beijum (zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**)

Wordt het meetpunt in Beijum meegenomen in de analyse dan is een lichte positieve correlatie van de archaea met de temperatuur te zien. Met andere woorden, warmere meetpunten hebben relatief een beetje meer archaea. Wordt dit punt niet meegenomen, dan is er geen correlatie tussen de temperatuur en het aantal bacteriën en archaea. In de grafiek zonder de Beijum metingen is te zien dat de meetpunten per locatie een hogere correlatie hebben dan tussen de verschillende locaties. Ofwel tussen de locaties is meer verschil te zien dan binnen een locatie, ongeacht de verschillen in temperatuur op deze locatie.

Op de locatie Centrum Utrecht is sprake van een vrij hoge concentratie bacteriën mogelijk ten gevolge van de aanwezige verontreiniging. Hier is de relatieve concentratie archaea lager, mogelijk ten gevolge van competitie met de bacteriën die gebruik kunnen maken van de aanwezige verontreiniging.



figuur 3.6 Principal component analyse voor de relatie tussen de temperatuur en het aantal bacteriën en archaea op de pilot locaties. B= Beijum, HG=Heuvelgalerie, ZW=Zwammerdam, R=Rosmalen, RT=Rotterdam, UH=Uithof, CU=centrum Utrecht, Strijp-S=Eindhoven



figuur 3.7 **Principal component analyse voor de relatie tussen de temperatuur en het aantal bacteriën en archaea op de pilot locaties exclusief locatie Beijum. HG=Heuvelgalerie, ZW=Zwammerdam, R=Rosmalen, RT=Rotterdam, UH=Uithof, CU=centrum Utrecht, Strijp-S=Eindhoven**

De resultaten van de aantallen micro-organismen komen overeen met de bevindingen uit de literatuurstudie (rapport 2) waarin werd aangetoond dat de totale hoeveelheden van de biomassa op een locatie niet afhankelijk zijn van de temperatuur. Waar de metingen in de labtesten aangeven dat bij 30 graden sprake is van een invloed op de biologische activiteit (zie 4.4.6) zijn op de locatie Beijum significante verschillen in de biologische samenstelling waarneembaar op het warmste meetpunt bij 39 graden.

3.3.3 Aanwezigheid potentieel pathogene micro-organismen

In het project is onderzocht of potentieel pathogene micro-organismen in WKO systemen voorkomen en of de aantallen bij de verhoogde temperaturen (tussen de 20 en 40 graden) hoger zijn waardoor ze een risico kunnen opleveren. Hiertoe zijn vertegenwoordigers van drie groepen micro-organismen gemeten op de verschillende locaties. Het betreft hier de groep van Enterobacteriaceae en de bacterie *E. coli* als maat voor mogelijke fecale besmetting vanuit ondiep grondwater en rioleringen, de bacterie *Legionella pneumophila* als maat voor het voorkomen van pathogenen in het leidingstelsel en de anaerobe sporenvormende bacterie *Clostridium perfringens* als maat voor micro-organismen die zich lange tijd goed kunnen handhaven in zuurstofarme en nutriëntarme watervoerende pakketten.

Op alle locaties zijn metingen uitgevoerd om vast te stellen of er potentieel pathogenen van de Enterobacteriaceae groep of *E. coli* bacteriën aanwezig zijn. In het overgrote deel van de bemonsterde punten werden geen of zeer lage aantallen Enterobacteriaceae aangetroffen (maximale aantallen: 26 kopieën/ml in Beijum en 27 kopieën/ml in Centrum Utrecht). *E.coli* werd op geen enkele locatie gemeten.

In Rosmalen zijn door Brabant Water metingen uitgevoerd op potentieel pathogene Enterococci met behulp van kweekmethoden. Ook hier werden in slechts een paar monsters zeer lage aantallen gevonden. Deze metingen duiden er op dat op deze locaties geen sprake is van contact met rioolwater of introductie van besmet ondiep grondwater.

Metingen voor *Legionella pneumophila* en *Clostridium perfringens* zijn uitgevoerd op de locaties Beijum, Heuvelgalerie en Uithof. In een monster op de locatie Beijum werd in 1 monster het zeer lage aantal van 1,7 gen kopieën/ml *Clostridium perfringens* aangetroffen. In alle andere monsters waren beide pathogenen afwezig. Deze metingen bevestigen de eerdere observaties dat *Legionella* niet goed overleeft onder de condities op de bemonsterde locaties en dat er geen risicovolle hoeveelheden *Clostridium perfringens* op de onderzochte locaties zijn aangetroffen.

In eerdere monitoringsrondes zijn op ondiepe locaties (zoals de Uithof en de High Tech Campus Eindhoven) wel *E.coli* aangetroffen, maar op de diepe locaties (Lelystad) niet.

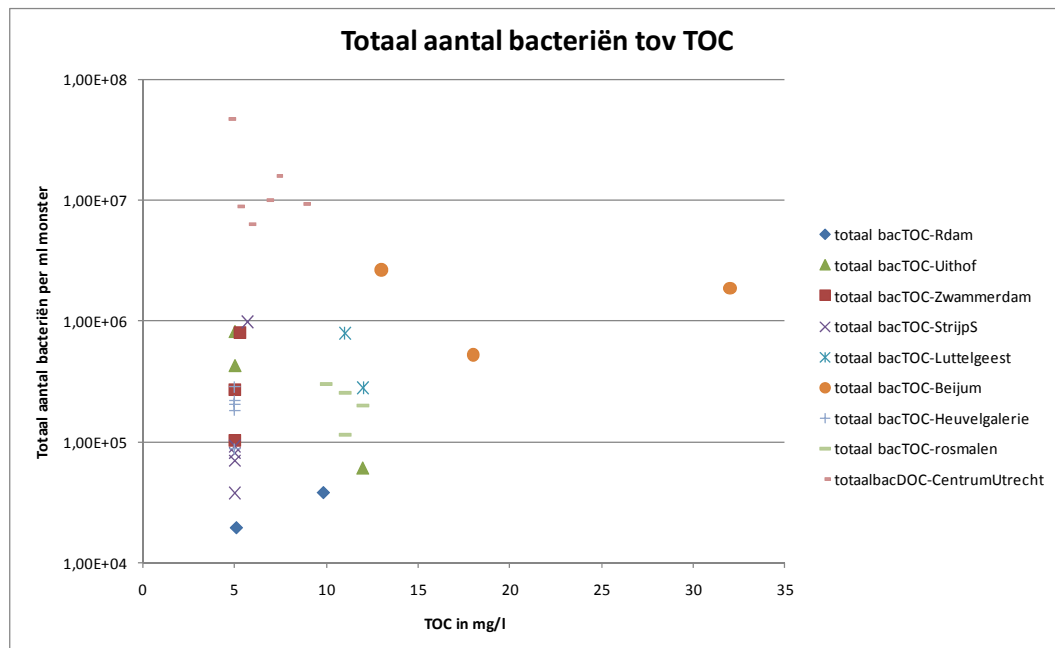
3.3.4 Aantallen micro-organismen in relatie tot de concentratie organisch stof

Naast effecten van temperatuur en menging is de hypothese gesteld dat de hoeveelheid en samenstelling van de microbiologische populatie wordt beïnvloed door de concentratie en kwaliteit van de beschikbare organische stof. De beschikbare organische stof kan dienst doen als koolstof en energiebron. De bepaling van de TOC, totale hoeveelheid organische stof geeft inzicht in de mate waarin deze koolstof en energiebron beschikbaar is, maar geeft geen informatie over de kwaliteit (bruikbaarheid) ervan.

Er werd voor de meetpunten van de in de eerste ronde bemeeten locaties geen relatie gevonden tussen de hoeveelheid bacteriën die op een locatie aanwezig is en de concentratie TOC ter plaatse (figuur 3.8). Dit beeld werd in de tweede ronde bevestigd (data niet toegevoegd).

Uit de labtesten (Hoofdstuk 4) is gebleken dat indien er organisch stof aan de bodem gebonden is deze wel beschikbaar kan komen bij verhoging van de temperatuur naar meer dan 30 °C. Indien het een arme zandbodem betreft komt er geen extra organisch materiaal vrij. Dit kan verklaren waarom bij verhoogde temperaturen op de meeste locaties toch geen toename in organisch stof gemeten wordt.

Uit eenvoudige schudproeven blijkt verder dat schudden (als simulatie voor maximale menging) tot een verhoogde beschikbaarheid van het organisch koolstofgehalte in de waterfase kan leiden (hoofdstuk 4). Een toename van temperatuur tot 30°C leidt niet tot een sterke verhoging in beschikbaarheid van het organisch koolstofgehalte in de waterfase, wat overeenkomt met de bevindingen in de literatuurstudie. Een toename in de temperatuur tot 50°C leidt wel tot een significante toename van het organisch koolstofgehalte in de waterfase. Deze wordt verder versterkt bij schudden. Het is overigens niet uit te sluiten dat het schudden, door de schurende werking van de korrels, zorgt voor het vrijkomen van organische koolstof.



figuur 3.8 Totaal aantal bacteriën (per ml grondwater) ten op zichte van organisch stof gehalte (TOC)

3.3.5 Aantallen functionele genen versus geochemische condities en temperatuur

Mogelijk hebben de temperatuur en het mengen van het grondwater invloed op het functioneren van de verschillende nutriëntencycli in de bodem en in het grondwater. De reden hiervoor is dat de verschillende micro-organismen verschillende optimale groeitemperaturen hebben. Bij verandering van de temperatuur kan een ander deel van de populatie dominant worden en kunnen andere soorten verdrongen worden. Daarnaast kan de temperatuur andere geochemische omstandigheden tot gevolg hebben die ook de groeisnelheden van micro-organismen beïnvloeden. Daarnaast heeft het mengen van grondwater tot gevolg dat concentraties stoffen in het water door homogenisatie veranderen en andere redoxcondities kunnen optreden. Het functioneren van nutriëntencycli is mede bepalend voor de kwaliteit van het grondwater. Veranderingen in de mate waarin processen in deze cycli optreden hebben dus mogelijk effect op de grondwaterkwaliteit en zijn daarom van belang om in kaart te brengen.

Om inzicht te krijgen in het optreden van deze processen zijn verschillende functionele eigenschappen van micro-organismen gemeten. Naast de temperatuur en de concentratie koolstofbron spelen ook de aanwezigheid van geschikte elektronen-donoren of elektronen accepterende stoffen (redoxconditie) een rol.

Uit de literatuurstudie blijkt dat de *samenstelling* van de biomassa in tegenstelling tot het *aantal* micro-organismen, wel door temperatuursverschillen kan worden beïnvloed (zie hoofdstuk 7 van de Literatuurstudie in rapport 2).

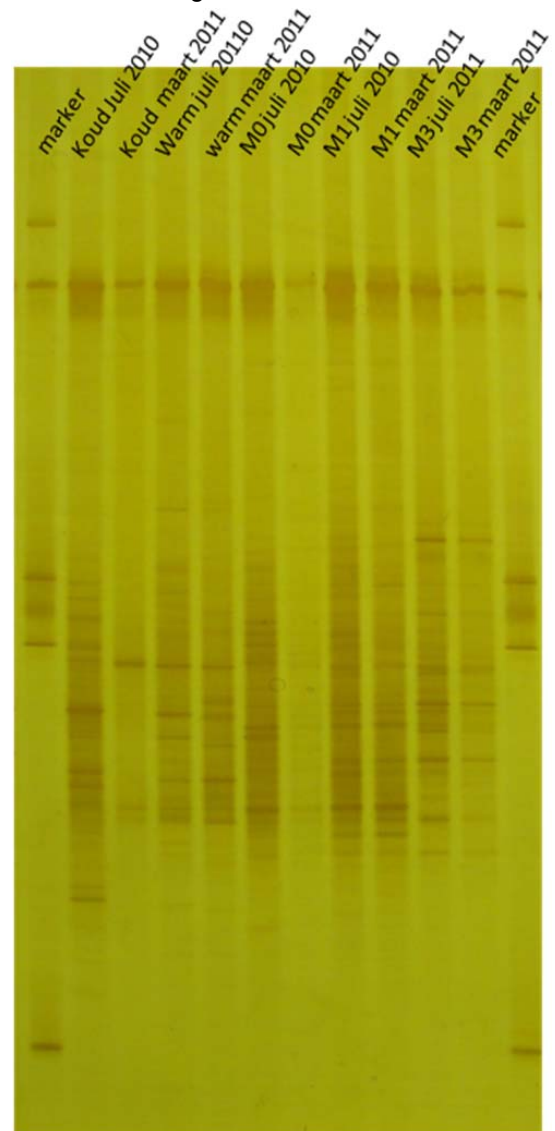
De analyse van de data laat zien dat er geen grote verschillen in de samenstelling van de microbiële populatie/ aanwezigheid op basis van de functionele eigenschappen aanwezig zijn. Op een aantal meetpunten zijn wel aanwijzingen gevonden voor beperkte verschillen. Deze zijn per locatie in meer detail besproken (zie hoofdstuk 5).

3.3.6 Biodiversiteit

Voor het bepalen van mogelijke veranderingen in de biodiversiteit is gebruik gemaakt van een zogenaamde DGGE analyse. Met deze techniek wordt een soort fingerprint/ streepjescode patroon van soorten micro-organismen in een monster verkregen.

Elk streepje vertegenwoordigt een soort, de plaats waar het streepje zich bevindt zegt niet iets over de soort zelf maar elke soort komt wel op een unieke plek in de gel terecht. Zitten streepjes dus op verschillende plekken tussen monsters dan is er sprake van verschillende soorten. De methodiek geeft alleen zicht op de soorten die het meest in het monster voorkomen en is semikwantitatief (dikke bandjes= meer van deze soort dan dunne bandjes).

Uit de resultaten (figuur 3.9) blijkt dat de soortendiversiteit locatiespecifiek is, het bandenpatroon ziet er in Beijum anders uit dan bij Heuvelgalerie of Zwammerdam (zie voor overige gel-informatie bijlage 4). Verder is het patroon ook meetpuntspecifiek. Het verschil in diversiteit is groter tussen bv de warme en koude bron dan binnen een en dezelfde bron op verschillende tijdstippen. Er zijn niet significant meer of minder soorten aanwezig bij de verschillende temperaturen.



figuur 3.9 DGGE gel op basis van soortspecifieke bacteriële 16S rDNA gebaseerde pcr producten. Monsters behorende bij locatie Heuvelgalerie

3.3.7 Algemene conclusies voor de biologie

De gevonden hoeveelheden en samenstelling van de bacteriën en archaea vallen in het bemeten temperatuurbereik (tussen 11 en 35 graden Celsius) binnen de natuurlijke variatie die zowel binnen als buiten de WKO gemeten worden. Er kan daarom geen specifiek effect van de temperatuur worden vastgesteld. De hoeveelheden en samenstelling zijn primair afhankelijk van de bemonsterde locatie. De locatie Beijum vormt hierop een uitzondering. Op het warmste punt van deze locatie zijn afwijkende waarden gevonden deze worden besproken in paragraaf 5.1.

Er zijn op slechts enkele locaties zeer lage aantallen pathogenen (waaronder *Clostridium*) aangetroffen. Deze aantallen blijven ver onder de toegestane normen voor bijvoorbeeld oppervlakte water en vormen dus geen aanvullend risico. *Legionella pneumophila* werd op geen enkele van de locaties aangetroffen, wat overeen komt met de verwachting op basis van de literatuurstudie.

Er zijn geen directe correlaties gevonden tussen de concentraties TOC (koolstofbron voor micro-organismen) en de hoeveelheid micro-organismen die op de locaties werden aangetroffen. De concentraties TOC op de gemeten locaties zijn over het algemeen laag of van onvoldoende kwaliteit en vormen mogelijk de beperkende factor voor microbiologische groei. De verontreinigde locatie vormen hierop een uitzondering: uit de metingen op de verontreinigde locaties (rapport 9) blijkt namelijk dat bij een toename van de concentratie TOC een toename van het totaal aantal bacteriën waargenomen wordt.

Op basis van de metingen zijn geen statistisch significante relaties gevonden tussen de aanwezigheid van de verschillende functionele eigenschappen en de heersende temperatuur of geochemische condities.

3.4 Algemene conclusies per locatie

3.4.1 Beijum

Bij het project Beijum wordt sinds 1984 warmte van 60 °C opgeslagen met behulp van verticale bodemwarmtewisselaars. De grondwaterkwaliteit wordt niet alleen beïnvloed door de temperatuurveranderingen, maar ook de dichtheidsgedreven grondwaterstroming die daarvan het gevolg is. Op basis van de grondwateranalyses te Beijum kan gesteld worden dat verzoeting van het aanwezige grondwater optreedt. Uit de fysische metingen (zie bijlage 2) blijkt dat in eerste instantie verzilting heeft plaatsgevonden, wat te verklaren is door het optreden van dichtheidsgedreven grondwaterstroming door de opwarming (opwaarts transport van grondwater met een hoger zoutgehalte van grotere diepte). Mogelijk leidt de hogere temperatuur ook tot enige kalkneerslag, dit effect kon echter niet onderscheiden worden.

Op de locatie is sprake van beperkte effecten op de biologie, met uitzondering van het warmste punt, hierbij vindt een verschuiving in de populatiesamenstelling plaats die echter geen significante gevolgen heeft voor het functioneren van de (micro)biologische kringloopprocessen. Zie tevens 5.1.

3.4.2 Heuvelgalerie

Op de locatie Heuvelgalerie waar sprake is van een range verschillende temperaturen kon naar de effecten van deze temperatuurverschillen op het kalkevenwicht gekeken worden omdat andere processen daar niet dominant waren. Deze relatie tussen het kalkevenwicht en de temperatuur volgde in grote mate de theoretisch voorspelde oplosbaarheid, zoals beschreven in paragraaf 2.2.1.1.

Op de locatie zijn metingen uitgevoerd aan een uitgebreide set van micro-organismen en genen die betrokken zijn bij (micro)biologische kringloopprocessen. De totale aantallen bacteriën en archaea zijn vergelijkbaar met hoeveelheden die ook op het merendeel van de andere locaties zijn aangetroffen. Er werden geen potentieel pathogene micro-organismen aangetroffen. Zie tevens paragraaf 5.2.

3.4.3 Luttelgeest

De 2 beschikbare analyses wijzen niet op het optreden van verzoeting of verzouting of andere processen. De totale aantallen bacteriën (10^5 /ml) en archaea zijn vergelijkbaar met hoeveelheden die op het merendeel van de andere locaties zijn aangetroffen. Het temperatuur verschil tussen de meetpunten is klein, 15,2 °C versus 12,6 °C. Op de gemeten locaties is het betreffende watervoerende pakket sulfaatreducerend tot methanogeen. In de onttrekking (12,8 °C) zijn de concentraties methaan hoger en worden significant meer sulfaat reduceerders en methanogenen aangetroffen dan in de infiltratie bron. De data is gebruikt in de overkoepelende analyses maar door de afwezigheid van een goed referentiepunt is er onvoldoende informatie voor verdieping op deze locatie.

3.4.4 Rosmalen

Ondiep grondwater relatief rijk aan sulfaat en chloride en met verhoogde nikkelconcentraties wordt in de WKO ingetrokken en gemengd met dieper grondwater. Door de menging zijn de nikkelconcentraties in het WKO water sterk verlaagd ten opzichte van het ondiepe grondwater. Deels zal dit ook komen door adsorptie aan mineraaloppervlakken in het sediment volume dat door het WKO water wordt doorstroomt.

Uit de kweek en moleculaire analyses blijkt dat het totale aantal micro-organismen variëren en dat de mate waarin dit gebeurt niet te koppelen is aan de werking van de WKO, maar dat de fractie die makkelijk groeit en kweekbaar is wel selectief door de WKO wordt gestimuleerd. Zie tevens paragraaf 5.4.1.

3.4.5 Rotterdam

De 2 beschikbare analyses wijzen niet eenduidig op het optreden van verzoeting of verzouting of andere processen. Op de locatie Rotterdam zijn metingen uitgevoerd aan een uitgebreide set van micro-organismen en genen die betrokken zijn bij (micro)biologische kringloopprocessen. De totale aantallen bacteriën (10^4 /ml) en archaea zijn laag in vergelijking met hoeveelheden die op het merendeel van de andere locaties zijn aangetroffen. Deze lage waarden zijn niet te verklaren uit bijvoorbeeld lage concentraties TOC omdat deze op de locatie met waarden van (9,8 en 5,1 mg/l) in voldoende mate aanwezig zijn. Het temperatuurverschil tussen de meetpunten is klein, 12,8 °C versus 15,5 °C. Op de gemeten locaties is het betreffende watervoerende pakket sulfaatreducerend tot methanogeen.

De data is gebruikt in de overkoepelende analyses, maar door de afwezigheid van een goed referentiepunt maakt is er onvoldoende informatie voor verdieping op deze locatie.

3.4.6 Uithof

Dit is een vrij homogeen systeem, een analyse van kalkevenwicht en zoet-zout concentraties geven geen aanwijzingen voor het optreden van significante effecten door dit WKO systeem. De variatie in de hoeveelheid biomassa tussen de beide meetmomenten is het grootste in de warme bron, de mate van variatie is groter dan in de referentie. In de koude bron is de variatie lager.

3.4.7 Zwammerdam

Bij dit systeem is in de periode 1998-2003 warmte van 80 à 90 °C opgeslagen. Sinds 2004 is het systeem niet meer in gebruik. Sindsdien is de temperatuur in de warme bron teruggezakt tot onder de 30 °C. Uit de metingen die in 2011 op de locatie zijn uitgevoerd blijkt dat de aantallen micro-organismen (zowel totale aantallen als functies) in de warme en koude put niet significant afwijken van de aantallen in de referentie. Er zijn wel verschillen in biodiversiteitspatroon tussen de referentie en de 'koude' en 'warme' bron. Het aantal verschillende soorten lijkt niet of nauwelijks te zijn verminderd (zie DGGE gel bijlage 3). Dit betekent dat het systeem zich niet heeft hersteld tot de exacte situatie voorafgaand aan de plaatsing van de WKO maar dat het wel weer in staat lijkt dezelfde functies uit te oefenen. Zie tevens paragraaf 5.3.

Verhoogde chloride en calcium concentraties reflecteren het toevoegen van zoutzuur bij deze hoge temperatuuropslag, verder wordt deze locatie besproken in rapportage voor hoge temperatuur opslag (HTO, Rapport 6)

4 Labtesten: effecten van temperatuur en menging

4.1 Achtergrond en opzet labexperimenten

Uit literatuuronderzoek is gebleken dat een temperatuurverhoging de microbiële afbraak versnelt. Bij hogere temperaturen (45°C) wordt organisch materiaal gemobiliseerd waardoor onder meer het opgelost organisch koolstof- en chemisch zuurstofverbruik in het grondwater toeneemt (zie ook de Literatuurstudie in rapport 2). Verder blijkt dat de microbiële populatie sterk verandert bij een grote verandering in temperatuur (zie ook de Literatuurstudie, rapport 2). Deze effecten treden mogelijk ook op bij de aanwezigheid van een WKO-systeem.

Naar aanleiding van praktijkvragen en inzichten vanuit de in de literatuur beschreven kennis zijn in het projectplan hypothesen opgesteld met betrekking tot de bovenstaande effecten. Een aantal van deze hypothesen zijn onderzocht met veldmetingen (hoofdstuk 2), terwijl voor andere hypothesen laboratoriumtesten nodig zijn, zoals beschreven in dit hoofdstuk. In het veld worden de effecten in de praktijk gemeten, maar is sprake van een complex systeem met meerdere invloedsfactoren die gelijktijdig een rol spelen. Het voordeel van labtesten is dat hierbij sprake is van gecontroleerde omstandigheden, zodat het effect van één van de variabelen (bv. de temperatuur) separaat kan worden onderzocht. Met behulp van een aantal labtesten willen we antwoord geven op een aantal onderzoeksvragen.

Er zijn twee typen laboratoriumtesten uitgevoerd, namelijk schudproeven en incubatie-experimenten. Met schudproeven kan in een relatief korte tijd inzicht worden verkregen in de hoeveelheid organisch stof dat maximaal vrij te maken is uit de bodemmatrix bij verschillende temperaturen. Met incubatie-experimenten wordt het effect van temperatuur op de microbiologische samenstelling bepaald.

4.2 Grondmonsters labtesten

Om de hier genoemde testen te kunnen uitvoeren zijn monsters genomen van grond en grondwater. Voor deze anaerobe labexperimenten is het van belang dat het materiaal anaeroob wordt bemonsterd, vervoerd, bewaard en opgewerkt. De beste methode voor het ongeroerd bemonsteren van grond is door gebruik te maken van steekbussen. Voor het uitvoeren van de labtesten is gebruik gemaakt van grond en grondwater van de locatie Den Bosch. De grondmonsters zijn genomen tijdens het plaatsen van een peilbuis (in het kader van een aan te leggen meetnet).

In Den Bosch zijn peilbuizen tot een diepte van 80 m-mv geplaatst. Tijdens het plaatsen van (een deel) van deze peilbuizen zijn grondmonsters genomen voor het uitvoeren van labtesten. De grond van een van de niet verontreinigde locaties is gebruikt voor het inzetten van de intrinsieke batchtesten.

4.3 Schudproef voor het inschatten van potentiële mengingseffecten

4.3.1 Doel schudproef

Het doel van deze testen is om antwoord te krijgen op de vraag hoeveel organisch stof er minimaal en maximaal vrij kan komen uit de bodemmatrix door het effect van mengen. Deze organische stof kan dienen als voedingsbron voor de microbiologie en daardoor afbraak processen van gechlloreerde koolwaterstoffen bevorderen. Met deze proef wordt getracht om een eerste inzicht te krijgen in het antwoord op hypothesen 2 en 3.

4.3.2 Aanpak en metingen schudproef

Er zijn een aantal schudproeven uitgevoerd met grondmonsters met twee verschillende organisch stof percentages:

- Monster A: organisch stof gehalte minder dan 0,5%
- Monster B: organisch stof gehalte 6%

Grond met een hoog organisch stof percentage is niet representatief voor de diepere watervoerende pakketten waarin WKO-systemen voornamelijk opereren. Monster B is daarom opgemaakt uit een deel van monster A en een deel van een monster uit een ondiepere veenlaag van dezelfde locatie. In deze testopzet is grond met een hoog organische stof percentage gebruikt, omdat verwacht wordt dat in dit geval grotere en dus beter meetbare effecten zullen optreden, waarmee inzicht wordt verkregen in de maximale beschikbaarheid. De testen zijn ingezet met demiwater.

De test is uitgevoerd onder statische (geen menging) en dynamische omstandigheden (maximaal schudden/ continue mengen). Tijdens de dynamische proef zijn de flessen gedurende 7 dagen bij 150 rpm (rounds per minute) geschud. De testen zijn bij vier verschillende temperaturen ingezet: 10°C, circa 18°C (kamertemperatuur in het lab), 30°C en 50°C. In tabel 4.1 is de opzet schematisch weergegeven.

tabel 4.1 Testopzet stap 1: schudproef

Batch	Organische stof	10°C *		18°C		30°C		50°C *	
		Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch	statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
A-1	<0,5%	X	X	X	X	X	X	X	X
B-1	6%	X	X	X	X	X	X	X	X

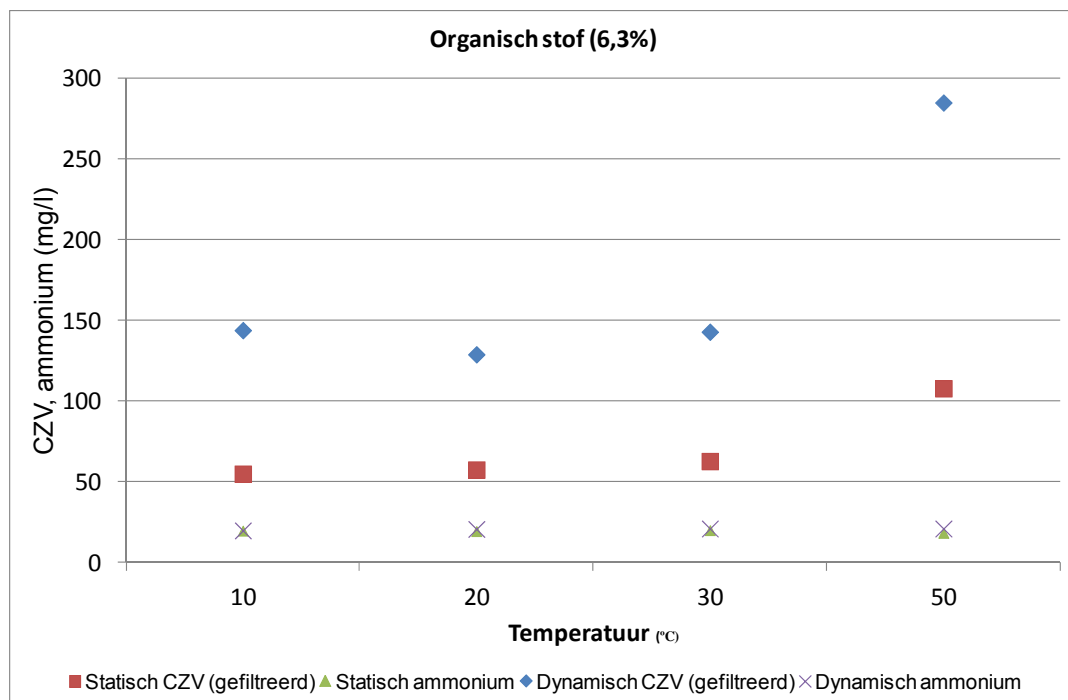
* Uitgebreid ten opzichte van het oorspronkelijke meet- en monitoringsplan

Bij aanvang en aan het eind van de incubatie (na een week) zijn analyses uitgevoerd op opgelost CZV (chemisch zuurstof verbruik als maat voor de beschikbare hoeveelheid organisch materiaal), ammonium en *ortho*-fosfaat. Deze analyses zijn uitgevoerd op gefiltreerde monsters van de gedecanteerde waterfase.

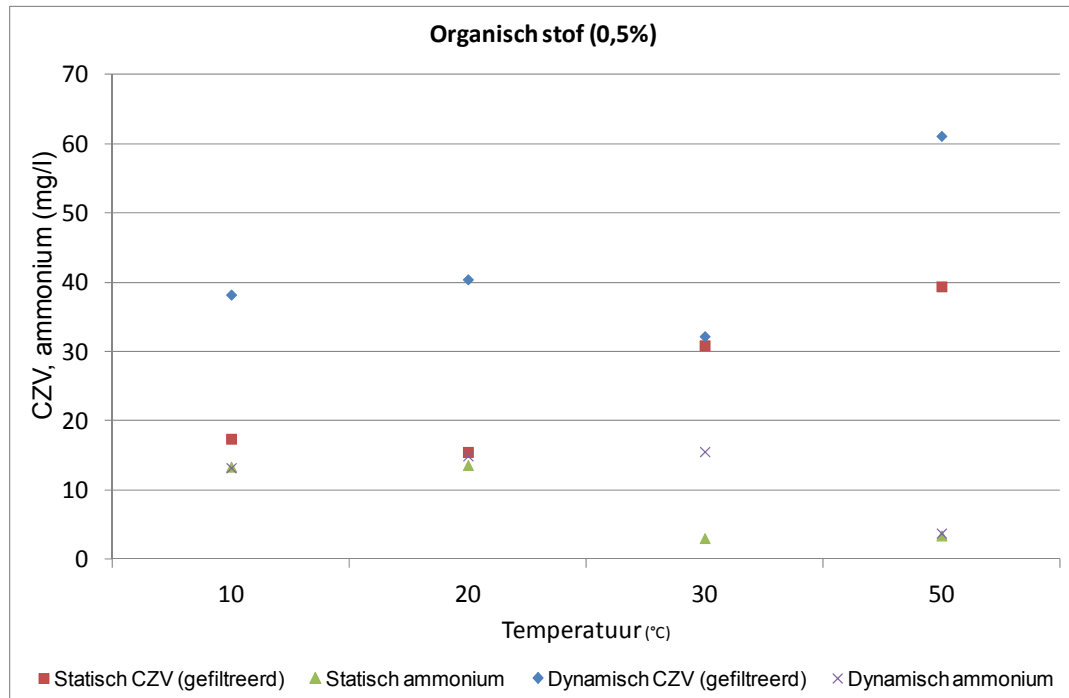
Met deze test wordt een indicatie verkregen over hoeveel organische stof er maximaal vrij kan komen uit de bodemmatrix door mengen/schudden en als effect van verhoging van de temperatuur. Ook wordt een indicatie gekregen over welk van deze twee parameters het grootste effect oplevert. Op basis hiervan worden in het kader van het aio onderzoek bij de WUR vervolg proeven (kolomtesten) gedimensioneerd.

4.3.3 Resultaten uitschudproef

De resultaten van de schudproeven zijn weergegeven in figuur 4.1 voor de resultaten van de 6% organisch stof test (B) en in figuur 4.2 voor de resultaten van de 0,5% organisch stof test (A).



figuur 4.1 Resultaten schudproef met grondmonster B (organisch stof 6%)



figuur 4.2 Resultaten schudproef met grondmonster A (organisch stof <0,5%)

De CZV concentraties van de dynamische geschudde batches met grondmonster B (met organisch stof gehalte van 6,3%) liggen allen een factor twee hoger dan de CZV concentraties van de statische proef. De resultaten van de ammonium-meting zijn in alle gevallen aan elkaar gelijk. Er is nagenoeg geen *ortho*-fosfaat in de grondwatermonsters aangetroffen (gegevens niet weergegeven). Uit de resultaten van test B blijkt dat het verhogen van de temperatuur (tot 30°C) en het al dan niet mengen geen invloed heeft op het ammoniumgehalte. Daarentegen neemt het CZV gehalte met circa een factor twee toe in het geval van schudden, daarbij is geen effect meetbaar van de temperatuur (tot 30°C). Bij een temperatuur van 50°C zowel in de statische als in de dynamische proef sprake van een toename van de CZV concentratie met ongeveer een factor 2 ten opzichte van de concentraties bij 30°C. Schudden en een temperatuurstijging tot circa 50 °C verhoogt de concentratie opgeloste CZV met ongeveer een factor 5.

Uit de resultaten blijkt dat het sterk schudden van een grondmonster een groter effect heeft op het vrijkomen van (organisch) materiaal dan het verhogen van de temperatuur tot 30°C. Deze observatie wordt in de batch bij 10°C en 20°C met grondmonster A (0,5% organisch stof) bevestigd. Het effect van sterk schudden is groter dan het effect van de temperatuur op het vrijkomen van (organisch materiaal). In het geval van 50°C is echter niet alleen menging maar ook de temperatuur van invloed op de concentratie CZV in de waterfase. Ook deze observatie wordt in de test met grondmonster A (0,5% organisch stof) bevestigd.

4.3.4 Conclusie schudproef

Uit deze eenvoudige schudproeven kan worden geconcludeerd dat schudden tot een verhoogde beschikbaarheid van het organisch koolstofgehalte in de waterfase kan leiden. Een toename van temperatuur tot 30°C leidt niet tot een sterke verhoging in beschikbaarheid van het organisch koolstofgehalte in de waterfase, wat overeenkomt met de bevindingen in de literatuurstudie. Een toename in de temperatuur tot 50°C leidt wel tot een significante toename van het organisch koolstofgehalte in de waterfase. Deze wordt verder versterkt bij schudden.

4.3.5 Conclusie voor de praktijk

Bij het opwarmen van de bodem boven de 30°C in combinatie met het rondpompen van het grondwater kan organisch stof vrijgemaakt worden. Dit organisch stof kan dienen als voedingsstoffen voor micro-organismen of kan redoxreacties aangaan met andere chemische componenten. Dit kan leiden tot extra groei en activiteit door micro-organismen of tot verder reduceren van stoffen in het grondwater waardoor bv meer methanogene condities kunnen ontstaan. Bij vertaling naar de praktijk dient er rekening mee te worden gehouden dat de in de proefopzet gehanteerde schudregimes enerzijds het intensief mengen van het grondwater en de verhoogde stroomsnelheid van het grondwater simuleren maar anderzijds ook het sediment intensief schudden, wat niet overeen komt met de werkelijke situatie bij WKO. In hoeverre de verhoogde TOC gehaltes het gevolg zijn van menging of van de schurende werking van de korrels is in deze proeven niet vast te stellen en vormen dus mogelijke een overschatting van het daadwerkelijke vrijkomen van TOC in het WKO systeem.

4.4 Effecten van temperatuur op de microbiële samenstelling

Aanvullend op de metingen op de pilot-locaties zijn labtesten ingezet bij 4 verschillende temperaturen waarbij gekeken is naar de effecten van deze temperaturen op de hoeveelheid en samenstelling van de microbiologische populatie.

4.4.1 Inleiding

In het Meer met bodemenergie (MMB) projectplan is een aantal hypothesen geformuleerd waar in dit project onderzoek naar gedaan is. Een aantal van deze hypothesen zijn onderzocht middels veldmetingen terwijl voor andere hypothesen laboratorium testen zijn uitgevoerd.

In de literatuurstudie uitgevoerd binnen MMB zijn onderstaande hypothesen geformuleerd ten aanzien van de (mogelijke) effecten van WKO op de microbiële populatie:

- Een toename in temperatuur resulteert zelden in een toename van het totale aantal micro-organismen omdat er nauwelijks assimileerbaar organisch koolstof aanwezig is wat nodig is voor de groei van bacteriën.
- Een verandering in temperatuur resulteert in een andere samenstelling van de microbiële populaties

Wat het effect is van de temperatuursveranderingen van de microbiële populatie is, is tot op heden in beperkte mate onderzocht. Hierbij is gekeken naar de aantallen en diversiteit van micro-organismen (Brielmann, et al., 2009). Er zijn verschillende soorten bacteriën die dezelfde bodemfunctie kunnen vervullen. Het meten van deze functies is relevant voor het inschatten van de mate waarin veranderingen in populatie ook effect kunnen hebben op het functioneren van microbiologische bodemprocessen. Alleen het aantonen van soorten bacteriën is daarbij niet voldoende. Het is belangrijk om te weten of de bodemfuncties, zoals de nutriëntencycli (nitraatreductie, ijzeroxidatie, etc), worden verstoord of versterkt. Detectie van de micro-organismen die verantwoordelijk zijn voor deze bodemfuncties, geeft daarom extra informatie over het effect van de WKO installatie op het functioneren van de bodem.

Verder is nog meer onderzoek nodig om vast te stellen wat de indirecte effecten van temperatuursverandering en andere gevolgen van WKO systemen zijn op de microbiële populaties. Komen er bijvoorbeeld door een toename in temperatuur meer of andere substraten vrij die door andere bacteriën dan de dominante soorten gebruikt kunnen worden (selectie op basis van concurrentie). Of komen er juist meer nutriënten beschikbaar wat een positief effect kan hebben op de aanwezige bacteriepopulatie waardoor een toename in biomassa plaatsvindt.

In dit rapport zijn de laboratoriumresultaten beschreven van batchexperimenten uitgevoerd met schone grond uit Den Bosch. In deze testen is de nadruk gelegd op het achterhalen van het temperatuurseffect op de microbiële populatie. In rapport 9 zijn de laboratoriumresultaten beschreven van batchexperimenten uitgevoerd met verontreinigd grond van de locatie Strijp-S.

4.4.2 Doelstelling

Het doel van de batchexperimenten is om vast te stellen wat het effect is van verschillende temperaturen op de microbiologische parameters in schone diepe bodempakketten die gebruikt zouden kunnen worden voor WKO systemen. Hierbij is specifiek gekeken naar totale hoeveelheid biomassa, de diversiteit aan organismen in het monster en de beïnvloeding van specifieke microbiologische soorten en eigenschappen. Er is hierbij ook gekeken naar het tijdelijk effect van het veranderen van de temperatuur.

4.4.3 Proefopzet

4.4.3.1 Achtergrond informatie monsters en labexperimenten

De batchexperimenten zijn ingezet met grond en grondwater van een locatie in Den Bosch. Voor het inzetten van de batchexperimenten is van de aangeleverde grond- en grondwatermonsters onder anaerobe omstandigheden een representatief mengmonster gemaakt. Tot aan het moment van inzetten zijn de monsters onder anaerobe omstandigheden bewaard.

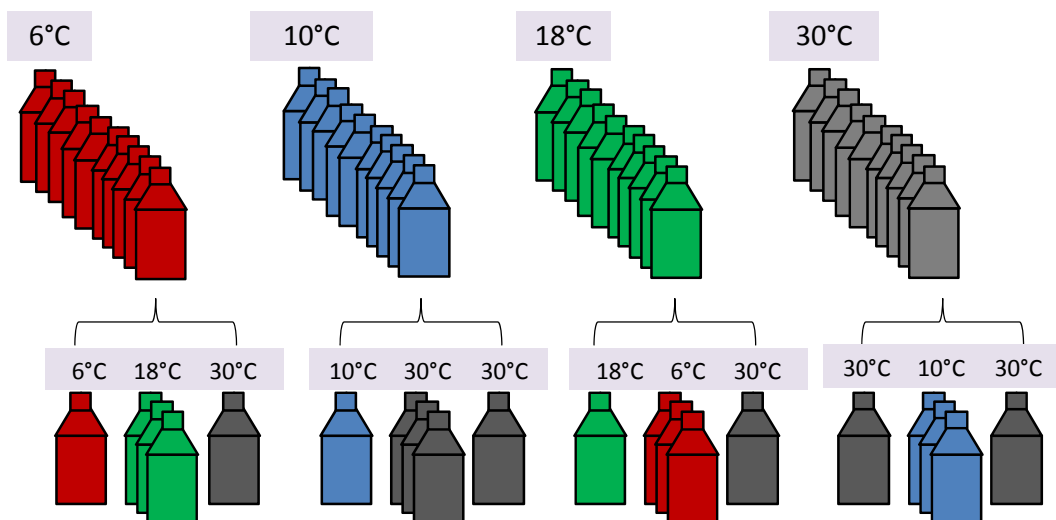
Het betreft statische anaerobe batchexperimenten die zijn uitgevoerd conform protocol beschreven in het NOBIS rapport (code 97-4-04). Dit protocol is in het kader van het Nederlands Onderzoeksprogramma voor Biotechnologische In situ Sanering (NOBIS) ontwikkeld en gevalideerd.

4.4.3.2 Temperatuurbereik

De batchexperimenten zijn bij vier verschillende temperaturen uitgevoerd, respectievelijk 6, 10, 18 en 30°C. De temperaturen zijn gekozen omdat zij model staan voor een aantal relevante praktijk condities: 6 graden als ondergrens in een groot aantal WKO systemen, 10 graden als representatie van de gemiddelde bodemtemperatuur, 18 graden iets boven de gemiddelde boventemperatuur in WKO's maar model voor een significante verhoging ten opzichte van de basistemperatuur en 30 graden als optimum temperatuur voor veel micro-organismen en boven de wettelijke grens van 25 graden die nu wordt toegestaan.

4.4.4 Aanpak

In onderstaande figuur is de opzet weergegeven. Hierbij zijn een aantal flessen per temperatuur (6, 10, 18 en 30 graden) weggezet. Gedurende een aantal maanden is het effect op de microbiologie gevolgd. Na verloop van tijd zijn van elke temperatuur een aantal flessen bij een andere temperatuur weggezet, zoals weergegeven in figuur 4.3. Het effect van deze temperatuursverandering is vergeleken met de resultaten van de eerste zes maanden.



figuur 4.3 Schematische opzet van de labtest. Bovenste rij is de beginsituatie, bij elke temperatuur een aantal flessen. Na 6 maanden incubatie zijn van iedere temperatuur een aantal flessen bij een andere temperatuur weggezet; bijvoorbeeld een aantal flessen van 6 °C bij 18 °C, een aantal flessen van 10 °C bij 30 °C en omgekeerd. Van iedere meetreeks zijn eveneens flessen bij 30 °C weggezet

4.4.5 Uitvoering

Voor deze labtest zijn de volgende monsters van de locatie Den Bosch gebruikt:

- Grond uit steekbussen 35 m-mv, 35,5 m-mv, 36 m-mv en 36,5 m-mv
- Grondwater uit Pb35 (32-52 m-mv)

De labtesten zijn bij vier verschillende temperaturen uitgevoerd, respectievelijk 6, 10, 18 en 30°C. Bij opstart van de 30°C batch is de temperatuur geleidelijk van de intrinsieke condities verhoogd naar 30°C (eerste week 20°C, tweede week 25°C en daarna 30°C). Gedurende de test zijn analyses uitgevoerd op pH, de redoxparameters (ijzer en sulfaat), organisch koolstof (TOC) en de microbiologische parameters (algemeen bacteriën en archaea, specifieke functionele groepen). Het meetschema is in onderstaande tabel weergegeven.

tabel 4.2 Meetschema flessen weggezet bij constante temperatuur

Maanden Analyse	start	0,5mnd	1mnd	2,3mnd	4,4mnd	6,2 mnd ³⁾	10mnd
Methaan	*	*	*	*	*		
Moleculair ^{1) 2)}	*	*	*	*	*	*	*
pH ¹⁾				*	*	*	*
CZV ¹⁾	*			*	*		
TOC ^{1) 4)}						*	*
Sulfaat ¹⁾	*	*	*	*	*	*	*
Nitraat ¹⁾	*	*	*	*			
Ammonium	*			*			

1) grondwater fase

2) grondfase

3) aantal flessen zijn bij verschillende temperaturen weggezet, zie tabel 4.3 en figuur 4.2

4) detectielimiet TOC varieert tussen 10 en 15 mg/l

tabel 4.3 Meetschema flessen weggezet bij veranderde temperatuur

Maanden Analyse	Start (6,2 mnd.)	0,5mnd (7 mnd.)	2mnd (8 mnd.)	4 mnd. (10mnd.)
Batches				
Moleculair ^{1) 2)}	*	*	*	*
pH ¹⁾	*	*	*	*
TOC ¹⁾	*		*	*
Sulfaat ¹⁾	*	*	*	*

1) grondwater fase

2) grondfase

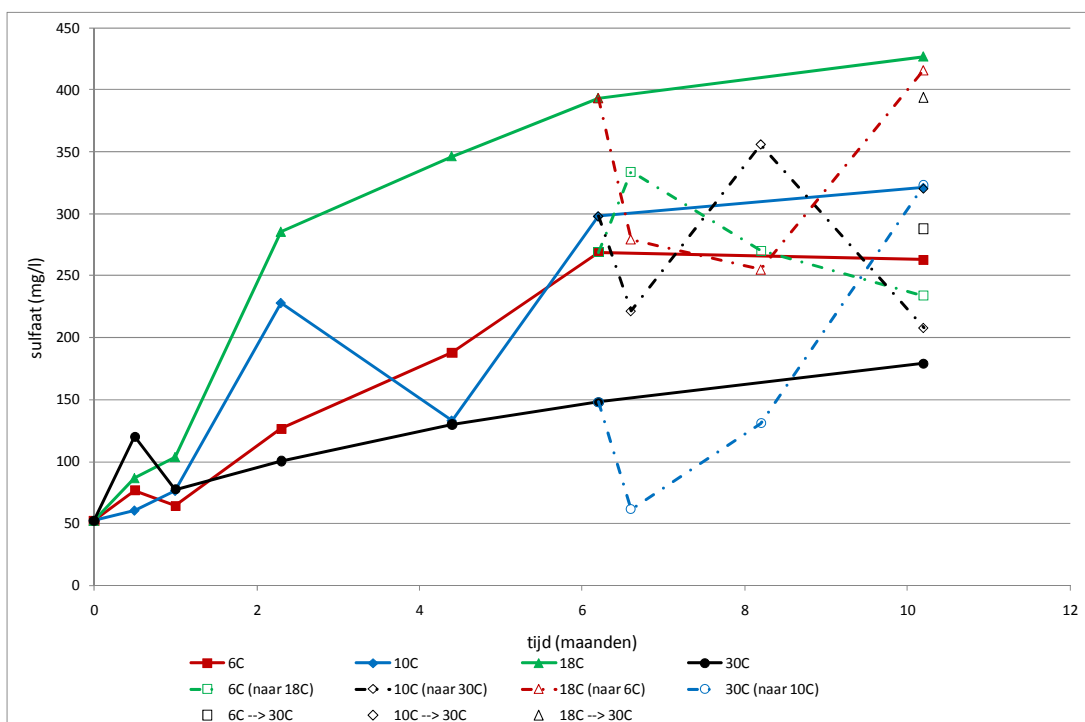
4.4.6 Resultaten

In figuur 4.4 zijn de resultaten van de sulfaatmeting uitgezet tegen de tijd. Te zien is dat in alle testen een toename in sulfaatconcentratie optreedt. De processen die voor een toename van de sulfaatconcentratie kunnen zorgen zijn het oplossen van sulfaathoudende mineralen (bv. gips: CaSO₄) of de oxidatie van sulfiden (bv. pyriet: FeS₂). Aangezien niet waarschijnlijk is dat de grondmonsters uit Den Bosch sulfaathoudende mineralen bevat is mogelijk sprake van de oxidatie van sulfiden. Voor de oxidatie van sulfiden zijn echter oxidatoren nodig (zuurstof en/of nitraat), die niet in het grondwater voorkomen. Mogelijk is er sprake geweest van toetreding van zuurstof. Deze toetreding zal in de praktijk niet tot nauwelijks optreden, waardoor de vertaling van de labtesten naar de praktijksituatie wordt bemoeilijkt. De snelheid waarmee sulfaat wordt gevormd varieert per test, deze variatie is statistisch significant. De vorming van sulfaat verloopt het langzaamst bij de test van 30 graden. Een mogelijke verklaring hiervoor is:

- Bij hogere temperatuur is de oplosbaarheid van zuurstof lager en wordt minder zuurstof opgelost. Hierdoor is er minder zuurstof aanwezig wat door de micro-organismen verbruikt kan worden.
- Er vindt verschuiving plaats in de microbiële populatie en bij hogere temperatuur spelen andere micro-organismen een rol. Deze micro-organismen hebben een andere/lagere invloed op de reactiesnelheid

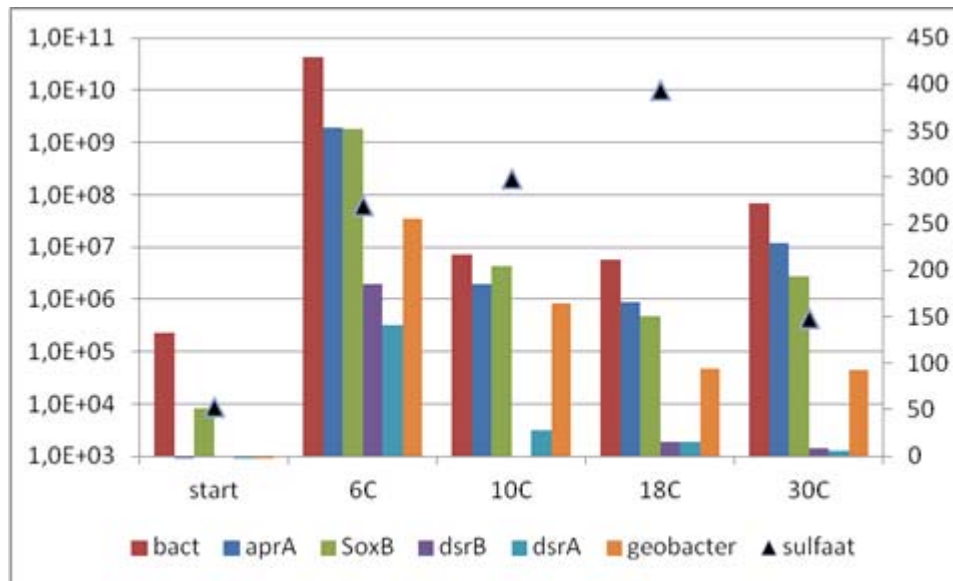
Wat verder opvalt, is dat er een toe of afname in sulfaatconcentratie optreedt nadat de flessen bij een andere temperatuur zijn weggezet, de verandering van de temperatuur heeft een effect op de zwavelcyclus. De resultaten wijzen er op dat bij 30 graden de sulfaat vormingsnelheid lager is dan bij de overige drie temperaturen al is deze correlatie niet heel duidelijk te bepalen op basis van de fluctuerende sulfaatconcentraties. Op basis van de huidige resultaten is het niet mogelijk te achterhalen of deze sulfaatvorming primair biologisch of chemisch tot stand is gekomen. Er zijn verschillende mogelijkheden:

- In de testen wordt zuurstof vrij gemaakt uit al aanwezige componenten, hier is geen gedetailleerd onderzoek naar gedaan
- er vindt intreding van zuurstof plaats gedurende de looptijd van de test (en bij hogere temperatuur is de oplosbaarheid van zuurstof lager)



figuur 4.4 Verandering in sulfaatconcentratie gedurende de looptijd van de verschillende testen. De stippellijnen geven de resultaten weer van de flessen waarbij een verandering van temperatuur heeft plaatsgevonden. Flessen van 10 graden (blauwe lijn) zijn bijvoorbeeld bij 30 graden weggezet (zwarte stippellijn)

Bij alle temperaturen zijn zwaveloxiderende micro-organismen in voldoende mate aanwezig om bij te dragen aan de vorming van sulfaat, maar hun aantallen verklaren niet het verschil in uiteindelijke sulfaatconcentraties (figuur 4.5). Opvallend is dat de hoogste concentraties sulfaat na 6 maanden worden aangetroffen in de batch van 18 graden. Hier is het aantal sulfaat reducerende bacteriën het laagst dus draagt de microbiologie hier weinig bij aan het weer reduceren van het sulfaat nadat het gevormd is. De resultaten duiden daarom op een combinatie van beide processen.

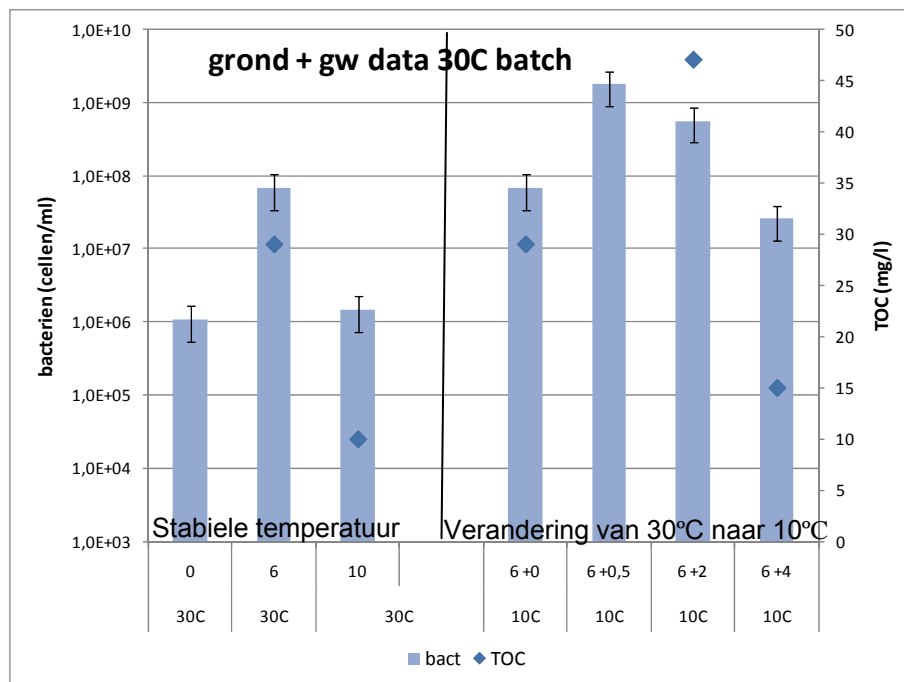


figuur 4.5 Aantallen specifieke functionele groepen micro-organismen bij verschillende temperaturen na 6 maanden incubatie. Bact=totaal aantal bacteriën, *aprA*, *dsrA* en *dsrB*= genen betrokken bij sulfaat reductie, *aprA* en *soxB* = genen betrokken bij zwaveloxidatie. *Geobacter*=ijzer oxideerder

In onderstaande figuur 4.6 en figuur 4.7 zijn de resultaten voor de 10°C en 30°C batch weergegeven. In deze grafieken zijn de totaal bacteriën en TOC uitgezet tegen de tijd (0, 6 en 10 maanden) en uitgezet ten opzichte van de verandering in temperatuur (van 10°C naar 30°C of van 30°C naar 10°C). Deze aanpassing van temperatuur heeft plaatsgevonden op 6 maanden na inzetten van de flessen. Dit betekent dat de flessen eerst bijvoorbeeld gedurende 6 maanden bij 30°C zijn geïncubeerd en vervolgens bij 10°C zijn geplaatst (annotatie 6+0 maanden). Deze flessen zijn gedurende 4 maanden gemonitord (annotatie 6+4 maanden).

Uit de resultaten van de 30 graden test blijkt dat organisch stof (TOC) vrijgemaakt wordt en dat dit in de waterfase terecht komt. Na 6 maanden incubatie is er circa 35 mg/l TOC aanwezig, in tegenstelling tot de 10 graden batch (zie figuur 4.7) waarbij na 6 maanden nog steeds circa 15 mg/l TOC aanwezig was. Het totaal aantal bacteriën in de 30 graden batch is na 6 maanden echter niet significant hoger dan in de 10 graden batch. Indien de test bij 30 graden doorgezet wordt dan is een afname in TOC waar te nemen (bij 10 maanden is de TOC lager/rond detectielimiet). Het totaal aantal bacteriën is vergelijkbaar met de beginsituatie.

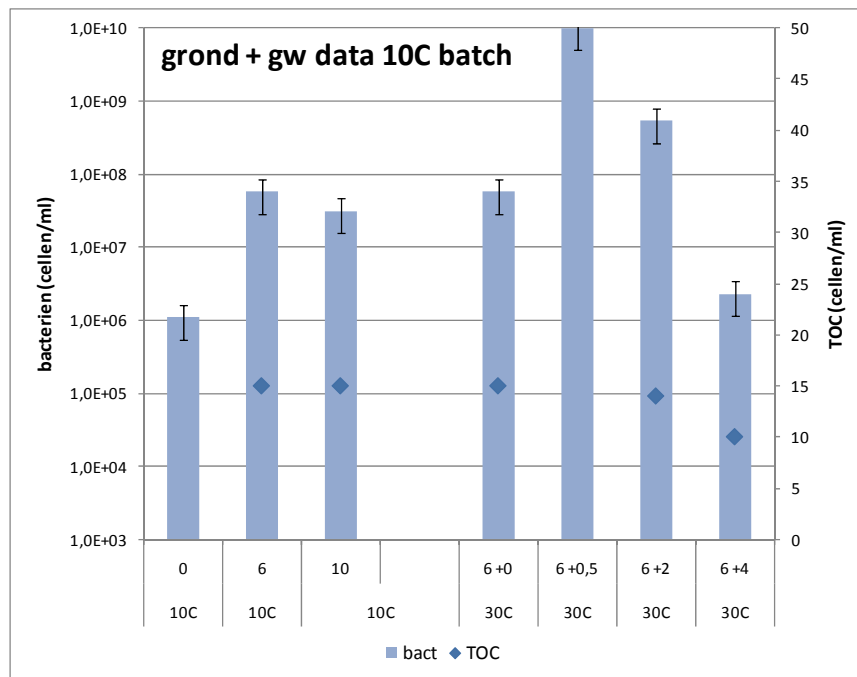
Een aantal flessen zijn op 6 maanden van 30 graden naar 10 graden geplaatst, op dit moment was er nog een verhoogde TOC concentratie aanwezig. Uit de resultaten blijkt dat in deze flessen, na 6 maanden nog steeds verhoogde aantallen bacteriën (circa 10^8 cellen/ml) aanwezig zijn. Uit de resultaten blijkt ook dat in ieder geval gedurende 2 maanden nog verhoogde TOC concentraties aanwezig zijn. Na incubatie gedurende 4 maanden bij 10 graden wordt ook in deze test de aanwezige TOC volledig verbruikt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat verhoging van temperatuur mogelijk een positief effect heeft op het vrijmaken van organisch stof (organisch stof percentage van de bodem is 0,5%), maar dat de temperatuur geen positief effect heeft op de totaal aantal bacteriën in de test (er vindt geen toename in totaal aantal bacteriën plaats). Indien, met de aanwezigheid van vrij gekomen organisch stof, de temperatuur weer teruggeschroefd wordt naar de normale bodemtemperatuur lijkt er wel degelijk een toename van het aantal bacteriën op te treden. Vanwege de beperkte statistische kracht van het geringe aantal meetpunten en de nauwkeurigheid van de meetmethode is bevestiging van deze observaties binnen andere onderzoekstrajecten gewenst.



figuur 4.6 Resultaten 30 graden test waarbij totaal aantal bacteriën en TOC concentratie uitgezet zijn tegen de gekozen condities (stabiele temperatuur of veranderde temperatuur) en tijd

Uit de resultaten van de 10 naar 30 graden test lijkt geen toename in TOC plaats te vinden. Bij de test die bij een continue temperatuur van 10 graden is geïncubeerd vindt initieel een toename in totaal aantal bacteriën plaats (het resultaat van deze nulmeting is echter minder betrouwbaar vanwege afwijkende methodiek van de monsternamen). Indien de aantallen na 6 maanden en 10 maanden na incubatie met elkaar vergeleken worden is geen verschil in aantallen zichtbaar. Na 6 maanden zijn een aantal flessen bij 30 graden weggezet.

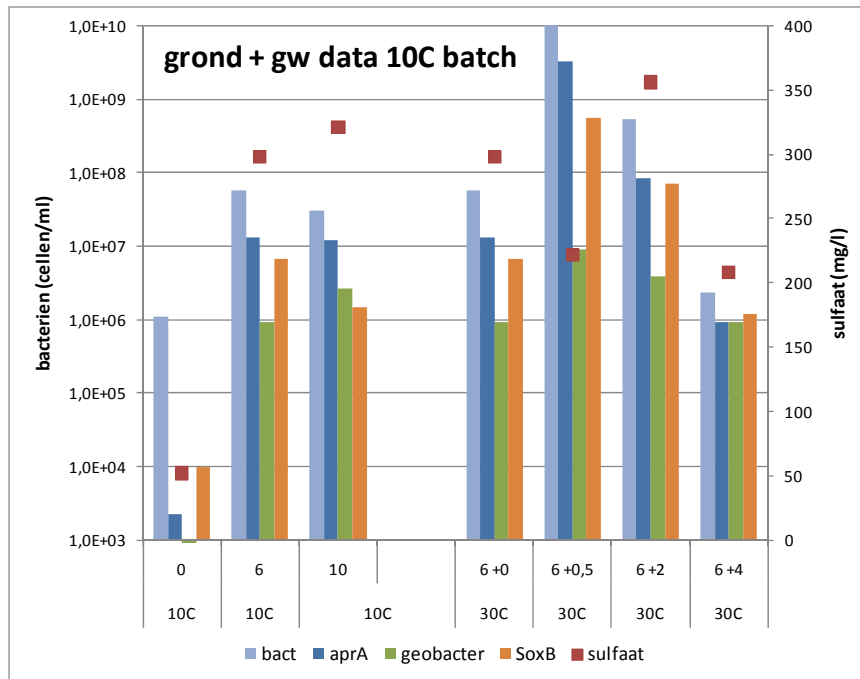
Verwacht was dat (op basis van de resultaten in figuur 4.6) na verhoging van de temperatuur een toename in organisch stof zou optreden, dit is niet waargenomen. Mogelijk dat er wel organisch stof vrij komt maar niet is gemeten (op t = 2 maanden) of dat het meteen wordt verbruikt door de aanwezige micro-organismen. Er vindt kort na verhoging van de temperatuur wel degelijk een significante toename in totaal aantal bacteriën plaats. Deze toename wordt na 4 maanden incubatie weer teniet gedaan, na vier maanden incubatie is er ook geen organisch stof meer (meetbaar) beschikbaar in de waterfase van de test.



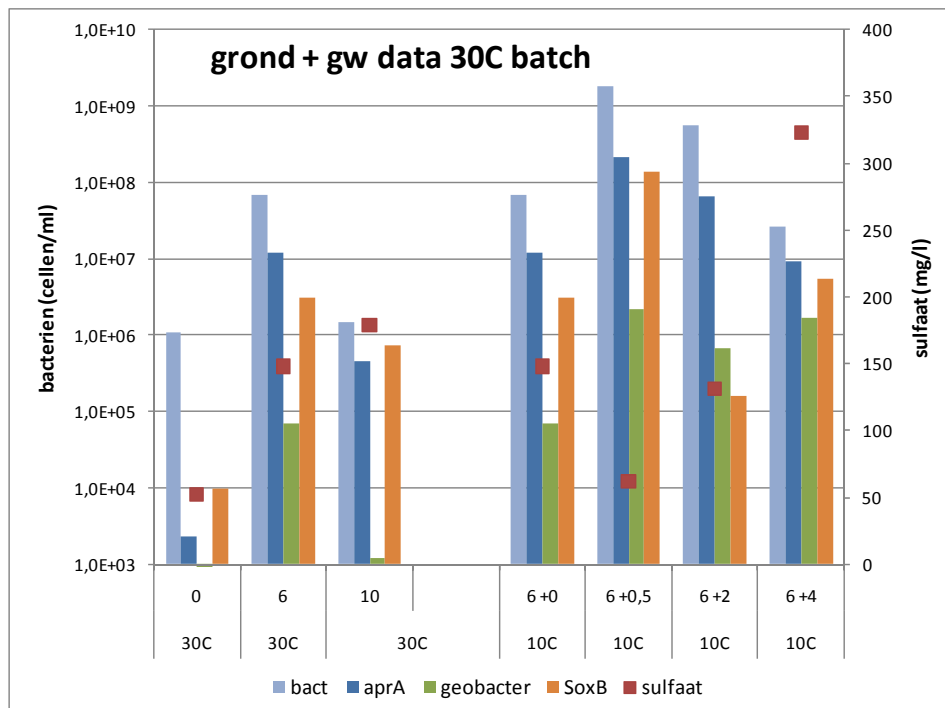
figuur 4.7 Resultaten 10 graden batch waarbij totaal aantal bacteriën en TOC concentratie uitgezet zijn tegen de gekozen condities (stabiele temperatuur of veranderde temperatuur) en tijd

In onderstaande figuur 4.8 en figuur 4.9 zijn de resultaten voor de 10°C en 30°C batch gegeven. In deze grafieken zijn het totale aantal bacteriën en de sulfaatconcentratie uitgezet tegen de tijd (0, 6 en 10 maanden). Ook zijn de resultaten weergegeven van de flessen die bij een andere temperatuur zijn weggezet (van 10°C naar 30°C of van 30°C naar 10°C). Naast totaal aantal bacteriën zijn in deze figuren ook de aantallen specifieke bacteriën en/of genen weergegeven zoals *Geobacter* (ijzerreducerder) en *soxB* (zwaveloxidatie). Omdat er te weinig gegevens zijn is het niet mogelijk om een statistisch onderbouwde conclusie te trekken, wel worden de waarnemingen hier kort beschreven.

Er is geen duidelijke correlatie tussen de sulfaatconcentratie en *soxB* of *aprA* aantallen, evenmin met de temperatuursverandering en de aantallen *soxB* en *aprA*, zowel bij de 10°C test als bij de 30°C test.



figuur 4.8 Resultaten 10°C batch (grond en grondwatergegevens), totaal bacteriën, geobacter, AprA gen, SoxB gen en sulfaatconcentratie. Gegevens uitgezet tegen gekozen condities (temperatuur) en tijd (in maanden)



figuur 4.9 Resultaten 30°C batch (grond en grondwatergegevens), totaal bacteriën, geobacter AprA gen, SoxB gen en sulfaatconcentratie. Gegevens uitgezet tegen gekozen condities (temperatuur) en tijd (in maanden)

Om vast te stellen of de gekozen condities ook de specifieke activiteit van de micro-organismen beïnvloed, is gekeken naar de verhouding tussen de DNA (potentie) en het RNA (de activiteit) bij de batches die bij 10°C en 30 °C zijn uitgevoerd (tabel 4.4) Hoe hoger het getal hoe actiever de totaal populatie is. Er zijn ook analyses gedaan op gen niveau, deze vielen echter allen onder de (relatief hoge) detectiegrens van de RNA meting.

tabel 4.4 Verhouding RNA en DNA totaal bacteriën in de 10 graden test

Tijdstip	t=start	t=0,5mnd	t=6mnd	t=6,5mnd
Flescode		I-10-C1	I-10-C10	I-10-C8
Temperatuur	10	10	10	30
DNA	8,6E+05	8,6E+06	5,0E+07	9,9E+07
RNA	9,5E+06	1,6E+08	8,7E+07	5,2E+09
RNA/DNA	11	18	1,7	53

tabel 4.5 Verhouding RNA en DNA totaal bacteriën in de 30 graden test

Tijdstip	t=start	t=0,5 mnd	t=6mnd	t=6,5mnd
Flescode		i-E-30	I-30-E10	I-30-E8
Temperatuur	30	30	30	10
DNA	8,6E+05	2,6E+08	6,8E+07	1,8E+07
RNA	9,5E+06	2,0E+08	5,3E+07	6,0E+06
RNA/DNA	11	0,8	0,8	0,3

De micro-organismen zijn 0,5 maanden na het inzetten van de batches actiever in de 10 graden dan in de 30 graden batch. Bij het plaatsen van de batches van 10 naar 30 graden neemt de activiteit significant toe, terwijl het plaatsen van de batch van 30 naar 10 graden resulteert in een lichte afname van de activiteit. Hiervoor zijn een aantal verklaringen mogelijk. De meest waarschijnlijke verklaring is dat de microbiële populatie is aangepast aan temperaturen rond de 11 graden en stress ondervindt bij temperatuurverhogingen naar 30 graden. Daarnaast kan er TOC vrijgemaakt worden bij 30 graden en deze daarna worden geconsumeerd wat leidt tot extra groei en activiteit bij verplaatsing naar 10 graden. Ook kan het langzamer toetreden van zuurstof aanvullend effect hebben op de snelheid van sulfaat oxidatie.

4.4.7 Conclusies

Uit de labtesten met verschillende incubatietemperaturen en temperatuurregimes blijkt dat de temperatuur en temperatuurverschuivingen effect hebben op de concentraties organisch stof, het totale aantal micro-organismen en de specifieke activiteit in de grond en het grondwater. Over effecten van de temperatuur op de samenstelling van de populaties zijn uit deze proefopzet met onvoldoende zekerheid conclusies te trekken.

5 Aandachtspunten in relatie tot specifieke vraagstelling

5.1 Effecten van temperatuur en dichtheidsstroming bij een gesloten systeem: locatie Beijum

Voor het optreden van mogelijke effecten van WKO's spelen zowel de beïnvloeding van de temperatuur als het optreden van menging een rol. Bij het gebruik van gesloten systemen kan specifiek naar de effecten van de temperatuur worden gekeken zonder dat mengeffecten van het WKO systeem een rol spelen. Wel treedt mogelijk additionele stroming op door het verschil in dichtheid van het water bij veranderende temperaturen.

Op de locatie Beijum is sprake van een gesloten systeem met een groot aantal warmtelussen in de bodem. Op de locatie zijn meetgegevens verkregen op punten met verschillende temperaturen binnen het beïnvloedingsgebied (zowel aan de stroomopwaartse als stroomafwaartse kant) van de bodemwarmtewisselaar en tevens van een referentie buiten dit gebied.

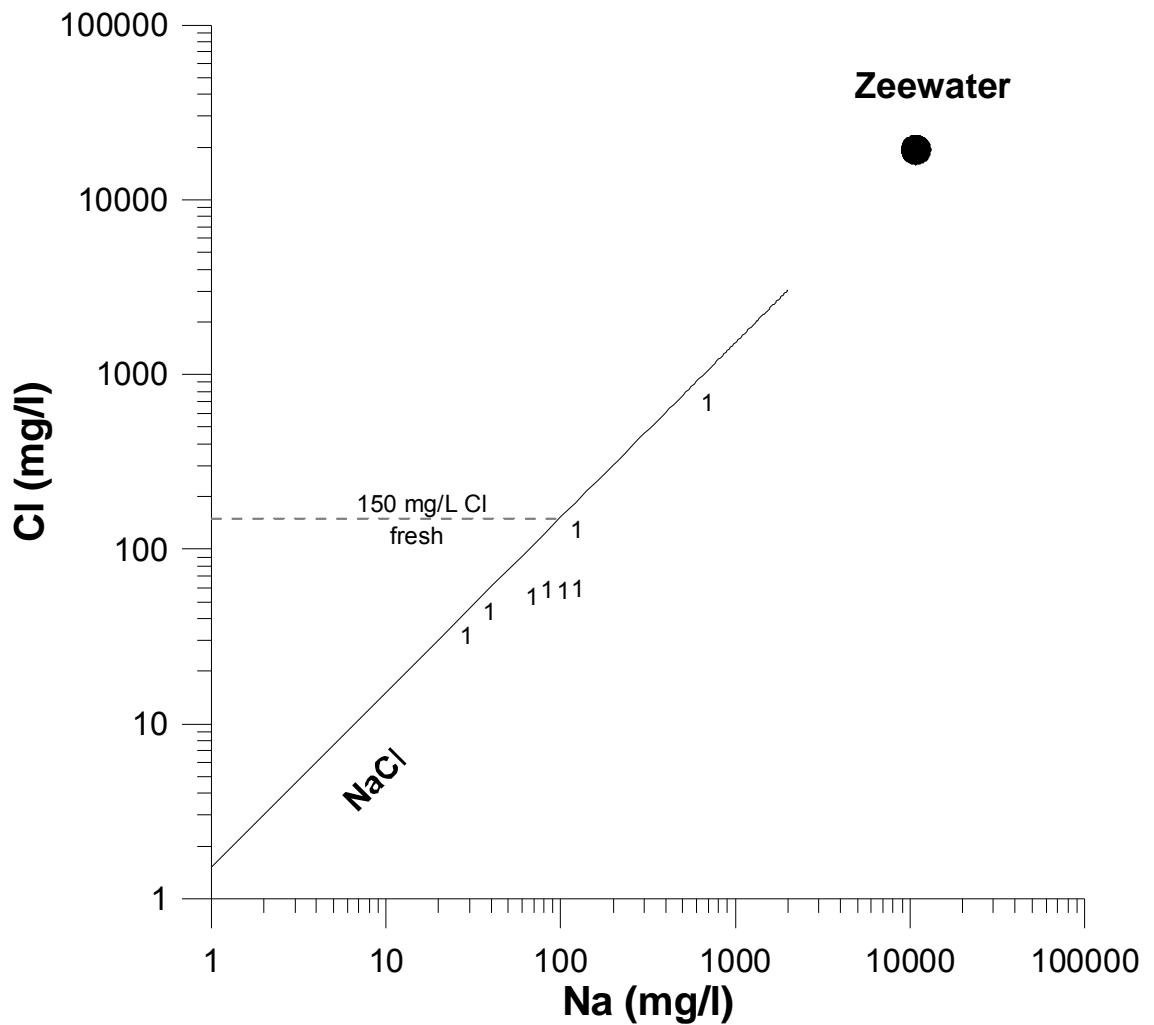
5.1.1 Effecten op de geochemie

Het effect van verzoeting op de locatie Beijum (locatie nummer 1) is te illustreren door de relatieve aanrijking van natrium chloride ten opzichte van de chloride concentraties (figuur 5.1), in vergelijking met de verwachte samenstelling van zeezout (NaCl). Dit wijst er op dat er natrium "vrijkomt". Daarnaast wijst de relatieve aanrijking van alkaliniteit ten opzichte van calcium (figuur 5.2) in vergelijking met de verhouding die verwacht wordt voor simpel kalkevenwicht onder verschillende koolzuurspanningen op het "verdwijnen" van calcium. Het mogelijk optreden van verzoeting op deze locatie lijkt dus geïllustreerd te worden door het aanwezig zijn van een "Na-HCO₃" watertype, wat kenmerkend is voor verzoeting. Hierbij wordt natrium dat onder zoutwater condities (Na en Cl houdend) geadsorbeerd is (bijv. op kleideeltjes) uitgewisseld voor calcium in instromend zoet water (Ca en HCO₃ houdend) volgens:

$$\text{Na}_2\text{-X} + \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{Ca-X} + 2 \text{Na}^+ + 2 \text{HCO}_3^-$$

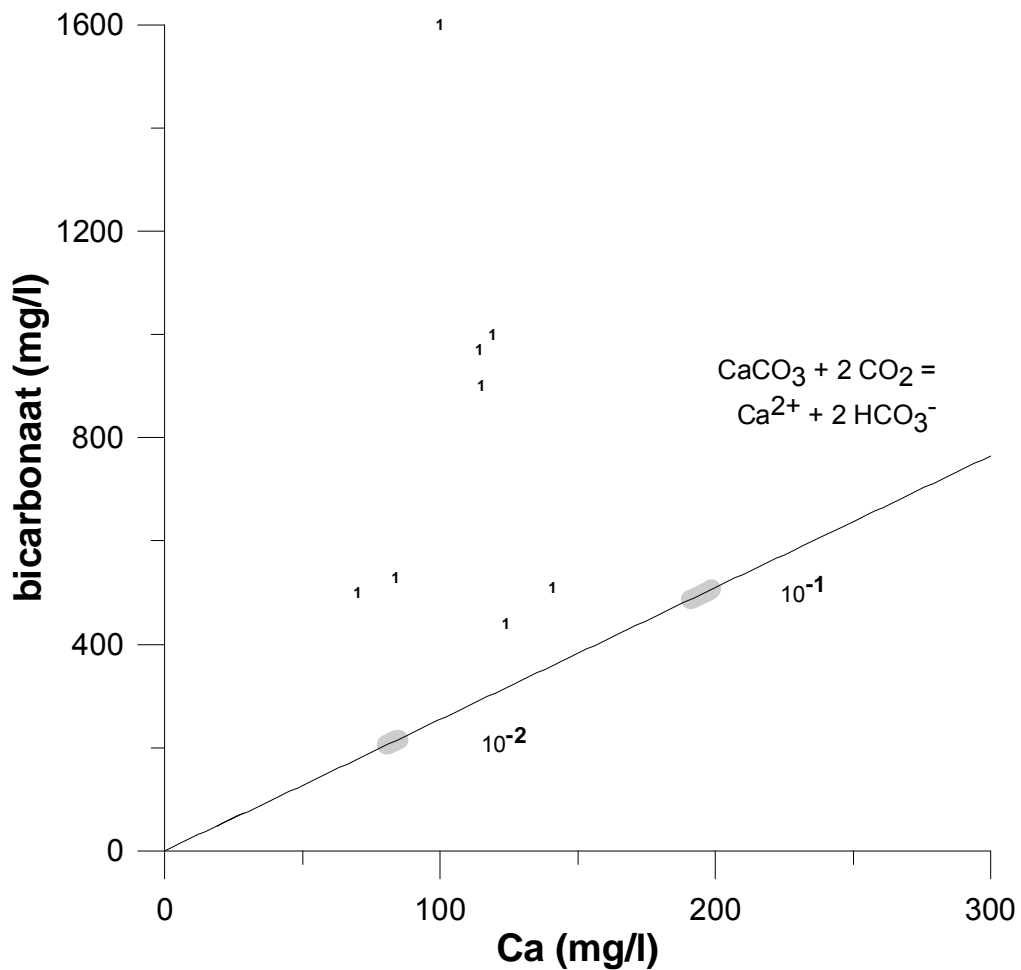
waarbij X een generieke uitwisselingsplek voor positief geladen ionen voorstelt.

Hierbij wordt het kalkevenwicht gehandhaafd waardoor er netto kalk oplost, aangezien dit op deze locatie bij relatieve hoge koolzuurspanningen gebeurt (tot 10%, 10⁻¹ atm) varieert de pH relatief weinig (6.6-7.2).



figuur 5.1

Soet-zout plot: natrium concentraties tegen chloride concentraties, met aangegeven de samenstelling van zeewater en de veel gebruikte grens van 150 mg/L als overgang van zoet naar brak water. Nummers geven de locatie weer: Beijum (1)



figuur 5.2 **Kalk plot: calcium concentraties tegen bicarbonaat concentraties, met aangegeven de samenstelling van de lijn van kalkoplossing bij verschillende koolzuurspanningen. De koolzuurspanningen 10^{-2} en 10^{-1} atm zijn in de grafiek aangegeven. De grijze gearceerde gebieden zijn de gemodelleerde concentratieveranderingen door verschuiving van kalkevenwicht van 10 naar 20 graden bij deze koolzuurspanningen. Nummers geven de locatie weer: Beijum (1)**

5.1.2 Effecten op de microbiologie

In algemene zin blijkt dat de variatie in gemeten aantallen microbiologische soorten en functies binnen de invloedssfeer van de WKO niet groter of kleiner is dan daarbuiten (zie de grafieken voor verschillende elementen in Bijlage 2). Er is sprake van een natuurlijke variatie en deze wordt door aanwezigheid van de warmtewisselaar niet in belangrijke mate veranderd. Voor een aantal specifieke parameters is echter wel sprake van (licht) afwijkende waarden. Deze worden hieronder besproken.

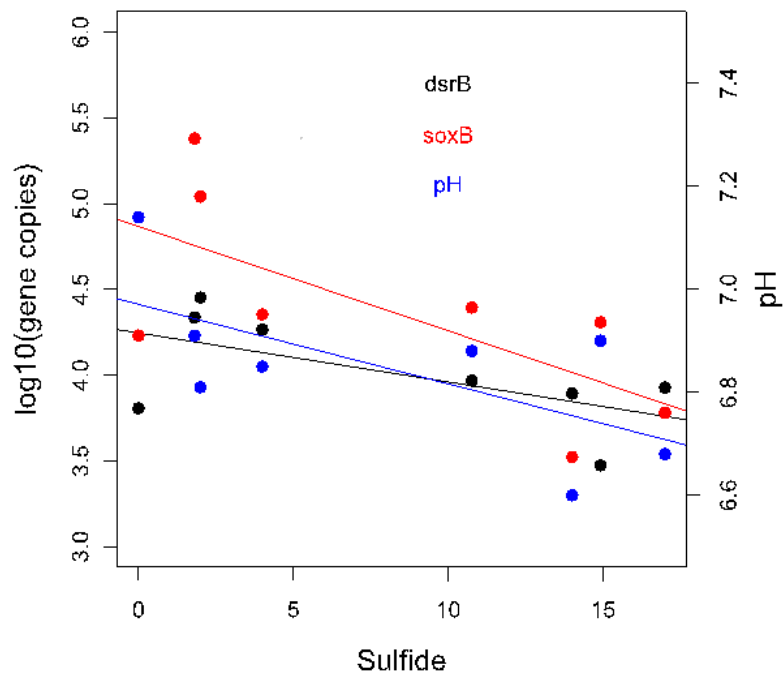
Het gaat hierbij om de relatieve toename van het aandeel archaea in het warmste meetpunt (39 °C). Op het zelfde meetpunt wordt deze toename niet gemeten bij een temperatuur van (35 °C). Deze observatie strookt met de theorie dat rond de 39 graden het optimum van de mesofiele groep wordt gepasseerd en dat hier een verschuiving naar de gematigde thermofielen optreedt (zie ook figuur 2.8 in hoofdstuk 2). Hiertoe behoren gemiddeld meer archaea.

Uit de metingen blijkt ook dat op het meetpunt met de hoogste temperatuur (35 en 39 °C) sprake is van verhoogde sulfaat concentraties ten opzichte van de referentie en de andere meetpunten op de locaties met lagere temperaturen en dat deze concentraties in de tijd variëren. Op dit meetpunt is ook sprake van de grootste variatie in aantallen sulfaat reduceerders en in deconcentratie van de door deze organismen gevormde sulfide. Stroomafwaarts loopt de temperatuur terug en normaliseren de sulfaat concentraties weer.

De variaties in sulfaat en sulfide op de locatie Beijum zijn opvallend. Om die reden is in meer detail gekeken naar de onderliggende mechanismen. Hiertoe zijn de chemische parameters sulfide en pH beschouwd in relatie tot de activiteit van organismen die betrokken zijn bij de vorming van sulfide (*drsA* en *dsrB* houdende soorten) en oxidatie van sulfide (*soxB* houdende soorten). Bij een chemische reactie van zuurstof met pyriet kan pyrietoxidatie optreden waarbij sulfaat wordt gevormd en metalen vrijkomen. Het vrijgekomen sulfaat kan weer gereduceerd worden door sulfaatreduceerders tot sulfide. Ook is gekeken naar de pH, omdat bij oxidatie van metaalsulfiden verzuring kan optreden en bij een lagere pH metaalsulfiden beter op kunnen lossen.

Op de locatie Beijum blijkt een negatieve correlatie te zijn tussen de concentratie sulfide en het aantal sulfaatreduceerders en sulfaat oxideerders. Er zijn dus minder van deze bacteriën om beide processen uit te voeren, waarbij vooral de zwaveloxideerders minder actief zouden kunnen zijn wat leidt tot een toename in de sulfide concentratie. Er is tevens een correlatie gevonden tussen de pH en de sulfide concentratie, een lagere pH correspondeert met een hogere sulfide concentratie. Een chemische verklaring is hierbij dus ook mogelijk, bij een lagere pH lossen metaalsulfiden beter op en neemt de sulfide concentratie toe. Het specifieke aandeel van de verschillende processen is uit de metingen niet af te leiden.

De bovengenoemde correlatie is hier beschreven om te illustreren dat binnen het onderzoek alle mogelijke effecten op de locatie in beschouwing zijn genomen. Het laat zien dat er op de verschillende meetpunten in het systeem verschillen in biologische en chemische processen optreden. De hierboven beschreven observatie is op dit moment alleen gevonden op de locatie Beijum en kan niet verklaard worden door specifieke temperatuurverschillen ten gevolge van de warmtewisselaar op de locatie.



figuur 5.3 Relatie tussen de concentraties sulfide en de sulfaatreducerende capaciteit (dsrB kopieën), de zwaveloxiderende capaciteit (soxB kopieën) en de pH voor de locatie Beijum

De hoogste temperatuur op de locatie Beijum heeft een effect op de samenstelling van de microbiologische populatie. Dit blijkt uit de relatieve toename van het aantal archaea op het warmste meetpunt en uit de effecten op de biodiversiteit (Bijlage 4).

5.1.3 Conclusies met betrekking tot gesloten systemen.

De locatie Beijum is het enige gesloten systeem dat in de studie is opgenomen en is daarmee indicatief te gebruiken voor het vaststellen van mogelijke effecten van een gesloten systeem in aanvulling op de reeds bestaande kennis. De gemeten effecten zijn primair het gevolg van de verhoogde temperaturen en de dichtheidsstroming die daar het gevolg van is.

Bij gesloten systemen wordt geen grondwater verpompt. Hierdoor was de verwachting dat bij gesloten systemen alleen het effect van temperatuur zou resteren. Uit de metingen bij Beijum blijkt dat ook voor gesloten systemen het optreden van dichtheidsstroming een dussdanig effect kan hebben op de geochemische kwaliteit van het grondwater dat dit de temperatuurseffecten overheerst.

Op de locatie is sprake van beperkte effecten op de biologie met uitzondering van het warmste punt, hierbij vindt een verschuiving in de populatiesamenstelling plaats die echter geen significante gevolgen heeft voor het functioneren van (micro)biologische kringloopprocessen. Onduidelijk is of hierbij gevolgen optreden voor de stabiliteit van het (micro)biologische proces bij aanvullende stress.

Voor specifieke processen in de zwavelcyclus is sprake van dynamica maar deze kan niet worden toegeschreven aan de temperatuur of de werking het systeem.

Pathogenen worden in het systeem op 2 meetpunten in zeer lage aantallen aangetroffen. Ze komen ook niet in grotere aantallen voor bij de warmere meetpunten. In combinatie met beschikbare literatuur gegevens (zie ook rapport 1) is zeer onwaarschijnlijk dat hierdoor een risico ontstaat.

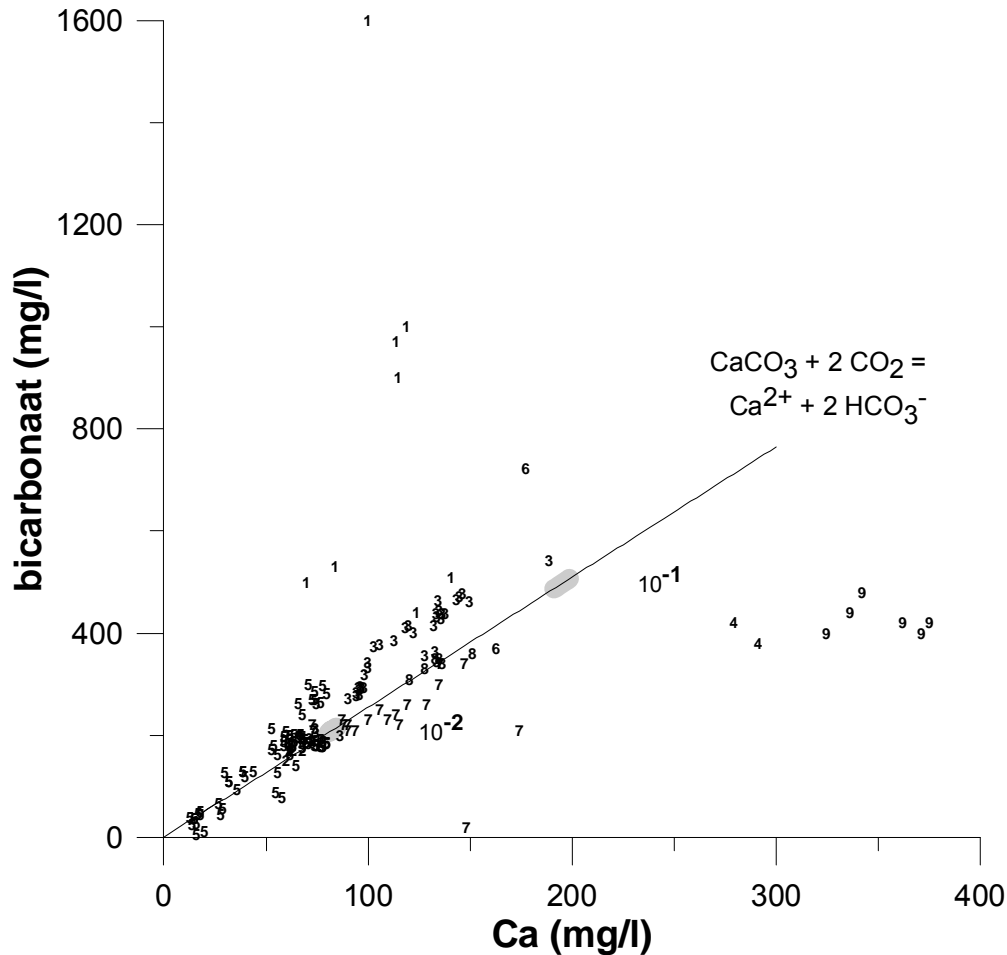
Binnen het onderzoek zijn geen aanvullende praktijkgegevens verzameld met betrekking tot de risico's op lekkage van gesloten systemen en de mogelijke schade van gebruikte antivries en anticorrosie middelen in deze systemen.

5.2 Effecten van open systeem met verschillende temperaturen: locatie Heuvelgalerie

Op veel van de bemeten pilotlocaties blijkt in de praktijk sprake van zeer geringe temperatuurverschillen van slechts enkele graden. Zoals in hoofdstuk 2 reeds aangegeven is de verwachting niet dat hier grote effecten als gevolg van temperatuur verschillen van de WKO optreden. Zowel de chemische als fysische meetwaarden bevestigen dit beeld. Er zijn variaties in de gemeten waarden maar deze kunnen niet worden gerelateerd aan de temperatuurverschillen op de locatie. In veel gevallen is de dynamiek in de referentie groter dan in het WKO gebied zelf.

De locatie Heuvelgalerie is een mooi voorbeeld van een locatie met een open WKO systeem met een reeks van verschillende temperaturen. Op de locatie zijn een aantal meetpunten met verschillende temperaturen beschikbaar die variëren van 14,2 (voor de referentie) tot 27,5 °C (in de warme bron). Op de gemeten locaties is het betreffende watervoerende pakket anoxisch.

5.2.1 Effect van temperatuur op kalkevenwicht

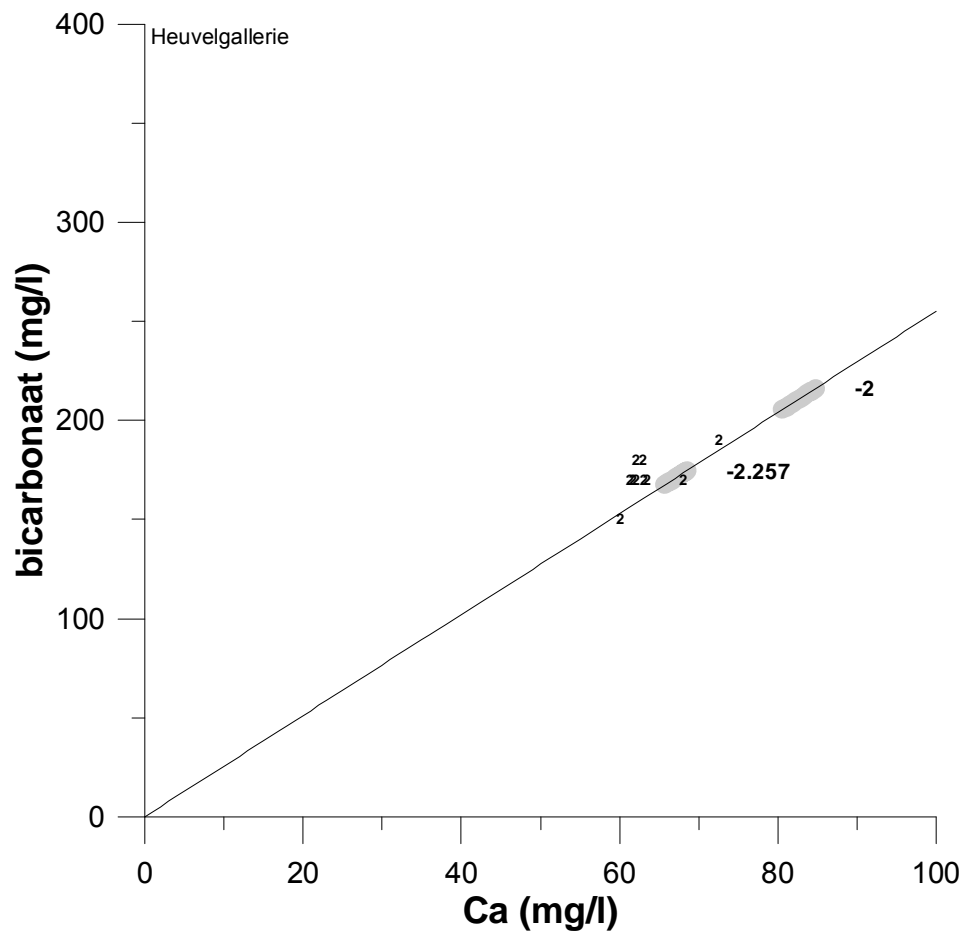


figuur 5.4 Kalkevenwicht onder invloed van CO₂ spanning (lijn) en temperatuur range (10-20 °C grize arcering bij pCO₂ van 10⁻¹ en 10⁻² atm). Processen die kunnen zorgen voor het afwijken van de CO₂-lijn worden besproken in de tekst. Nummers geven locaties weer: Beijum 1, Heuvelgalerie 2, Utrecht Centrum 3, Luttelgeest 4, Rosmalen 5, Rotterdam 6, Strijp-S 7, Uithof 8, Zwammerdam 9

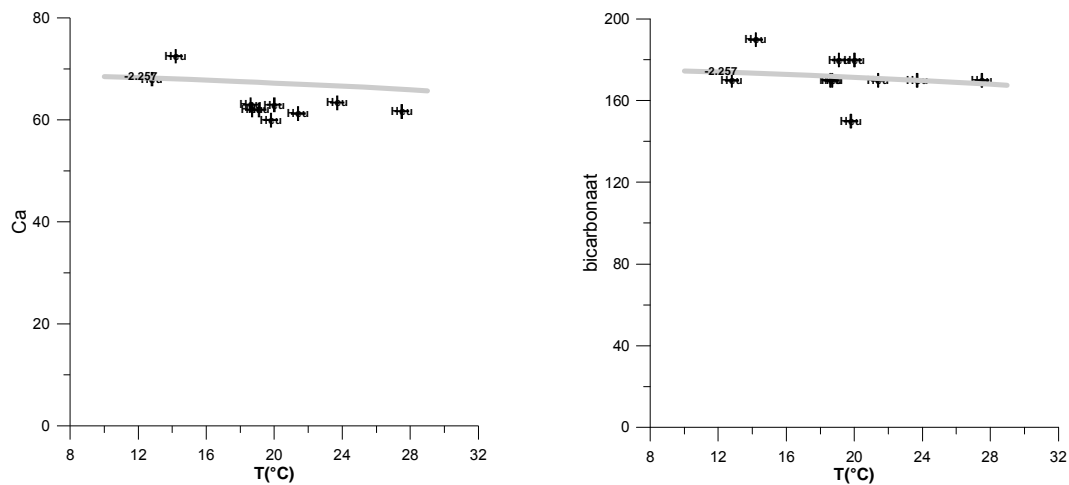
Bij de beschouwing van de effecten van temperatuur op de geochemische samenstelling van het grondwater worden eventuele effecten het grootst geacht daar waar de temperatuur verschillen met de achtergrondtemperatuur van grondwater het grootst zijn. In figuur 2.2 is de temperatuurrange weergegeven van de geanalyseerde grondwatermonsters. De temperatuurrange voor de locatie Beijum, Zwammerdam en de Heuvelgalerie zijn in dit kader interessant. Aangezien de calcium en alkaliniteits data op de locatie Heuvelgalerie dicht bij elkaar plotten op de kalk-koolzuur lijn (figuur 5.4 en figuur 5.5), lijkt de kalkchemie op deze locatie het minst beïnvloed door verschillen in CO₂ spanning of door andere processen die de kalkchemie beïnvloeden.

Daarom is deze locatie gebruikt voor de analyse van temperatuurseffecten op evenwichtschemie. Bij de voor deze locatie berekende CO₂ spanning, zijn de calciumconcentraties en de alkaliniteit uitgezet tegen de temperatuur van de verschillende grondwatermonsters.

Deze blijken een redelijk goede relatie te hebben. Bij een temperatuursverschil van 20 graden is de opgeloste hoeveelheid kalk bij de hoogste temperatuur (~30 °C) zo'n 83% van de concentratie bij de laagste temperatuur (~10 °C). Dit verschil is in overeenstemming met de theoretische verwachting (figuur 5.5). Een temperatuursafhankelijke relatie van zware metaalconcentraties was niet zichtbaar in de data van deze locatie.



figuur 5.5 Data voor de locatie Heuvelgalerie. Kalkevenwicht onder invloed van CO₂ spanning (lijn) en temperatuur range (voor 10-20 °C grijze arcering bij pCO₂ van 10⁻² atm en 10-29 °C bij een voor de locatie Heuvelgalerie berekende pCO₂ van 10^{-2.26}). Schaal is aangepast ten opzichte van figuur 5.4



figuur 5.6 Relatie tusse temperatuur en de calcium en alkaliniteitsconcentraties voor de locatie Heuvelgalerie bij een berekende pCO_2 van $10^{-2.26}$. Lijnen geven de gemodeleerde temperatuursafhankelijkheid van kalkevenwicht bij deze CO_2 spanning weer

Op de locatie Heuvelgalerie zijn metingen uitgevoerd aan een uitgebreide set van micro-organismen en genen die betrokken zijn bij (micro)biologische kringloopprocessen. Daarnaast is gemeten op een aantal potentieel pathogene micro-organismen. De totale aantallen bacteriën ($10^5/ml$) en archaea zijn vergelijkbaar met hoeveelheden die ook op het merendeel van de andere locaties zijn aangetroffen.

De potentieel pathogenen *E. coli*, *Legionella pneumophila* en *Clostridium perfringens* werden in geen van de monsters aangetroffen terwijl lage concentraties (3 cellen/ml) Enterobacteriaceae werden aangetroffen in de koude bron.

De ijzerreducerder *Geobacter* sp. werd in significant hogere concentraties aangetroffen in het monster van de warme bron dan in de andere monsters van deze locatie. Deze temperatuur ligt het dichtst bij de optimale groeitemperatuur ($30\text{ }^\circ\text{C}$) van dit organisme. Het aantal zwaveloxideerders was significant hoger in de koude bron dan in de andere monsters. De reden hiervoor is onbekend. In de literatuur worden soortgelijke observaties gedaan waarbij wordt gesuggereerd dat er daarbij sprake is van de aanvoer van een specifieke electronacceptor, niet is vastgesteld welke electronacceptor mogelijk tot een dergelijke toename in groei kan leiden (Lerm, et al 2011). Er werden verder geen significante verschillen aangetroffen in de aantallen specifieke genen tussen de verschillende meetpunten.

Uit de biodiversiteitsanalyse blijkt dat de samenstelling van de populatie afhankelijk is van de locatie en zelfs van het specifieke bemonsteringspunt. De verschillen tussen de meetpunten is bij Heuvelgalerie groter dan de verschillen op beide meetmomenten in hetzelfde punt. Op de DGGE gel (figuur 3.9) is te zien dat het patroon bij de koude bron tijdens de meting in maart 2011 meer overeenkomt met de patronen in de warme bron op beide meetmomenten. Uit de later aangeleverde gegevens van de locatie is gebleken dat dit waarschijnlijk het gevolg is geweest van het heen en weer pompen van water tussen de koude en de warme bron in de dagen vlak voorafgaand aan de tweede monsternamen.

Dit is een aanwijzing dat de WKO water met een verschillende populatie micro-organismen van de ene naar de andere put pompt. Deze populatie past zich vervolgens weer aan de nieuwe situatie bij de andere put.

5.2.2 Conclusie met betrekking tot open systeem met verschillende temperaturen

De effecten van temperatuur op de geochemische en (micro)biologische kwaliteit van het grondwater in een WKO systeem worden in het temperatuurbereik van de onderzochte WKO systemen in de meeste gevallen overschaduwd door mengeffecten. Daar waar dat niet het geval is blijkt de theoretische beschrijving van temperatuursafhankelijk mineraal evenwicht goed te matchen met de analyses. Voor reacties die kinetisch gelimiteerd zijn, wordt in het temperatuurbereik van de onderzochte WKO systemen geen significante effecten verwacht binnen de monitoringsduur van de onderzochte WKO pilots. In zoverre deze effecten toch optreden worden deze waarschijnlijk overschaduwd door mengeffecten.

Op het warmste punt van de locatie werden verhoogde concentraties archaea aangetroffen terwijl de totale aantallen bacteriën niet veranderen. Overige verschillen in de microbiologie lijken primair het gevolg van menging en niet van de verschillen in temperatuur.

5.3 Reversibiliteit van effecten van verhoogde temperaturen: locatie Zwammerdam

Op de locatie Zwammerdam is in het verleden sprake geweest van een hoge temperatuurwarmteopslagsysteem. De opgeslagen temperaturen van ruim 80 graden zijn dusdanig hoog dat verondersteld kan worden dat zowel mesofiele als gematigd thermofiele organismen hierin niet hebben kunnen overleven. Aangezien dit destijds niet is onderzocht, is hiervoor echter geen bewijs in de vorm van meetresultaten beschikbaar. Sinds 2004 is het systeem niet meer in gebruik en de temperatuur terug gelopen tot beneden de 30 graden.

Uit de metingen die in 2011 op de locatie zijn uitgevoerd blijkt dat de aantallen micro-organismen (zowel totale aantallen als functies) in de warme en koude put niet significant afwijken van de aantallen in de referentie. Er zijn wel verschillen in biodiversiteitspatroon tussen de referentie en de 'koude' en 'warme' bron. Het aantal verschillende soorten lijkt niet tot beperkt te zijn verminderd (zie DGGE gel bijlage 4). Dit suggereert dat het systeem zich heeft hersteld, waarschijnlijk door middel van aanvoer van nieuwe organismen vanuit het toestromende grondwater.

Op de locatie zijn verhoogde concentraties chloride en calcium gemeten. Deze zijn te verklaren vanuit de zoutzuurdosering bij deze hoge temperatuuropslag, verder wordt deze locatie besproken in rapportage voor hoge temperatuur opslag (HTO, Rapport 6)

5.3.1 Conclusie reversibiliteit van hoge temperatuur systemen

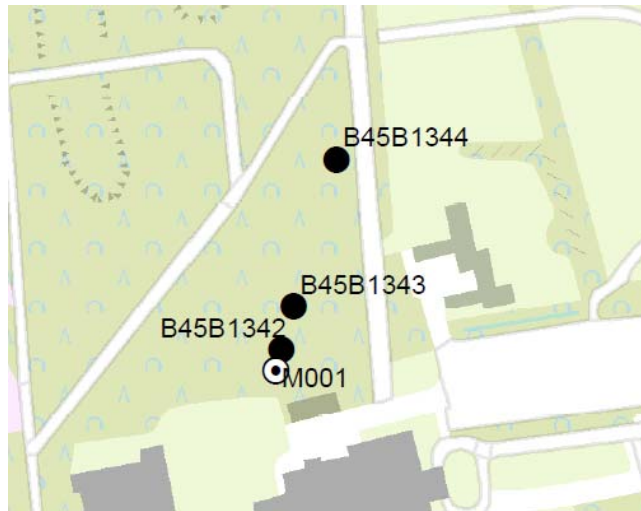
Na afsluiting van een hoge temperatuur WKO systeem lijkt herstel van de microbiële populatie mogelijk. In hoeverre de uiteindelijke populatie weer overeenkomt met de oorspronkelijk en de termijn die hiervoor nodig is, is op basis van de huidige beschikbare gegevens niet vast te stellen.

De zoutzuur (HCl) toevoeging die is toegepast om kalkneerslag te voorkomen, heeft geleid tot het oplossen van kalk uit het aquifer sediment in de directe omgeving van de koude put. Deze lokale kalkoplossing is een onomkeerbaar effect. Ook de toevoeging van chloride is onomkeerbaar. De invloed op het chloridegehalte is in dit geval echter beperkt (toename van 3.900 naar 4.100 mg/l) en door menging met het natuurlijke grondwater zal het chloridegehalte geleidelijk dalen naar de achtergrondwaarde.

5.4 Effecten van menging in relatie tot de kwaliteit van grondwater: locatie Rosmalen en locatie Strijp-S

Op een aantal locaties is naast een (klein) temperatuurverschil vooral sprake van menging van water. Een aantal van deze locaties (Rosmalen en Strijp-S) is verder onderzocht om de effecten van menging en transport in kaart te brengen. Op de locatie Rosmalen waar een monobron is gesitueerd is sprake van het mengen van water van verschillende diepte. Op de locatie Strijp-S is sprake van het rondpompen van water in het kader van een hydrologisch beheerssysteem voor het beheersen van een verontreiniging.

5.4.1 Effecten van WKO op de locatie Rosmalen

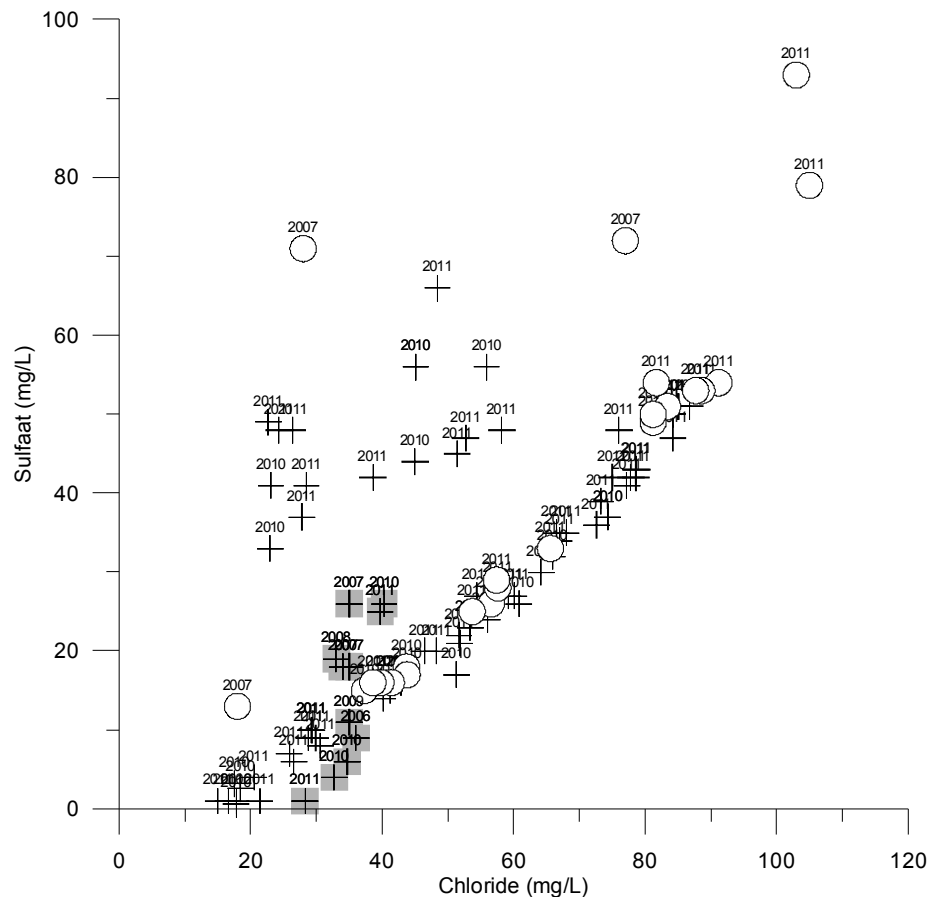


figuur 5.7 Overzicht van de monsterpunten op de locatie Rosmalen. De referentielocatie WP B45B0408 bevindt (buiten de kaart) op ongeveer 275 m ten noordoosten van de monobron (M)

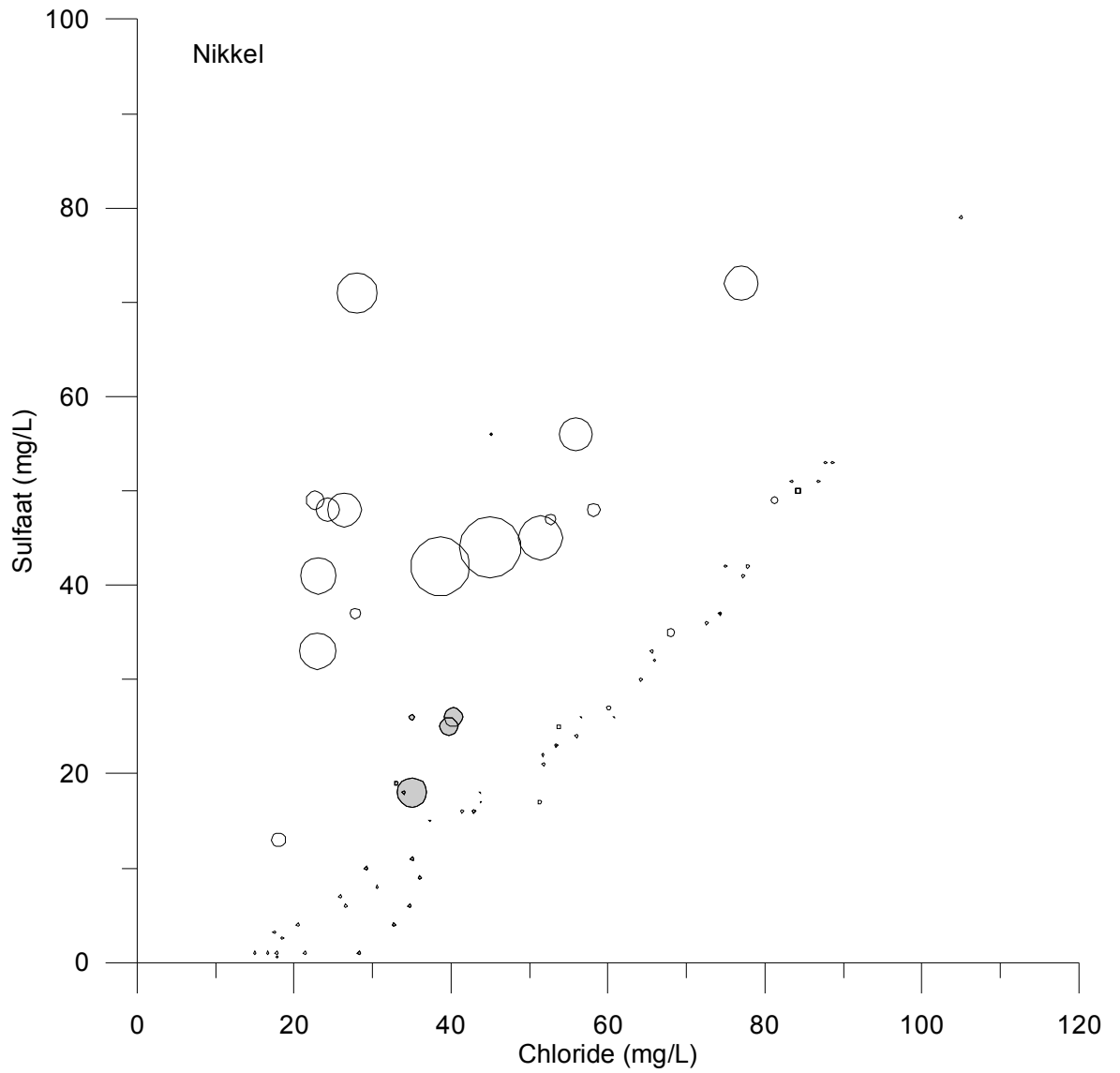
De dataset voor de locatie van Rosmalen laat goed de effecten van menging in de monobron zien. Op deze locatie is het ondiepe grondwater sulfaat- en chloride-rijker dan op grotere diepte. Om de menging inzichtelijk te maken, is chloride gebruikt als conservatieve tracer. Bij afwezigheid van processen die sulfaatreductie of sulfide-oxidatie veroorzaken kan ook sulfaat als conservatieve tracer gezien worden.

In figuur 5.8 blijkt dat de menging door de monobron van ondiep en diep water zich uitdrukt in een menglijn van lage chloride- en sulfaatconcentraties (diep grondwater) en hoge chloride en sulfaat concentraties (ondiep grondwater). Afgezien van enkele metingen in de monobron in het jaar van opstarten (2007) vallen alle monsters uit de monobron op deze menglijn. Deels vallen ook de metingen van de peilbuizen op deze menglijn, wat de aanwezigheid van gemengd WKO water in de aquifer op die locaties bevestigt. Een deel van de peilbuis data valt echter ook boven de menglijn met een relatieve aanrijking met sulfaat. Het bemonsterde grondwater in deze peilbuizen wijst dus op invloeden dan de conservatieve menging binnen het WKO systeem. Het zijn deze ondiepe monsters die ook verhoogde nikkel concentraties (tot 34 $\mu\text{g/L}$) laten zien (figuur 5.9), hieronder bevinden zich ook de monsters van de referentielocatie (WP B45B0408) waar ze zich in de ondiepste filters bevinden, deze zijn echter minder verhoogd dan de metingen in het bereik van het WKO systeem. De lage concentraties aan nikkel in het door de WKO beïnvloedde grondwater wordt verklaard door de verdunning die daar optreedt door menging met dieper grondwater. De bron voor de verhoogde nikkel concentraties in combinatie met de verhoogde sulfaat concentraties is waarschijnlijk de oxidatie van ijzersulfiden in het ondiepe grondwater. Mogelijk wordt deze oxidatie van ijzersulfiden door WKO geïnduceerde grondwaterstandwisselingen versterkt. Ook voor arseen worden enkele verhoogde concentraties (tot 61 $\mu\text{g/l}$) buiten de WKO menglijn gevonden en worden deze verdund in het mengwater van de bronnen.

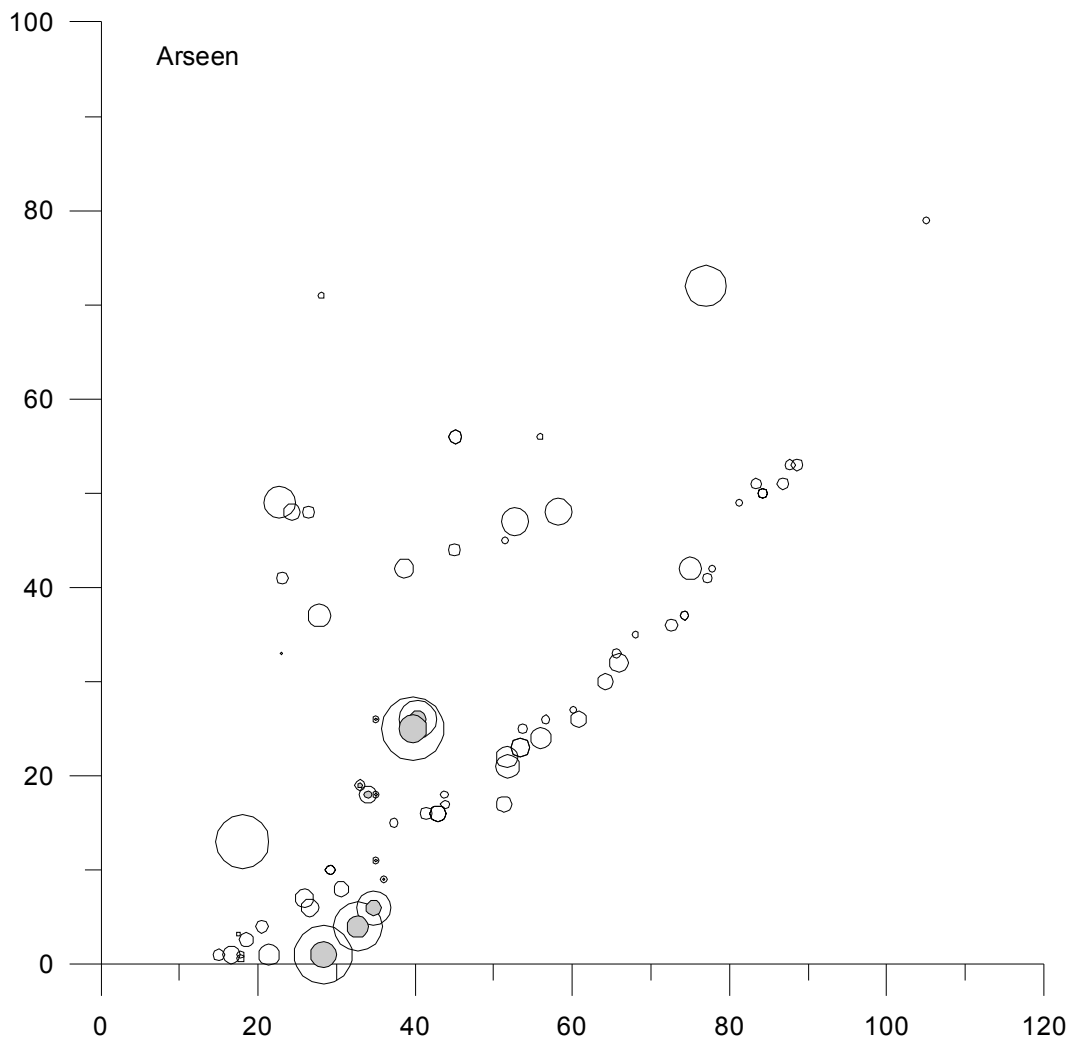
Ondanks dat de bron voor deze arseenverhogingen ook gerelateerd is aan de oxidatie van ijzersulfiden, zijn deze slecht gecorreleerd met de nikkelverhogingen. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het contrasterende transportgedrag van het arseen als negatief geladen oxyanion ten opzichte van het positief geladen kation nikkel.



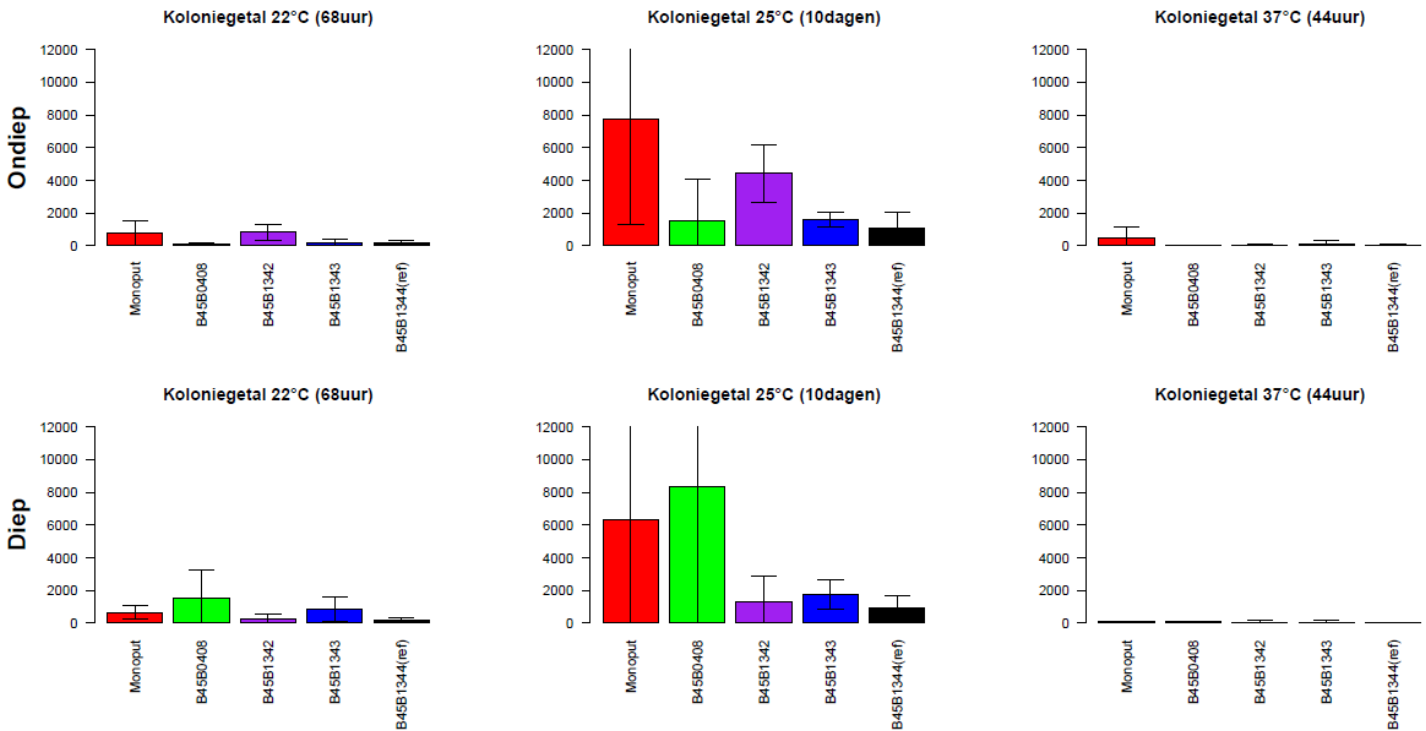
figuur 5.8 Geobserveerde chlorideconcentraties tegen sulfaatconcentraties voor de locatie Rosmalen. Cirkels zijn metingen uit de monobron, plussen uit peilbuizen. De grijs gearceerde analyses geven de observaties weer in de referentiefilters



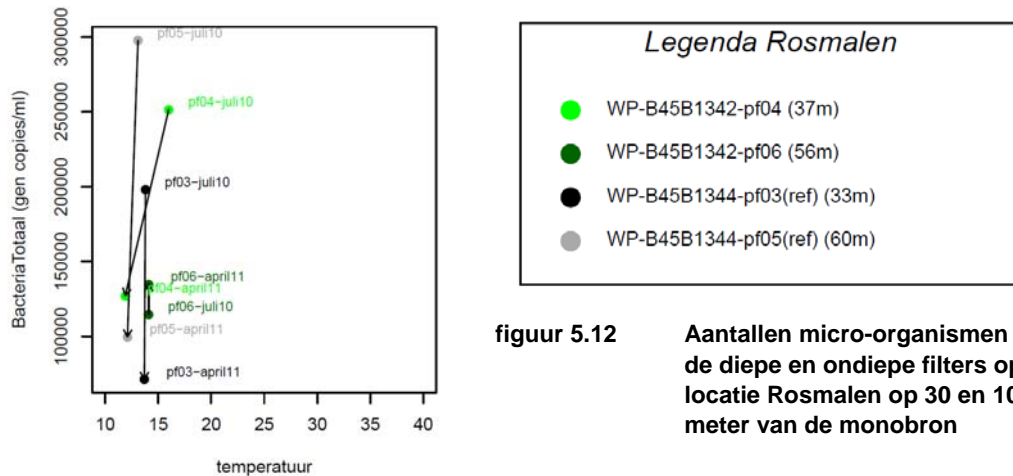
figuur 5.9 Geobserveerde chlorideconcentraties tegen sulfaatconcentraties voor de locatie Rosmalen. Cirkels geven de relatieve nikkel concentraties weer. De grijs gearceerde analyses geven de observaties weer in de referentiefilters



figuur 5.10 Geobserveerde chlorideconcentraties tegen sulfaatconcentraties met jaartallen voor de locatie Rosmalen. Cirkels geven de relatieve arseen concentraties weer. De grijs gearceerde analyses geven de observaties weer in de referentiefilters



figuur 5.11 Overzicht van aantal kweekbare micro-organismen (aantal kolonie vormende eenheden per milliliter(KVE/ml)) in de monoput en peilbuizen op de locatie Rosmalen. Bovenste rij: resultaten van ondiepe filters. Onderste rij: resultaten van diepe filters



figuur 5.12 Aantallen micro-organismen in de diepe en ondiepe filters op locatie Rosmalen op 30 en 100 meter van de monobron

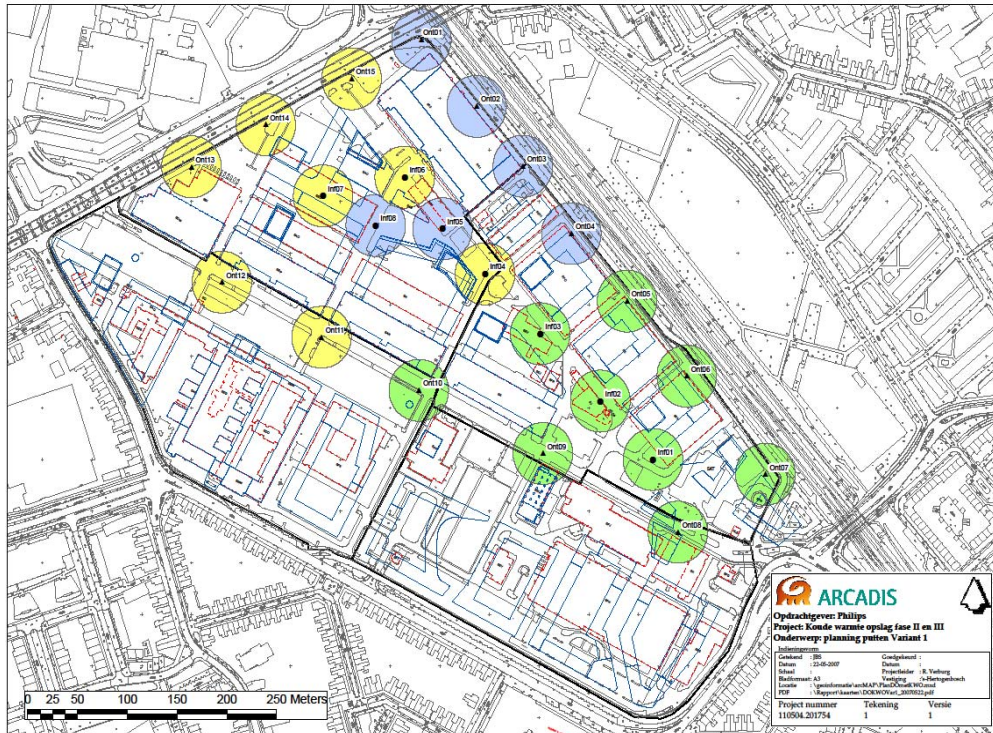
Voor het systeem in Rosmalen zijn door Brabant water (micro)biologische metingen op basis van kweektechnieken uitgevoerd. Uit de (micro)biologische metingen middels kweektechnieken blijkt dat de meeste kweekbare organismen (aantallen KVE/ml) bij 25 °C worden gemeten (figuur 5.11). Ter plaatse van de monobron zijn er geen significante verschillen in aantallen gevonden op de verschillende dieptes. Dit kan verklaard worden door de menging die in de monobron plaatsvindt. De aantallen nemen met toenemende afstand van de monobron af in het ondiepe pakket terwijl in het diepe pakket de aantallen eerst toenemen en op verdere afstand afnemen. Het aantal kweekbare organismen is binnen het WKO systeem hoger dan in de referentie.

Als met de moleculaire analyse gekeken wordt naar de aantallen micro-organismen (figuur 5.12) dan is te zien dat deze variëren in de tijd en dat de dynamiek in aantallen in de referenties (zowel diep als ondiep) groter is dan binnen het systeem. Dit geldt ook voor de verschillende functionaliteiten binnen deze groep.

Uit de kweek en moleculaire analyses blijkt dat de totale aantallen micro-organismen variëren en dat de mate waarin dit gebeurt niet te koppelen is aan de werking van de WKO, maar dat de fractie die makkelijk groeit en kweekbaar is wel selectief door de WKO wordt gestimuleerd (of aangetrokken). Deze observaties komen overeen met de eerdere observaties (zowel binnen MMB locaties als uit de literatuur) dat vooral de samenstelling van de populatie wordt beïnvloed en in veel mindere mate de totale hoeveelheid micro-organismen. In dit geval is de verandering in de samenstelling van de populatie echter niet het gevolg van de temperatuurveranderingen (die zijn immers beperkt), maar van waarschijnlijk het gevolg van het aantrekken/mengen van grondwater met een andere samenstelling.

5.4.2 Effecten van WKO op de locatie Strijp-S

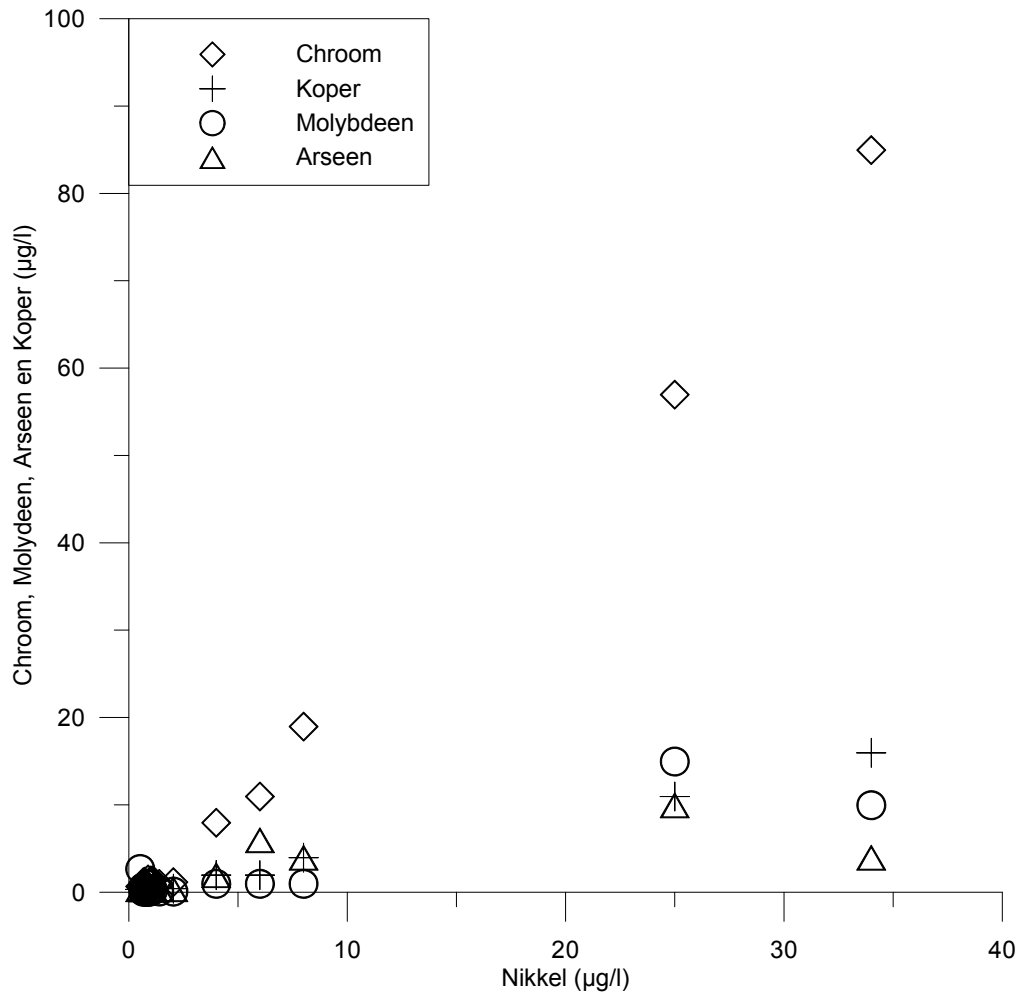
Op de locatie Strijp-S is in 2011 een WKO recirculatie systeem opgestart (figuur 5.13). De doorspoeling van het WKO systeem is echter nog onvolledig tijdens de MMB bemonsteringronde in 2011, in April (beperkte analyseset) en September (beperkte set peilbuizen). Wel is de verwachting dat van de bemonsterde peilbuizen, 29SH en 5/5A het eerst gemengd WKO water zullen ontvangen aangezien deze het dichtst bij de infiltratieputten liggen. Peilbuis 4A wordt als referentiebus beschouwd aangezien deze buiten het bereik valt waarbinnen het gemengde het WKO water zich zal verspreiden. Tijdens de bemonsteringsronde in 2010 is de uitgangssituatie wat betreft de grondwaterkwaliteit vastgesteld. Aanvullend op de metingen uitgevoerd door het MMB consortium is in december 2011 door Philips zelf een bemonstering uitgevoerd (beperkte set peilbuizen, en beperkte analyseset).



figuur 5.13 Overzicht locatie met gerealiseerde (I, blauw en II geel) en geplande (III, groen) Sanergyclusters

Om de menging inzichtelijk te maken wordt chloride gebruikt als conservatieve tracer. Bij afwezigheid van processen die sulfaatreductie of sulfideoxidatie kan ook sulfaat als conservatieve tracer gezien worden. Voor de uitgangssituatie in 2010 vallen de chloride concentraties tussen de 50 en 100 mg/l, de sulfaatconcentraties tussen de 50 en 150 mg/l (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**). Voor zowel chloride als sulfaat worden de hoogste concentraties in de meest ondiepe filters (30m) gevonden, maar een eenduidige trend met de diepte ontbreekt. Het beeld voor de bemonsteringsronde in april 2010 komt hiermee overeen, echter in september 2011 laten de peilbuizen nabij de infiltratieputten sterk verhoogde chloride concentraties zien in de filters op 30m (29 SH en 5/5A), 40m diepte en 50 m diepte (29SH). In december 2011 is niet op chloride gemeten, alleen de resultaten van april en september zijn hier in beschouwing genomen. De toename in chloride concentraties wijst er op chloriderijk water van binnen de invloedssfeer van de WKO is aangetrokken. Na menging met chloridearm water heeft het geïnjecteerde water zich op de diepte van de bemonsterde peilbuisdiepten. Tevens geeft de relatie tussen chloride en sulfaat in deze monsters aan dat dit geïnjecteerde water zich met het oorspronkelijke grondwater in de range van filterdiepten heeft vermengd. De referentiepeilbuis (4A) die zich buiten de menginvloed van de WKO bevindt, laat geen sterke toename van chlorideconcentraties zien. Afhankelijk van de aard en de positie van het initiële chloriderijke water ten opzichte van het WKO systeem, zullen de chloorconcentraties zich bij verdere recirculatie binnen het WKO systeem homogeniseren en stabiliseren bij bepaalde hoogte van chloride concentraties.

Uit de resultaten van september 2011 blijkt dat in het in chloride aangerijkte WKO mengwater ook aangerijkte zware metalen aanwezig zijn; met name nikkel (figuur 5.16) en chroom (figuur 5.17), en een reeks andere elementen zoals de oxy-anionen molybdeen en arseen (figuur 5.14). Voor enkele van deze elementen nemen ook de concentraties in de referentiepeilbuis (4A) toe, bijvoorbeeld nikkel (figuur 5.16) en chroom (figuur 5.17), maar zonder sterke toename van chloride en in veel beperktere mate dan voor de peilbuizen die reeds mengwater van de WKO ontvangen (29SH en 5/5A).

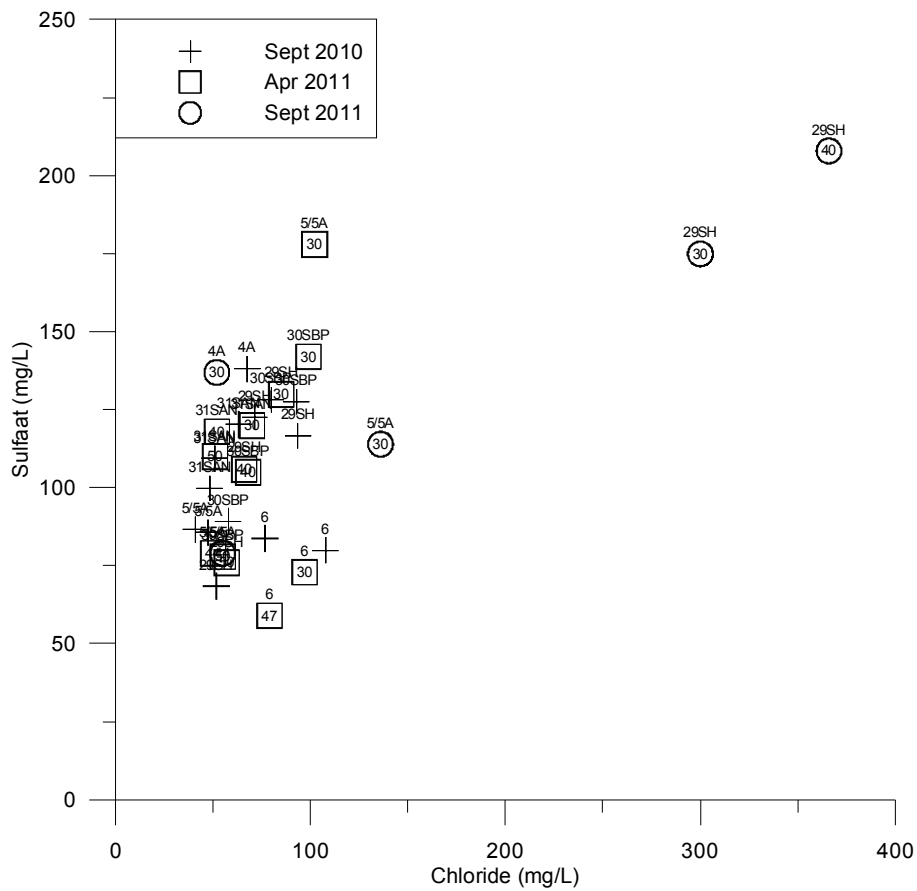


figuur 5.14 Nikkel concentraties in relatie tot enkele andere elementen met verhoogde concentraties in het WKO water

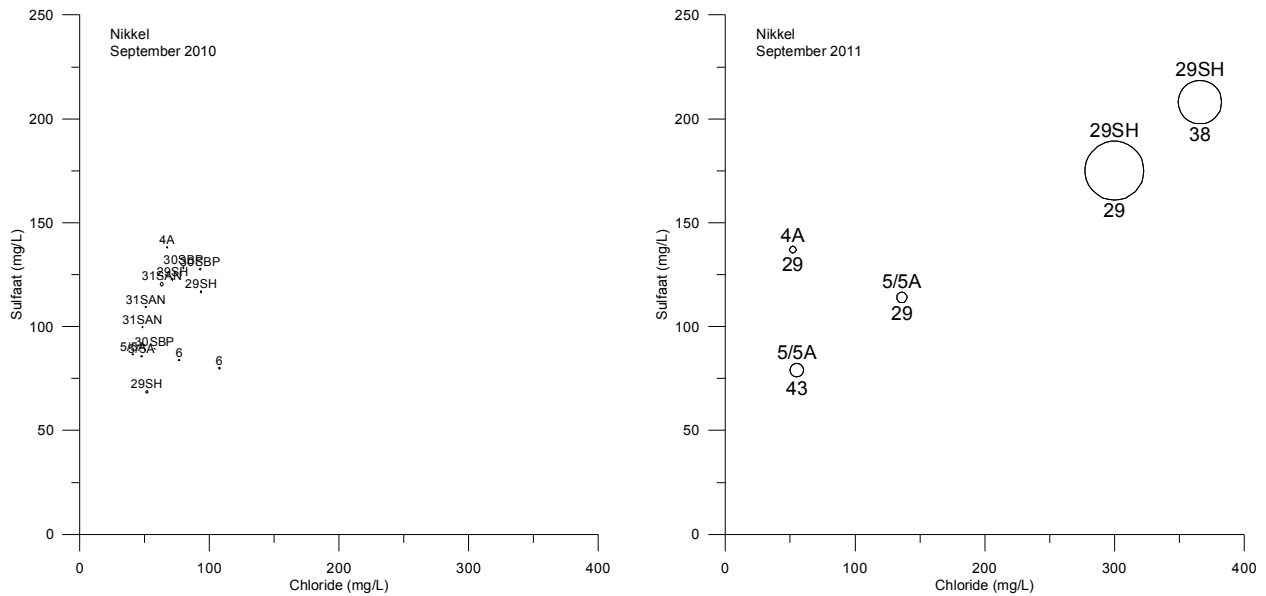
Tijdens de monitoring in december 2011 zijn alleen de filters van peilbuis 29SH bemonsterd. De referentie peilbuis is niet bemonsterd. De monitoring in december 2011 wijkt af van de low flow purge methode waarmee binnen MMB is bemonsterd. In december 2011 is drie keer het peilbuis volume afgepompt voorafgaand aan de bemonstering. Tijdens de monitoring in december 2011 is een zeer beperkte analyseset uitgevoerd, de chloride en sulfaat zijn niet geanalyseerd, hierdoor is een beschouwing ten aanzien van mengen van waterstromen voor deze ronde niet mogelijk.

De laatste resultaten van december 2011 wijzen op lagere concentraties metalen dan de meting in september 2011. Om hier een gedegen analyse op uit te voeren is meer data (peilbuizen en parameters) nodig. Op basis van de natrium- en geleidbaarheidwaarden blijkt echter dat deze peilbuizen nog steeds beïnvloed worden doordat het WKO systeem water aantrekt met een afwijkende samenstelling. Zo zijn de natrium- en geleidbaarheidwaarden zijn nog steeds verhoogd ten opzichte van de achtergrond rondes in september 2010 en april 2011. Ook zijn de gemeten pH waarden in december 2011 (8,2-8,8) lager dan in september 2011 maar zijn wel verhoogd ten opzichte van de achtergrondmetingen in april 2011 (circa 7,5).

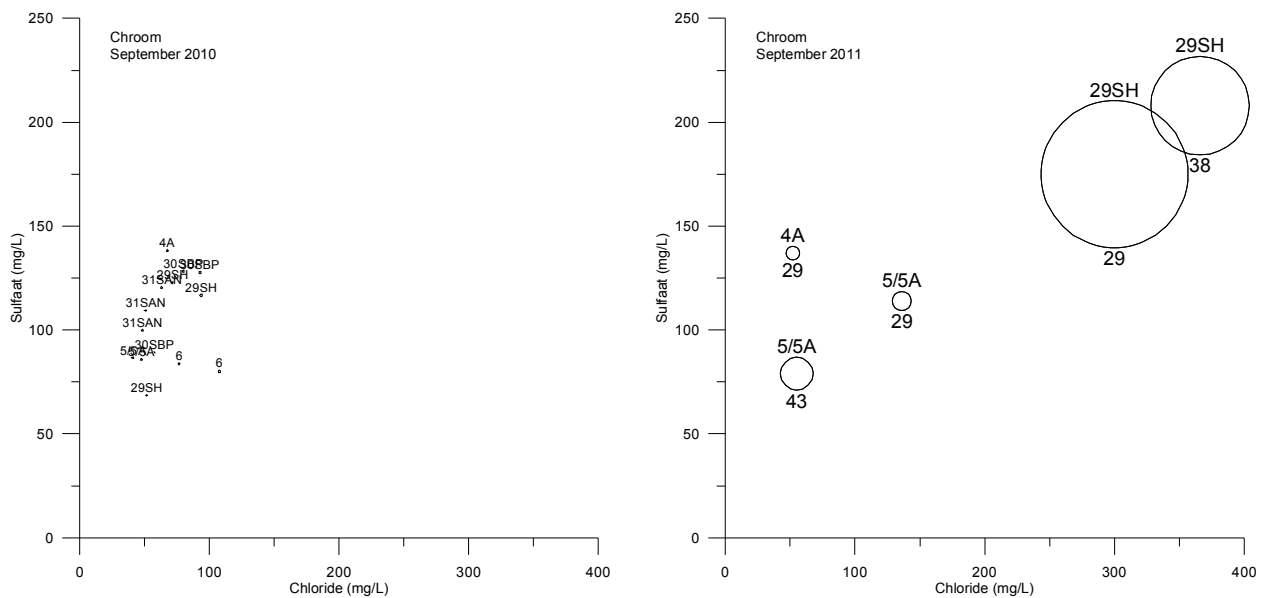
Op basis van de drie uitgevoerde meetronden, na opstart van het systeem, is duidelijk dat er sprake is van het optreden van verhoogde metalenconcentraties ten opzichte van de achtergrond rondes. De samenstelling van het WKO water wijst op het mengen van grondwaterkwaliteiten, die anders zijn dan zoals tijdens de achtergrond rondes bepaald. Geadviseerd wordt het verdere verloop van de grondwatersamenstelling te volgen door het grondwater in alle peilbuizen (zoals gemeten in de achtergrond rondes van september 2010 en april 2011). Om uitsluitel te geven in de mate waarin de samenstelling van het WKO water blijft afwijken van de achtergrond concentraties dient dan ook hetzelfde, uitgebreide analysepakket gebruikt te worden als in deze achtergrond rondes. Daarnaast wordt het, indien enigszins mogelijk, aanbevolen het water bij de infiltratieputten en ontrokken bij de verschillende ontrekkingsputten te analyseren. Dit om de samenstelling van het WKO mengwater en de mogelijke bronlocaties die bijdragen aan de instroom van het externe water te bepalen.



figuur 5.15 Sulfaatconcentratie uitgezet tegen chlorideconcentratie, voor alle peilbuizen gemeten in 2010 en april en September 2011. De getallen in de cirkels en vierkanten geven de diepte (m-mv) van het filter aan



figuur 5.16 Nikkelconcentratie geplot in de grafiek waarbij sulfaat en chloride zijn uitgezet, links September 2010 (nulst situatie) en rechts September 2011. De grootte van de cirkels is een maat voor de concentratie (hoe groter de cirkel hoe hoger het gehaltes). Boven de cirkels zijn peilbuislabels aangegeven, er onder de filterdieptes



figuur 5.17 Chroomconcentratie geplot in de grafiek waarbij sulfaat en chloride zijn uitgezet, links September 2010 (nulst situatie) en rechts September 2011. De grootte van de cirkels is een maat voor de concentratie (hoe groter de cirkel hoe hoger het gehaltes). Boven de cirkels zijn peilbuislabels aangegeven, er onder de filterdieptes

5.4.2.1 Effecten op de biologie

Op de locatie Strijp-S nemen de aantallen van diverse organismen tussen de eerste en de derde meetronde significant toe (met een factor van circa 100 of meer). De hoeveelheid biomassa is de derde meetronde in alle peilbuizen vergelijkbaar (10^7 cellen/ml). Dit effect is vooral zichtbaar in het middelste filter van 29SH, hierin is een sterke (> factor 100) toename in totaal aantal bacteriën. De toename in totaal aantal bacteriën kan verklaard worden door een verhoogde beschikbaarheid in organisch stof ten gevolge van het rondpompen van water. De samenstelling van de bacteriële populatie varieert onderling. In peilbuis 29SH-40m nemen de genen voor sulfaatreductie (*dsrB*), zwaveloxidatie (*soxB*) en methaanvorming (*mcrA*) sterk in aantal toe. Dit duidt op een toename van sulfaatreductie en methanogenese en sterker gereduceerde omstandigheden.

De effecten op micro-organismen betrokken bij afbraak op de locatie Strijp-S worden verder besproken in rapport 9. Uit de analyse van de gegevens daar blijkt dat in de meeste peilbuizen (29SH alle dieptes, 30SBP-30m en -40m, 31SAN alle dieptes en 5A-30 m), inclusief in de referentiepeilbuis, de aantallen *Dehalococcoides* en specifieke genen betrokken bij de reductieve afbraak van VOCl toenemen. Dit duidt op een toename in afbraakpotentie. Daarnaast zijn ook de genen betrokken bij micro-aerofiele afbraak van VOCl aangetroffen in een aantal peilbuizen en nemen deze in de tijd toe. Dit wijst erop dat er naast reductieve dechlorering ook een potentie aanwezig is voor micro-aerofiele afbraak van VOCl. Daar het een eenmalige waarneming betreft dienen deze resultaten op basis van langdurigere monitoring en in vergelijking met het gebied buiten het WKO gebied te worden geverifieerd.

De toename in het aantal micro-organismen in de verschillende meetronden is niet te wijten aan verschillen in de temperatuur (die zijn zeer gering) maar is waarschijnlijk het gevolg van de verhoogde stroomsnelheid van het grondwater. Er is hierbij geen onderscheid te maken in een toename door groei op vrijgemaakt TOC of verplaatsing van water met hogere concentraties micro-organismen uit delen van de locatie.

5.4.3 Conclusies menging

Menging bleek de meest bepalende factor voor geochemische kwaliteitsveranderingen in het grondwater binnen een open WKO systeem. In de wijze van menging kunnen een drietal manieren onderscheiden worden:

- De initiële menging van verschillende typen water die worden ingetrokken over de filterlengte bij opstarten van de WKO. Dit bepaalt de initiële samenstelling van het WKO water. Bij het aanwezig zijn van verticale verschillen wordt de bijdrage van deze kwaliteitsverschillen in het mengwater in hoge mate bepaald door de relatieve doorlatendbaarheid van de lagen die met deze kwaliteitsverschillen geassocieerd zijn. Bij het opstarten van Strijp-S vond er duidelijk menging plaats met ondiep grondwater met afwijkende kwaliteit (o.a. inzichtelijk door verhoogde chlorideconcentraties). Daarnaast nam het aantal micro-organismen in de beïnvloede peilbuizen toe. Dit kan het gevolg zijn geweest van groei door toenemende beschikbaarheid van TOC, door de verhoogde snelheid van de grondwaterstroming (er komt per tijdseenheid meer grondwater langs). Ook het intrekken van een waterstroom met verhoogde concentraties micro-organismen is een mogelijke verklaring.

- De continue instroom en vervanging van een deel van het WKO water door omringend achtergrondwater. Deze mengingstype wordt vooral bepaald door de relatieve snelheid van de regionale grondwaterstroming ten opzicht van de gebruikte pompdebieten. Ook hier zijn relatieve doorlatendheidsverschillen over het dieptetraject van het bronfilter van belang. Zo blijkt voor de langlopende WKO op de centrum locatie in Utrecht dat er relatief veel ondiep water, dat relatief sulfaat arm is, ingetrokken wordt.
- Menging die optreedt aan het front tussen het geïnjecteerde mengwater uit de WKO en het omringende grondwater tijdens infiltratie en onttrekking door longitudinale en transversale dispersieprocessen. Dit proces is vooral van belang bij voldoende contrast tussen de samenstelling van het mengwater in de WKO en de omringende grondwaterkwaliteit. Dit proces is deels afhankelijk van de grondwaterstroomsnelheid en is afhankelijk van de, temporeel variërende, operationele condities van een WKO systeem. Dispersie draagt daarom bij aan de variatie van de mengwater samenstelling. Dit komt op de locatie Strijp-S waarschijnlijk deels tot uitdrukking in chloride en sulfaat concentraties voor de verschillende filters in de peilbuizen (5A en 29SH) die door het WKO mengwater beïnvloed zijn. Weliswaar wijzen de vergelijkbare chloride-sulfaat verhoudingen in deze filters op dezelfde invloedsbron, de absolute concentraties variëren. Als aangenomen mag worden dat gedurende de WKO infiltratie de chloride en sulfaatconcentraties constant zijn in het geïnjecteerde WKO mengwater, dan zijn de verschillen in de absolute chloride en sulfaat concentraties een reflectie van de mate aan waarin er dispersieve menging van het WKO mengwater aan het infiltratiefront is opgetreden.

Van de drie door de TCB genoemde gradiënten (Paragraaf 2.2.3), wordt de significante menging water met van verschillende chlorideconcentraties herkend op de locatie Beijum, Strijp-S en locatie centrum Utrecht. Daarnaast vind er ook significant menging plaats over hardheidsgradiënten op de locatie centrum Utrecht en in mindere mate op de locaties Strijp-S en Rosmalen.

6 Eindconclusies

6.1 Onderzoeksvragen

6.1.1 Wat is het effect van open bodemenergiesystemen op de geochemie (adsorptie/desorptie, chemische evenwichten)?

Bij open systemen wordt vaak aangenomen dat de invloed van de temperatuur een belangrijke - zo niet de belangrijkste - parameter is die de chemische en microbiologische samenstelling van het grondwater beïnvloedt. Voor de onderzochte open systemen bleek echter dat de effecten van temperatuur zeer gering waren, en dat menging van grondwater als gevolg van het onttrekken en infiltreren van grondwater de meest bepalende factor is.

Bij open systemen kan deze menging op een aantal manieren plaatsvinden waaronder middels het onttrekken van grondwater van verschillende samenstelling, dat gemengd en vervolgens weer geretourneerd wordt. Dit effect is vooral van belang in het eerste jaar en/of bij een onbalans in de jaarlijks verpompte waterhoeveelheden. Dit effect is het meest duidelijk waargenomen bij de metingen op de pilotlocaties. Menging van water met verschillende chloridegehalten en hardheidsprofielen is het meest voorkomend gebleken op de pilotlocaties.

Met betrekking tot temperatuurseffecten op de geochemie is zowel een uitwerking op theoretische basis uitgevoerd als metingen op de locatie. De snelheid van geochemische en biologische reacties neemt met een factor 2 tot 3 toe bij een temperatuurverhoging van 10°C naar 20°C. Voor open grondwatersystemen zijn de reactiesnelheden daarom in de koude bron lager en in de warme bron hoger dan bij de natuurlijke grondwatertemperatuur. Hoe groter de temperatuurverandering, hoe groter de veranderingen in de reactiesnelheden. Doordat bij bodemenergiesystemen met een energiebalans ongeveer evenveel opwarming als afkoeling optreedt, is het netto effect op de reactiesnelheden echter klein. De temperatuursverschillen hebben daarom een geringe invloed op de geochemische waterkwaliteit van de binnen MMB bestudeerde bodemenergiesystemen.

Het theoretisch kader geeft voor temperaturenverschillen van minder dan 20 °C geen aanleiding tot het verwachten van significante temperatuurseffecten op een tijdschaal van 20 jaar. De waterkwaliteitsveranderingen die te verwachten zijn op basis van minerale evenwicht voor kalk, komen goed overeen met de veldwaarnemingen bij de Heuvelgalerie.

6.1.2 Wat zijn effecten op de microbiële ecologie (aantallen, samenstelling populaties, activiteit, voorkomen van pathogenen)?

Net als voor de geochemie geldt dat de te verwachten effecten op de microbiologie locatieafhankelijk zijn. De microbiële populaties zijn vaak locatiespecifiek en de populatiedynamiek (verhouding tussen meer of minder aanwezigheid of activiteit) is zelfs vaak meetpunt specifiek. Op basis van dit onderzoek zijn echter wel een aantal generieke effecten te beschrijven.

In de labtesten is bij een temperatuur van 18 °C geen effect op de aantallen en het functioneren van de micro-organismen vastgesteld. Bij 30 °C zijn wel effecten op de activiteit van de micro-organismen gemeten. In het veld zijn deze effecten binnen het bemeten temperatuurbereik (tussen 11°C en 35 °C) niet gevonden. De gemeten hoeveelheden en samenstelling van de bacteriën vallen binnen de totale natuurlijke variatie in de Nederlandse ondergrond die zowel binnen als buiten het bodemenergiesysteem gemeten is. De aantallen en samenstelling van de bacteriën zijn primair afhankelijk van de bemonsterde locatie.

Bij temperaturen hoger dan 30 °C (in labtesten en op de warmste onderzoekslocatie Beijum, 39 °C) zijn wijzigingen in de samenstelling van de microbiologische populatie gevonden. Maar hier bleek dat de functies die de microbiologische populatie verzorgt intact blijven. Deze effecten komen overeen met de theoretische verwachting. Rond deze temperatuur heeft een andere groep micro-organismen een selectief voordeel. De specifieke soorten die de verschillende functies uitvoeren kunnen naar gelang de temperatuur wel veranderen. Blijkbaar worden de functies overgenomen door de nieuwe soorten. Ook zijn er binnen het bemeten temperatuurbereik in het veld (tot 39 °C) geen aanwijzingen gevonden voor toe- of afname van de biodiversiteit door de temperatuur. Dit is van belang voor de veerkracht van het microbiologische systeem.

Er zijn op slechts enkele locaties zeer lage aantallen pathogenen (waaronder *Clostridium*) aangetroffen. Deze aantallen blijven ver onder de toegestane normen voor bijvoorbeeld oppervlaktewater en vormen dus geen aanvullend risico. *Legionella pneumophila* werd op geen enkele van de locaties aangetroffen, wat overeen komt met de verwachting op basis van de literatuurstudie.

Er zijn geen directe correlaties gevonden tussen de concentraties TOC (koolstofbron voor micro-organismen) en de hoeveelheid micro-organismen die op de locaties werden aangetroffen. De concentraties TOC op de gemeten locaties zijn over het algemeen laag, of zijn onvoldoende biobeschikbaar en vormen mogelijk de beperkende factor voor microbiologische groei. De verontreinigde locaties (rapport 9) vormen hierop een uitzondering, hier blijkt namelijk dat bij een toename van de concentratie TOC een toename van het totaal aantal bacteriën waargenomen wordt.

6.1.3 Wat is het effect op de kwaliteit van het grondwater?

Het effect van temperatuur (bij temperatuursverschillen van minder dan 20 °C) op de kwaliteit van het grondwater blijkt op de genoemde locaties gering te zijn. Verstoring door andere processen en het geringe aantal metingen bij hogere temperaturen verhinderen uitsluitend over effecten bij hogere temperaturen. Mengingseffecten hebben wel invloed op de kwaliteit. Zo kan het aantrekken van zout water op diepte, na menging in het WKO systeem voor verzilting kunnen zorgen op diepten waar zich zoet grondwater bevindt. Dit is echter zeer locatie-specifiek en hangt af van de aanwezigheid en mate van zoet-zout verschillen in relatie tot bijvoorbeeld filterstelling. Ook voor andere WKO locaties is dus de resulterende kwaliteit een resultante van conservatieve menging, geochemische en (micro)biologische activiteiten en eventuele temperatuurinvloeden.

De grootste effecten op de kwaliteit worden waargenomen bij de initiële menging van verschillende typen water die worden ingetrokken over de filterlengte bij opstarten van de WKO. Het vrijmaken en distribueren van organisch stof kan de biomassagroei versterken of er kunnen gesuspendeerde concentraties micro-organismen van de ene naar de andere locatie worden verspreid. Daarnaast kan door continue instroom en vervanging van een deel van het WKO water omringend achtergrondwater worden aangetrokken.

Tevens kan menging optreden tussen WKO water en omringend grondwater. Het effect is dan afhankelijk van het verschil tussen de samenstelling van het mengwater in de WKO en de omringende grondwater kwaliteit. Dit proces is deels afhankelijk van de grondwaterstroomsnelheid en is afhankelijk van de, temporeel variërende, operationele condities van een WKO systeem.

Literatuur

Appelo, C.A.J., Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Ed. Balkema. 536 pp.

Brielmann, H, C. Griebler, S. L., Schmidt, R. Michel, and L. Tillmann (2009). Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microb. Ecol.* 68:273-286.

Lerm, S., M. Alawi, R. Miethling-Graff, M. Wolfgramm, K. Rauppach, A. Seibt and H. Würdemann (2011). Influence of microbial processes on the operation of a cold store in a shallow aquifer: impact on well injectivity and filter lifetime. *Grundwasser* 16: 93-104.

Lieten, S. en Dinkla, I. (2011). Literatuurstudie Meer Met Bodemenergie, Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom bodemenergie - Hoofdstuk 7: Effecten op ondergrondse microbiologie. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Madigan M, Martinko J (editors) (2006). *Brock Biology of Microorganisms* (13th ed.). Pearson Education. p. 1096.

Meer Met Bodemenergie, rapport 6 Hogetemperatuuropslag. Kennisoverzicht en praktijkmetingen rondom hogetemperatuurwarmteopslagsystemen. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Meer Met Bodemenergie, rapport 8 Autonome opwarming. Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

N Hartog, Anticipated Temperature Effects on Biogeochemical Reaction Rates in Seasonal Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) Systems : An Evaluation Using the Arrhenius Equation, in Dutch Geothermal Congress 2011: Utrecht, NL

Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2) - a computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations. *US Geol. Surv. Water Resour. Inv. Rep.* 99-4259, 312p.

TCB (2009), Advies duurzaam gebruik van de bodem voor WKO. Technische Commissie Bodem (TCB), A050, september 2009, Den Haag.

Bijlage I

Afweging pilot keuze

Meer Met Bodemenergie: Selectie pilot-locaties voor werkpakket 2 en 3

- DEFINITIEF CONCEPT -

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Afweging locaties werkpakket 2	4
2.1	Afwegingscriteria	4
2.1.1	Type systeem	4
2.1.2	Redoxtoestand	4
2.1.3	Temperatuurniveau	6
2.1.4	Beschikbaarheid meetputten.....	6
2.1.5	Ouderdom van het project.....	6
2.1.6	Beschikbaarheid historische meetgegevens.....	7
2.1.7	Medewerking eigenaar/beheerder	7
2.1.8	Aantal locaties	7
2.2	Weging criteria	7
2.3	Selectie locaties	8
3	Afweging locaties werkpakket 3	12
3.1	Afwegingscriteria	12
3.2	Weging criteria	12
3.3	Selectie locaties	13
3.3.1	Jaarbeursterrein, Utrecht	13
3.3.2	Strijp S, Eindhoven.....	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
3.3.3	Paleiskwartier, Den Bosch	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
3.3.4	Ridsterrein, Haarlem	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
3.3.5	Evenblij, Hoogeveen	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
3.3.6	Apeldoorn ROC.....	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
3.3.7	Appeldoorn Stadhuis.....	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
3.3.8	Appeldoorn Gemeentehuis	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
	Literatuur	15
Bijlagen:		
1	Overzicht aangedragen locaties WP2	
2	Kenmerken geselecteerde locaties WP2	
3	Kenmerken geselecteerde locaties WP3	

1 Inleiding

In het kader van Meer Met Bodemenergie zal onderzoek worden uitgevoerd naar de milieueffecten van warmte-/koudeopslag (WKO). Gestart wordt met een literatuuronderzoek om de huidige kennis over deze milieueffecten te inventariseren. Vervolgens zal onderzoek worden uitgevoerd in het laboratorium en in het veld. Voor het onderzoek in het veld zijn praktijklocaties nodig, waar in-situ metingen kunnen worden uitgevoerd om de effecten van WKO-systemen te onderzoeken.

De partijen die participeren in Meer Met Bodemenergie zijn in de gelegenheid gesteld om pilot locaties aan te dragen. Daarnaast zijn locaties aangeleverd door de onderzoekspartijen zelf. De keuze voor de onderzoekslocaties is van groot belang voor het vervolg van het onderzoek, omdat dit mede bepaalt welke gegevens beschikbaar komen. Het is dan ook belangrijk om tot een weloverwogen keuze te komen.

2 Afweging locaties werkpakket 2

2.1 Afwegingscriteria

Doel van het onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie is het verbeteren van de kennis over de milieueffecten van WKO-systemen. De geselecteerde pilots bepalen welke onderzoeksvragen kunnen worden beantwoord en in hoeverre deze te vertalen zijn naar landelijke schaal. Hieronder zijn de belangrijkste criteria voor de selectie nader toegelicht.

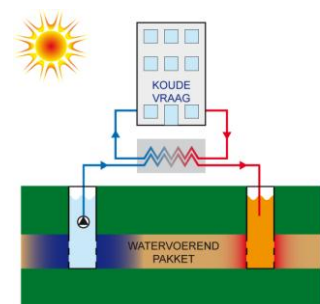
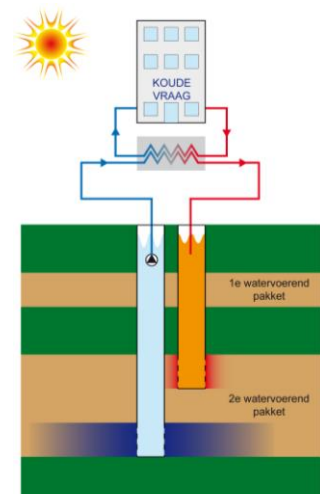
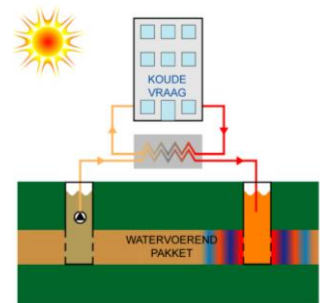
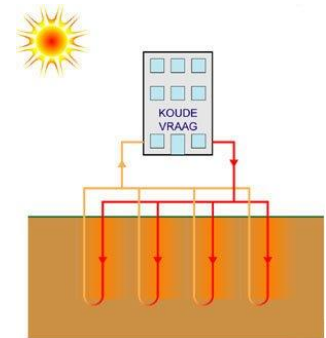
2.1.1 Type systeem

Bodemenergie kan worden onderverdeeld in open en gesloten systemen. De gesloten systemen bestaan uit bodemwarmtewisselaars (zie figuur 2.1, bovenste tekening). De open systemen zijn uit te splitsen in recirculatiesystemen (2^e van boven), monobronnen (3^e van boven) en doubletsystemen (onderaan). Binnen de doubletsystemen kan onderscheid worden gemaakt tussen hoge temperatuur warmteopslag en “gewone” WKO-systemen met relatief kleine temperatuurverschillen ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Om een zo representatief mogelijk beeld te verkrijgen is het streven om binnen werkpakket 2 voor verschillende typen systemen te kiezen.

2.1.2 Redoxtoestand

De invloed van temperatuurverandering door bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit wordt bepaald door de mate waarin de temperatuur verandert (zie 2.1.3) en de samenstelling van bodem en grondwater. In bodemlagen met een hoge reactiviteit is de kans op beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit door de temperatuurverandering het grootst. De belangrijkste reactieve bestanddelen in de ondergrond zijn (Van Beek, C., van den Berg, G. en Hesen, P., 2005):

- organisch materiaal;
- pyriet (ijzersulfiden);
- sideriet (ijzercarbonaat);
- kalk (calciumcarbonaat).



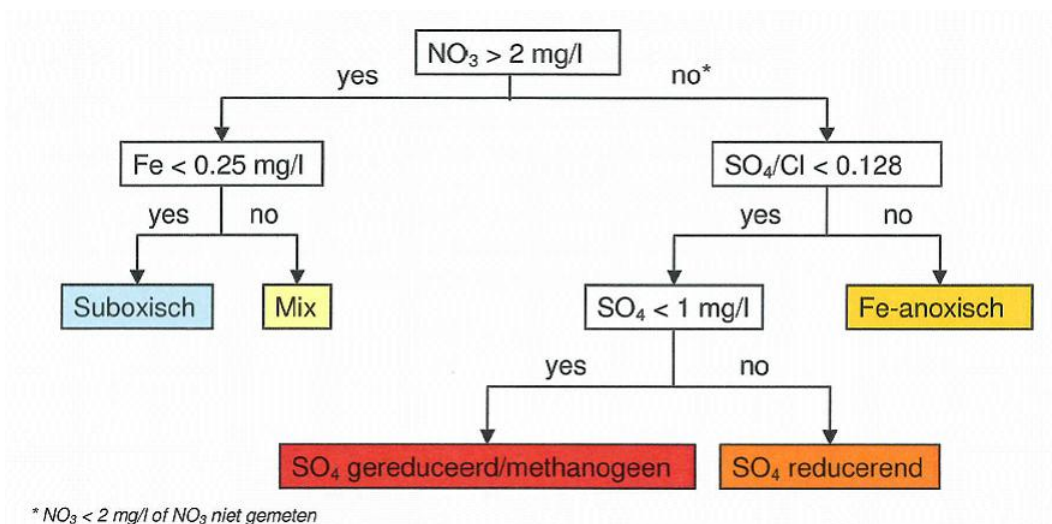
Figuur 2.1 Typen bodemenergiesystemen. Van boven naar onder: bodemwarmtewisselaars, recirculatie, monobron en “gewoon” doublet.

Daarnaast zijn kleimineralen en andere geladen deeltjes van belang in verband met de adsorptie en uitwisseling van positief geladen deeltjes (cationuitwisseling). De reactiviteit van de bodem en het grondwater is dan ook afhankelijk van de aanwezigheid van de betreffende bestanddelen.

De beschikbare informatie over de geochemische samenstelling van de diepere ondergrond (diepte waarop WKO-systemen worden gerealiseerd: over het algemeen tussen 25 en 250 m-mv) is zeer beperkt. De aanwezigheid en reactiviteit van organisch materiaal, pyriet en sideriet worden mede bepaald door de redoxtoestand van het grondwater. Kalk zal in veel gevallen in de bodem aanwezig zijn (dit is af te leiden uit de kalkverzadigingsindex van het grondwater) en is daardoor geen onderscheidend kenmerk. Cationuitwisseling treedt alleen op als de watersamenstelling verandert en speelt daardoor pas in tweede instantie een rol.

De grondwaterkwaliteit is hier onderverdeeld op basis van de redoxtoestand, welke voor een belangrijk deel een afspiegeling is van de bodemsamenstelling. De belangrijkste factor is de reactiviteit van organische stof. Uit proeven door Brons (1991, 1992) blijkt dat bij temperaturen boven de 30 °C de concentratie opgeloste organisch koolstof door mobilisatie uit het sediment toeneemt. Zogg et al. (1997) suggereren hierbij een verband met de verandering in de microbiologische populatie. De redoxtoestand van het grondwater houdt verband met de aanwezigheid en reactiviteit van organisch materiaal in de ondergrond en geeft dus een indicatie van de mate waarin dit proces kan optreden. Hier is onderscheid gemaakt in de volgende categorieën (zie figuur 2.1 voor de classificatie):

- (sub)oxisch;
- mix;
- anoxisch;
- sulfaatreducerend;
- sulfaatgereduceerd - methanogeen.



Figuur 2.1 Classificatie van de grondwaterkwaliteit op basis van de redoxtoestand (Bron: TNO, 2007).

2.1.3 Temperatuurniveau

Bij het overgrote deel van de open bodemenergiesystemen in Nederland blijft het verschil met de natuurlijke grondwatertemperatuur beperkt tot enkele graden. Deze kleine temperatuurverschillen hebben nauwelijks invloed op de grondwaterkwaliteit (IF Technology, 2004). Hoe groter de temperatuurverschillen, hoe groter de kans dat een meetbare invloed op de grondwaterkwaliteit optreedt. Vanuit het oogpunt van het onderzoek is daarom relevant om zowel systemen met een klein temperatuurverschil ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur te kiezen (deze komen het meeste voor), als systemen met een groot temperatuurverschil (hier kunnen meetbare effecten optreden). Daarbij is ook relevant dat hoge temperatuur warmteopslag grote potentie heeft om de energiebesparing door WKO verder te verbeteren: in dat geval is namelijk de inzet van de warmtepomp niet meer nodig of in mindere mate. Het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp is namelijk een bepalende factor in het totale energieverbruik van WKO-systemen. Een te klein temperatuurverschil ($< 2\text{ °C}$) is niet gewenst, omdat er dan vrijwel zeker geen verschillen veroorzaakt worden.

2.1.4 Beschikbaarheid meetputten

Bodemenergiesystemen zijn primair bedoeld om koude en warmte te leveren aan de aangesloten gebruikers. Het aanleggen van meetputten op enige afstand van de bronnen brengt extra kosten met zich mee en wordt daarom zo veel mogelijk vermeden. In de praktijk hebben de meeste systemen daardoor alleen de bronnen van het systeem zelf met bijbehorende peilbuizen en is het uitvoeren van metingen op afstand niet mogelijk.

Voor het onderzoek is het van belang om zowel binnen als buiten het thermisch beïnvloede gebied (referentiebuiz) metingen te kunnen uitvoeren, zodat kan worden vastgesteld in hoeverre sprake is van verschillen in de grondwaterkwaliteit. Bovendien is het dan mogelijk om een meer gedetailleerd beeld te verkrijgen van de werkelijke verbreiding van het thermische en hydrologische invloedsgebied. Het aantal en de positionering van de meetputten in combinatie met het aantal peilfilters per meetput is dan ook mede bepalend voor de selectie.

2.1.5 Ouderdom van het project

Uit verschillende onderzoeken is gebleken (Heidemij, 1986; Willemsen en van der Weiden, 1991; Kim, 2003; IF Technology, 2004) dat de waterkwaliteit bij de realisatie van boorgaten verstoord wordt en na maximaal 1 jaar weer stabiliseert. Aangezien Meer Met Bodemenergie slechts 2 jaar duurt bestaat bij projecten uit 2009 en nog niet gerealiseerde het risico dat de verstooring van de ondergrond door de realisatie van boorgaten de onderzoeksresultaten te veel beïnvloedt. Alleen projecten van voor 2009 komen daarom in aanmerking voor selectie.

Eén van de specifieke doelen van het onderzoek is het vaststellen van de lange-termijn effecten van WKO-systemen. Deze kunnen alleen worden vastgesteld bij projecten die al lange tijd in bedrijf zijn. De ouderdom van het project is dan ook één van de aspecten die een rol spelen bij de selectie.

Een bijkomend voordeel van oude projecten is dat daar vaak één of meerdere meetputten aanwezig zijn. In het verleden was WKO namelijk een nieuwe techniek en werden vaak meetputten voorgeschreven om de effecten te kunnen toetsen. Na verloop van tijd is gebleken dat de effecten minimaal zijn en zijn de meetputten niet meer (of in ieder geval veel minder vaak) voorgeschreven.

2.1.6 Beschikbaarheid historische meetgegevens

Het project Meer Met Bodemenergie heeft een doorlooptijd van 2 jaar. In deze relatief korte periode is het niet mogelijk om een meetreeks op te bouwen waaruit eventuele trends kunnen worden afgeleid. Als vanuit het verleden meetgegevens beschikbaar zijn, dan kan voor de betreffende parameters wel worden nagegaan of sprake is van een trendmatige ontwikkeling. Bij projecten waar geen meetreeksen beschikbaar zijn, kan slechts een vergelijking worden gemaakt tussen de situatie binnen en buiten het beïnvloede gebied (als een referentiebus beschikbaar is).

2.1.7 Medewerking eigenaar/beheerder

Een locatie kan alleen worden meegenomen in het onderzoek als de eigenaar/beheerder bereid is om mee te werken aan het onderzoek. Alleen dan is het mogelijk om metingen op locatie uit te voeren.

2.1.8 Aantal locaties

Het aantal locaties dat kan worden onderzocht binnen Meer Met Bodemenergie wordt bepaald door het beschikbare onderzoeksbudget (het deel daarvan wat beschikbaar is voor het veldonderzoek) en de kosten die per onderzoekslocatie worden gemaakt (aantal metingen en analyses, interpretatie, modellering en rapportage). Binnen werkpakket 2 kunnen 6 pilot-locaties worden onderzocht, waarbij 2 maal bemonstering plaats zal vinden: 1 maal in de zomer van 2010 en 1 maal in de winter van 2010/2011. Daarnaast is gebleken dat in werkpakket 3 niet het volledige aantal van 4 geschikte pilot-locaties kan worden gevonden. Daarom is besloten om een deel van de ruimte die hierdoor ontstaat te gebruiken om binnen werkpakket 2 nog twee aanvullende locaties toe te voegen, waar éénmalig metingen uitgevoerd zullen worden.

2.2 Weging criteria

De acht criteria uit paragraaf 2.1 zijn als volgt toegepast:

- 1) Conform paragraaf 2.1.1. is allereerst een onderverdeling gemaakt in type systemen. Om tevens aan te sluiten bij het aantal locaties dat budgettair gezien kan worden onderzocht (zie paragraaf 2.1.8) is het streven om 1 gesloten systeem, 1 recirculatiesysteem, 1 monobronstelsysteem, 1 hoge temperatuur warmteopslagsysteem en 2 "gewone" doubletsystemen te selecteren. Gekozen is om de éénmalige metingen uit te voeren bij twee hoge temperatuur warmteopslagsystemen. Als binnen een bepaalde categorie geen geschikte locaties beschikbaar zijn, dan kan dat aanleiding zijn om een extra locatie uit een andere categorie te kiezen.

- 2) Alleen systemen van voor 2009 komen in aanmerking als pilot-locatie in verband met de versterking van de grondwaterkwaliteit na realisatie (zie paragraaf 2.1.5).
- 3) Beschikbaarheid van minimaal één meetput die kan dienen als referentie (buiten het thermisch beïnvloedde gebied) heeft sterk de voorkeur (zie paragraaf 2.1.4).
- 4) De geochemische omstandigheden, waarvan de redoxtoestand een afspiegeling is (zie paragraaf 2.1.2). Streven is om pilot-locaties te selecteren die gebruik maken van grondwater met verschillende redoxtoestanden. Dit heeft als doel om de representativiteit van de onderzoeksresultaten zo breed mogelijk te maken.
- 5) Beschikbaarheid van een bij voorkeur uitgebreide en langjarige meetreeks (zie paragraaf 2.1.6), zodat lange termijn trends kunnen worden afgeleid. Als geen lange en uitgebreide meetreeks beschikbaar is, dan kan op basis van de referentieput toch nog een indruk worden verkregen van eventuele verschillen en watersamenstelling.
- 6) Bij projecten met een zeer gering verschil in temperatuur ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur ($< 2\text{ °C}$) is de verwachting dat er geen meetbare veranderingen als gevolg van de temperatuurverandering zullen optreden, wat deze locaties minder interessant maakt voor het onderzoek (zie paragraaf 2.1.3). Bij de beoordeling is de temperatuur van de warme bron(nen) beschouwd.

Op basis van bovenstaande lijst is een voorselectie gemaakt van de meest geschikte pilot-locaties. De geografische spreiding speelt bij de keuze alleen een rol als gekozen kan worden uit verschillende locaties van gelijke geschiktheid.

Vervolgens is navraag gedaan bij de beheerder/eigenaar of deze bereid is mee te werken aan het onderzoek en of er nog relevante zaken aan de orde zijn (bijvoorbeeld of de meetputten uit het verleden nu nog beschikbaar zijn). Projecten die hierbij afvallen worden vervangen door de meest geschikte alternatieve locatie.

2.3 Selectie locaties

Bijlage 1 geeft een overzicht van de (deels door de participanten en deels door de onderzoekers) aangedragen locaties voor werkpakket 2. In rood is aangegeven welke locaties niet zijn geselecteerd en wat daarvan de reden is (vakje van het betreffende criterium is rood gemarkeerd). In groen zijn de geselecteerde locaties aangegeven met de bijbehorende reden (groen gemarkeerd). De niet gekleurde locaties zijn niet afgevallen omdat ze niet voldoen aan de selectiecriteria, maar omdat andere projecten meer geschikt zijn. In bijlage 2 zijn overzichten opgenomen van de belangrijkste kenmerken van de geselecteerde locaties. Hieronder is per locatie een kort omschrijving gegeven.

- 1) Beijum, Groningen (bodemwarmtewisselaarsysteem)
Dit is het oudste bodemenergieproject van Nederland: dit systeem is al meer dan 25 jaar in bedrijf (sinds 1984). Destijds gerealiseerd als demonstratieproject, waardoor een groot aantal meetputten aanwezig is en uitgebreid onderzoek is gedaan naar de effecten van de hoge temperatuur warmteopslag (bodemtemperatuur fluctueert tus-

sen 25 en 60 °C) op de chemie en microbiologie, in de eerste 5 jaar. Dit project is bij uitstek geschikt om eventuele lange termijn effecten vast te stellen.

- 2) Hederakwekerij van den Berg, Luttelgeest (recirculatiesysteem)
Recirculatiesysteem dat al sinds 1994 in bedrijf is. Bij het systeem zijn twee meetputten aanwezig, één tussen de onttrekkingsbron en de infiltratiebron en één op ongeveer 90 m van de onttrekkingsbron. Zowel in de bronnen als in de meetputten zijn vanaf de inbedrijfname meerdere keren per jaar bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd. In de eerste 5 jaar was sprake van een proefvergunning en is uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de chemie van het grondwater.
- 3) Mariaoord, Rosmalen (monobronstelsel)
Monobron in de 100-jaars intrekzone van de drinkwaterwinning Nuland van Brabant Water. Bij het systeem zijn 3 meetputten aangelegd op 10, 30 en 100 meter van de monobron. Het systeem is gerealiseerd in 2007. In verband met de ligging nabij de drinkwaterwinning moet een uitgebreid pakket aan chemische parameters worden gemeten.
- 4) Heuvelgalerie Eindhoven (doubletsysteem - hoge temperatuur warmteopslag)
Dit betreft een (middel)hoge temperatuur warmteopslagsysteem (30 °C), dat eind 1992 is gerealiseerd en in het voorjaar van 1993 in bedrijf is genomen. In de eerste 5 jaar was sprake van een proefvergunning en heeft monitoring plaatsgevonden van de grondwaterkwaliteit (chemisch en microbiologisch), de bodemtemperatuur (gemeten in 3 meetputten rond de locatie), stijghoogte en zettingen.
- 5) De Bruggen, Zwammerdam (doubletsysteem - hoge temperatuur warmteopslag)
Dit is het enige hoge temperatuur warmteopslagsysteem (80 °C) dat nog in gebruik is. De enige andere, bij de Universiteit Utrecht, is sinds 2000 afgesloten. Hier is warmte van in de bodem opgeslagen. Bij de warmteopslag zijn 3 meetputten aanwezig. In het kader van de vergunning Grondwaterwet zijn metingen gedaan aan de chemie, microbiologie, stijghoogte en bodemtemperatuur. Om verstopping van de bronnen door kalkneerslag te voorkomen wordt zoutzuurdosering toegepast, wat goed heeft gewerkt.
- 6) TNO/NITG Utrecht ("gewoon" doubletsysteem)
Dit systeem bestaat uit 4 warme en 4 koude bronnen. Daarnaast zijn twee diepe meetputten aanwezig en vier ondiepe peilbuizen. Het systeem is sinds november 2002 in bedrijf. In 2008 was de gemiddelde infiltratietemperatuur in de warme bronnen 14,5 °C. TNO heeft in oktober 2008 en mei 2009 het grondwater onderzocht op een uitgebreid pakket aan chemische en microbiologische parameters.
- 7) Maasstad Ziekenhuis - locatie Zuider, Rotterdam ("gewoon" doubletsysteem)
In 1998 is hier een doubletsysteem gerealiseerd in het tweede watervoerende pakket. Dit project is interessant vanwege de afwijkende grondwaterkwaliteit: de redox-toestand van het grondwater is hier sulfaatgereduceerd/methanogeen. Bij het systeem zijn (voor zover bekend) geen meetputten aanwezig.

Aanvullende locaties

Naast de locaties waar metingen zullen worden uitgevoerd in het kader van Meer Met Bodemenergie zijn er ook locaties waar metingen uitgevoerd gaan worden, die beschikbaar zullen worden gemaakt voor het onderzoek. Het gaat om de volgende locaties:

- 8) Meetnet gemeente Den Bosch
De gemeente Den Bosch legt een meetnet aan, bestaande uit een groot aantal meetputten van 60 à 80 meter diepte. In een deel van de meetputten worden divers aangebracht, waarmee de stijghoogte en de temperatuur wordt gemeten. De temperatuurmetingen zijn mogelijk geschikt voor het onderzoek naar de achtergrondeffecten: met name de opwarming van de ondergrond door verstedelijking. In een later stadium wordt nog besloten of in de meetputten bodemtemperatuurprofielen gemeten gaan worden.

Aanvullende locaties uit KWR-onderzoek (definitieve goedkeuring nog niet verkregen):

- 9) RIVM Bilthoven ("gewoon" doubletsysteem)
Pilotproject van de provincie Utrecht, waar uitgebreid onderzoek wordt gedaan naar de chemie en microbiologie. Dit project maakt onderdeel uit van het onderzoeksprogramma van KWR, wat zich richt op mogelijke beïnvloeding van drinkwaterwinnings. Hier zullen geen metingen worden verricht vanuit Meer Met Bodemenergie, maar zal gebruik worden gemaakt van de bestaande gegevens.
- 10) Philips High Tech Campus Eindhoven ("gewoon" doubletsysteem)
Grootschalig WKO-systeem in een grondwaterbeschermingsgebied. Dit project is toegestaan onder voorwaarde van uitgebreide monitoring, waardoor veel gegevens beschikbaar zijn. Dit project maakt onderdeel uit van het onderzoeksprogramma van KWR, wat zich richt op mogelijke beïnvloeding van drinkwaterwinnings. Hier zullen geen metingen worden verricht, maar zal gebruik worden gemaakt van de bestaande gegevens.
- 11) UMC Radboud Nijmegen ("gewoon" doubletsysteem)
Dit WKO-systeem is gerealiseerd net buiten een grondwaterbeschermingsgebied in Nijmegen, en zal binnenkort in bedrijf worden genomen. Vanwege de nabijheid van de drinkwaterwinning zal de grondwaterkwaliteit gedetailleerd worden onderzocht. Op deze locatie is sprake van (sub)oxisch grondwater.

Reserve locaties

Naast de bovenstaande locaties waar metingen worden gedaan of beschikbaar gesteld, is nog een aantal locaties als reserve opgenomen. Nadat de resultaten van de eerste meetronde bekend zijn, zal worden nagegaan of er nog aanleiding is om bij één of meer van deze systemen te gaan meten. Ook als er problemen zijn met het verkrijgen van gegevens of toestemming van de beheerder kunnen de reservelocaties worden ingezet. Het gaat om de volgende locaties:

- hoge temp. warmteopslag Univ. Utrecht (70 °C, sinds 2000 niet meer actief)
- (middel) hoge temperatuur warmteopslag 2 MW Haarlem (43 °C)

- Provinciehuis Flevoland te Lelystad (15 °C)
- Provinciehuis Overijssel te Zwolle (15 °C)
- TESSAS, Mol, België (bodemwarmtewisselaars)
- Mauser, Oosterhout (recirculatiesysteem)

3 Afweging locaties werkpakket 3

3.1 Afwegingscriteria

Doel van werkpakket 3 in het onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie is enerzijds het vaststellen van de effecten van energieopslag op de aanwezige verontreiniging in de ondergrond. Anderzijds wordt onderzocht of er mogelijkheden zijn voor een combinatie van WKO en saneren en hoe de optimale ontwerpen er uit zien.

In Nederland worden reeds veel WKO-systemen toegepast. Wegens het huidig beleid worden deze systemen tot nu toe voornamelijk in niet verontreinigde bodemlagen geplaatst. Er is vanuit de markt vraag naar het effect van WKO op verontreinigingen om zo mogelijk WKO ook in verontreinigde gebieden toe te passen en/of combinatiemogelijkheden te benutten.

Voor werkpakket 3 is de aanwezigheid van verontreiniging in meetbare concentraties de belangrijkste criteria voor de selectie van geschikte pilot-locaties. De concentratie VOCl dient groter te zijn dan 100 µg/l.

Naast de verontreinigingscriteria zijn de criteria genoemd in hoofdstuk 2 ook van toepassing voor de selectie van pilot-locaties in werkpakket 3. In onderstaande paragraaf is een weging gemaakt van de verschillende criteria.

3.2 Weging criteria

De criteria uit paragraaf 2.1 en 3.1 zijn voor werkpakket 3 als volgt toegepast:

- 1) Alleen systemen waar meetbare concentraties VOCl of BTEX in de WKO putten zijn aangetroffen komen in aanmerking als pilot-locatie.
- 2) Systemen van voor 2009 prefereren als pilot-locatie in verband met de verstoring van de grondwaterkwaliteit na realisatie van de putten (zie paragraaf 2.1.5).
- 3) Locaties met de beschikbaarheid van minimaal één meetput die kan dienen als referentie (buiten het thermisch beïnvloedde gebied) heeft sterk de voorkeur (zie paragraaf 2.1.4).

Op basis van bovenstaande criteria is een selectie gemaakt van de meest geschikte pilot-locaties. Vervolgens is navraag gedaan bij de beheerder/eigenaar of deze bereid is mee

te werken aan het onderzoek en of er nog relevante zaken aan de orde zijn (bijvoorbeeld aanwezigheid van referentieputten of meetputten).

3.3 Selectie locaties

De locaties die in werkpakket 3 zijn opgenomen zijn onderverdeeld in drie groepen. De omschrijving van iedere groep en een verkorte omschrijving van de geselecteerde locaties binnen iedere groep wordt in de volgende paragrafen besproken. Een gedetailleerde omschrijving van de locaties is gegeven in bijlage 3.

- 1) Onder groep 1 vallen de locaties die voldoen aan de opgestelde criteria. Voornaamste punt is dat op deze locaties is een significante verontreiniging aanwezig is. Op deze locaties worden aanvullende veldmetingen verricht om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden;
- 2) Onder groep 2 vallen de locaties waar geen of zeer weinig verontreiniging in de putten gemeten is maar waar de verontreiniging wel zeer dicht in de buurt van het WKO systeem aanwezig is. Deze locaties zijn geselecteerd om het effect van WKO systemen op nabij gelegen verontreinigingen vast te stellen. Op deze locaties wordt uitgegaan van bestaande meetresultaten om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden;
- 3) Onder groep 3 vallen de locaties waar het WKO-systeem nog niet gerealiseerd is of nog in ontwerpfase is. Deze installaties zijn niet geselecteerd voor het uitvoeren van veldonderzoek maar kunnen dienst doen als case voor het uitwerken van bijvoorbeeld combinatieconcepten tussen WKO en saneren. Op deze locaties wordt uitgegaan van bestaande meetresultaten om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden.

3.3.1 Groep 1

Jaarbeursterrein, Utrecht

Het WKO systeem op het Jaarbeursterrein is actief vanaf eind jaren 90. Op de locatie is een VOCl verontreiniging aanwezig tot een diepte van 34-35 m-mv. De maximaal aange troffen VOCl concentratie is 1.300 ug/l aan VC. Vanaf 1993 zijn er analyseresultaten beschikbaar van verschillende peilbuizen. Op verzoek van de gemeente Utrecht is in 2008 met de toen beschikbare gegevens een haalbaarheidsonderzoek verricht naar de inzet van WKO voor sanering of beheersing van een verontreiniging in de Utrechtse ondergrond. Door het uitvoeren van metingen kan het effect van een WKO systeem op de afbraak van een verontreiniging nader worden gevolgd.

Strijp S, Eindhoven (Sanergy)

Op de locatie Strijp S is in 2009 bewust een WKO systeem in een verontreiniging geplaatst. Naast energie winning is het systeem zo ontworpen dat het de verontreiniging beheerst en verspreiding wordt voorkomen. In de ontwerpfase van de sanering is veel kennis opgedaan op het gebied van combinatieconcepten. Er zijn grondwateranalysedata beschikbaar van voorgaande meetronden. Met aanvullende metingen is het daadwerkelijke effect van een WKO systeem op de afbraak van een verontreiniging te volgen.

3.3.3 Groep 2

Paleiskwartier, Den Bosch

Op de locatie is boven het bodempakket waar het WKO systeem grondwater verpompt een VOCl verontreiniging aanwezig. Tussen de grondwaterverontreiniging en het WKO systeem is een scheidende laag aanwezig. Tegen de verwachting in zijn in het verleden toch enkele ug/l aan VOCl aangetroffen in het verpompte water. De reden van dit VOCl lek is mogelijk te achterhalen met een modelstudie. De resultaten van de modelstudie kunnen vervolgens op andere locaties worden gebruikt om het effect van een WKO systeem op een nabij gelegen verontreinigingen te bepalen. Over de mogelijkheden om deze diepe grondwaterverontreiniging te saneren met behulp van het WKO systeem is reeds een rapport geschreven.

Grote Oever, Meppel

Op de locatie is net als op de locatie Paleiskwartier boven het bodempakket waar het WKO systeem grondwater verpompt een VOCl verontreiniging aanwezig. Tussen de grondwaterverontreiniging en het WKO systeem is een scheidende laag aanwezig. Tegen de verwachting in zijn in het verleden toch enkele ug/l aan VOCl aangetroffen in het verpompte water. Door deze case te onderzoeken is het mogelijk om het effect van een WKO systeem op een nabij gelegen verontreinigingen te bepalen.

3.3.4 Groep 3

Locaties Apeldoorn

In Apeldoorn zijn verschillende WKO systemen bekend waar in een bovenliggend bodempakket verontreinigingen aanwezig zijn. Tot op heden zijn nog geen meldingen bekend van WKO putten waar verontreiniging in is aangetroffen. Dit sluit echter niet uit dat er geen verontreiniging in de WKO putten aanwezig is. Deze locaties kunnen binnen het MMB project gebruikt worden als aanvullende case bij het uitwerken van de invloed van WKO systemen op nabij gelegen verontreinigingen of bij het uitwerken van concepten voor de combinatie van WKO en bodemsaneringen.

Ridsterrein Haarlem

Op locatie Ridsterrein is een verontreiniging aanwezig met chloorbenzeen en benzeen. Dit terrein wordt in de toekomst herontwikkeld. Bij de herontwikkeling wordt gedacht aan het plaatsen van een WKO systeem binnen de verontreinigingscontour. Dit biedt mogelijkheden om WKO en bodemsaneringen te combineren. Deze locatie kan binnen het MMB project gebruikt worden als case bij de ontwikkeling van concepten voor de combinatie van WKO en bodemsaneringen.

Evenblij, Hoogeveen

Stroomafwaarts van een VOCl verontreiniging is een WKO systeem in aanbouw. Mogelijk stroomt in de toekomst de verontreiniging naar het beïnvloedingsgebied van het WKO systeem. In een peilbuis nabij het aan te leggen WKO systeem is reeds 1 ug/l aan verontreiniging aangetroffen. Deze locatie kan binnen het MMB project gebruikt worden als aanvullende case bij het uitwerken van de invloed van WKO systemen op nabij gelegen verontreinigingen.

Literatuur

Brons, H.J., 1992. Biogeochemical aspects of aquifer thermal energy storage. 127 pagina's. LUW, Wageningen.

Heidemij, 1986. Onderzoek naar de veranderingen in chemische en bacteriologische grondwatersamenstelling van de warmte-opslag Groningen. Onderzoek in opdracht van Bureau Energie Onderzoek Projecten van ECN, PEO -samenwerkingsovereenkomst nr.54202-20.5-1.7.16.

IF Technology, 2004. Temperatuureffecten op grondwaterkwaliteit. Samenvatting bestaande kennis. Rapport in opdracht van NOVEM. Arnhem.

Kim, 2003. Long term disturbance of ground water chemistry following well installation. Ground Water 41, no. 6: 780-789.

TNO, 2007. Landsdekkende, geologische karakterisering van de regionale grondwatersamenstelling in de geotoop van Nederland - Data rapport. TNO rapport 2006-U-R0171/A, Utrecht.

Van Beek, C., van den Berg, G. en Hesen, P., 2005. Geohydrochemische typologie als hulpmiddel bij grondwaterkwaliteitsbeheer. Bodem nr 5, oktober 2005.

Willemsen, A. en van der Weiden, M., 1991. Meetresultaten warmteopslag Bunnik. H₂O (24) 1991, nr. 20.

Zogg, G.P., et al., 1997. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming. Soil Sci. Soc. Am. J. 61 (2), 475–481.

Bijlage 1

Overzicht aangedragen locaties WP2

type project / projectnaam	Ingebracht door	in bedrijf sinds?	systeem nog actief?	ref.buis beschikbaar?	aantal monitoringsputten	redoxtoestand	uitgevoerde metingen	gem. temp. warme bron(nen)
Bodemwarmtewisselaars								
Schoenmakershoek Eiten-Leur	IF	nog niet voltooid						
Beijum Groningen	IF	1984	ja	ja (veel)	6	anoxisch - sulfaatgereduceerd	chemie, microbiologie	25 - 60
TESSAS, Mol (Belgie)	IF							
Recirculatiesystemen								
Hederakwekerij Luffelgeest	IF	1993 (realisatie)	ja	ja	2	sulfaatreducerend	volgens NEN 5740 en stijghoogte, temperatuur	n.v.t.
WIVA/Mauser Oosterhout	IF	1997 (realisatie)	ja	ja	2	anoxisch	11 chemische parameters, stijghoogten, temperaturen	n.v.t.
Monobronnen								
Kurhaus Scheveningen	IF	2000 (realisatie)	ja	nee	0	sulfaatreducerend	chloride	23,6 (2008)
Hanzehogeschool / RUG - Locatie Zernikke	prov. Groningen	2006	ja	nee	0	anoxisch	nog niet beschikb.	
Mariaoord, Rosmalen	IF	2007 (realisatie)	?	?	3	anoxisch	vrij uitgebreide set i.v.m. nabijgelegen drinkwaterwinning	?
Hoge Temperatuur opslag								
Dolfinarium Harderwijk	IF	1997 (realisatie)	ja	nee	2	anoxisch	kiemgetal, verontreinigingen	38,5 (2008)
Heuvelgalerie Eindhoven	IF	1992 (realisatie)	ja	ja	3	anoxisch	stijghoogten, temperaturen, chemisch, microb.	29,6 (2008)
2MW Haarlem	prov. N-Holland	2002	ja	nee	0	sulfaatgereduceerd - methanogeen	temperaturen, chemische analyses	43 (2008)
Universiteit Utrecht	IF	1991	nee (tot 2000)	ja	4	sulfaatreducerend	peratuur, drukken, waterkwaliteit, energie, waterhoeveelheid, zett	70 (1995)
Hooge Burgh/De Bruggen Zwammerdam	IF	1998 (realisatie)	ja	wellicht M2	3	sulfaatreducerend	chemisch, stijghoogten, temperaturen,	48 - 88 (2001)
NIOO Wageningen	prov. Gelderland	nog niet in bedrijf	nvt	ja	1	sulfaatreducerend ?	ntb	40
Gewone dubletten								
Greene Hart Ziekenhuis Gouda	IF	2008	ja	nee	1	sulfaatreducerend	chloride	17,1 (2008)
Provinciehuis Flevoland, Lelystad	prov. Flevoland	2007	ja	ja	1	sulfaatreducerend	temperatuur, verontreinigingen	14,9 (2008)
IBM Zoelmeermeer	IF	1993 (realisatie)	ja	ja	3	sulfaatgereduceerd - methanogeen	temperatuur, stijghoogte, chloride,	13 (2002)
Zuiderziekenhuis/Ikazia Rotterdam	IF	1998 -> WVP2	onbekend	onbekend	2	sulfaatgereduceerd - methanogeen	stijghoogte, kwaliteit, temperatuur	15 (2005)
Gelredome Arnhem	IF	1998 (realisatie)	ja	ja	1	anoxisch	temperatuur, in bronnen EC, chemisch, temp, aparte monitoring va	14 (2008)
Provinciehuis Groningen	IF	1996 (realisatie)	ja	ja	1	anoxisch	grondwaterstand, temperatuur	monitoring niet door IF
Cascade Groningen	IF, prov. Groningen	1997 (realisatie)	ja	nee	2	anoxisch	verontreinigingen, chloride	2006-2008 niet geregistreerd
Hanzehogeschool / RUG - Locatie Zernikke	prov. Groningen	2006	ja	nee	0	anoxisch		nog niet beschikb.
UMC Groningen	prov. Groningen	2004	ja	nee	0	anoxisch		ca 11
TNO/NITG Utrecht	Deltares	2002 (november)	ja	ja	1	anoxisch	pompproef, waterhoeveelheid, temperatuur	14,5 (gem inf. temp 2008)
NIOO Wageningen	prov. Gelderland	nog niet in bedrijf	nvt	nee	0	anoxisch	nvt	nvt
Provinciehuis Overijssel, Zwolle	prov. Overijssel							
Waterbosch Apeldoorn	gam. Apeldoorn	2005	ja	ja (dubieus ivm stuwing)	1	anoxisch		13
Projecten KWR								
RIVM Bilthoven	prov. Utrecht, KWR, RIVM	2008	ja	ja	10	anoxisch	chemie, microbiologie	nee
Philips High Tech Campus	KWR	2003 (realisatie)	ja	ja	15	anoxisch	temperatuur, verontreinigingen, stijghoogte	15 (2006 - 2008)
UMC Radboud	prov. Gelderland, KWR	nog niet in bedrijf	nvt	nee	1	(sub)oxisch	alleen referentie metingen (zeer uitgebreid)	nvt
Mogelijke aanvullingen								
Diverse projecten	prov. Noord-Brabant							
Diverse projecten PT	Productschap Tuinbouw	Toelichting: De Provincie Noord-Brabant kan locaties leveren in het geval dat een tekort aan pilot locaties zou bestaan.						
Meetnet gemeente Den Bosch	gem. Den Bosch	Toelichting: Het Productschap Tuinbouw (PT) kan locaties leveren in het geval dat een tekort aan pilot locaties zou bestaan. Toelichting: Netwerk van 40 peilbuizen verspreid over de gemeente Den Bosch. Buizen zijn 65 of 85 m diep						

Geselecteerde locatie

Afgewezen locatie

Reserve locatie

Aanvullende locatie

Niet geselecteerde locatie

Bijlage 2

Kenmerken geselecteerde locaties WP2

Naam project:	Froukemaheerd (Beijum), Groningen
Provincie:	Groningen
In bedrijf sinds:	1983
Nog in de bedrijf:	ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	Bodemwarmtewisselaars
Gemiddelde temperatuur in de opslag (laatst beschikbare jaar)	25 - 60 °C
Redoxtoestand:	divers: anoxisch, sulfaatreducerend, sulfaatgereduceerd - methanogeen
Interactie met ander systeem:	nee
Bijzonderheden:	welke meetputten nog beschikbaar?

Contactgegevens beheerder

Firma BAM Techniek
 Contactpersoon Ronald van Beek
 Adres Rouaanstraat 3, Groningen
 Telnr. 050 - 365 7171 (algemeen)
 Toestemming: vragen aan eigenaar (zie hieronder)

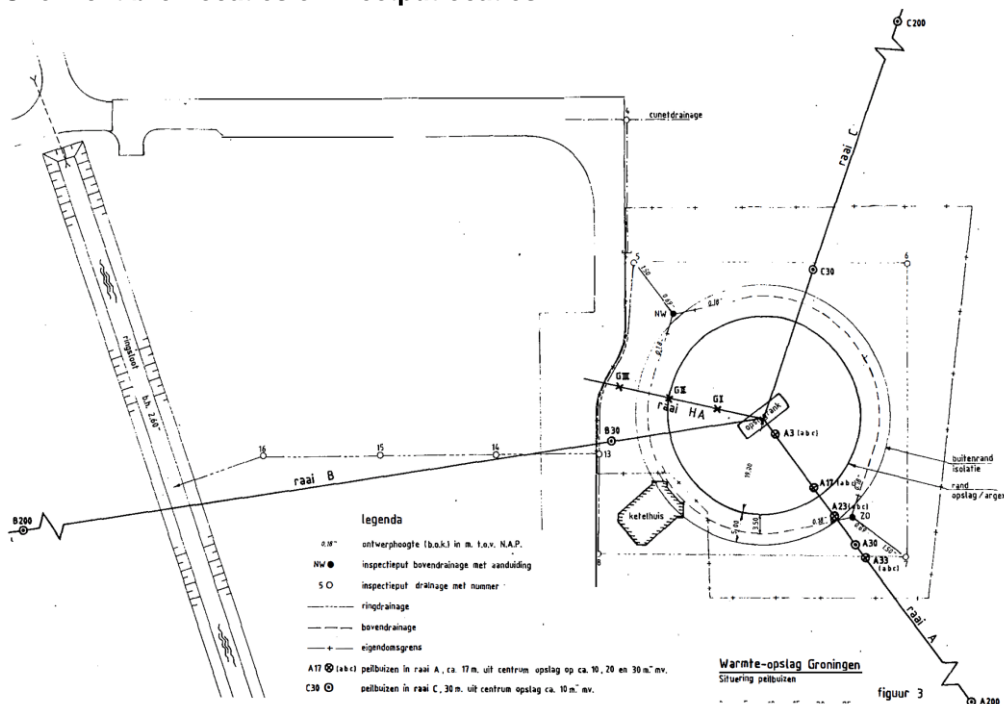
Contactgegevens eigenaar

Firma Woningstichting de Huismeesters, Groningen
 Contactpersoon dhr. H. Stiekema
 Adres Friesestraatweg 18
 Tel.nr 050 - 365 7157 mob: 06 - 2955 0226
 Toestemming: ja

2° contactpersoon Hans Hovink 050 - 365 7164
 mob: 06 - 5268 2820



Overzicht bronlocaties en meetputlocaties



Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)	meetpunten nog beschikbaar?
A3 (raai A, 3 m uit centrum opslag)	10, 20 en 30	ja/nee
A17 (raai A, 17 m uit centrum opslag)	10, 20 en 30	ja/nee
A23 (raai A, 23 m uit centrum opslag)	10, 20 en 30	ja/nee
A30 (raai A, 30 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
A33 (raai A, 33 m uit centrum opslag)	10, 20 en 30	ja/nee
A200 (raai A, 200 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
B30 (raai B, 30 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
B200 (raai B, 200 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
C30 (raai C, 30 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
C200 (raai C, 200 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
G I (8,8 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
G II (17,4 m uit centrum opslag)	10	ja/nee
G III (29,0 m uit centrum opslag)	10	ja/nee

Overzicht beschikbare metingen:

meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
G I, II en III	voorjaar 1983 - januari 1988	13 metingen in meetperiode	EC, pH, Temperatuur, Ca, Mg, Na, K, NH ₄ , HCO ₃ , Cl, SO ₄ , Fe, Mn, SiO ₂ , COD, DOC, CZV
A17c, A23b	27 - 01 - 88	eenmalig	EC, pH, Temperatuur, Ca, Mg, Na, K, NH ₄ , HCO ₃ , Cl, SO ₄ , Fe, Mn, SiO ₂ , CZV
A3c, A33a, A33c, C30, C200	03 - 02 - 88	eenmalig	EC, pH, Temperatuur, Ca, Mg, Na, K, NH ₄ , HCO ₃ , Cl, SO ₄ , Fe, Mn, SiO ₂
G I, II en III	voorjaar 1983 - zomer 1986	7 metingen in meetperiode	kiemgetallen bij verschillende temperaturen (10, 20, 30 en 50 °C) en DOC
opgeslagen en onttrokken energie			

Kaart met thermisch invloedsgebied

Niet beschikbaar (vaststellen op basis van metingen)

Ontwerpuitgangspunten

- Aantal wisselaars: 360
- Maximale diepte bodemlussen: 20 m

Naam project:	Hederakwekerij Luttelgeest
Provincie:	Flevoland
In bedrijf sinds:	Aangelegd in: sept. '93, operationeel: '94
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	Nog regelen
Soort systeem:	Koudeopslag, recirculatie
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	Max. 24 °C
Redoxtoestand:	(in te vullen door Hetty)
Interactie met ander systeem:	nee
Bijzonderheden:	

Contactgegevens eigenaar

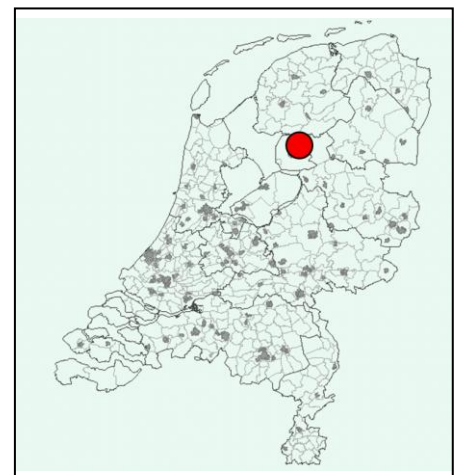
Firma: Hedrakwekerij J.J. van der Berg

Contactpersoon: Carlo v/d Berg

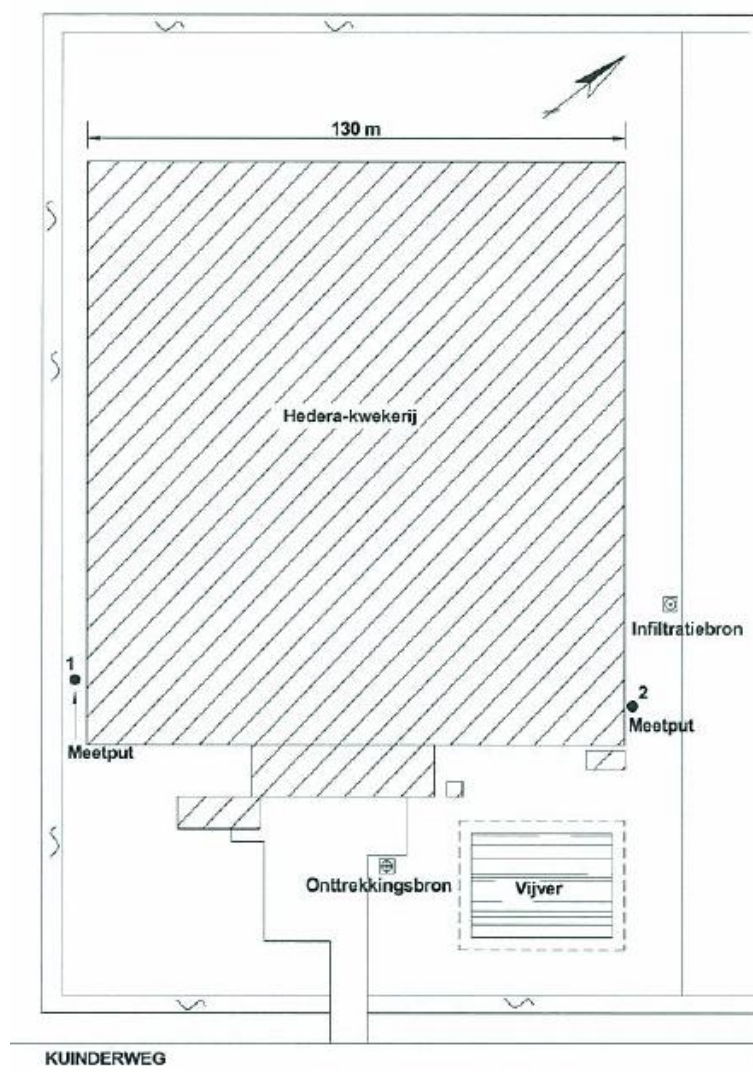
Adres: Kuinderweg 27, 8315 PW Luttelgeest

Tel.nr: 0527 202788

Toestemming: De eigenaar gaat akkoord, zolang het hem geen geld en tijd kost. Hij wordt graag geïnformeerd voordat er metingen plaatsvinden. GH heeft dit met hem afgesproken.



Overzicht bronlocaties en meetputlocaties



Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)
Onttrekkingsbron filter	25 – 44,5 en 47 - 65
PF1	39 – 40
PF2	9 – 10
Infiltratiebron	26 – 65
PF1	32 – 33
PF2	9 – 10
M1	PF1: 39 – 40, PF2: 9 – 10
M2	PF1: 39 – 40, PF2: 9 – 10

Overzicht beschikbare metingen:

meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
I, M1, M2	Okt. '93 t/m okt. '98	11	Klassieke parameters + metalen, olie, PAK
O, I, M1, M2	Sept. '93 t/m jul. '98	19	Gw-standen (handmatig)
O, I	'93 t/m '98	10	Temperatuursprofiel
M1, M2	'93 t/m '98	15	Temperatuursprofiel
M1, M2	'00 t/m '08	4 x pj	Temperatuursprofiel
O, I	'03 t/m '08	dagelijks	Temperatuur

Kaart met thermisch invloedsgebied

Niet beschikbaar.

Ontwerpuitgangspunten grondwaterzijdig

- maximaal debiet zomer/winter 50 m³/h
- gem. en max. waterverplaatsing Z/W max. 130.000 p/j volgens vergunning
- gemiddelde infiltratietemperatuur zomer/winter 20°C

Naam project:

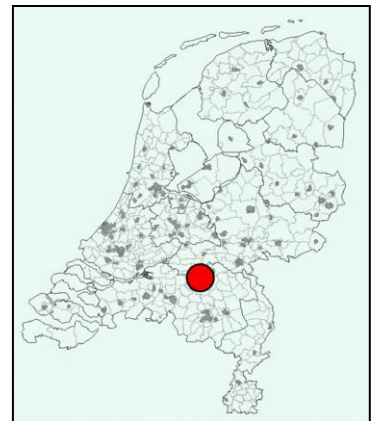
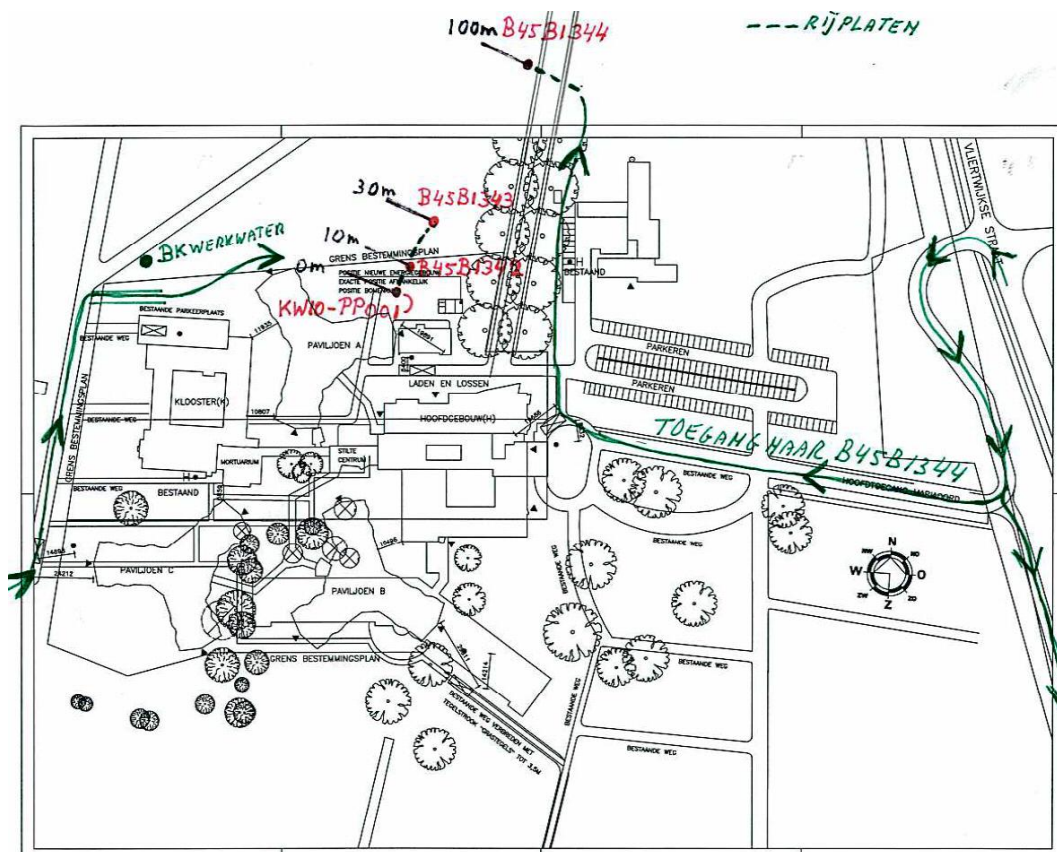
Provincie: Noord-Brabant
In bedrijf sinds: nog navragen (realisatie in 2007)
Nog in de bedrijf: ja/nee
Toestemming eigenaar/beheerder? ja/nee
Soort systeem: monobron
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar) temperatuur
Redoxtoestand: anoxisch
Interactie met ander systeem: nee, maar wel nabij drinkwaterwinning Nuland
Bijzonderheden: nieuwe bronnen, problemen functioneren, ??

Contactgegevens beheerder

Firma Hydreco
Contactpersoon Eric van Griensven
Adres
Tel.nr
Toestemming: ja, maar ook toestemming eigenaar nodig

Contactgegevens eigenaar

Firma
Contactpersoon
Adres
Telnr.
Toestemming: ja/nee/onbekend

**Overzicht bronlocaties en meetputlocaties**

Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)
W	26-36
K	54-64
Peilfilter 1	5-6
Peilfilter 2	54-55
Peilfilter 3	54-64
Peilfilter 4	26-27
Peilfilter 5	26-36
M1	
M2	
M3	

Overzicht beschikbare metingen:

meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
-----------------	--------------------	-----------------------	-------------------

Kaart met thermisch invloedsgebied

Nog niet beschikbaar

Ontwerpuitgangspunten grondwaterzijdig

- 30 m³/uur
- maximaal 85.000 m³/jaar
- ???

Naam project:	Heuvelgalerie Eindhoven
Provincie:	Noord-Brabant
In bedrijf sinds:	1992
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	Ja
Soort systeem:	1 doublet, Koude-/warmteopslag
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	29,6 °C (2008)
Redoxtoestand:	anoxisch
Interactie met ander systeem:	Nee, dichtbij ligt wel Dynamo
Bijzonderheden:	Koud 18,0°C, warm 30,0°C

Contactgegevens beheerder

STB

De heer G. Brugman

Leemkuil 11, Postbus 9712, 5602LS EINDHOVEN

Tel.nr: 040 266 25 25

Toestemming: de heer Brugman is akkoord en werkt graag hieraan mee, hij informeert ING hierover dat wij metingen komen verrichten.

Contactgegevens eigenaar

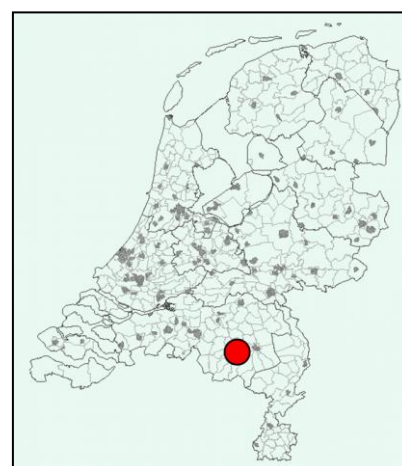
SCM, Shopping Center Management B.V.

Contactpersoon

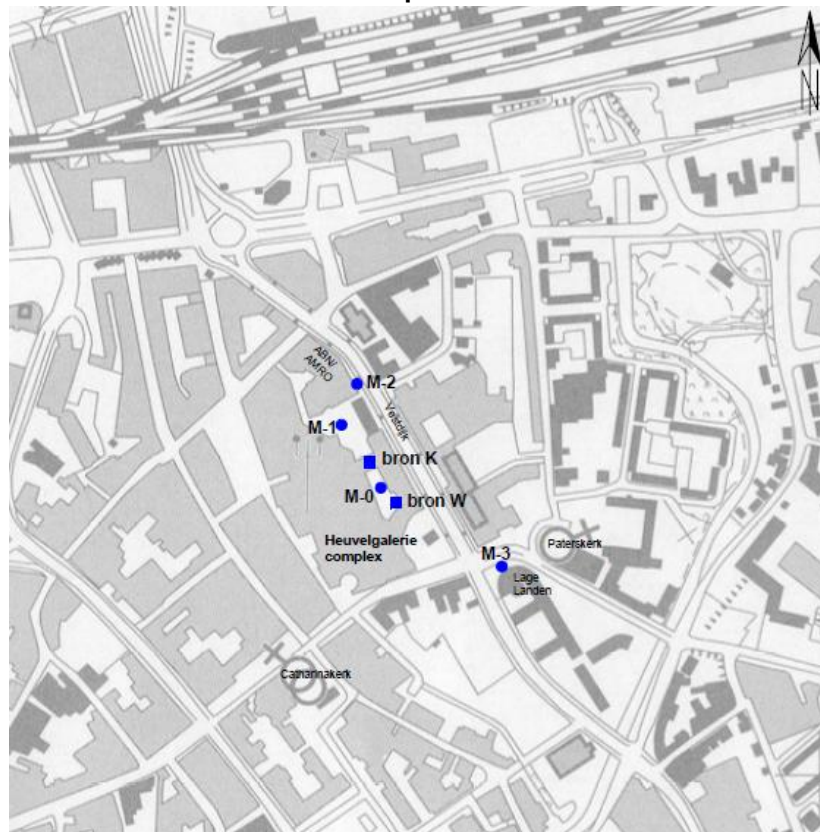
Adres

Telnr.

Toestemming: onbekend



Overzicht bronlocaties en meetputlocaties



Legenda:

- bron
- meetput

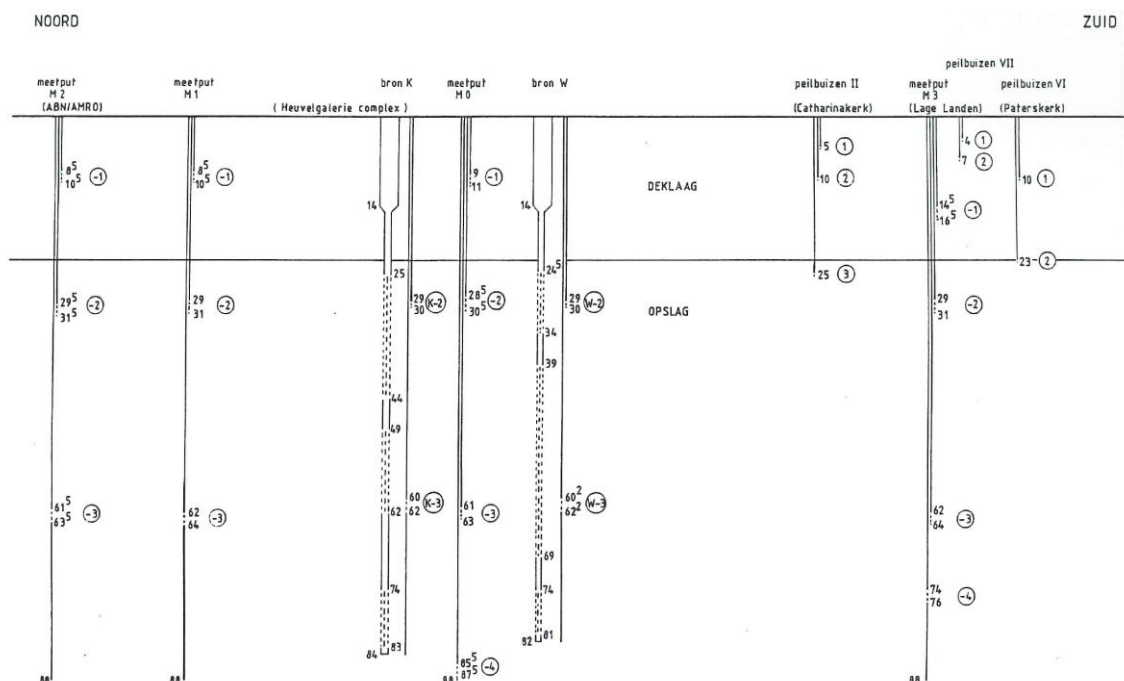
Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)
Warme bron	(29 – 30), (60 – 62)
Koude bron	(29 – 30), (60 – 62)
Meetput 0	(9 – 11), (28,5 – 30,5), (61 – 63), (85,5 – 87,5)
Meetput 1	(8,5 – 10,5), (29 – 31), (62 – 64)
Meetput 2	(8,5 – 10,5), (29,5 – 31,5), (61,5 – 63,5)
Meetput 3 (lage Landen)	(14,5 – 16,5), (29 – 31), (62 – 64), (74 – 76)
Peilbuizen II (Catharinakerk)	5, 10, 25
Peilbuizen VI	10, 23
Peilbuizen VII	4, 7

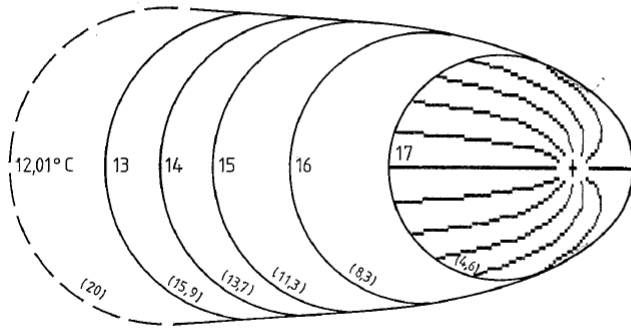
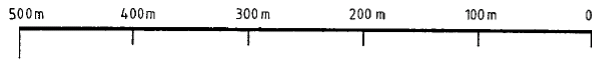
Overzicht beschikbare metingen:

meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
WB, KB, M0, M1, M2, M3	nov. '92 – juli '97	Gem. 3x	EGV,pH,sulfaat, DOC, sulfide, Fe, stijghoogten
WB, KB, M0	nov '92 – juli '97	Gem. 3x	microbiologisch
WB, KB,	nov. '92 – juli '97	Gem. 3x	temperatuurprofiel
M0, M1, M2, M3	nov. '92 – juli '97	Gem. 12x	temperatuurprofiel
M0, M1, M2, M3	apr. 2002 t/m mei 2008	Gem. 6	stijghoogten

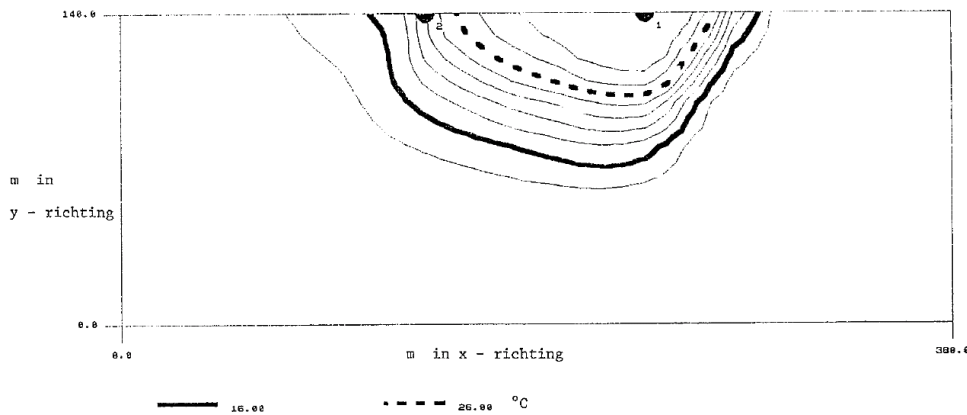
Dwarprofiel meetpunten:



Kaart met thermisch invloedsgebied



Figuur 20. Isothermen na 20 jaar injectie van 237.000 m³/jaar water van 18°C.
 (11.3) verblijftijd thermisch front is 11.3 jaar.
 ---- maximale uitbreiding warmte = verblijftijd thermisch front van 20 jaar.



Figuur 12. Isothermen in een horizontale doorsnede berekend na de 4^e injectie.
 Regionale stroming van rechts naar links 0.1 m/d

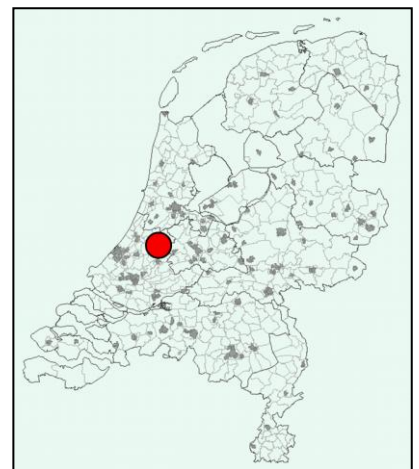
Ontwerpuitgangspunten grondwaterzijdig (uit eff. studie)

- | | | |
|---|--|------------------------|
| - | maximaal debiet zomer/winter: | 100 m ³ /h |
| - | gemiddelde waterverplaatsing zomer | 200.000 m ³ |
| - | maximale waterverplaatsing zomer | 275.000 m ³ |
| - | gemiddelde waterverplaatsing winter | 150.000 m ³ |
| - | maximale waterverplaatsing winter | 225.000 m ³ |
| - | gemiddelde infiltratietemperatuur zomer/winter | 18°C/32°C |

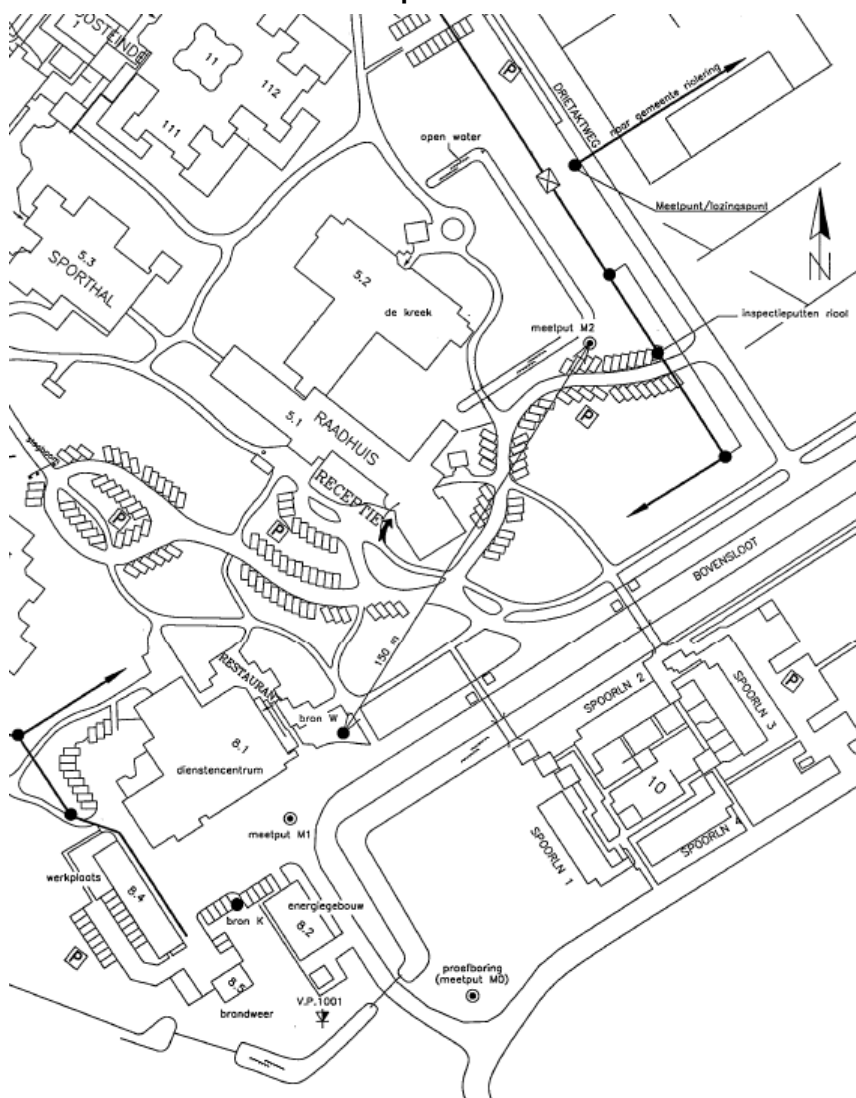
Naam project:	Hooge Burch Zwammerdam
Provincie:	Zuid-Holland
In bedrijf sinds:	Zomer 1998
Nog in de bedrijf:	ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	doublet, hoog temperatuuropslag
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	Max. 90°C
Redoxtoestand:	sulfaatreducerend
Interactie met ander systeem:	nee?
Bijzonderheden:	nieuwe bronnen, problemen functioneren, ??

Contactgegevens eigenaar/beheerder

Firma: Ipse de Bruggen
 Contactpersoon: Rob Teunisse
 Email: rob.teunisse@ipsedebruggen.nl
 Bezoekadres: Spoorlaan 19, 2471 PB Zwammerdam
 Postbus 2027, 2470 AA Zwammerdam
 Telefoonnummer: 0172 - 64 26 42
 Toestemming: ja



Overzicht bronlocaties en meetputlocaties



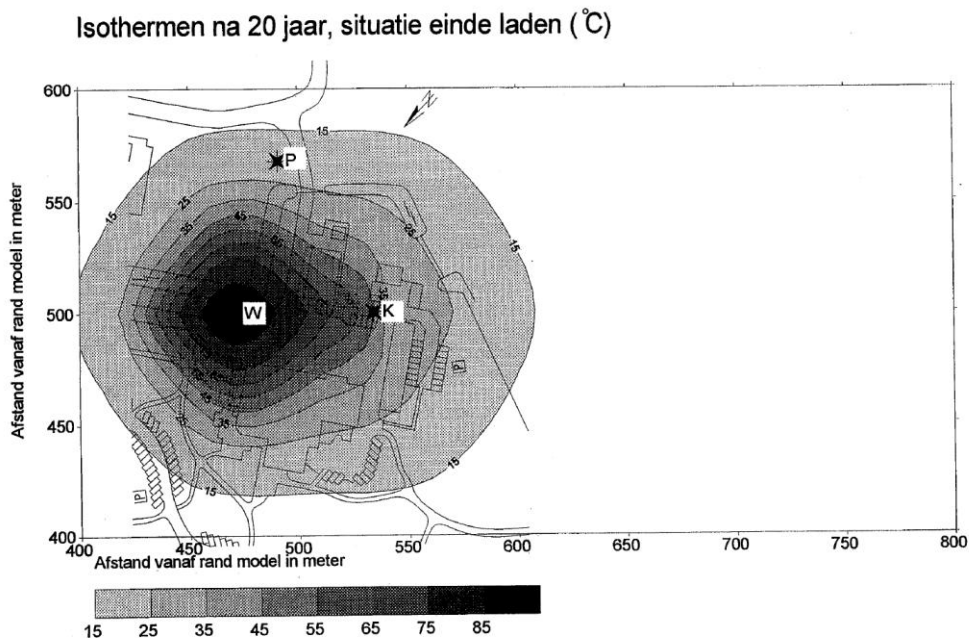
Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)
WB	139,5 - 147,7
PF WB	141, - 143,7
KB	140 - 149
PF KB	143 - 145
M1	(29 - 30) (62 - 63) (98 - 100) (142 - 144)
M2	(98 -100) (140 - 142)
Proefboring (M0)	(70 - 71) (107 -108) (171 - 172) (199 - 200)

Overzicht beschikbare metingen:

meetpunt	meetperiode	metingen	parameters
M0	Apr. '96 t/m nov. '98	2	temperatuurprofiel
M0	Jan. '98 t/m okt. '01	24	stijghoogte
M0	Apr. '96 t/m sep. '96	2	pH, Ec, Cl, Ca, CO_3^{2-} , SO_4^{4-}
M1	Mrt. '98 t/m sep. '01	10	temperatuurprofiel
M1	Apr. '98 t/m okt. '01	10	stijghoogte
M1	Mrt. '98 t/m mrt. '01	4	pH, Ec, Cl, Ca, CO_3^{2-} , SO_4^{4-} , etc., koloniegetal (3x)
M2	t/m sept. '01	5	temperatuurprofiel
M2	Apr. '98 t/m okt. '01	8	stijghoogte
M2	Apr. 98	1	pH, Ec, Cl, Ca, CO_3^{2-} , SO_4^{4-} , etc. koloniegetal
KB	Jan.'98 t/m feb. '02	8	pH, Ec, Cl, Ca, CO_3^{2-} , SO_4^{4-} , etc. koloniegetal(2x)
WB	Dec.'97 t/m okt.'01	5	pH, Ec, Cl, Ca, CO_3^{2-} , SO_4^{4-} , etc. koloniegetal(4x)

Kaart met thermisch invloedsgebied



Ontwerpuitgangspunten grondwaterzijdig

- maximaal debiet zomer/winter 25 m3/h
- gemiddelde en maximale waterverplaatsing zomer/winter 41.000 m3/seizoen
- gemiddelde infiltratietemperatuur zomer 88°C
- gemiddelde infiltratietemperatuur winter 40°C

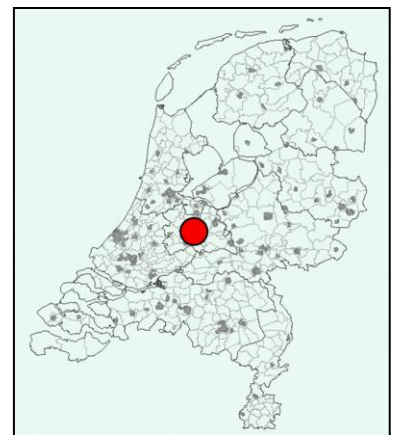
Naam project:	Uithof TNO-NITG
Provincie:	Utrecht
In bedrijf sinds:	November 2002
Nog in de bedrijf:	ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	Doubletten 2 x 4 bronnen
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	14,5
Redoxtoestand:	anoxisch
Interactie met ander systeem:	nee
Bijzonderheden:	Voornemen om aanvullende koelmogelijkheid voor laden van koudebron te installeren.

Contactgegevens beheerder (= eigenaar)

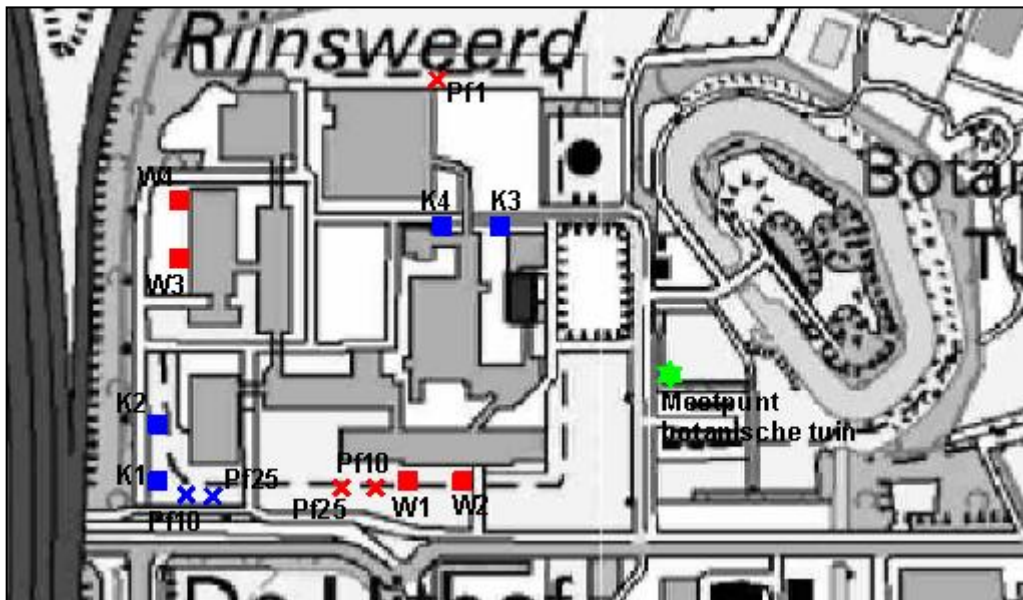
Universiteit Utrecht
Facilitair Bedrijf Utrecht
Sector Bouw & Techniek, Energie
Postbus 80125
3508 TC UTRECHT
T 030 - 253 42 20 / 030 - 253 50 19
F 030 - 253 36 67
E h.klein@uu.nl
E h.hellwich@uu.nl

Contactpersonen: dhr. H.P.P. Klein
dhr. H. Hellwich

Contactpersoon Pieter:
Michel van Gilsdonk 06 55555305
030 253 4130



Overzicht bronlocaties en meetputlocaties



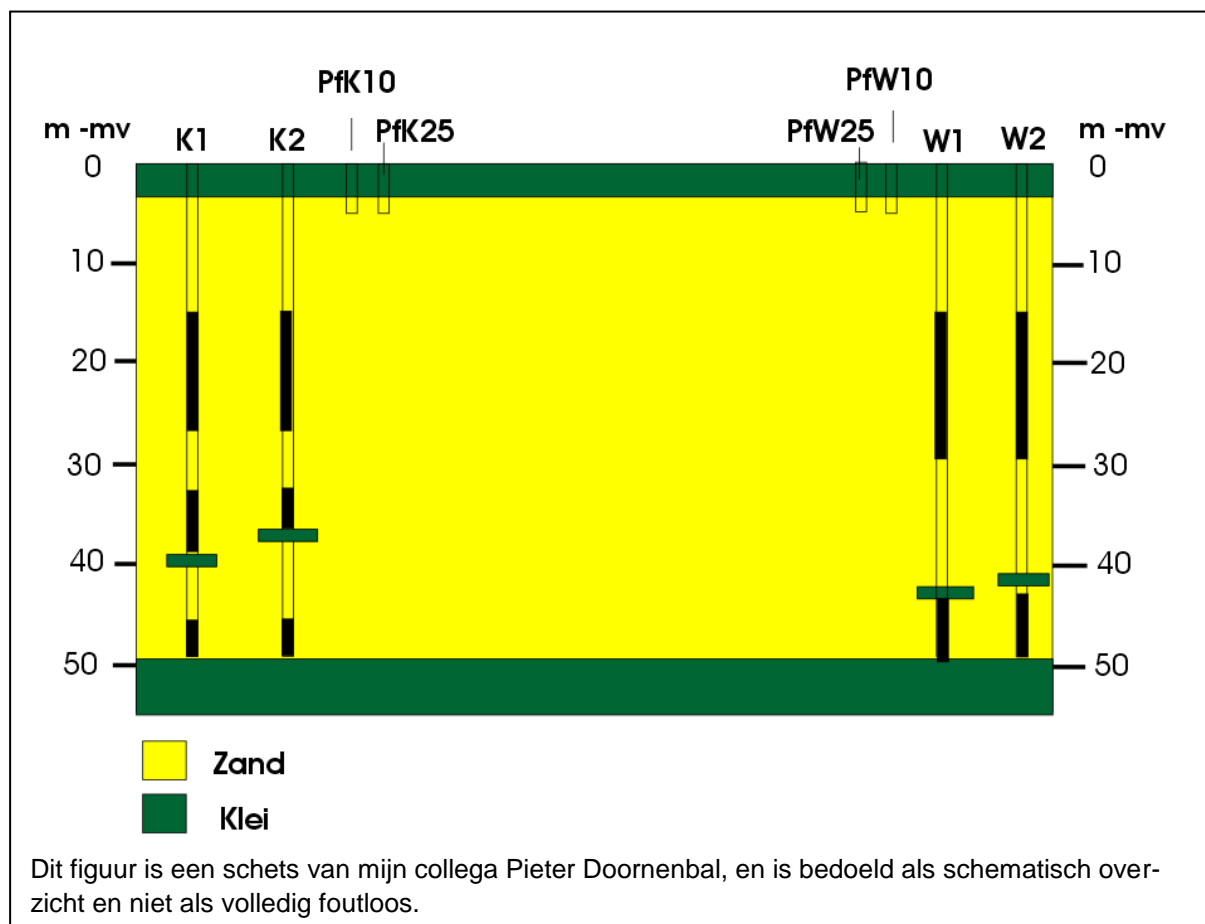
Nog peilfilters aanwezig op 70 m van K1 en op 70 m van W1?

De WKO installatie van de Universiteit Utrecht op de Uithof, draait op 4 warme bronnen en 4 koude bronnen (zie bovenstaand figuur). Deze zijn verdeeld in twee clusters. De pompfilters bevinden zich op een diepte van 16 – 50 m beneden het maaiveld. Bij de koude bronnen 1 en 2 zijn op een afstand van 10 en 25 m twee peilfilters geplaatst. Bij de warme bronnen 1 en 2 eveneens op een afstand van 10 en 25 m twee peilfilters geplaatst.

Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)
Pf1	vraag aan Roelof
PfK10 blauw	3,5 meter
PfK25 blauw	3,5 meter
PfK70 blauw	3,5 meter
PfW10 rood	3,5 meter
PfW25 rood	3,5 meter
PfW70 rood	3,5 meter
Meetpunt Botanische tuin	?vraag aan roelof

De peilfilters nabij de bronnen hebben allemaal dieptes tot aan de diepste filters.



Overzicht beschikbare metingen:

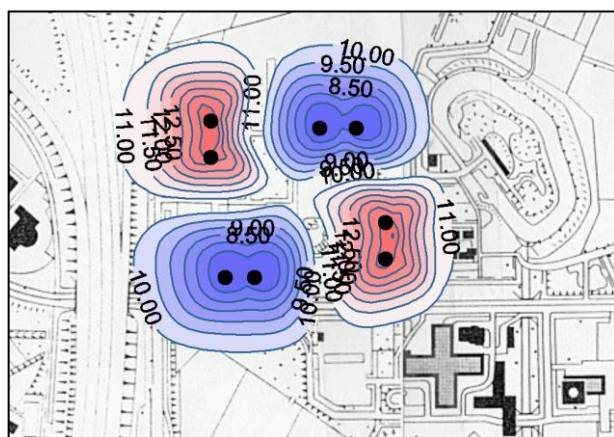
meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
GBS	2002-huidig	Dagelijks, rapportage op maandbasis	temperatuur, watermeterstanden, energiebalans In rapportages voor 2004 geen cumulatieven aangetroffen. In rapportages vanaf 2004 de maandgegevens in grafiekvorm
Pompproef	Januari 2003	eenmalig	Stijghoogten en pompdebieten

meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
Freatische en WVP1 peilfilters	2009	Uurbasis	Stijghoogten en freatische grondwaterstanden met divers Voor alle peilfilters totale meetreeks vanaf juli Voor het grootste deel vanaf januari 09
Freatische en WVP1 peilfilters	2009	Uurbasis	Temperatuur met divers Voor alle peilfilters totale meetreeks vanaf juli Voor het grootste deel vanaf januari 09
Peilfilters in bronnen en referentiemeetpunt	2009	2 metingen	Chemie en microbacteriën

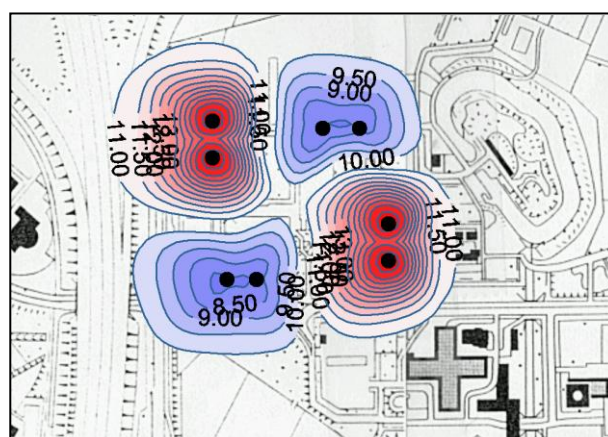
Kaart met thermisch invloedsgebied

De thermische berekeningen van de effectstudie zullen niet geheel kloppen aangezien de locatie van de bronnen in de werkelijkheid anders is dan tijdens de effectstudie verwacht werd.

Situatie eind winter



Situatie einde zomer



Ontwerpuitgangspunten grondwaterzijdig

- maximaal debiet zowel zomer als winter: 330 m³/uur
- gemiddelde waterverplaatsing zomer: 460.000 m³
- gemiddelde waterverplaatsing winter: 510.000 m³
- maximale waterverplaatsing per jaar: 1.450.000 m³/jaar (vergund)
- gemiddelde infiltratietemperatuur zomer: 18 °C
- gemiddelde infiltratietemperatuur winter: 6 °C

Naam project: Maasstad Ziekenhuis, locatie Zuider, Rotterdam

Provincie:	Zuid-Holland
In bedrijf sinds:	Eind 1998
Nog in bedrijf:	ja/nee, volgens mij nog in bedrijf
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja/nee
Soort systeem:	1 doublet
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	Zomer 2005: $\pm 15,5$ °C
Redoxtoestand:	sulfaatgereduceerd/methanogeen
Interactie met ander systeem:	nee
Bijzonderheden:	IF heeft van 1999 t/m 2005 monitoring verzorgd

Contactgegevens beheerder = eigenaar = ziekenhuis

Opdrachtgever tijdens monitoring

Contactpersoon: dhr. P.T. van de Graaf (coördinator bedrijfsbureau)

Adres: Olympiaweg 350

Tel.nr.: 010 – 291 19 60

Toestemming: gevraagd op 1-2-'10 aan mw.Arkenbout. Nog geen reactie ontvangen.

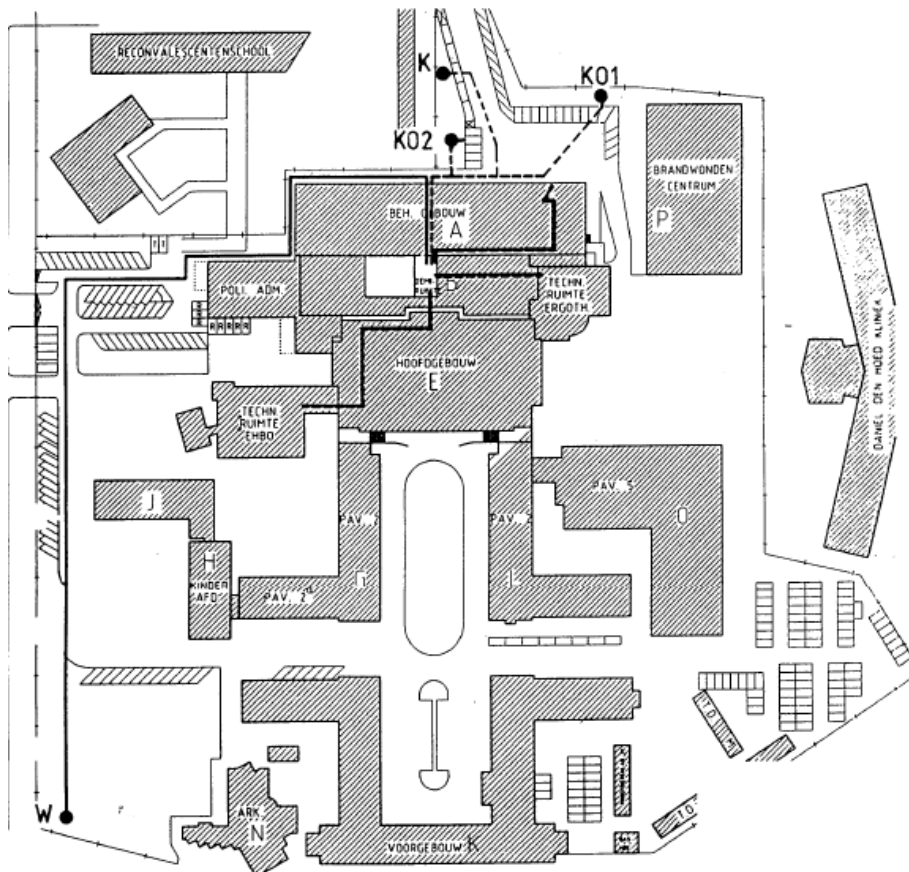
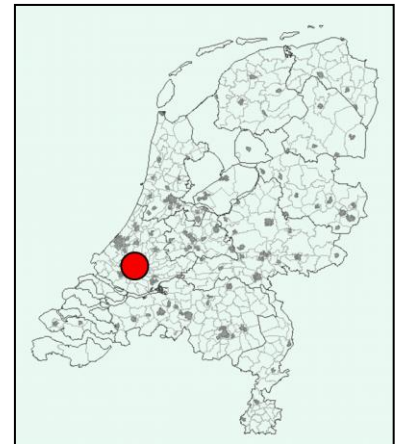
Contactgegevens Technische Dienst ziekenhuis

Contactpersoon: Hans Smit

Adres zie hierboven

Telnr. Zie hierboven

Toestemming: ja/nee/onbekend



Overzicht bronlocaties en meetputlocaties

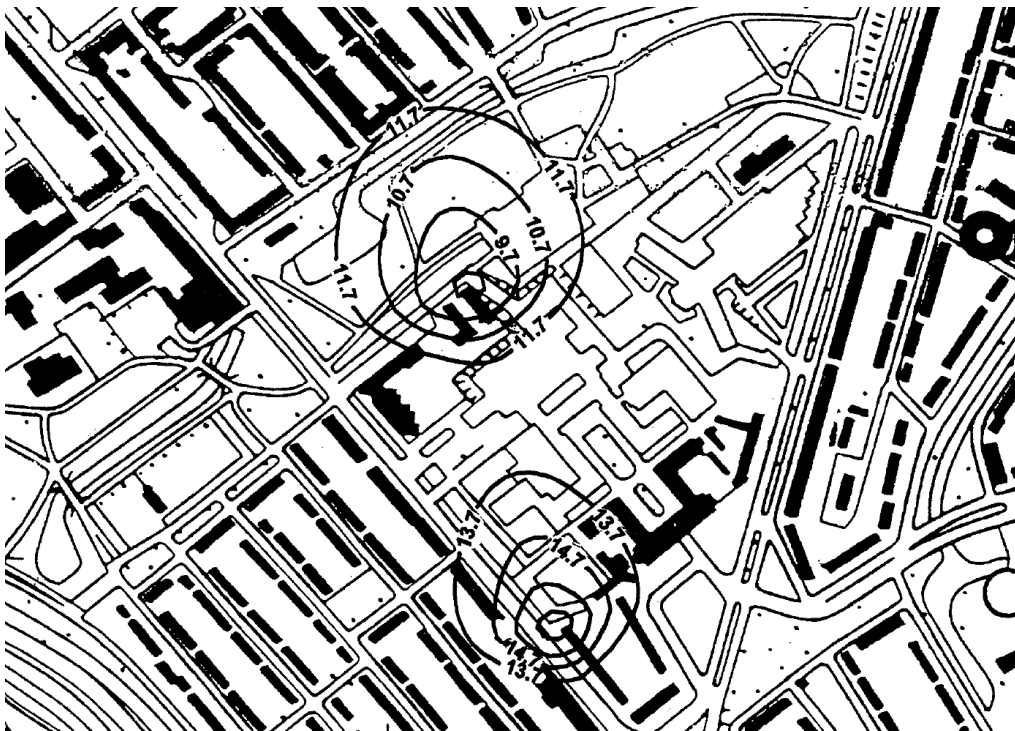
Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)
Wbron	130 m, filter 83-104 en 109-129
Kbron	131 m, filter 86-91 en 92-130

Overzicht beschikbare metingen:

meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
PF WB	Aug.'98 – aug. '05	16	Stijghoogte (handmatig)
GBS	'98 – '05	8	Verplaatste waterhoeveelheden
spuiwater	'97 – '01	5	Chloride
proefboring	'97	4	Chloride metingen op verschillende diepten

Kaart met thermisch invloedsgebied



Figuur 5.1 Berekende isothermen (°C) in het tweede watervoerende pakket na 20 jaar energieopslag. Situatie eind zomer. Schaal 1:5.000

Ontwerpuitgangspunten grondwaterzijdig

- maximaal debiet zomer	75 m ³ /h
- Maximaal debiet winter	60 m ³ /h
- gemiddelde waterverplaatsing zomer	60.000 m ³
- gemiddelde waterverplaatsing winter	70.000 m ³
- maximale waterverplaatsing zomer	85.000 m ³
- maximale waterverplaatsing winter	75.000 m ³
- gemiddelde infiltratietemperatuur zomer/winter	7,5°C/17,5°C

Bijlage 3

Kenmerken geselecteerde locaties WP3

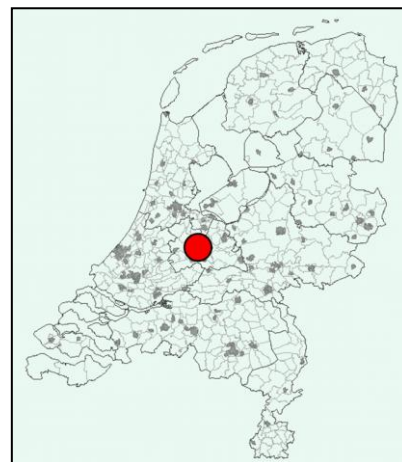
Naam project:	Jaarbeursterrein Utrecht
Provincie:	Utrecht
In bedrijf sinds:	Stapsgewijs in 1993, 1996 en 1999
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	Nog onbekend
Soort systeem:	Open systeem
Gemiddelde temperatuur in de opslag (laatst beschikbare jaar)	10 - 12 °C
Redoxtoestand:	IJzer tot sulfaat reducerend. Plaatselijk sulfaat-reducerend tot methanogeen.
Interactie met ander systeem:	Zie onderstaande tekening
Bijzonderheden:	De ondergrond is verontreinigd met VOCI en BTEX

Contactgegevens beheerder

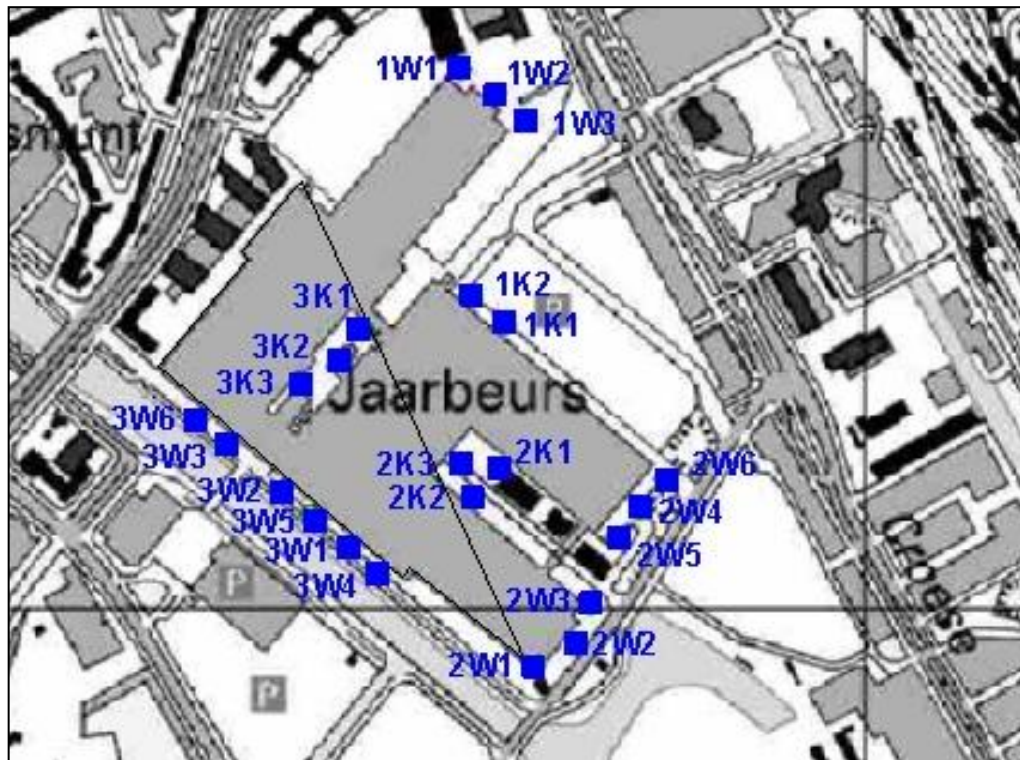
- Firma
- Contactpersoon
- Adres
- Telnr.
- Toestemming:

Contactgegevens eigenaar

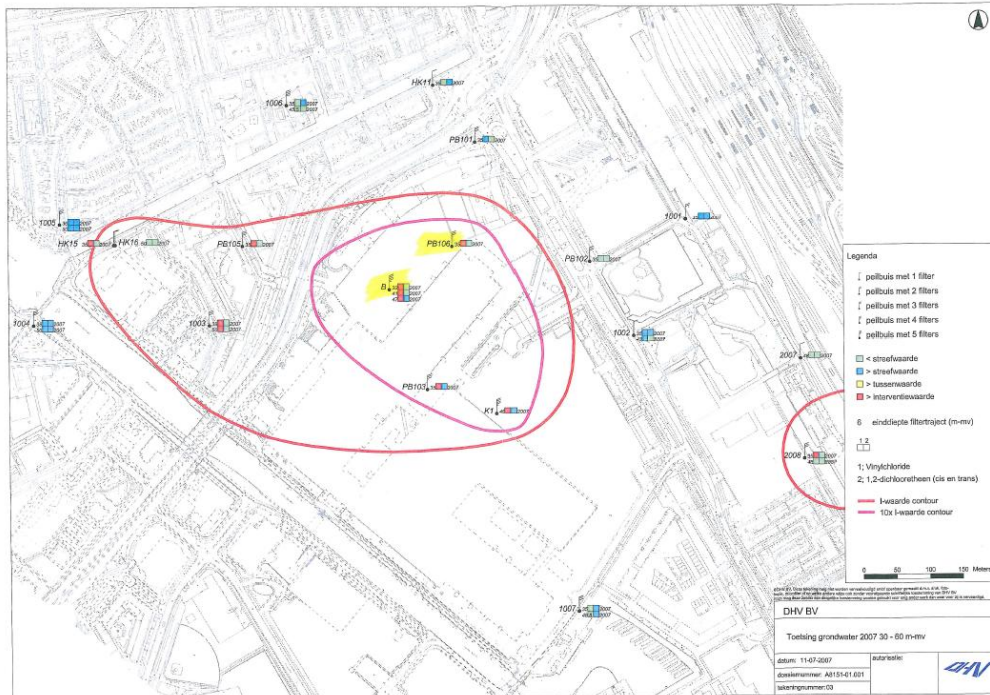
- Firma
- Contactpersoon
- Adres
- Tel.nr
- Toestemming:



Overzicht bronnen



Overzicht peilbuizen



Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)	meetpunten nog beschikbaar?
Pb103	19- 20	Ja
Pb103	34- 35	Ja
Pb106	19- 20	Ja
Pb106	34- 35	Ja
PbB	4-5	Ja
PbB	13-14	Ja
PbB	22- 23	Ja
PbB	40- 41	Ja
K1	18	Ja
K1	46	Ja
K1	72	Ja
PB103	20	Ja
PB103	35	Ja
B	23	Ja
B	32	Ja
B	41	Ja
B	47	Ja
HK4	20	Ja
1003	38	Ja
1003	49	Ja
PB106	20	Ja
PB106	35	Ja
HK20(HK4)	20	Ja
DKM4	28	Ja
DKM4	50	Ja
1007	20	Ja
1007	35	Ja
1007	49	Ja

105	20	Ja
105	30	Ja
HK2	20	Ja
Bron 1W2	20	Ja
Bron 1W2	39	Ja
Bron 2K2	44	Ja
Bron 2W3	40	Ja
Bron 2W5	51	Ja
Bron 3K1	49	Ja
Bron 3K3	48	Ja
Bron 3W1	41,5	Ja
Bron 3W2	44,5	Ja
Bron 3W6	44,5	Ja

Overzicht beschikbare metingen:

Meetpunt	meetperiode	Parameters
PbB	'93, '94, '95, '96, '97, '99, '04, '07	VOCl en enkele jaren redoxparameters
Pb103	'04 en '07	VOCl, TOC en redoxparameters
Lijst met peil- buizen van K1 t/m Bron 3W6	2008	Zeer uitgebreid monitoringspakket inclusief VOCl, TOC, redoxparameters, anionen, kationen en VC reductase

Ontwerpuitgangspunten:

- Aantal bronnen: 23
- Diepte filters: 25 – 60 m-mv.

Overzicht peilbuizen



Overzicht meetpunten:

Naam en locatie	diepte (m-mv)	meetpunten nog beschikbaar?
Zie bovenstaande tekening	Onbekend	Onbekend

Overzicht beschikbare metingen:

Meetpunt	meetperiode	meetfrequentie	parameters
Onbekend			

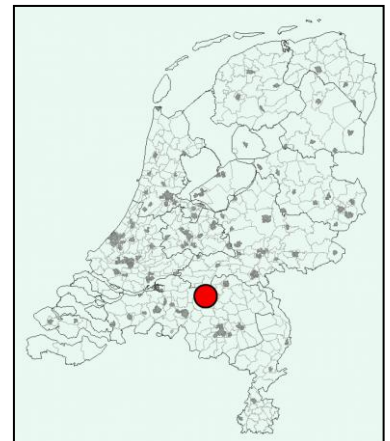
Ontwerpuitgangspunten:

- Aantal bronnen: 23
- Diepte filters: 25 – 60 m-mv.

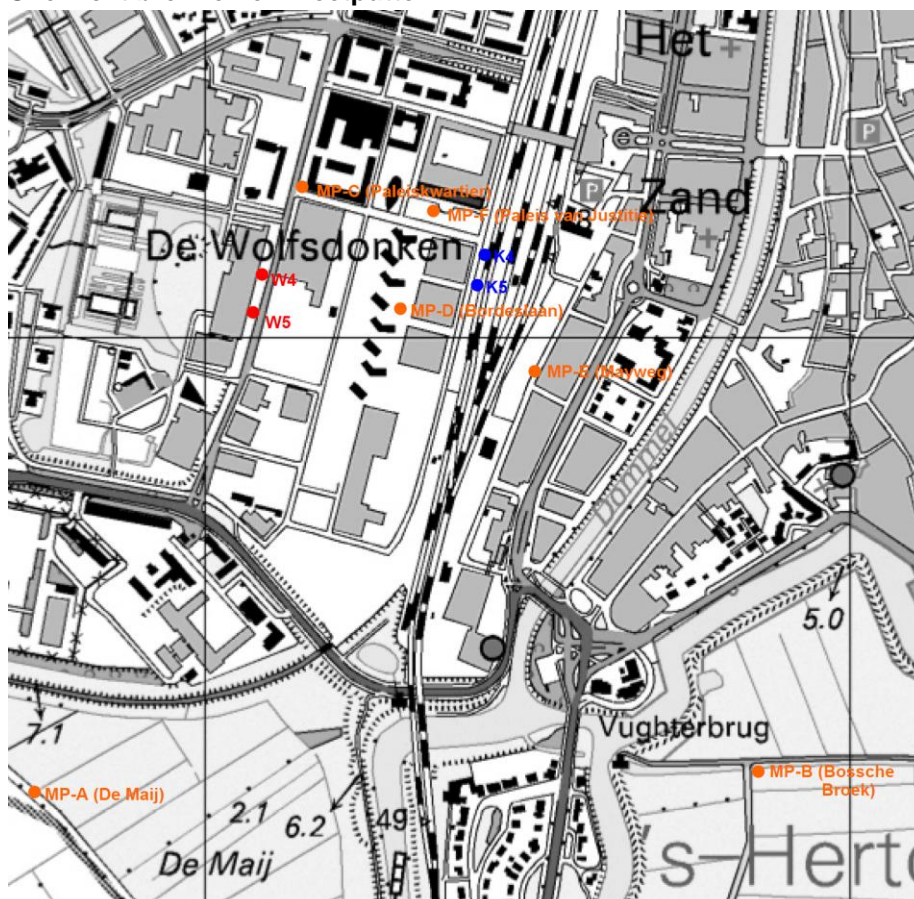
Naam project:	Paleiskwartier Den Bosch
Provincie:	Brabant
In bedrijf sinds:	2001
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	Ja
Soort systeem:	Open systeem
Gemiddelde temperatuur in de opslag (laatst beschikbare jaar)	10-12 graden
Interactie met ander systeem:	WKO 'La Tour' 300 m ten noorden.
Bijzonderheden:	In het ondiepere grondwater is een VOCl verontreiniging aanwezig. Verwacht werd dat deze VOCl verontreiniging zich door de aanwezigheid van een scheidende laag niet in het eerste watervoerende pakket zou bevinden, maar uit monitoringsdata blijkt dat het grondwater rondom de warmtebronnen in het verleden licht (enkele µg/l) verontreinigd is met <i>cis</i> -1,2-dichlooretheen (<i>cis</i> -DCE) en vinylchloride (VC). In de laatste meetronde uitgevoerd door IF-Technology is de verontreiniging niet meer aangetroffen.

Contactgegevens eigenaar

Firma Essent Warmte
Contact persoon Jessica van Heel



Overzicht bronnen en meetputten



Overzicht meetpunten:

Naam en locatie	diepte (m-mv)	meetpunten nog beschikbaar?
MP A		
MP B		
MP C		
MP D	29-31	Ja
MP D	37-39	Ja
MP E		
MP F		
Put K4		Ja
Put K5		Ja
Put W4		Ja
Put W5		Ja

Op de bovenstaande meetpunten zijn metingen verricht op april 2008, november 2008, mei 2009 en januari 2010 op redoxparameters, on-line parameters en VOCl.

Ontwerputgangspunten:

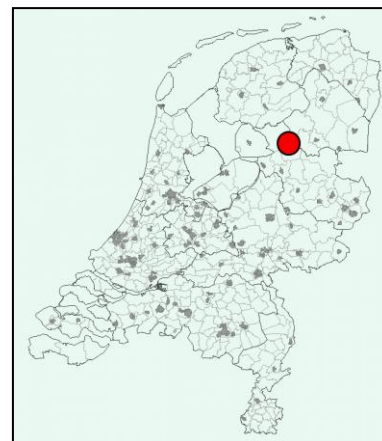
- Aantal bronnen: 4
- Diepte filters: 40 -85 m-mv

Naam project:	Grote Oever Meppel
Provincie:	Provincie Drenthe
In bedrijf sinds:	Onbekend
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	Ja
Soort systeem:	Open systeem
Gemiddelde temperatuur in de opslag (laatst beschikbare jaar)	Onbekend
Redoxtoestand:	Onbekend
Bijzonderheden:	Op 15 m-mv ligt een scheidende kleilaag met een dikte van ongeveer 2 meter. Boven de scheidende laag is een VOCl verontreiniging aanwezig met maximum concentraties van 20.000 ug/l. Vlak onder de scheidende laag (16 m-mv) zijn concentraties van 300 ug/l gemeten en de verontreiniging blijkt dus door de scheidende laag te lekken. In de WKO bronnen zelf is op dit moment een concentratie van 1 ug/l VOCl gemeten. Meer informatie over de locatie wordt toegestuurd zodra het monitoringsrapport definitief gemaakt is.

Contactpersoon

De heer Booj, Provincie Drenthe.
h.booj@drenthe.nl (0592) 36 58 74

Kaart met overzicht bronnen



Kaart met overzicht peilbuizen

Overzicht meetpunten:

Naam	diepte (m-mv)	meetpunten nog beschikbaar?

Overzicht beschikbare metingen:

Meetpunt	Meetperiode	Parameters

Ontwerpuitgangspunten:

- Aantal bronnen: 2
- Diepte filters: 20 – 40 m-mv

Bijlage II

Fysische beschrijving per locatie

Meer Met Bodemenergie

Rapport 3 - Effecten van warmte en koude opslagsystemen op geochemie en biologie. Eindrapport pilotmonitoring en labtesten

Definitief concept

Colofon

Dit is een gezamenlijk rapport van IF Technology, Bioclear, Deltares en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie.

Opdrachtgever

SKB duurzame ontwikkeling ondergrond
Postbus 420
2800 AK GOUDA
T 0182 – 54 06 90
F 0182 – 54 06 91
E info@skbodem.nl
Contactpersoon: Arno Peekel

en Participanten (zie volgende pagina).

Schrijvers

Inez Dinkla, Bioclear
Shakti Lieten, Bioclear
Benno Drijver, IF Technology
Niels Hartog, Deltares

Datum goedkeuring SKB

23 december 2011

Datum goedkeuring Technische Commissie MMB

23 december 2011

Website

www.meermetbodemenergie.nl

Participanten

Agentschap NL	Productschap Tuinbouw
Arcadis	provincie Drenthe
Bodem+	provincie Flevoland
Brabant Water	provincie Friesland
Eneco	provincie Gelderland
Essent Warmte	provincie Groningen
gemeente Almelo	provincie Limburg
gemeente Amersfoort	provincie Noord-Brabant
gemeente Apeldoorn	provincie Overijssel
gemeente Den Bosch	provincie Utrecht
gemeente Deventer	provincie Zeeland
gemeente Haarlem	provincie Zuid-Holland
gemeente Hengelo	Rendo
gemeente Tilburg	SBNS
gemeente Utrecht	SKB
gemeente Zwolle	Vewin
Havenbedrijf Rotterdam	Vitens
Ministerie van Infrastructuur & Milieu	Waterbedrijf Drenthe
NVOE	Waterschap Groot Salland
Philips	Waterschap Regge en Dinkel

Onderzoeksteam Meer met Bodemenergie

IF Technology	Guido Bakema	Technische commissie
IF Technology	Marc Koenders	Penvoerder
IF Technology	Benno Drijver	Onderzoeker
IF Technology	Sanne de Boer	Onderzoeker
IF Technology	Marion Heterscheid	Ondersteuner
Bioclear	Maurice Henssen	Technische commissie
Bioclear	Inez Dinkla	Onderzoeker
Bioclear	Erik de Vries	Onderzoeker
Bioclear	Shakti Lieten	Onderzoeker
Deltares	Hans Gehrels	Technische commissie
Deltares	Niels van Oostrom	Onderzoeker
Deltares	Niels Hartog	Onderzoeker
Deltares	Nanne Hoekstra	Onderzoeker
Deltares	Mike Woning	Onderzoeker
Wageningen Universiteit	Tim Grotenhuis	Technische commissie
Wageningen Universiteit	Huib Rijnaarts	Technische commissie
Wageningen Universiteit	Wijb Sommer	Onderzoeker
Wageningen Universiteit	Zhubiao Ni	Onderzoeker
Wageningen Universiteit	Martijn Smit	Onderzoeker

Inhoudsopgave

1	Bijlage 2 bij rapport 3+4, overzicht gegevens per locatie.....	5
1.1	Locatie Beijum, Groningen.....	5
1.1.1	Achtergrond.....	5
1.1.2	Locatiekaart Beijum.....	6
1.1.3	Fysische gegevens.....	7
1.2	Heuvelgalerie.....	15
1.2.1	Achtergrond.....	15
1.2.2	Locatiekaart Heuvelgalerie.....	17
1.2.3	Fysische gegevens.....	19
1.3	Locatie Hederakwekerij, Luttelgeest.....	28
1.3.1	Achtergrond.....	28
1.3.2	Locatiekaart Hederakwekerij Luttelgeest.....	29
1.3.3	Fysische gegevens.....	30
1.4	Locatie Mariaoord, Rosmalen.....	37
1.4.1	Achtergrond.....	37
1.4.2	Locatiekaart Mariaoord, Rosmalen.....	38
1.4.3	Fysische gegevens.....	39
1.5	Maasstadziekenhuis, Rotterdam.....	42
1.5.1	Achtergrond.....	42
1.5.2	Locatiekaart Maasstadziekenhuis, Rotterdam.....	43
1.5.3	Fysische gegevens.....	44
1.6	De Uithof Utrecht.....	44
1.6.1	Achtergrond.....	44
1.6.2	Gegevens van de pilot.....	45
1.6.3	Fysische gegevens: temperatuur.....	46
1.6.4	Fysische gegevens: stijghoogten.....	50
1.6.5	Fysische gegevens: geleidbaarheid.....	51
1.7	Locatie De Bruggen, Zwammerdam.....	52
1.7.1	Achtergrond.....	52
1.7.2	Gegevens pilotlocatie.....	53
1.7.3	Fysische gegevens.....	54
1.8	Lelystad.....	58
1.8.1	Gegevens Pilot.....	58
1.8.2	Fysische gegevens.....	58

1 Bijlage 2 bij rapport 3+4, overzicht gegevens per locatie

1.1 Locatie Beijum, Groningen

1.1.1 Achtergrond

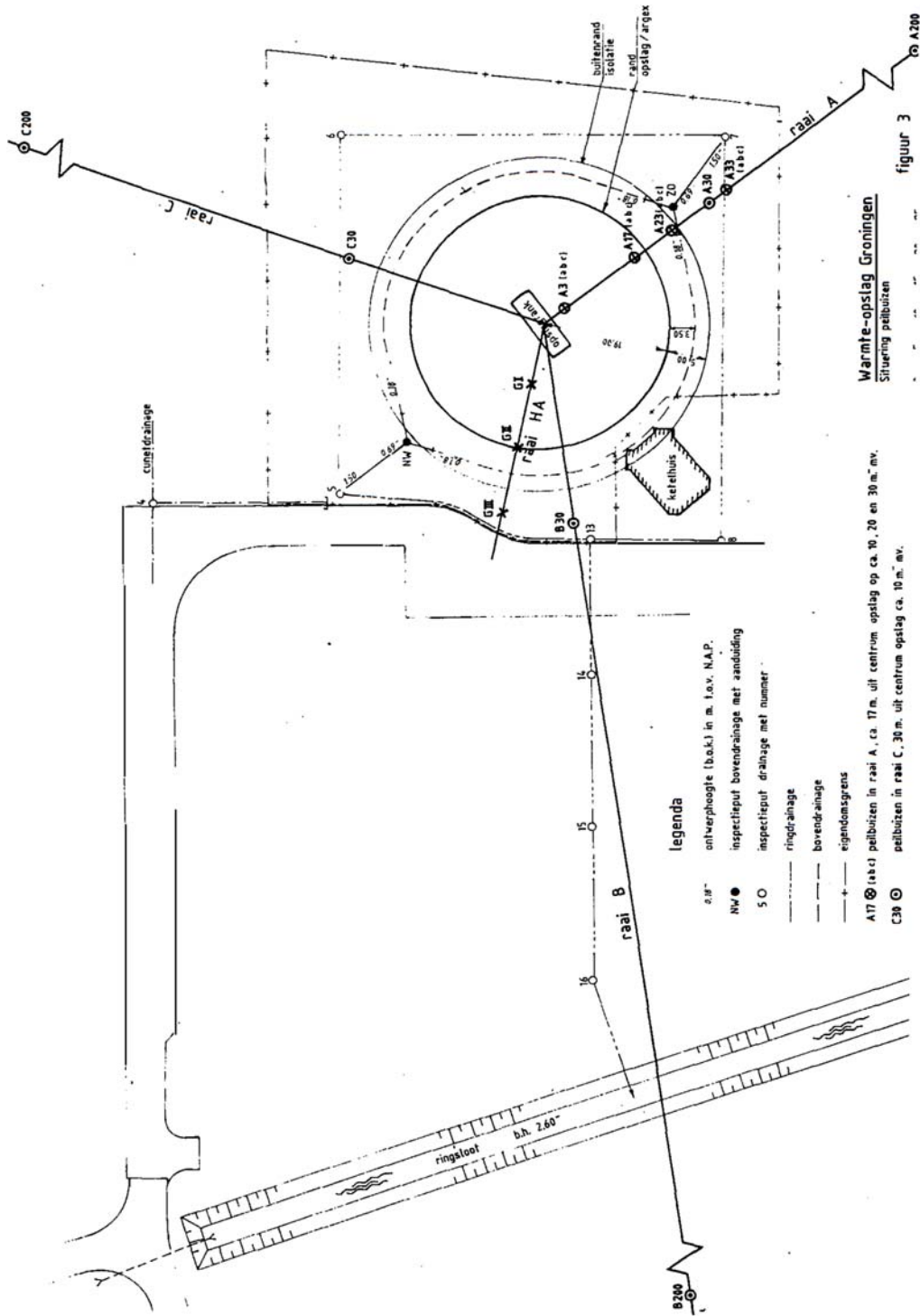
Type systeem: bodemwarmtewisselaarsysteem

Dit is het oudste bodemenergieproject van Nederland: dit systeem is al meer dan 25 jaar in bedrijf (sinds 1984). Destijds gerealiseerd als demonstratieproject, waardoor een groot aantal meetputten aanwezig is en uitgebreid onderzoek is gedaan naar de effecten van de hoge temperatuur warmteopslag (bodemtemperatuur fluctueert tussen 25 en 60 °C) op de chemie en microbiologie, in de eerste 5 jaar.

Tabel 1. Locatiegegevens Beijum

Provincie:	Groningen
In bedrijf sinds:	1983
Nog in de bedrijf:	ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	Bodemwarmtewisselaars
Gemiddelde temperatuur in de opslag (laatst beschikbare jaar)	25 - 60 °C
Redoxtoestand:	divers: anoxisch, sulfaatreducerend, methanogeen
Interactie met ander systeem:	nee
Bemonsterde meetputten:	G1, GIII, A33

1.1.2 Locatiekaart Beijum

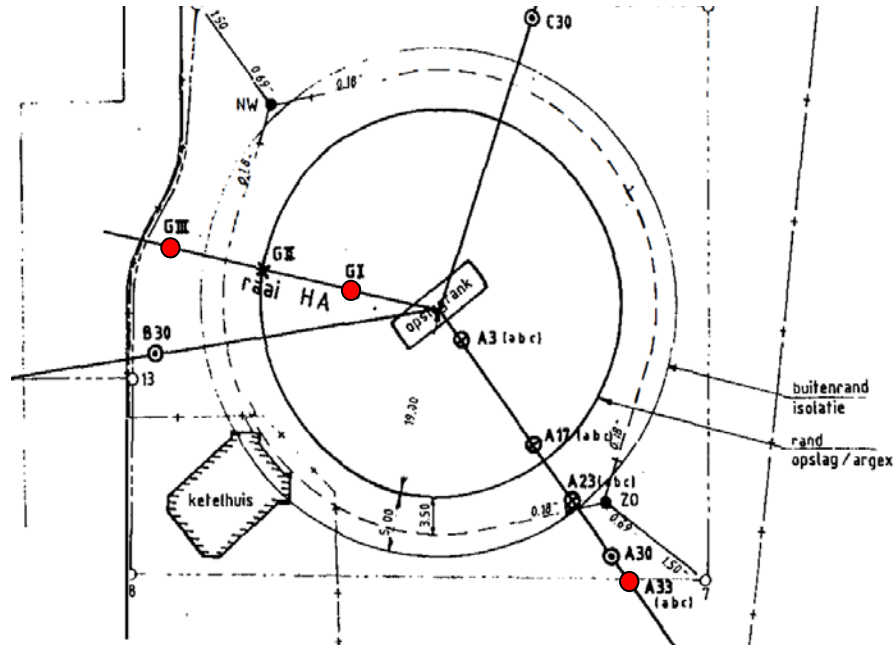


Figuur 1. Locatiekaart Beijum

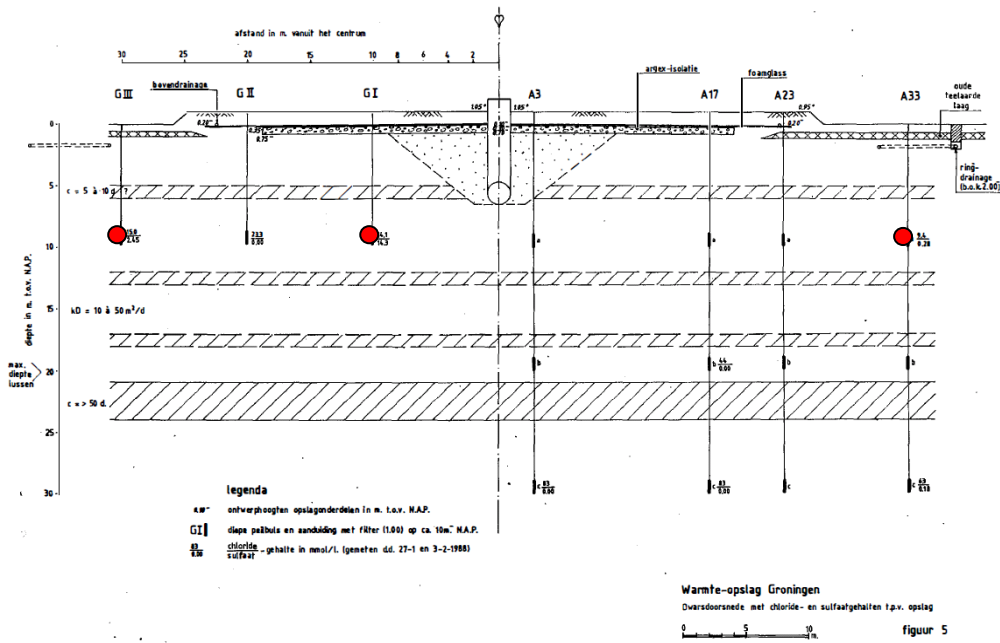
1.1.3 Fysische gegevens

Bodemtemperatuur

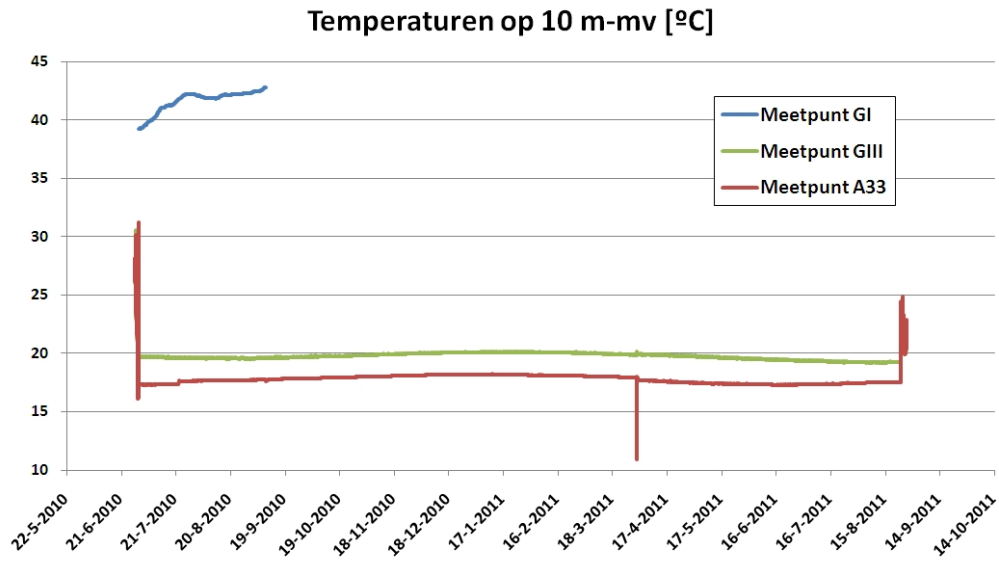
In 3 peilbuizen zijn divers aangebracht op ongeveer 9,5 m diepte, namelijk GI (in de opslag), GIII (30 m uit het centrum van de opslag), A33 (33 m uit het centrum van de opslag buiten de opslag en buiten de geïsoleerde zone). Bij de tweede keer uitlezen van de divers bleek de diver uit meetpunt GI verdwenen, waardoor alleen van de eerste periode gegevens beschikbaar zijn.



Figuur 2. Boven-aanzicht van de ligging van de meetpunten ten opzichte van de zone van de opslag en de zone met de aan maaiveld aangebrachte isolatie.



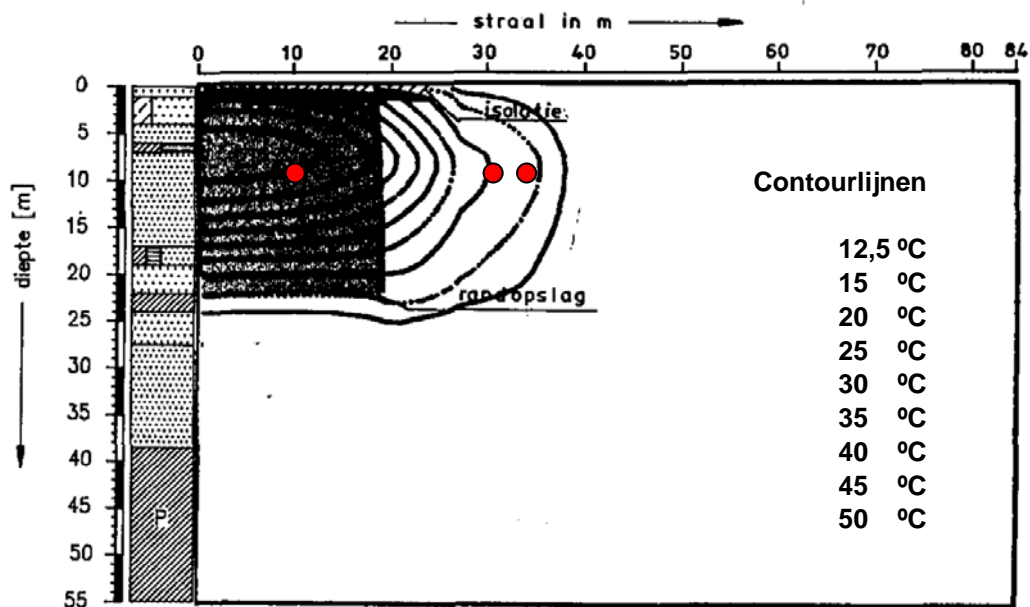
Figuur 3. Dwarsprofiel over de opslag met daarin aangegeven de meetputten en de diepte van de peilfilters.



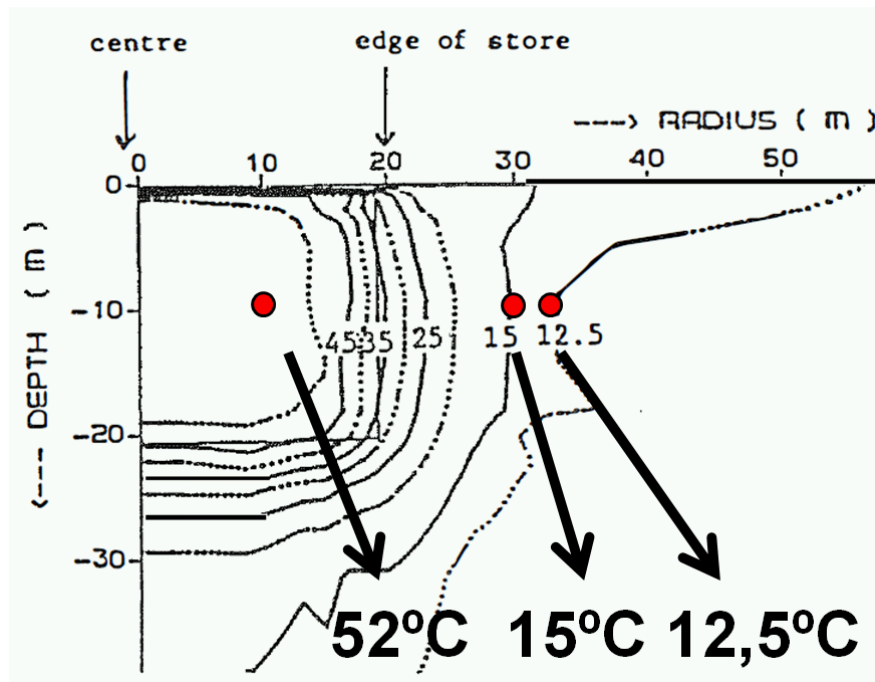
Figuur 4. Temperaturen gemeten met de divers

De gemeten temperaturen zijn weergegeven in bovenstaande grafiek. De temperatuur in de opslag (meetpunt GI) loopt in de periode eind juni tot begin september 2010 op van ongeveer 39 °C naar 43 °C (meer gegevens ontbreken doordat de diver bij de tweede keer uitlezen niet meer aanwezig bleek). De temperatuur in GIII is net iets lager dan 20 °C en in A33 ongeveer 17,5 °C. Beide locaties vertonen een zeer kleine fluctuatie. De oorspronkelijke bodemtemperatuur is ongeveer 10 °C. Meetpunt A33 ligt op basis van deze gegevens niet buiten de thermische invloedszone van het systeem en is dus niet ideaal als referentie. Inmiddels is een verder weg gelegen referentiebuis gevonden, welke in de volgende meetronde zal worden gebruikt voor metingen.

Vergelijking van de gemeten met de berekende temperaturen (berekeningen voor de situatie na twee jaar) toont aan dat de metingen vrij goed overeen komen met de berekeningen: berekend/gemeten GI 48/43 °C; GIII 20/20 °C en A33 16/17,5 °C.



Figuur 5. Dwarsdoorsnede door de opslag met de oorspronkelijk berekende temperaturen.



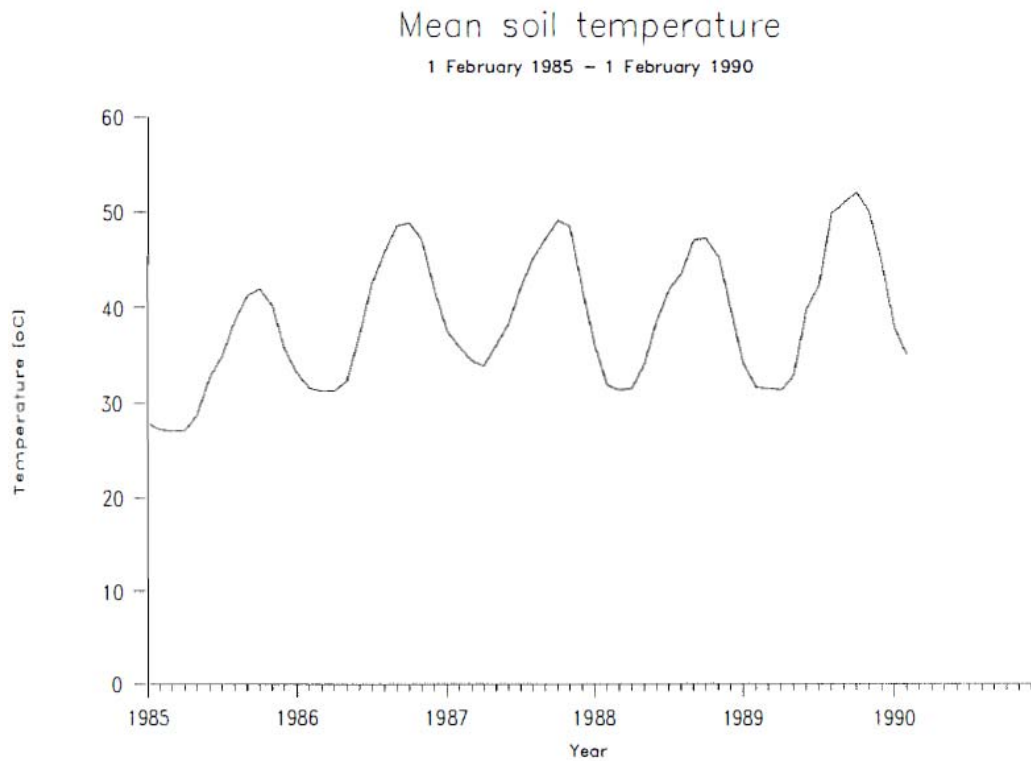
Figuur 6. Temperatuurverdeling in en ronde de warmteopslag op 1 oktober 1986. De rode punten geven de locaties aan van de meetpunten uit de 1^e meetronde

Tabel 2. Temperatuurmetingen Beijum

meetpunt	berekend voor 2 ^e jaar, voor aanvang winterseizoen	metingen 1 oktober 1986 (3 ^e jaar)	metingen begin september 2010
GI	48 °C	ca. 52 °C	43 °C
GIII	20 °C	15 °C	20 °C
A33	16 °C	12,5 °C	17,5 °C

Er zijn ook metingen beschikbaar van 1 oktober 1986, 3 jaar na start van de opslag. Op dat moment lagen de temperaturen in de meetpunten op respectievelijk circa 52, 15 en 12,5 °C. Tabel 2 toont een overzicht van alle gemeten en berekende waarden.

Verder is een grafiek beschikbaar (Figuur 7) van de gemiddelde temperatuur in de opslag in de periode 1 februari 1985 - 1 februari 1990. De gemiddelde temperatuur in de opslag varieert globaal tussen 30 en 50 °C. De metingen uit 2010 vallen dus binnen dezelfde range.

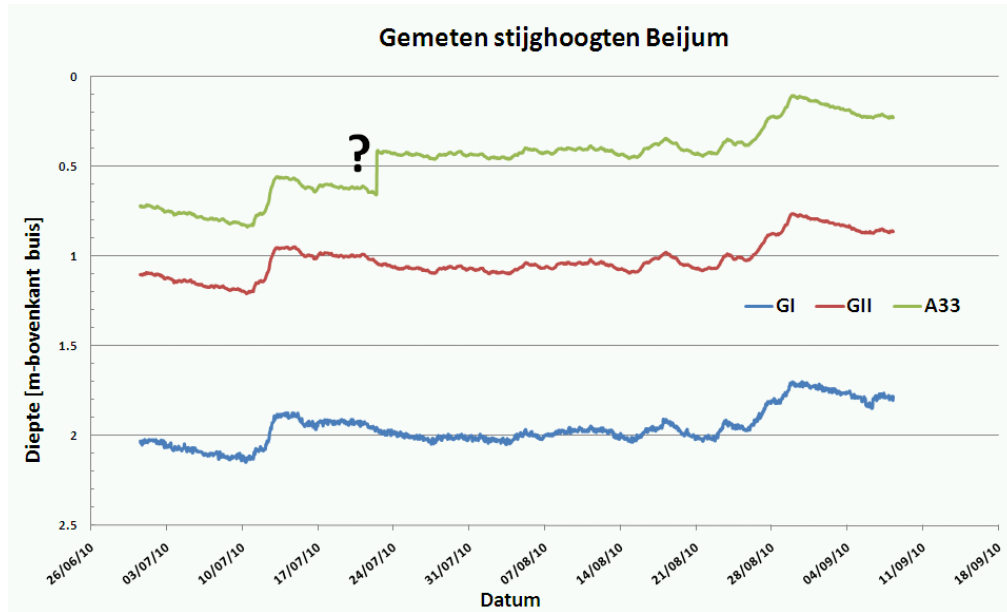


Figuur 7. Gemiddelde temperatuur in opslag Beijum.

De stabilisatie van de temperatuurfluctuatie suggereert dat de warmteverliezen stabiliseren. De metingen geven aan dat de temperatuur op 30 m afstand tussen 1986 en 2010 met 5 °C zijn gestegen. Op basis hiervan mag worden aangenomen dat het thermisch invloedsgebied van de warmteopslag vrijwel constant zal zijn, waarbij de thermische verliezen vrijwel volledig via het maaiveld verdwijnen.

Stijghoogten

Figuur 8 toont de met de divers gemeten stijghoogte in de meetpunten.

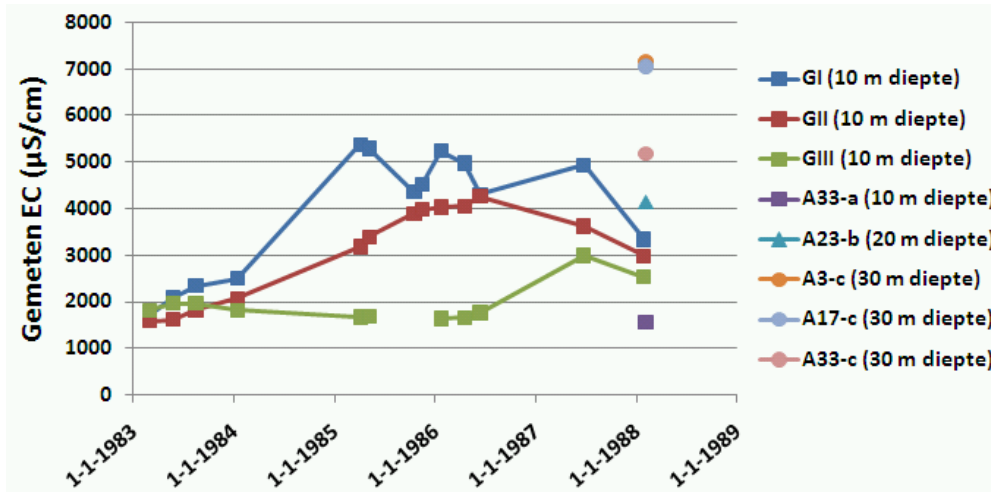


Figuur 8. Gemeten stijghoogten Beijum.

De stijghoogte in GI is duidelijk lager dan de stijghoogte in GII en die is weer lager dan de stijghoogte in A33. Deze verschillen kunnen worden verklaard vanuit verschillen in de hoogte van de bovenkant van de peilbuizen. Verder vertonen de lijnen hetzelfde verloop, met uitzondering van een plotselinge sprong in de lijn van meetpunt A33. De variatie moet het gevolg zijn van het natuurlijke stijghoogteverloop, aangezien bij dit systeem geen grondwater wordt verpompt.

Geleidbaarheid (EC)

In de eerste 5 jaar van de opslag is 13 maal het grondwater uit de buizen GI, GII en GIII-bemonsterd en geanalyseerd. Hierbij zijn ook de EC-metingen uitgevoerd. De resultaten zijn in Figuur 9 weergegeven. Begin 1988 zijn ook een aantal diepere buizen bemonsterd.



Figuur 9. Gemeten geleidbaarheid Beijum.

De grafiek toont aan dat de EC van het grondwater na aanvang oploopt, wat duidt op zoute kwel. Logische verklaring voor dit fenomeen is dat de temperatuurstijging van het grondwater opwaartse stroming als gevolg van dichtheidsverschillen tot gevolg heeft. Het grondwater in het opslagveld zal zich door de lagere dichtheid omhoog bewegen, waardoor dieper grondwater omhoog wordt getrokken. Het effect is dan ook het sterkst in het centrum van de opslag en neemt af met toenemende afstand uit het centrum van de opslag.

Op 30 juni 2010 is het grondwater uit de buizen GI, GIII en A33 nogmaals bemonsterd en is de EC gemeten. De resultaten zijn 756 µS/cm (GI), 797 µS/cm (GIII) en 1400 µS/cm (A33-a). De meting in A33-a komt vrijwel overeen met de meting van begin 1988. De metingen in GI en GIII wijken sterk af: blijkbaar is het zoutgehalte van het grondwater hier afgenomen, zelfs ten opzichte van de referentiesituatie.

Nadere beschouwing van de opgeloste stoffen in het grondwater geeft aan dat bicarbonaat en chloride bij de anionen de belangrijkste bijdrage leveren aan de geleidbaarheid van het water. Bij de kationen gaat het vooral om calcium, magnesium en natrium. In de onderstaande tabel zijn de gemeten gehalten van de betreffende parameters uit maart 1983, respectievelijk februari 1988 (eerste metingen in betreffende meetpunt) en de waarden van nu naast elkaar gezet.

Tabel 3. Gemeten gehalten van de zouten die een belangrijke bijdrage leveren aan de geleidbaarheid van het grondwater [mmol/l].

	GI		GIII		A33	
	maart '83 / jan '88	1 ^e meetronde	maart '83	1 ^e meetronde	feb '88	1 ^e meetronde
bicarbonaat	9,7 / 12,1	8,4 *	13,3 / 12,8	8,7 *	13,5	16,4
chloride	5,3 / 14,1	1,7 *	4,5 / 15,0	1,7 *	9,4	1,7 *
calcium	2,1 / 10,5	3,5	1,5 / 4,1	2,1	1,8	3,0
magnesium	2,2 / 7,2	1,0 *	1,8 / 4,5	1,5 *	1,1	3,7
natrium	7,8 / 16,1	1,7 *	12,0 / 13,0	3,7 *	16,7	5,5 *

* Waarden zijn gelijk of lager dan de minimale waarde uit het verleden

Uit Tabel 3 komen enkele relevante verschillen naar voren:

- 1) Het gehalte aan bicarbonaat is in GI en GIII afgenomen en in A33 juist toegenomen. Verder is de concentratie bicarbonaat in GI en GIII vergelijkbaar en in A33 bijna 2 keer zo hoog.
- 2) De gehalten calcium en magnesium zijn in GI en GIII duidelijk afgenomen ten opzichte van de laatste metingen uit 1988, terwijl bij A33 juist sprake is van een toename. Daarnaast ligt de concentratie magnesium in A33 duidelijk hoger dan in GI en GIII.
- 3) De gehalten chloride en natrium zijn in alle meetputten aanzienlijk afgenomen ten opzichte van de jaren '80 terwijl in de eerste jaren sprake was van een toename.

Uit deze waarnemingen (1 en 2) kan worden afgeleid dat waarschijnlijk sprake is (gevoelt) van neerslag van carbonaten in de zone met hoge temperaturen, waardoor de concentraties calcium, magnesium en bicarbonaat zijn verlaagd. Dit proces mag op basis van het literatuuronderzoek ook worden verwacht bij de hoge temperaturen die van toepassing zijn in kern van de opslag. De temperatuur bij GIII is echter niet hoog genoeg. De verlaagde concentraties bij GIII zijn te verklaren door afstroming van grondwater vanuit het gebied van de opslag waarin de neerslag van carbonaten optreedt. Uit metingen in de omgeving is afgeleid dat de grondwaterstroming naar het westen gericht is en op de locatie zou de stromingsrichting naar het zuiden zijn (minder betrouwbaar door relatief korte afstanden tussen de peilbuizen). Daarnaast speelt het opdrijven van het warme grondwater een rol: hierdoor stroomt in het centrum van de opslag water omhoog en aan de onderzijde van de bovenliggende kleilaag (7 m-mv) zijwaarts. Het grondwater stroomt zo doende vanuit de opslag naar GIII en blijktbaar niet of minder naar A33.

Uit punt 3 blijkt dat in eerste instantie verzilting optrad en inmiddels weer verzoeting heeft plaatsgevonden. Dit is te verklaren uit het optreden van dichtheidsstroming na het opwarmen van het grondwater, waardoor in het centrum van de opslag dieper (zouter) grondwater naar boven is gekomen. De dichtheidsstroming is nu minder sterk (omgeving is ook opgewarmd), waardoor de invloed van de infiltratie van zoet regenwater op het zoutgehalte weer de overhand heeft gekregen.

Zettingen

In een rapport van Heidemij adviesbureau van juli 1988 (bijlage C bij het rapport “Oorzaken en maatregelen ter voorkoming van hogere warmteverliezen bij aquifers” van de Technisch Fysische Dienst van TNO – TH) zijn de gemeten zettingen geëvalueerd. In dit rapport staat over zettingen:

Uit de veldinspectie (waaronder hoogtemetingen) zijn de volgende conclusies te trekken: sinds de realisatie van het opslagsysteem zijn enige peilmerken en peilbuizen in de omgeving enige cm' s gezakt (ca. 3 cm). Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door de gaswinning in Groningen, die over grote oppervlakte en diepte merkbaar is; zowel de plantsoenen als de verharding vertonen ten opzichte van de bebouwing een zichtbare verlaging (van enkele tot ca. 5 cm) welke enerzijds veroorzaakt kan zijn door de gepleegde terreinophoging en anderzijds door het lagere ontwateringsniveau. Ter plaatse van de opslag, alwaar ca. 1 meter meer grond is opgebracht dan in de omgeving, ligt een nog grotere zetting voor de hand; het tankopslaghuisje midden op de opslag vertoont aan de westelijke kant een verticale scheur boven maaiveld.

Gezien het voorgaande is het terecht te veronderstellen dat de gerealiseerde opslagonderdelen (isolatie, leidingen, etc .) zoals op ontwerp- en revisietekeningen aangegeven, inmiddels enige centimeters (ca. 5 cm) zijn gezakt.

De waargenomen maaiveldaling is waarschijnlijk te wijten aan een combinatie van factoren die los staan van de effecten van de warmteopslag. Een grootte van de eventuele uitzetting van de bodem door de opwarming van de ondergrond is daardoor niet uit de metingen af te leiden, maar is in ieder geval niet groter dan de opgetreden dalingen.

1.2 Heuvelgalerie

1.2.1 Achtergrond

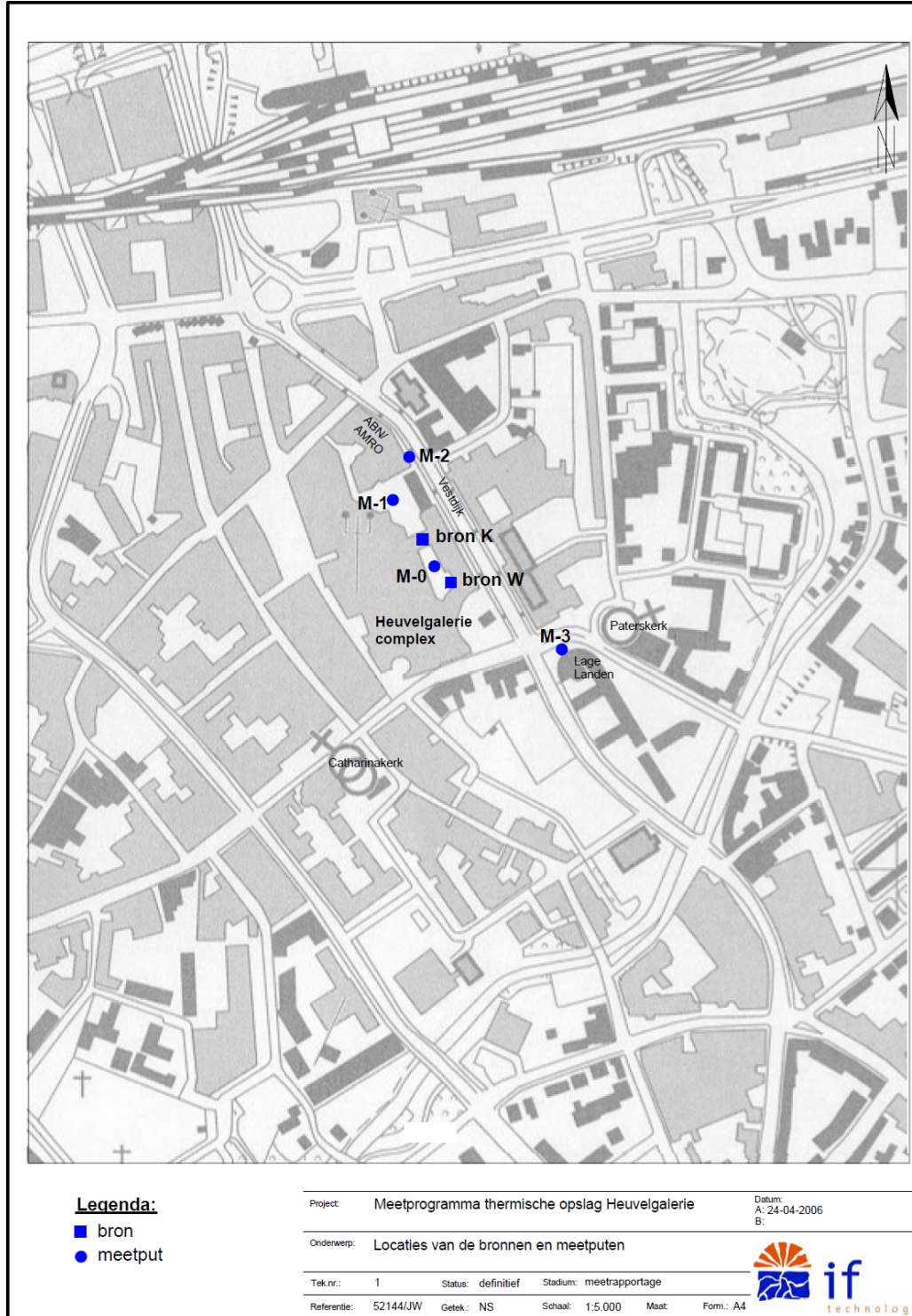
Type systeem: hogere temperatuuropslag

Ten behoeve van de koude- en warmte levering aan de gebouwen, passages en winkels van de Heuvelgalerie te Eindhoven is in 1992 een warmteopslagsysteem gerealiseerd. Dit systeem is opgebouwd uit een warme en een koude bron die door middel van een transportleiding in verbinding staan met een technische ruimte, waar een warmtewisselaar staat opgesteld ten behoeve van de energie-uitwisseling met de genoemde afnemers.

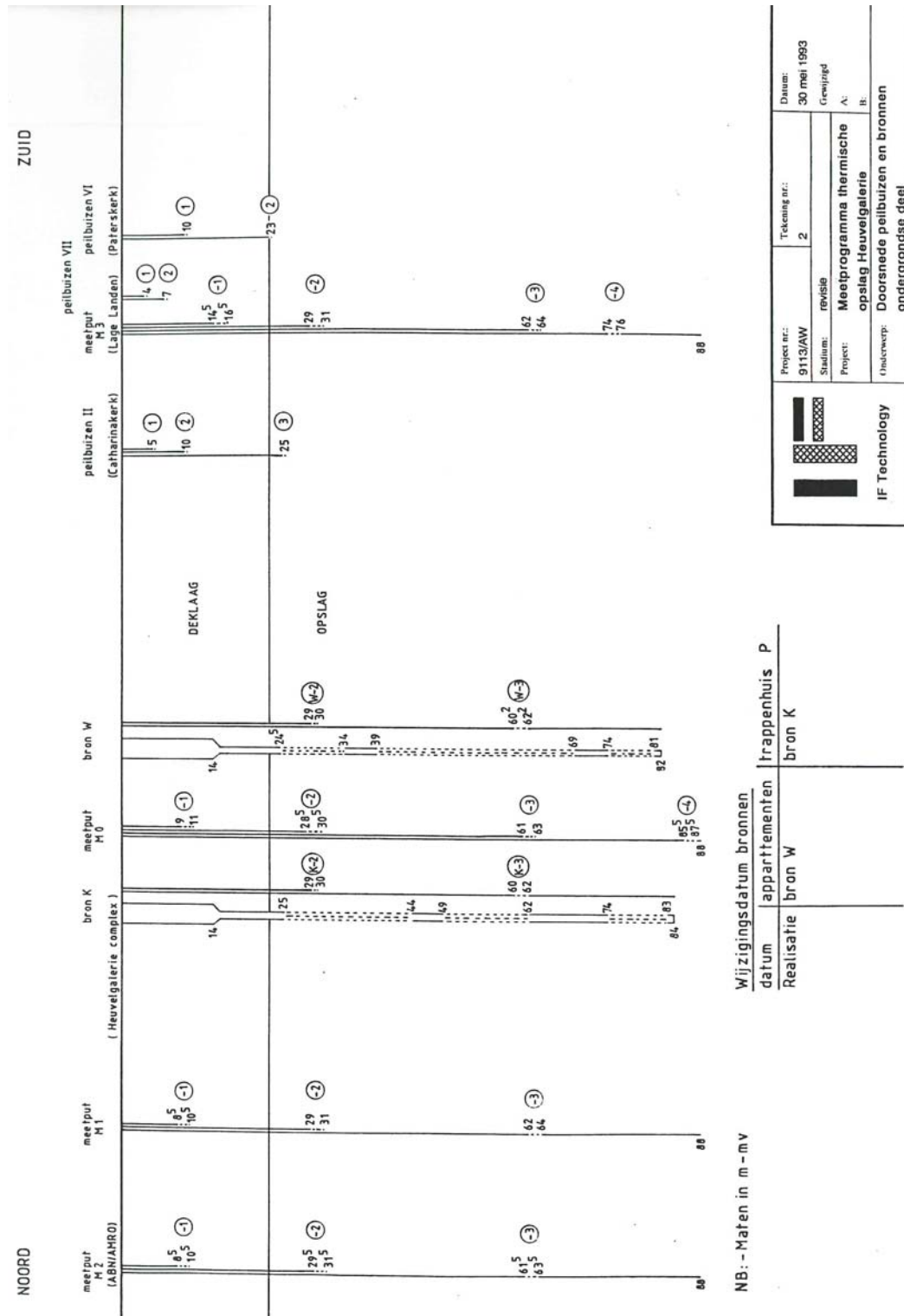
Tabel 4. Locatiegegevens Heuvelgalerie.

Provincie:	Noord-Brabant
In bedrijf sinds:	1992
Nog in de bedrijf:	ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	warmteopslagsysteem
Gemiddelde temperatuur tijdens infiltratie W; 2008.	29.6 – 31.5 °C
Gemiddelde temperatuur tijdens onttrekking K; 2008.	
Gemiddelde temperatuur tijdens infiltratie K; 2008.	20.8 – 22.0 °C
Gemiddelde temperatuur tijdens onttrekking W; 2008.	
Ontwerp T onttrekking	17.8 – 20.5 °C
Ontwerp T infiltratie	24.0 – 25.6 °C
Filterdiepte (m-mv) Koude bron	
Filterdiepte (m-mv) Warme bron	28.0 °C
Filterdiepte (m-mv) M0	18.0 °C
Filterdiepte (m-mv) M1	
Filterdiepte (m-mv) M2	81-74, 62-60, 30-29,
Filterdiepte (m-mv) M3	81-74, 62.2-60.2, 34-24.5, 30-29, 87.5-85.5, 63-61, 30.5-28.5, 11-9 64-62, 31-29, 10.5-8.5 63.5-61.5, 31.5-29.5, 10.5-8.5 76-74, 64-62, 31-29, 16.5-14.5
Interactie met ander systeem:	nee
Bemonsterde meetputten:	M0, M1, M2, M3, warme bron, koude bron

1.2.2 Locatiekaart Heuvelgalerie



Figuur 10. Locatiekaart Heuvelgalerie.

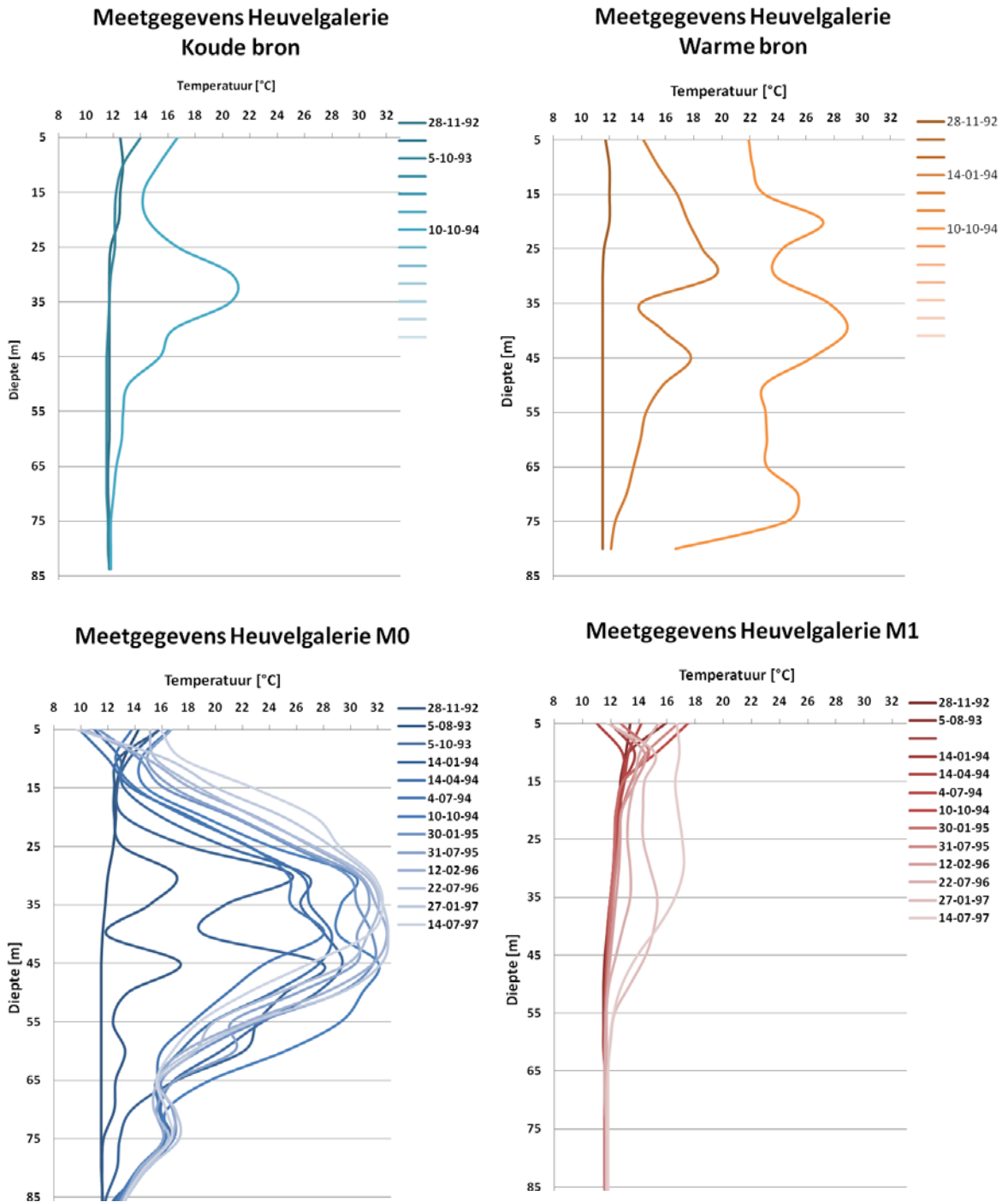


Figuur 11. Doorsnede peilbuizen en bronnen ondergrondse deel Heuvelgalerie.

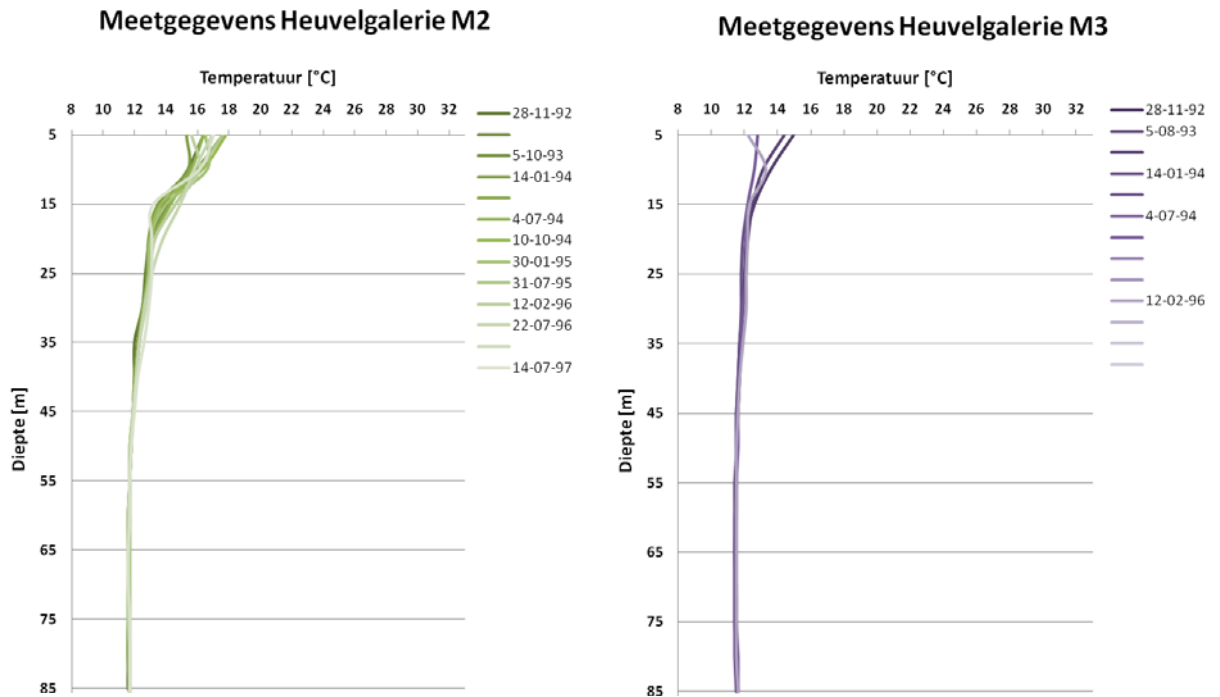
1.2.3 Fysische gegevens

Bodemtemperatuur

In 4 meetputten en de warme en koude bron zijn temperatuurmetingen verricht tot een diepte van ~80m-mv. M0 bevindt zich tussen de warme en koude bron in, M1 bevindt zich ten N-NW van de koude bron, M2 bevindt zich ten noorden van de koude bron en M3 ligt ten zuidoosten van de warme bron (zie locatiekaart Heuvelgalerie).



Figuur 12. Meetgegevens Heuvelgalerie



Figuur 13. Meetgegevens Heuvelgalerie

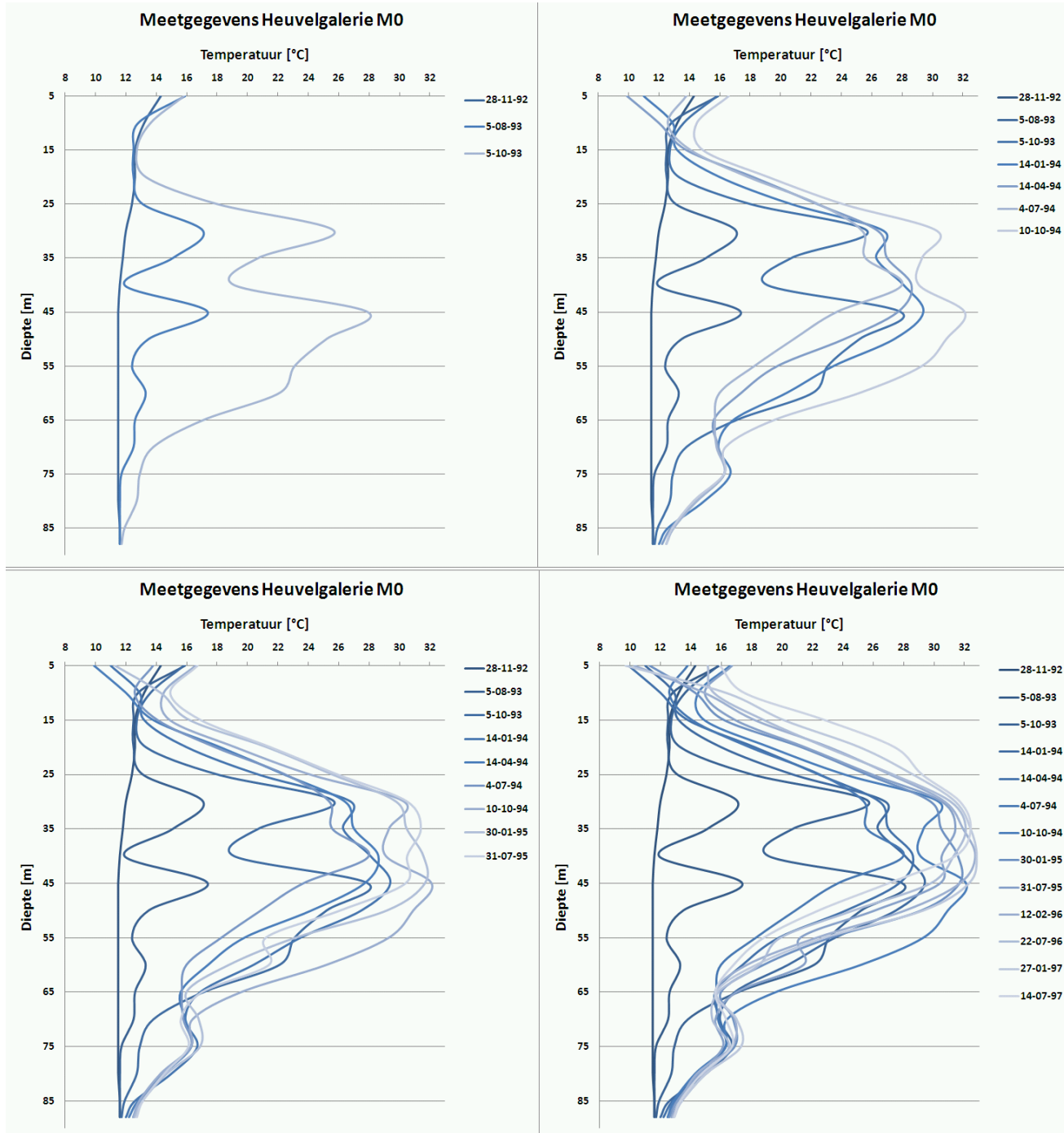
De gemeten temperaturen zijn weergegeven in Figuur 13.

De warme bron en M0 vertonen eind 1993/begin 1994 lagere temperaturen tussen 30 en 45 m-mv. Oorzaak hiervan is de onderbreking van de filterbuis in de warme bron van 35-40 m-mv in verband met de aanwezigheid van een kleilaag (ook nog te zien bij M0, maar niet bij de koude bron). In het 1^e kwartaal van 1994 is de bodemtemperatuur in M0 duidelijk hoger dan die in de warme bron (gemiddeld ongeveer 22 °C respectievelijk 15 °C); dit is mogelijk een gevolg van infiltratie van warm water met verschillende temperatuurniveaus in de zomerperiode.

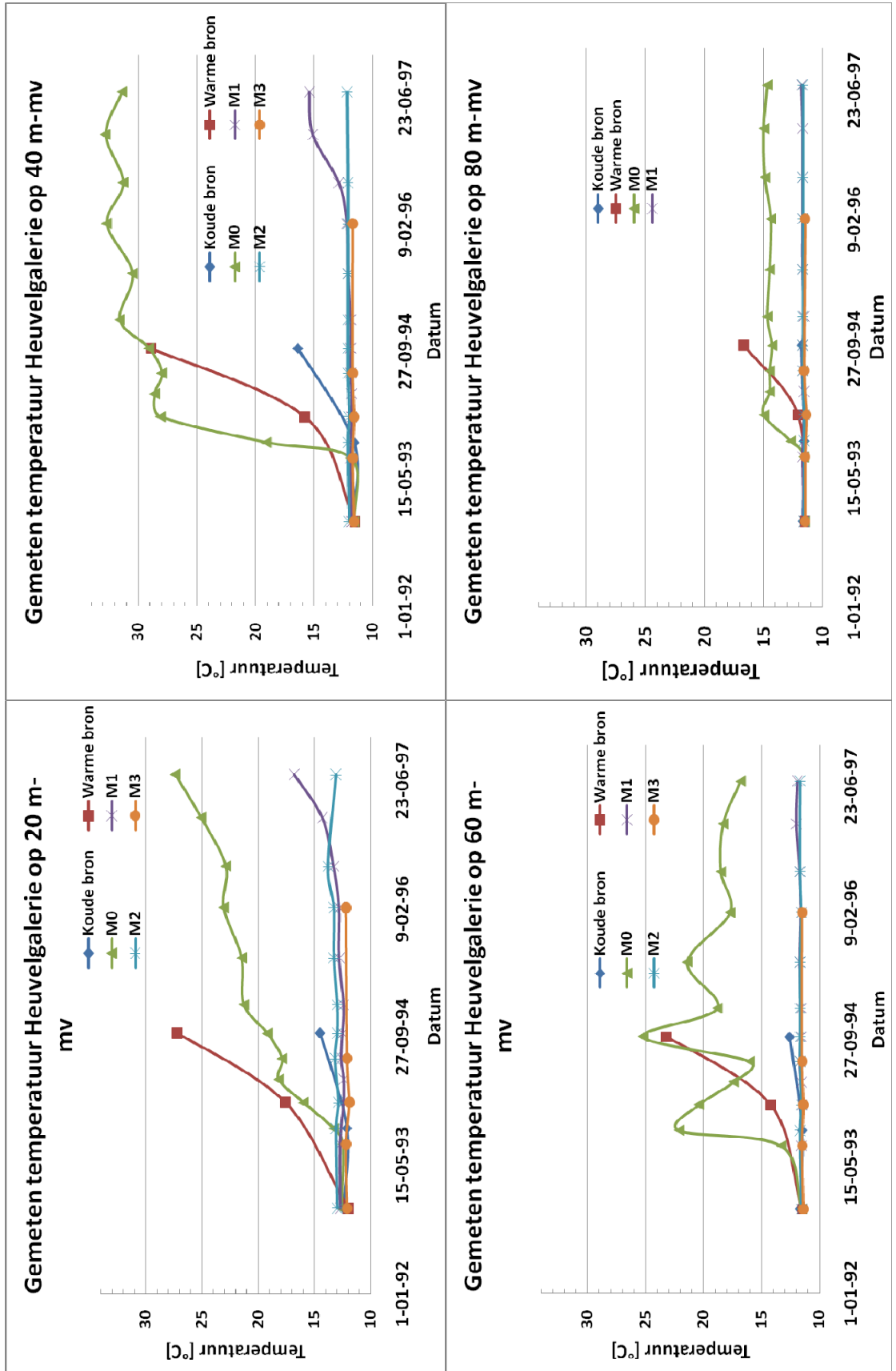
In het laatste kwartaal van 1994 vertoont zowel M0 als de warme bron hogere bodemtemperaturen dan in het 1^e kwartaal 1994. Dit is een logisch gevolg van het opslaan van warmte in de voorgaande zomerperiode.

In de koude bron is in oktober 1994 een relatief hoge temperatuur gemeten op 25-30 m-mv. Waarschijnlijk is de koude bron hier aan het einde van de zomer uitgeput geraakt en is een uitloper van de warme bron aangetrokken.

Daarnaast is in de grafieken van M0 en M1 te zien dat de warmte zich concentreert in het bovenste deel (bij M0 ondieper dan 65 m en bij M1 ondieper dan 55 m), wat kan worden verklaard door het optreden van vrije convectie als gevolg van de relatief hoge temperaturen in de opslag (door de lagere dichtheid van het warme water ten opzichte van het omringende grondwater stroomt het warme water naar het bovenste deel van het watervoerende pakket; voor meer informatie over vrije convectie wordt verwezen naar het rapport over hoge temperatuur warmteopslag).



Figuur 14. Meetgegevens Heuvelgalerie



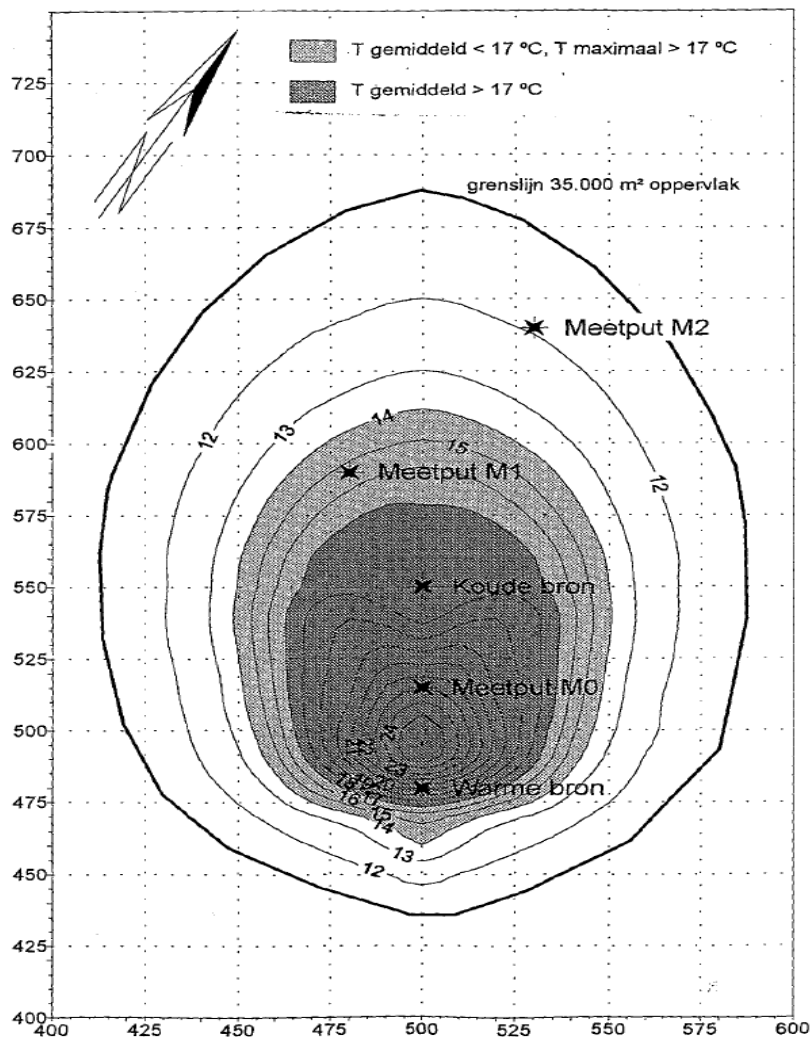
Figuur 15. Gemeten temperatuur Heuvलगалерии

De temperatuur in M0 loopt in de loop van de jaren geleidelijk op en lijkt in de laatste metingen te stabiliseren.

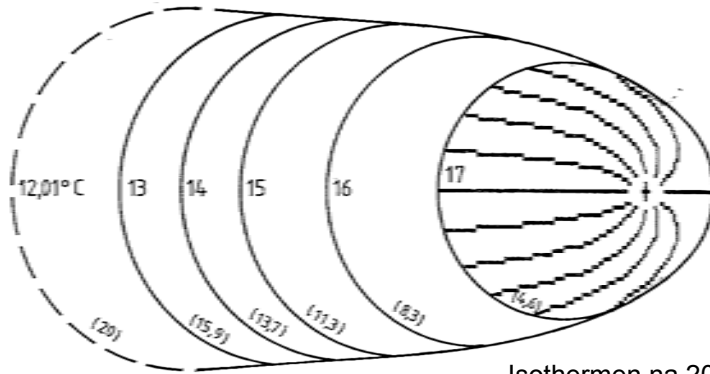
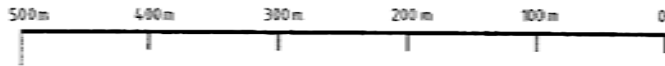
De verder weg gelegen meetputten M2 en M3 worden in de meetperiode niet/nauwelijks beïnvloed. In meetput M1 begint de temperatuur in de laatste metingen op te lopen in het meest ondiepe deel van het gebruikte watervoerende pakket.

In 1998 zijn de metingen in het kader van de vergunningvoorschriften geëvalueerd. Bij deze evaluatie is het oppervlak berekend waar een temperatuur hoger dan 17 °C heerst. De evaluatie zegt hierover:

“Het in de vergunning bedoelde oppervlak waarbinnen de gemiddelde opslagtemperatuur meer dan 17 °C bedraagt, is 6.500m², wat ca. 20% is van het maximaal toegestane oppervlak. Dit oppervlak ligt dus ruim binnen het maximaal toegestane oppervlakte van 35.000m²” (aangegeven met een dikke lijn, zie Figuur 16).



Figuur 16.



Isothermen na 20 jaar injectie van 237.000 m³/jaar water van 18 °C
 (11,3) = verblijftijd thermisch front is 11,3 jaar
 ----- = maximale uitbreiding warmte = verblijftijd thermisch front van 20 jaar

Figuur 17. Isothermen

De infiltratietemperatuur in de warme bron in 2007 is gemiddeld 31,5 °C en wijkt daarmee nauwelijks af van de gewenste temperatuur van 32,0 °C. Ondanks dat de infiltratietemperatuur volgens verwachting is, blijft de gemiddelde onttrekkingstemperatuur uit de warme bron (25,6 °C) achter bij de verwachte temperatuur (28,0 °C). Dit geeft echter geen belemmeringen voor de werking van het systeem.

De infiltratietemperatuur in de koude bron in 2007 is gemiddeld 20,2 °C en wijkt daarmee af van de gewenste temperatuur van 18 °C. De onttrekkingstemperatuur uit de koude bron (20,0°C) is hierdoor ook hoger dan de verwachte temperatuur (18,0°C). In 2008 geldt hiervoor hetzelfde.

Maximale temperaturen zijn over het algemeen niet overschreden en in de meetputten M1, M2, M3 is geen of weinig thermische invloed gemeten. Vergelijking van de gemeten met de berekende temperaturen (voor de situatie na twee jaar) toont aan dat de metingen vrij goed overeen komen met de berekeningen.

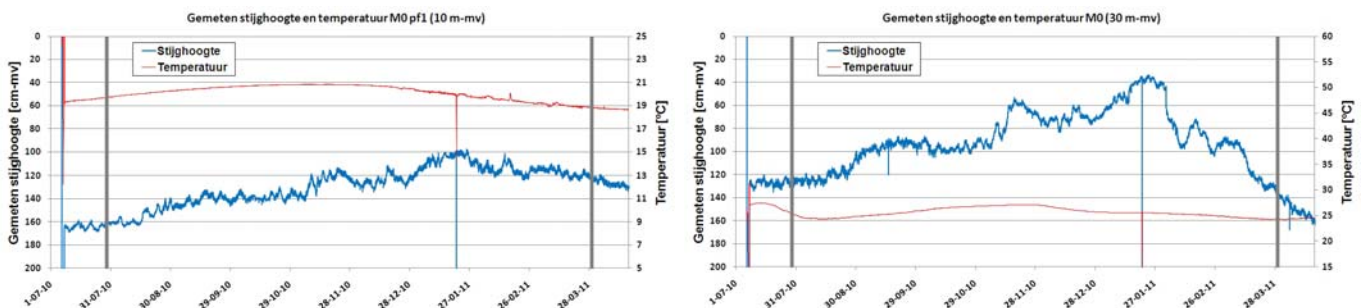
Stijghoogten

De resultaten van de stijghoogte- en temperatuurmetingen zijn weergegeven in onderstaande figuren. Uit de stijghoogtemetingen kan worden afgeleid dat de maximale stijghoogteverandering in de warme bron in de meetperiode ongeveer 80 cm is geweest (Figuur 18). De berekeningen in de effectenstudie gaven een maximale stijghoogteverandering van 1,09 m aan. De gemeten stijghoogteveranderingen vallen dus ruim binnen de voorspelde marge.

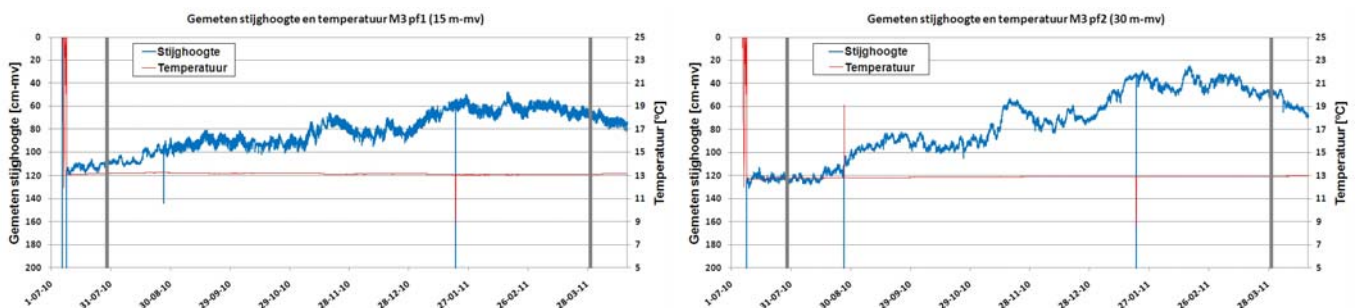
Figuur 20 toont het verloop van de stijghoogte op 30 m diepte. Opvallend is dat de stijghoogte in M3 en de rust-stijghoogte in de warme bron vrijwel exact synchroon lopen. Ook de stijghoogte in M0 loopt in eerste instantie synchroon, maar vertoont vanaf begin februari een dalende trend ten opzichte van de andere meetpunten. De verklaring hiervoor is niet bekend.

Doordat de metingen op 30 m in de warme bron en meetput M3 synchroon lopen, kunnen de lijnen “over elkaar heen gelegd” worden (M3 gecorrigeerd in Figuur 21). Door vervolgens in te zoomen op een periode met veel pieken in het debiet (Figuur 22) kan worden afgeleid wat de maximale invloed van de WKO is ter hoogte van M3: dit blijkt ongeveer 7 cm te zijn. Op basis van de effectenstudie zou in deze meetput maximaal 5 à 10 cm stijghoogteveranderingen kunnen optreden. De maximale stijghoogteverandering die uit de metingen naar voren komt, komt dus goed overeen met de destijds voorspelde maximale stijghoogteverandering. Dit betekent dat ook het destijds berekende hydrologisch invloedsgebied goed overeen komt met de werkelijkheid (werkelijke invloedsgebied is waarschijnlijk een fractie kleiner).

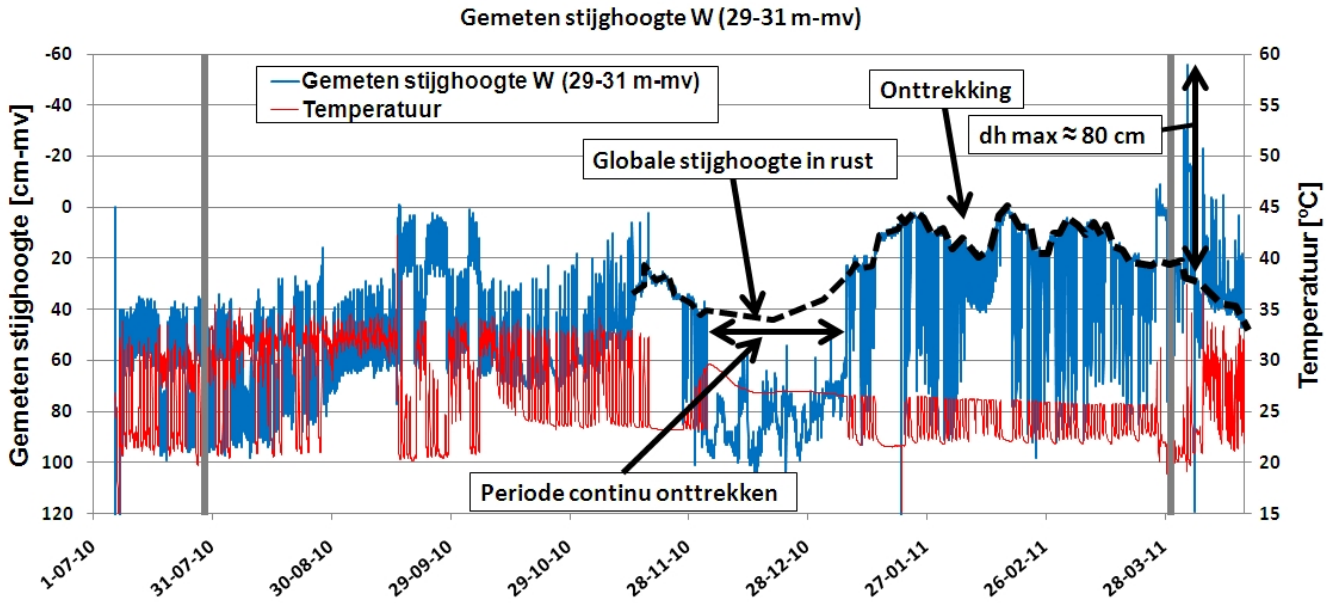
Er is geen verband gevonden tussen de fluctuaties in de deklaag en de stijghoogteveranderingen in de warme bron. De waargenomen fluctuaties in de deklaag zijn dus grotendeels door andere factoren veroorzaakt, zoals neerslag/verdamping en andere grondwateronttrekkingen in de omgeving.



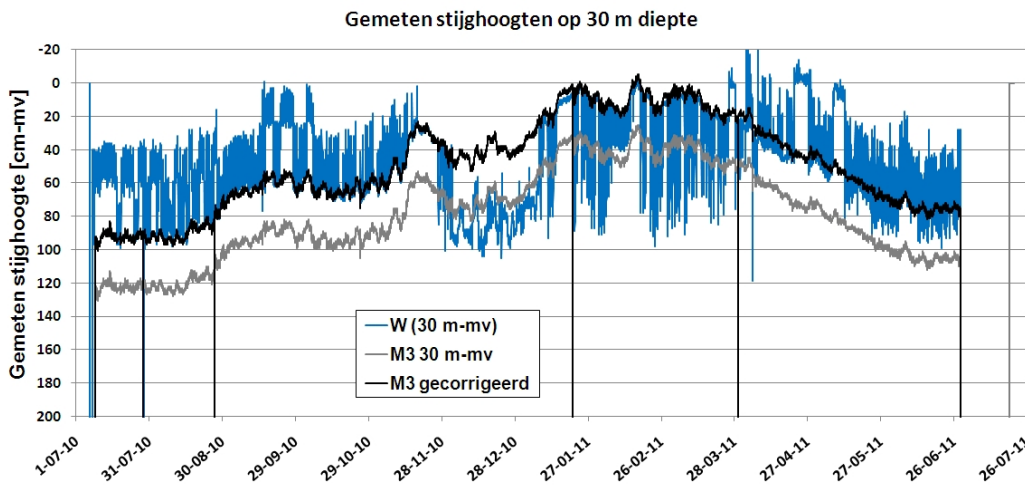
Figuur 18. Gemeten stijghoogte en temperatuur in meetput M0 op 10 m-mv (links) en 30 m-mv (rechts). De verticale grijze lijnen geven de datum van de bemonsteringen aan die in het kader van MMB zijn uitgevoerd.



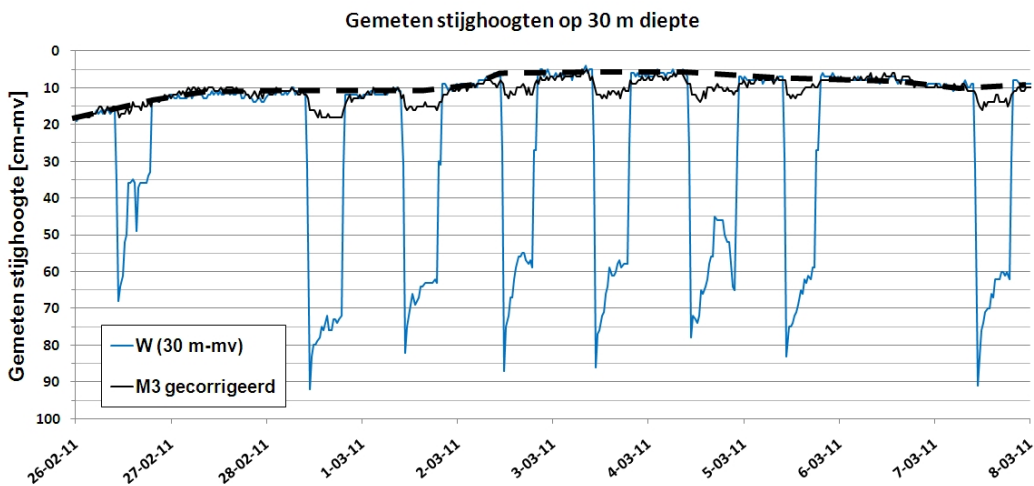
Figuur 19. Gemeten stijghoogte en temperatuur in meetput M3 op 15 m-mv (links) en 30 m-mv (rechts). De verticale grijze lijnen geven de datum van de bemonsteringen aan die in het kader van MMB zijn uitgevoerd.



Figuur 20. Gemeten stijghoogte (links) en temperatuur (rechts) in de warme bron in het filter op 29-30 m-mv



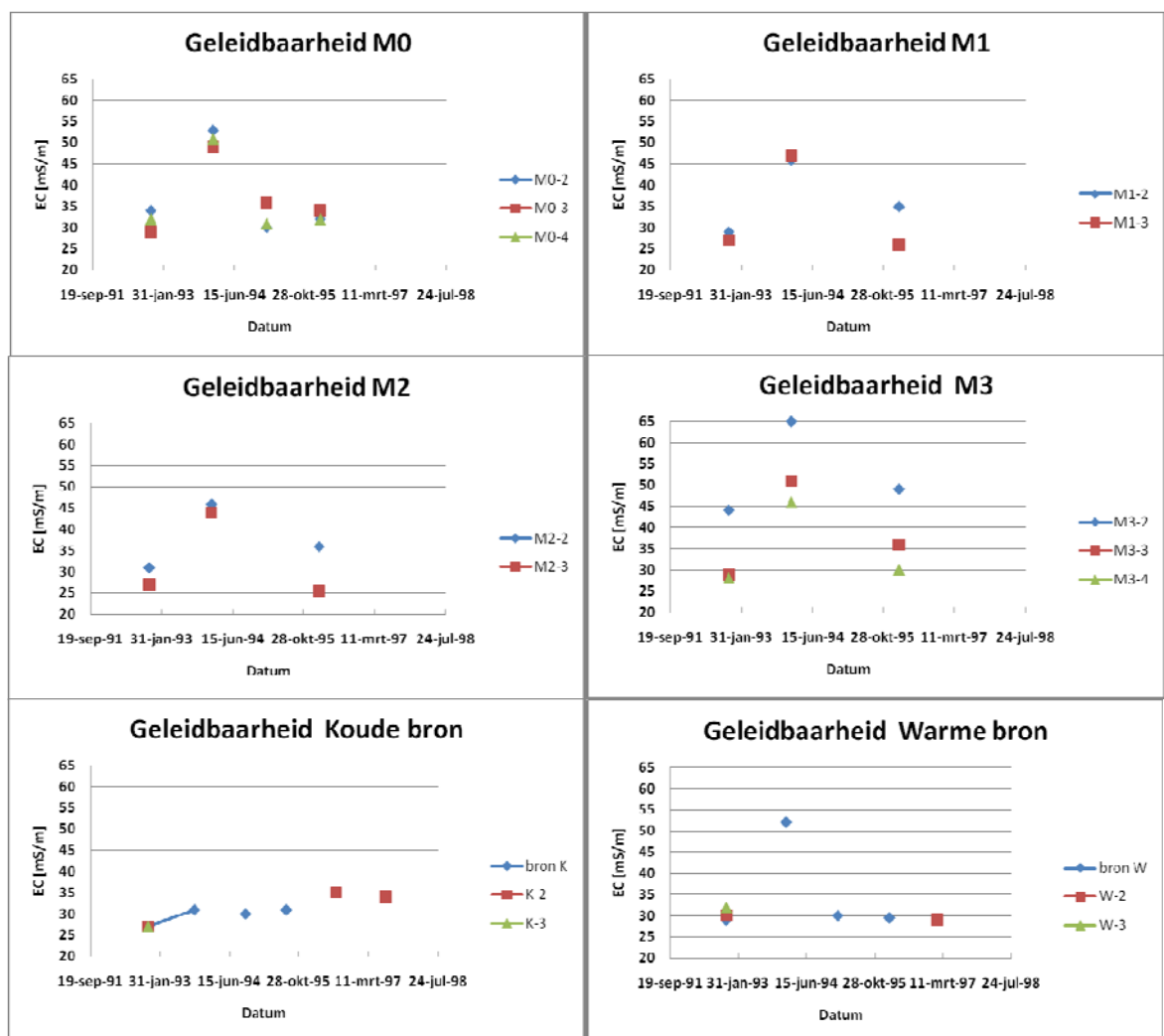
Figuur 21. Afleiden van de effecten in het filter van M3 op 30 m-mv door de metingen in de warme bron en die in M3 “over elkaar heen te leggen”.



Figuur 22. Ingezoomd op eind februari/begin maart.

Gegevens over de geleidbaarheid zijn van de periode van 1992 tot 1997 bekend. De geleidbaarheid die op 17 januari 1997 is gemeten, wijkt voor alle metingen sterk af van de metingen daarvoor en daarna. De verklaring hiervoor is niet bekend. De overige metingen geven een redelijk consistent beeld: er is bij M1, M2 en M3 een afname van de geleidbaarheid met de diepte. De geleidbaarheid is in de meetputten en in bron K en W vrijwel constant in de tijd. Bij M0 is geen gradiënt van de geleidbaarheid met de diepte zichtbaar, waarschijnlijk doordat over het gehele dieptetraject hetzelfde infiltratiewater aanwezig is.

In meetput M3 is duidelijk sprake van verschillende geleidbaarheid in de diepte, wat aangeeft dat hier (minimaal deels) nog het oorspronkelijke grondwater aanwezig is. Op basis van deze gegevens is deze meetput daarom een goede referentie.



Figuur 23. Geleidbaarheid (EC)

Onderstaande tabel toont de resultaten van de veldmetingen uit de eerste meetronde.

Tabel 5. Recente Veldmetingen

metingen uitgevoerd in (filterdiepte)	Bron-K (29-30 m-mv)		Bron-W (29-30 m-mv)		M-0 (28,5-30,5 m-mv)		M-1 (29-31 m-mv)		M-3 (29-31 m-mv)	
datum	28-7-2010		28-7-2010		28-7-2010		28-7-2010		28-7-2010	
filterdiepte	29-30	m	29-30	m	28,5-30,5	m	29-31	m	29-31	m
g.w.s bovenkantpb	0,53	m	0	m	0,93	m	0,95	m	0,82	m
geleidbaarheid	308	μS/cm	302	μS/cm	412	μS/cm	302	μS/cm	384	μS/cm
pH	7,36	pH	7,26	pH	6,72	pH	7,11	pH	7,21	pH
redoxpotentiaal	-132	mV	-166	mV	-132	mV	-175	mV	-128	mV
temperatuur	20	°C	27,5	°C	23,7	°C	21,4	°C	14,2	°C
zuurstof	0,17	mg/L	0,1	mg/L	0,07	mg/L	0,06	mg/L	0,06	mg/L

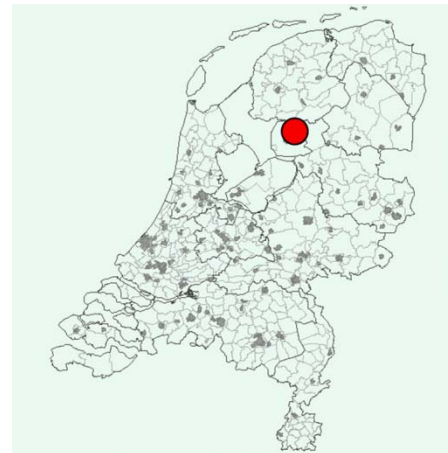
De gemeten geleidbaarheid ligt voor alle meetpunten globaal tussen 300 en 400 μS/cm, wat overeen komt met de metingen uit het verleden. Alleen in meetput M3 is de geleidbaarheid ten opzichte van de historische metingen gedaald (van ongeveer 500 μS/cm [=50 mS/m] naar 384 μS/cm). De reden hiervan is niet bekend. Wel lijkt de in het verleden gemeten geleidbaarheid hoog ten opzichte van de andere metingen.

1.3 Locatie Hederakwekerij, Luttelgeest

1.3.1 Achtergrond

Type systeem: recirculatiesysteem

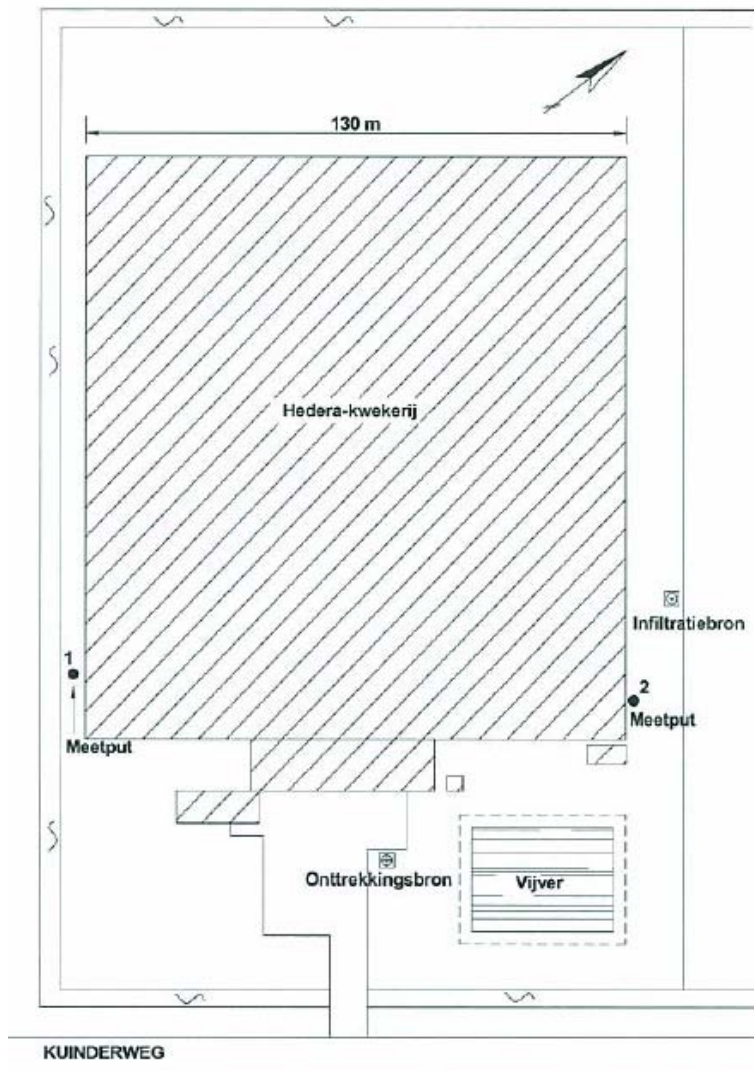
Recirculatiesysteem dat al sinds 1994 in bedrijf is. Bij het systeem zijn twee meetputten aanwezig, één tussen de onttrekkingsbron en de infiltratiebron en één op ongeveer 90 m van de onttrekkingsbron. Zowel in de bronnen als in de meetputten zijn vanaf de inbedrijfname meerdere keren per jaar bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd. In de eerste 5 jaar was sprake van een proefvergunning en is uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de chemie van het grondwater.



Tabel 6. Locatiegegevens Hederakwekerij

Provincie:	Flevoland
In bedrijf sinds:	Aangelegd in: sept. '93, operationeel: '94
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	Ja
Soort systeem:	Koudeopslag, recirculatie
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	Max. 24 °C
Redoxtoestand:	
Interactie met ander systeem:	nee
Bemonsterde meetputten:	M1, M2

1.3.2 Locatiekaart Hederakwekerij Luttelgeest



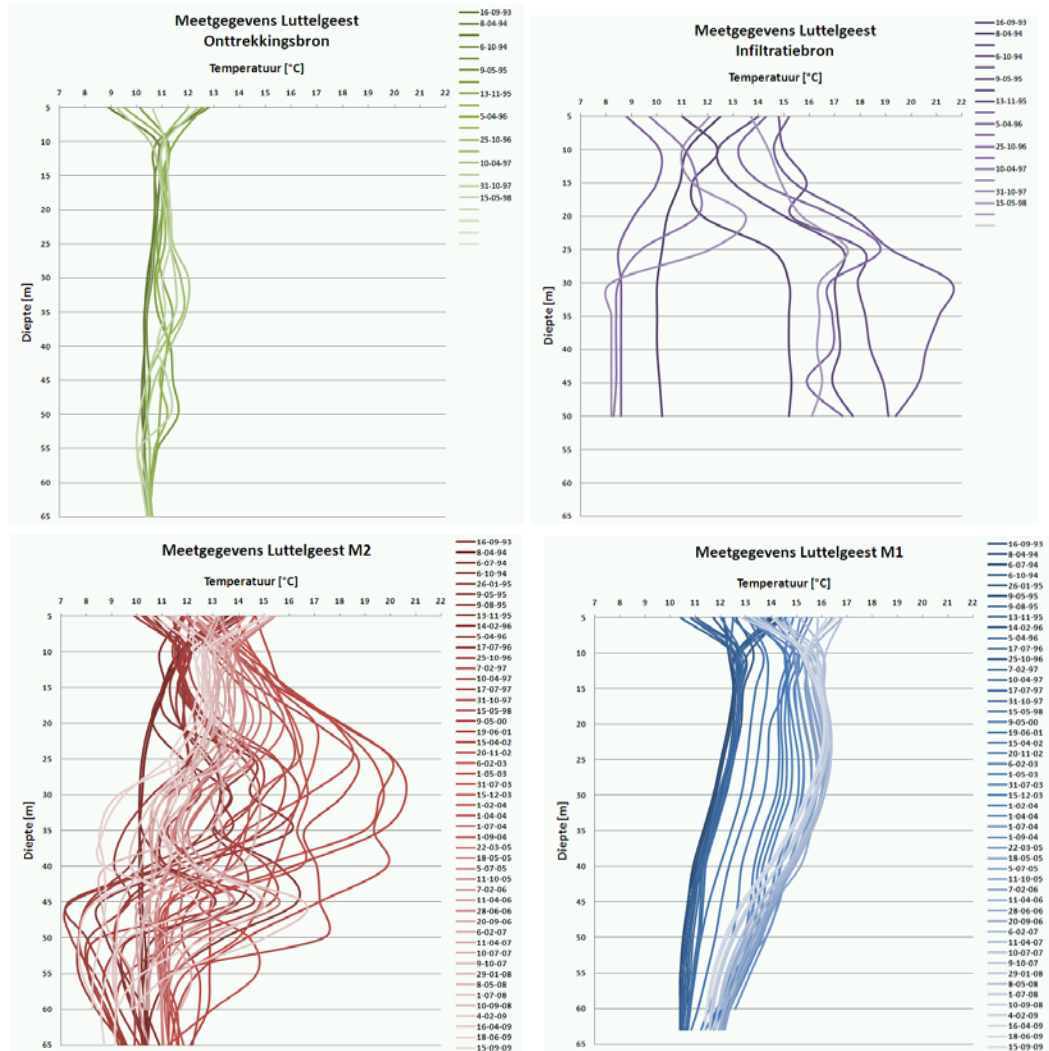
Figuur 24. Overzicht meetpunten Luttelgeest

Tabel 7. Overzicht filterdieptes

Naam	diepte (m-mv)
Onttrekkingsbron filter	25 – 44,5 en 47 - 65
PF1	39 – 40
PF2	9 – 10
Infiltratiebron	26 – 65
PF1	32 – 33
PF2	9 – 10
M1	PF1: 39 – 40, PF2: 9 – 10
M2	PF1: 39 – 40, PF2: 9 – 10

1.3.3 Fysische gegevens

Bodemtemperatuur

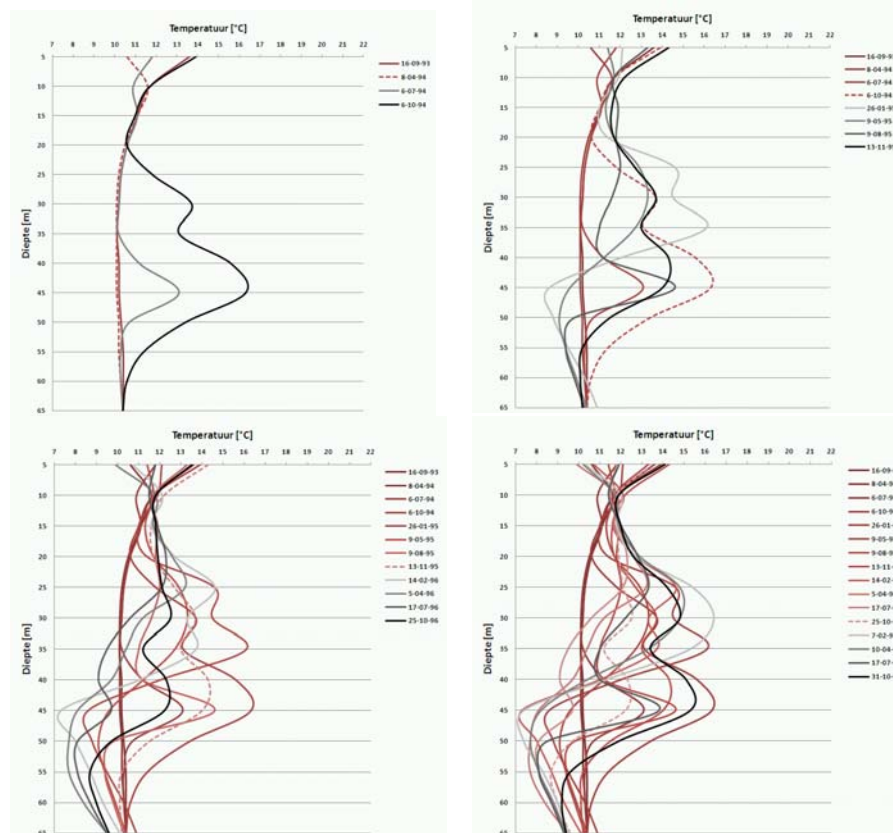


Figuur 25. Gemeten bodemtemperaturen in de bronnen (1993-1998) en de meetputten (1993-2009)

Bij dit project wordt elk kwartaal een bodemtemperatuurprofiel gemeten in de diepste peilfilters van de meetputten. In de eerste 5 jaar zijn ook metingen verricht in de onttrekkingsbron en de infiltratiebron. Op basis van deze metingen zijn grafieken gemaakt om inzicht te geven in de ontwikkeling van de bodemtemperaturen in de loop van de tijd.

De bovenstaande grafieken tonen een overzicht van alle meetgegevens per meetpunt. In elke grafiek zijn de donkerste lijnen het eerst gemeten en de lichte lijnen het laatst. In de grafieken vallen een aantal zaken op:

- In de onttrekkingsbron blijft de temperatuur in de meetperiode (1993-1998) relatief constant. Wel is te zien dat de temperatuur ten opzichte van de eerste metingen tot maximaal 2 °C hoger is (vooral op 30-35 m-mv). Verder is de seizoensfluctuatie van de temperatuur van het ondiepe grondwater goed te zien in de metingen op 5 m diepte. Dieper dan 10 à 15 m is deze seizoensfluctuatie verdwenen, wat op basis van de literatuurstudie ook werd verwacht;
- in de infiltratiebron liggen de meeste temperatuurprofielen ruim boven de natuurlijke grondwatertemperatuur (tot 22 °C) en een aantal lijnen iets onder de natuurlijke grondwatertemperatuur (tot 8 °C);
- meetput M2 vertoont een grote variatie in temperaturen. In de bovenste 40 m is vrijwel overal sprake van duidelijke opwarming. Van afkoeling tot onder de natuurlijke grondwatertemperatuur is vooral sprake op grotere diepte (45-65 m-mv). Verder is te zien dat de laatste jaren de temperaturen aan het dalen zijn;
- in meetput M1 verandert in de eerste jaren vrijwel niets. Vervolgens loopt de temperatuur op met maximaal 4,5 °C en de laatste jaren lijkt weer sprake te zijn van afkoeling (vooral onderin). De opwarming is het sterkst in het bovenste deel van de bodem.

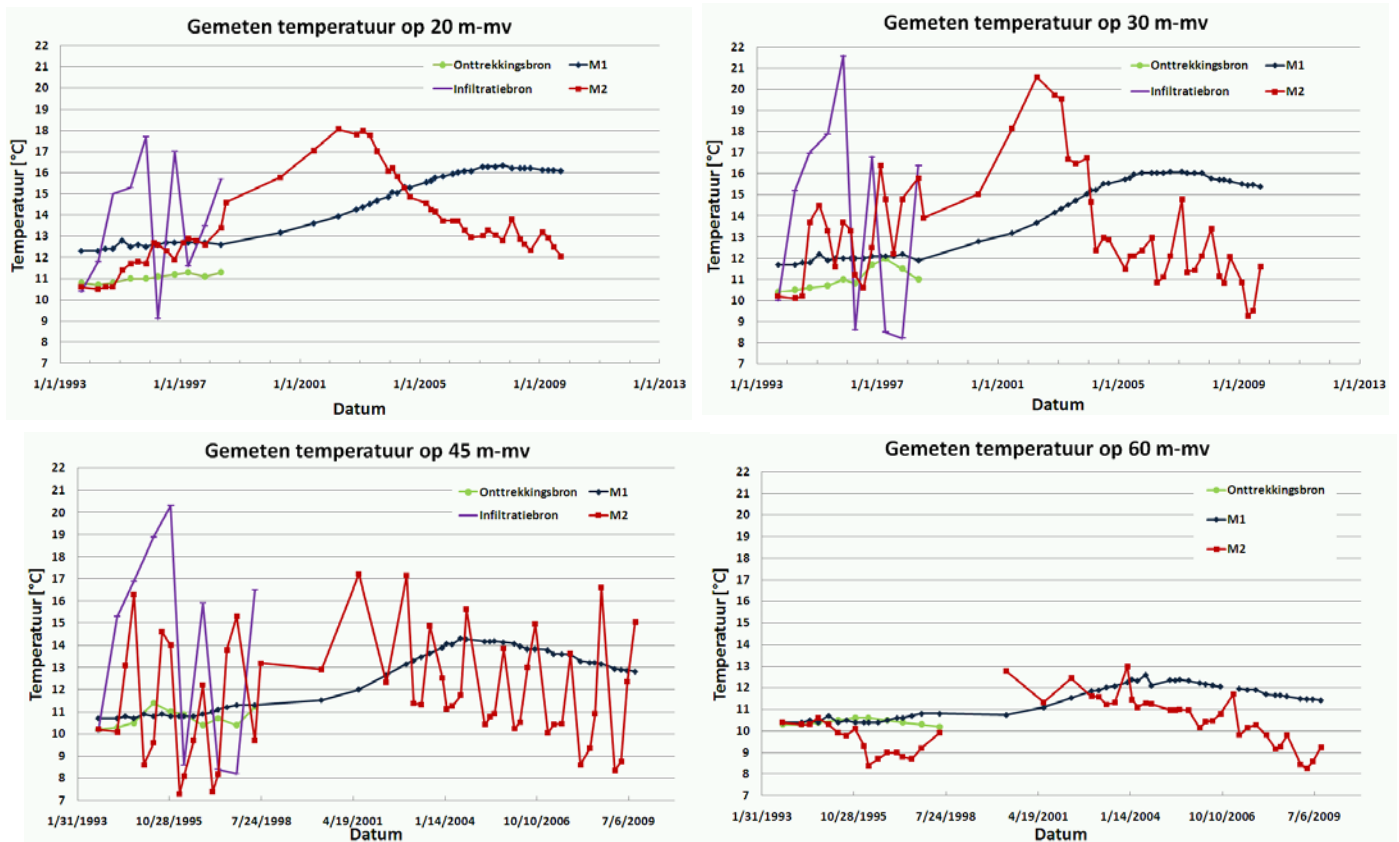


Figuur 26. Overzicht van alle gemeten temperatuurprofielen in 1993-1994 (linksboven) met de toevoegingen in 1995 (rechtsboven), 1996 (linksonder) en 1997 (rechtsonder). De gearceerde lijn toont steeds de laatste lijn uit de voorgaande grafiek. Verder is de lichtgrijze meting de eerste nieuwe meting en de zwarte lijn de laatste nieuwe meting in de grafiek

Om de gegevens van meetput M2 beter te kunnen interpreteren zijn voor de eerste jaren een aantal grafieken gemaakt, waarbij steeds een aantal lijnen is toegevoegd.

In de eerste grafiek is goed te zien dat rond 45 m diepte de eerste reactie in de temperatuur te zien is. Blijkbaar is hier sprake van een zone met een hogere doorlatendheid, waardoor het infiltratiewater hier eerder aankomt dan op andere diepten. Ook op ongeveer 30 m-mv is een wat beter doorlatende zone aanwezig. De overige grafieken laten zien dat ook boven het filtertraject (ondieper dan 26 m-mv sprake is van opwarming) en dat afkoeling zich dieper dan 40 m-mv concentreert.

Tenslotte zijn grafieken gemaakt van het temperatuurverloop in de tijd op een aantal dieptes.



Figuur 27. Overzicht van de meetresultaten van de nu beschikbare divermetingen.

Opvallende zaken in deze grafieken zijn:

- In M2 is een duidelijke temperatuurstijging te zien in de periode t/m 2002, waarna de temperatuur weer daalt. Op 20 m is de temperatuur in de laatste metingen nog hoger dan de oorspronkelijke temperatuur. Op 60 m-mv is de temperatuur gedaald tot onder de oorspronkelijke temperatuur.
- Ook in M1 is sprake van een temperatuurstijging. De temperatuurtrend in M1 is vertraagd ten opzichte van M2 en de temperatuurstijging is kleiner;
- De temperatuurfuctuaties in M2 zijn op 45 m-mv ongeveer $\frac{3}{4}$ van de fluctuatie in de infiltratiebron. Op 30 m-mv is dat ongeveer de helft. Op de andere dieptes is het inputsignaal sterk gedempt. Dit is te verklaren uit de stroomsnelheid, die op 45 m het hoogst is en ook op 30 m relatief hoog (snelle reactie: minder tijd voor uitdemping);

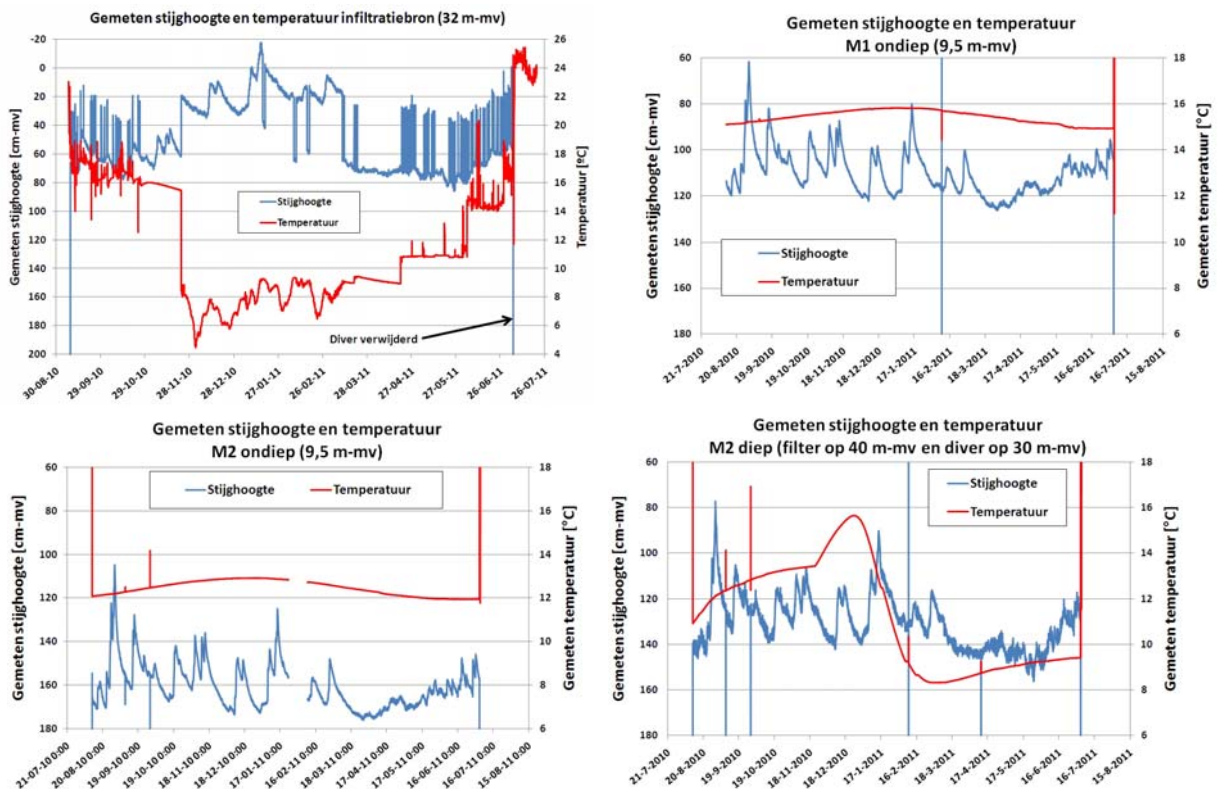
Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat in de periode t/m 2002 sprake was van een energetische onbalans, waarbij (veel) meer warmte in de bodem werd gebracht dan koude. Om de energiebalans in de bodem te herstellen zijn maatregelen genomen, waardoor het warmteoverschot in de bodem in de periode na 2002 grotendeels is weggevoerd door meer koude dan warmte in de ondergrond te brengen (Bron: IF Technology, 2004, meetrapportage 2003 en evaluatie januari 2003 - december 2003).

Uit de metingen kan worden afgeleid dat het warme water (relatief groot temperatuurverschil met oorspronkelijke temperatuur) onder invloed van de lagere dichtheid omhoog beweegt. Het koude water doet dat niet (klein temperatuurverschil met oorspronkelijke temperatuur). Dit resulteert in meetput M2 in een concentratie van relatief warm water in de bovenste 40 à 50 m en een concentratie van relatief koud water dieper dan 40 m. Op 60 m diepte is de opwarming veel minder geweest en is de temperatuur nu zelfs lager dan de oorspronkelijke temperatuur.

Verder valt op dat ook in meetput M1 sprake is geweest van temperatuurveranderingen, terwijl dit normaalgesproken niet verwacht werd. De oorzaak is hier het structurele warmteoverschot in de eerste 10 jaar. Als sprake zou zijn geweest van een energiebalans zou de temperatuur in M1 vermoedelijk niet/nauwelijks zijn veranderd.

Stijghoogten

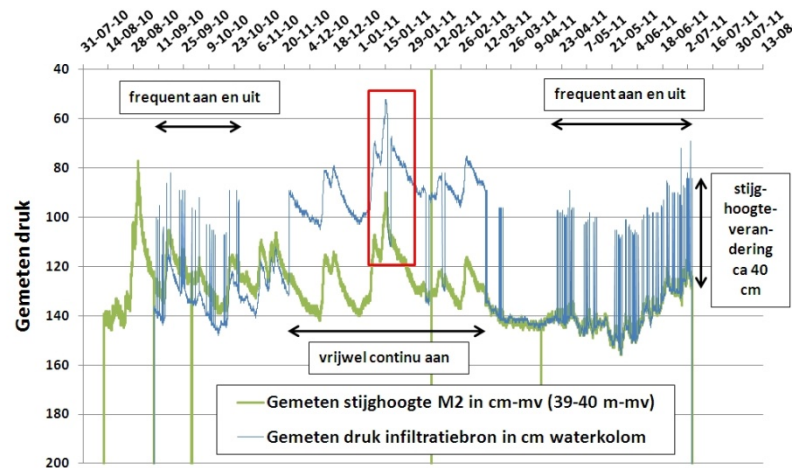
In de peilbuizen van de meetputten zijn divers aangebracht om de stijghoogte, temperatuur en de geleidbaarheid te meten. Onderstaande grafieken tonen de resultaten van de nu beschikbare metingen.



Figuur 28. Overzicht van de meetresultaten van de nu beschikbare divermetingen.

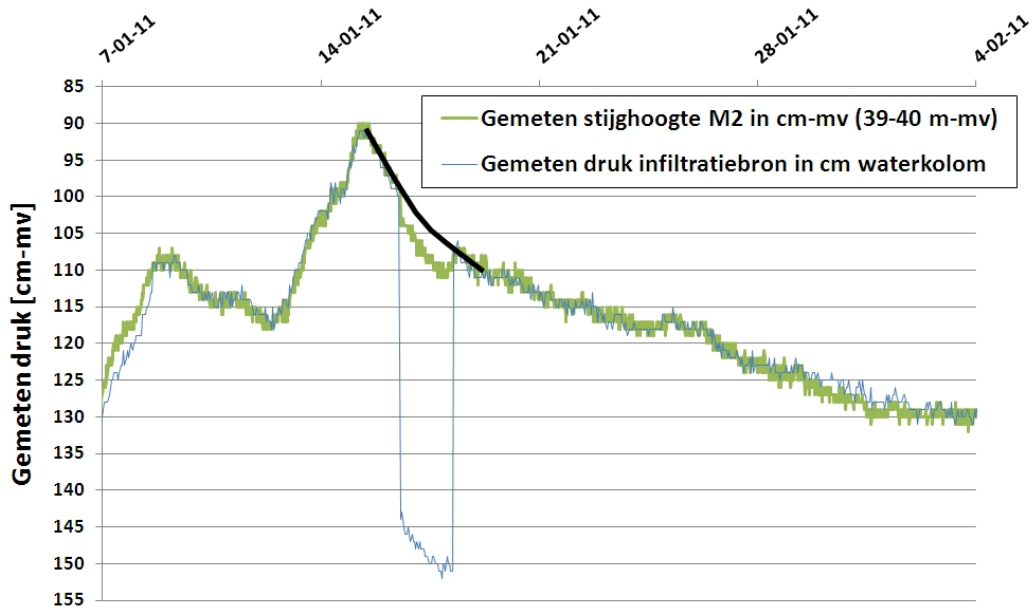
Opvallend is dat het stijghoogteverloop in alle van de meetputten buizen vrijwel exact gelijk is. De verwachting was dat het stijghoogteverloop in meetput 2 (bij de infiltratiebron) een tegengesteld beeld zouden laten zien ten opzichte van dat in meetput 1 (dichtst bij de onttrekkingsbron). De enige mogelijke verklaring voor de sterke overeenkomst in het stijghoogteverloop is dat de fluctuatie het gevolg is van andere factoren dan de WKO en dus mag worden beschouwd als achtergrondfluctuatie.

Deze interpretatie wordt bevestigd door de effecten die vooraf zijn berekend: de te verwachten effecten zijn namelijk klein. De maximale stijghoogteveranderingen die zijn berekend treden op in de bronnen en zijn 40 cm. De bronnen zijn in werkelijkheid dichter bij elkaar geplaatst dan in de effectenstudie, waardoor een nieuwe berekening kleinere stijghoogteveranderingen zal opleveren. De metingen in de infiltratiebron geven aan dat de maximale stijghoogteveranderingen in de infiltratiebron 40 cm bedraagt, zoals in de effectenstudie is aangegeven (zie onderstaande Figuur 29, effect duidelijk zichtbaar in rode kader).



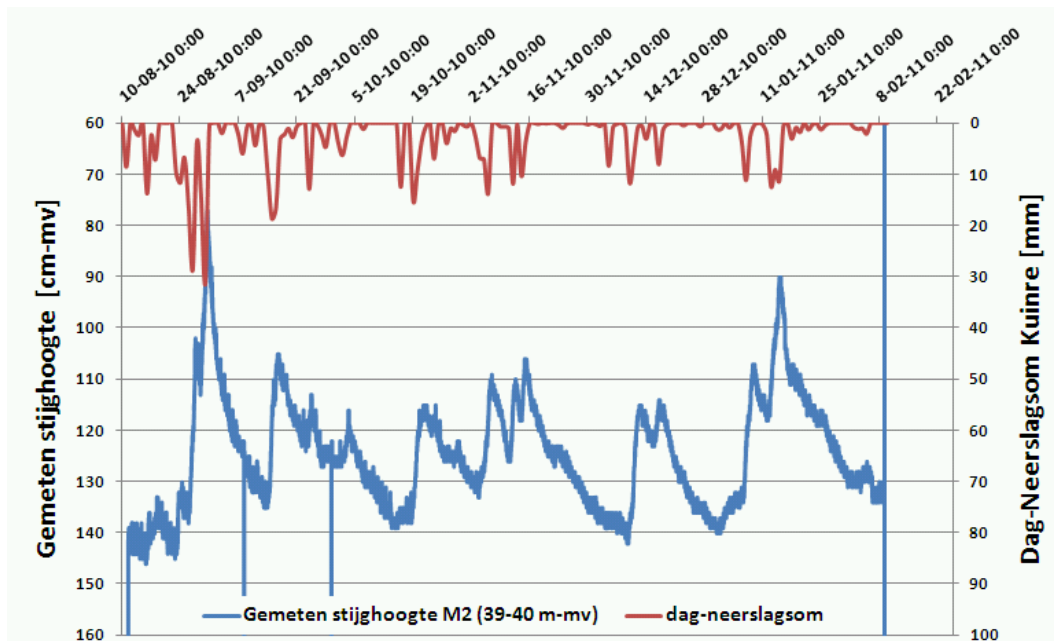
Figuur 29. Vergelijking van de metingen in de infiltratiebron (blauwe lijn) en het diepe filter van M2 (groene lijn) geeft aan dat de stijghoogte in de infiltratiebron in rust vrijwel exact hetzelfde verloop vertoont als de stijghoogte in het diepe filter van M2. Als de infiltratiebron aan staat is de stijghoogte ongeveer 40 cm verhoogd.

Door de voorspelde effecten te corrigeren voor de kortere afstand tussen de bronnen, zijn de te verwachten maximale stijghoogteveranderingen in de meetputten ingeschat. In het diepe peilfilter van M2 is dat ongeveer 8 cm en op dezelfde diepte in M1 is dat 1 à 2 cm. Dit verklaart waarom er niet of nauwelijks een effect van de WKO te zien is in de gemeten stijghoogten. Het effect in het diepe peilfilter van M2 is bepaald door de metingen in de periode binnen het rode kader uit bovenstaande grafiek nader te analyseren. Hieronder een uitvergroting van het gebied, waaruit een maximale stijghoogteverandering van 5 cm volgt (iets minder dan verwacht). Dit effect is ook te zien in de korte termijn fluctuaties die te zien zijn op de lijn van het diepe filter van M2: de lijn is “dikker” dan de lijn van het ondiepe filter.



Figuur 31. Uitvergroting van het gebied in het rode kader uit het voorgaande figuur. Door de gemeten stijghoogten in de infiltratiebron en in het diepe filter van M2 “over elkaar heen te leggen” wordt duidelijk wat het effect van het WKO-systeem is in het diepe filter van M2.

Tenslotte is nog gezocht naar een verklaring voor het verloop van de achtergrondstijghoogte. De meest voor de hand liggende verklaring zou de neerslag zijn. Onderstaande grafiek toont het stijghoogteverloop in het diepe filter van M2 en de dagelijkse neerslagsom in Kuinre, een meteo-station op ca. 3 km afstand (bron gegevens over de neerslag: KNMI). Uit de grafiek blijkt dat de pieken in het stijghoogteverloop samen vallen met pieken in de neerslag. Zo kan de piek in de stijghoogte van eind augustus/begin september worden verklaard uit de overvloedige neerslag in deze periode. Van 23 augustus t/m 30 augustus 2010 is in Kuinre in totaal 123 mm neerslag gevallen, waaronder één dag met 29 mm (27 augustus 2010) en één dag 31 mm neerslag (30 augustus 2010).



Figuur 30. Stijghoogte in het diepe filter van meetput M2 en de dag-neerslagsom gemeten op neerslag-station Kuinre op 3 km afstand van de locatie (Bron neerslag-gegevens: KNMI).

Geleidbaarheid (EC)

Het uitlezen van de EC-divers is niet gelukt, waardoor alleen de data van de eerste maand beschikbaar is. Dit is nog te weinig om hieraan conclusies te kunnen verbinden.

1.4 Locatie Mariaoord, Rosmalen

1.4.1 Achtergrond

Type systeem: monobron

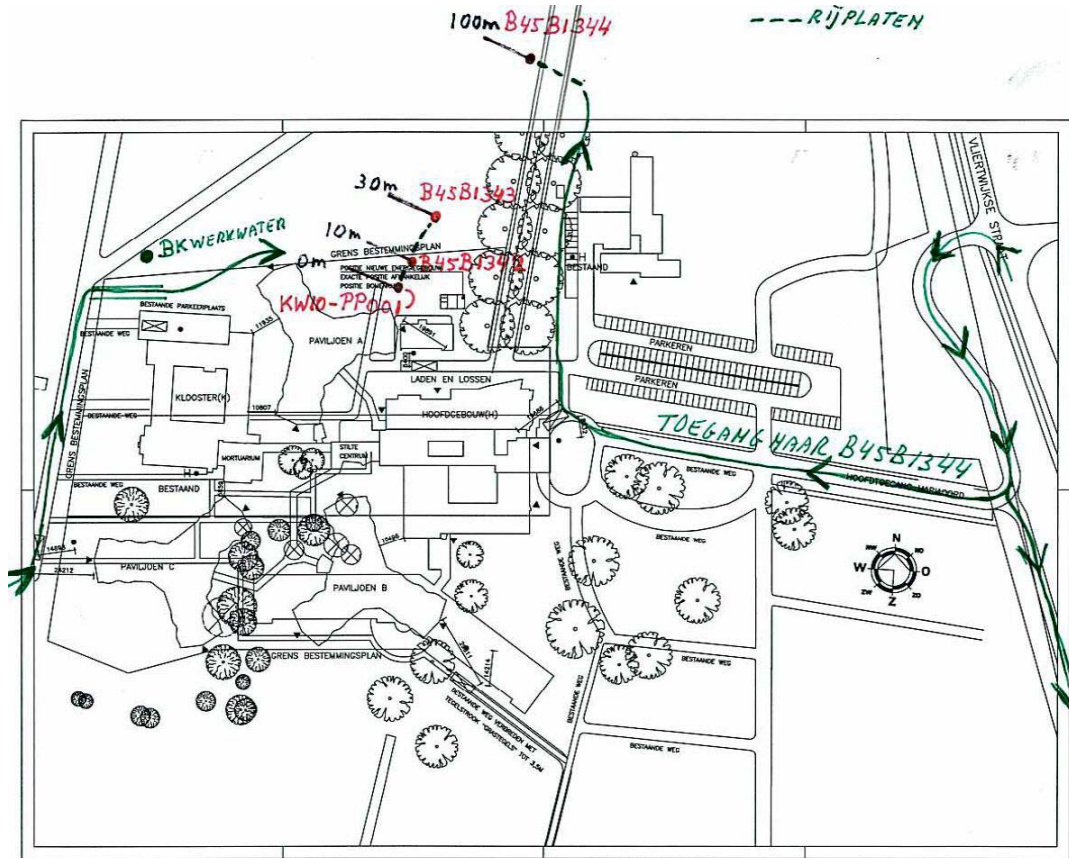
Monobron in de 100-jaars intrekzone van de drinkwaterwinning Nuland van Brabant Water. Bij het systeem zijn 3 meetputten aangelegd op 10, 30 en 100 meter van de monobron. Het systeem is gerealiseerd in 2007. In verband met de ligging nabij de drinkwaterwinning is een uitgebreid pakket aan chemische parameters gemeten.



Tabel 8. Locatiegegevens Mariaoord

Provincie:	Noord-Brabant
In bedrijf sinds:	realisatie in 2007
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	monobron
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	temperatuur
Redoxtoestand:	anoxisch
Interactie met ander systeem:	nee, maar wel nabij drinkwaterwinning Nuland
Bemonsterde meetputten:	PP2 (32 en 80 m-mv), PP4 (32 en 80 m-mv)

1.4.2 Locatiekaart Mariaoord, Rosmalen

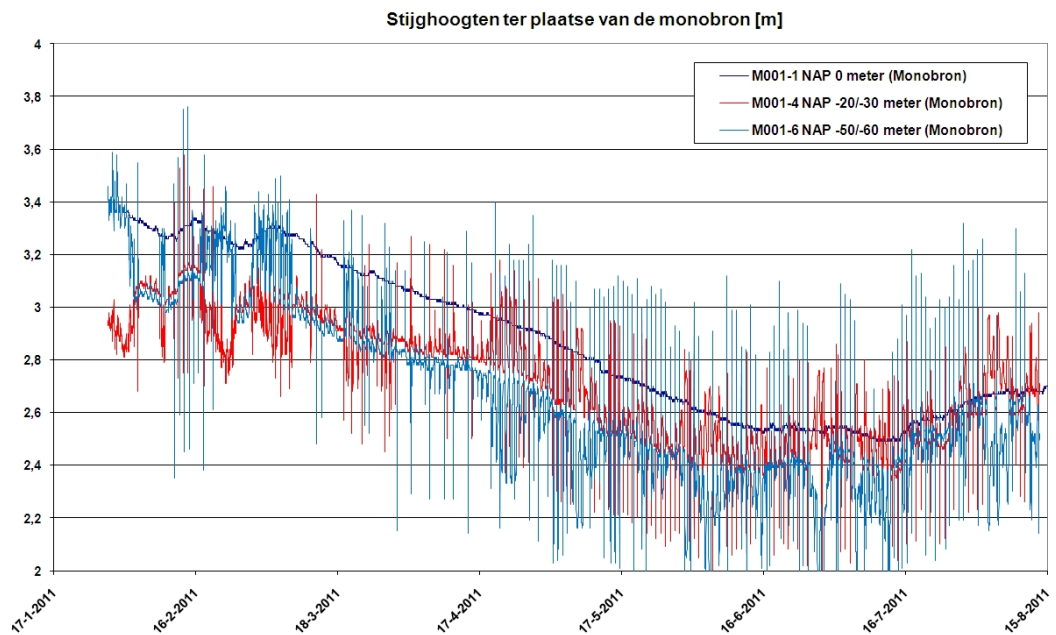


Figuur 32. positie van de monsterpunten in Rosmalen.

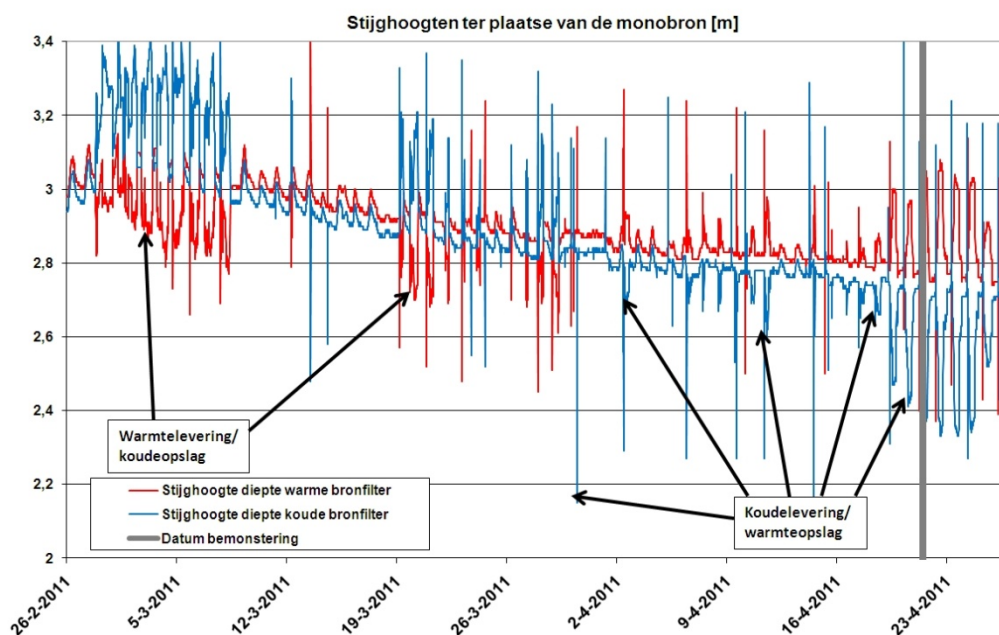


1.4.3 Fysische gegevens

Op de locatie zijn stijghoogte- en temperatuurmetingen uitgevoerd met divers. Alleen de gegevens vanaf eind januari 2011 zijn beschikbaar. Ter plaatse van de monobron is duidelijk het effect van de monobron te zien: de korte termijn stijghoogtefluctuaties ter hoogte van het warme bronfilter (NAP -20 tot -30 m) zijn tegengesteld aan die op de diepte van het koude filter (NAP -50 tot -60 m). De metingen op NAP 0 m laten geen duidelijk effect van de WKO zien, wat betekent dat de effecten op de grondwaterstand klein zijn.



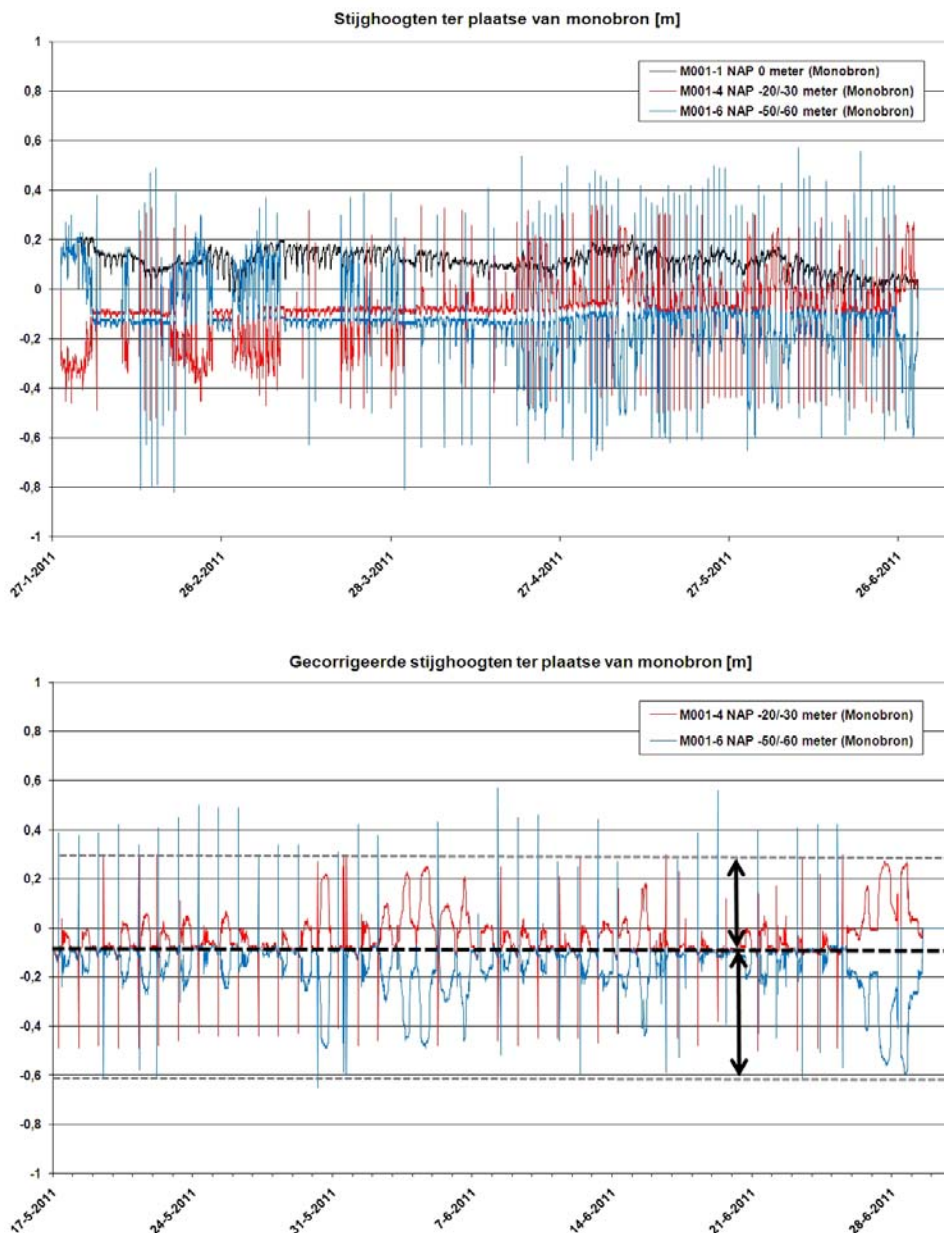
Figuur 33. Gemeten stijghoogtefluctuatie ter plaatse van de monobron.



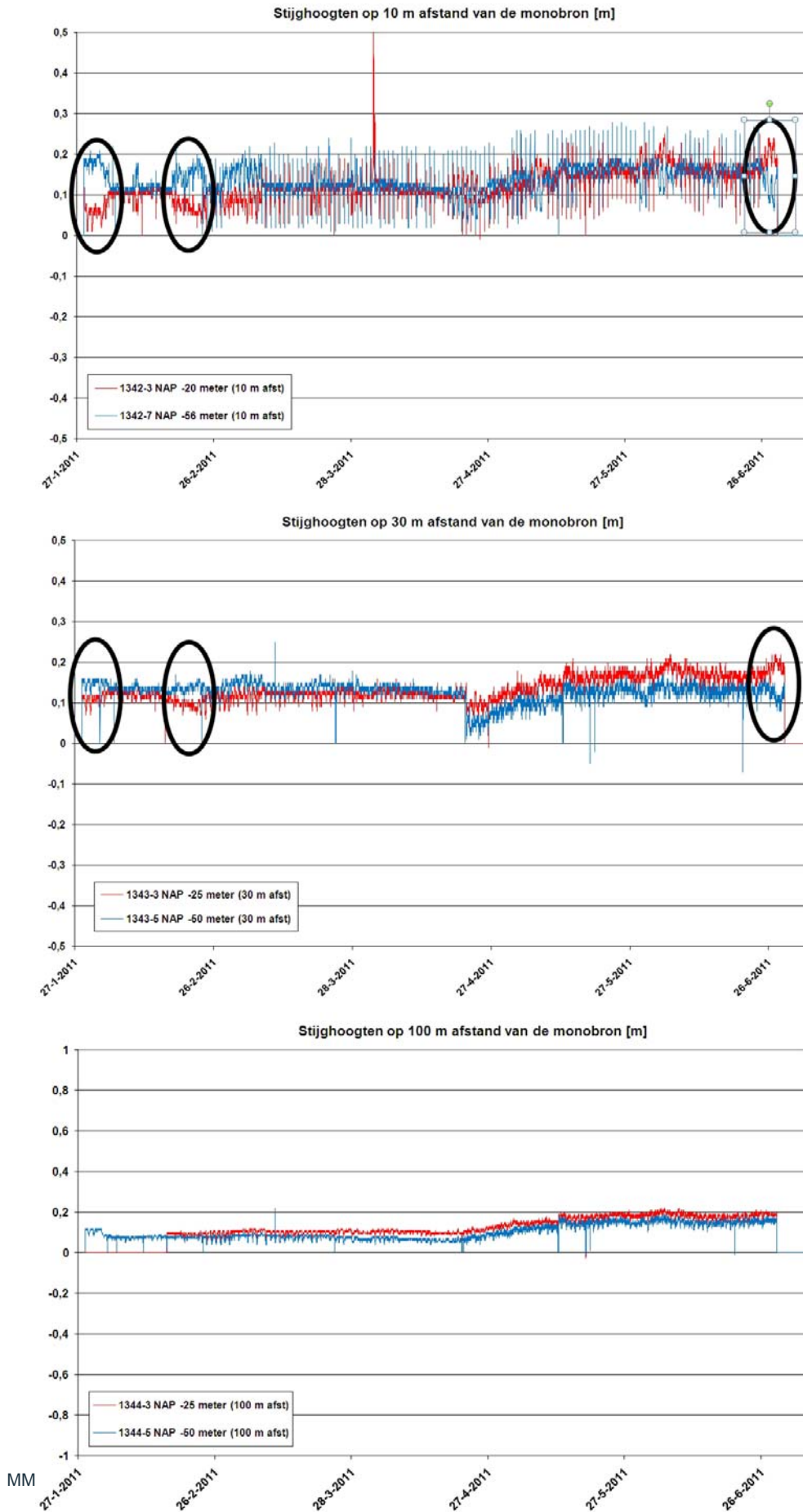
Figuur 34. Gemeten stijghoogtefluctuatie ter plaatse van de monobron (maart en april).

De locatie ligt dicht bij een drinkwaterwinning, die net als de WKO korte termijn fluctuaties veroorzaakt. Om de externe invloeden (met name de drinkwaterwinning) zo veel mogelijk uit de gemeten stijghoogtepatronen te verwijderen zijn de gemeten stijghoogtes gecorrigeerd. Deze correctie is uitgevoerd door het verschil te bepalen dus de gemeten waarden en de waarden in een referentiebuisk op ongeveer 250 m afstand van de WKO (B45B0408). Uit deze gecorrigeerde waarden kan een goede bepaling worden gedaan van het maximale effect van de WKO dat op verschillende afstanden van de monobron optreedt.

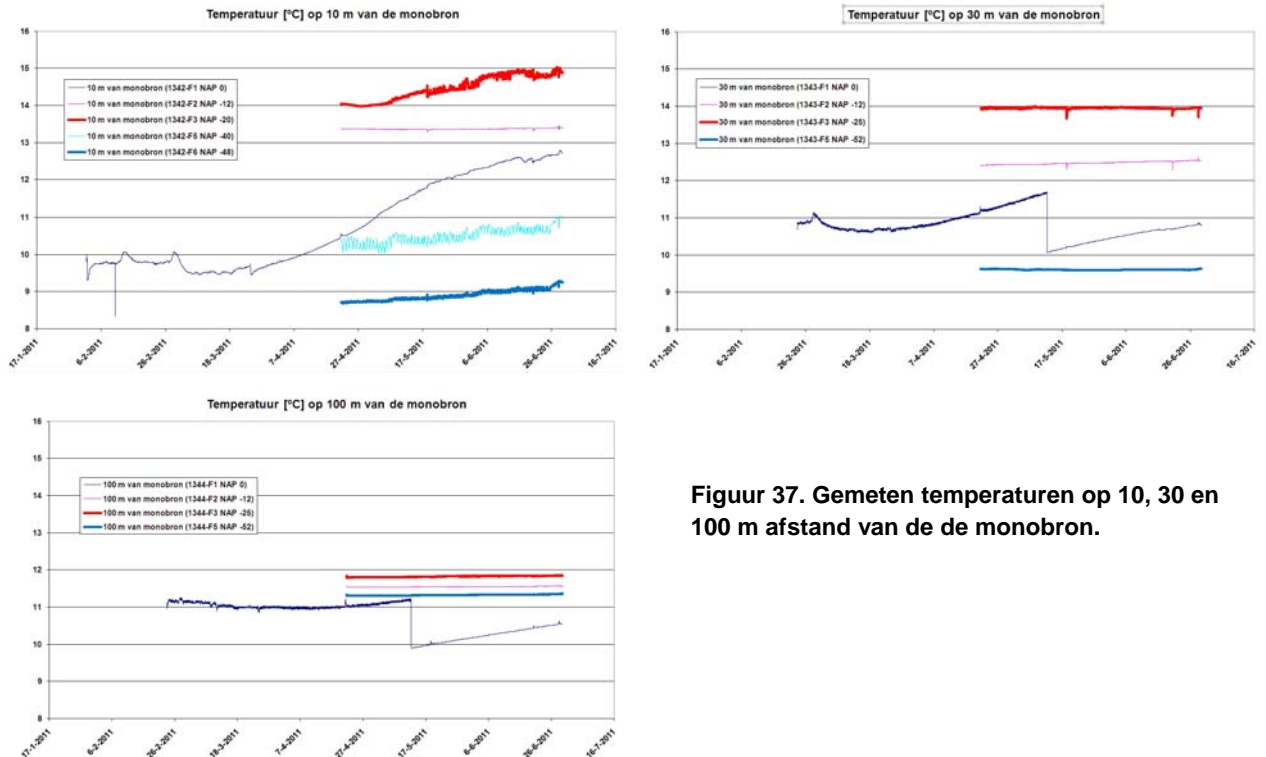
Uit de metingen volgen maximale stijghoogteveranderingen van 40 cm in het warme bronfilter en 50 à 60 cm in het koude bronfilter (zie Figuur 35). Op 10 m afstand van de monobron is nog een maximale stijghoogteverandering van ongeveer 10 cm, op 30 m afstand is dat nog 5 cm en op 100 m afstand is geen invloed meer terug te vinden.



Figuur 35. Gemeten stijghoogtefluctuatie ter plaatse van de monobron na correctie.



Figuur 36. Gemeten stijghoogtefluctuatie op 10, 30 en 100 afstand van de monobron.



Figuur 37. Gemeten temperaturen op 10, 30 en 100 m afstand van de de monobron.

De gemeten temperaturen zijn weergegeven in Figuur 37. Uit de temperatuurgrafieken komt naar voren dat in alle drie de meetputten de temperatuur op NAP-20 respectievelijk NAP-25 de hoogste temperatuur wordt gemeten en in het diepste filter (NAP-48 respectievelijk NAP-52) de laagste temperatuur. Wel is duidelijk dat de verschillen op 100 m afstand van de monobron nog maar klein zijn. De temperatuurgegevens lijken aan te geven dat op 100 m afstand sprake is van een geringe thermische invloed.

1.5 Maasstadziekenhuis, Rotterdam

1.5.1 Achtergrond

Type systeem: doublet

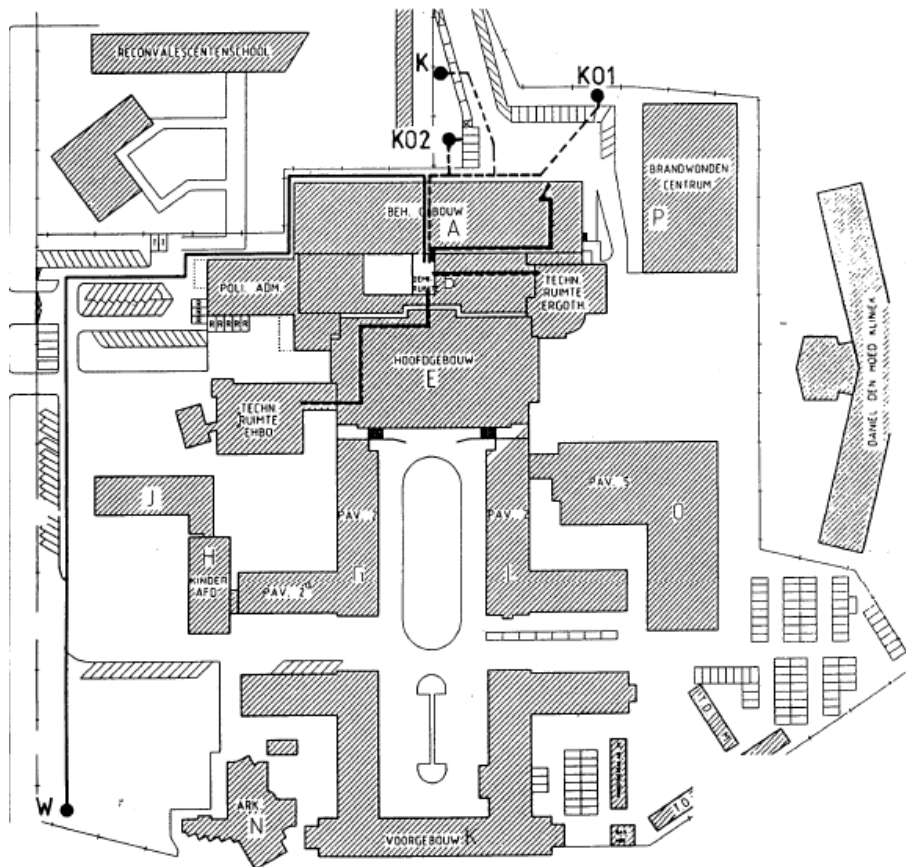
In 1998 is hier een doubletsysteem gerealiseerd in het tweede watervoerende pakket. Dit project is interessant vanwege de afwijkende grondwaterkwaliteit: de redox-toestand van het grondwater is hier sulfaatgereduceerd/methanogeen. Bij het systeem zijn geen meetputten aanwezig.



Tabel 9. Locatiegegevens Maastadziekenhuis

Provincie:	Zuid-Holland
In bedrijf sinds:	Eind 1998
Nog in bedrijf:	ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	1 doublet
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	Zomer 2005: $\pm 15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Redoxtoestand:	sulfaatgereduceerd/methanogeen
Interactie met ander systeem:	nee
Bemonsterde meetputten:	Bron W, Bron K

1.5.2 Locatiekaart Maasstadziekenhuis, Rotterdam



1.5.3 Fysische gegevens

Temperatuur, stijghoogte en geleidbaarheid

De gemiddelde infiltratietemperatuur in de warme bronnen lag in de periode 2002-2005 tussen 15 en 17 °C. In de koude bronnen lag de gemiddelde infiltratietemperatuur in dezelfde periode tussen 8 en 9 °C.

De divers zijn hier niet opgehangen. De referentiebron bleek niet aanwezig en gezien het plan om deze locatie in het voorjaar van 2011 te sluiten, zijn de divers ook later niet geplaatst. Interpretatie van de fysische gegevens is daardoor niet mogelijk.

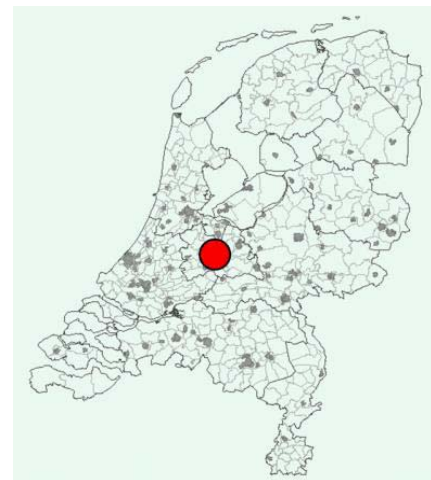
Aangezien de geleidbaarheid in brak en zout grondwater vaak sterk samenhangt met het chloridegehalte kan op basis van de gemeten chloridegehalten wel een indicatie worden verkregen. In de periode 1999-2002 is jaarlijks het chloridegehalte gemeten van het (spui)water uit de bronnen. Het gemeten chloridegehalte ligt tussen 230 en 270 mg/l en er is geen toename of afname zichtbaar. Verder valt het chloridegehalte binnen het bereik aan chloridegehalten dat voorafgaande aan de inbedrijfname van het systeem in de proefboring is gemeten (180-270 mg/l). De huidige metingen geven chloridegehalten van 264 en 299 mg/l en vallen aan de bovenzijde van de eerder gemeten bandbreedte. Er zijn dus geen aanwijzingen voor het optreden van noemenswaardige verzilting.

1.6 De Uithof Utrecht

1.6.1 Achtergrond

Type systeem: doublet

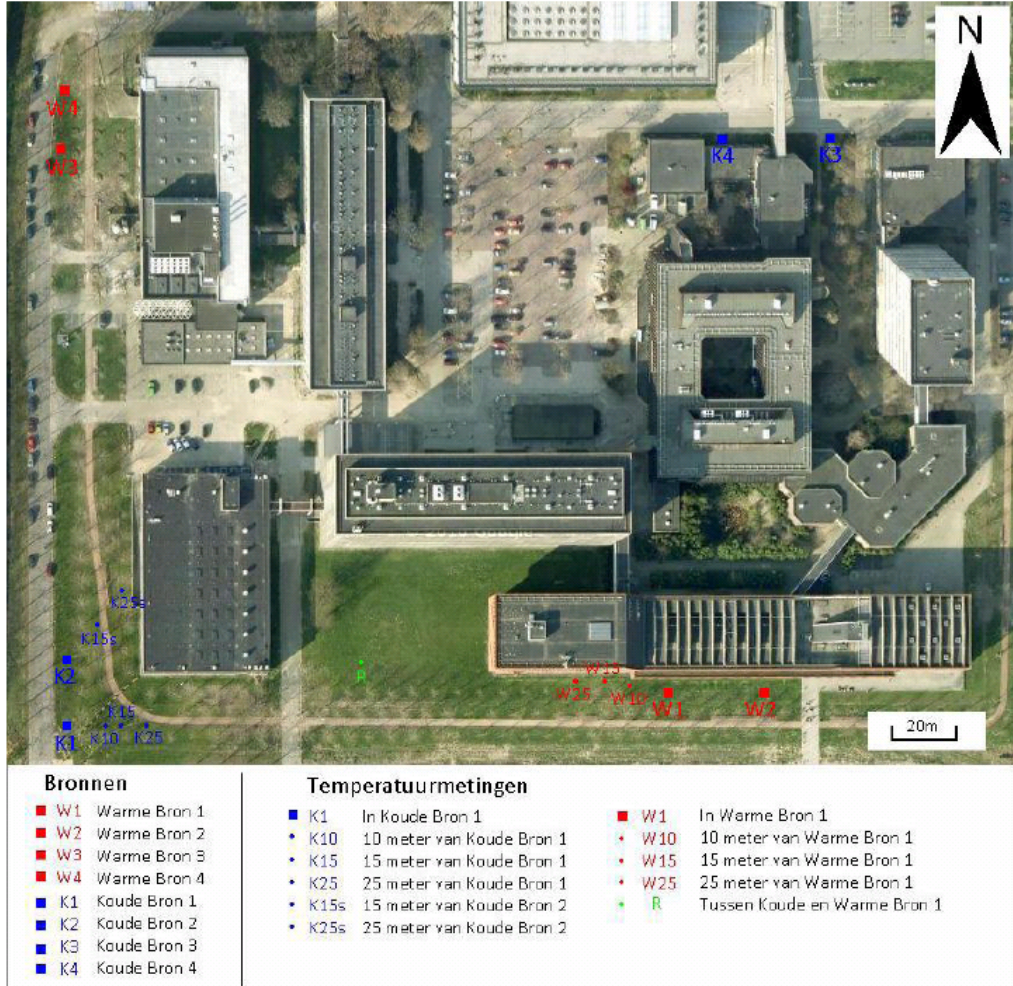
Dit systeem bestaat uit 4 warme en 4 koude bronnen. Daarnaast zijn twee diepe meetputten aanwezig en vier ondiepe peilbuizen. Het systeem is sinds november 2002 in bedrijf. In 2008 was de gemiddelde infiltratietemperatuur in de warme bronnen 14,5 °C. Deltares heeft in oktober 2008 en mei 2009 het grondwater onderzocht op een uitgebreid pakket aan chemische en microbiologische parameters.



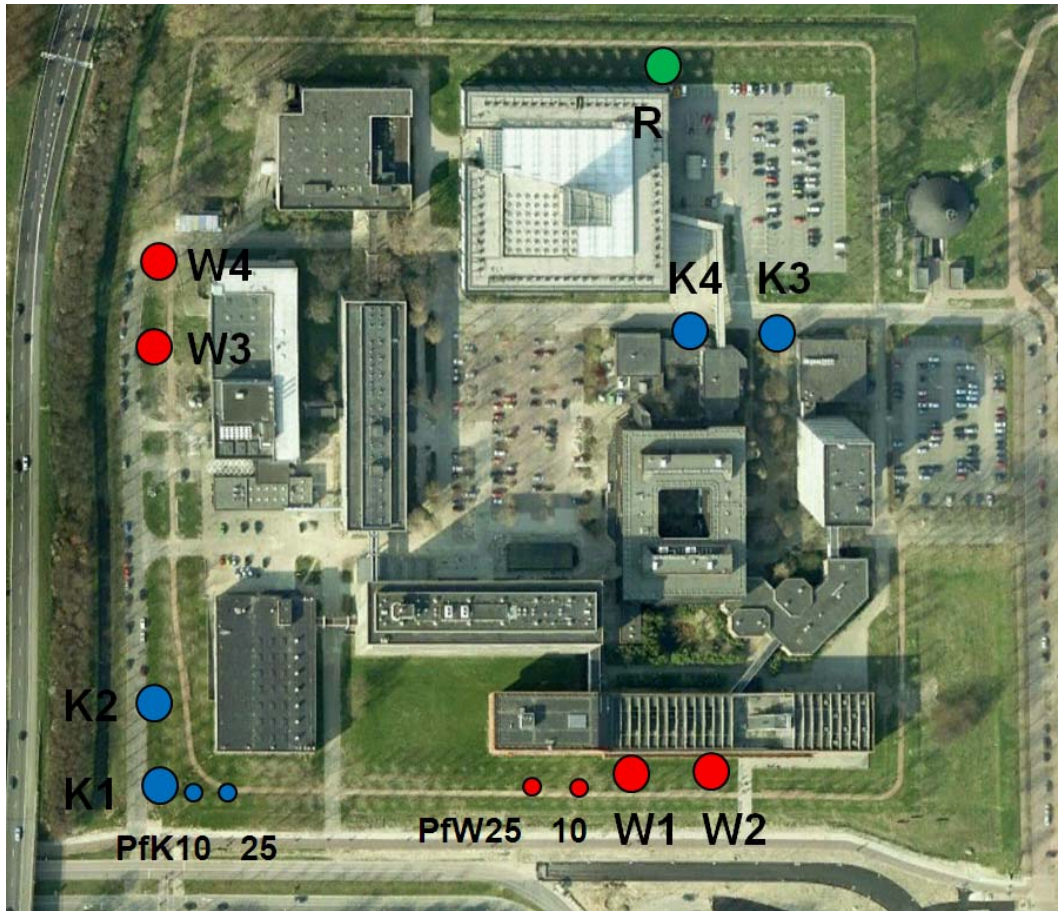
Tabel 10. Locatiegegevens de Uithof

Provincie:	Utrecht
In bedrijf sinds:	November 2002
Nog in de bedrijf:	ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	ja
Soort systeem:	Doubletten 2 x 4 bronnen
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	14,5
Redoxtoestand:	anoxisch
Interactie met ander systeem:	nee
Bemonsterde meetputten:	K1, W1 en B31H0814

1.6.2 Gegevens van de pilot



Figuur 38. Locaties bronnen en temperatuurmetingen (glasvezelkabels)

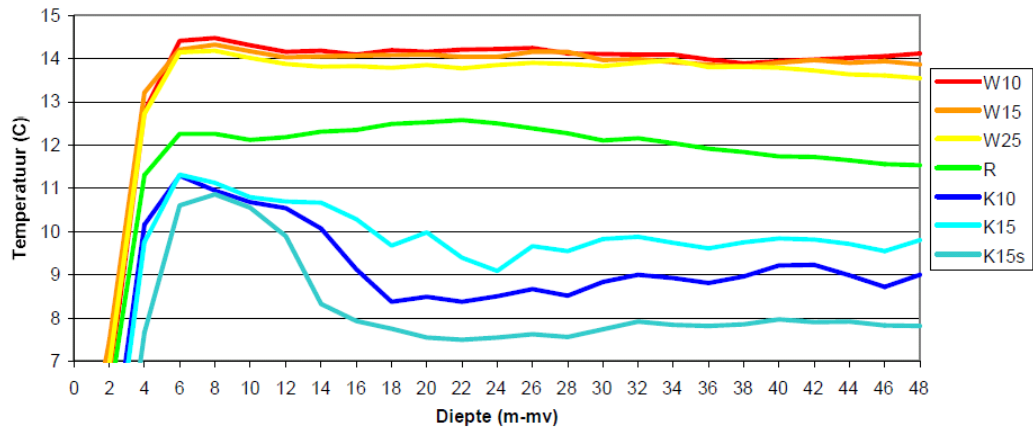


Figuur 39. Locaties bronnen en peilbuizen

1.6.3 Fysische gegevens: temperatuur

Bij het project Uithof zijn in een aantal meetpunten glasvezelkabels aangebracht. Hiermee zijn op 14 december 2010 temperatuurmetingen uitgevoerd. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 40. De temperatuur nabij de warme bron is ongeveer 14 °C en de temperatuur nabij de koude bronnen ligt tussen 8 en 10 °C. Tussen warme bron 1 en koude bron 1 is een temperatuur van ongeveer 12 °C gemeten. Het temperatuurverschil tussen de warme bel en de koude bel was dus ongeveer 5 °C. De temperatuur van de warme bel ligt ongeveer 2 °C hoger op de meetlocatie tussen warme bron 1 en koude bron 1.

Verder is te zien dat de temperatuur in de warme bel in de drie meetpunten vrijwel gelijk is. Dit kan worden verklaard doordat het warme water zich al een aantal maanden in de bodem bevindt, waardoor de temperatuurverschillen binnen de warme bel zijn uitgevlakt. Bij de koude bronnen zijn wel duidelijke verschillen te zien, wat te verklaren is uit verschillen in de infiltratietemperatuur en de korte verblijftijd (verschillen nog maar nauwelijks uitgevlakt) tussen de bron en de meetlocaties.



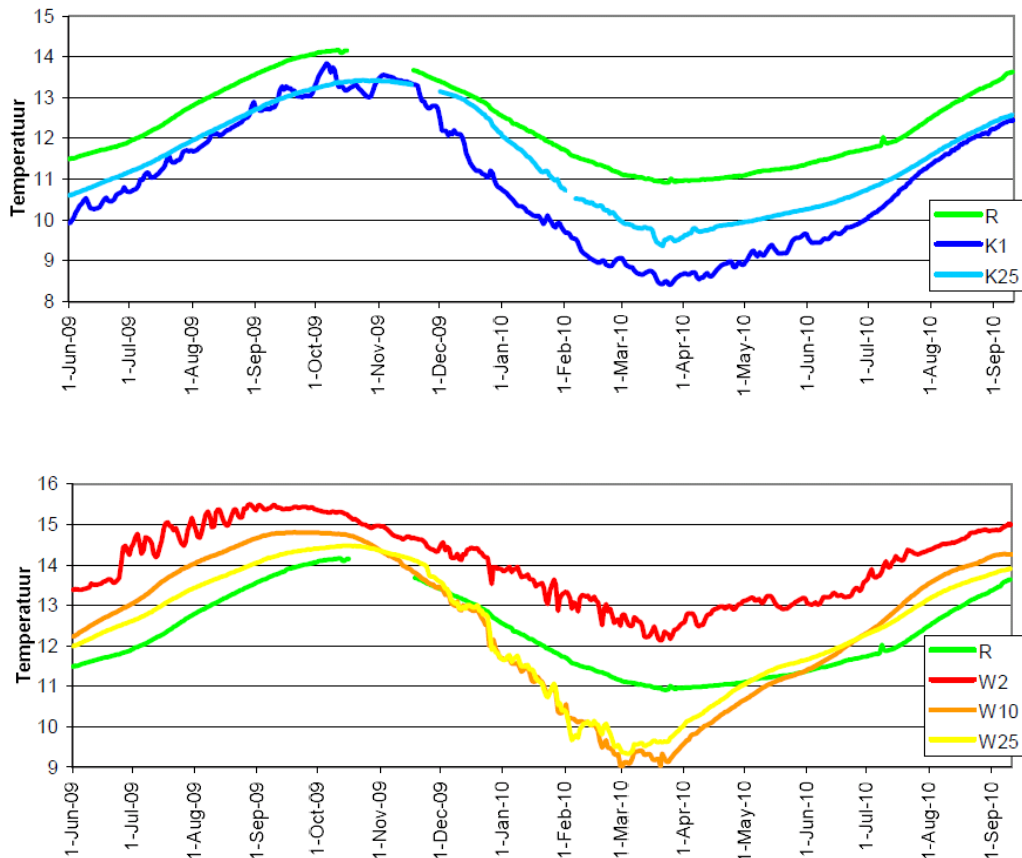
Figuur 40. Temperatuurmetingen van de glasvezelkabels op 14 december 2011.

Tevens zijn divers aangebracht in een aantal meetpunten. De meetpunten K25, W10 en W25 betreffen peilbuizen met een diepte van 3,75 m (tot net onder de deklaag). De filters van de bronnen zijn gesteld van 16-27, 30-37 en 45-48 m-mv (K1) en van 16-31 en 44-47 m-mv (W2). De diepte van de divers is in onderstaande tabel weergegeven. De diver in peilfilter R hangt op 4,2 m diepte en de overige divers 1 à 1,5 meter ondieper.

Tabel 11. Diepte (m-mv) van de geanalyseerde divers

Peilfilter	Diepte Diver (m-mv)
K1	3,20
K25	2,97
W2	3,20
W10	2,62
W25	2,92
R	4,20

Hieronder zijn de meetresultaten weergegeven voor de divers bij de koude en bij de warme bronnen.



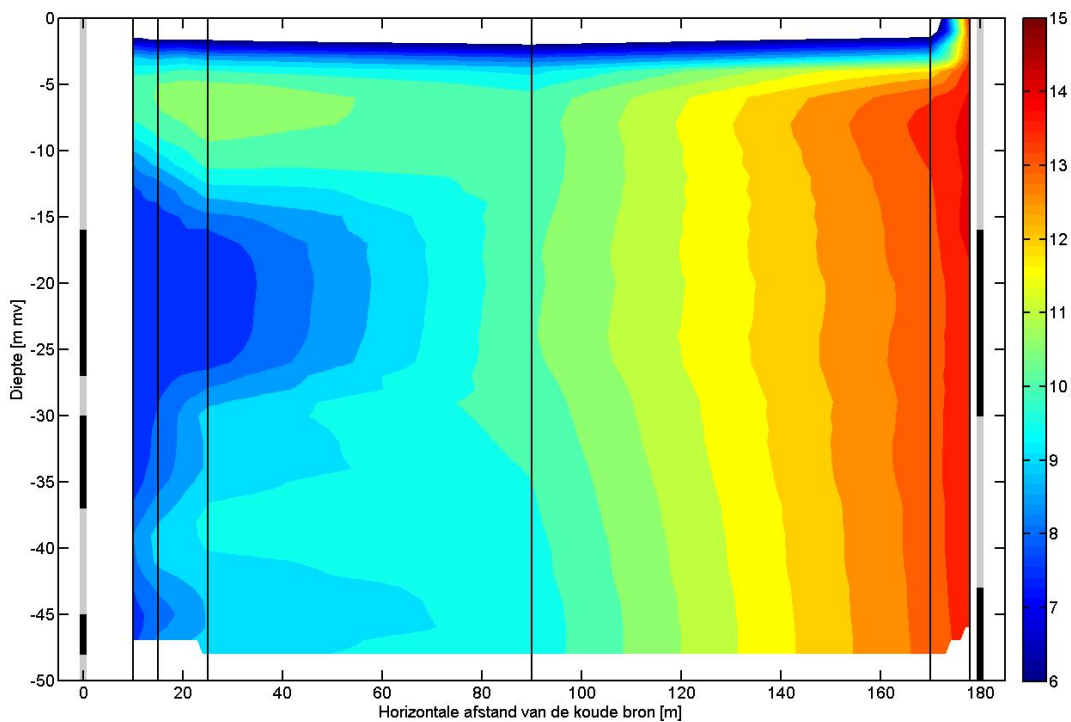
Figuur 41. Meetresultaten voor divers bij warme en koude bronnen Uithof.

In Figuur 41 is duidelijk de seizoensfluctuatie van de bodemtemperatuur te zien, die op deze diepte nog goed merkbaar is. De temperatuurf fluctuatie in de bodem onder invloed van seizoenale temperatuurf fluctuatie is sterk afhankelijk van de diepte (zie ook literatuurstudie). Dit is terug te zien in de meetgegevens. In de grafiek van de metingen bij de koude bronnen is het verschil tussen de hoogst gemeten temperatuur en de laagste gemeten temperatuur het kleinst bij diver R (diepste diver). In de grafiek van de metingen bij de warme bronnen is duidelijk te zien dat bij diver W10 (de meest ondiepe diver) het verschil tussen de hoogst gemeten temperatuur en de laagste gemeten temperatuur het grootst is.

Ook is te zien dat de gemeten temperatuur bij bron K1 duidelijk lager is dan bij W2 op dezelfde diepte. Dit is het gevolg van de aanwezigheid van de warme en de koude bel dicht onder deze meetpunten.

Glasvezelmetingen

Naast de metingen die met de divers zijn uitgevoerd, is ook gebruik gemaakt van glasvezelmetingen. Op een aantal plaatsen tussen de zuidelijke warme bronnen en de koude bronnen zijn glasvezelkabels aangebracht in de ondergrond. Met behulp van deze glasvezelkabels kan de temperatuur in de ondergrond worden gemeten. Figuur 42 toont een geïnterpreteerd dwarsprofiel van 4 januari 2011. De locaties van de glasvezels zijn weergegeven als zwarte verticale lijnen. De filterstellingen van de koude en warme bronnen is te zien aan de linker- en rechterzijde.

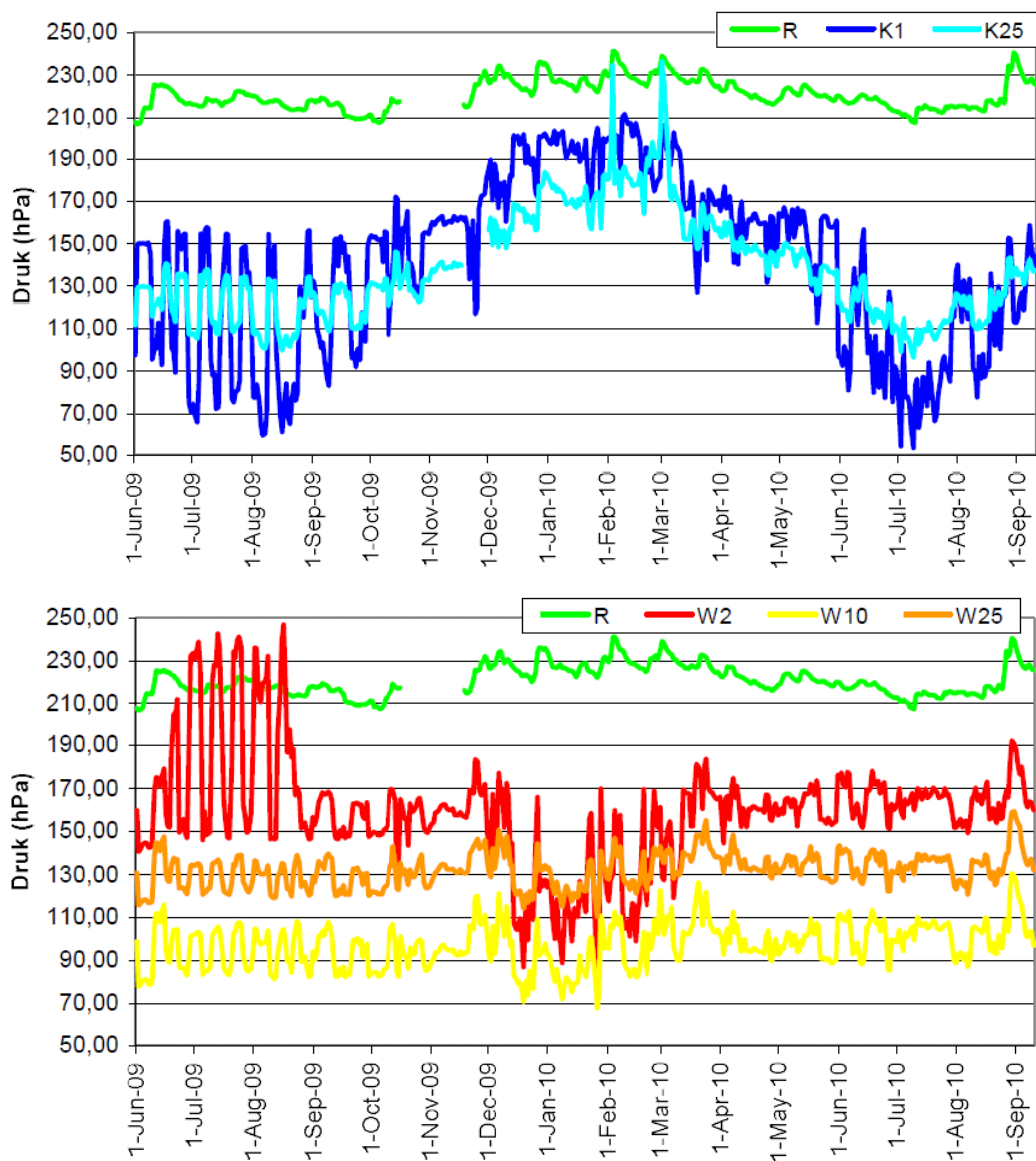


Figuur 42. Dwarsdoorsnede van de bodemtemperatuur op 4 januari 2011, interpretatie van metingen met glasvezelkabels (locaties metingen aangegeven als zwarte verticale lijnen. De filterstelling van de koude en de warme bronnen zijn aan de linker- en rechterzijde weergegeven (zwarte delen zijn de bronfilters).

In de metingen is duidelijk de invloed van de filterstelling van de koude bronnen te zien. Verder blijkt dat via het bovenste bronfilter meer water infiltreert dan via de onderste twee filters. Mogelijke verklaringen zijn een hogere doorlatendheid ter hoogte van het bovenste bronfilter en/of een grotere weerstand op de boorgatwand bij de diepere filters. De boorbeschrijving van bron K1 geeft aan dat het zand op de diepte van het bovenste bronfilter grover is dan op de diepte van de twee diepere filterdelen.

Opgemerkt moet worden dat onzeker is of de grote uitstulping van koude ter hoogte van het bovenste bronfilter overeen komt met de werkelijkheid: het kan ook een gevolg zijn van het interpoleren tussen de twee meetlocaties, die in dit geval relatief ver uit elkaar liggen. Wel is duidelijk dat de koude niet evenredig over de diepte is verdeeld. Ten opzichte van de situatie van een homogene ondergrond, is op bepaalde dieptes sprake van een wat groter thermisch invloedsgebied (lagen met een relatief hoge doorlatendheid) en op andere dieptes van een wat kleiner thermisch invloedsgebied (lagen met lagere doorlatendheid).

1.6.4 Fysische gegevens: stijghoogten



Figuur 43. Gemeten drukken met de divers in de meetpunten nabij bron K1 (boven) en bron W2 (onder). Op de verticale as staat de druk in hPa, wat overeen de druk in cm waterkolom boven de diver.

De duidelijkste effecten zijn te zien in de zomerperiode. In bron W2 treedt een verhoging op van maximaal 1,0 m en in bron K1 een verlaging van maximaal 0,9 m. Op 10 m afstand van bron W2 is in dezelfde periode direct onder de deklaag een verhoging van ongeveer 25 cm te zien en op 25 m afstand een verandering van 10 à 15 cm. Op 25 m afstand van bron K1 is een verandering van 25 cm gemeten. Onderstaande tabel 12 toont een overzicht van uit de metingen afgeleide veranderingen en de vooraf berekende veranderingen.

Tabel 12. Overzicht van uit de metingen afgeleide veranderingen en de vooraf berekende veranderingen.

Meetpunt	zomer		winter	
	gemeten*	berekend*	gemeten*	berekend*
K1	0,9 m	1,8 m	0,5 m	1,8 m
K25	0,25 m	0,17 m	0,5 m**	0,35 m
W2	1,0 m	1,7 m	0,8 m	1,7 m
W10	0,25 m	0,23 m	0,4 m	0,35 m
W25	0,13 m	0,22 m	0,3 m	0,3 m

* Gemeten is de verandering direct onder de deklaag. In de berekeningen is de verandering in deklaag bepaald. De gemeten veranderingen onder de deklaag zijn enkele centimeters groter dan in de deklaag.

** De metingen in de winter zijn moeilijk te interpreteren. In de metingen zijn twee onverklaarbare pieken zichtbaar, die hier buiten beschouwing zijn gelaten.

Uit Tabel 12 blijkt dat de stijghoogteveranderingen in de bronnen kleiner zijn dan voorspeld. Op 25 m afstand van bron K1 is de gemeten stijghoogteverandering direct onder de deklaag groter dan is berekend in de deklaag. Een verschil van een aantal centimeters kan worden verklaard doordat niet dezelfde diepte wordt vergeleken. Ook de locaties van de bronnen in de effectenstudie wijken enigszins af van de werkelijke locaties. De gemeten veranderingen op 10 en 25 m van bron W2 komen globaal overeen met de vooraf berekende veranderingen. De vooraf berekende veranderingen zijn dus een goede voorspelling voor de daadwerkelijk situatie.

1.6.5 Fysische gegevens: geleidbaarheid

Bij dit project zijn geen divers geplaatst die ook de geleidbaarheid registreren, aangezien hier geen sprake is van zoet-/brak-/zout overgangen in de buurt van de bronfilters.

1.7 Locatie De Bruggen, Zwammerdam

1.7.1 Achtergrond

Type systeem: doubletsysteem - hoge temperatuur warmteopslag

De Bruggen Zwammerdam is het enige hoge temperatuur warmteopslagsysteem in Nederland (80 °C) dat recentelijk nog in gebruik was. De enige andere, bij de Universiteit Utrecht, is reeds sinds 2000 afgesloten. In Zwammerdam is warmte in de bodem opgeslagen. Bij de warmteopslag zijn 3 meetputten aanwezig. In het kader van de vergunning Grondwaterwet zijn metingen gedaan aan de chemie, microbiologie, stijghoogte en bodemtemperatuur. Om verstopping van de bronnen door kalkneerslag te voorkomen wordt zoutzuurdosering toegepast, wat goed heeft gewerkt.

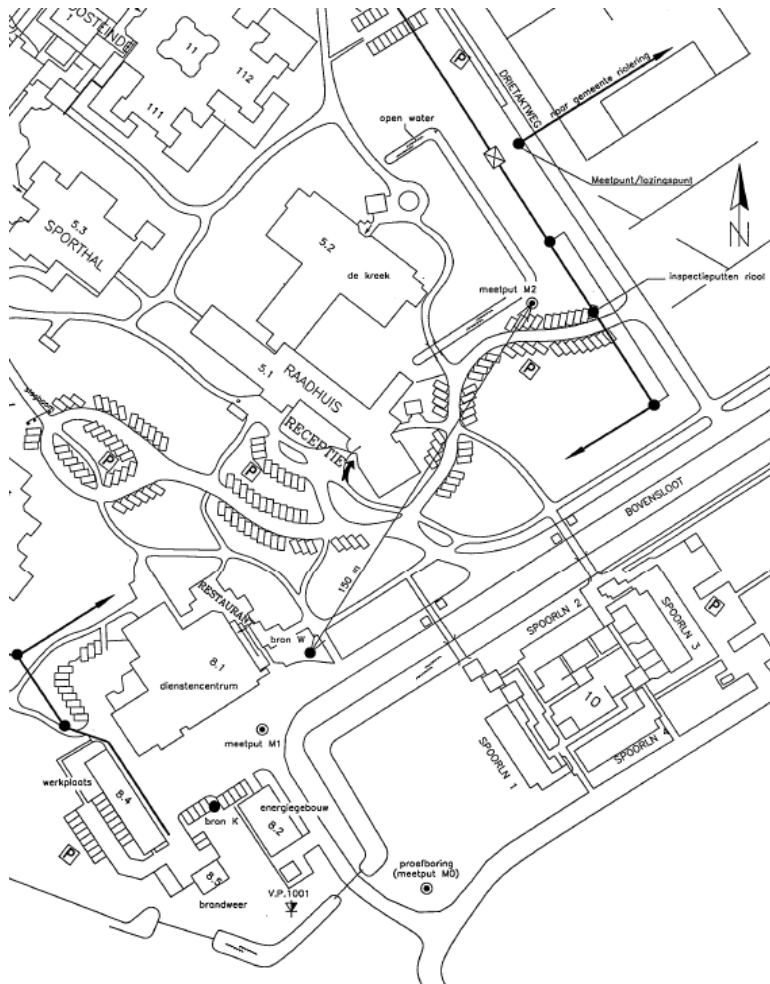


Tabel 13. Locatiegegevens De Bruggen

Provincie:	Zuid-Holland
In bedrijf sinds:	Zomer 1998
Nog in de bedrijf:	Ja
Toestemming eigenaar/beheerder?	Ja
Soort systeem:	doublet, hoog temperatuuropslag
Gemiddelde infiltratietemperatuur zomer (laatst beschikbare jaar)	Max. 90°C
Redoxtoestand:	Sulfaatreducerend
Interactie met ander systeem:	Nee
Bemonsterde meetputten:	PF WB, PF KB, M2

N.B. Bemonstering van Zwammerdam heeft in de eerste meetronde plaatsgevonden op een diepte van 100 m-mv in plaats van 140 m-mv. In de tweede meetronde is bemonsterd op -140 m.

1.7.2 Gegevens pilotlocatie



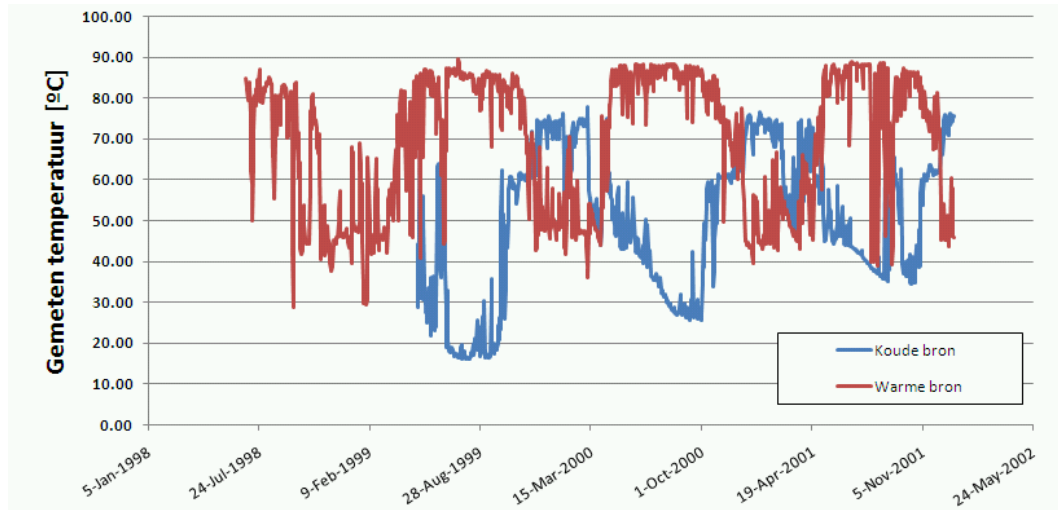
Tabel 14. Overzicht meetpunten

Naam	diepte (m-mv)
WB	139,5 - 147,7
PF WB	141, - 143,7
KB	140 – 149
PF KB	143 – 145
M1	(29 - 30) (62 - 63) (98 - 100) (142 - 144)
M2	(98 -100) (140 - 142)
Proefboring (M0)	(70 - 71) (107 -108) (171 - 172) (199 - 200)

1.7.3 Fysische gegevens

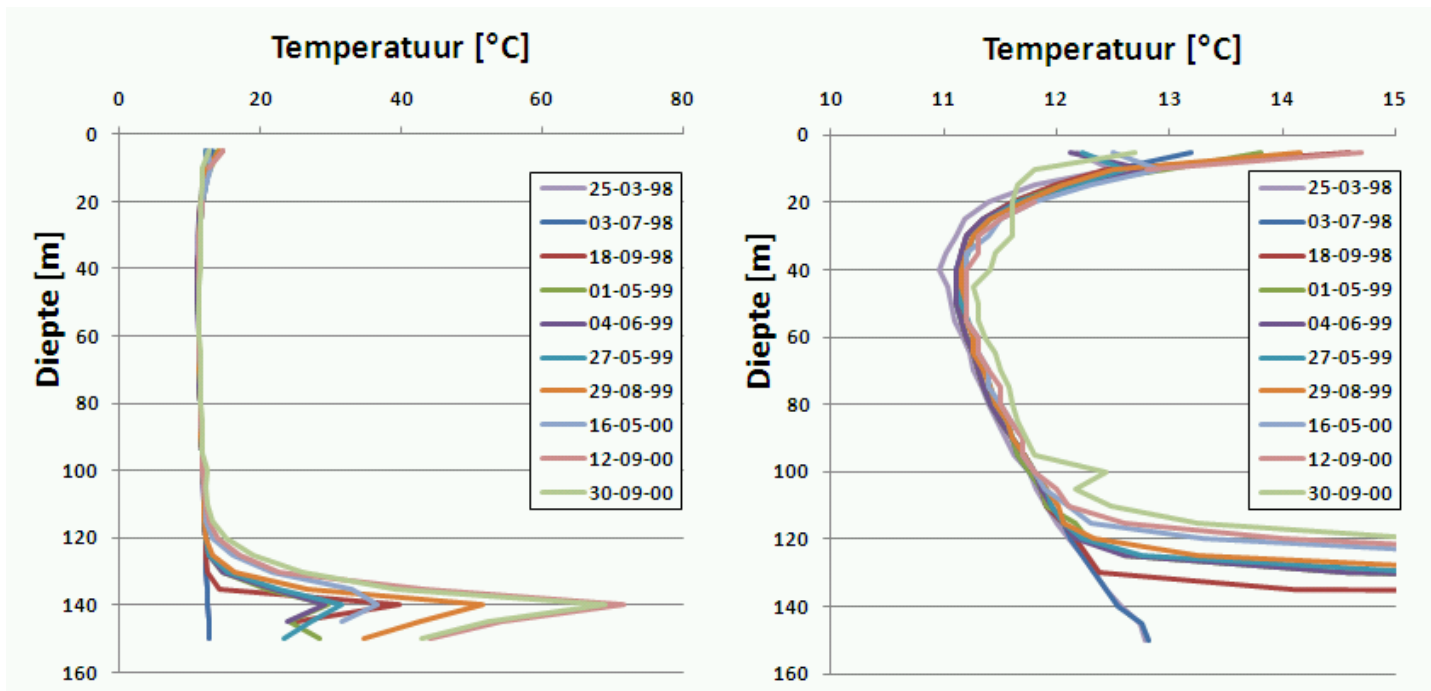
Bodemtemperaturen

Bij dit project is warmte opgeslagen met een hoge temperatuur. Onderstaande grafiek toont de temperaturen van het water in de warme en de koude bron. In de zomer neemt de temperatuur in de warme bron toe tot tot 85 à 90 °C.



Figuur 44. Temperaturen in de warme en koude bron locatie Zwammerdam.

In de periode 1998-2000 zijn elk kwartaal bodemtemperatuurprofielen gemeten in meetput M1. In de meetputten M0 en M2 zijn ook bodemtemperatuurprofielen gemeten, maar hier zijn geen noemenswaardige wijzigingen zichtbaar.



Figuur 45. Gemeten bodemtemperaturen in meetput M1, links 0-80 °C en rechts ingezoomd op 10-15 °C.

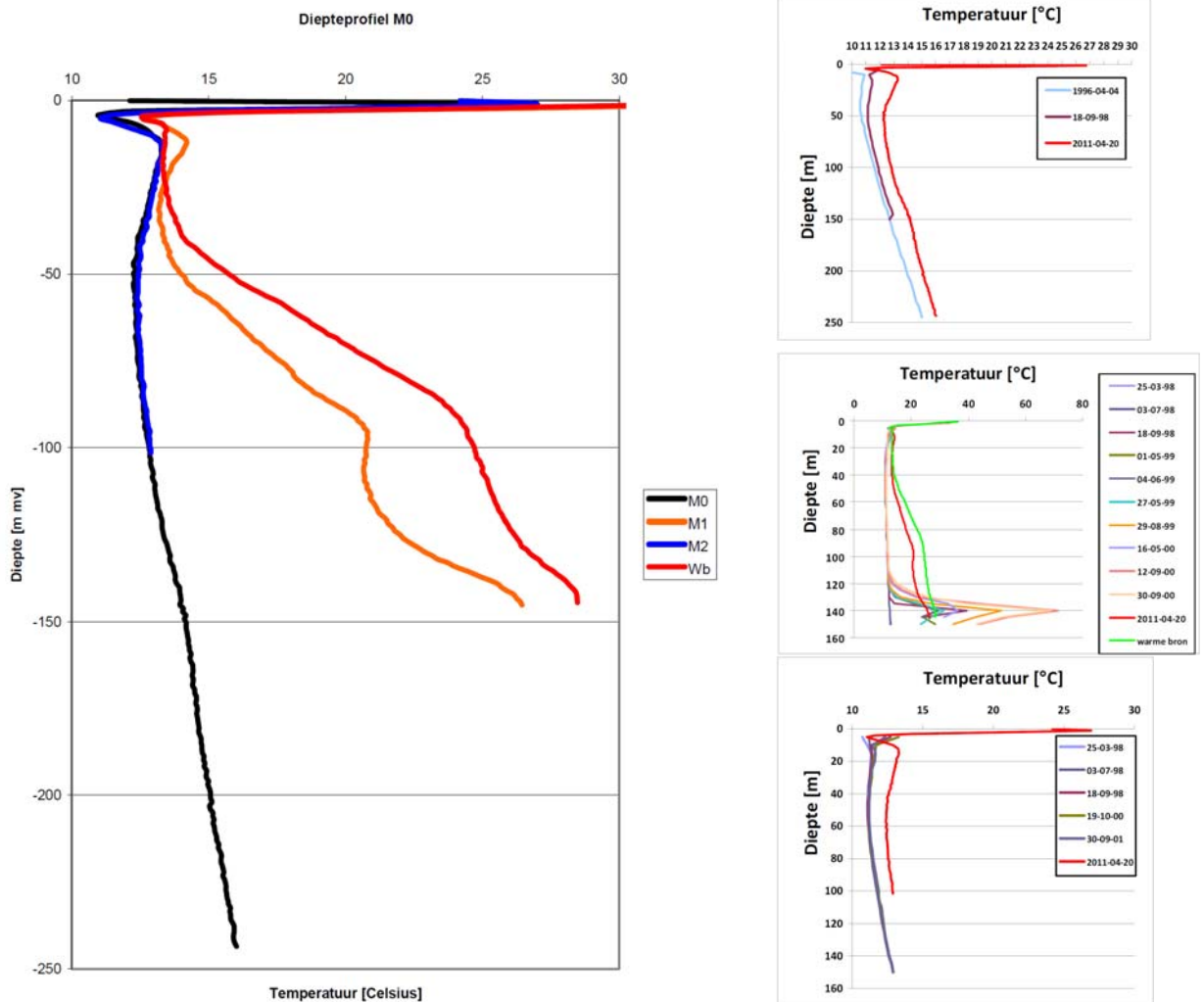
De metingen geven aan dat de temperatuur in M1 op de diepte van de bronnen (140-149 m beneden maaiveld) oploopt tot maximaal 70 °C. De hoogste temperatuur wordt gemeten in de top van het watervoerende pakket, wat duidt op opwaartse stroming onder invloed van de lagere dichtheid van het warme water. In de bovenliggende scheidende laag dringt de warmte langzaam maar zeker door naar boven, waarschijnlijk door geleiding.

Op 20 april 2011 is de temperatuur in de warme bron en in de meetputten M0, M1 en M2 gemeten met behulp van glasvezelkabels

Uit de metingen blijkt dat de temperatuur in de afgelopen jaren sterk is afgenomen. Dit is een logisch gevolg van het uit bedrijf nemen van de installatie: verschillende processen, zoals dichtheidsstroming, warmtegeleiding, grondwaterstroming, diffusie en dispersie zorgen voor verspreiding van de achtergebleven warmte. Tabel 15 geeft een overzicht van de jaarlijks verplaatste hoeveelheid water in de periode 1999-2007. Na 2007 is geen water meer verpompt. Uit dit overzicht blijkt dat het systeem vanaf 2003 nauwelijks meer is gebruikt. De installatie is in 2008 buiten bedrijf gesteld.

Tabel 15. Verplaatste waterhoeveelheden Zwammerdam (2008 t/m 2010 = 0 m³)

jaar	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
m ³ onttrokken	35.477	70.220	49.612	26.248	1.164	23	2	3	2



Figuur 46. Resultaten van de temperatuurmetingen met de glasvezelkabels die zijn uitgevoerd op 20 april 2011 (links). Rechts een vergelijking met de metingen die in het verleden zijn uitgevoerd in (van boven naar beneden) M0, M1 en M2.

Uit de metingen blijkt dat de temperatuur met name bij de warme bron en M1 nog duidelijk verhoogd is ten opzichte van de meetputten M0 en M1. De historische metingen lijken aan te geven dat bij M0 en M2 de temperatuur in de loop van de tijd is opgelopen (resultaten glasvezelmetingen ten opzichte van de metingen van uit de periode 1996-2001). Het vermoeden bestaat echter dat deze afwijkingen veroorzaakt zijn doordat sprake is van verschillende meetmethoden: vooral het parallel lopen van de lijnen wekt die indruk.

In de ongeveer 8 jaar dat het systeem niet (of nauwelijks) meer is gebruikt, is de temperatuur gedaald van 70 à 80 °C naar respectievelijk 26 °C (M1, 145 m-mv) en 28 °C (warme bron, 145 m-mv) op 20 april. In dit geval lijkt de uitdoving van de warmte dus relatief snel te verlopen. De resultaten op het gebied van de chemie en microbiologie kunnen meer inzicht geven in de nog resterende effecten op deze gebieden.

Stijghoogten

In de peilbuizen van de meetputten is in het verleden maximaal eens per kwartaal de stijghoogte gemeten. In de meetputten M0 en M2 is de variatie in de gemeten stijghoogte zeer gering, wat overeen komt met de bevindingen uit de temperatuurmetingen. In meetput M1 zijn wel stijghoogteverschillen gemeten: het verschil tussen de hoogste en de laagste gemeten stijghoogte is ongeveer 80 cm. Meetput M1 bevindt zich ongeveer midden tussen de koude en de warme bron, wat betekent dat de invloeden van beide bronnen elkaar bij benadering zouden moeten compenseren. De gemeten stijghoogteverschillen zijn waarschijnlijk het gevolg van achtergrondeffecten (natuurlijke stijghoogtevariatie).

Geleidbaarheid

De in het verleden uitgevoerde metingen geven aan dat de geleidbaarheid van het water in de warme en de koude bron tussen 11.000 en 13.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ blijft, met uitzondering van één meting (7.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). In de metingen is geen trend herkenbaar.

pH

Bij dit project is gebruik gemaakt van zoutzuurdosering om de neerslag van kalk bij het opwarmen van het water te voorkomen. Doel van de dosering is om de kalkverzadigingsgraad naar beneden te brengen, zodat bij de opwarming van het water geen oververzadiging optreedt en kalkneerslag wordt voorkomen. Na dosering van het zoutzuur en opwarming moet de verzadigingsindex ongeveer op nul uitkomen. Aan de warme zijde zal daardoor niet of nauwelijks kalkoplossing plaatsvinden. In de zomer wordt het warme grondwater weer onttrokken en afgekoeld, waardoor de kalkverzadigingsgraad daalt. Na infiltratie in de koude bron zal daardoor kalk in het water oplossen totdat het water kalkverzadigd is. In de volgende cyclus is weer zoutzuurdosering nodig: het onttrokken water is immers weer kalkverzadigd en zal zonder tegenmaatregelen oververzadigd raken bij opwarming. Zodoende is elk seizoen zoutzuurdosering nodig.

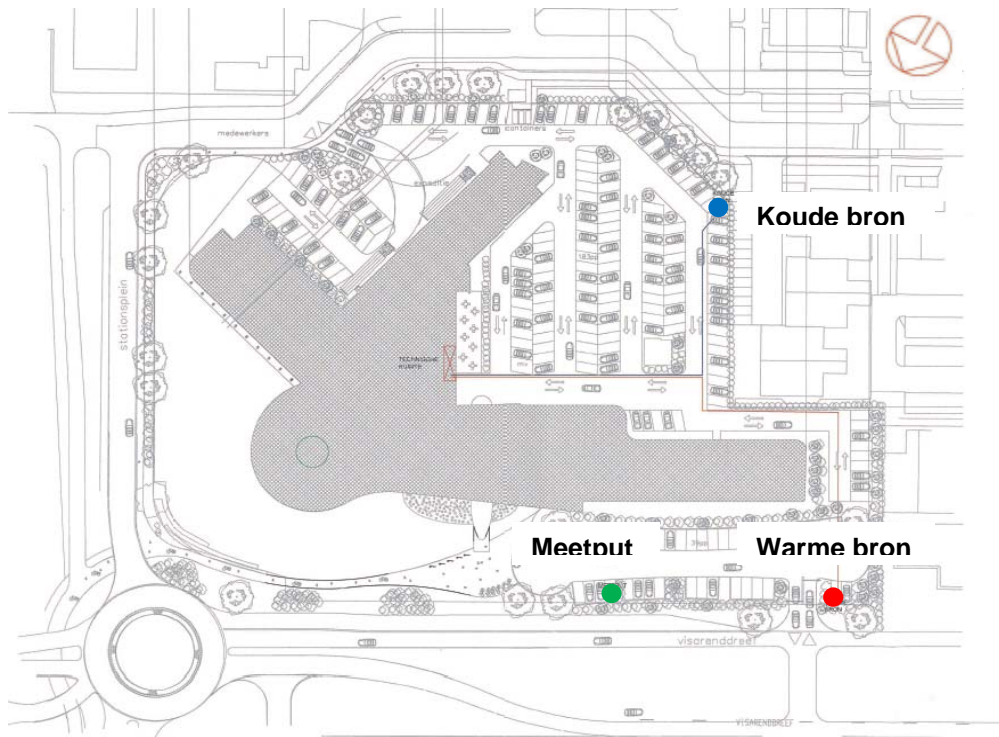
Door de dosering van het zoutzuur daalt de pH van het water en neemt het chloridegehalte toe. Uiteindelijk zal het zuur door het oplossen van kalk in de bodem worden geneutraliseerd. Bij het oplossen van kalk stijgt het gehalte aan calcium en bicarbonaat en stijgt de pH. Tijdens de evaluatie die in 2002 is uitgevoerd zijn deze effecten niet duidelijk terug te vinden in de waterkwaliteitsgegevens, doordat de natuurlijke variatie in de concentraties van de betreffende stoffen/parameters vergelijkbaar is met het verwachte effect. Een duidelijke daling van de pH van het water dat uit de koude bron wordt onttrokken is dan ook niet waargenomen. Mogelijk is dat mede het gevolg van de meetnauwkeurigheid van de pH-meters.

Zettingen

Voor zover bekend zijn geen zettingsmetingen uitgevoerd bij dit project.

1.8 Lelystad

De locatie Lelystad maakt geen deel uit van de locaties waarbinnen Meer met Bodem-energie metingen op locatie worden uitgevoerd. Het biedt echter wel veel aanvullende informatie voor de interpretatie van de effecten van WKO systemen.



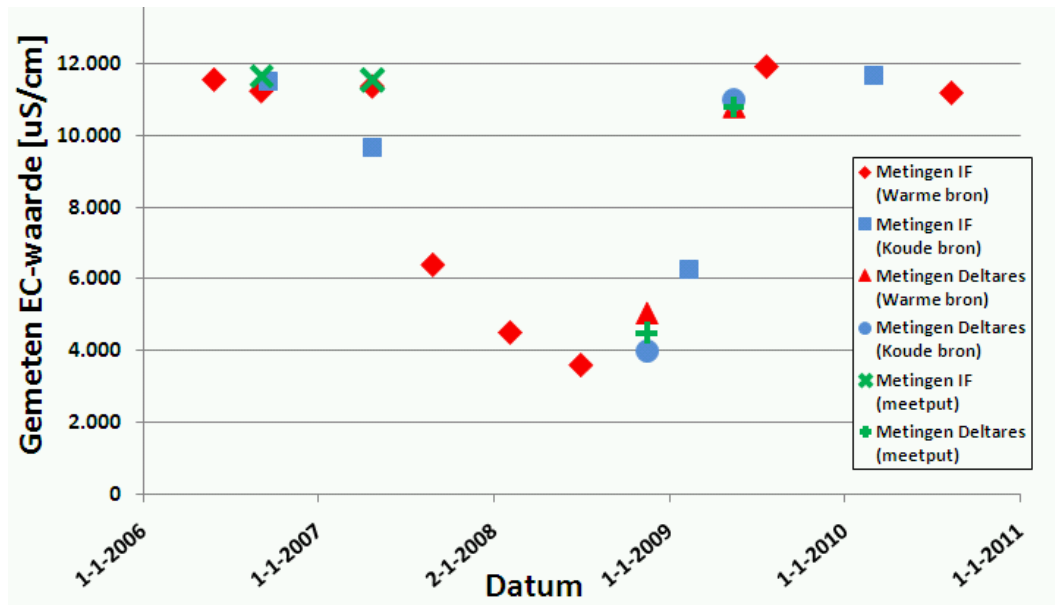
1.8.1 Gegevens Pilot

Tabel 16. Overzicht van aanwezige meetpunten en filters op locatie Provinciehuis Lelystad

meetpunt	filter	filterdiepte [m-mv]
warme bron	bronfilter	64-87
warme bron	F-1	17-19
warme bron	F-2	70-72
koude bron	bronfilter	64-87
koude bron	F-1	19-21
koude bron	F-2	70-72
meetput	F-1	14-16
meetput	F-2	49-51
meetput	F-3	74-76

1.8.2 Fysische gegevens

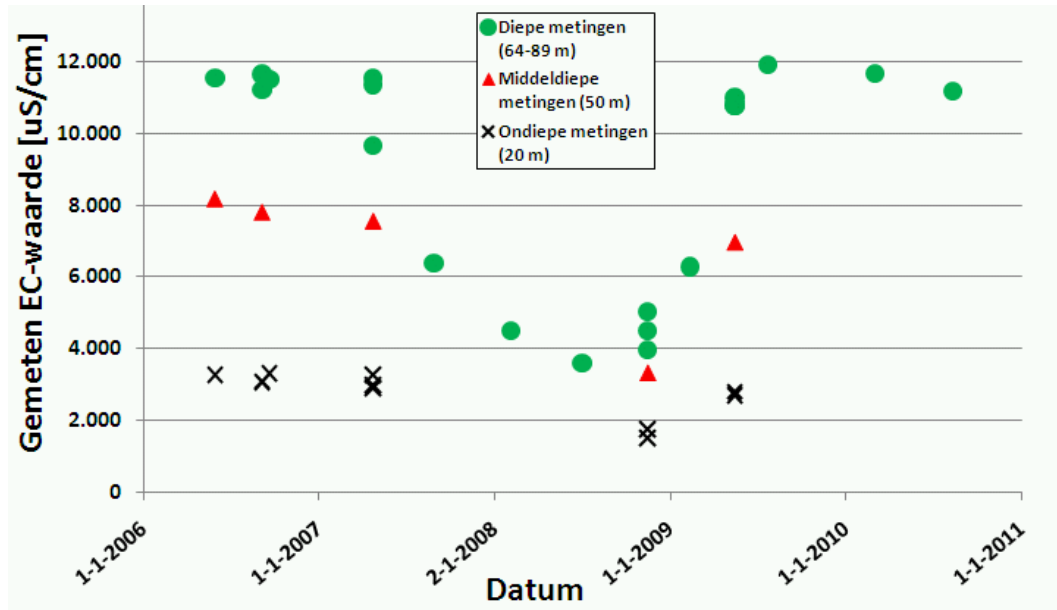
In Lelystad is in december 2010 een diver opgehangen om de geleidbaarheid te meten. De gegevens zijn nog niet beschikbaar. Wel zijn van dit project historische gegevens beschikbaar over de geleidbaarheid.



Figuur 47. Gemeten EC in de diepe filters van de warme (W) en koude bron (K) en de meetput bij Provinciehuis Flevoland

De Figuur 47 laat zien dat de EC in januari 2006 op de diepte van de bronnen op ongeveer 11.500 uS/cm is. In 2007 daalt de EC scherp tot ongeveer 4.000 uS/cm halverwege 2008. In het daarop volgende jaar loopt de EC weer op tot de oorspronkelijke waarde. Deze metingen geven aan dat tijdelijk verzoeting is opgetreden. Mogelijk is hier sprake van het opdrijven van een bel zoet grondwater van grotere diepte. Het is bekend dat in Flevoland zoet/zout inversies voorkomen, wat betekent dat zoet grondwater zich onder zout grondwater bevindt. Aangezien het zoete grondwater een lagere dichtheid heeft, is dit geen stabiele situatie. Vroeg of laat zal een het zoete water zich naar boven verplaatsen. Mogelijk heeft de stroming door de WKO hier gezorgd voor het in gang zetten van dit proces. Dit proces zou ook waarschijnlijk ook van nature zijn opgetreden, maar dan op een later moment.

Ter controle van deze hypothese zijn ook de beschikbare metingen in de ondiepere meetpunten in Figuur 48 geplot. Ook op 50 m diepte en op 20 m diepte is eind 2008 een relatief lage EC gemeten en is de EC halverwege 2009 weer ongeveer op het oorspronkelijke niveau. Dit is in overeenstemming met de hypothese.

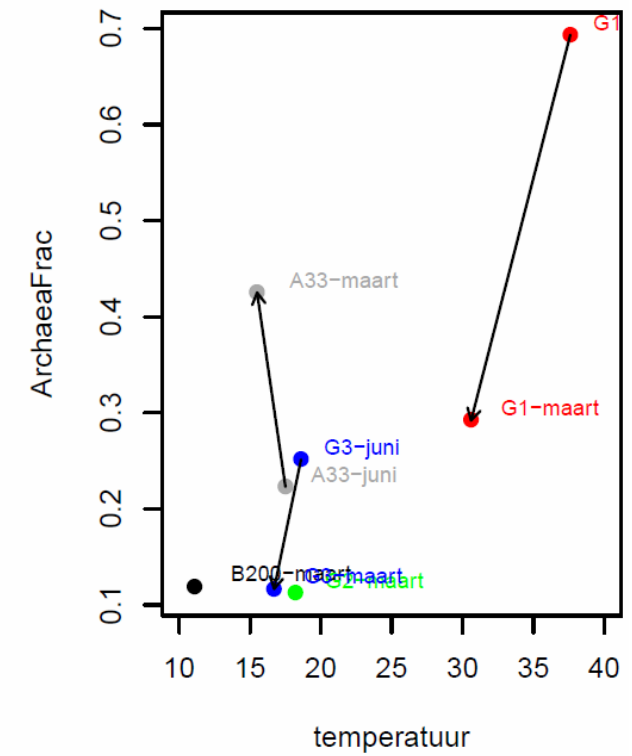
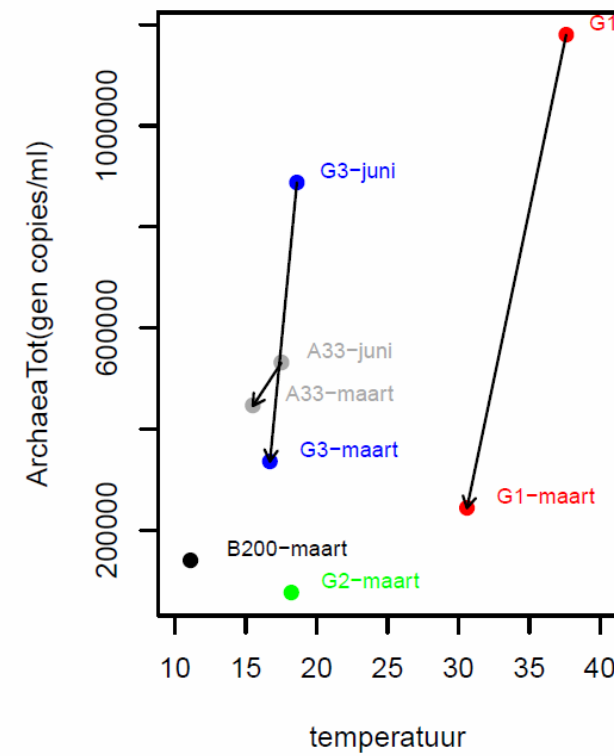
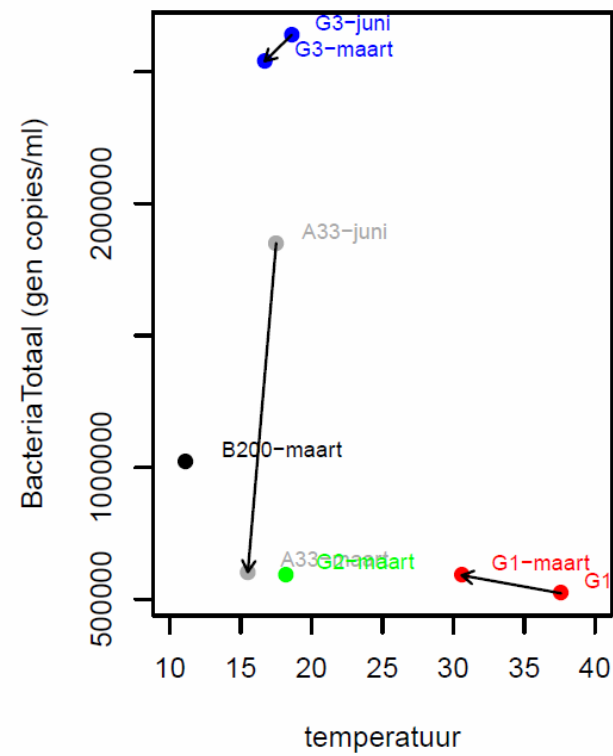
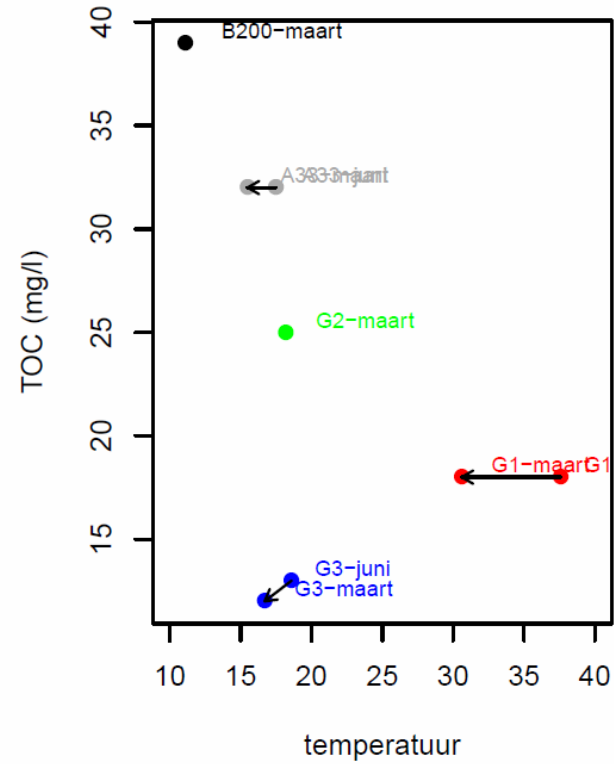
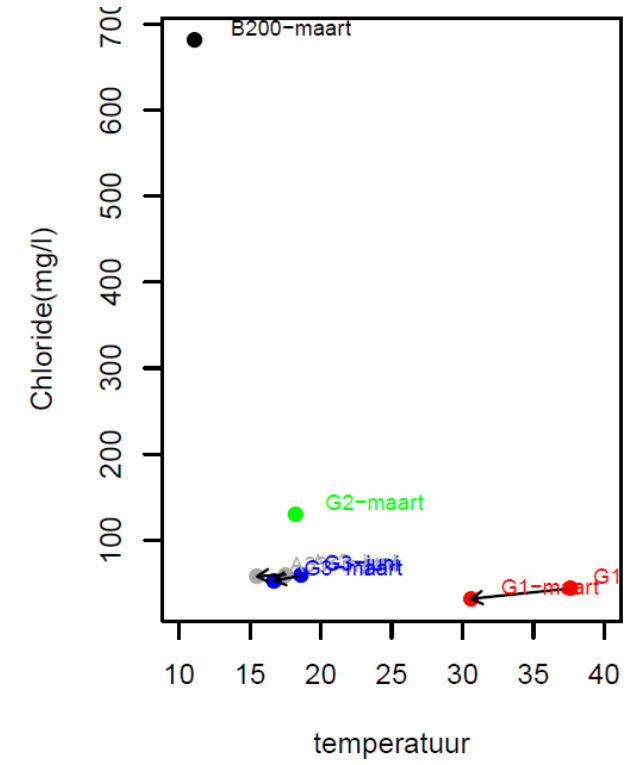
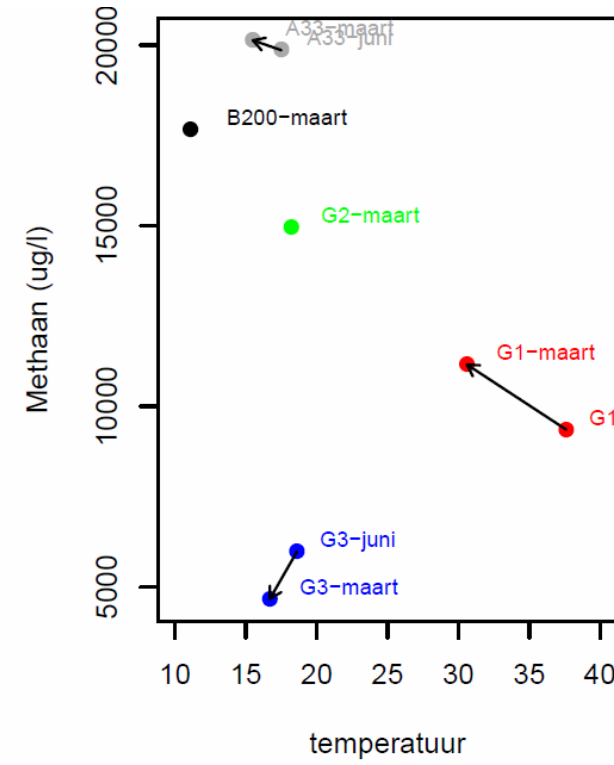
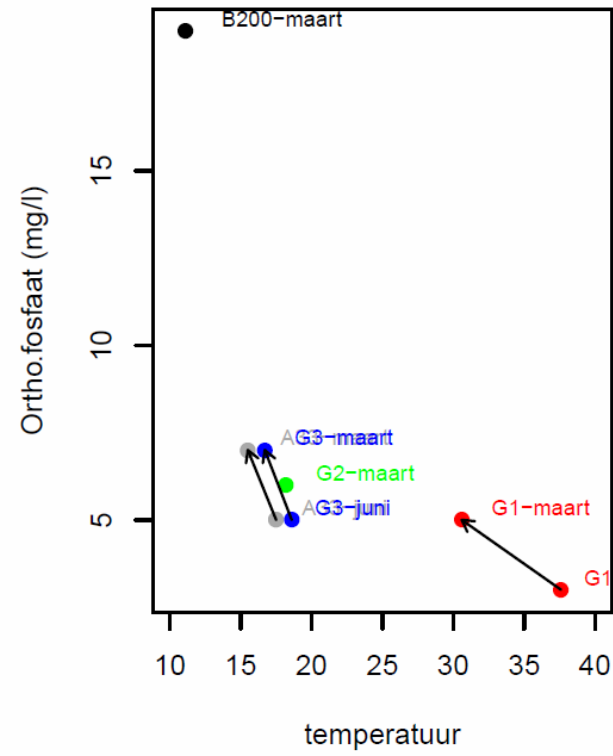
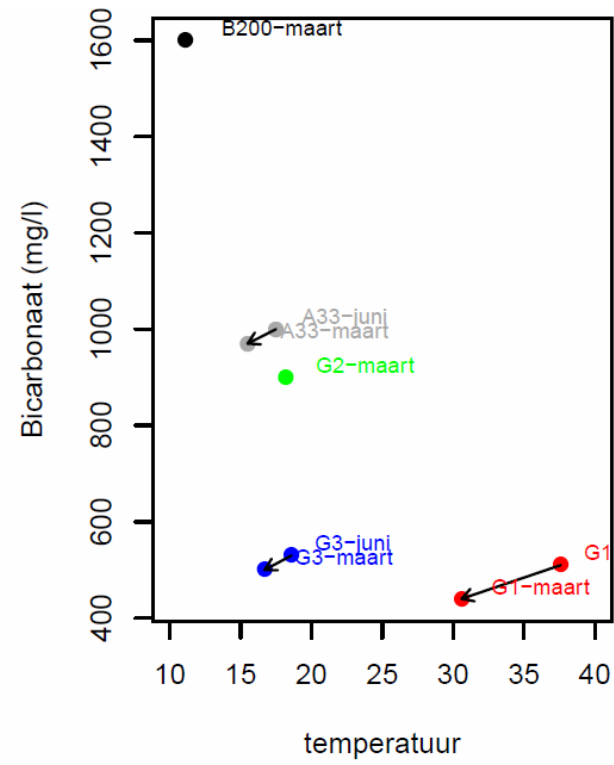


Figuur 48. Gemeten EC in de diepe filters van de warme (W) en koude bron (K) en de meetput bij Provinciehuis Flevoland

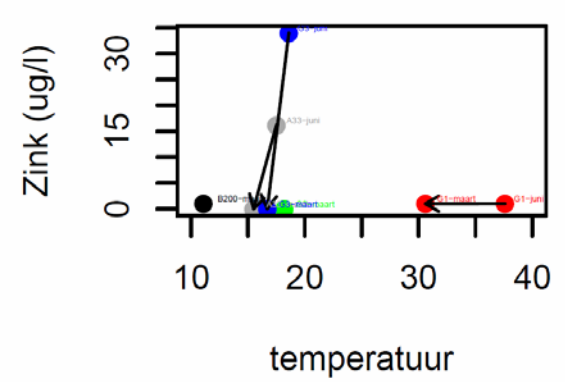
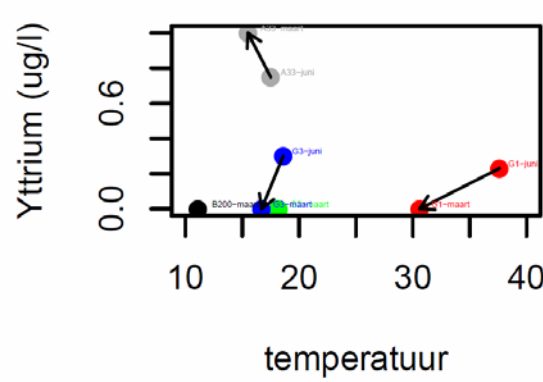
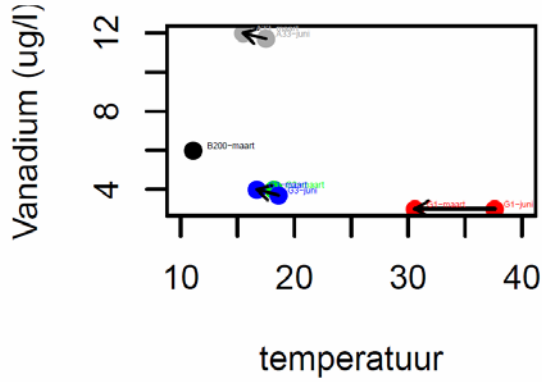
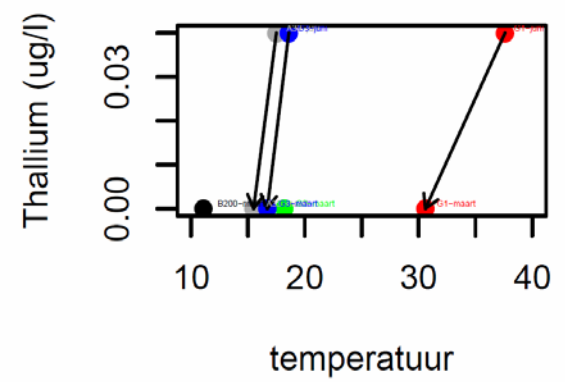
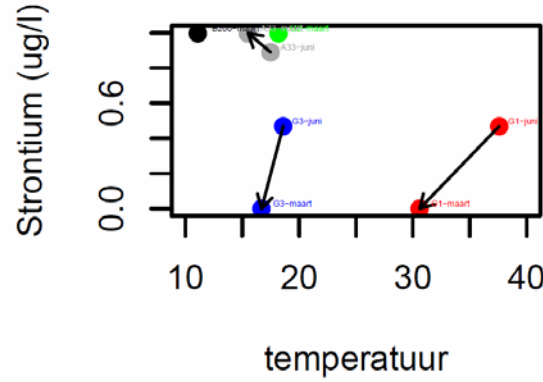
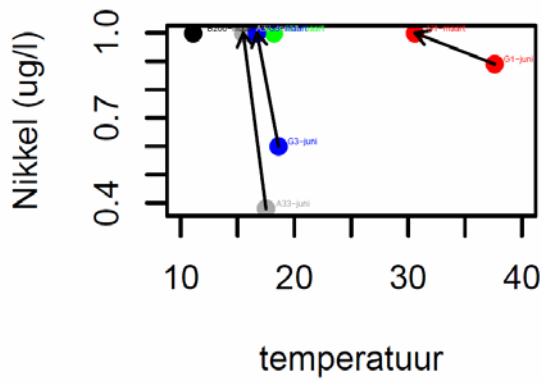
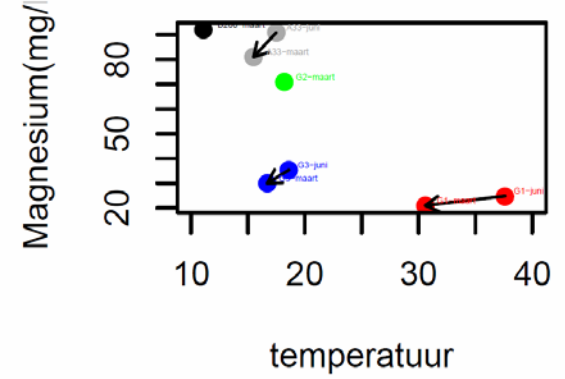
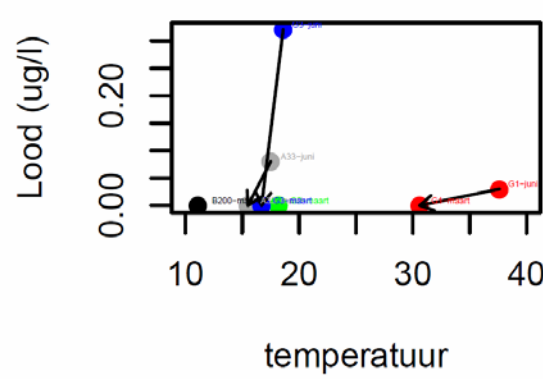
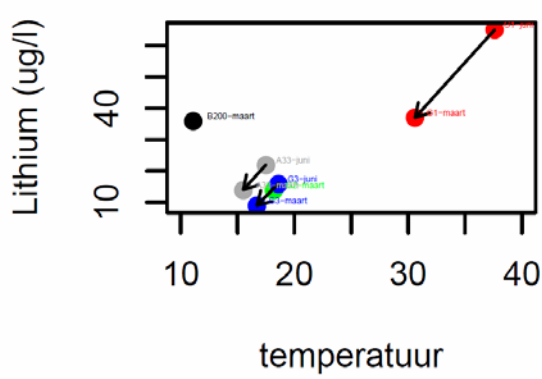
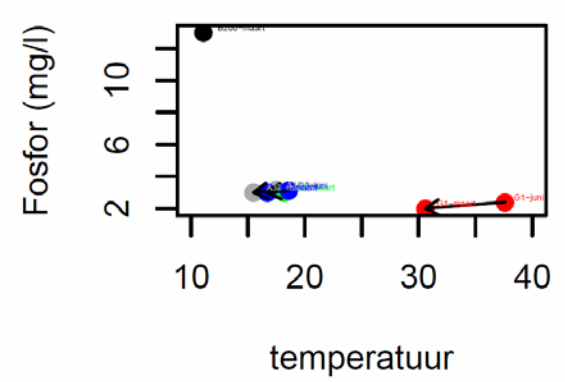
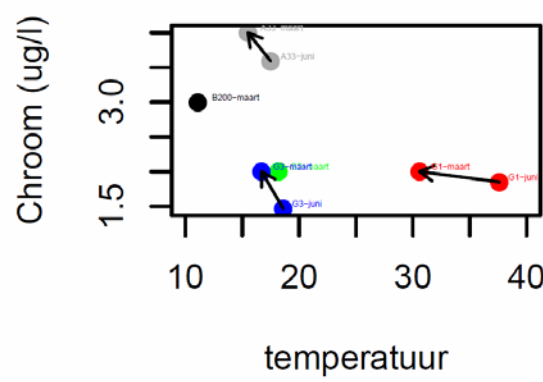
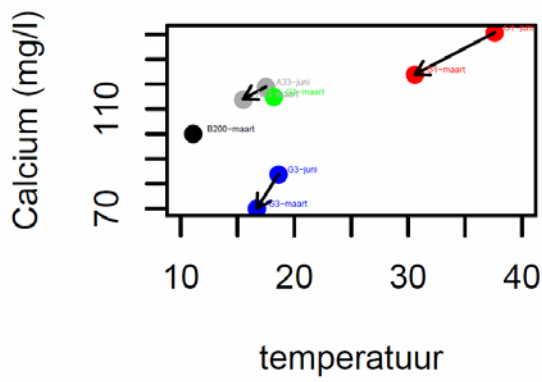
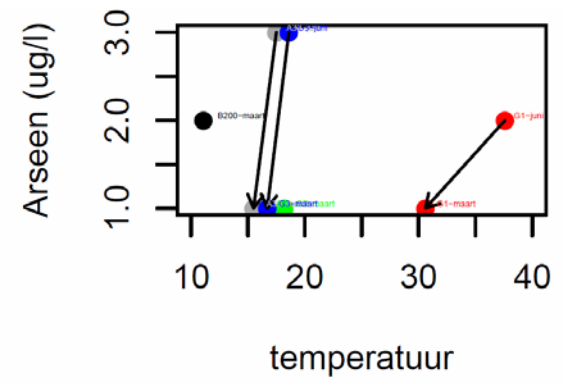
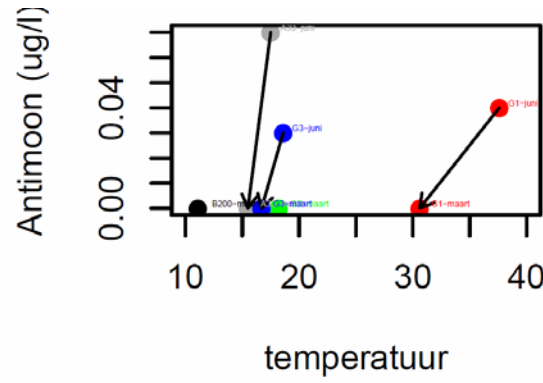
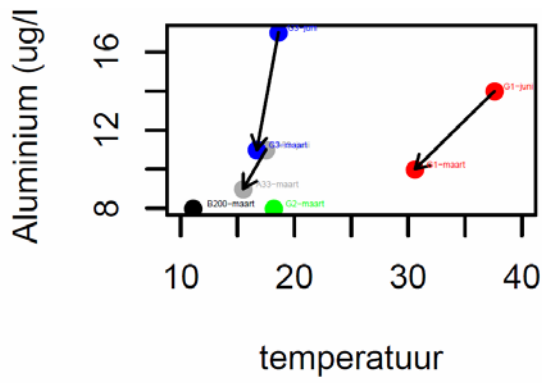
Bijlage III

Resultaten per locatie

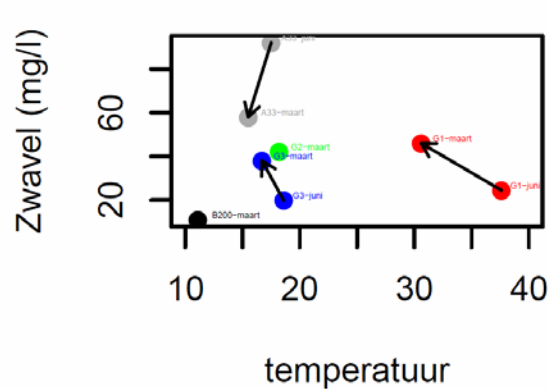
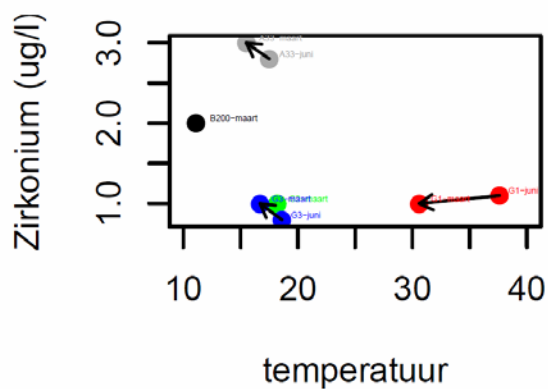
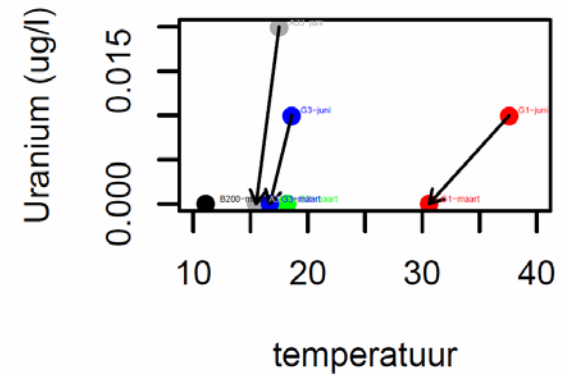
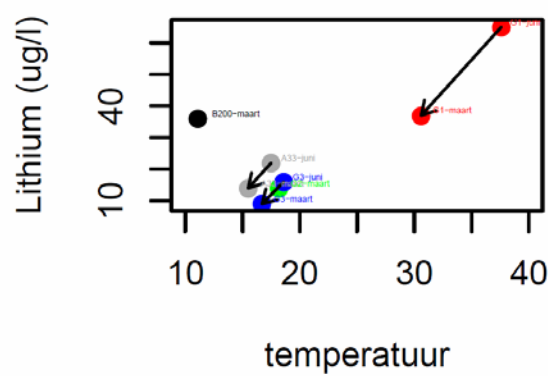
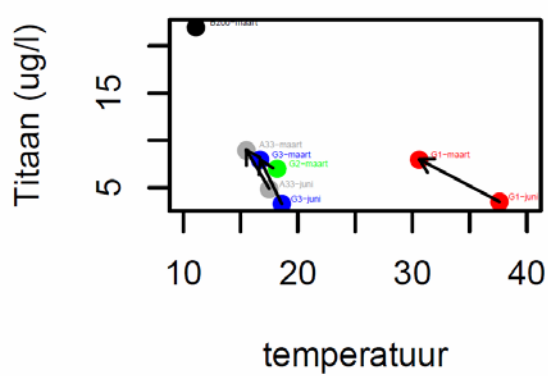
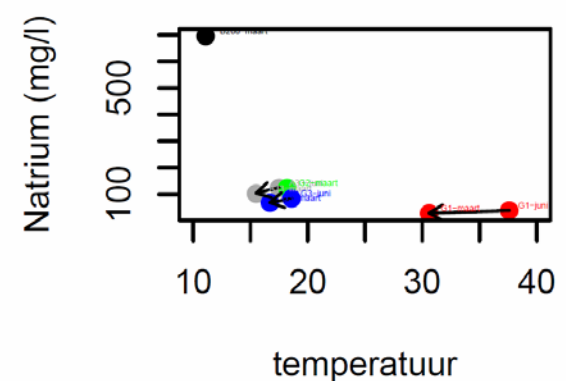
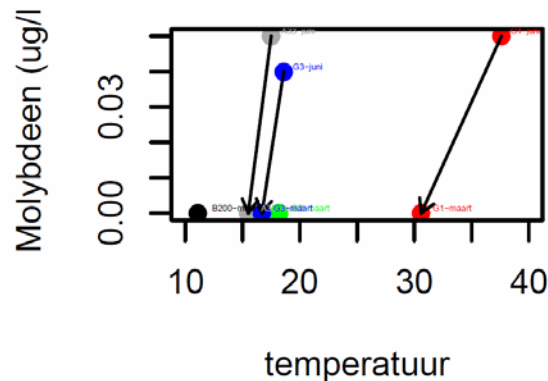
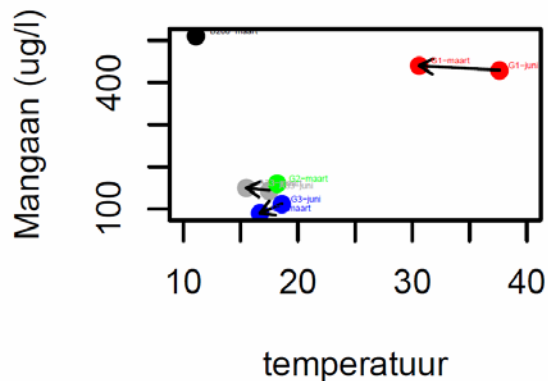
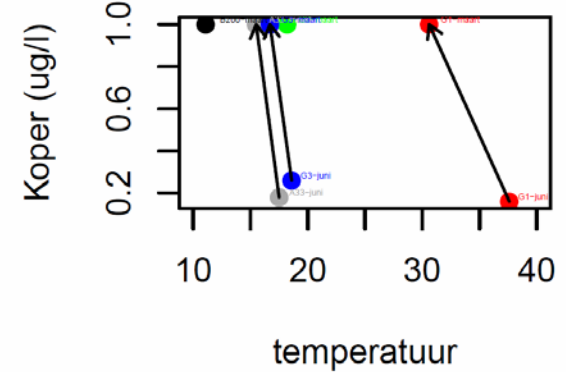
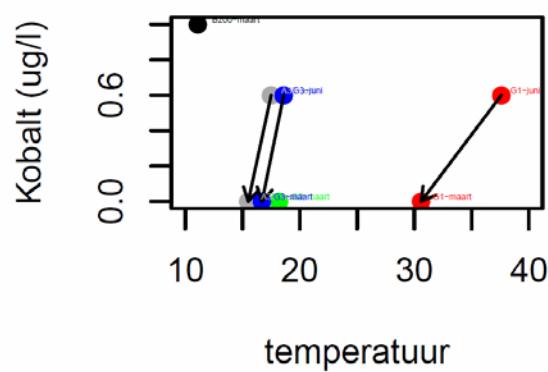
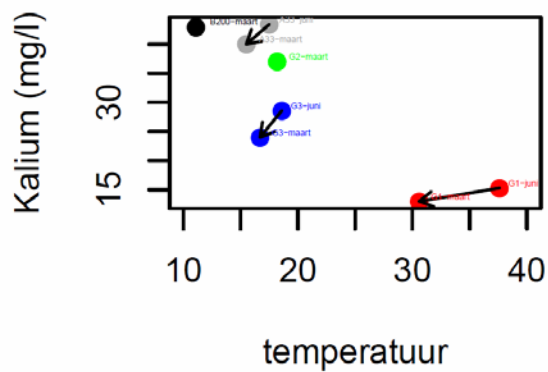
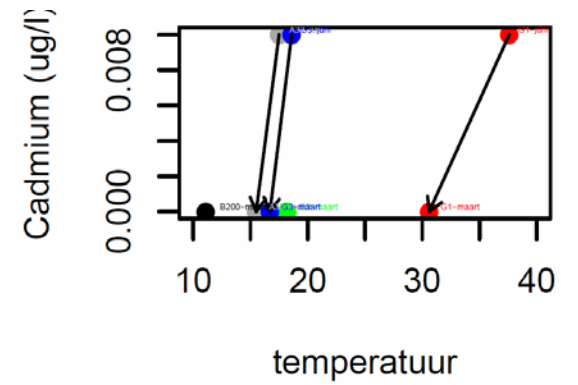
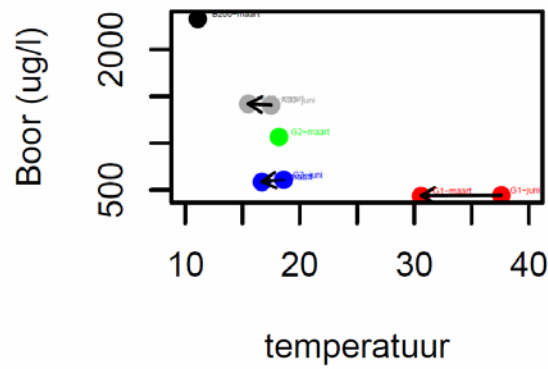
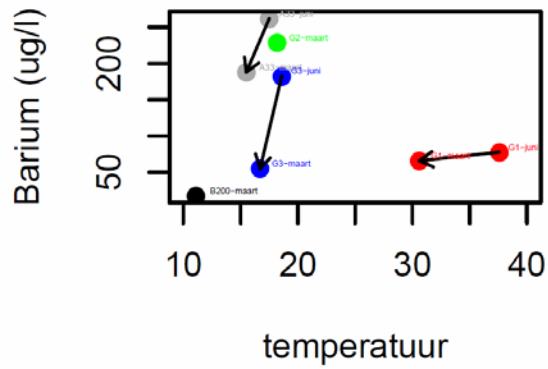
Beijum Algemeen



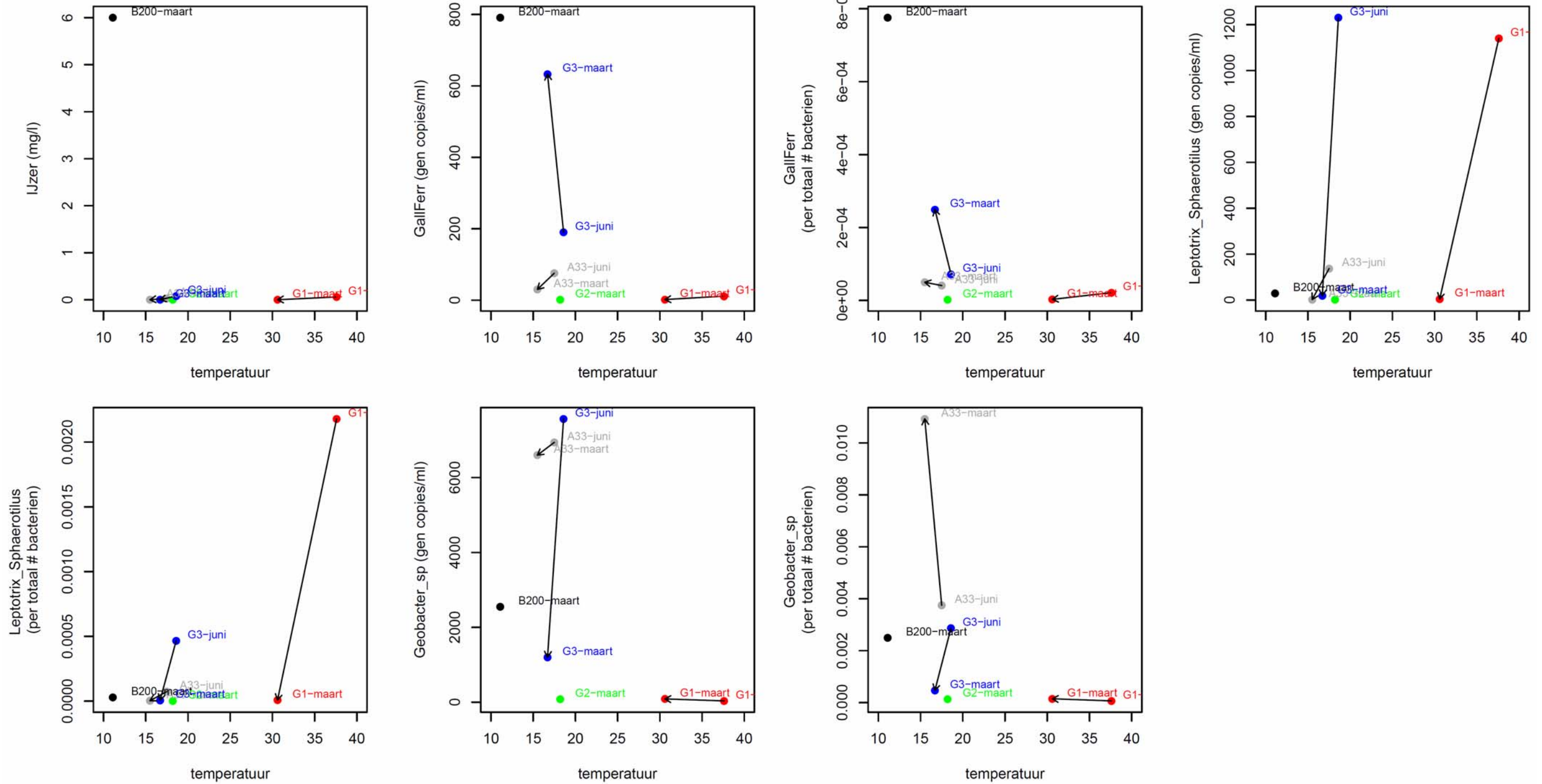
Beijum Elementen



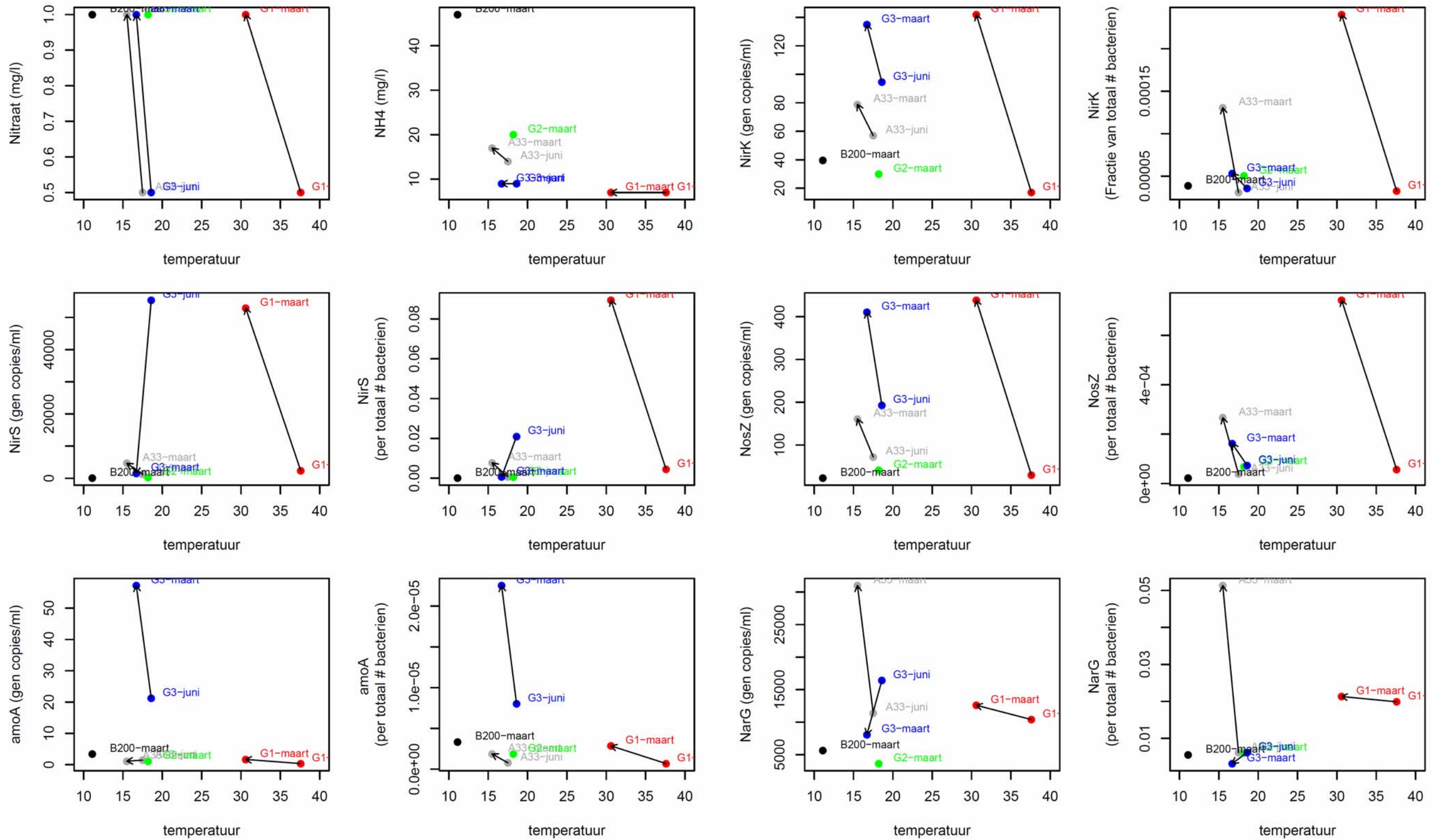
Beijum Elementen



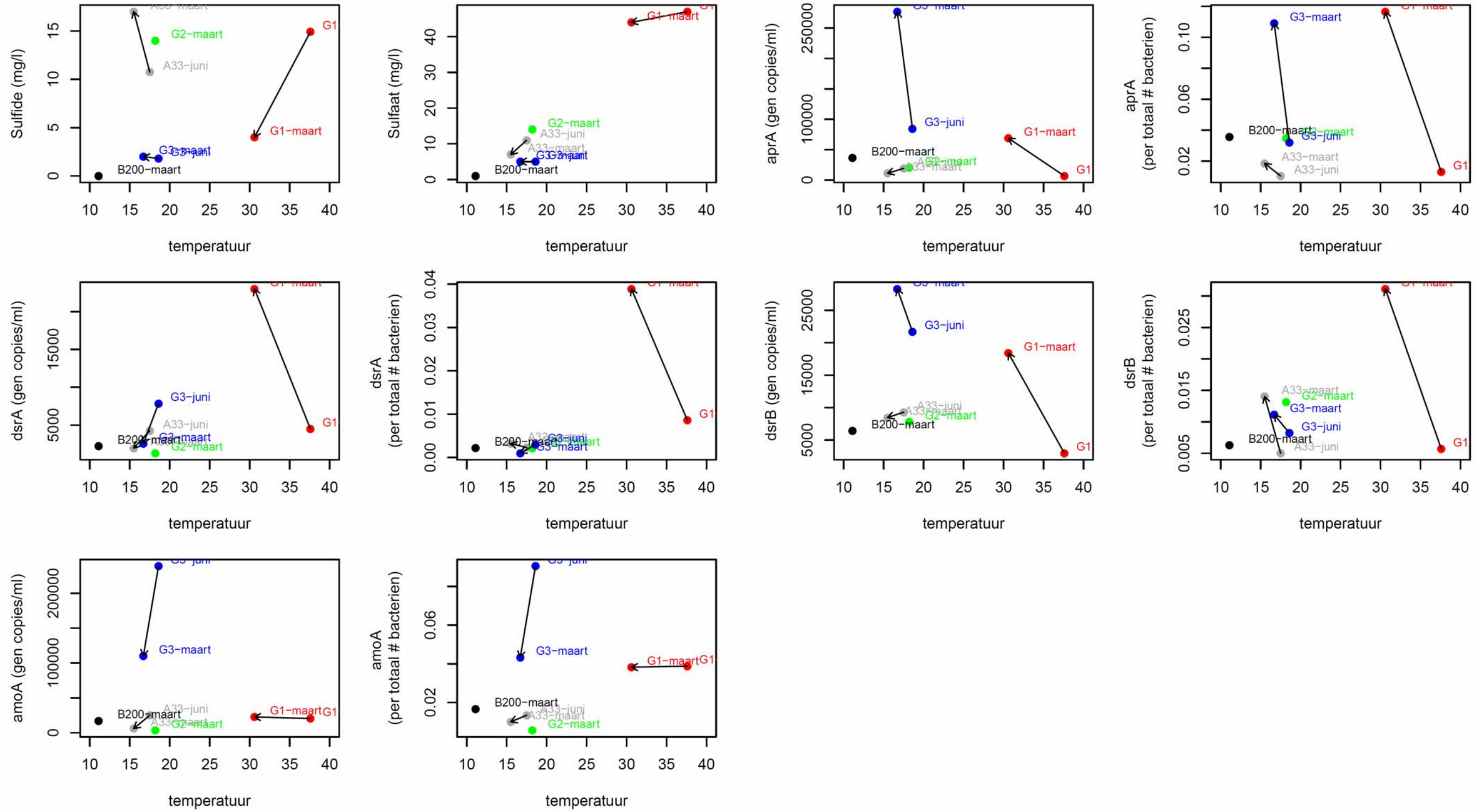
Buijum ijzer



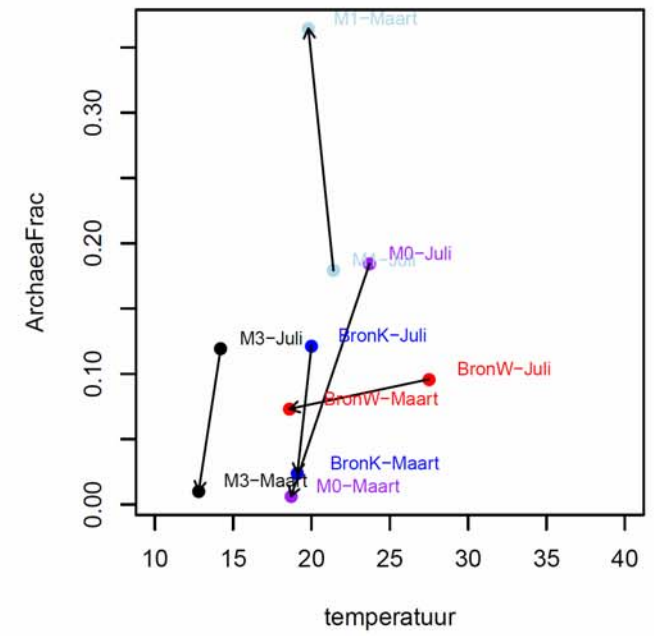
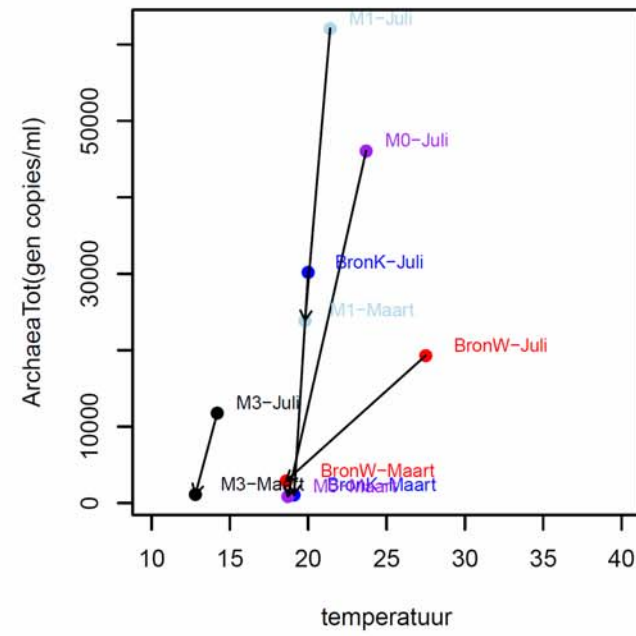
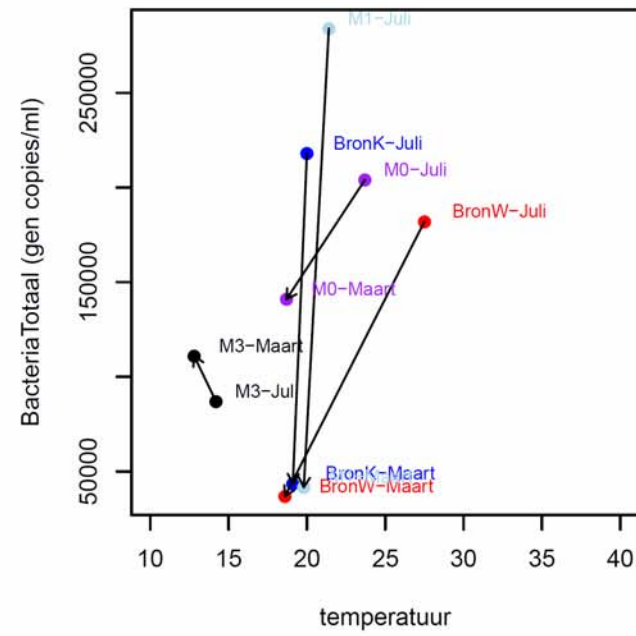
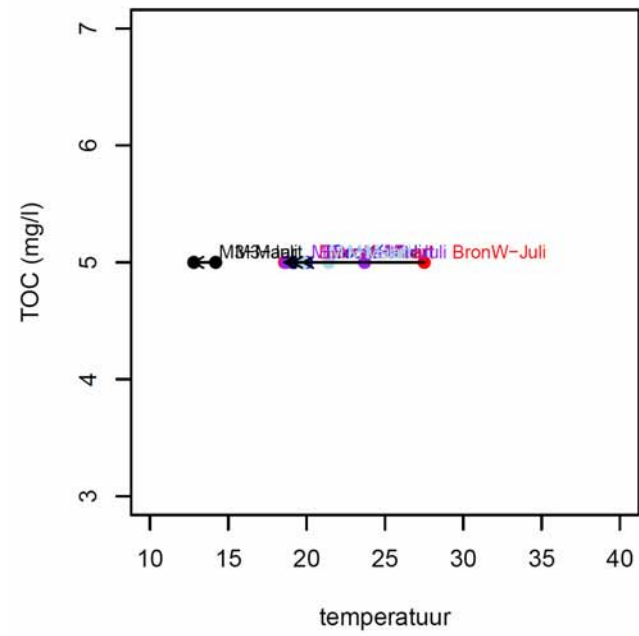
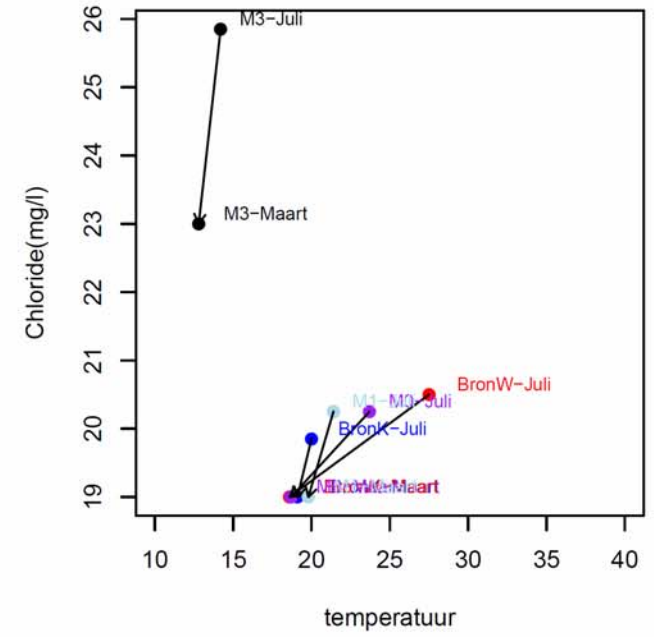
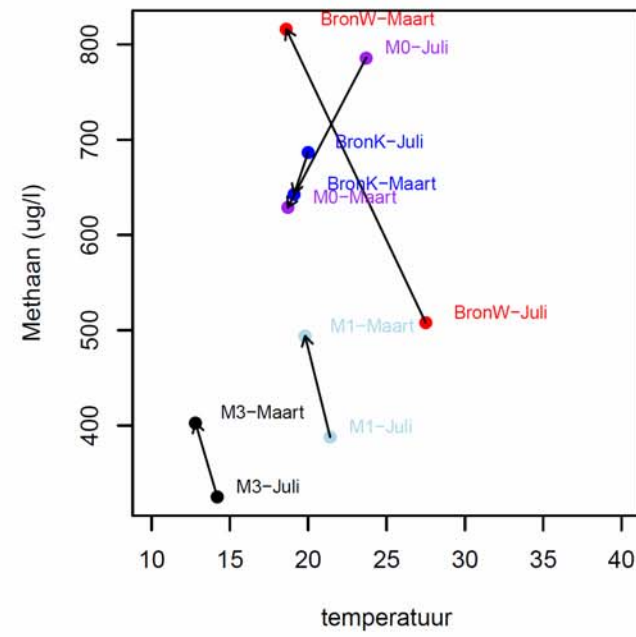
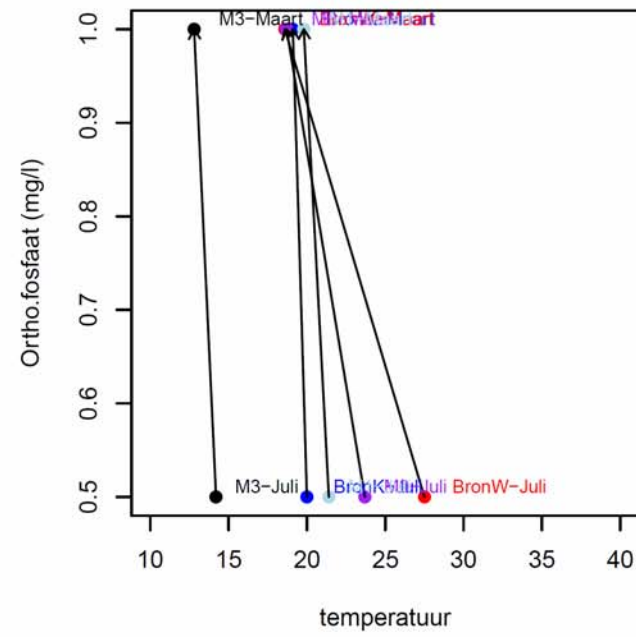
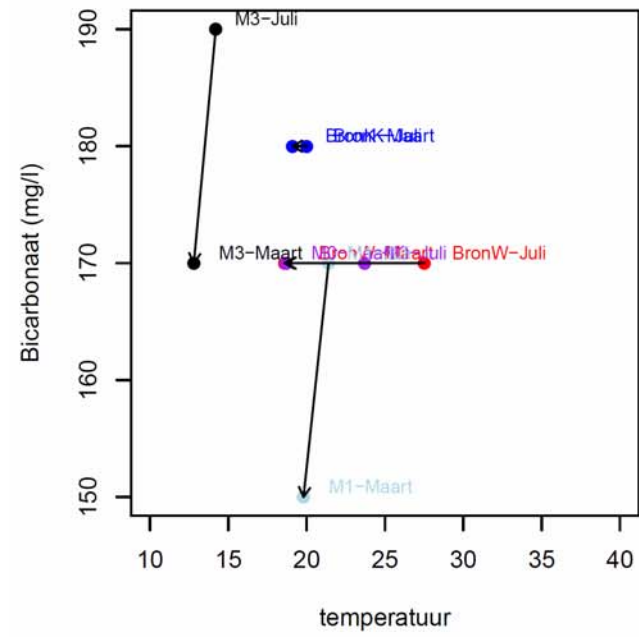
Beijum stikstof



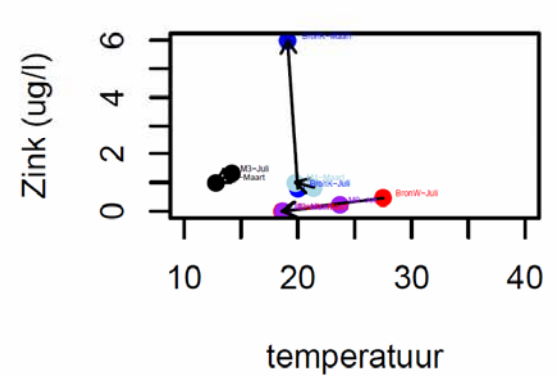
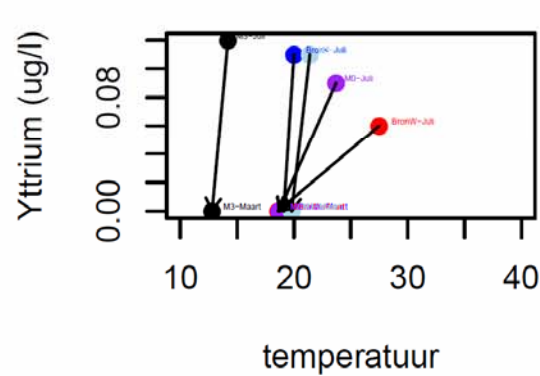
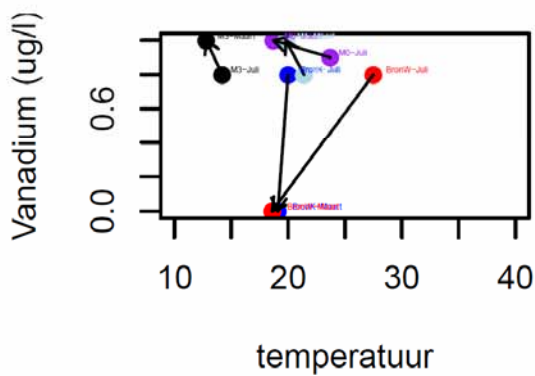
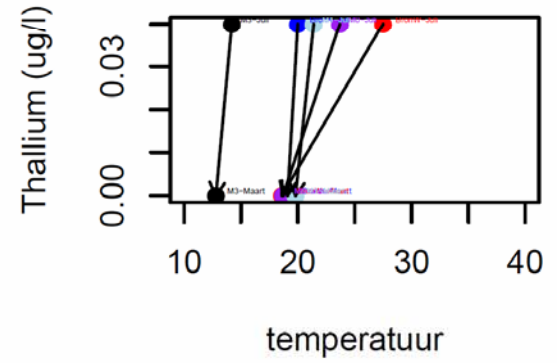
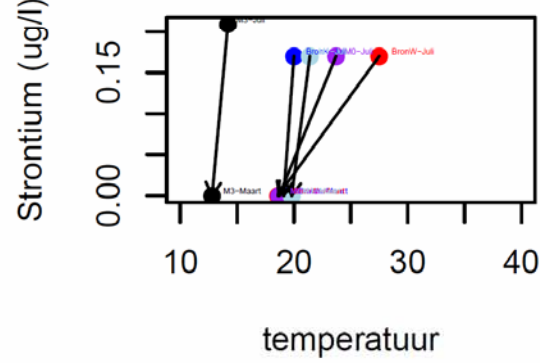
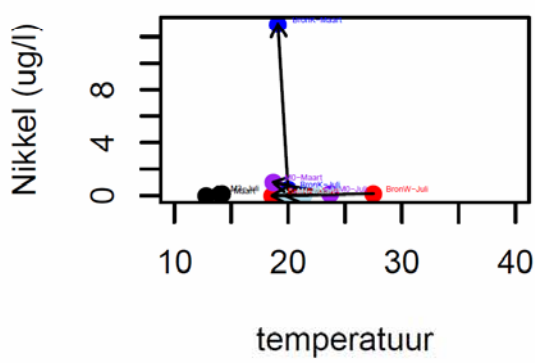
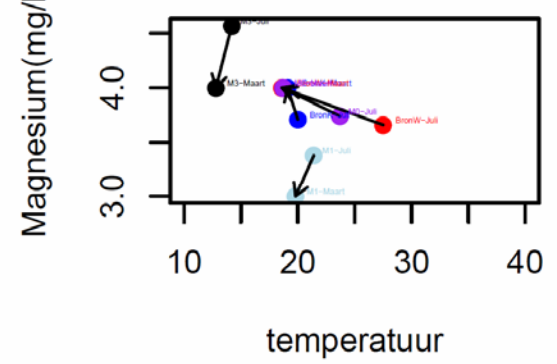
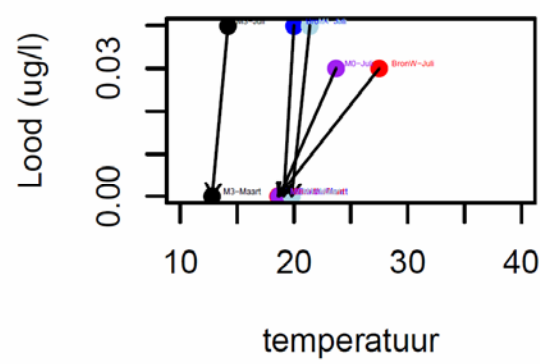
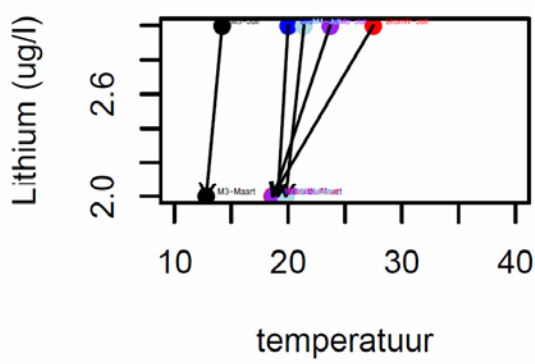
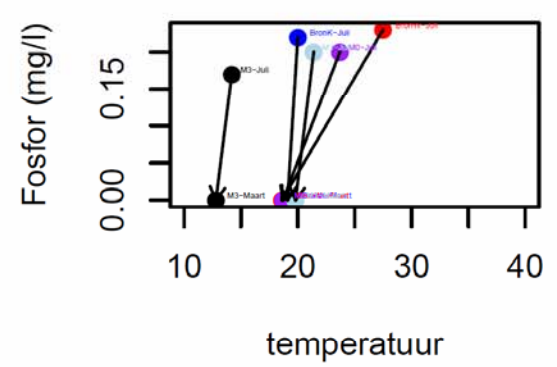
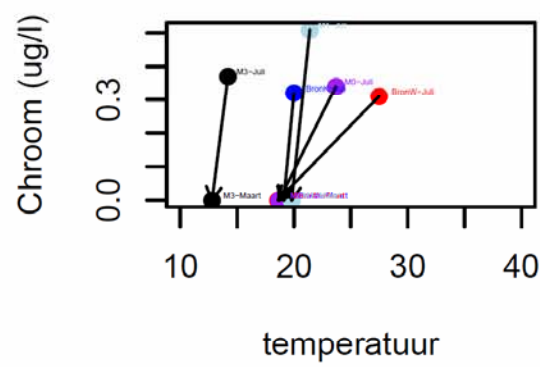
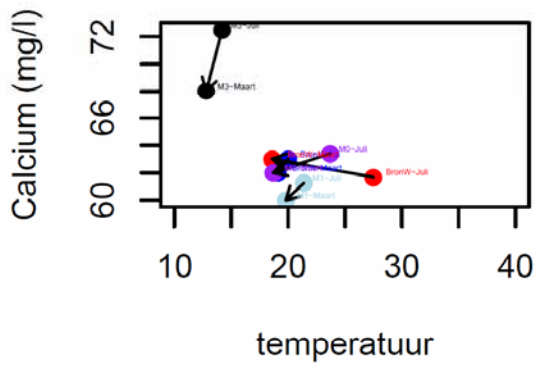
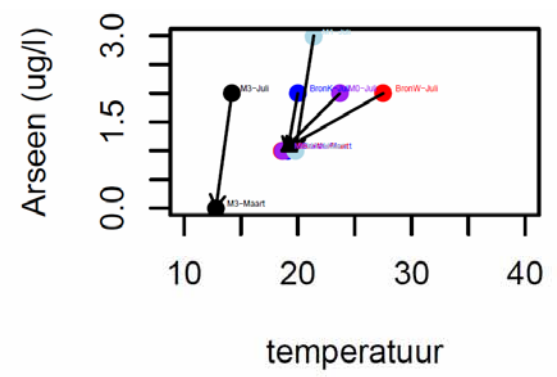
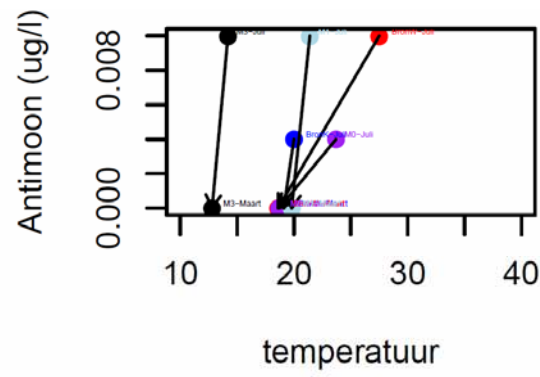
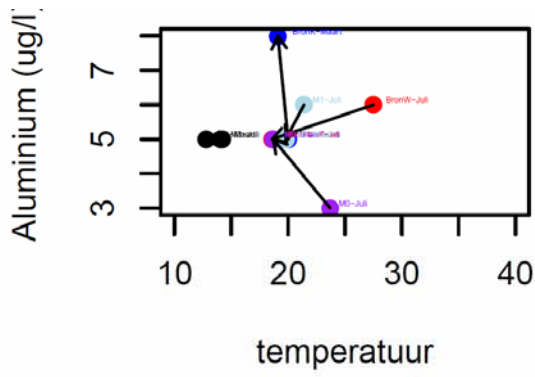
Beijum zwavel



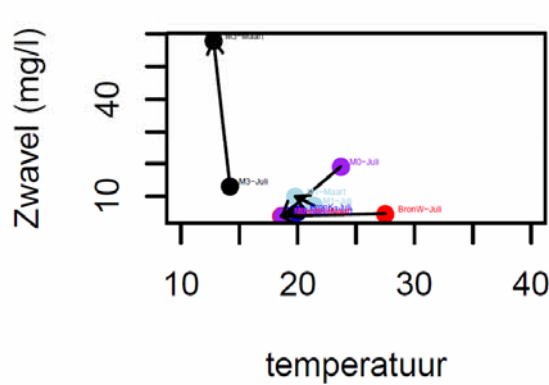
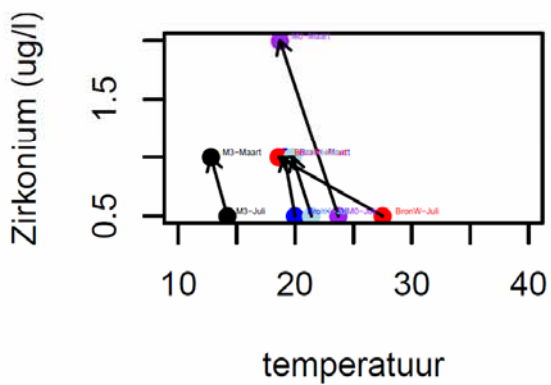
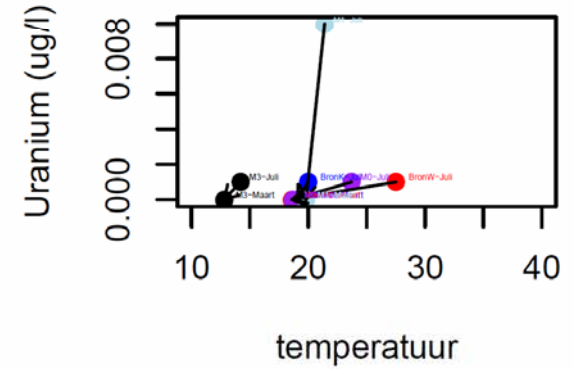
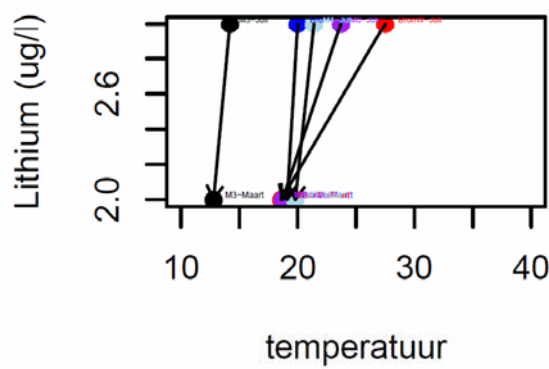
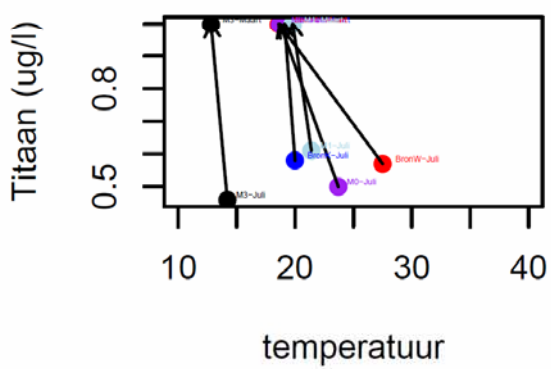
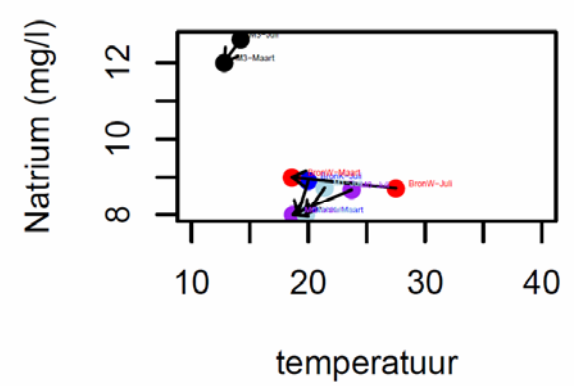
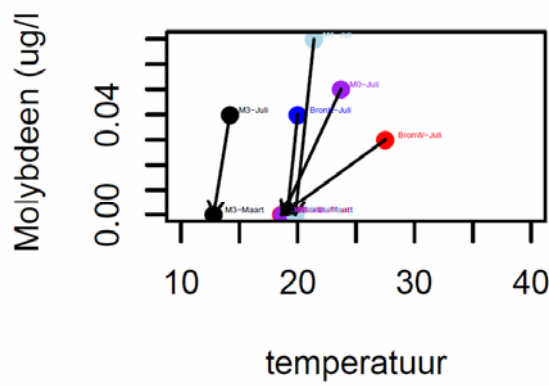
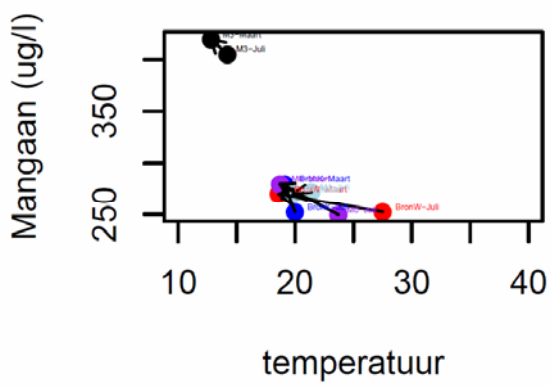
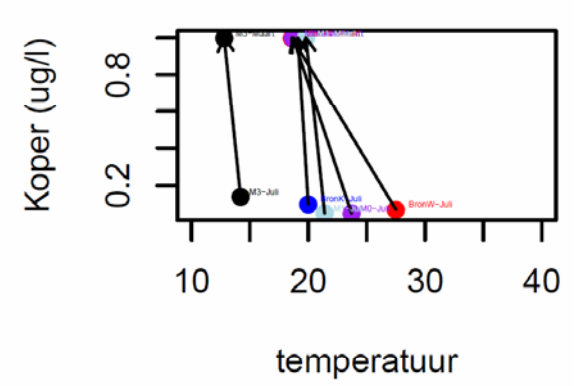
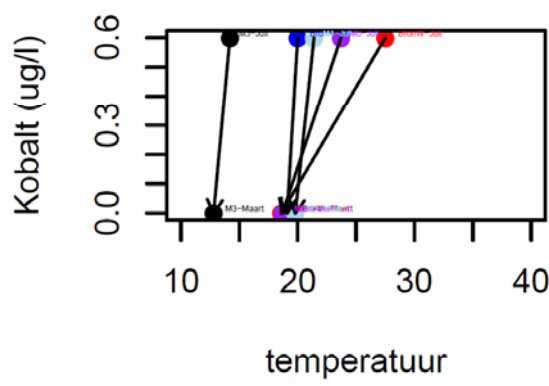
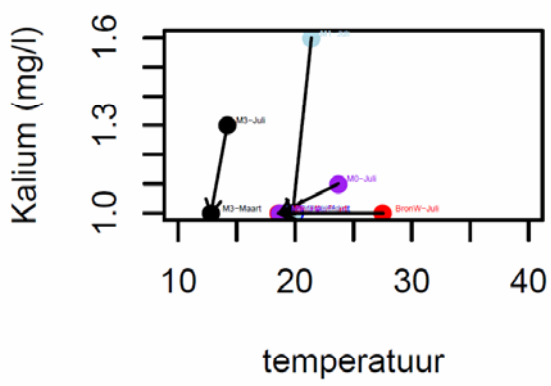
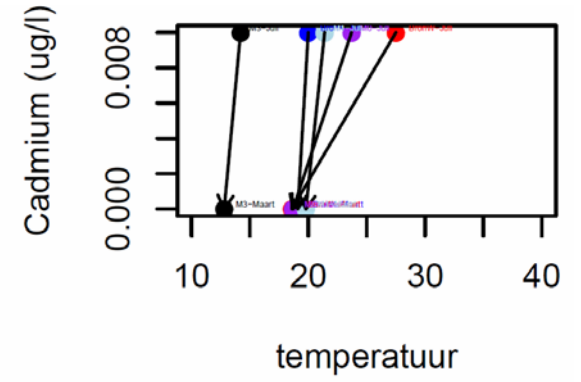
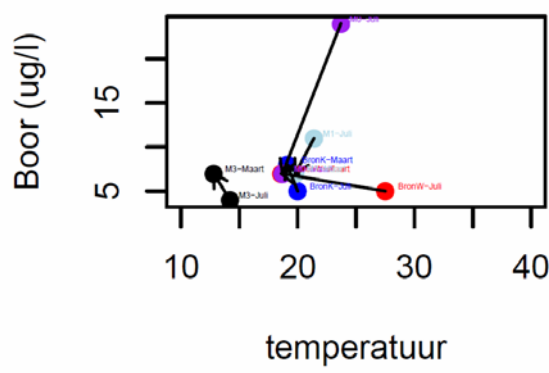
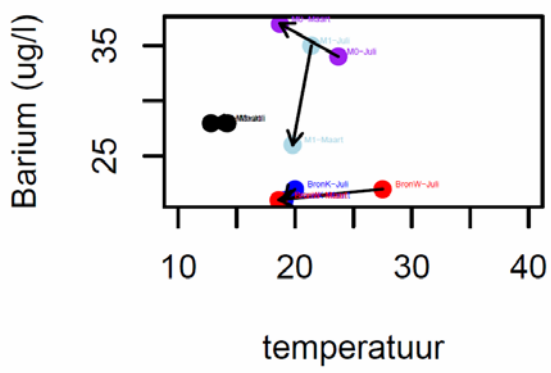
Heuvelgalerie algemeen



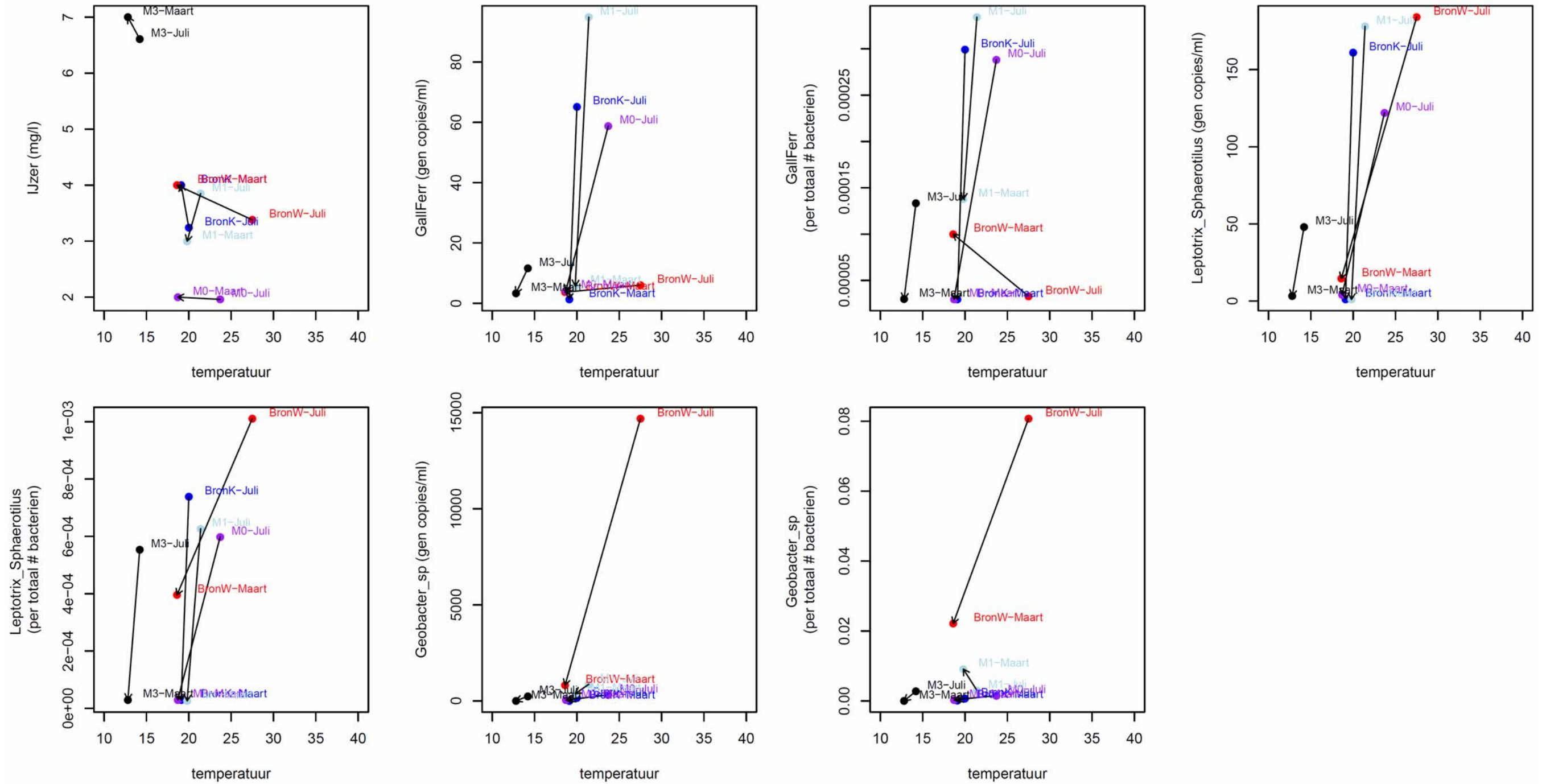
Heuvelgalerie elementen



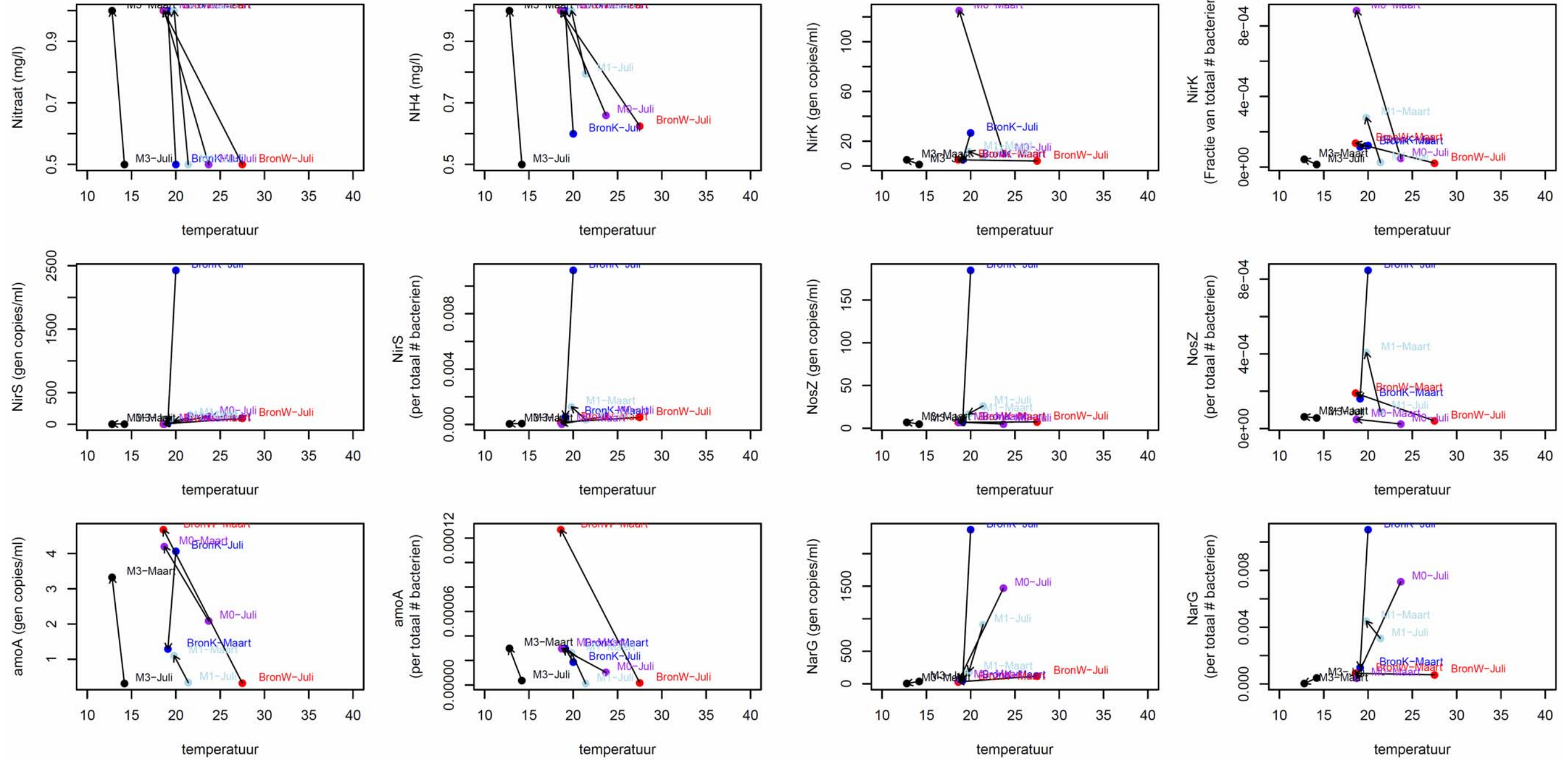
Heuvelgalerie elementen



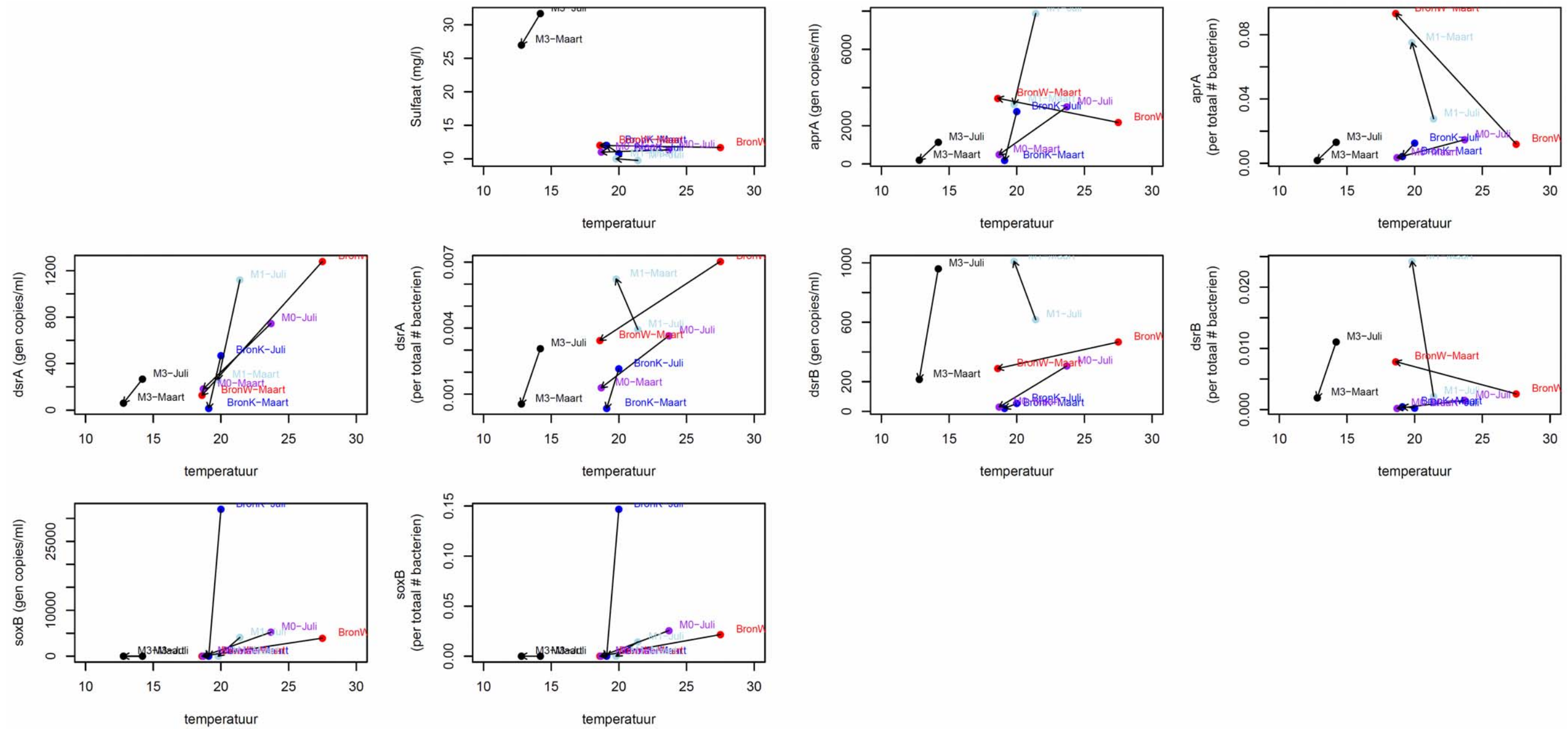
Heuvelgalerie ijzer



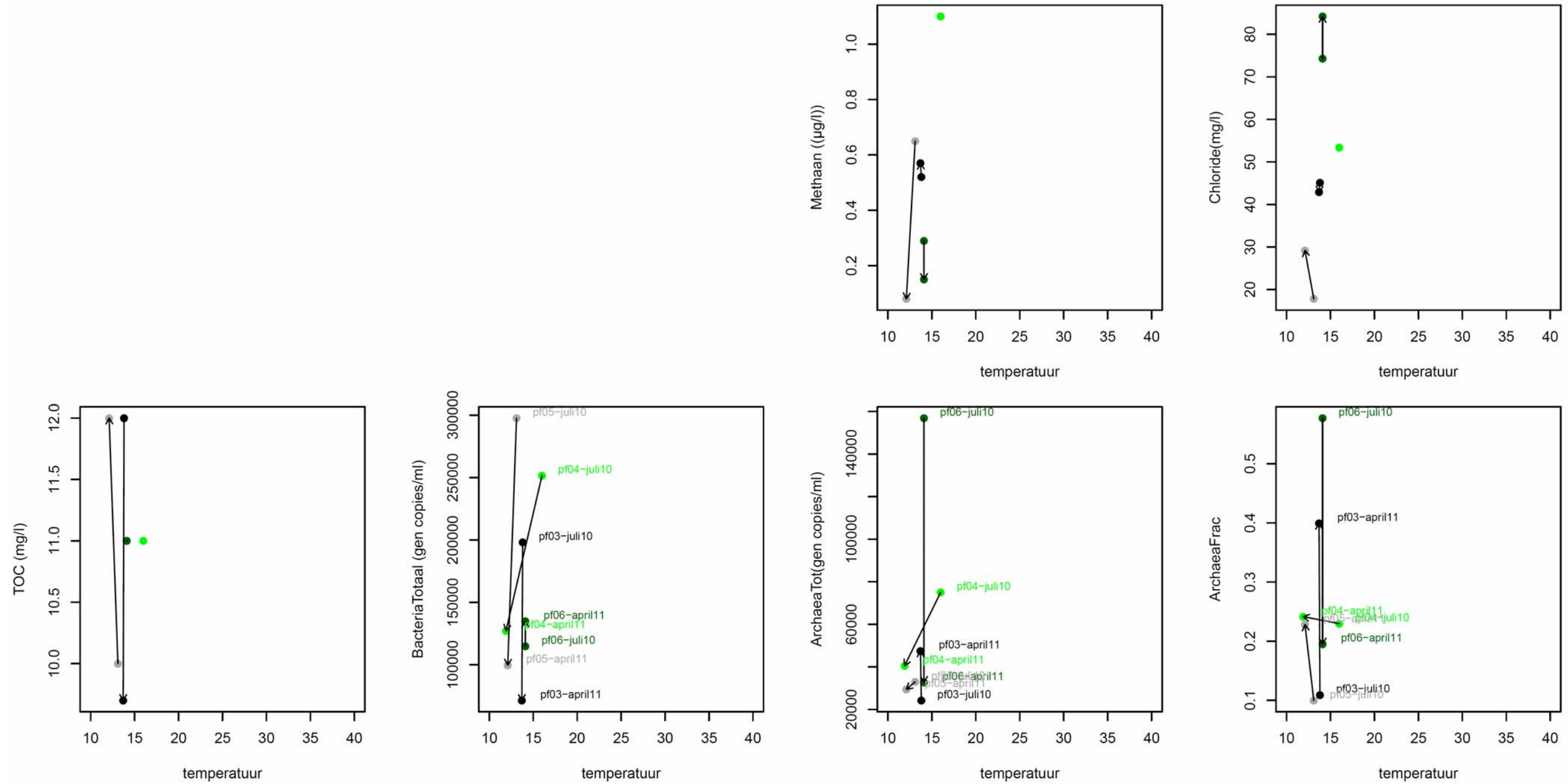
Heuvelgalerie stikstof



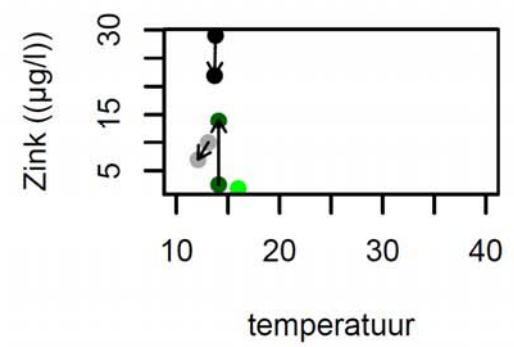
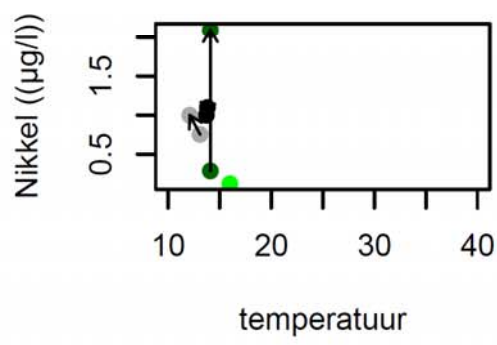
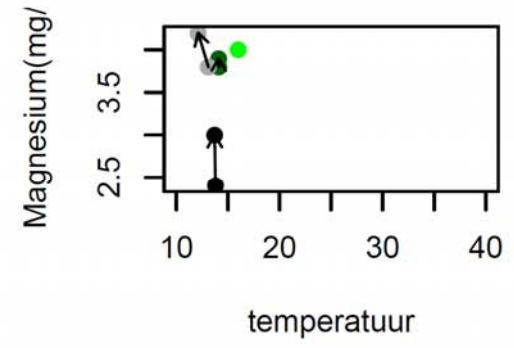
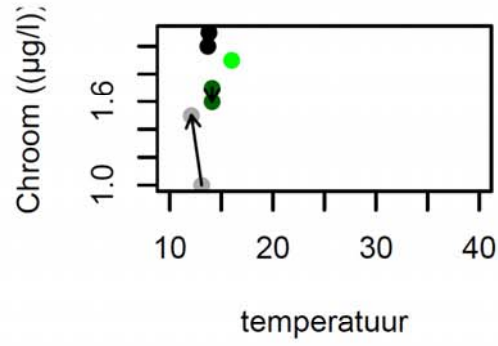
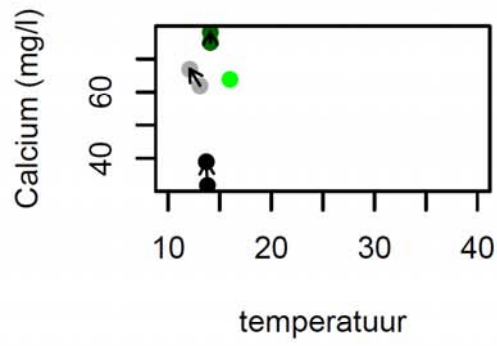
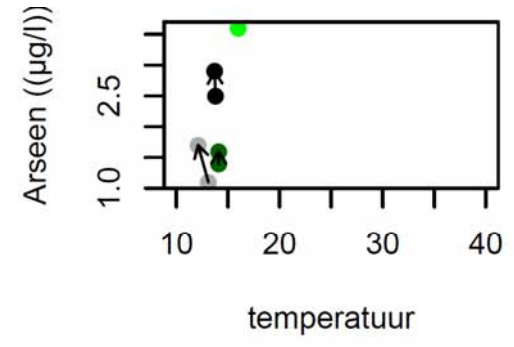
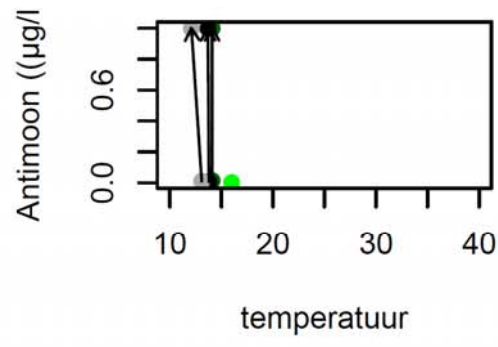
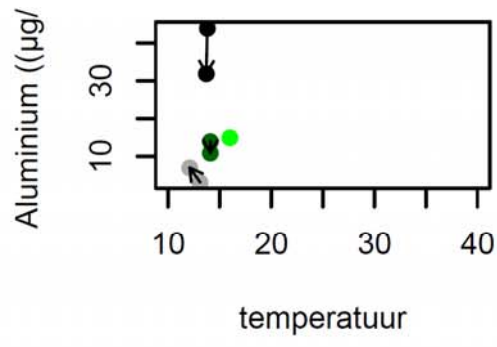
Heuvelgalerie zwavel



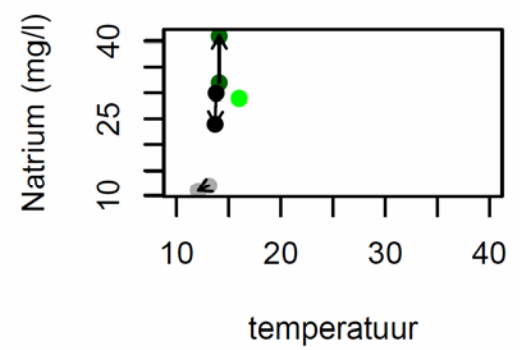
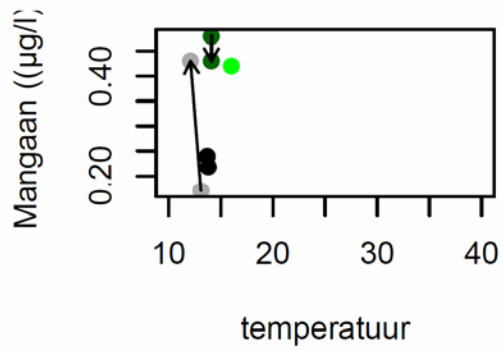
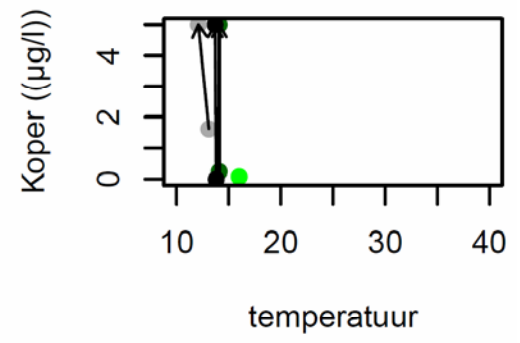
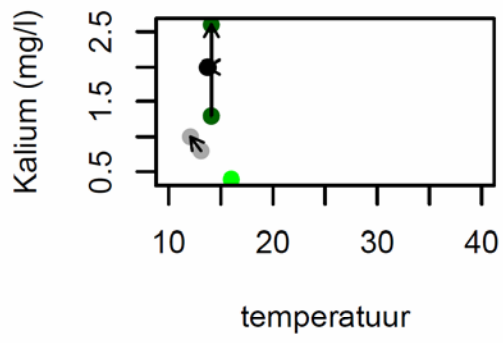
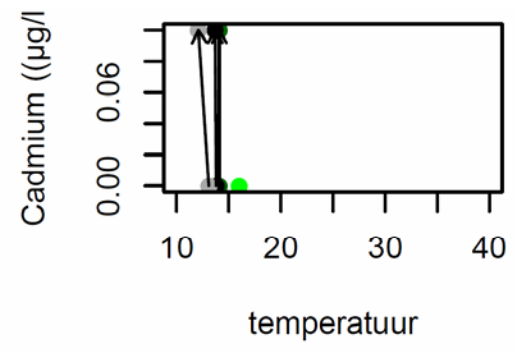
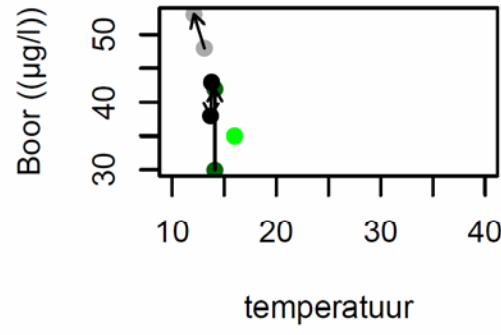
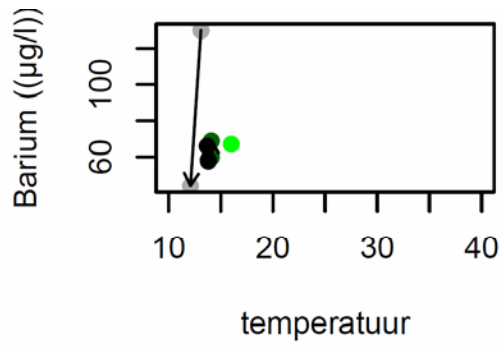
Rosmalen algemeen



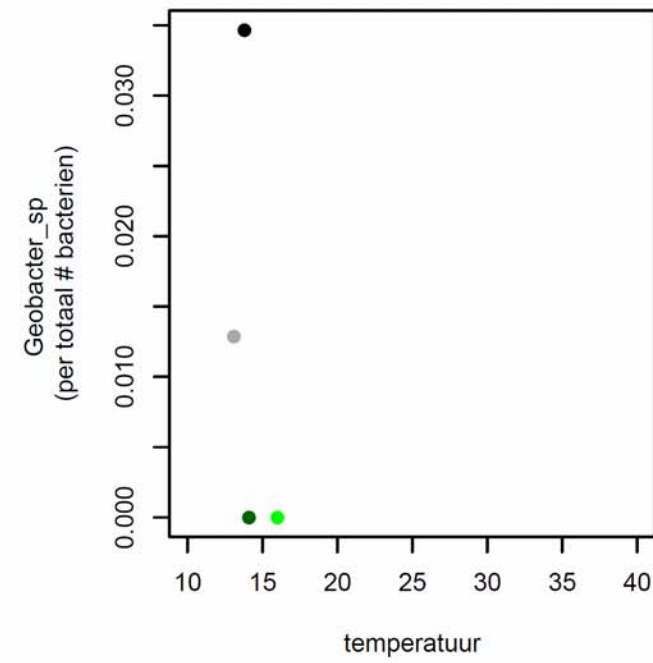
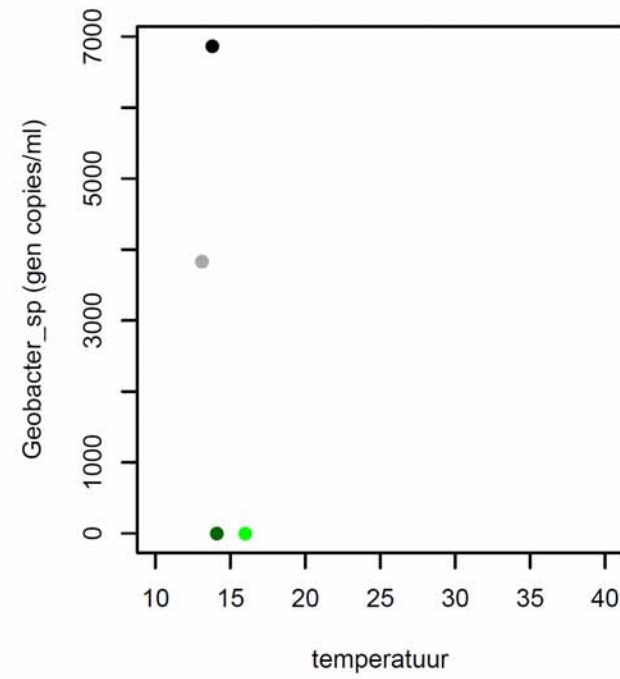
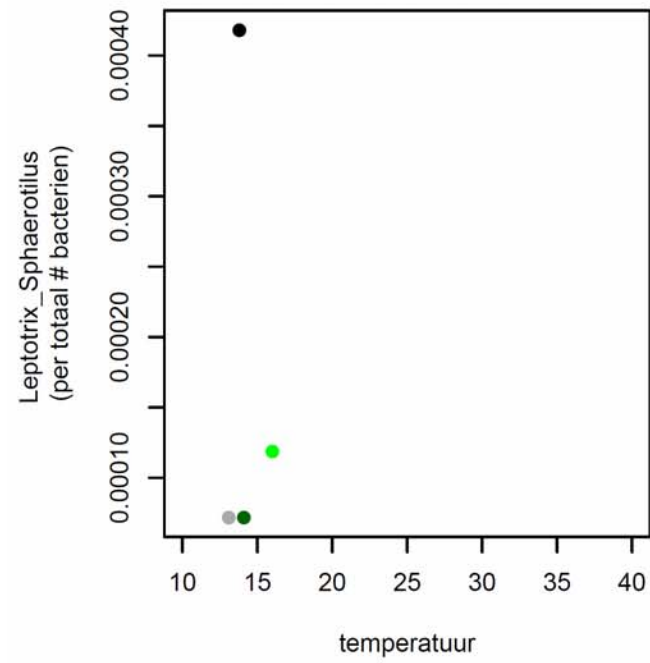
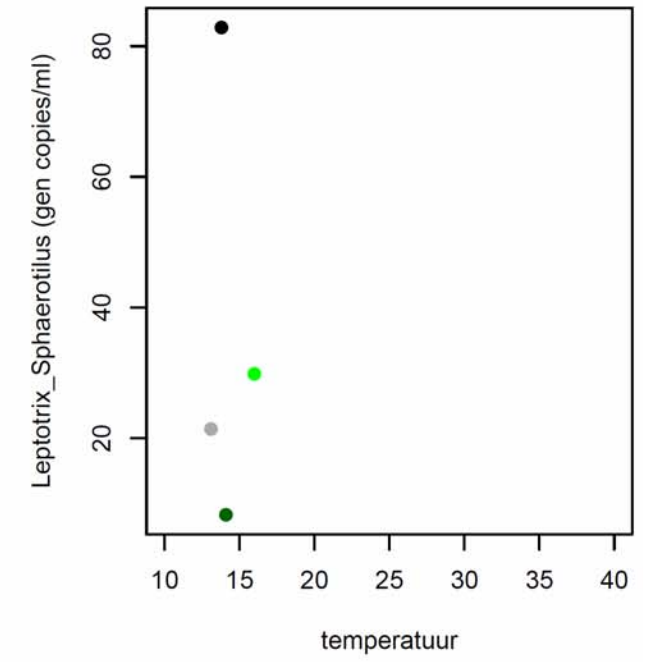
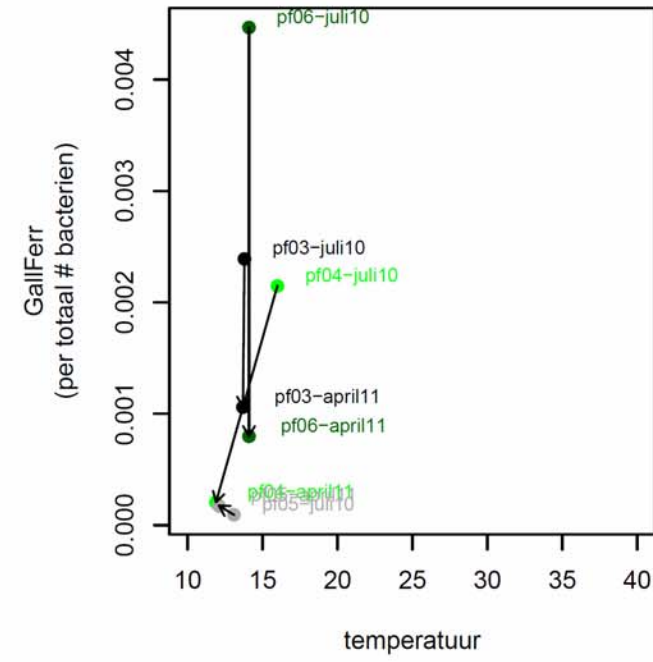
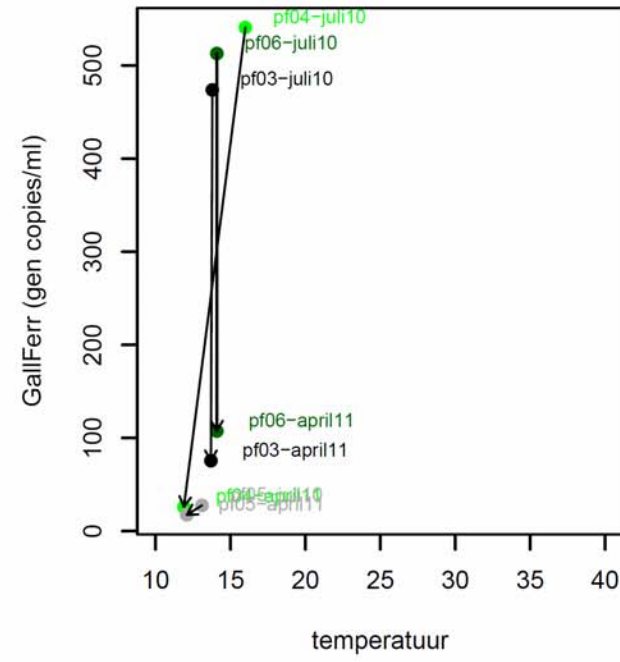
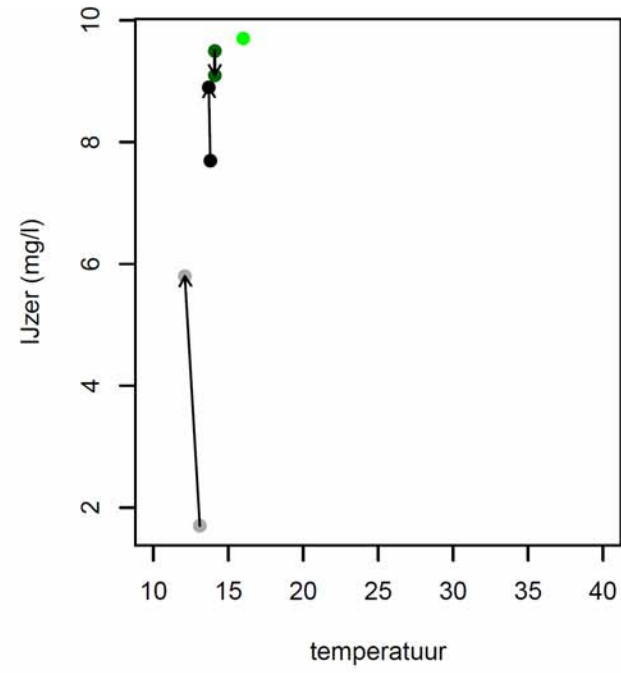
Rosmalen elementen



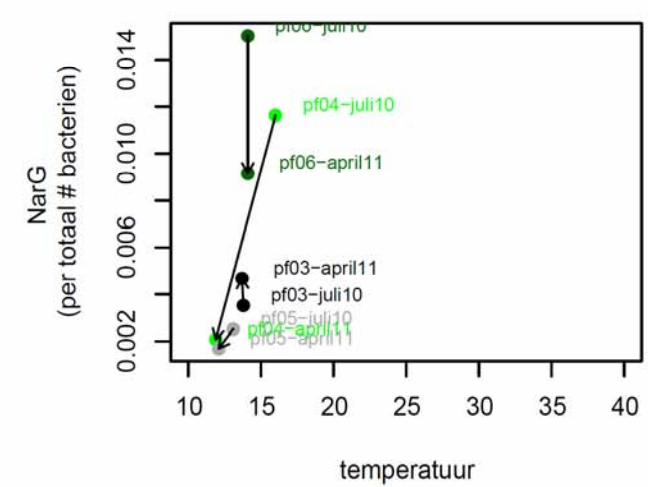
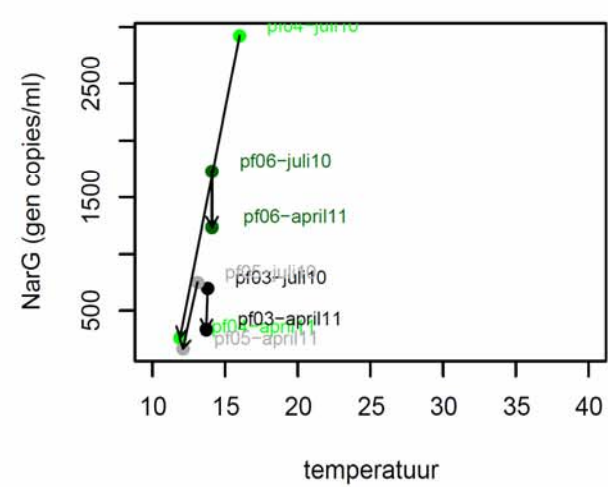
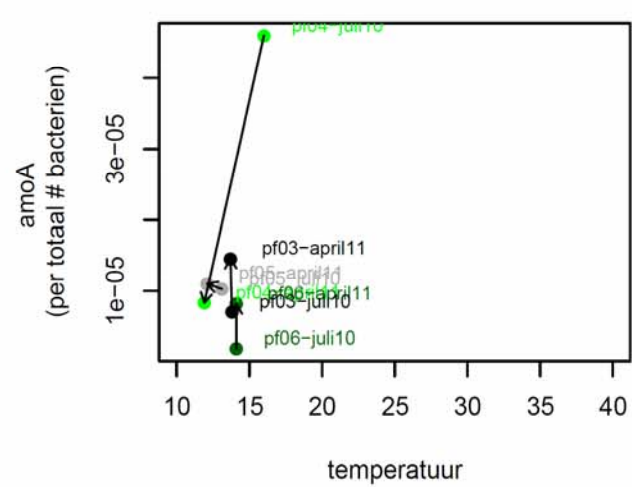
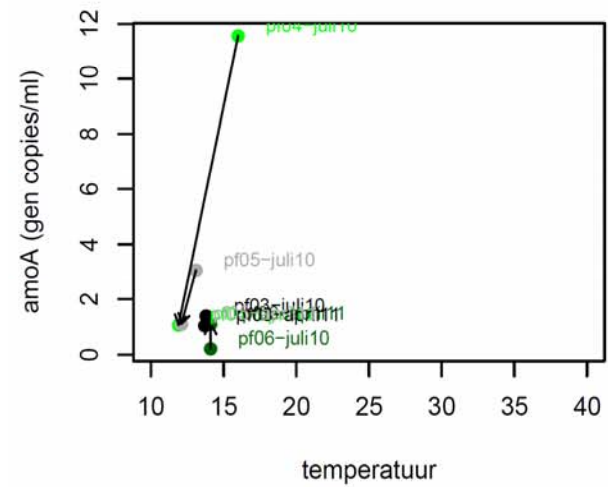
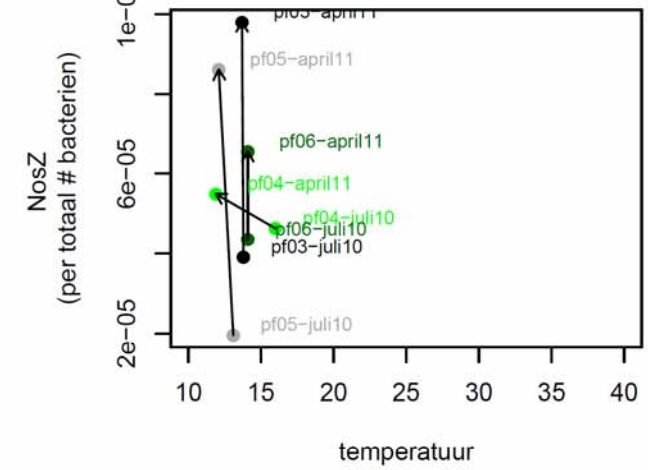
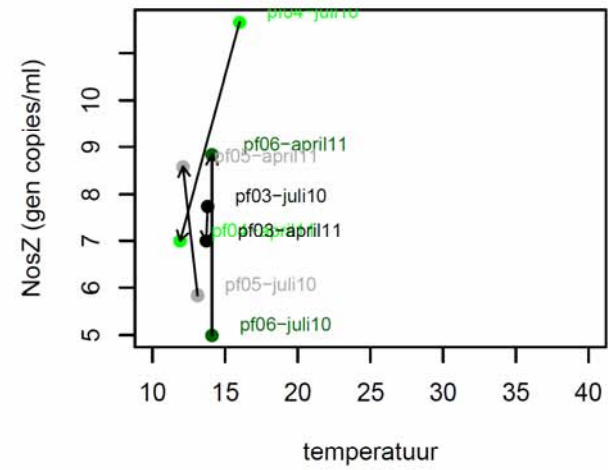
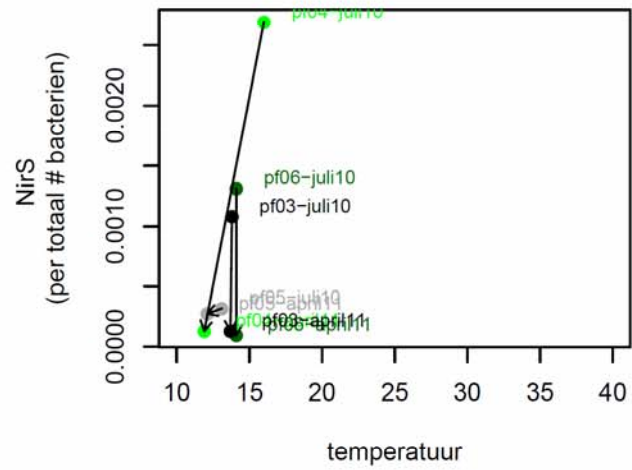
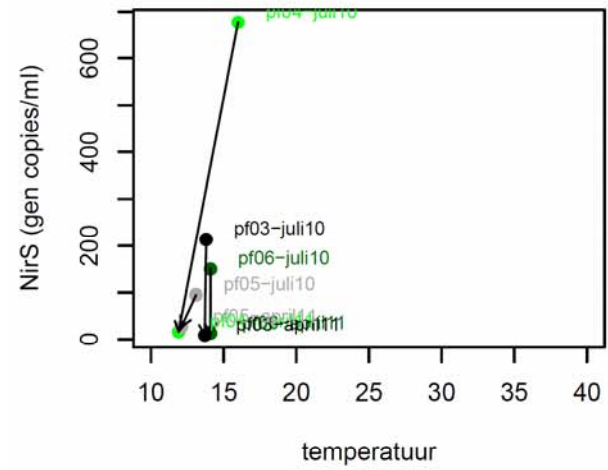
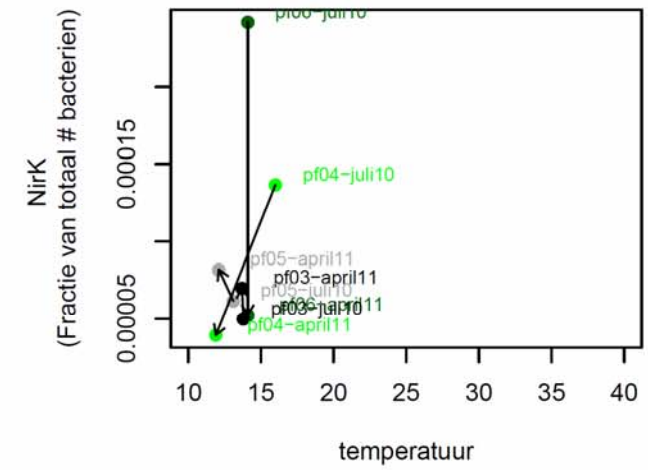
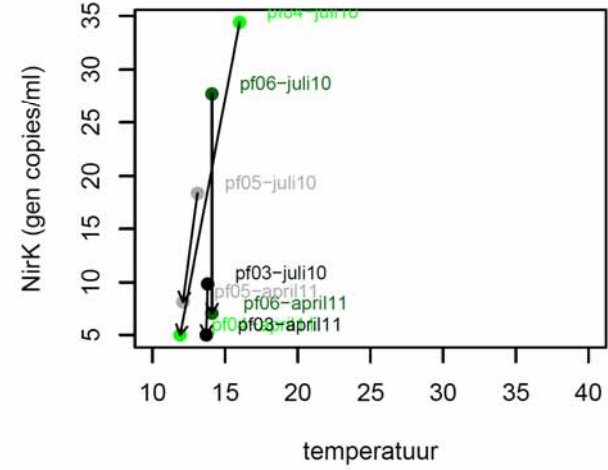
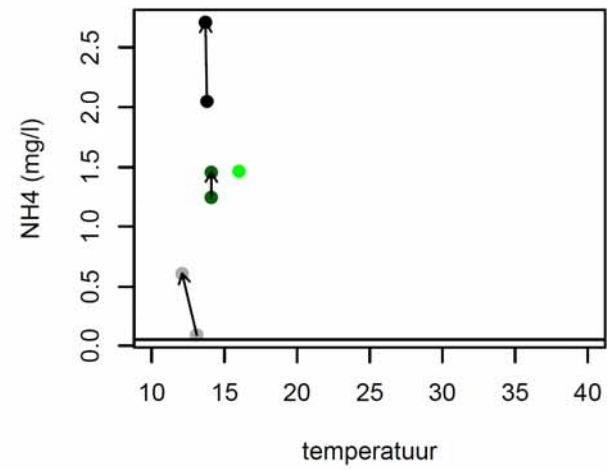
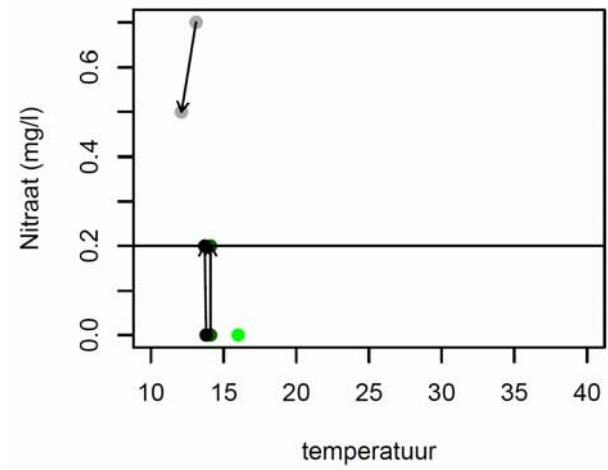
Rosmalen elementen



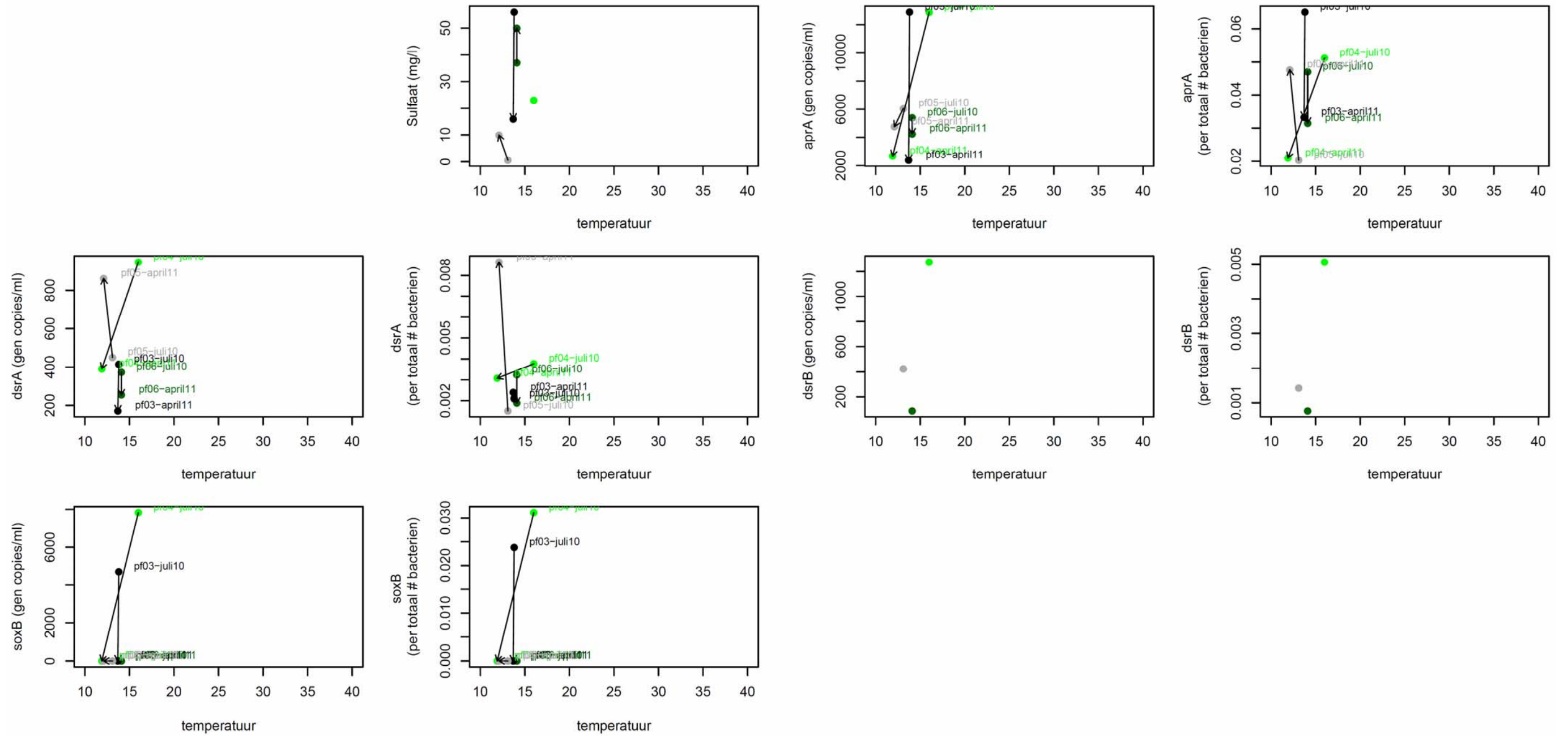
Rosmalen ijzer



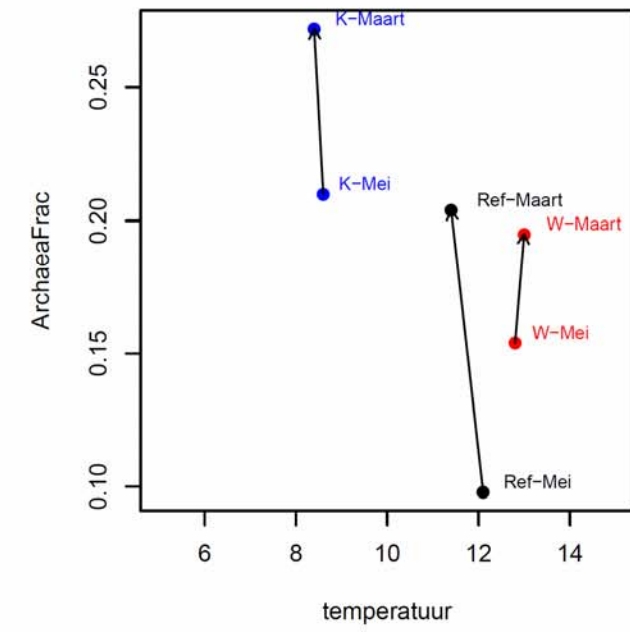
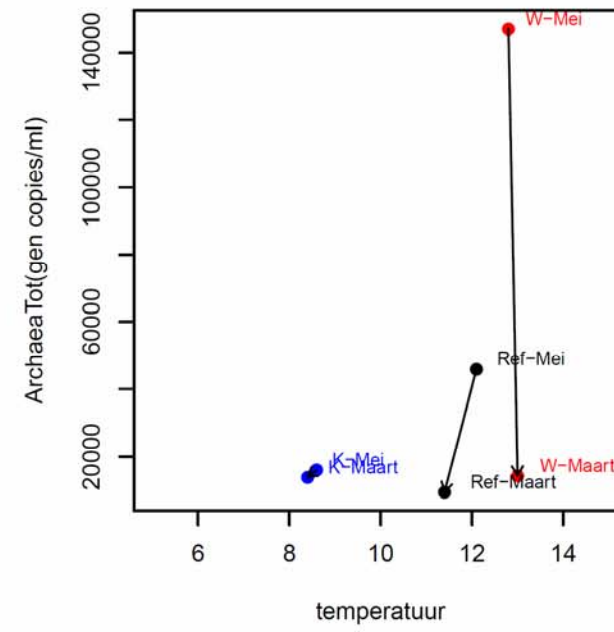
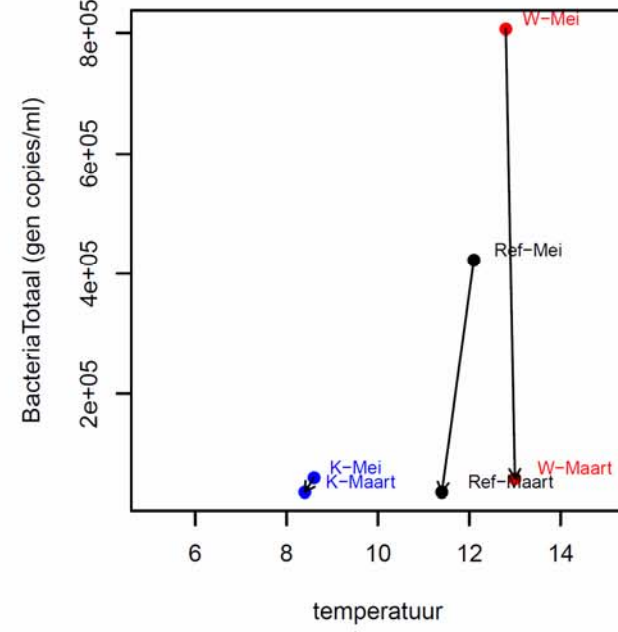
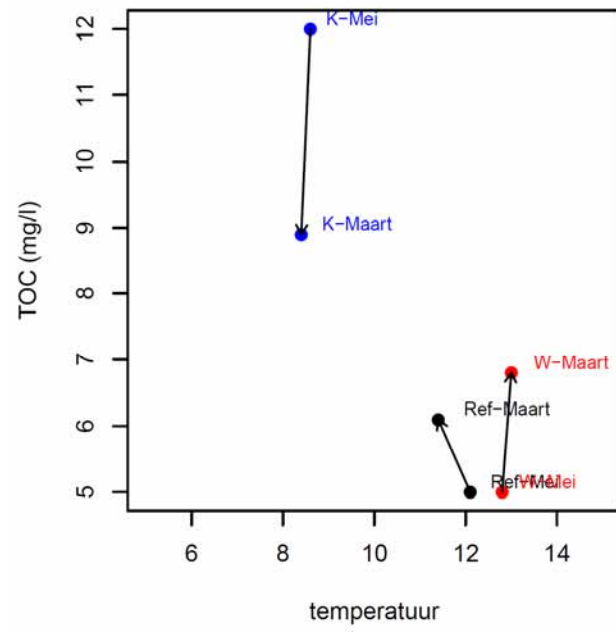
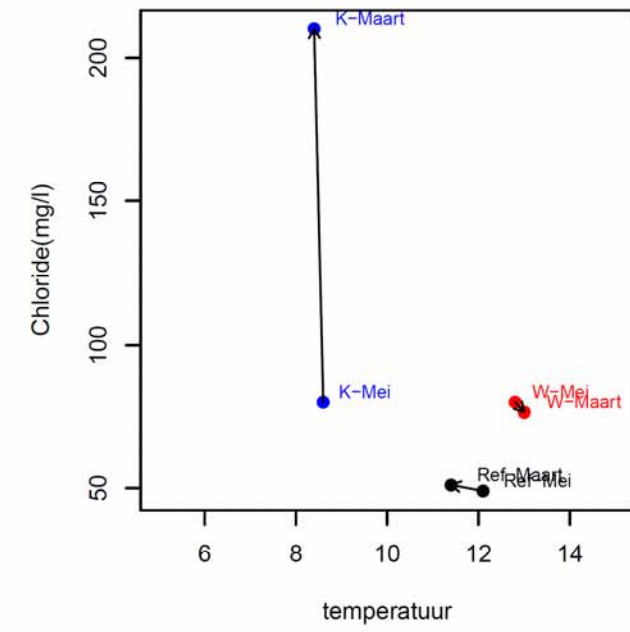
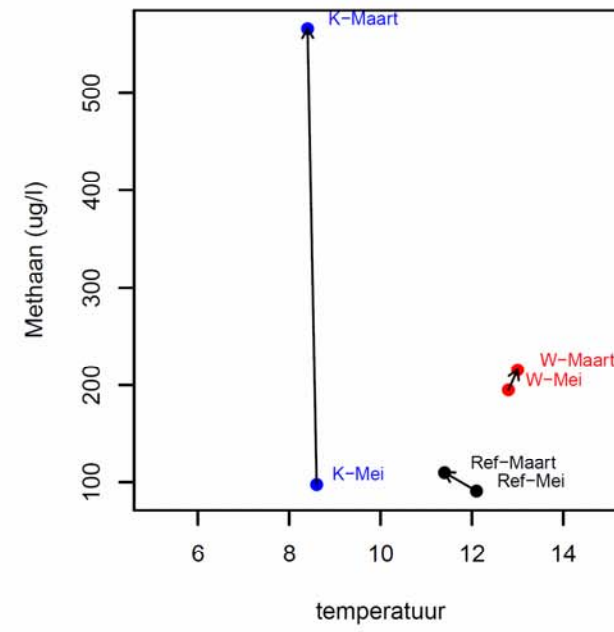
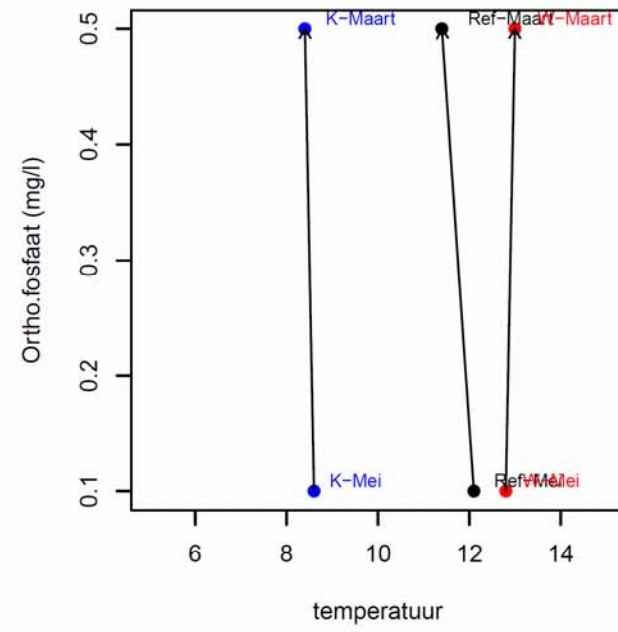
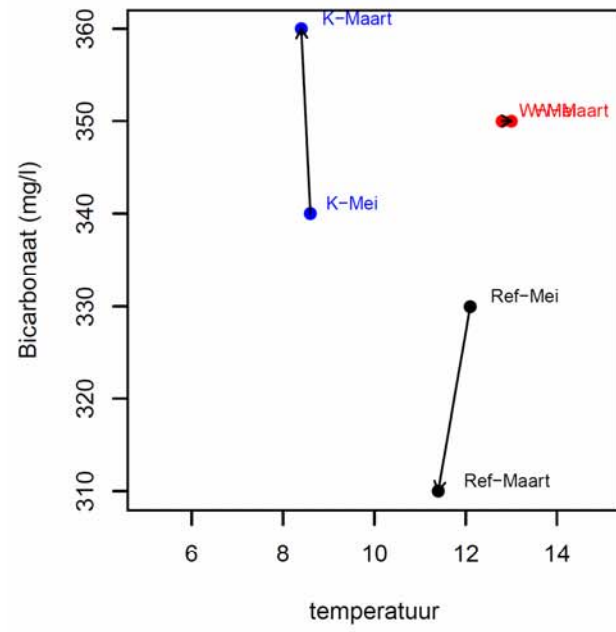
Rosmalen stikstof



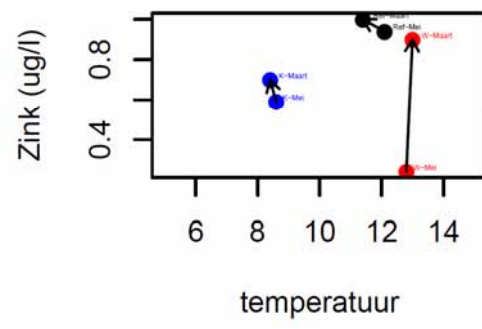
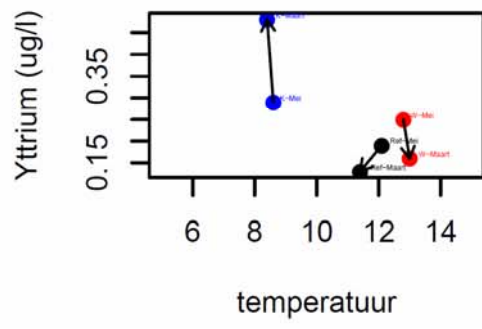
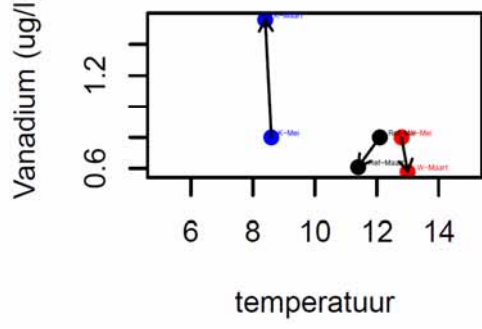
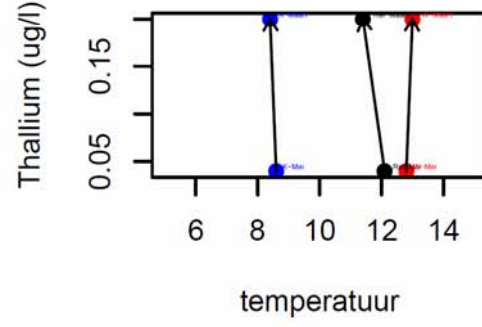
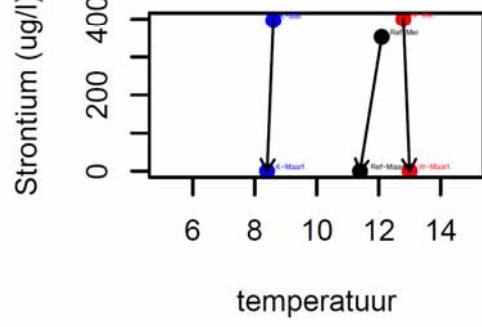
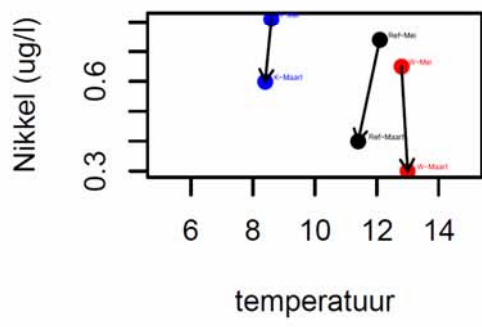
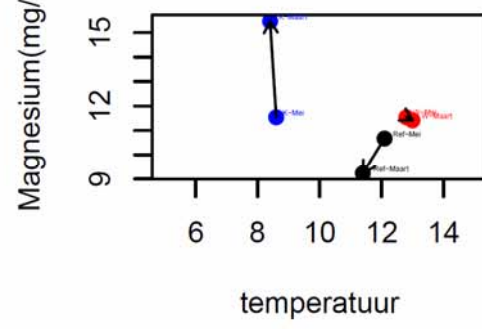
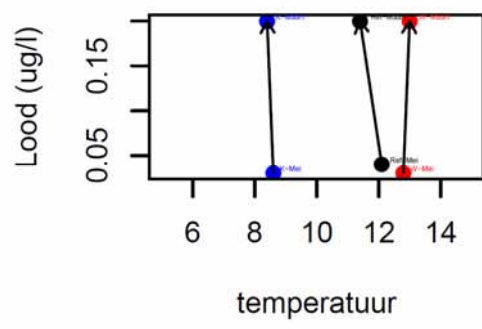
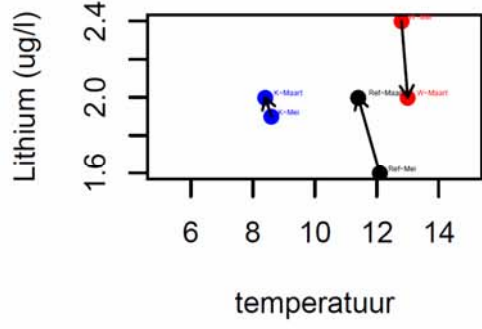
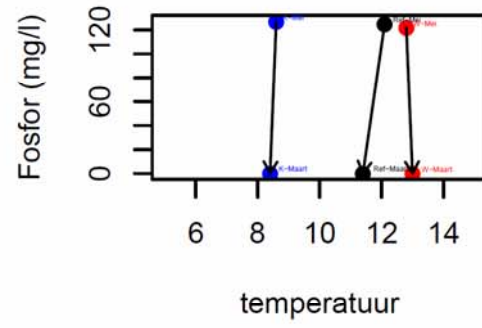
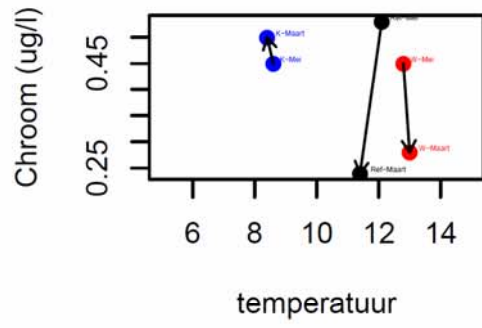
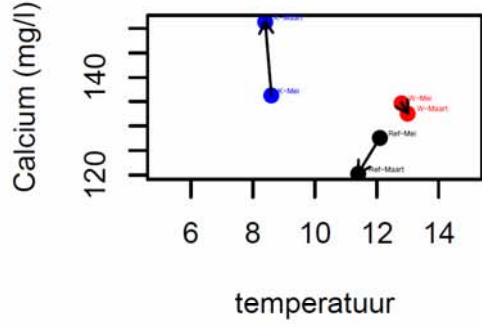
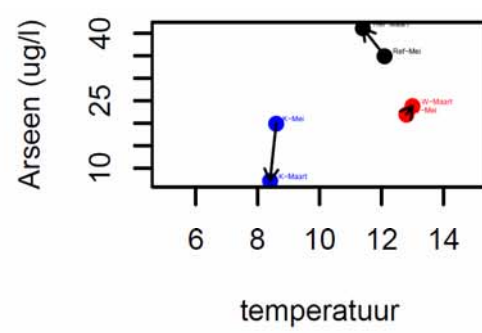
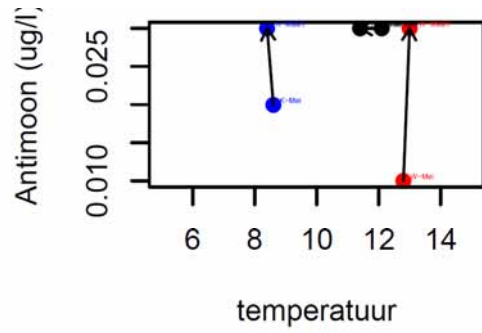
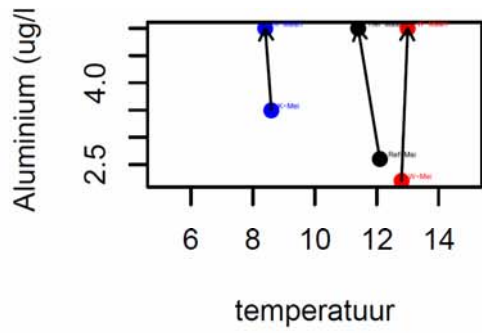
Rosmalen zwavel



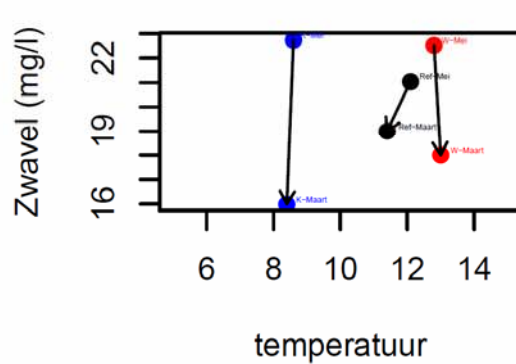
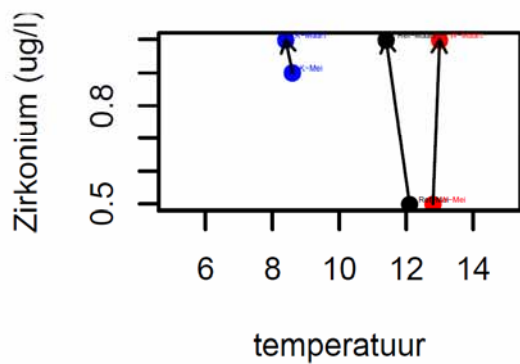
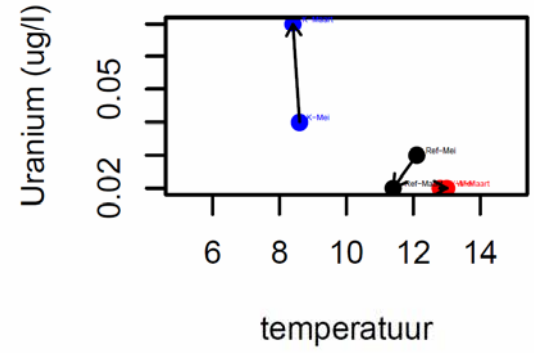
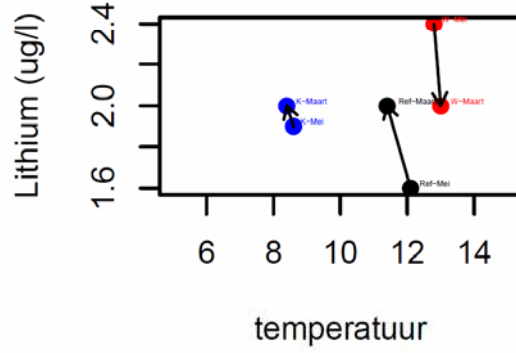
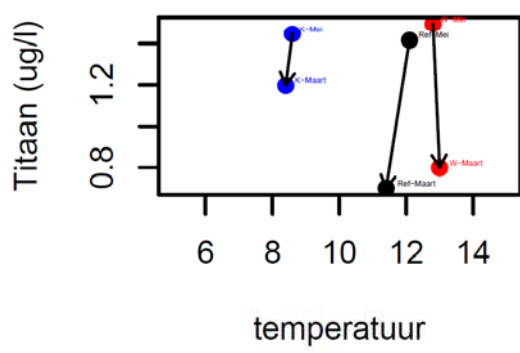
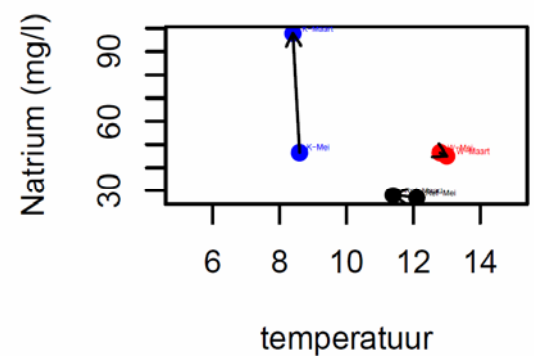
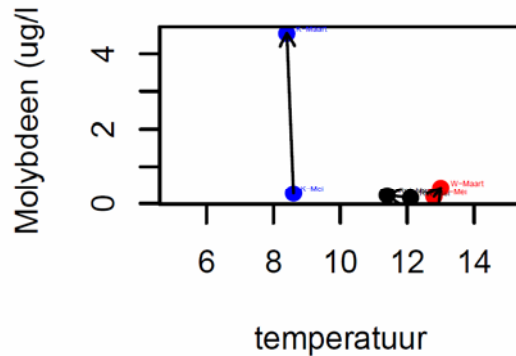
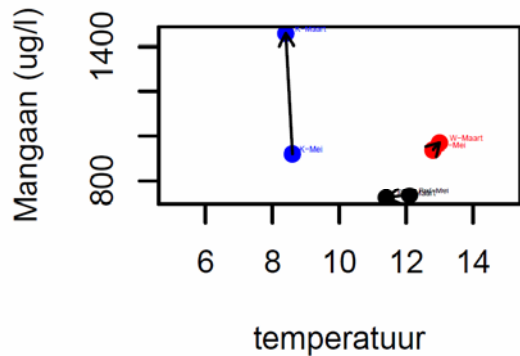
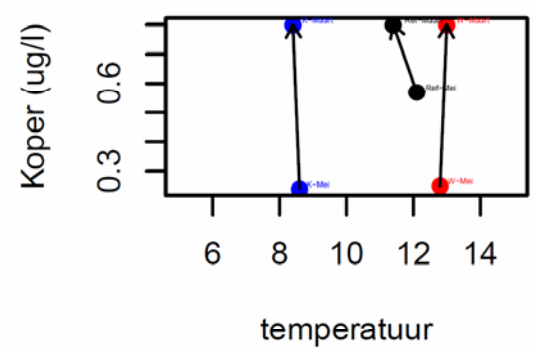
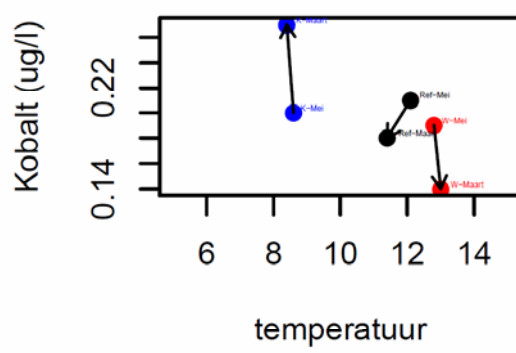
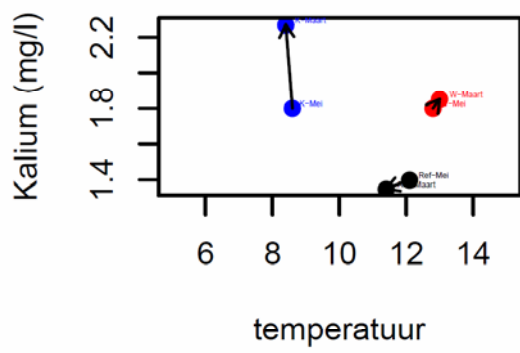
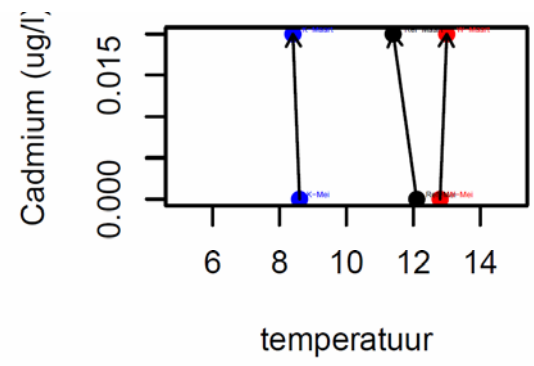
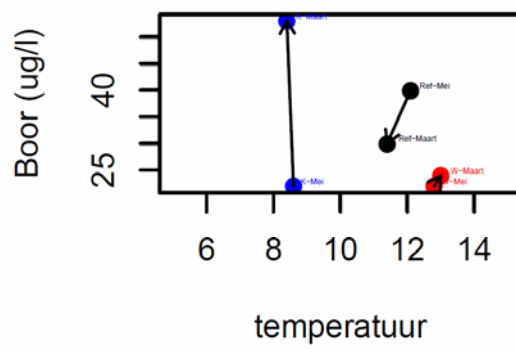
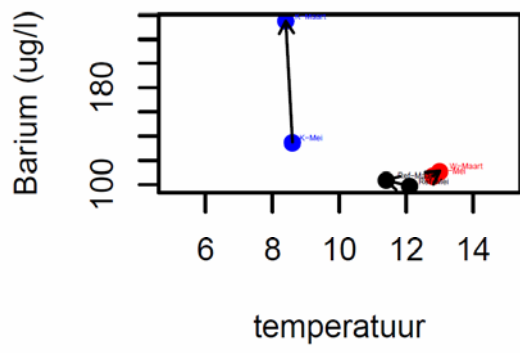
Uithof algemeen



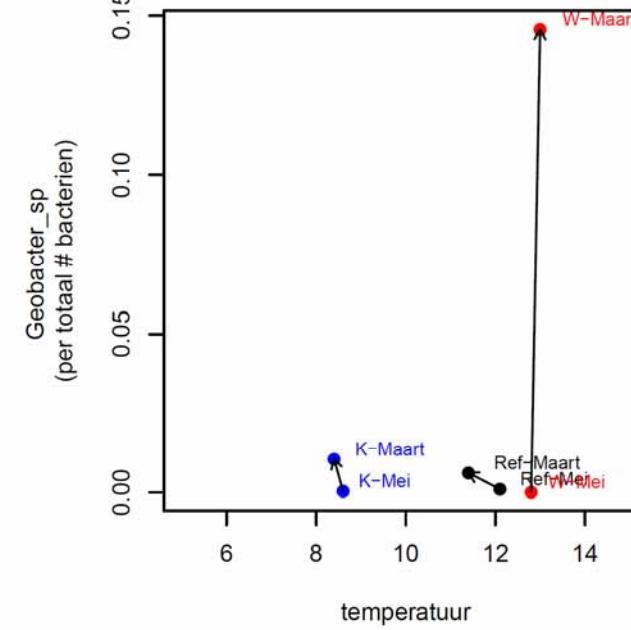
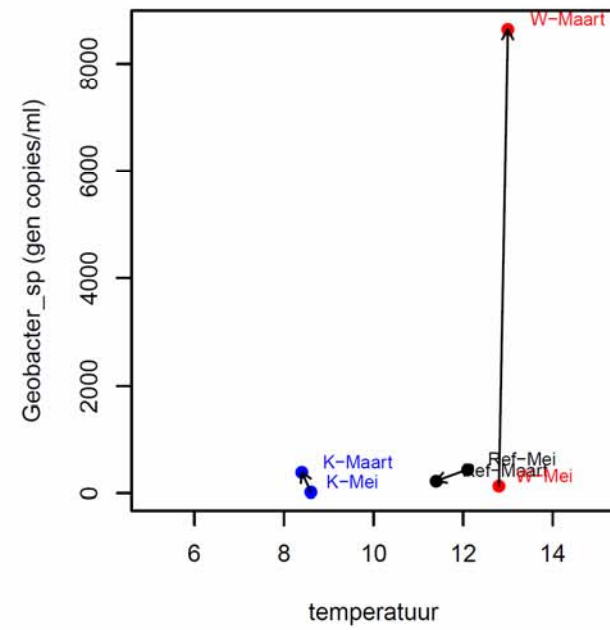
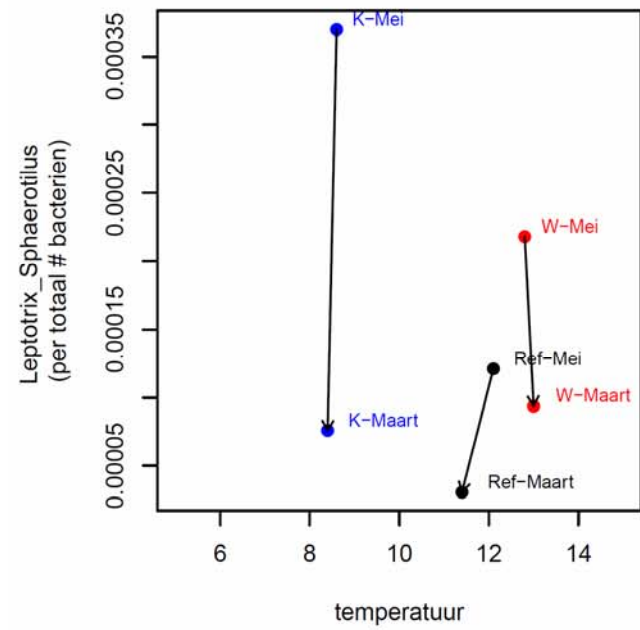
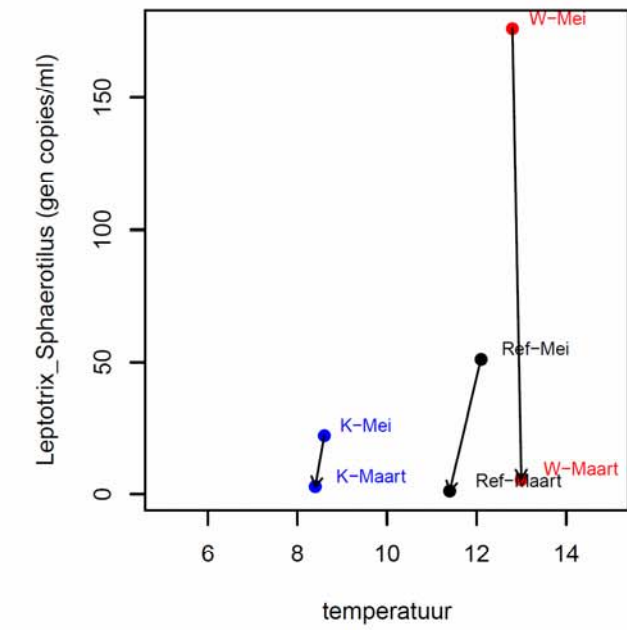
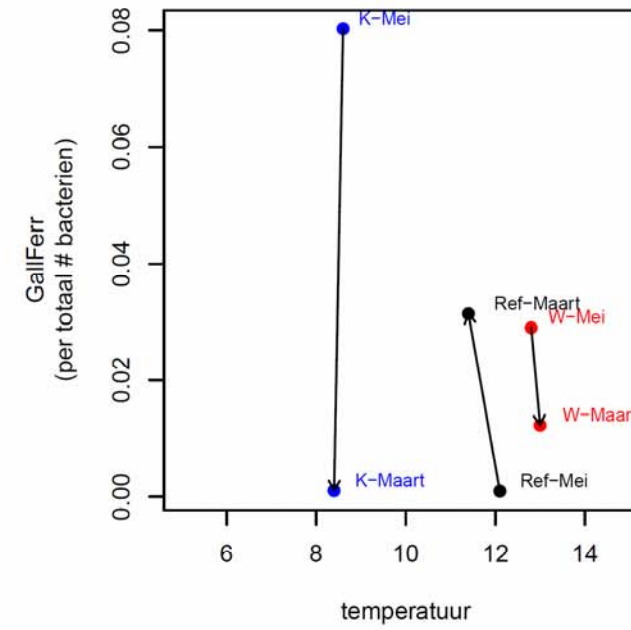
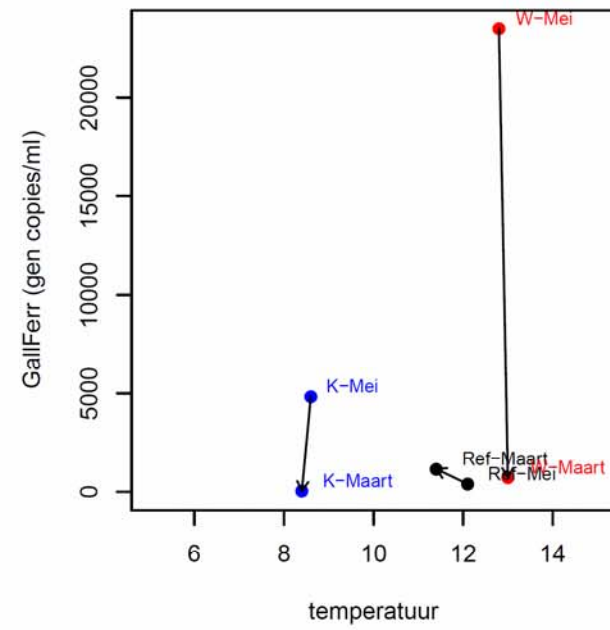
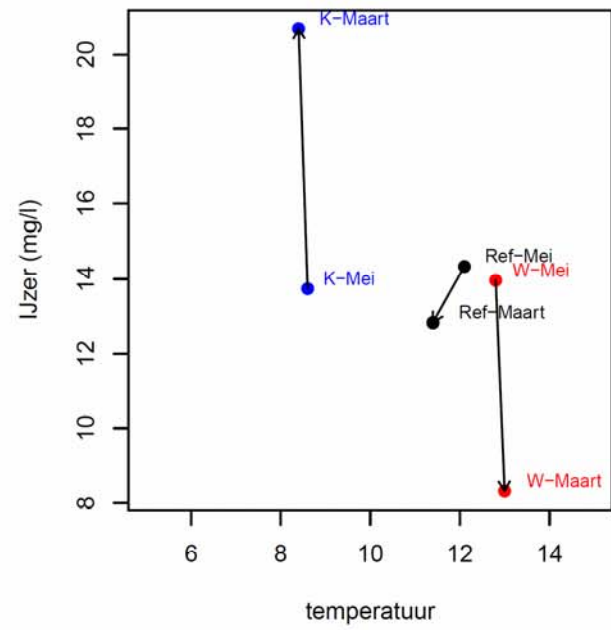
Uithof elementen



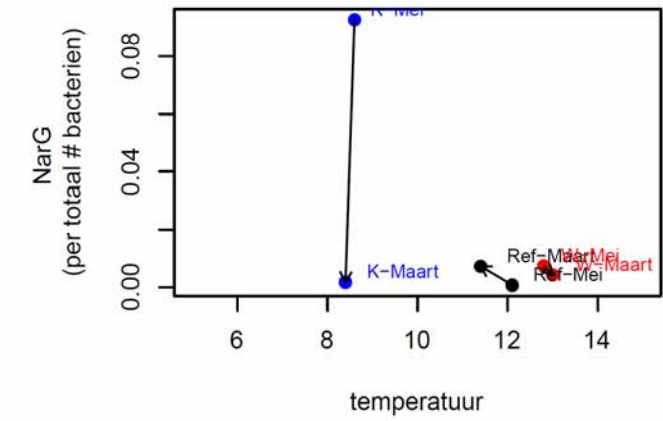
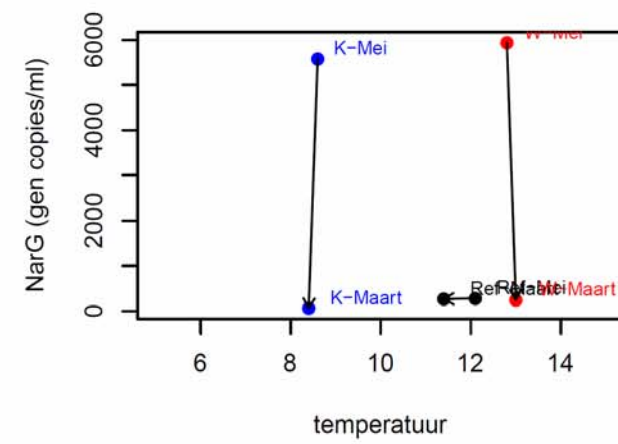
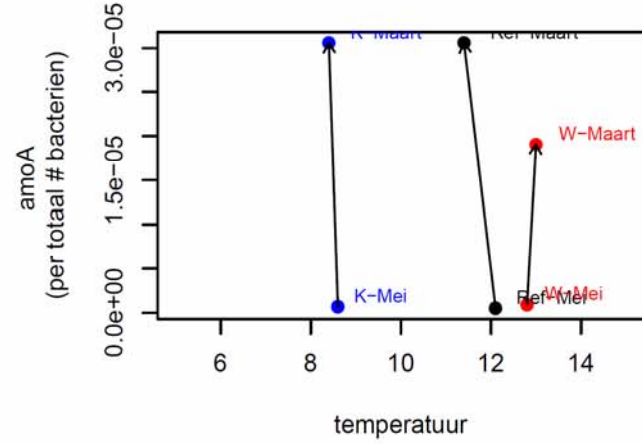
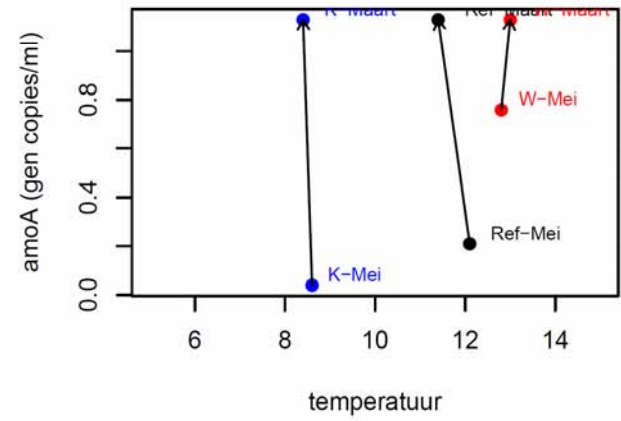
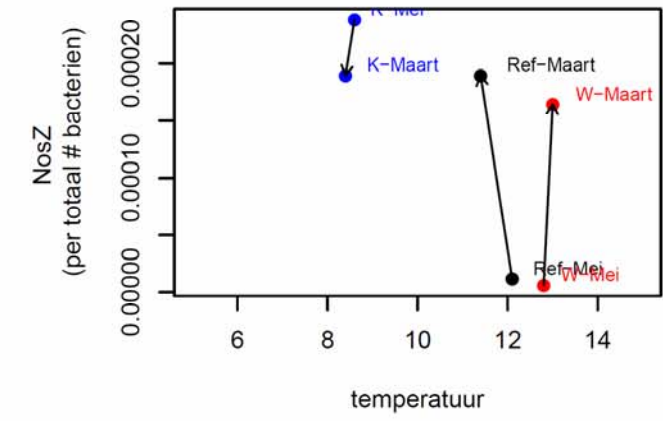
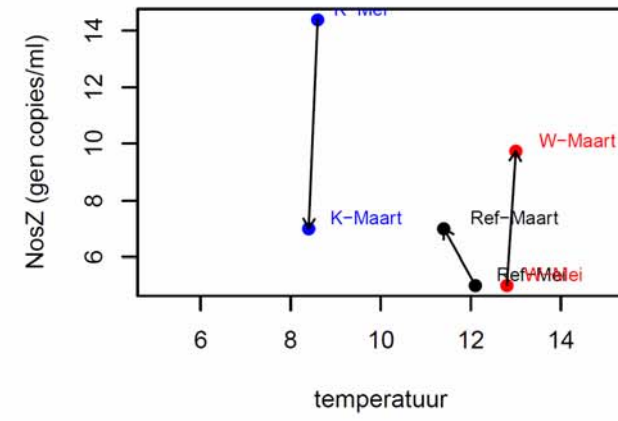
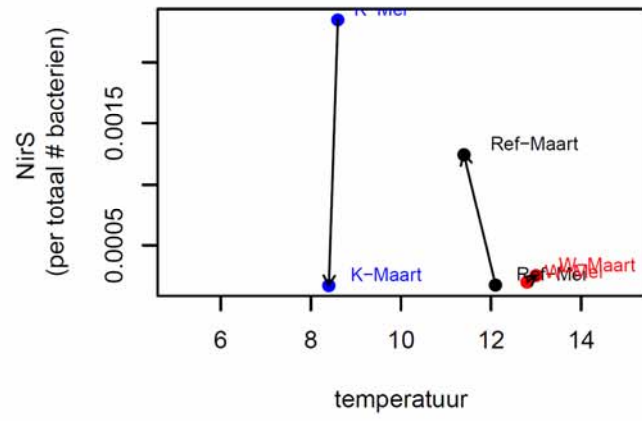
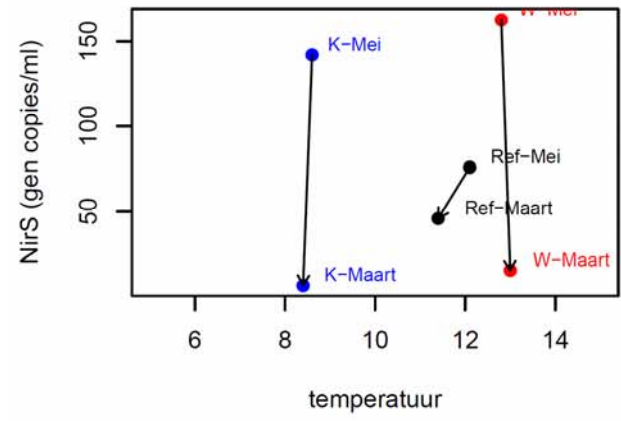
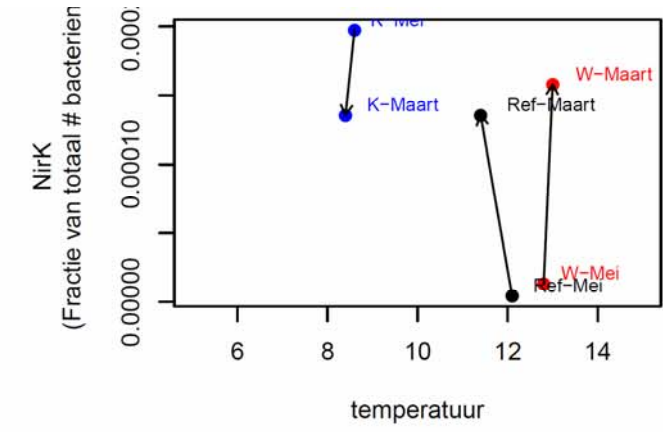
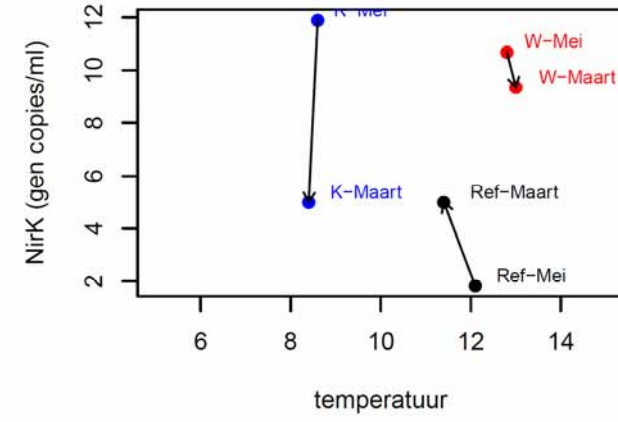
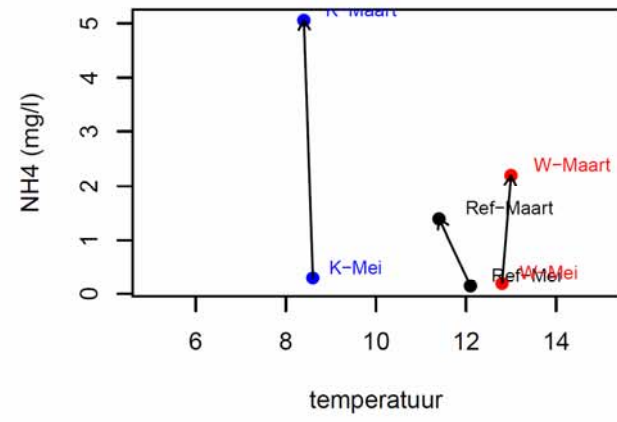
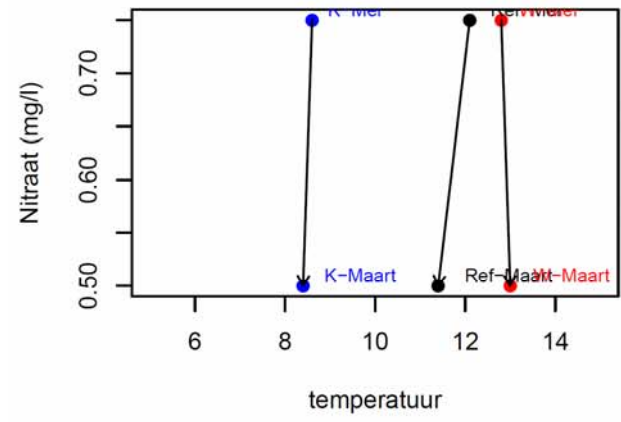
Uithof elementen



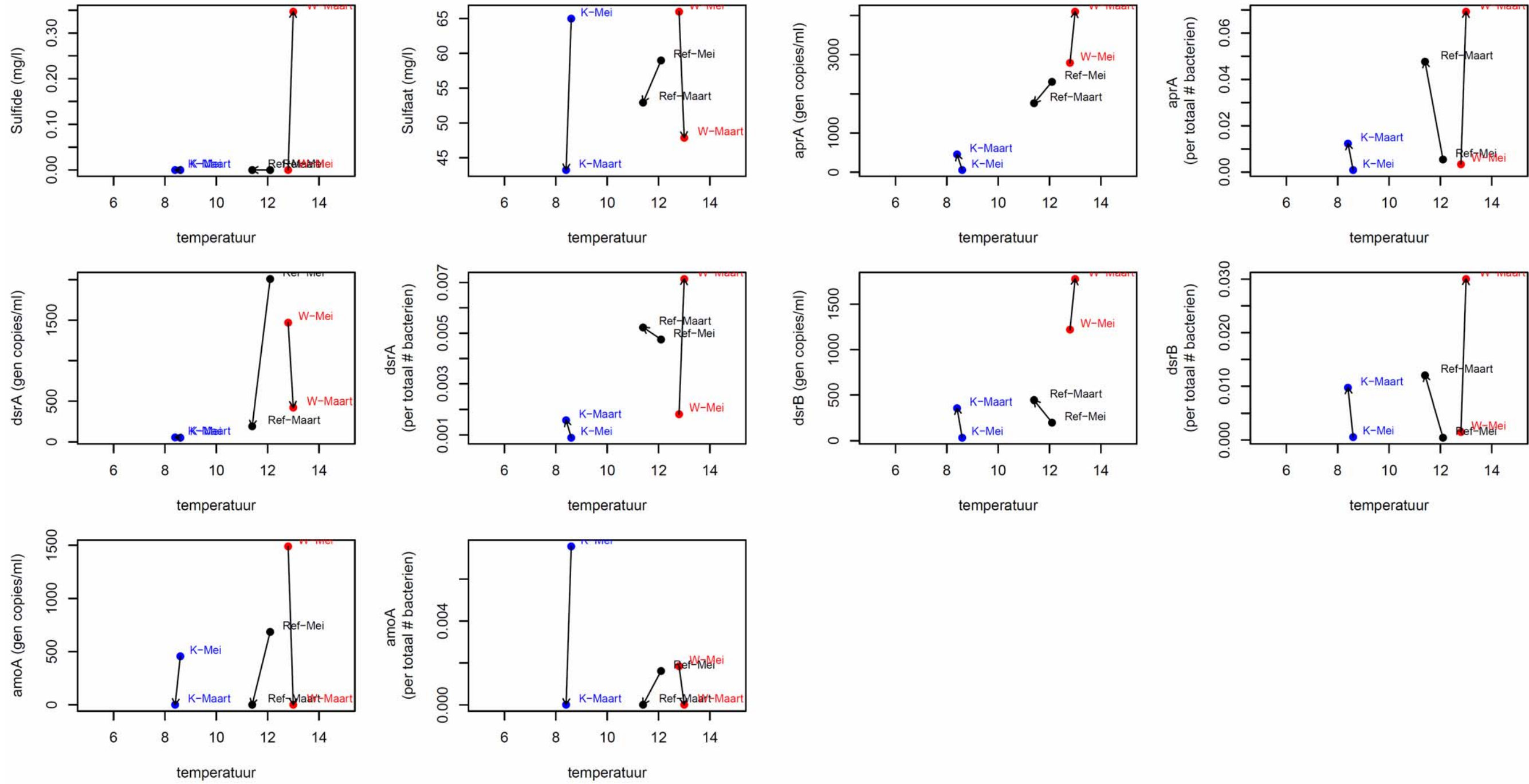
Uithof ijzer



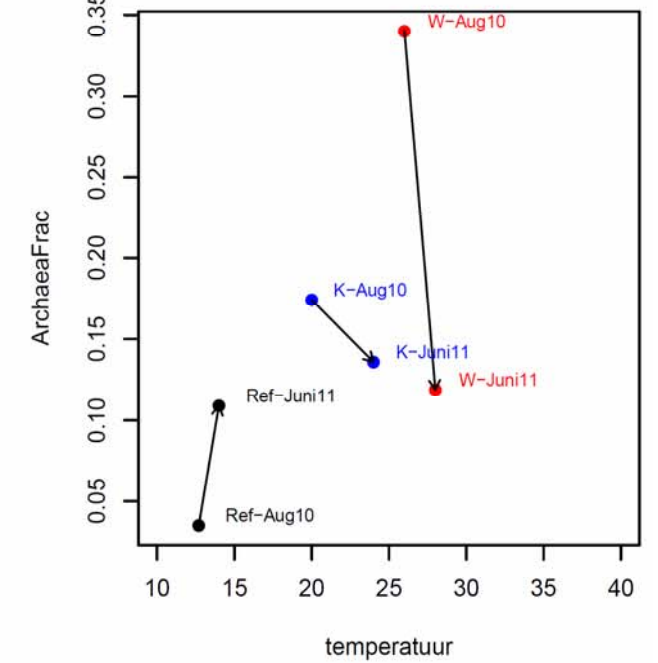
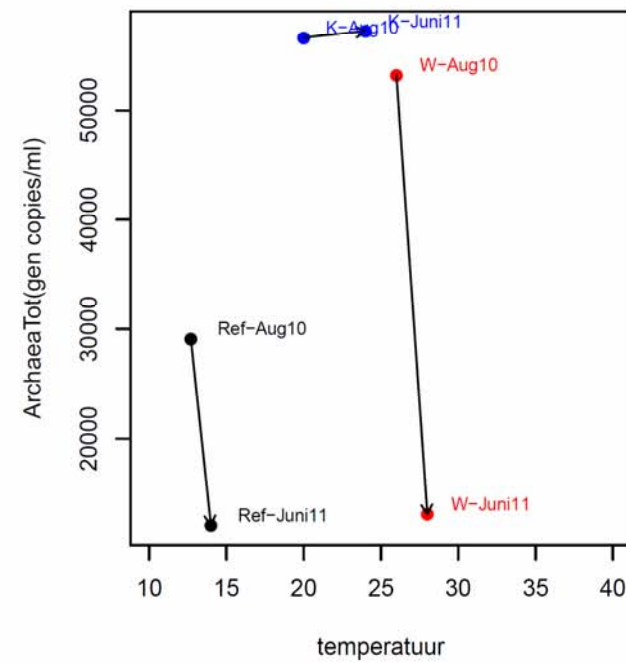
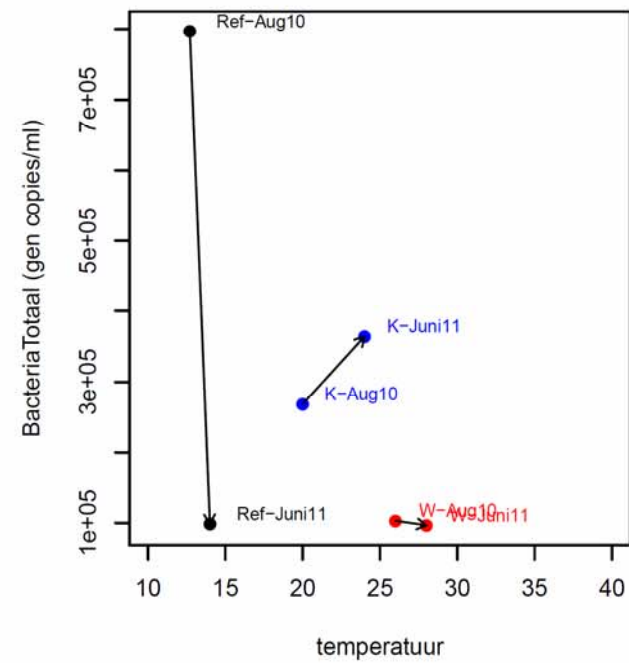
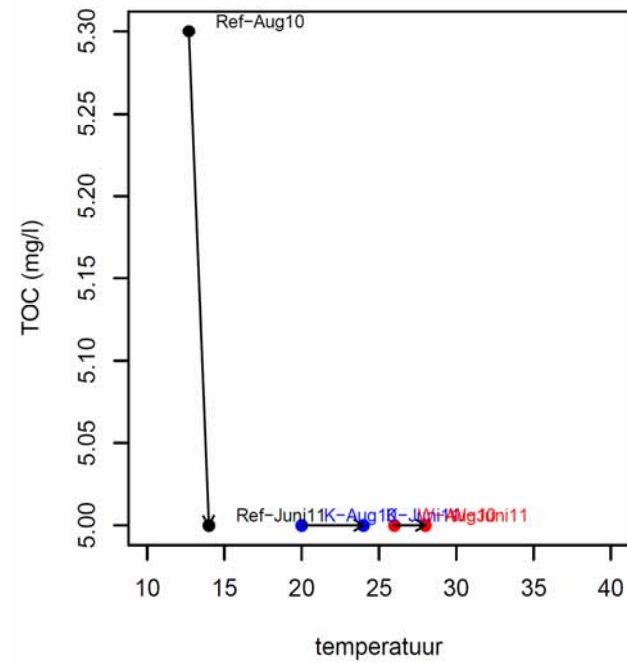
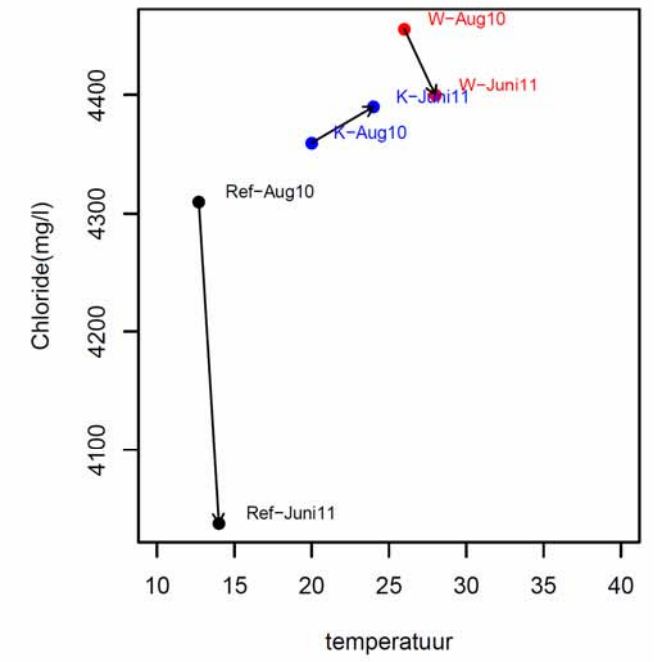
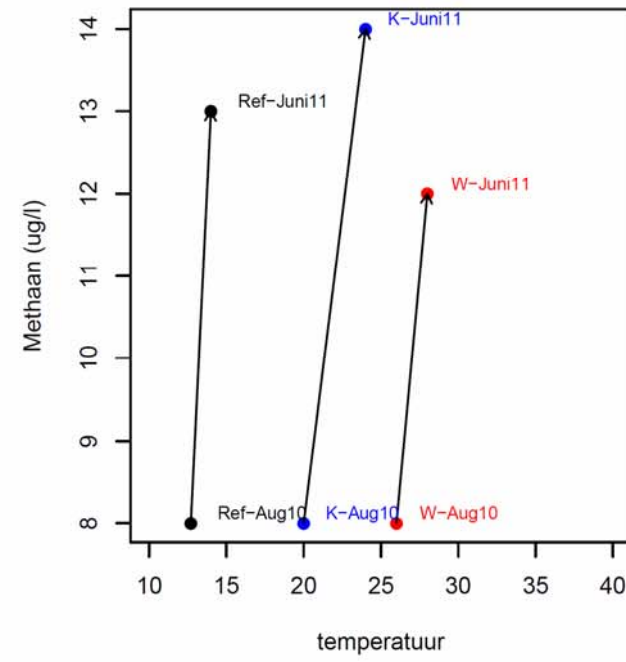
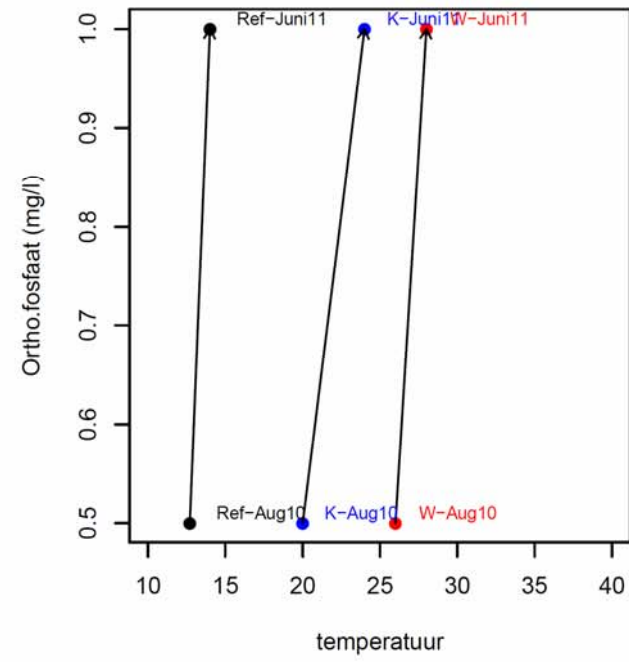
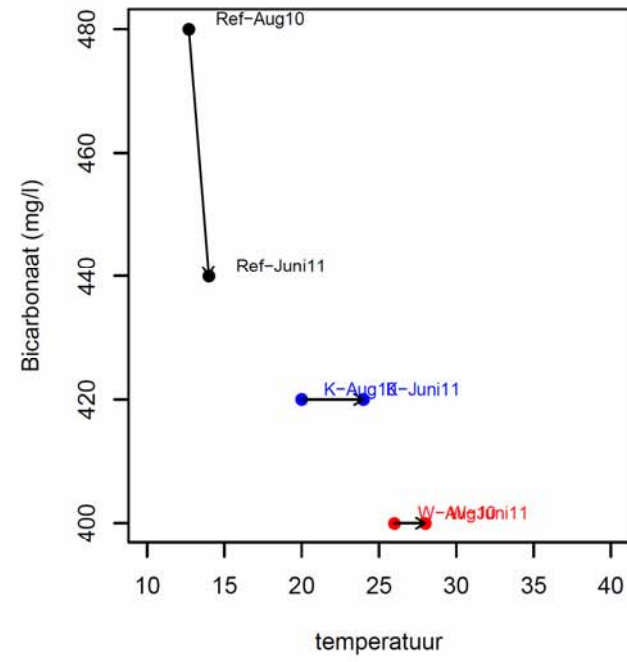
Uithof stikstof



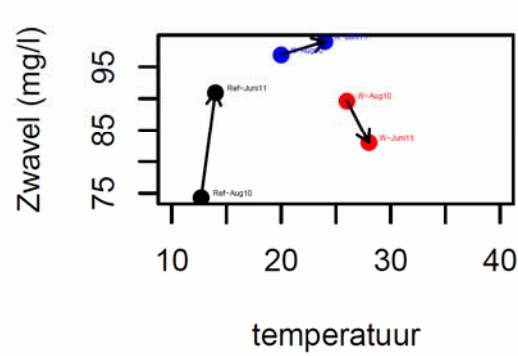
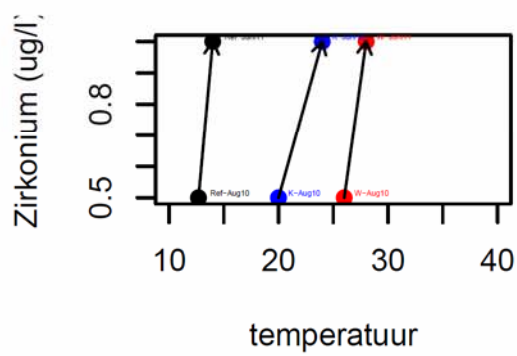
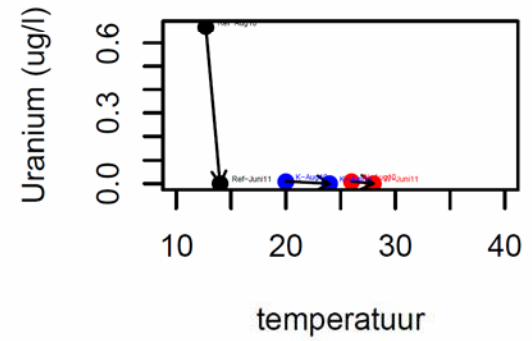
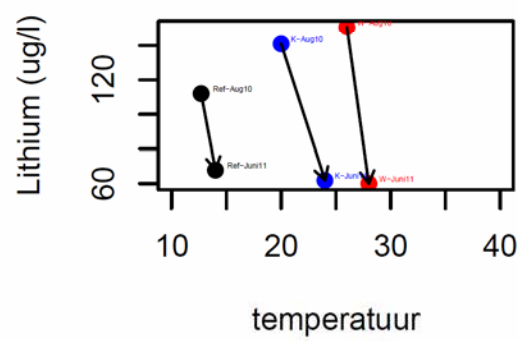
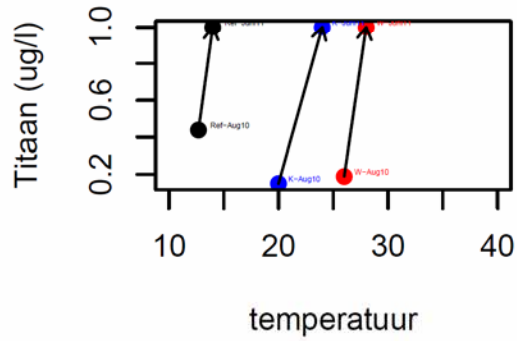
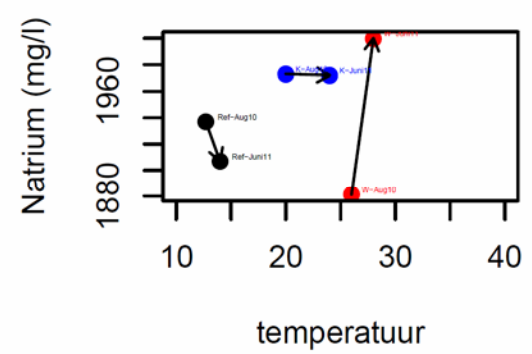
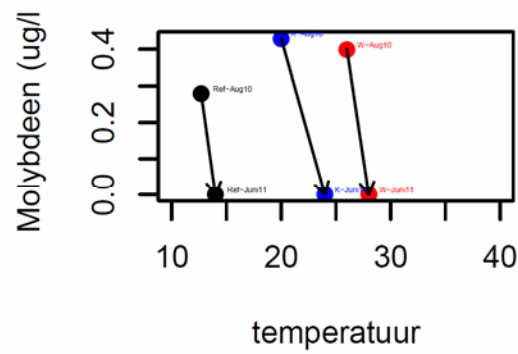
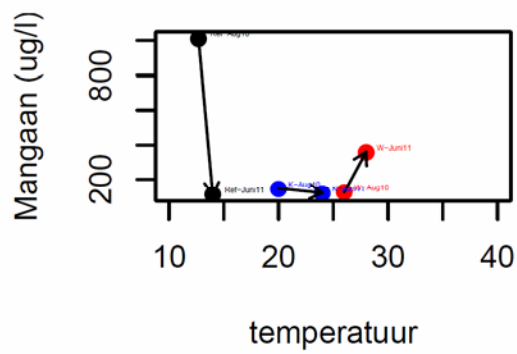
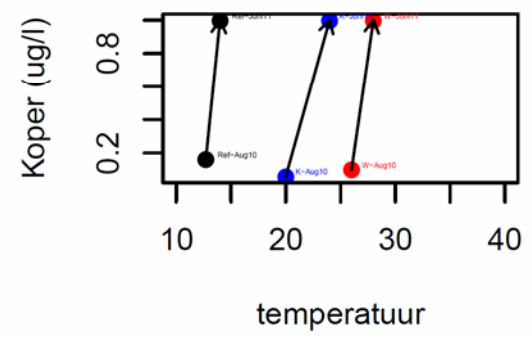
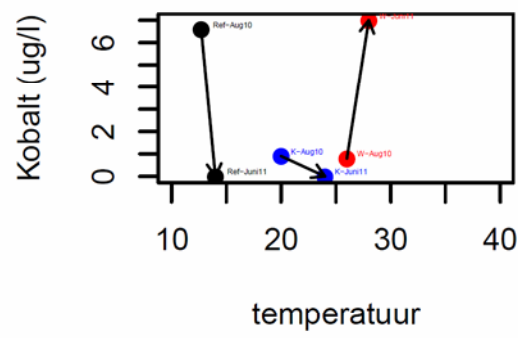
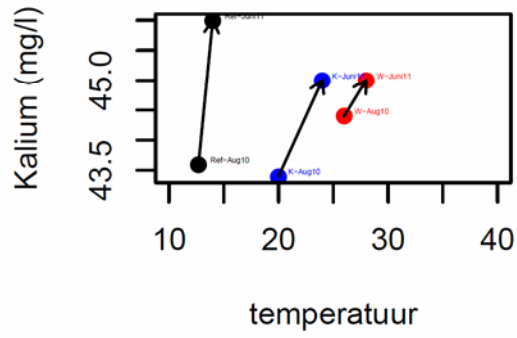
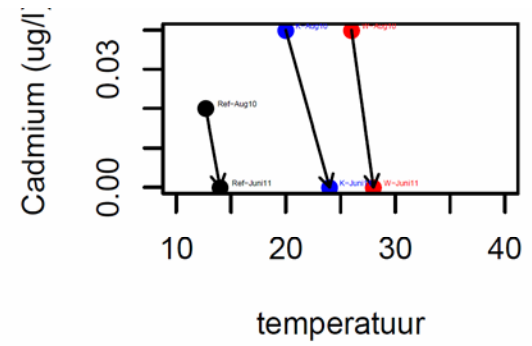
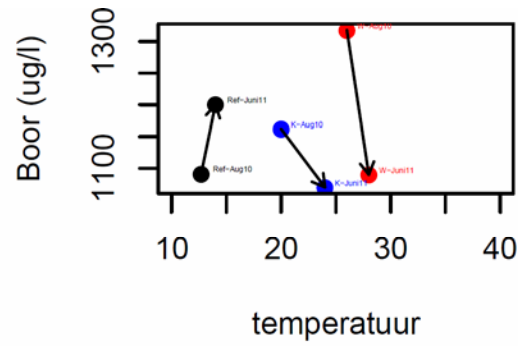
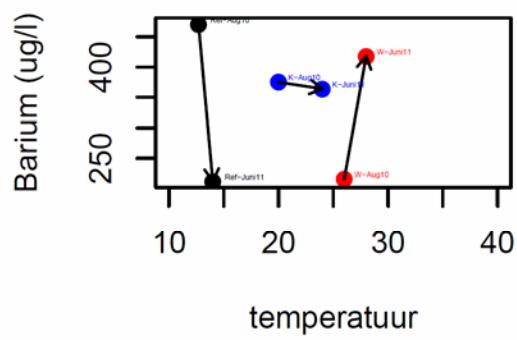
Uithof stikstof



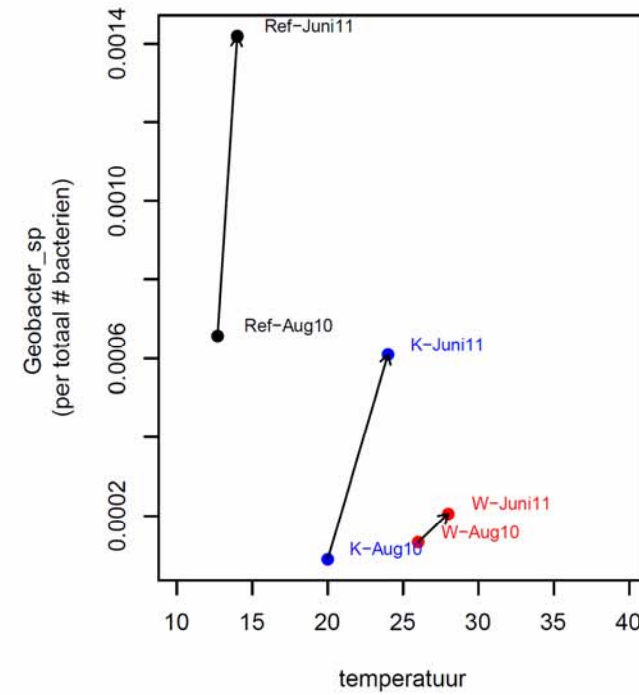
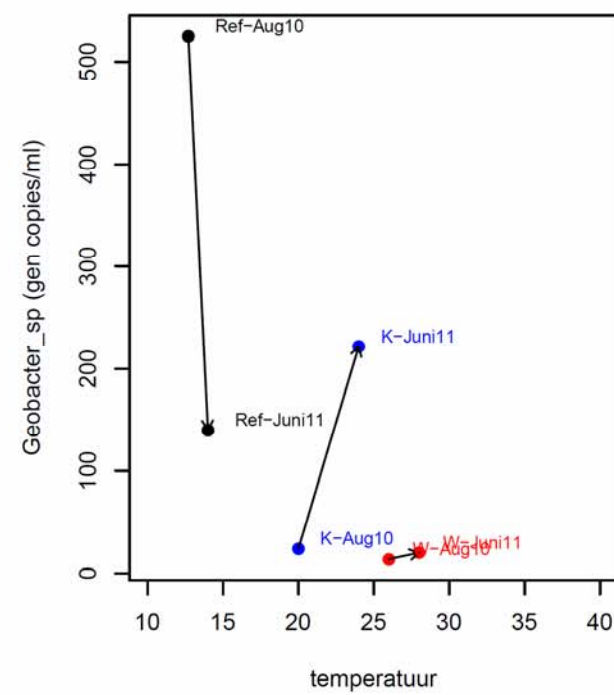
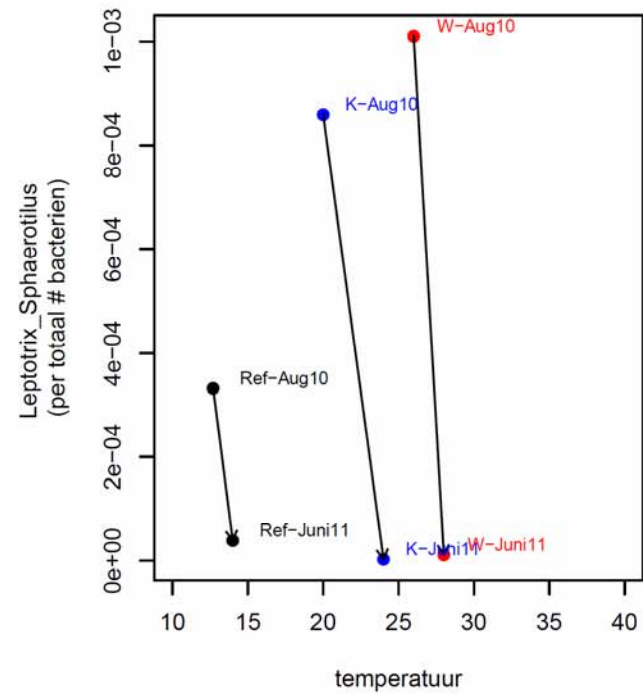
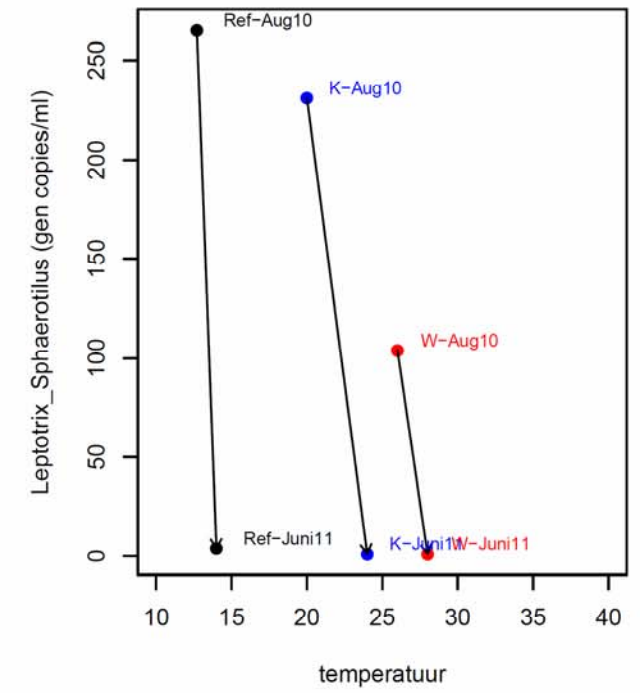
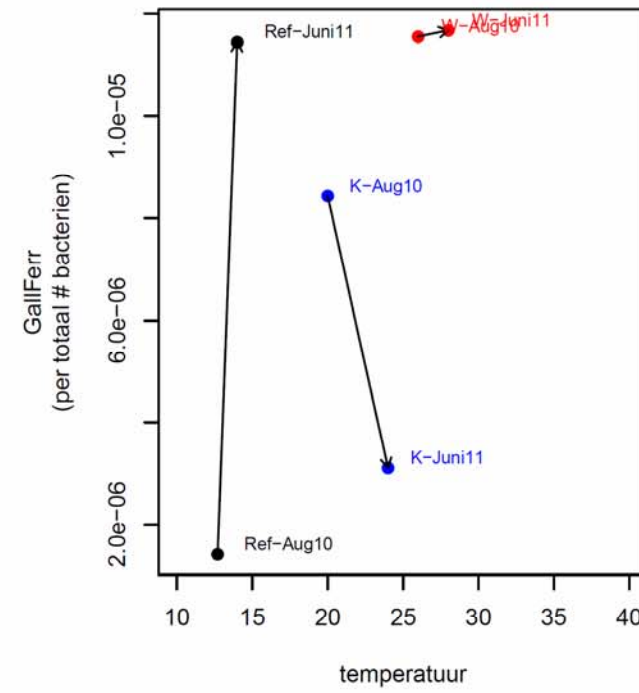
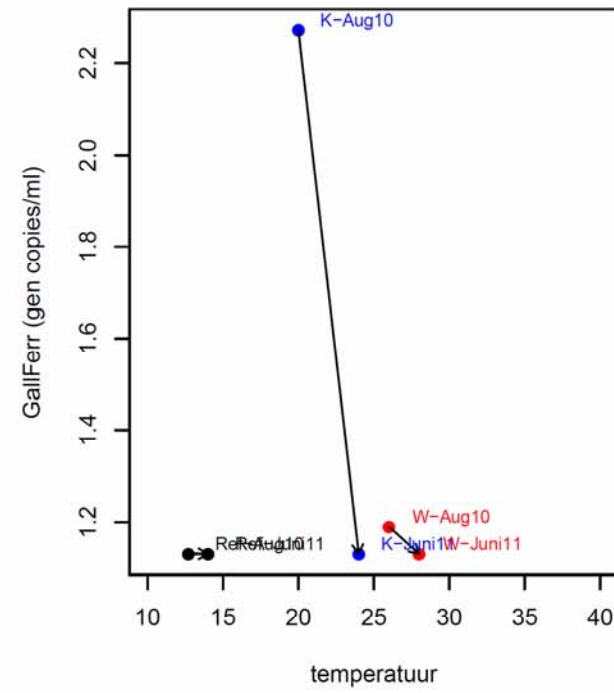
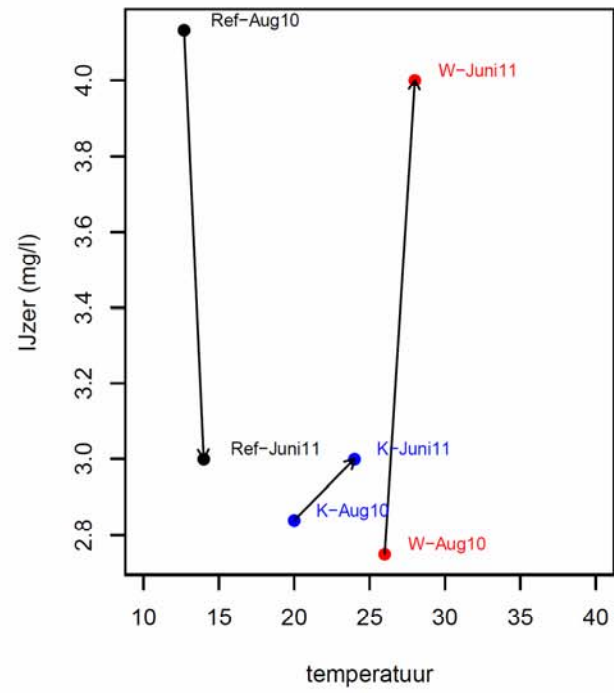
Zwammerdam algemeen



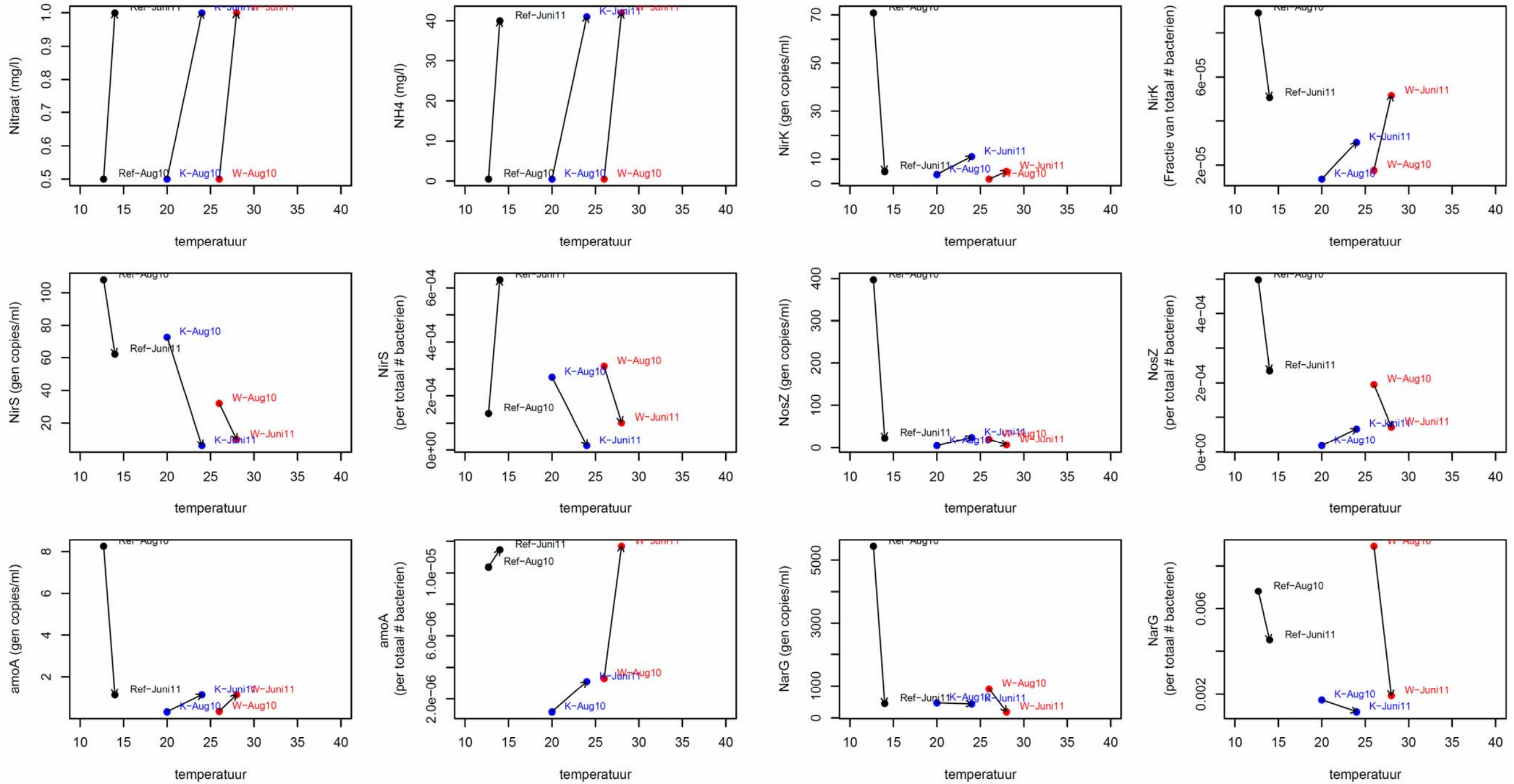
Zwammerdam elementen



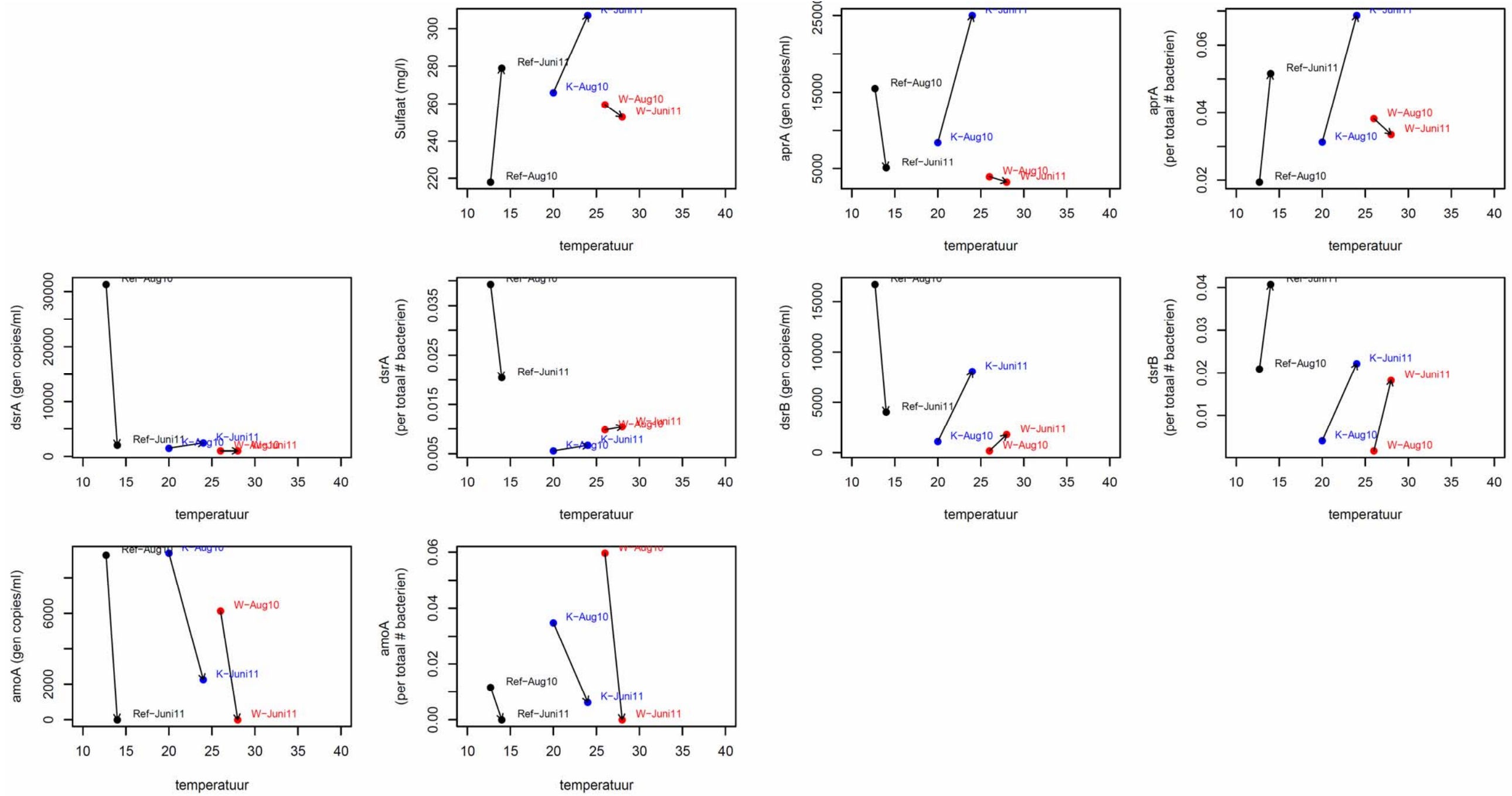
Zwammerdam ijzer



Zwammerdam stikstof



Zwammerdam zwavel



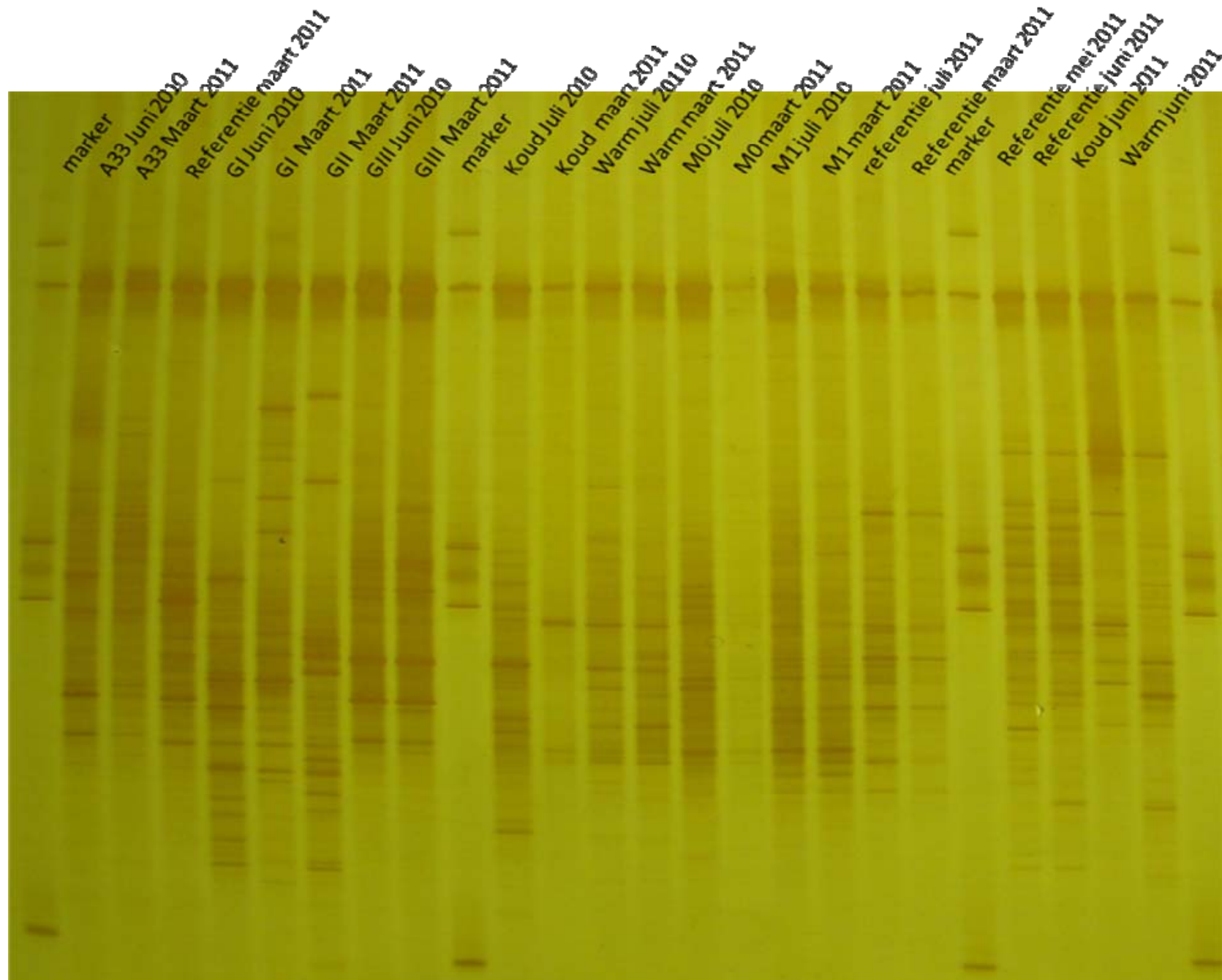
Bijlage IV

Resultaten DGGE-gel

Beijum

Heuvelgalerie

Zwammerdam



Deelnemende bedrijven en instanties

Agentschap NL / Bodem+

Arcadis

Bioclear

Brabant Water - Hydreco

Deltares

Eneco

Essent

Gemeente Almelo

Gemeente Amersfoort

Gemeente Apeldoorn

Gemeente Den Bosch

Gemeente Deventer

Gemeente Haarlem

Gemeente Hengelo

Gemeente Tilburg

Gemeente Utrecht

Gemeente Zwolle

Havenbedrijf Rotterdam

IF Technology

Ministerie van Infrastructuur & Milieu

NVOE

Productschap Tuinbouw

Provincie Drenthe

Provincie Flevoland

Provincie Friesland

Provincie Gelderland

Provincie Groningen

Provincie Limburg

Provincie Noord-Brabant

Provincie Noord-Holland

Provincie Overijssel

Provincie Utrecht

Provincie Zeeland

Provincie Zuid-Holland

SBNS

SKB

Vewin

Vitens

Wageningen Universiteit

Waterschap Groot Salland

Waterschap Regge en Dinkel

