

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

KWR 2021.009 | februari 2021

# Ondergronds Ontijzeren bij WKO- systeem UZ Leuven

Eindrapportage TKI-project Ondergronds  
ontijzeren bij WKO  
bodemenergiesystemen

## TKI-samenwerkingspartners



# Colofon

## Ondergronds Ontijzeren bij WKO-systeem UZ Leuven

Eindrapportage TKI-project Ondergronds ontijzeren bij WKO bodemenergiesystemen

**KWR 2021.009 | Februari 2021**

### Opdrachtnummer

402868

### Projectmanager

Ir. Jan Willem Kooiman

### Opdrachtgever

TKI-watertechnologie

### Auteur(s)

Dr. Bas van der Grift, Steven Ros MSc

Met medewerking van:

Bert Flierman (Flierman Techniek), Kor Reinink (Haitjema)

### Kwaliteitsborger(s)

Dr. Niels Hartog

### Verantwoording

Deze activiteit is gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken en Klimaat met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) en uit bijdrages van UZ Leuven, Haitjema grondboorbedrijf, ENGIE Solutions en Flierman techniek.

### Keywords

WKO bodemenergiesystemen, putverstopping, ondergronds ontijzeren

Jaar van publicatie  
2021

#### Meer informatie

dr. B. van der Grift  
T +31 30 606 9519  
E Bas.van.der.Grift@kwrwater.nl

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

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

# KWR

Februari 2021 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

# Samenvatting

Op steeds meer plekken in Vlaanderen en Nederland wordt ondergrondse Warmte-Koude Opslag (WKO) toegepast om energie te besparen. Vaak bevat het grondwater dat hiervoor wordt onttrokken en geïnfiltreerd opgelost ijzer. Oxidatie van ijzer kan zorgen voor verstopping van de onttrekkings- of infiltratieputten. Ondergronds ontijzeren kan deze problemen voorkomen. Deze techniek wordt voor de drinkwaterproductie al vele jaren succesvol toegepast, maar biedt ook potentie voor andere sectoren die problemen ondervinden door de aanwezigheid van ijzer- en of mangaan in onttrokken grondwater.

Het WKO systeem van het UZ Leuven is een voorbeeld van een bodemenergiesysteem dat niet functioneert als gevolg van putverstopping. Dit systeem is in 2014 aangelegd na een geslaagde proef met twee proefputten. Het uiteindelijke WKO systeem heeft eigenlijk nooit naar behoren gefunctioneerd. Al vanaf het begin is er sprake van putverstopping door neerslagen. Voorafgaand aan het TKI project zijn door verschillende partijen activiteiten uitgevoerd om het probleem van de putverstopping te verhelpen. Dit heeft echt niet tot een gewenst resultaat geleid.

De doelstelling van dit TKI project was om te bepalen of ondergronds ontijzeren een geschikte technologie is om het probleem van chemisch putverstopping bij WKO systemen te verhelpen. Samen met Haitjema grondboorbedrijf, ENGIE Solutions, Flierman techniek en UZ Leuven is een pilot opgezet en uitgevoerd om vast te stellen of het mogelijk is om ijzerloos grondwater op te pompen uit de koude bronnen van het WKO systeem door inzet van een tijdelijke Fermanox installatie voor ondergronds ontijzeren en dit vervolgens langdurig en zonder problemen in de warme bronnen te infiltreren.

Een tweede doelstelling van dit project was te inventariseren of ondergronds ontijzeren bij kan dragen aan het realiseren van WKO systemen in gebieden die hiervoor vanwege het optreden van chemische putverstopping met ijzergewoonlijk niet geschikt worden geacht. Hiervoor is op basis van grondwaterkwaliteit gegevens uit de Vlaamse meetnetten voor grondwaterkwaliteit een eerste risicokaart gemaakt voor het optreden van oxidatie van ijzer en/of mangaan bij onttrekking van water uit het freatische watervoerende pakket.

De pilot heeft duidelijk laten zien dat door inzet van ondergronds ontijzeren er zonder problemen ijzerloos grondwater kan worden opgepompt en dat de ondergrondse ontijzering geen nadelige effecten heeft op de grondwaterkwaliteit. Langdurige infiltratie van het geproduceerde grondwater in de warme bronnen is in deze pilot echter niet gelukt. In de pijpleiding tussen de koude bronnen en warme bronnen (de backbone) is nog een rest verontreiniging van ijzerhydroxide neerslagen uit het verleden aanwezig die wordt gemobiliseerd door de waterstroom door de pijpleiding. Hierdoor neemt de infiltratiecapaciteit van de warme bron af in de tijd. Voor de ingebruikname van het WKO systeem met een definitieve installatie voor ondergrondse ontijzering zal de backbone dus gereinigd moeten worden. Ook zullen de warme bronnen die nog (deels) verstopt zijn met de ijzerhydroxide neerslagen uit het verleden intensief gereinigd moeten worden.

Uit de karting van de grondwaterkwaliteit blijkt dat in grote delen van Vlaanderen er gewoonlijk putverstopping op kan treden bij onttrekking uit het freatisch pakket door mening van nitraathoudend en ijzerhoudend grondwater. In deze gebieden biedt ondergrondse ontijzering een mogelijkheid om WKO systemen te realiseren. Ondergronds ontijzeren kan daarmee een waardevolle bijdrage leveren aan het kunnen realiseren van open bodemenergiesystemen.

# Inhoud

Colofon	2
Samenvatting	3
Inhoud4	
<b>1 Inleiding</b>	<b>6</b>
<b>2 Uitgangsituatie</b>	<b>8</b>
2.1 Chemische karakterisatie neerslagen	11
2.2 Grondwaterkwaliteit in de omgeving van de campus Gasthuisberg	14
<b>3 Pilot ondergronds ontijzeren</b>	<b>16</b>
<b>4 Resultaten</b>	<b>21</b>
4.1 Fase 1 en 2 - waterkwaliteit koude bronnen	21
4.2 Fase 3 – testen WKO systeem met ondergrondse ontijzering	24
<b>5 Risico op putverstopping in Vlaanderen</b>	<b>30</b>
<b>6 Conclusies</b>	<b>32</b>
<b>7 Referenties</b>	<b>33</b>



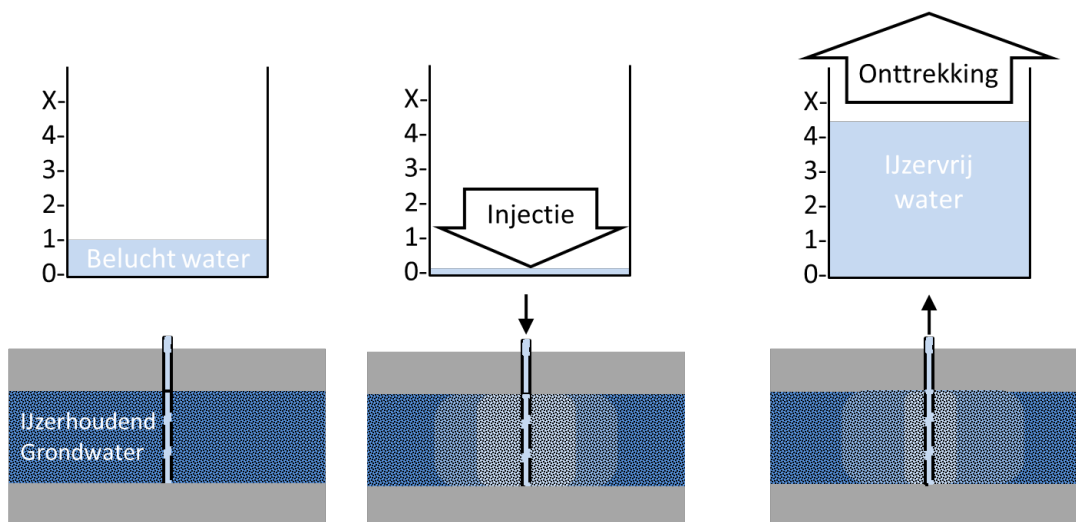
# 1 Inleiding

Open bodemenergiesystemen met Warmte- Koude Opslag (WKO) worden veelvuldig toegepast om energie te besparen. Het aantal WKO systemen neemt sterk toe door ambitieuze groeidoelstellingen voor bodemenergie. Verstopping van de bronnen is een van de problemen waar WKO systemen te maken kunnen krijgen en ertoe leiden dat het rendement afneemt. Chemisch verstopping is naast verstopping door deeltjes en gasverstopping een belangrijke oorzaak van putverstopping. Chemische verstopping door neerslag van ijzerhydroxiden is veel voorkomend en wordt vooral veroorzaakt door reacties door ijzerhoudend grondwater met grondwater met andere samenstelling

Uiteraard wordt bij het zorgvuldig ontwerpen van een WKO systeem de meningen van grondwater met verschillende samenstellingen zoveel mogelijk vermeden. Toch komt chemische putverstopping door ijzernerislag in de praktijk nog voor waardoor het rendement van het WKO systeem afneemt. Met regeneratietechnieken wordt getracht om verstopte bronnen te herstellen. Deze worden met wisselend succes ingezet en zijn door gebruik van sterk zure en oxiderende stoffen milieubelastend met bij onjuiste uitvoering ook nog gevaarlijk. Ondergronds ontijzeren is een meer preventieve technologie die potentie heeft om chemische verstopping te verminderen of voorkomen. Het idee achter ondergronds ontijzeren is dat het opgeloste ijzer uit het grondwater verwijderd voordat het wordt opgepompt. Een de meerwaarde van ondergronds ontijzeren is ook dat het moeten uitvoeren van putregeneratie voorkomen of verminderd kan worden.

## Ondergronds ontijzeren

Het basisprincipe voor ondergronds ontijzeren is relatief simpel (Figuur 1.1, de la Loma Gonzales and Hartog 2016, Vandenbohede et al. 2019). Het begint met de injectie van een volume zuurstofhoudend (belucht) water in een grondwaterput. De zuurstof reageert met het ijzer in het grondwater, dat neerslaat in de vorm van roest in de bodem. Daarna kan, meestal via dezelfde put, ijzervrij grondwater worden opgepompt, meerdere malen het volume aan belucht water dat vooraf werd geïnjecteerd. Vervolgens kan de cyclus van injectie en onttrekking opnieuw worden gestart. Bij drinkwaterbedrijven wordt ondergrondse ontijzeren al decennia met goede resultaten toegepast. Deze technologie biedt ook mogelijkheden om putverstoppingsproblemen van bestaande WKO systemen te verminderen of te voorkomen en naar verwachting ook om WKO systemen te realiseren op plekken die vanwege het risico op het optreden van putverstopping tot nu toe worden vermeden.



Figuur 1.1. de drie basisstappen van ondergronds ontijzeren (van links naar rechts): Beluchting van een volume water, injectie en onttrekking van ijzervrij water.

### *WKO systeem UZ Leuven*

Het WKO systeem van het UZ Leuven is een bodemenergiesysteem dat niet functioneert als gevolg van putverstopping. Putverstopping als gevolg van de vorming ijzerhydroxide neerslagen is een bekend probleem bij putten waarin ijzerhoudend grondwater wordt opgepompt. Dit is vooral een risico wanneer er zowel zuurstof- en/of nitraathoudend als ijzerhoudend grondwater door de put wordt aangetrokken. Ook bij de WKO installatie van het UZ Leuven is dit het geval. De verstopte WKO installatie van het UZ Leuven wordt daarom als testcase gebruikt. Het freatisch aquifer systeem in verschillende delen in Vlaanderen bevat bovenin hoge nitraatconcentratie en kan in diepe delen opgelost ijzer(II) bevatten. Met het oppompen van dit water wordt tegelijk zuurstofhoudend water van boven aangetrokken wat tot de verstoppingsproblemen leidt.

Het doel van dit project is te onderzoeken of chemische putverstopping van WKO installaties kan worden voorkomen of beheersbaar kan worden gemaakt door inzet van ondergronds ontijzeren. Hierbij wordt nadrukkelijk ook gekeken naar eventuele nadelige effecten van de periodiek infiltratie van zuurstofrijk water in de ondergrond op de grondwaterkwaliteit. In een kalkloos systeem met weinig pH buffercapaciteit kan injectie van zuurstofhoudend water tot ongewenste pH verlagingen leiden doordat er zuur wordt geproduceerd bij de oxidatie en neerslag van ijzerhydroxides. In aquifers die ijzersulfides (pyriet) bevatten kan de injectie van zuurstofhoudend water daarnaast ook leiden tot mobilisatie van sporenelementen.

Omdat putverstopping door ijzerneerslagen veel voorkomt biedt ondergronds ontijzeren op veel plekken kansen om verstoppingsproblemen van de vele en groeiende aantal WKO systemen in Nederland en Vlaanderen op te lossen of te voorkomen. Dit project is daarmee een eerste toets voor een bredere toepassing van ondergronds ontijzeren voor het oplossen en/of voorkomen van putverstoppingsproblemen bij WKO systemen.



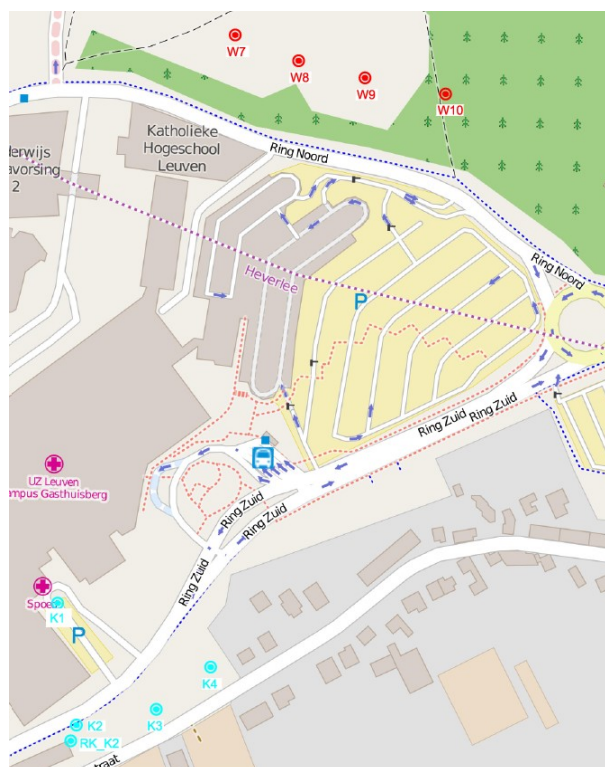
## 2 Uitgangssituatie

Het WKO systeem van de campus Gasthuisberg van het UZ Leuven bestaat uit 8 putten: 4 warme bronnen en 4 koude bronnen (Figuur 2.1). De bronnen zijn in 2014 aangelegd na een geslaagde proef met twee proefputten. De filterlengte van de verschillende bronnen bedraagt 10 tot 16 m en de filterstelling ligt tussen 40 en 70 m-maaiveld (16 en -3 m t.ov. TAW). Het uiteindelijke WKO systeem heeft eigenlijk nooit naar behoren gefunctioneerd. Al vanaf het begin is er sprake van verstopping van de infiltratieputten waardoor het waterniveau hier teveel steeg.

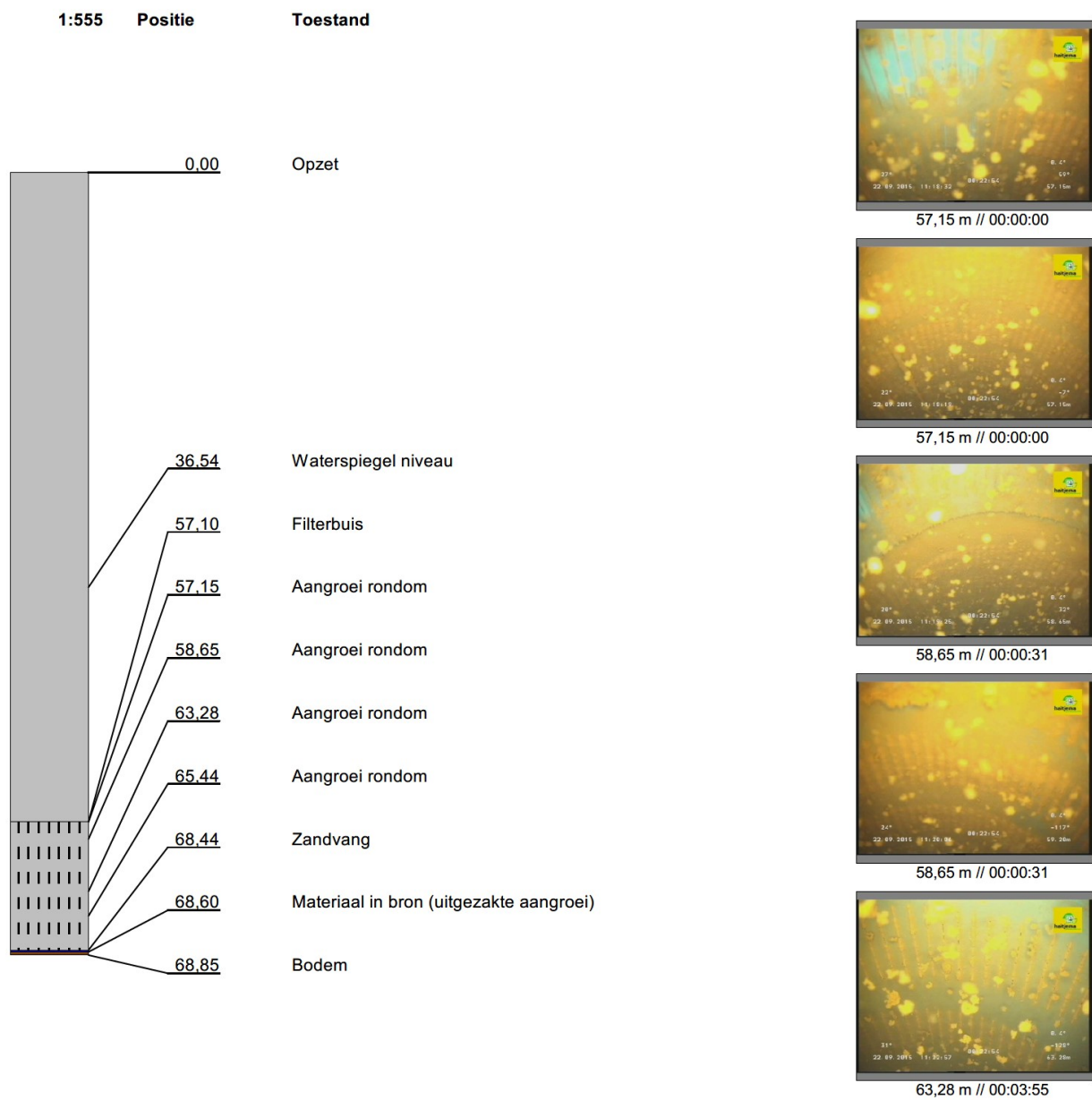
In eerste instantie werd gedacht aan een gasverstopping maar dit bleek niet het geval te zijn. In 2015 heeft Haitjema een bron inspectie uitgevoerd waarin duidelijk te zien was dat er verstopping van de filterspleten door neerslagen plaats heeft gevonden (Figuur 2.2) (Haitjema 2015). Deze neerslagen zien eruit als ijzerhydroxideneerslagen. Metingen van de grondwatersamenstelling uit 2015 laten zien dat het onttrokken grondwater zowel nitraat als ijzer bevat (

Tabel 2.1). Met waarden tot ongeveer 0,5 mg/L zijn de ijzerconcentratie van het bemonsterde grondwater niet erg hoog te noemen. Waarschijnlijk bevat het diepere grondwater wel hoger ijzerconcentraties die door menging met ondiep ijzerloos grondwater tijdens de bemonstering worden verdund. De menging van ondiep en diep grondwater tijdens bemonstering blijkt ook uit de gemeten nitraatconcentraties (4 tot 15 mg/L). IJzer en nitraat kunnen namelijk niet tegelijk voorkomen in de ondergrond..

De afgelopen jaren zijn door verschillende partijen activiteiten uitgevoerd om het probleem van de putverstopping te verhelpen maar dit heeft tot op heden onvoldoende resultaat opgeleverd. Samen met Haitjema grondboorbedrijf, ENGIE Solutions, Flierman techniek en UZ Leuven heeft KWR onderzocht of ondergronds ontjizersen een geschikte technologie is om het probleem van chemisch putverstopping bij WKO systemen te verhelpen.



Figuur 2.1. Bronlocaties WKO-systeem UZ Leuven Campus Gasthuisberg met vier koude bronnen (K1 t/m K4) en vier warme bronnen (W7 t/m W10)



Figuur 2.2. Broninspectie W7 22 september 2015 (Haitjema, 2015)

Tabel 2.1. Grondwatersamenstelling voorafgaand aan ondergrondse ontijzering (Bodemkundige dienst van België)

bron	datum	bovenkant filter meter-mv	onderkant filter meter-mv	Grondwaterst and meter-mv	O <sub>2</sub> meting start mg/L	O <sub>2</sub> meting 2 mg/L	Nitraat mg/L	Fe mg/L
K3	27-10-2015	47.5	59.5	33.5	0.95	2.45	42	0.28
K1	27-10-2015	40	52	23	1.12	1.04	4	0.45
K4	27-10-2015	47.5	59.5	33.5	1.62	2.88	15.4	0.13
K2	27-10-2015	39	51	25.5	0.92	1.19	15.3	0.49
W8	22-10-2015	53	66	35.5	0.47	1.27	14	0.19
W9	22-10-2015	51.9	61.5	32	0.44	0.73	6.1	0.20
W7	22-10-2015	58.5	69.75	33	0.51	1.19	14.4	0.40
W10	22-10-2015	40.5	51.5	23.5	0.53	0.21	<0.2	0.09

## 2.1 Chemische karakterisatie neerslagen

In de transportleiding tussen de koude bronnen en de warme bronnen (de zogenaamde 'backbone') bevindt zich nog de restverontreiniging als gevolg van de bemaling in 2014. Wanneer er water door deze backbone wordt gespuid is het water troebel en roodbruin van kleur (Figuur 2.3). Na verloop van tijd wordt dit water steeds helderder wat erop duidt dat de hoeveelheid mobiliseerbaar materiaal af neemt tijdens het spuien.



Figuur 2.3 Roodbruin water bij spuien van de backbone

Het zwevende stof in het water uit de backbone is opgevangen in filterzakken (Figuur 2.4). Om de oorzaak van de putverstopping nog eens eenduidig vast te stellen zijn de filterzakken voor chemische analyse aangeboden op het laboratorium van KWR. Het roodbruine materiaal is chemisch geanalyseerd door combinatie van X-Ray Fluorescentie Spectrometrie (XRF), element analyse op C en S (CS-analyse) en thermogravimetrische analyse (TGA).

Het resultaat van deze analyse is weergegeven in Tabel 2.2. IJzer is met 21.4% het belangrijkste element, gevolgd door silicium, koolstof, calcium en aluminium. Kalium, magnesium, mangaan en natrium zijn in relatief lage gehalten aanwezig. Het fosforgehalte is met 0.77% relatief hoog ten opzichte van normale gronddeeltjes. Het zwavelgehalte is weer laag te noemen.

Wanneer we het ijzergehalte omreken naar een zuivere ijzerhydroxide ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) geeft de een gehalte van 40.9%. De rode neerslag is echter geen zuiver ijzerhydroxide maar bevat ook significante hoeveelheden calcium, silicium en fosfaat. Bij de oxidatie van Fe(II) en neerslag van Fe(III) precipitaten in een waterige oplossing worden deze elementen in de gevormde neerslag ingebouwd (Senn et al. 2015, Voegelin et al. 2010). Dit proces wordt aangeduid als co-precipitatie.

Een duidelijke aanwijzing dat er co-precipitatie is opgetreden is het gemeten Si gehalte in combinatie met het Al gehalte. Op basis van het gemeten Al kan het percentage kleimineralen (aluminium silicaten) worden ingeschat. Het Al gehalte in kleimineralen is namelijk redelijk constant. Het gehalte aan kleimineralen in het monster is, op basis van het gemeten Al gehalte (1.3%), ongeveer 2.4% (Griffioen et al. 2012). Dit is veel lager dan op basis van het Si gehalte (11.3%) zou worden ingeschat. Het monster bestaat voor 24% uit  $\text{SiO}_2$  (bouwsteen voor silicaten waaronder kleimineralen). Als dit Si volledig uit kleimineralen zou bestaan bedraagt het gehalte aan kleimineralen ongeveer 50%, uitgaande van de samenstelling van kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_2$ ). Op basis van het Al gehalte kan dus worden uitgesloten dat al Si als kleimineralen in het monster aanwezig is. Zand kan wel (bijna) volledig uit  $\text{SiO}_2$  bestaan. Vanwege de fijne aard van het monster materiaal kan echter worden uitgesloten dat er zandkorrels en zelf siltdeeltjes in het monster aanwezig zijn. Het overschot Si moet dus door middel van co-precipitatie ingebouwd zijn in de ijzernerneerslag.

Naast Si zijn ook Ca en P als gevolg van co-precipitatie in het materiaal terecht gekomen. Dit verklaart ook de relatief hoge P gehalte en lage carbonaatgehalte (max 2.9%, zie hieronder) van het monster.

Het totaal-C gehalte is 9.3%, wat neerkomt op een organisch materiaalgehalte van ongeveer 18.6% indien het monster geen anorganisch koolstof bevat. De aanwezigheid van anorganisch koolstof (carbonaat) is echter niet helemaal uit te sluiten. De LOI550-LOI1050 (2.9%) is een maat voor het carbonaatgehalte. Behalve carbonaten verdwijnt in temperatuurtraject waarschijnlijk ook kristalwater uit het monster. Het werkelijke carbonaatgehalte is dus lager. De LOI550-LOI105 is voor normale grondmonsters ongeveer gelijk aan het organisch materiaalgehalte. Voor dit monster betekent dit dat het voor ongeveer 27% uit organisch materiaal bevat. Dit is wat hoger dan het organisch materiaalgehalte volgens CS-analyse. Mogelijk verdwijnt ook in dit temperatuurtraject andere andere verbindingen dan organisch materiaal uit het monster. Het kristalwater is dan ook weer een reële optie. Het organisch materiaalgehalte van het monster zal dus rond de 18% liggen. Dit zal voornamelijk uit restanten van micro-organisme bestaan (biomassa) die geholpen hebben bij de oxidatie van Fe(II) onder invloed van nitraat.

Het monster bestaat dus voor het grootste deel uit **onzuivere ijzerhydroxides met bijmenging van Ca, Si en P**, gevolgd door **organisch materiaal** en een klein percentage aan kleimineralen. De ijzerhydroxides en organisch materiaal zijn naar alle waarschijnlijkheid gevormd na het oppompen en mengen van nitraathoudend ondiep grondwater en ijzerhoudend dieper grondwater.



Figuur 2.4. Opegeknijpte filterzakken met roodbruine neerslagen

Tabel 2.2. Chemische samenstelling roodbruine neerslagen in filterzakken

element		methode	gehalte
Al	%	XRF	1.3
Ca	%	XRF	4.7
Fe	%	XRF	21.4
K	%	XRF	0.80
Mg	%	XRF	0.36
Mn	%	XRF	0.22
Na	%	XRF	0.12
P	%	XRF	0.77
Si	%	XRF	11.3
Ctot	%	CS-analyse	9.3
Stot	%	CS-analyse	0.24
LOI105	%	TGA	<0.05
LOI550	%	TGA	27.6
LOI1025	%	TGA	30.5

## 2.2 Grondwaterkwaliteit in de omgeving van de campus Gasthuisberg

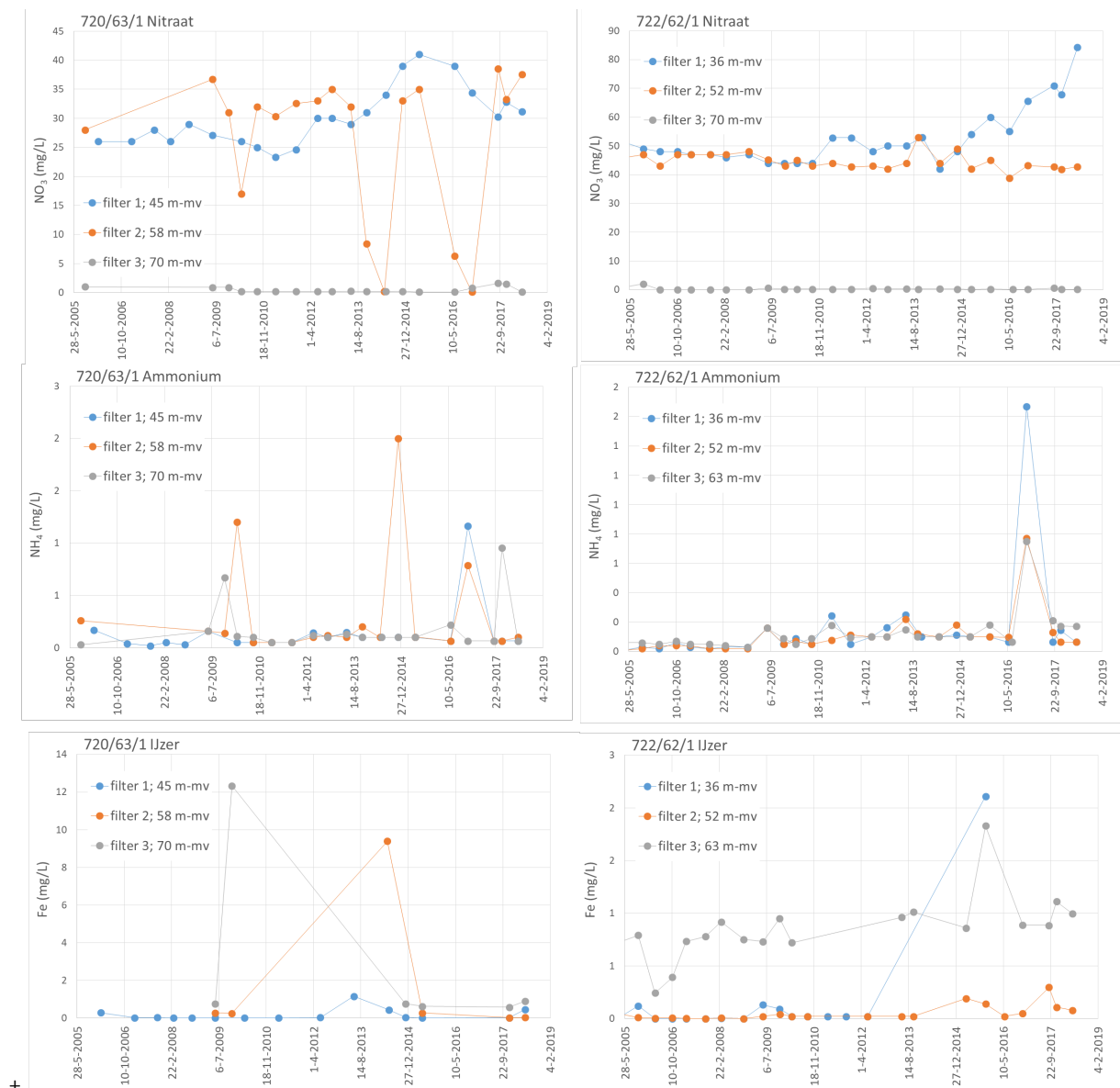
In de nabijheid van de campus Gasthuisberg liggen drie monitoringsputten van het freatisch meetnet van de VMM (Figuur 2.5) ([www.dov.vlaanderen.be](http://www.dov.vlaanderen.be)). Deze monitoringsputten hebben ieder drie filters in een dieptetraject dat vergelijkbaar is aan de filters van de WKO-bronnen. De filterstelling van de monitoringsputten van het freatisch meetnet is ca. 40 tot 70 m-mv en van de bronnen van het WKO-systeem is dit ca. 40 tot 80 m-mv. Dit betreft het Onder-Oligoceen Aquifersysteem (HVOC 0400) en het Ledo Paniseliaan Brusseliaan Aquifersysteem (HVOC 0600) die ter plekke beide als freatisch kunnen worden beschouwd. Op basis van het hoogtekartaat ligt monitoringsput 720/63/1 ongeveer stroomopwaarts van het WKO-systeem van UZL.

Tijdreeksen van de nitraat, ammonium en ijzerconcentratie vanaf 2005 van de monitoringsputten 720/63/1 en 722/63/1 zijn weergegeven in Figuur 2.6. De in monitoringsput 720/63/4 is alleen in het derde filters op een beperkt aantal momenten de grondwatersamenstelling gemeten.

De locatie 720/63/1 laat in met name in het tweede en derde filters opvallend sterke wisselingen in nitraat, ammonium en ijzerconcentraties zien. Hoewel het aantal analyses en de monsterdata niet altijd overeenkomen (en de pieken dus niet altijd direct met elkaar kunnen worden vergeleken) lijkt het patroon in afwisseling van hoge nitraatconcentratie met laag ammonium- en ijzerconcentraties en vice versa behoorlijk goed overeen te komen. Dit betekent dat het patroon met afwisseling van nitraat en ijzer niet aan analysefout kan worden toegeschreven. Verschillen in pompdebiet tijdens bemonstering zou een oorzaak kunnen zijn van deze variatie. De bemonstering en analyse van het freatisch meetnet wordt door de VMM erg gestructureerd uitgevoerd. Dit duidt erop dat er dieper in het freatisch pakket daadwerkelijk een temporele variatie is in nitraathoudend en ijzerhoudend grondwater.



Figuur 2.5. Locatie monitoringsputten freatisch meetnet VMM in de nabijheid van de campus Gasthuisberg (blauwe vierkantjes), de groene vierkantjes zijn de bronnen van het WKO-systeem) ([www.dov.vlaanderen.be](http://www.dov.vlaanderen.be)).



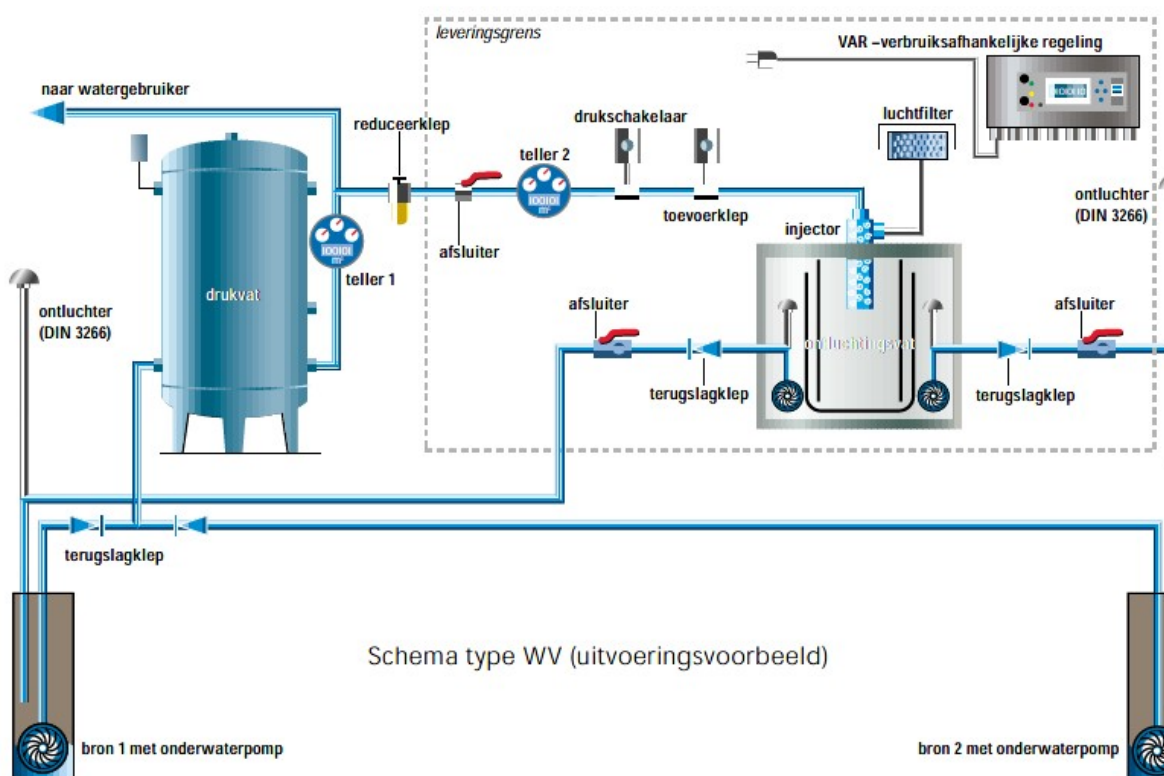
Figuur 2.6. Tijdreeksen van nitraat-, ammonium- en ijzerconcentraties in twee monitoringsputten van het fretisch meetnet in de nabijheid van de campus Gasthuisberg (data VMM, Fretisch meetnet)



### 3 Pilot ondergronds ontijzeren

Ten behoeve van de pilotproef heeft Flierman Techniek in samenwerking met Winkelkemper GmbH een tijdelijke Fermanox-installatie voor ondergronds ontijzeren geplaatst bij de koude bronnen. De doelstelling van de proef was om vast te stellen of door middel van ondergronds ontijzeren er continue ijzerloos water kan worden onttrokken uit de koude bronnen dat vervolgens getransporteerd kan worden naar de warme bronnen. Wanneer er continue ijzerloos water kan worden onttrokken zal verstopping van de infiltratiebronnen door ijzereerslagen worden voorkomen.

Indien de proef met de tijdelijke Fermanox-installatie slaagt is de UZ Leuven voornemens om twee permanente Fermanox-installaties te plaatsen bij zowel de koude bronnen als de warme bronnen. De Fermanox is in zijn basis een volledig geautomatiseerde installatie die water onttrekt uit bron 1, belucht en vervolgens infiltreert in bron 2 (Figuur 3.1). De installatie wordt zodanig geprogrammeerd dat na infiltratie van een x aantal kuub belucht water in een bron er een y aantal kuub grondwater wordt onttrokken uit dezelfde bron, waarbij y een veelvoud is van x. Een deel van dit onttrokken grondwater wordt in de Fermanox belucht en weer geïnfilteerd in de andere bron.



Figuur 3.1 Schematisch overzicht van de Fermanox-installatie (voorbeeld)

Voor de pilot proef is door Flierman techniek en Winkelkemper GmbH een procedure ontwikkeld om met de Fermanox-installatie te komen tot een duurzame productie van ijzerloos water uit de koude bronnen. Met deze procedure is in **drie fases** een reactieve zone rond de koude bronnen ontwikkeld en vervolgens getest of er langdurig ijzerloos grondwater kan worden onttrokken.

De drie fases zijn als volgt uitgevoerd:

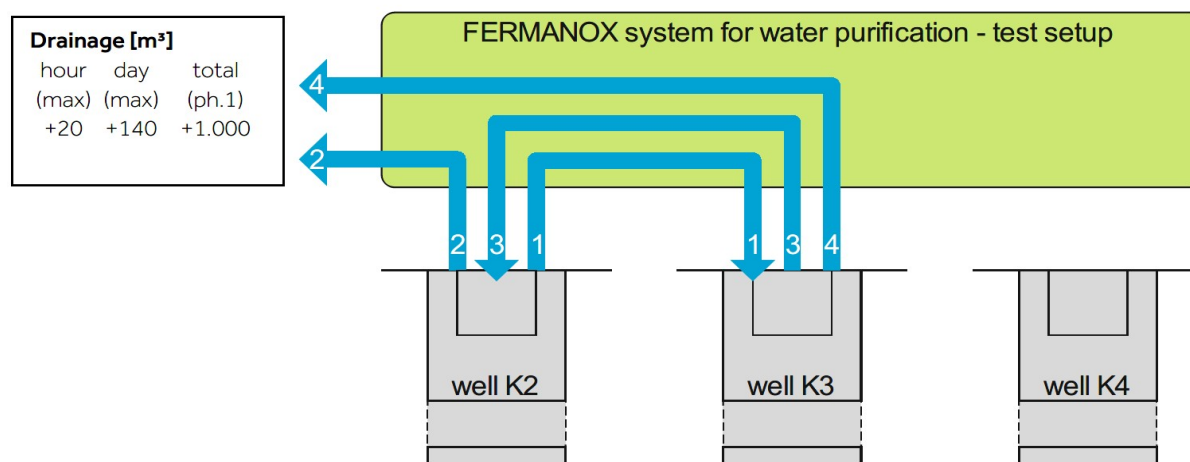
**Fase 1 (5 dagen):** in deze fase is een ijzer reactieve zone rond koude bronnen K2 en K3 gecreëerd en vergroot  
 Putten in bedrijf: K2 en K3  
 Levering van gezuiverd water: riool

Dit betrof de startfase van de pilot proef waarbij in 9 cycli de hoeveelheid onttrokken en behandeld grondwater langzaam werd opgevoerd (Figuur 3.2).

Elke behandelcyclus bestond uit 4 stappen:

1. Onttrekking vanuit bron K2 (20 m<sup>3</sup>/uur) en infiltratie in bron K3 na beluchting in de Fermanox.
2. Additionele onttrekking K2 (20 m<sup>3</sup>/uur) en lozing van dit water op het riool.
3. Omschakeling naar onttrekking vanuit bron K3 (20 m<sup>3</sup>/uur) en infiltratie in bron K2 na beluchting in de Fermanox.
4. Additionele onttrekking K3 (20 m<sup>3</sup>/uur) en lozing van dit water op het riool.

Aan het einde van stap 2 en stap 4 is een watermonster genomen ten behoeve van chemische analyse op hoofdelementen, sporenelementen en opgelost organisch materiaal (DOC).



Groundwater balance	well K2			well K3			well K4		
	hour (max)	day (max)	total (ph.1)	hour (max)	day (max)	total (ph.1)	hour (max)	day (max)	total (ph.1)
Extraction [m <sup>3</sup> ]	- 20	- 300	- 1.160	- 20	- 300	- 1.160	0	0	0
Infiltration [m <sup>3</sup> ]	+20	+160	+640	+20	+160	+640	0	0	0
Total [m <sup>3</sup> ]			- 520			- 520			0

Cyclus	Onttrekking per bron (m <sup>3</sup> )	Infiltratie per bron (m <sup>3</sup> )	Debiet bron (m <sup>3</sup> /uur)	Duur infiltratie per bron (uur)	Duur cyclus (uur)
1	30	20	20	1	3
2	30	20	20	1	3
3	60	40	20	2	6
4	60	40	20	2	6
5	60	40	20	2	6
6	160	80	20	4	16
7	160	80	20	4	16
8	300	160	20	8	30
9	300	160	20	8	30

Figuur 3.2. Cycli, waterstromen en grondwaterbalans voor fase 1

**Fase 2 (2 weken):** consolidatie van reactie zones voor bronnen K2 en K3 en infiltratie in K4

Putten in bedrijf: K2 en K3

Levering van gezuiverd water: K4

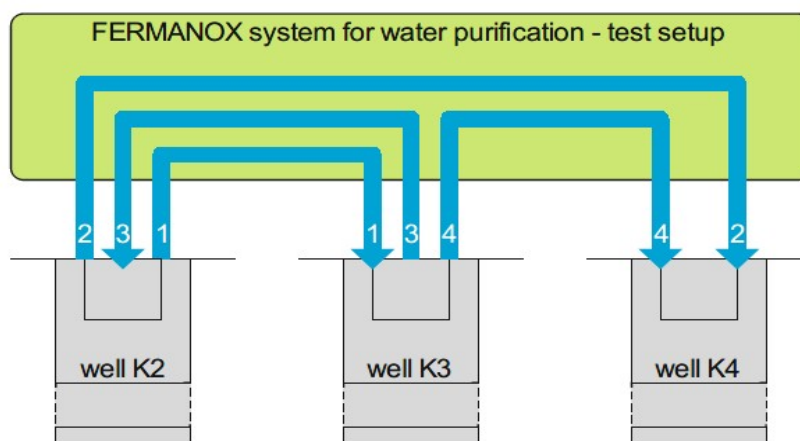
Zodra is aangetoond dat de waterkwaliteit goed is (ijzerconcentratie is lager dan 0,1 mg/L gedurende de gehele cyclus) voor putten K2 en K3, is de werking van de ondergrondse ontijzering bewezen. De putten zijn klaar voor gebruik op volledige schaal. Rond put K4 wordt dan ijzerhoudend water verdrongen door gezuiverd water in fase 2 te infiltreren. Dus, put K4 kan in het systeem worden geïntegreerd zonder dat de opbouw van een reactiezone nodig is.

Deze fase bestond uit 4 cycli van onttrekking, behandeling en infiltratie waarbij de hoeveelheid onttrokken water verder is vergroot (Figuur 3.3).

Elke behandel zuiveringscyclus bestond uit 4 stappen:

1. Onttrekking uit put K2 (20 m<sup>3</sup> / h), infiltratie in put K3 na beluchting in de Fermanox.
2. Extra onttrekking uit put K2 (ca. 20 m<sup>3</sup> / h), infiltratie in put K4.
3. Na omschakeling onttrekking uit put K3 (20 m<sup>3</sup> / h), infiltratie in put K2 na beluchting in de Fermanox.
4. Extra onttrekking uit put K3 (ca. 20 m<sup>3</sup> / h), infiltratie in put K4.

Aan het einde van stap 2 en stap 4 is een watermonster genomen ten behoeve van chemische analyse op hoofdelementen en sporenelementen.



Groundwater balance	well K2			well K3			well K4		
	hour (max)	day (max)	total (ph.2)	hour (max)	day (max)	total (ph.2)	hour (max)	day (max)	total (ph.2)
Extraction [m <sup>3</sup> ]	- 20	- 480	- 5.000	- 20	- 480	- 5.000	0	0	0
Infiltration [m <sup>3</sup> ]	+20	+260	<u>+1.040</u>	+20	+260	<u>+1.040</u>	+20	+480	<u>+6.960</u>
Total [m <sup>3</sup> ]			- 3.960			- 3.960			+7.920

Cyclus	Onttrekking per bron (m <sup>3</sup> )	Infiltratie per bron (m <sup>3</sup> )	Debiet bron (m <sup>3</sup> /uur)	Duur infiltratie per bron (uur)	Duur cyclus (uur)
10	500	260	20	13	50
11	500	260	20	13	50
12	2000	260	20	13	200
13	2000	260	20	13	200

Figuur 3.3. Cycli, waterstromen en grondwaterbalans voor fase 2

**Fase 3 (4 weken):** testen van een volledig geautomatiseerd systeem met 3 bronnen

Putten in bedrijf: K2, K3 en K4

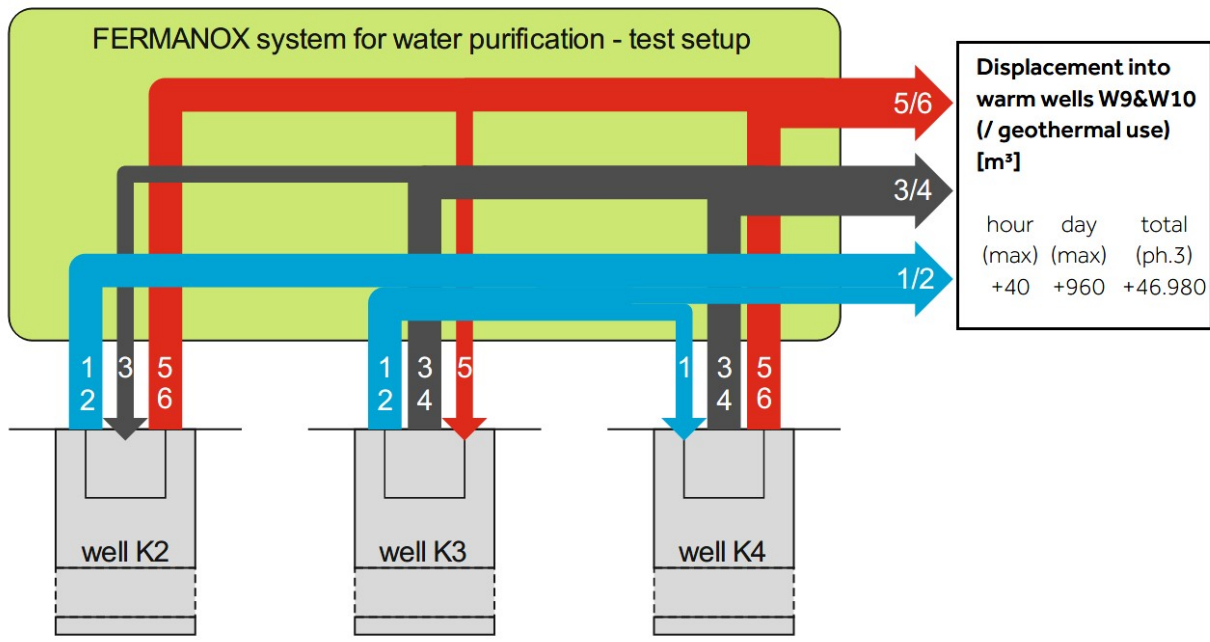
Levering van gezuiverd water: warme bronnen W7

In fase 1 en 2 is water uit slechts één put tegelijk onttrokken. Water is ofwel gebruikt voor beluchting met de Fermanox gevolgd door lozing op het riool of infiltratie in K4. Na succesvol uitvoeren van fase 1 en 2 kan water uit twee bronnen tegelijkertijd worden onttrokken. Slechts een klein deel ervan wordt gebruikt voor beluchting en herinfiltratie, terwijl het meeste onttrokken grondwater water naar de warme bronnen wordt getransporteerd. Fase 3 is dus gericht op het in gebruik nemen van een volledig geautomatiseerd en functionerend WKO systeem dat voorzien is van een installatie voor ondergrondse ontijzering van het water.

Stappen van een zuiveringscyclus:

1. Onttrekking uit putten K2 en K3 (elk ca. 20 m<sup>3</sup>/uur), infiltratie in put K4 na beluchting in de Fermanox (20 m<sup>3</sup> / uur), verplaatsing naar warme bronnen (ca. 20 m<sup>3</sup>/uur).
2. Extra onttrekking uit putten K2 en K3 (elk ca. 20 m<sup>3</sup>/h), verplaatsing naar warme putten (ca. 40 m<sup>3</sup>/h), automatische omschakeling wanneer bron K2 zijn onttrekkingslimiet heeft bereikt of bron K3 50% heeft bereikt van de limiet.
3. Onttrekking uit putten K3 en K4 (elk ca. 20 m<sup>3</sup>/uur), infiltratie in put K2 na beluchting in de Fermanox (20 m<sup>3</sup>/uur), verplaatsing naar warme bronnen (ca. 20 m<sup>3</sup>/uur).
4. Extra onttrekking uit putten K3 en K4 (elk ca. 20 m<sup>3</sup>/u), verplaatsing naar warme putten (ca. 40 m<sup>3</sup>/u), automatische omschakeling wanneer bron K3 zijn onttrekkingslimiet heeft bereikt of bron K4 50% heeft bereikt van de limiet.
5. Onttrekking uit putten K4 en K2 (elk ca. 20 m<sup>3</sup>/uur), infiltratie in put K3 na beluchting in de Fermanox (20 m<sup>3</sup>/uur), verplaatsing naar warme bronnen (ca. 20 m<sup>3</sup>/uur).
6. Extra onttrekking uit putten K4 en K2 (elk ca. 20 m<sup>3</sup>/uur), verplaatsing naar warme bronnen (ca. 40 m<sup>3</sup>/uur), automatische omschakeling wanneer bron K4 zijn onttrekkingslimiet heeft bereikt of bron K2 50% van limiet heeft bereikt.

Aantal zuiveringscycli: ca. 9



well K2			well K3			well K4			Groundwater balance
hour (max)	day (max)	total (ph.3)	hour (max)	day (max)	total (ph.3)	hour (max)	day (max)	total (ph.3)	
-20	-480	-18.000	-20	-480	-18.000	-20	-480	-18.000	Extraction [m³]
+20	+260	+2.340	+20	+260	+2.340	+20	+260	+2.340	Infiltration [m³]
		-15.660			-15.660			-15.660	Total [m³]

Cyclus	Onttrekking (m³)	Infiltratie (m³)	Debiet bron (m³/uur)	Duur infiltratie (uur)	Duur cyclus (uur)
14	6000	760	20	39	150
--					
22	6000	760	20	39	150

Figuur 3.4. Cycli, waterstromen en grondwaterbalans voor fase 3

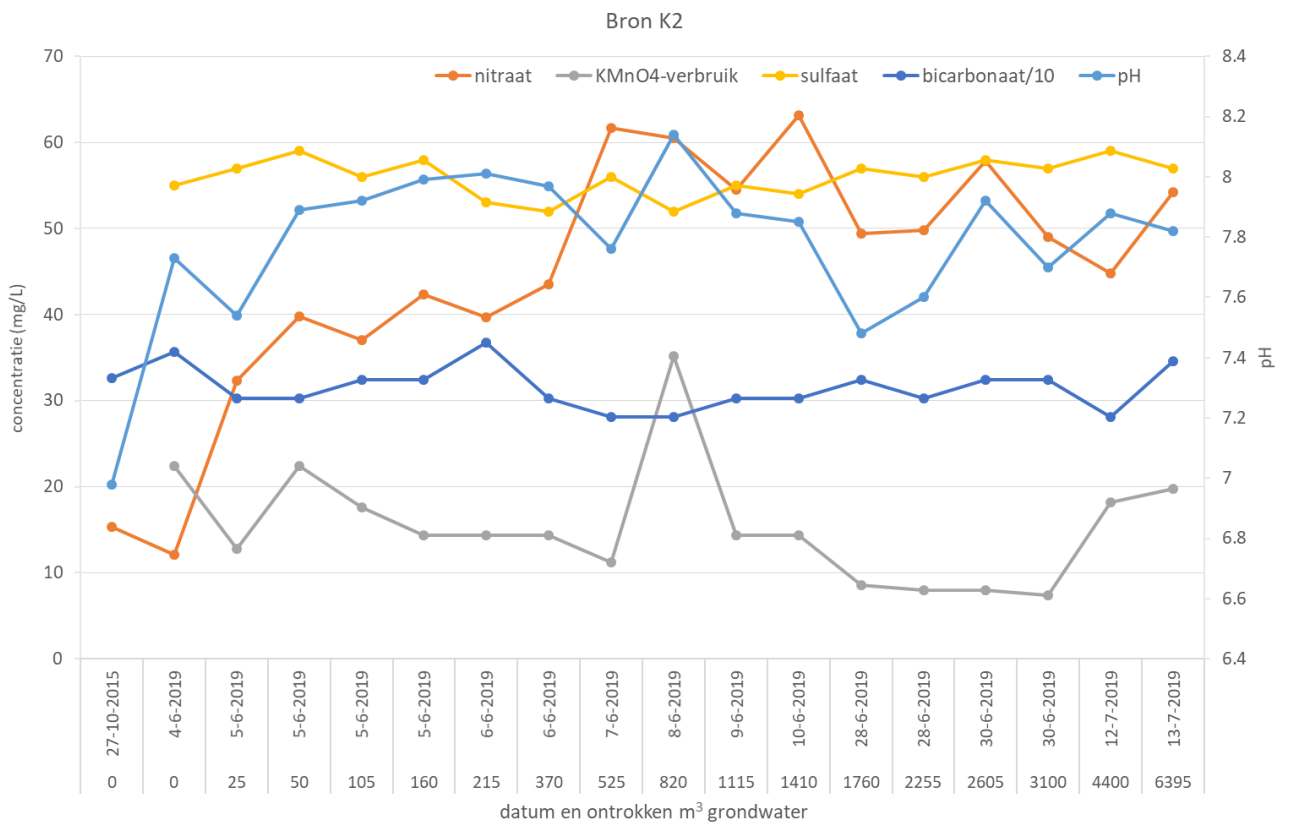
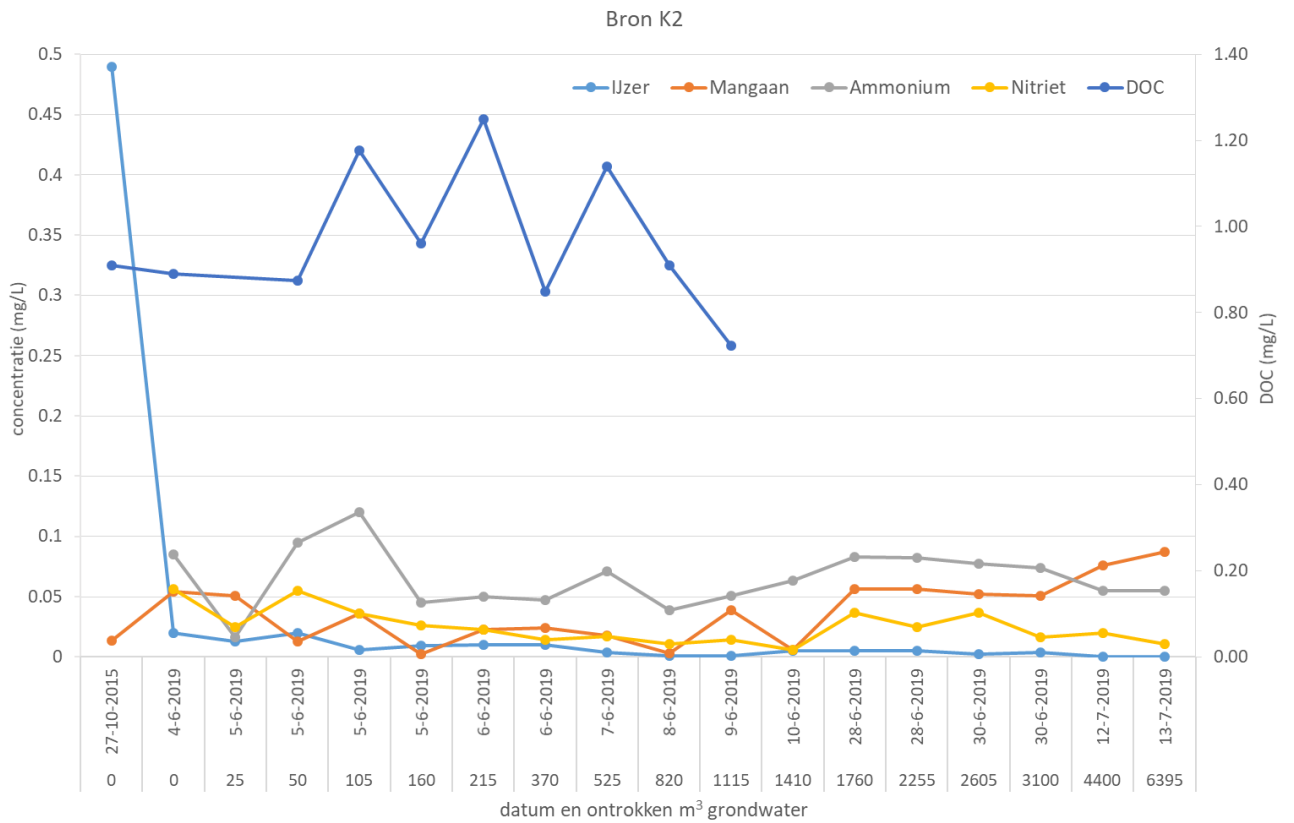
## 4 Resultaten pilotproef

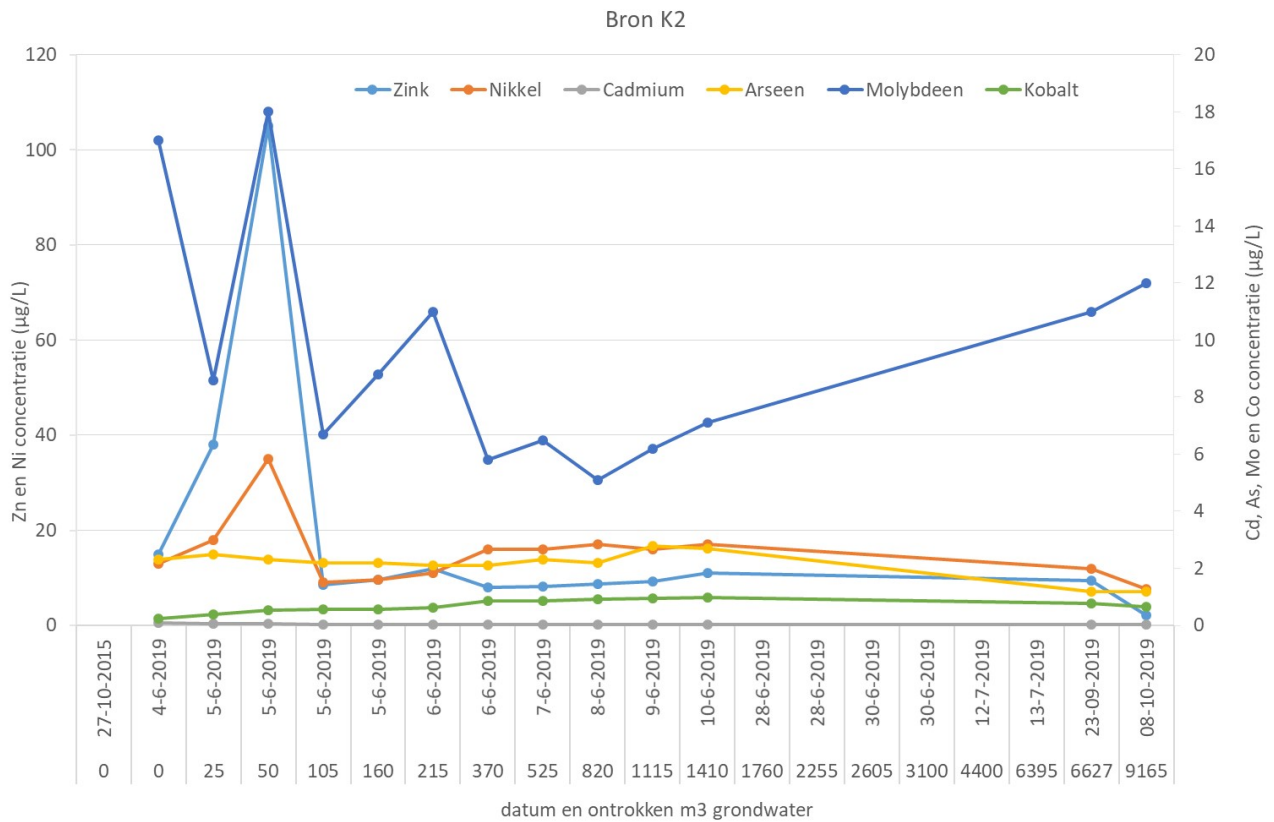
### 4.1 Fase 1 en 2 - waterkwaliteit koude bronnen

Het belangrijkste resultaat voor de waterkwaliteitsparameters van bron K2 en K3 gedurende fase 1 en 2 (Figuur 4.1 en Figuur 4.2) is dat de ijzerconcentraties van het onttrokken grondwater gedurende alle cycli laag zijn (< 0,1 mg/L). Het water dat uit K2 en K3 wordt onttrokken kan dus gebruik worden voor infiltratie in een andere bron zonder dat er een kans is op het optreden van putverstopping tijdens infiltratie van dit water.

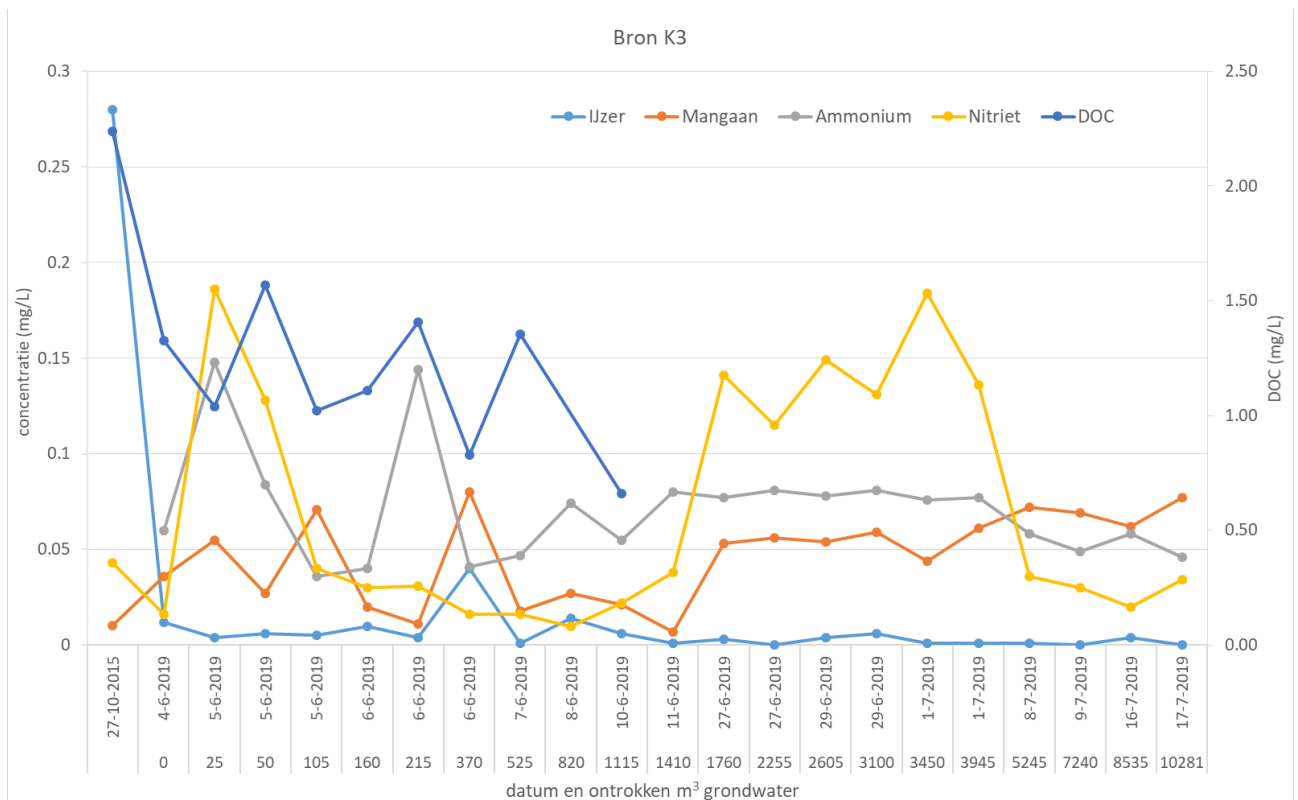
Naast de lage ijzerconcentraties zijn er nog een aantal relevante waarnemingen:

- Er is geen afname van de pH en bicarbonaatconcentratie van het onttrokken grondwater tijdens de proef. Dit betekent dat infiltratie van zuurstofrijk water niet tot een ongewenste verzuring van het grondwater leidt.
- Bron K2 geeft een toename van de nitraatconcentratie gedurende de proef. Dit duidt op een toename van de bijdrage van ondiep grondwater met hoge nitraatconcentraties tijdens bemaling. De (diepere) ondergrond lijkt enige denitrificatie capaciteit te hebben waardoor de nitraatconcentraties in het grondwater op de diepte van de filters afneemt.
- De sulfaatconcentratie neemt niet toe gedurende de proef. Dit duidt erop dat er geen oxidatie van ijzersulfides in de ondergrond plaatsvindt als gevolg van infiltratie van zuurstofrijk water.
- De sporenelementen zink, arseen, nikkel, cadmium, kobalt en molybdeen nemen niet toe gedurende de proef. Infiltratie van zuurstofrijk water heeft dus geen negatief effect op de mobilisatie van deze sporenelementen.

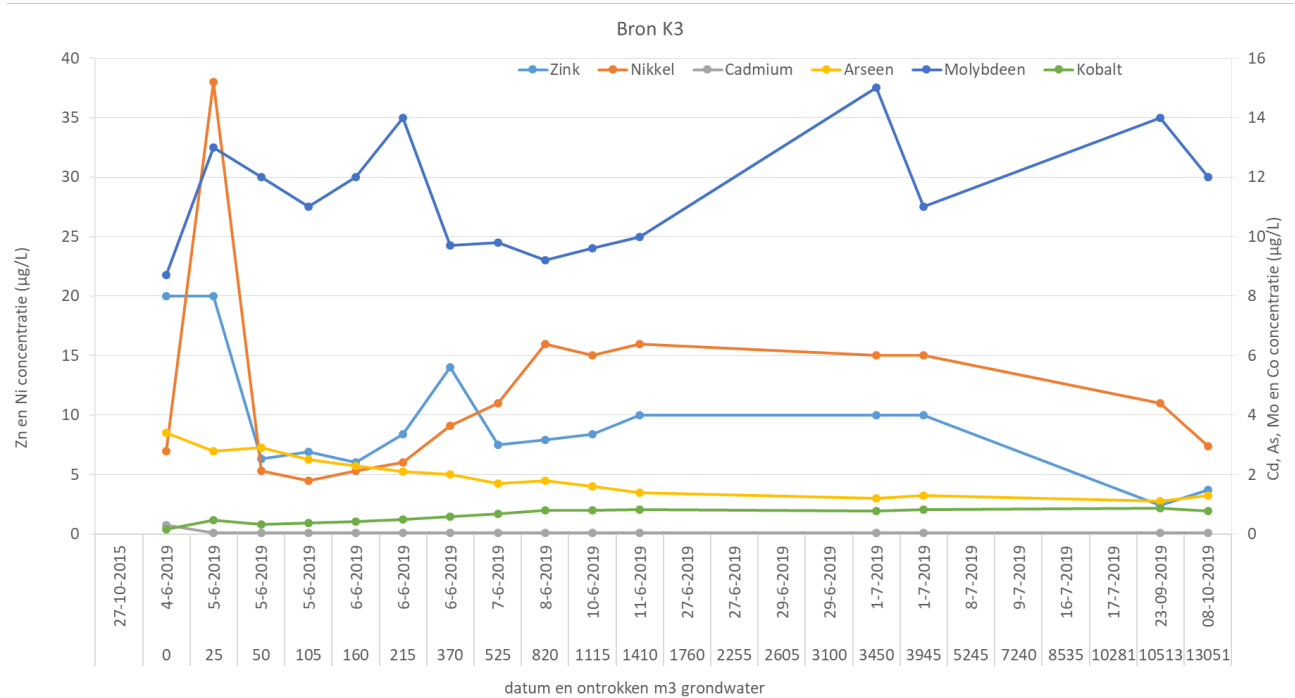
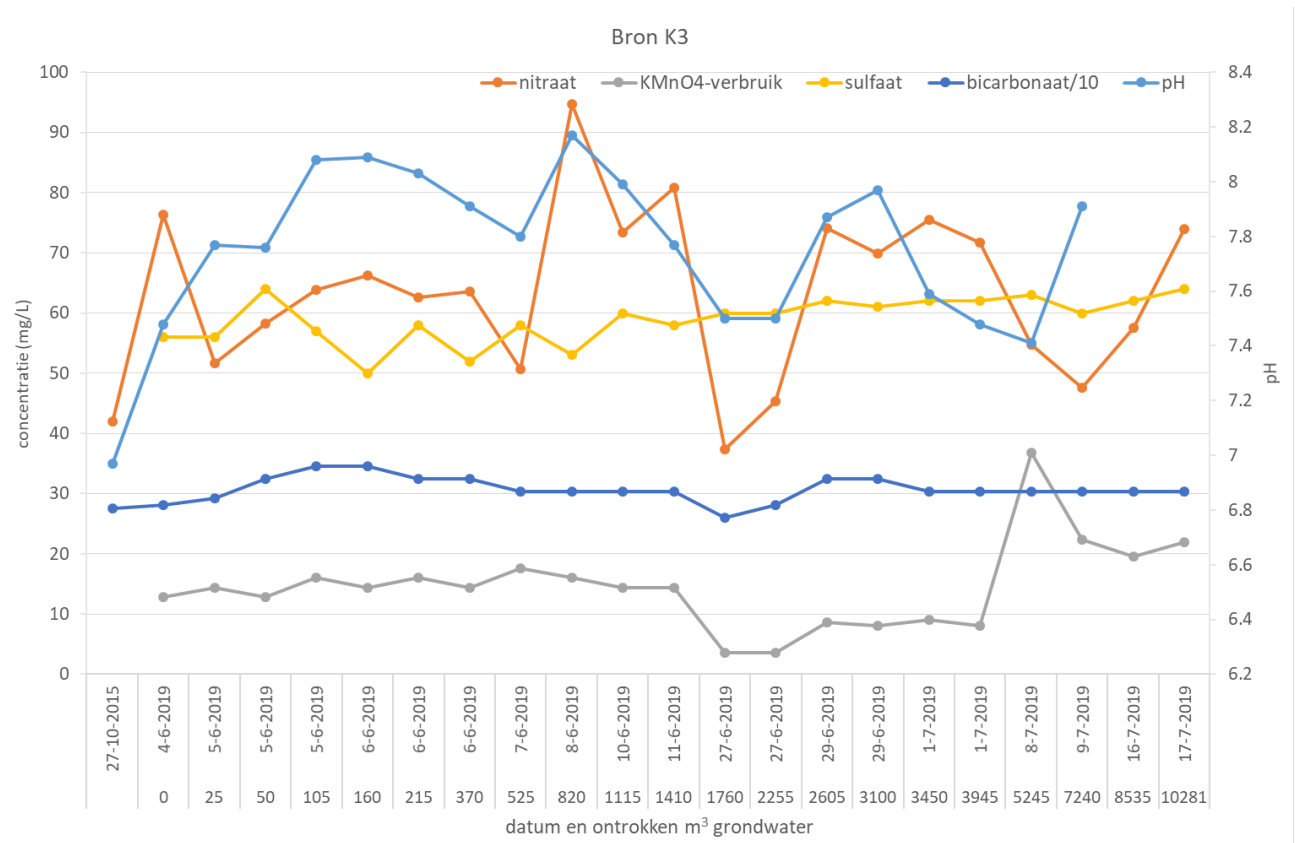




Figuur 4.1. Tijdreeks van waterkwaliteitsparameters van bron K2 zoals gemeten voorafgaand aan de ondergrondse ontjizers en gedurende fase 1 en 2 van de proef







Figuur 4.2. Tijdreeks van waterkwaliteitsparameters van bron K3 zoals gemeten voorafgaand aan de ondergrondse ontjizersen en gedurende fase 1 en 2 van de proef.

### 4.2 Fase 3 – testen WKO systeem met ondergrondse ontjizing

Na het doorlopen van fase 1 en 2 is fase 3 erop gericht om het functioneren van het WKO-systeem voorzien van een Fermanox systeem voor ondergrondse ontjizing te testen voordat een definitieve Fermanox installatie wordt

geplaatst. In fase 3 wordt het geproduceerde water uit de koude bronnen door de pijpleiding (de ‘backbone’) tussen de koude bronnen en warme bronnen getransporteerd en in de warme bron W7 geïnfiltreerd. Vrij snel na het starten van fase 3 in september 2019 bleek het waterniveau in de W7 te stijgen (Figuur 4.3), een indicatie van putverstopping. In de periode van 3 oktober tot 7 oktober stijgt de waterstand in W7 ongeveer 4 meter bij een gelijkblijvend debiet. Op 8 oktober is het systeem stopgezet waarna W7 door Haitjema is gejutted. Hierbij wordt getracht de infiltratiecapaciteit van de bron te verhogen. In de periode tussen 12 november en 25 november is er geen sprake van een toename van het waterniveau in W7. Tussen 25 november en 27 november staat het systeem uit. Na opstart op 27 november neemt het waterniveau direct toe en deze toename zet door tot het einde van de meetperiode. De opstart van het WKO-systeem op 27 november lijkt dus bij te dragen aan de verminderde infiltratiecapaciteit.

In de koude bronnen is geen afname of toename van de waterniveaus te zien tijdens de onttrekking en infiltratie van grondwater. De meest voor de hand liggende verklaring voor de toename van de waterstand in W7 is verstopping van het filter met neerslagen die nog als restverontreiniging uit het verleden in de backbone aanwezig zijn. Het vervolg van fase 3 is erop gericht om de oorzaak van de verstopping te achterhalen. De aanwezigheid van een restverontreiniging in de backbone was al bekend. De warmtewisselaar is namelijk ook verontreinigd met ijzerneerslagen en tijdens het spuien van de backbone voorafgaand aan fase 3 bleek er roodbruin water uit de backbone te stromen (Figuur 2.3).

Reinigen van de backbone is een kostbare aangelegenheid. Dit was de reden om met fase 3 te beginnen voordat de backbone is gereinigd. Voorafgaand aan de beslissing tot reinigen moet de oorzaak van de verminderde infiltratiecapaciteit eenduidig worden vastgesteld. De meest voor de hand liggende hypothese is de mobilisatie van de ijzerhydroxyde neerslagen in de backbone tijdens het opstarten van het systeem. Andere oorzaken zoals de vorming van verse neerslagen uit de koude bronnen moeten dus worden uitgesloten.



Figuur 4.3. Waterniveau debiet koude bronnen en warme bron tijdens start fase 3

Om de oorzaak van de verminderde infiltratiecapaciteit eenduidig vast te stellen zijn tijdens de uitvoer van fase 3 aanvullende metingen uitgevoerd, naast de routinematig meting van de waterkwaliteit uit de koude bronnen (ijzer, nitraat, e.d.). Het aanvullende meetprogramma betrof:

1. Plaatsen filterpotten met 50  $\mu\text{m}$  filterzakken voor W7 en bemonstering en chemische analyse materiaal uit filterzakken (zie paragraaf 2.1).
2. Plaatsen troebelheidsmeters bij K3 en W7 (Figuur 4.4). De troebelheids meters zijn speciaal voor de drinkwatersector ontwikkeld en kunnen uiterst nauwkeurig in een zeer laag waardebereik semi-continue de troebelheid water een waterstroom meten (in NTU).
3. Bemonstering K2, K3 en W7 voor labanalyse troebelheid binnen 24 uur en na langere periode. Deze metingen zijn gebruik voor validatie van de gemeten waardes afkomstig van de semi-continue troebelheidsmeters. Ook wordt met deze metingen het ontstaan van deeltjes na monsternamen gevolgd. IJzerneerslagen kunnen immers worden gevormd na meningen van nitraat en ijzerhoudend grondwater.
4. MFI metingen K2, K3, en W7.
5. Bemonstering K2, K3 en W7 voor analyse opgeloste concentratie metalen en totaal concentratie metalen
6. Meten zuurstofconcentratie (optische sensor) en bemonsteren grondwater t.b.v. eventuele gasanalyse.



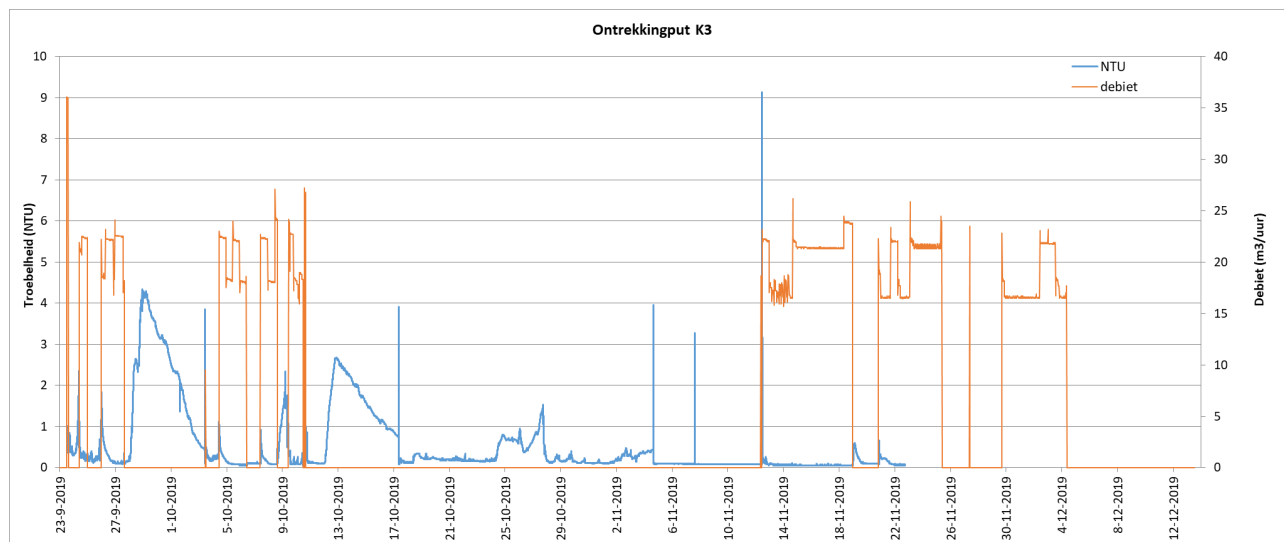
Figuur 4.4. Aansluiting troebelheidsmeter (zwarte buisje) bij W7 voor het filter

Tabel 4.1. Indicatieve grenswaarde voor infiltratiewater om putverstopping te voorkomen (Paalman and Zuurbier 2019)

parameter	grenswaarde
Zwevende stof	< 0.1 mg/L
Troebelheid	< 1 NTU
Dissolved Organic Carbon (DOC)	< 2 mg/L
IJzer	< 0.01 mg/L
Assimilable Organic Carbon (AOC)	< 10 $\mu\text{g}$ acetate-C/L
Modified Fouling Index (MFI)	< 3-5 s/L <sup>2</sup>

Figuur 4.5 en Figuur 4.6 geven tijdreeksen van troebelheid van het onttrokken en te infiltreren water bij K3 en W7. Er bestaan geen harde grenswaarden voor de troebelheid van water met het oog op putverstopping bij

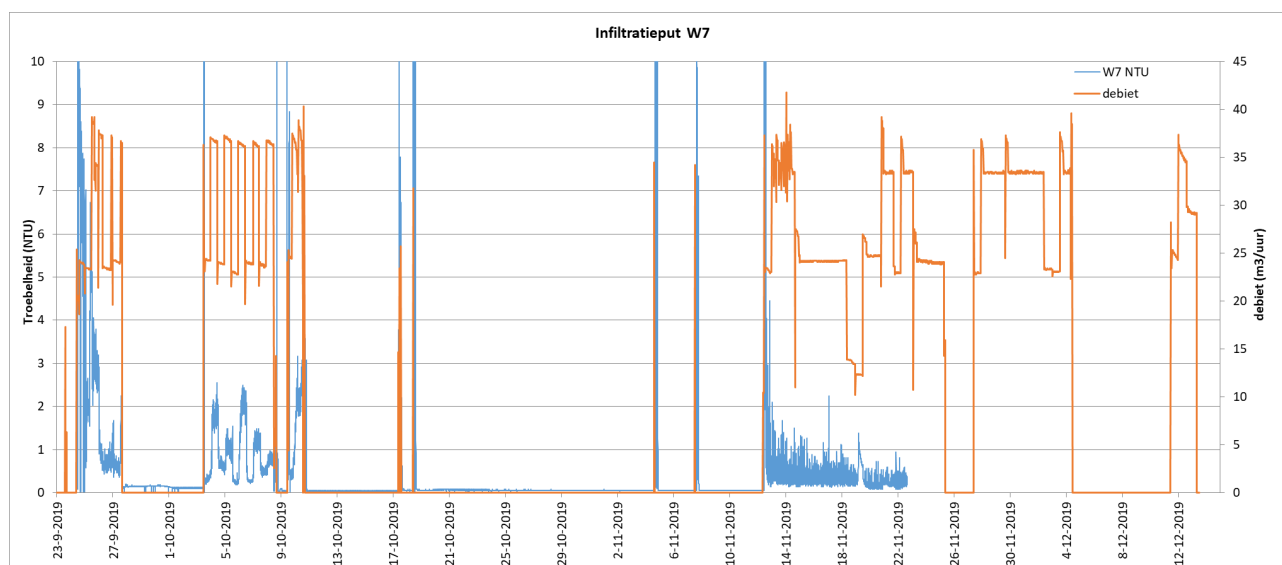
infiltratieputten. Een NTU waarde van 1 wordt vaak als grenswaarde gebruikt waaronder veilig kan worden geïnfiltreerd (Tabel 4.1). De wettelijke norm voor drinkwater is 4 NTU. Goed drinkwater heeft een troebelheid van ongeveer 0,5 NTU.



Figuur 4.5. Troebelheid en debiet koude bron K3

Waarnemingen troebelheid bij K3:

- Tijdens onttrekking is troebelheid altijd laag (< 1 NTU), uitzonderingen zijn startmomenten na langere periodes van inactiviteit waar korte periodes van verhoogde troebelheid zijn waargenomen (zoals op 12-11-2019)
- Op sommige momenten waarop het systeem uit staat is er een toename en hierop volgende afname van de troebelheid waarneembaar (28-09, 08-10, 12-10 en 27-10). Deze toename wordt echt niet altijd tijdens rustperiodes waargenomen (3-10, 6-10 en 19-11). Voor dit patroon is geen directe verklaring voorhanden. Theoretisch kan de toename verklaart worden door oxidatie en neerslag van ijzerdeeltjes in de leiding na oppompen. De watermonsters uit K3 (en K2) laten echter geen toename van troebelheid tussen veld en lab zien en ook niet tussen opeenvolgende labmetingen (Tabel 4.2). Hier is dus geen vorming van deeltjes in het onttrokken grondwater. Ook zijn de ijzerconcentraties na filtratie en totaal ijzerconcentraties na destructie van de K3 monster laag. De verschillen in 'lag time' tussen stopzetten van de pomp en toename van de troebelheid zijn ook moeilijk te verklaren.
- Tijdens de stilstand van het systeem tussen 10-10 en 12-11 zijn er enkele kortdurende pieken in troebelheid waarneembaar deze zijn gerelateerd aan kortdurende pompactiviteiten van ander bronnen (K2 en K4).



Figuur 4.6. Troebelheid en debiet warme bron W7

#### Waarnemingen bij W7:

- Direct na opstart van het systeem op 23 september is de troebelheid hoog (waardes hoger dan 10 liggen boven het meetbereik van de troebelheidmeter, de werkelijke troebelheid van dit water is dus niet bekend). In een periode van enkele dagen neemt de troebelheid af tot waardes onder de 1 NTU bij putschakeling met één koude bron.
- De puls in troebelheid is na de herstart van het systeem op 3 oktober is veel kleiner dan bij de start op 24 september. Dit duidt op een afname van de hoeveelheid mobiliseerbare neerslagen in de backbone.
- Troebelheid reageert op putschakeling van één naar twee koude bronnen en omgekeerd. Dit duidt op mobilisatie van neerslagen in de backbone die afhankelijk is van het debiet door de leiding. In de periode van af 12-11 wordt dit echter niet meer waargenomen
- Troebelheid met een debiet uit twee koude bronnen neemt af gedurende de proef
- De ruis op het signaal vanaf 12-11 is (veel) groter dan in de periode voor 10-10. Ook zijn wisselingen in de putconfiguratie niet meer in het signaal zichtbaar. Mogelijk functioneert de troebelheidmeter gedurende deze periode niet optimaal.

Tabel 4.2 geeft een overzicht de verstoppingsparameters zoals door KWR op steekmonster zijn gemeten tijdens fase 3 van de pilot proef. De belangrijkste waarnemingen zijn:

- De opgeloste ijzerconcentraties en totaal ijzerconcentraties in het water uit K2 en K3 is laag, ditzelfde geldt ook voor de mangaanconcentratie. Dit duidt erop dat er geen potentie is op de vorming van neerslagen in het grondwater onttrokken uit deze bronnen.
- Gemeten troebelheid lab van 12-12-2019 monsters is laag (vrijwel op detectieniveau apparatuur). Deze monsters zijn niet speciaal geconserveerd om vorming van ijzerveerslag te voorkomen. Aangezien de monsters pas een dag na monsternamen zijn geanalyseerd is al het eventuele opgeloste Fe(II) al geoxideerd en neergeslagen. Uit de lage troebelheid (< 1 NTU) blijkt dat het onttrokken grondwater geen potentie heeft voor vorming van neerslagen.
- Voor K2 en K3 is er geen toename van de troebelheid-lab in opeenvolgende metingen. Dit bevestigt de bovenstaande observatie.
- Gemeten MFI waardes op 12-12-2019 zijn laag voor alle monsters. Dit geldt ook voor de monsters K3 en K7 van 08-10-2019. Het monster K2 van 08-10-2019 heeft een wat hogere MFI waarde maar deze is nog wel lager dan de grenswaarde zoals gerapporteerd in Tabel 4.1.
- IJzer en mangaan van het water uit de koude bronnen zijn laag. Ditzelfde geldt ook voor de DOC concentratie. De gemeten DOC concentraties van het onttrokken grondwater tijdens fase 1 liggen met waardes rond de 1 mg/L ook lager dan de indicatieve grenswaarde voor putverstopping (Figuur 4.1 en Figuur 4.2)

Tabel 4.2. Verstoppingsparameters tijdens fase 3

monster	datum	troebelheid	troebelheid	MFI	IJzer	IJzer	Mangaan	Mangaan	DOC
		veld	lab		na filtratie	na HNO3 destructie	na filtratie	na HNO3 destructie	
		FNE	FNE	s/L2	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l
K2	23-09-2019	-	3.4	-	0.1	-	9.5	-	-
K2 [2e meting op 09-10-2019]	23-09-2019	-	3.2	-	-	-	-	-	-
K2 [3de meting op 10-10-2019]	23-09-2019	-	3.9	-	-	-	-	-	-
K3	23-09-2019	1.02	1.0	-	0.034	-	16	-	-
K3 [2e meting op 09-10-2019]	23-09-2019	-	0.98	-	-	-	-	-	-
K3 [3de meting op 10-10-2019]	23-09-2019	-	1.2	-	-	-	-	-	-
W7	23-09-2019	-	0.17	-	<0.01	-	10	-	-
W7 [2e meting op 09-10-2019]	23-09-2019	-	0.21	-	-	-	-	-	-
W7 [3de meting op 10-10-2019]	23-09-2019	-	0.42	-	-	-	-	-	-
K2	08-10-2019	-	0.55	1.96	0.012	0.11	4.4	5	-
K2 [2de meting op 10-10-2019]	08-10-2019	-	0.63	-	-	-	-	-	-
K3	08-10-2019	0.2	0.35	0.79	0.02	0.03	7.1	7.4	-
K3 [2de meting op 10-10-2019]	08-10-2019	-	0.19	-	-	-	-	-	-
W7	08-10-2019	0.04	<0.10	0.73	<0.01	0.01	<0.01	5.2	-
W7 [2de meting op 10-10-2019]	08-10-2019	-	0.11	-	-	-	-	-	-
W7 voor filter	12-12-2019	-	0.12	0.56	0.0027	0.02	5.1	4.5	0.38
W7 na filter	12-12-2019	-	-	0.52	-	-	-	-	-
K2	12-12-2019	-	0.34	0.83	0.008	0.03	4.8	4.1	0.37
K4	12-12-2019	-	0.22	0.48	0.0055	0.05	7.2	9	0.39

Op basis van de resultaten van fase 3 kunnen we stellen dat het onttrokken grondwater uit de koude bronnen geen aanleiding geeft tot vorming van neerslagen tijdens transport door de backbone die vervolgens de infiltratieput kunnen verstopen. De ondergrondse ontijzering is dus effectief.

De pieken in troebelheid bij W7 direct na het opstarten van het systeem zijn het gevolg van mobilisatie van neerslagen in de backbone die hier nog als restverontreiniging vanuit het verleden (voor de inzet van de ondergrondse ontijzering) aanwezig waren. Dit kan verder geïllustreerd worden met het volgende sommetje. De troebelheid van het water in NTU is ongeveer 1:1 gecorreleerd aan het zwevende stofgehalte (ZS). Door de continue gemeten NTU waarde als ZS te vermenigvuldigen met het debiet kan de zwevende stofflux bij K3 en W7 worden berekend. Gedurende de meetperiode vanaf 23 september tot 21 november is dit 1 kg bij K3 en 13.5 kg bij W7. De stofflux bij W7 is nog een onderschatting van de werkelijke stofflux omdat de pieken boven 10 NTU zijn afgekapt.

Reiniging van de backbone lijkt op basis van de metingen noodzakelijk om tot een duurzaam functionerend WKO-systeem te komen.

## 5 Risico op putverstopping bij WKO in Vlaanderen

Door middel van een data analyse met grondwaterkwaliteit gegevens is onderzocht wat de risico is voor putverstopping door ijzerneslagen bij onttrekking van grondwater uit het freatisch pakket in Vlaanderen. Hiervoor is gebruik gemaakt van data van het freatisch meetnet en het primair meetnet van de Vlaamse Milieu Maatschappij (VMM). Het risico op putverstopping is bepaald op basis van de potentie voor reacties tussen nitraathoudend ondiep en ijzerhoudend diep water na onttrekking uit het freatisch pakket.

Voor de analyse is gebruik gemaakt van data de databank van Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV). Deze data is door VMM aangeleverd. Deze data is zowel afkomstig uit het Primair meetnet als het Freatisch meetnet. Voor alle meetpunten is het aquifer type herleidbaar. Zowel data met het aquifer type "Freatisch" en als "Onbekend" is voor de analyse meegenomen.

De volgende acties zijn achtereenvolgend uitgevoerd voorafgaand aan de verdere analyse van de data:

1. De stratigrafie van de meetpunten is opgehaald uit de DOV database via de pydov module van de VMM. In de stratigrafie is aangegeven: Formatie, diepte (+laagdikte) en ouderdom met aangegeven betrouwbaarheid van deze data.
2. Grondwaterstanden zijn opgehaald uit de DOV database via de pydov module van de VMM. Hierin is aangegeven: filterdiepte, aquifer type, maaiveld hoogte en gemeten peilhoogte (per datum/meting)

De macrochemische data van de DOV is geanalyseerd op aanwezigheid van ijzer (Fe-totaal, Fe(II), Fe(III)) en nitraat voor zowel het meest diepe als ondiepe filter per monitoringsput. Vervolgens is een statistische analyse uitgevoerd waarbij voor nitraat en ijzertotaal per filterdiepte de gemiddelde, mediaan, minimum en maximumconcentratie is bepaald. Aangenomen is dat er een risico is op putverstopping door menging van ijzerhoudend en nitraathoudend grondwater als ondiep (in het meest ondiepe filter) de mediaanwaarde van de nitraatconcentratie hoger is dan 1 mg/L (als mediaanwaarde) en diep (in het diepste filter) de mediaanwaarde van de ijzerconcentratie hoger is >0,5 mg/L.

Vervolgens is een classificatie gemaakt voor het risico op putverstopping door vorming ijzerneslagen op basis van de mediaanwaarden van nitraat in het meest ondiepe filter en ijzer in het meest diepe filter. Hierbij is onderstaande kruistabel (Tabel 5.1) genomen als uitgangspunt.

Tabel 5.1. Kleurcodering "risico op putverstopping door redox-condities" (Groen: "Minimaal", Geel: "Klein/beperkt", Oranje: "Matig", Rood: "Hoog", Dieprood: "Heel hoog"). Nitraat en ijzerconcentraties zijn in mg/L

	IJzer < 0.5	IJzer < 2	IJzer < 5	IJzer > 5
<b>Nitraat &lt; 1</b>	1	1	1	1
<b>Nitraat &lt; 10</b>	1	2	3	3
<b>Nitraat &lt; 50</b>	1	3	3	4
<b>Nitraat &gt; 50</b>	1	3	4	5

Het aantal metingen dat volgens deze classificatie binnen iedere categorie valt is weergegeven in (Tabel 5.2).

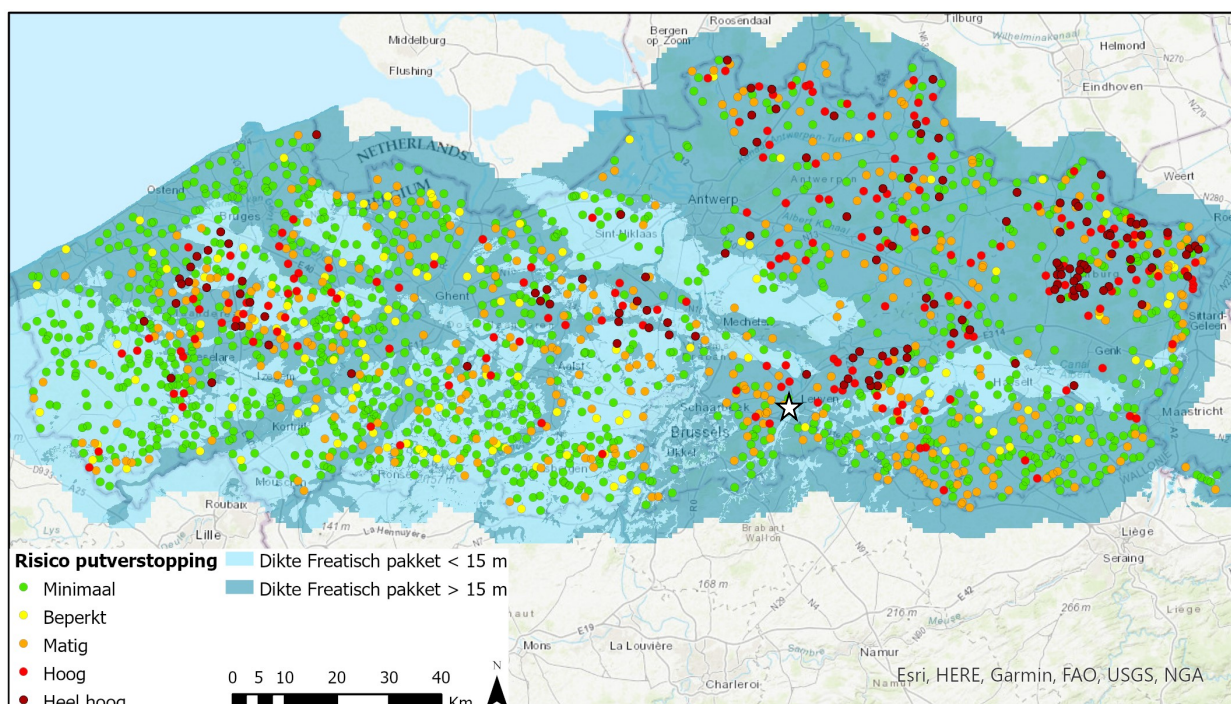
Tabel 5.2: Aantal meetpunten vallend in iedere categorie

	IJzer < 0.5	IJzer < 2	IJzer < 5	IJzer > 5
Nitraat < 1	97	101	115	204
Nitraat < 10	104	65	51	106
Nitraat < 50	187	92	57	113
Nitraat > 50	283	118	69	133

Als laatste stap is een puntenkaart gemaakt met het risico op putverstopping door menging van nitraathoudend en ijzerhoudend grondwater bij onttrekking uit het freatisch pakket (Figuur 5.1). Met het oog op de geschiktheid van het freatisch pakket voor WKO is in deze kaart de gebieden aangegeven waar het freatische watervoerende pakket dikker is dan 15 m en dunner dan 15 m. Pakketten dunner dan 15 m zijn niet echt geschikt voor WKO systemen.

Figuur 5.1 geeft een heterogeen beeld, waarbij de meetlocaties van het freatisch grondwater met een minimaal tot heel hoog risico op putverstopping naast elkaar kunnen voorkomen. Wanneer er met enige afstand naar de kaart wordt gekeken blijkt wel dat er gebieden zijn in Vlaanderen met een risico op putverstopping. Dit geldt bijvoorbeeld voor de provincies Antwerpen en Limburg, het gebied tussen Hasselt en Leuven, het gebied tussen Dendermonde en Mechelen en het gebied ten zuiden van Brugge. In het gebied rond de UZ Leuven komen ook relatief veel meetlocaties van het freatisch meetnet voor die vallen vooral in de categorieën matig, hoog en heel hoog.

Bij de realisatie van WKO systemen in gebieden waarin meetlocaties van het freatisch meetnet voorkomen met een matig tot hoog risico op putverstopping zou tijdens het ontwerp specifiek aandacht besteed moeten worden aan de grondwaterkwaliteit. Uit de pilotproef uit de UZ Leuven gebleken dat, in geval van voorkomen van nitraat en ijzer in hetzelfde watervoerende pakket, ondergrondse ontjizersen mogelijk een geschikte en duurzame technologie om het risico op putverstopping te verminderen of te voorkomen. Hierdoor kunnen er waarschijnlijk WKO-installaties worden ontwikkeld in gebieden die op voorhand niet geschikt lijken te zijn voor WKO.



Figuur 5.1. Risico's op putverstopping door menging van nitraathoudend en ijzerhoudend grondwater bij onttrekking uit het eerste watervoerende pakket op basis van de meetlocaties van het freatisch meetnet in Vlaanderen met de dikte van het freatisch pakket als achtergrond (bron: VMM). De locatie van de UZ Leuven is weergegeven door middel van de witte ster.



## 6 Conclusies

Op basis van de uitgevoerde studie kunnen de volgende conclusies worden getrokken ten aanzien van de putverstoppingsproblematiek van het WKO-systeem van de UZ Leuven, campus Gasthuisberg:

- De putverstoppingsproblemen zijn veroorzaakt door vorming van ijzerneslagen als gevolg van menging van nitraathoudend en ijzerhoudend grondwater bij onttrekking uit het freatisch grondwaterpakket.
- De proef met de tijdelijke Fermanox-installatie voor ondergronds ontijzeren van de koude bronnen wijst uit dat door periodiek infiltratie van belucht zuurstofhoudend water er continue ijzerloos grondwater kan worden onttrokken.
- Infiltratie van belucht zuurstofhoudend water heeft geen nadelige effecten op de grondwaterkwaliteit in termen van een verlaging van de pH mobilisatie van sporenelementen.
- Ondergronds ontijzeren is een duurzame oplossing om de putverstoppingsproblemen van het WKO-systeem van de UZ Leuven door vorming van neerslagen te voorkomen.
- De mobilisatie van ijzerneslagen die nog als restverontreiniging uit de periode voorafgaand aan de ondergronds ontijzering in de backbone aanwezig zijn naar alle waarschijnlijkheid de oorzaak van het teruglopen van de infiltratiecapaciteit van de warme bron tijdens de pilotproef.
- Reinigen van de backbone van de WKO-installatie is noodzakelijk om tot een langdurig operationeel systeem te komen. Ook zullen de warme bronnen die nog (deels) verstopt zijn met de ijzerhydroxide neerslagen uit het verleden intensief gereinigd moeten worden.

Meer algemeen kunnen vervolgens de volgende conclusies worden getrokken:

- In grote delen van Vlaanderen een risico bestaat op het optreden van putverstopping door vorming van ijzerneslagen bij onttrekking van grondwater uit het freatische pakket.
- In gebieden met een matig tot hoog risico op het optreden van putverstopping is ondergrondse ontijzeren mogelijk een geschikte en duurzame technologie om het risico op putverstopping bij WKO-installaties te voorkomen.
- Door inzet van ondergronds ontijzeren kunnen er waarschijnlijk WKO-installaties worden ontwikkeld in gebieden die hiervoor op voorhand niet geschikt. Ondergronds ontijzeren kan daarmee een waardevolle bijdrage leveren aan de energietransitie.

## 7 Referenties

de la Loma Gonzales, B. and Hartog, N. (2016) Subsurface Iron removal in historical pilots: Modelling tools, p. 65, KWR, Nieuwegein.

Griffioen, J., Klein, J. and van Gaans, P.F.M. (2012) Reaction capacity characterization of shallow sedimentary deposits in geologically different regions of the Netherlands. *Journal of Contaminant Hydrology* 127(1), 30-46.

Haitjema, G. (2015) Broninspectierapport, Grondboorbedrijf Haitjema, Dedemsvaart.

Paalman, M. and Zuurbier, K. (2019) Enabling aquifer storage and recovery (ASR) by high flowrate filtration for improved water management, deliverable of the EU AquaNES project. KWR (ed).

Senn, A.-C., Kaegi, R., Hug, S.J., Hering, J.G., Mangold, S. and Voegelin, A. (2015) Composition and structure of Fe(III)-precipitates formed by Fe(II) oxidation in water at near-neutral pH: Interdependent effects of phosphate, silicate and Ca. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 162, 220-246.

Vandenbohede, A., Wallis, I. and Alleman, T. (2019) Trace metal behavior during in-situ iron removal tests in Leuven, Belgium. *Science of The Total Environment* 648, 367-376.

Voegelin, A., Kaegi, R., Frommer, J., Vantelon, D. and Hug, S.J. (2010) Effect of phosphate, silicate, and Ca on Fe(III)-precipitates formed in aerated Fe(II)- and As(III)-containing water studied by X-ray absorption spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(1), 164-186.