

A network diagram consisting of various sized circles connected by thin lines, set against a blue background. The circles vary in size and are connected in a complex, interconnected pattern.

KWR 2022.076 | Juli 2022

Pilot onderzoek naar het gebruik van vlokmiddel gemaakt van waterijzer

**Doseertesten op RWZI influent van locatie
Bath (WBD)**

Samenwerkingspartners



Rapport

Pilot onderzoek naar het gebruik van vlokmiddel gemaakt van waterijzer

Doseertesten op RWZI influent locatie Bath (WBD)

KWR 2022.076 | Juli 2022

Opdrachtnummer

402086/001

Projectmanager

Erwin Beerendonk

Opdrachtgever

TKI

Auteurs

Wolter Siegers, Roberta Hofman (KWR), Bart Joosse, Estelle van den Broek (WBD), Gert van Triest, René Bouwman (Feralco)

Kwaliteitsborgers

Frank Oesterholt, Emile Cornelissen

Verzonden naar

AquaMinerals, Evides, Feralco, Vitens, Waternet, Waterschap Brabantse Delta, WML

Dit rapport is openbaar.

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 AquaMinerals, Evides, Feralco, Vitens, Waternet, Waterschap Brabantse Delta en WML.

Keywords

Waterijzer, hergebruik, ijzer vlokmiddel

Jaar van publicatie

2022

Meer informatie

Wolter Siegers

T 0610946825

E wolter.siegers@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl

KWR

Juli 2022 ©

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

Samenvatting

Bij de productie van drinkwater wordt een slib gevormd dat rijk is aan ijzer. Dat geldt zowel bij anaeroob grondwater als oppervlaktewater als bron voor de productie. In totaal gaat het in Nederland jaarlijks om ongeveer 90.000 ton waterijzer, waarvan ongeveer 1/3^{de} deel steekvast (met een vaste stofgehalte van circa 30 %) en 2/3^{de} deel met een vaste stofgehalte van circa 10%.

Uit eerder onderzoek in het kader van het TKI-project HerCauWer (Hergebruik van Coagulant uit Waterijzer) [Hofman e.a. 2019] was gebleken dat het mogelijk is het ijzer uit dit slib op te lossen met behulp van een sterk zuur. In het onderhavige rapport is beschreven of het mogelijk is om waterijzer op deze manier te hergebruiken als vlokmiddel bij de fosfaatverwijdering van stedelijk afvalwater. Wanneer de methode technisch en financieel haalbaar is, zou een deel van het door waterbedrijven geproduceerd waterijzer kunnen worden hergebruikt als vlokmiddel bij de zuivering van stedelijk afvalwater.

Er is een geschikt type waterijzer (Loenderveen) geselecteerd, dat in een fabriek in Duitsland is aangezuurd met zwavelzuur tot pH 1, waarbij een ijzersulfaat vlokmiddel is gevormd, in het vervolg aangeduid als “HerCauWer-vlokmiddel”. Na bezinking van vaste bestanddelen is de ijzersulfaatoplossing gedoseerd aan influent in de beluchtingstank van een zuiveringsstraat van RWZI Bath van WBD, met als doel om het aanwezige fosfaat chemisch te binden. Ter vergelijking is een tweede straat als referentie onderzocht met een commercieel vlokmiddel dat WBD op de locatie gebruikt voor hetzelfde doel. Door middel van 24-uurs bemonstering zijn beide straten gedurende 1 maand onderzocht op fosfaatverwijdering en overige van belang zijnde processen tijdens de zuiveringsstap. Daarnaast is het HerCauWer-vlokmiddel in de tijd gevolgd op ijzergehalte en is de chemische samenstelling geanalyseerd. Na de proefperiode is beoordeeld of het van HerCauWer-vlokmiddel een vergelijkbare werking heeft als het commerciële vlokmiddel.

De resultaten geven aan dat er goede technische mogelijkheden zijn om waterijzer, met behulp van een sterk zuur, te hergebruiken als vlokmiddel. Het in het Loenderveense waterijzer aanwezige ijzer wordt voor bijna 93% opgelost, daarnaast bevatte het HerCauWer-vlokmiddel na aanzuren van het waterijzer ook organisch materiaal, andere (zware) metalen en een deel onoplosbaar materiaal. Deze aanwezigheid lijkt vanwege de verdunning echter niet van bezwaar voor het toepassen bij de behandeling van afvalwater. Voor het slib, dat door Slibverwerking Noord-Brabant (SNB) wordt verwerkt, zullen deze concentraties geen problemen opleveren, en ook voor het effluent lijken de eisen van Rijkswaterstaat hier niet mee op gespannen voet te staan. Het zou echter verder onderzocht moeten worden, als de concentraties daar aanleiding toe zouden lijken te geven. Het HerCauWer-vlokmiddel bleek ook voldoende stabiel gedurende de testperiode. Uit de ijzer/fosfor (Me/P)- verhouding blijkt dat het HerCauWer-vlokmiddel minder ijzer nodig heeft voor de binding van fosfaat, mogelijk veroorzaakt door een andere samenstelling ten opzichte van het commerciële product: het bevat meer driewaardig ijzer en een hoger gehalte aan aluminium. Echter, doordat het geteste HerCauWer-vlokmiddel ongeveer de helft minder ijzer bevat dan het commerciële vlokmiddel moet er qua volume wel meer worden gedoseerd om een vergelijkbare dosering te verkrijgen.

In het zuiveringsproces is een vergelijkbare fosfaatverwijdering gevonden (gemiddeld 79 ± 11 %) ten opzichte van het commerciële vlokmiddel (gemiddeld 81 ± 9 %). Ook de slibvolume index en het droge stofgehalte geven vergelijkbare resultaten als het commerciële ijzersulfaat. De overige processen, zoals vlokvorming en verwijdering van stikstof, zijn niet zichtbaar beïnvloed door het gebruik van het HerCauWer-vlokmiddel. Dit betekent dat het HerCauWer-vlokmiddel zeker net zo goed functioneerde als het conventionele ijzersulfaat.

Een update van zowel de levenscyclusanalyse als de verbruikskosten op basis van pilotdata en recente cijfers laat zien dat de milieu-impact van het aangezuurde waterijzer ongeveer 1-2 % bedraagt van die van commercieel ijzersulfaat. Hierbij is er wel van uitgegaan dat er gebruik wordt gemaakt van een zuur, dat in een ander

(industriële) proces als afval vrijkomt (en waarvan de impact dus niet meetelt). Inmiddels zijn door allerlei internationale ontwikkelingen de kosten van diverse grondstoffen sterk gestegen. Als de stijging in de kosten voor zwavelzuur en vlokmiddel worden meegewogen, blijken de kosten van het HerCauWer-vlokmiddel te liggen in de grootteorde van 75 % van die van commercieel materiaal, die op dit moment (juli 2022) €175 - €200/ton bedragen. Belangrijke aspecten zijn bovendien dat het hergebruik van waterijzer uit de drinkwaterzuivering in de afvalwaterzuivering bijdraagt aan de circulaire economie, en aan een oplossing voor de huidige tekorten aan vlokmiddel.

Aanbevolen wordt verder te onderzoeken hoe het hergebruik van waterijzer in de afvalwaterzuivering op grote schaal kan worden gerealiseerd. Is het beter het waterijzer regionaal in te zetten, en moet het aanzuren dan gebeuren bij de drinkwater- of bij de afvalwaterzuivering? Of is het toch praktischer om ergens centraal een aanzuring te realiseren? Dit gaat weliswaar gepaard met meer transport, maar heeft wel schaalvoordelen, en kan voor een constante kwaliteit van een grote hoeveelheid waterijzer zorgen. Voor de technische haalbaarheid zijn er nog optimalisatiemogelijkheden. Zo moet worden onderzocht of het mogelijk is het aangezuurde waterijzer in zijn geheel aan het influent van de RWZI te doseren, zonder het eerst te laten bezinken. Daarnaast is het van belang in kaart te brengen welke typen waterijzer hiervoor in aanmerking komen. Er zijn verschillen in extraheerbaarheid van het ijzer, en bovendien zouden relatief hoge gehalten aan arseen of calciumcarbonaat tot problemen kunnen leiden bij de toepassing.

Eindconclusie: op basis van de uitgevoerde studie, lijkt er een goede kans te bestaan om het onderzochte product te kunnen vermarkten, en op die manier bij te dragen aan een meer circulaire economie.

Inhoud

Samenwerkingspartners	2
Rapport	3
Samenvatting	4
Inhoud	6
1 Inleiding	8
1.1 Aanleiding	8
1.2 Pilotonderzoek	9
2 Uitvoering	10
2.1 Locatie beschrijving Bath (WBD)	10
2.2 Fabricage en transport van het vlokmiddel	12
2.3 Opslag en dosering van het vlokmiddel	12
2.4 Dosering, monsterneming en analyses	13
3 Resultaten en discussie	16
3.1 Fabricage, transport en dosering van het vlokmiddel	16
3.2 Metingen samenstelling HerCauWer-vlokmiddel	16
3.3 Dosering, monsterneming en analyses van de vlokmiddelen	18
3.3.1 Effecten van opslag op het HerCauWer-vlokmiddel	18
3.3.2 Analyses van ijzergehaltes in het vlokmiddel tijdens de pilottest	25
3.3.3 Analyses van metalen en TOC in het vlokmiddel tijdens de pilottest	26
3.4 Effecten van de vlokmiddel dosering op metingen in het influent water	33
3.4.1 Effecten op fosfaatgehalte	33
3.4.2 Overige effecten	34
3.5 Vlokstructuur analyse	35
4 Duurzaamheids- en kostenaspecten	37
4.1 Inleiding	37
4.2 Levenscyclusanalyse	37
4.3 Kostenaspecten	39
4.4 Conclusies	41
5 Conclusies en aanbevelingen	42
5.1 Conclusies	42
5.2 Aanbevelingen	42

6	Literatuur	44
I	Gehaltes metalen in verschillende batches vlokmiddel	45
II	Overige analyses	47

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bij de productie van drinkwater wordt vrijwel altijd een slib gevormd dat rijk is aan ijzer. Anaeroob grondwater bevat vaak opgelost Fe(II), en wanneer dit in aanraking komt met zuurstof, wordt het Fe(II) geoxideerd tot Fe(III) en slaat het neer als ijzerhydroxide ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), ijzeroxide (Fe_2O_3) of een mengvorm daarvan. Ook wanneer oppervlaktewater als bron voor drinkwater wordt gebruikt, ontstaat vaak ijzerhoudend slib omdat een ijzerhoudend vlokmiddel wordt toegevoegd voor coagulatie/flocculatie. In totaal wordt er op deze manier jaarlijks ca. 90.000 ton waterijzer (ijzerhoudend slib) gevormd in Nederlandse drinkwaterbedrijven (± 30.000 ton steekvast materiaal met een vast stofgehalte van ongeveer 30% en ± 60.000 ton slib met een vaste stofgehalte van ca. 10%). Ook bij de zuivering van afvalwater wordt meestal een vlokmiddel toegepast, onder andere om fosfaat te verwijderen. Hiervoor wordt in plaats van Fe(III) ook wel Fe(II) gedoseerd, wat tijdens het beluchten van het water in situ wordt omgezet in Fe(III).

In het kader van het TKI topsector Water programma is onderzoek gedaan naar mogelijkheden om dit waterijzer terug te winnen: HerCauWer (Hergebruik van Coagulant uit Waterijzer). Het eerste deel van dit onderzoek (een bureaustudie en lab-experimenten) zijn gepubliceerd in de vorm van een KWR-rapport [Hofman e.a. 2019]. Uit laboratorium experimenten blijkt dat het mogelijk is ijzer uit het slib succesvol terug te winnen door het toevoegen van geconcentreerd zuur, met als doel het ijzer weer als vlokmiddel in te zetten bij de waterzuivering. Het meest geschikte zuur hiervoor lijkt (96%) zwavelzuur¹. Bij het slib van bijvoorbeeld Grubbenvorst kan hiermee ongeveer 99% van het ijzer uit het slib worden geëxtraheerd. Dit hangt echter sterk af van het type slib: bij Ossendrecht is het hooguit 40%. Daarnaast varieert het ijzergehalte van de verschillende typen slib.

Uit een verkennende LCA-studie [Hofman e.a. 2019] blijkt dat het terugwinnen van vlokmiddel uit drinkwaterslib een gunstig effect voor het milieu zou kunnen hebben, als gebruik gemaakt wordt van zuren die als afval- of bijproduct in de industrie vrijkomen. Hierbij is de milieu-impact van dit "afvalzuur" op 0 gesteld. Bovendien geeft een eerste kostenraming in hetzelfde rapport aan dat het ook economisch interessant kan zijn ijzerzouten te hergebruiken, in plaats van vers ijzerzout te kopen. Bovendien is er actueel (zomer 2022) een groot tekort aan bijvoorbeeld zoutzuur en daardoor ook aan ijzerhoudende vlokmiddelen, waardoor ook de prijzen hiervan sterk gestegen zijn. Vanwege eisen die gesteld worden aan chemicaliën die gebruikt worden voor de drinkwaterbereiding en de bijbehorende verplichte certificaten (en de beperkingen die dat oplegt), ligt het voor de hand het extract in te zetten bij de behandeling van spoelwater van de drinkwaterzuivering (buiten het primaire productieproces) of bij de behandeling van afvalwater om fosfaat te verwijderen.

Niet alleen de hoeveelheid ijzer, die kan worden teruggewonnen, speelt een rol in het extractieproces, ook de hoeveelheden carbonaat en calcium. Bij het gebruik van zwavelzuur slaat het calcium namelijk neer in de vorm van gips. Het aanwezige carbonaat wordt bij lage pH omgezet in CO_2 , en dat kan, afhankelijk van de samenstelling van het slib, leiden tot schuimvorming. Vooral dit laatste is een aandachtspunt bij eventuele grootschalige toepassing van het proces. Toevoeging van antischuimmiddel kan het probleem mogelijk voorkomen of verkleinen, maar op laboratoriumschaal was dit niet erg effectief [Hofman e.a. 2019].

¹ In dit onderzoek is gebruik gemaakt van 96 % technisch zwavelzuur. Wellicht is het echter ook mogelijk om zuren te gebruiken die als afval vrijkomen in de industrie, maar vaak wel een lager gehalte aan zwavelzuur bevatten.

1.2 Pilotonderzoek

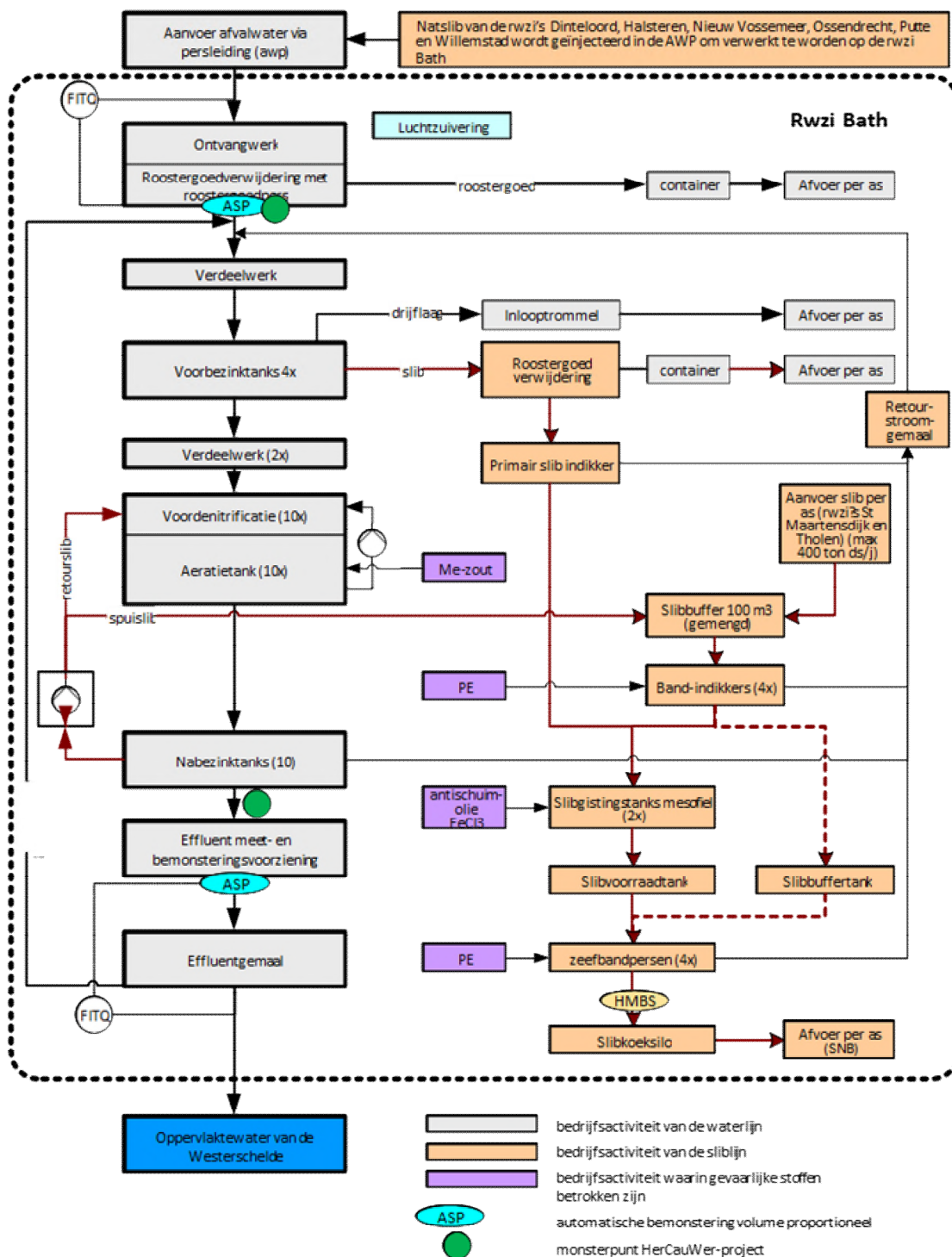
Op grond van de behaalde resultaten uit 2019 is in dit project een pilot uitgevoerd op het influent water van RWZI Bath van Waterschap Brabantse Delta (WBD). Hiervoor is door een Duitse fabriek een grote batch ijzerslib (ca. 85 m³) met zwavelzuur omgezet in circa 96 m³ vlokmiddel (voortaan aangeduid als “HerCauWer-vlokmiddel”), hetgeen op locatie vergeleken is met het commercieel verkregen vlokmiddel. In het onderhavige rapport is beschreven of het mogelijk is om waterijzer op deze manier te hergebruiken als vlokmiddel bij de fosfaatverwijdering van stedelijk afvalwater. Wanneer de methode technisch en financieel haalbaar is, zou een deel van het door waterbedrijven geproduceerd waterijzer kunnen worden hergebruikt als vlokmiddel bij de zuivering van stedelijk afvalwater.

Dit pilot onderzoek is uitgevoerd in het kader van het TKI topsector Water programma, in samenwerking met AquaMinerals, Evides, Feralco, Vitens, Waternet, Waterschap Brabantse Delta en WML. De auteurs willen de volgende personen bedanken voor hun constructieve bijdragen aan de discussies en experimenten: Bas Hofs (Evides), Steven van Duijvenbode (Waternet), Alexander Roling (WML), Frank Schoonenberg (Vitens), Etteke Wypkema en René Lambregts (Brabantse Delta), Ronny Theune en Helmuth Lenting (AquaMinerals), Edward Wegman (Feralco).

2 Uitvoering

2.1 Locatie beschrijving Bath (WBD)

De pilotlocatie voor de proef is rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI) Bath. RWZI Bath is de grootste RWZI van Waterschap Brabantse Delta en zuivert een mengsel van regen en afvalwater. Dit afvalwater is afkomstig van huishoudens en bedrijven in West-Brabant, waaronder industrieterrein Moerdijk. Het afvalwater wordt op RWZI Bath gezuiverd in 10 parallelle straten, waarbij chemische fosfaatverwijdering plaatsvindt door toevoeging van ijzer(II)sulfaat. Doordat er lucht door het water wordt geborrelt, wordt ter plekke het Fe(II) geoxideerd tot Fe(III). Het schema van de zuivering is weergegeven in Figuur 1. Het HerCauWer-vlokmiddel wordt gedoseerd in de aeratietank.



Figuur 1: Zuiveringsschema van RWZI Bath. De groene bolletjes geven de monsterpunten aan.

2.2 Fabricage en transport van het vlokmiddel

Het vlokmiddel uit waterijzer (voortaan “HerCauWer-vlokmiddel” genoemd) is geproduceerd bij BNT Chemicals GmbH in Duitsland; hiertoe werden enkele bulkvrachtwagens gevuld met het waterijzer van locatie Loenderveen (Waternet) en getransporteerd naar Duitsland. De fabricage heeft in delen plaatsgevonden, er is een kleine hoeveelheid (een paar liter op 85 m³ slib) antischuimmiddel toegepast vanwege heftige schuimvorming, voor het overige is de fabricage probleemloos verlopen. Het gebruikte antischuimmiddel is Nalco 131S, een food-grade antischuimmiddel. Bij een eerdere laboratoriumtest bleek het Loenderveen waterijzer een droge stofgehalte te bezitten van 10,5 % en bevatte het 400 g/kg Fe. Nu was het droge stofgehalte gemiddeld 9,6 % droge stof. Na het behandelen van het waterijzer met 96% zwavelzuur tot pH 1 (110 g H₂SO₄ op 1 kg nat slib) bevatte het HerCauWer-vlokmiddel (in oplossing) gemiddeld 33,8 g/l Fe of 12 % Fe₂(SO₄)₃. Het uiteindelijke product werd medio september 2021 in 1m³ IBC's getransporteerd naar Sluiskil in Nederland, waar het bij Feralco kon worden opgeslagen.

2.3 Opslag en dosering van het vlokmiddel

De vaste bestanddelen in het HerCauWer-vlokmiddel (circa 10-20 %) in een IBC kregen minimaal een week tijd om te bezinken, voordat de IBC werd ingezet. De verwachting was dat hiermee eventuele verstopping van het doseersysteem in Bath kon worden voorkomen.

In de winterperiode wordt op RWZI Bath altijd aluminiumchloride als vlokmiddel gedoseerd, in combinatie met ijzersulfaat. In de rest van het jaar wordt ijzer(II)sulfaat als vlokmiddel gebruikt. Het idee was om de opstelling (de tank en membraandoseerpomp) van de aluminiumdosering te gebruiken om het aangezuurde waterijzer te doseren. Doordat er zich neerslag in het mengsel bevond, bleek de membraandoseerpomp van de bestaande opstelling vast te lopen. Hierdoor werd het project vertraagd, en moest de RWZI overschakelen op de dosering van aluminiumchloride, waardoor de uitvoering van de pilottest verder vertraagd werd. Hierdoor heeft het aangezuurde waterijzer ongeveer zeven maanden in opslag bij Feralco in Sluiskil gestaan, voordat het doseerexperiment herstart kon worden.

Vanaf april '22 werd de bovenstaande vloeistoflaag (circa 70-80 %) vanuit de IBC's overgebracht naar een transporttankwagen. Er vond transport op afroep plaats naar Bath, waar het HerCauWer-vlokmiddel werd overgebracht in een stationaire tankwagen in een lekbak, van waaruit het HerCauWer-vlokmiddel werd gedoseerd met behulp van een Watson Marlow slangenpomp. Met behulp van een slangenpomp werd het HerCauWer-vlokmiddel met een debiet van 100 L/h gedurende 30 dagen gedoseerd aan het influent van straat 5. Tussen 25 mei en 30 juni 2022 heeft de pomp echter slechts circa 38 L/h (912 L/dag) verpompt in plaats van de gewenste 100 L/h (2400 L/dag). Voor de overige periodes heeft de pomp wel het gewenste debiet gehad, wat regelmatig door Feralco is gecontroleerd. In Figuur 2 zijn de doseerunit en tank weergegeven.



Figuur 2: Tankwagen, lekbak en doseerunit voor het doseren van het HerCauWer-vlokmiddel aan straat 5

De sibleeftijd gedurende de proef was 17-18 dagen, waardoor er dus gedurende bijna twee sibleeftijden HerCauWer-vlokmiddel werd gedoseerd.

2.4 Dosering, monsterneming en analyses

Regelmatig werd een monster genomen van het HerCauWer-vlokmiddel door een kleine hoeveelheid van het mengsel dat in Figuur 3 wordt toegevoegd, op te vangen. Afhankelijk van het actuele Fe-gehalte, werd een vergelijkbare gewichtshoeveelheid HerCauWer-vlokmiddel als de commerciële variant gedoseerd. Het doseerdebiet bedroeg gemiddeld 100 L/h (afgezien van de periode van drie dagen waarin de dosering ongeveer 38 L/h bedroeg); met de beschikbare voorraad HerCauWer-vlokmiddel is gedurende 30 dagen getest. Er werd in die periode dus ongeveer 81 kg Fe per straat per dag gedoseerd.

In Figuur 3 is de dosering van het HerCauWer-vlokmiddel aan het influentwater van straat 5 weergegeven.



Figuur 3: Dosering van het HerCauWer-vlokmiddel aan het influent van straat 5 op Bath

Vanwege de maximale hoeveelheid te produceren vlokmiddel en concentratie aan Fe kon gedurende één maand een test worden gedaan. Het doseren werd eerst gedurende minimaal 1 dag uitgevoerd om een goede menging en voldoende vloeistofretentie te bereiken voordat er een 24-uursbemonstering plaats kon vinden. Daarnaast was het van belang de kwaliteit van het influentwater in de RWZI regelmatig vast te stellen, bijvoorbeeld vanwege de invloed van een regenbui op de kwaliteit. Het was dus noodzakelijk een aantal keer per week monsters te nemen om de resultaten naderhand te kunnen relateren aan de influentkwaliteit. Het meten van het effect op de ontwatering van slib bleek niet mogelijk omdat het slib van alle straten gezamenlijk wordt verzameld en ontwaterd. Het dagelijks toezicht (en regelmatige controle en monsterneming) vond door WBD plaats. In Figuur 4 is een automatische monsternemer weergegeven zoals gebruikt in Bath; in totaal zijn 4 van deze systemen gebruikt voor het nemen van 24-uurs monsters van het in- en effluent.



Figuur 4: Systeem dat is gebruikt om automatisch een 24-uurs monster te kunnen nemen van het in- en effluent

Gegevens van de te onderzoeken straat en gewenste dosering:

1. Debiet 7000 m³/straat/d
2. Verblijftijd gemiddeld 18 h
3. Gewenste dosering Fe 81 kg/straat/dag (gemiddelde over 2019-2021)
4. Concentratie HerCauWer-vlokmiddel Fe 37 g/l
5. Benodigd debiet HerCauWer-vlokmiddel 100 l/h, afgerond

Monsters van het HerCauWer-vlokmiddel werden genomen uit het pijpje van waaruit het vlokmiddel in de aeratietank werd gedoseerd (zie Figuur 3, en de groene bolletjes in Figuur 1).

Het analytische onderzoek richtte zich op de volgende onderwerpen:

1. De kwaliteit van het gemaakte Fe₂(SO₄)₃
 - a. Gehalte Fe
 - b. Gehalte opgeloste "vervuilingen"
 - c. Gehalte onopgelost materiaal
 - d. Effect van tijd op de kwaliteit
2. Het effect van doseren van het HerCauWer-vlokmiddel op de kwaliteit van het influent
 - a. Afname van het fosfaat gehalte (hoeveelheid mol P per mol Fe)
 - b. Bij een (te) lage verwijdering, hoeveel meer dosering nodig is (via labtest). In de praktijk bleek dit echter niet mogelijk te zijn, omdat het te lang duurde voordat de resultaten van de metingen binnen kwamen.
 - c. Vorming hoeveelheid slib (slibvolume index (SVI), Imhoff kolven)
 - d. Kwaliteit van het slib (samenstelling verandering)
 - e. Vlokstructuur analyse (microscopisch)

Hierbij is gemonitord op de volgende parameters:

1. Snelle meting ijzergehalte van het HerCauWer-vlokmiddel in de aanvoerleiding, via Hanna testkit, eenmaal per week; Bij een Hanna-testkit worden ijzer(III)-ionen gereduceerd tot ijzer(II), waarna Fe(II) een oranje-rood complex vormt met 1,10-fenantroline. Dit wordt met een spectrofotometer gemeten. Vooraf werd het vlokmiddel 10.000 maal verdund met demiwater om de meting binnen de ijklijn van de methode te laten vallen. De gebruikte Hanna reagentia voor ijzer (0,0 tot 5,0 mg/l) waren gecodeerd met HI93721-01.
2. Kwaliteit $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (gehalte Fe, TOC, Ca en vervuilingen zoals zware metalen, onopgeloste bestanddelen) (KWR), eenmaal per week, monsters te nemen door Feralco/WBD; Metalen worden gemeten met behulp van ICP-MS.
3. Kwaliteit en hoeveelheid slib (svi, % vloeistof, droge stof/asrest, bezinkbaarheid, slibleeftijd), daarnaast zwevende stof (+asrest) van afloop nabezinktank (DWB), 3 maal per week. Droge stof wordt gemeten volgens NEN-EN 12880 en een eigen methode; bezinksel wordt gemeten volgens NEN 6623.
4. Fosfaatverwijdering (P_{tot}) (Aquon, WBD), driemaal per week in het behandelde water. Hiervoor wordt een analyse uitgevoerd volgens NEN-EN-ISO 6878 (ontsluiting) en NEN-EN-ISO 15681-2 (analyse)
5. BZV/CZV/TZV/ N_{Kj} / N_{tot} /onopgeloste bestanddelen voor en na behandeling (Aquon), 3 maal per week. BZV wordt gemeten volgens NEN-EN-ISO 5815-1; CZV volgens NEN-ISO 15705; N_{tot} volgens NEN-EN-ISO 11905-1, N_{Kj} volgens NEN 6646
6. Vlokstructuur van het verzamelde slib met behulp van microscopie (Feralco).

3 Resultaten en discussie

3.1 Fabricage, transport en dosering van het vlokmiddel

Er is voor de fabricage van het HerCauWer-vlokmiddel in dit geval gebruik gemaakt van technisch zwavelzuur 96%; er ontstond hierbij geen reststroom. Het zwavelzuur verbruik was circa 95-100 kg per ton product. In totaal is ongeveer 85 m³ waterijzer in behandeling genomen. Het product werd in 96 IBC's naar Feralco getransporteerd. Uit de analyses van het vlokmiddel direct na de productie (zie Bijlage I) bleek dat de gemiddelde verhouding tussen Fe(II) en Fe(III) 1,4:2,0 was met een relatief hoge standaardafwijking van 0,7:0,8. Dit geeft aan dat deze verhouding nogal kan verschillen per batch. Het HerCauWer-vlokmiddel bevatte dus zowel Fe(II) als Fe(III) en bestond gemiddeld uit circa 20 % meer Fe(III). Gemiddeld was het totale ijzergehalte in het aangezuurde product 37 g Fe/liter.

3.2 Metingen samenstelling HerCauWer-vlokmiddel

Bij een eerste test met waterijzer van Loenderveen (juli 2021) is de in Tabel 1 gegeven samenstelling gemeten. Er zijn toen meer metalen gemeten maar de metalen met een gehalte < 0,01% zijn niet opgenomen in deze tabel, maar in bijlage I. Het gaat hierbij om 0,03% van het totaal. De 27,8 g/l Fe (circa 2,8% Fe) kwam goed overeen met de waarden gemeten met een testkit (22-32 g/l) van Hanna;. Daarna is besloten deze Hanna testkit te gebruiken voor de metingen van Fe in het HerCauWer-vlokmiddel bij de pilot. Hiervoor werd overigens het monster niet gedestruueerd.

Tabel 1: Samenstelling van metalen in de eerste laboratoriumtest met HerCauWer-vlokmiddel gemaakt van waterijzer van Loenderveen

Metaal	Concentratie (µg/l)	Gehalte (%)
Fe	2,78*10 ⁷	96,83
Ca	6,42*10 ⁵	2,23
Al	6,21 *10 ⁴	0,22
Mn	5,56*10 ⁴	0,19
Mg	4,01*10 ⁴	0,14
K	2,89*10 ⁴	0,10
V	2,62*10 ⁴	0,09
Na	2,44*10 ⁴	0,08
Ti	1,10*10 ⁴	0,04
Sr	7,09*10 ³	0,02
Cr	3,98*10 ³	0,01
Zn	2.68*10 ¹	0,01

Zoals in hoofdstuk 2 beschreven, is het in Duitsland gefabriceerde HerCauWer-vlokmiddel met regelmaat naar Feralco getransporteerd in IBC's tussen 14 juli en 20 september 2021. Daarbij is een negental monsters genomen (7 van het HerCauWer-vlokmiddel en 2 van het originele slib) om het gehalte ijzer, arseen en TOC te bepalen na destructie. Op een later moment zijn eventuele verontreinigingen zoals bijvoorbeeld zware metalen bepaald. In Tabel 2 is de samenstelling voor Fe, As en TOC gegeven van deze monsters. In Bijlage I en II zijn alle meetdata vermeld.

Tabel 2: Samenstelling van het in Duitsland geproduceerde HerCauWer-vlokmiddel (n=7) en het daarvoor gebruikte waterijzer (n=2)

Parameter in HerCauWer-vlokmiddel	Eenheid	Gemiddeld	SD	Recovery (%)	SD opbrengst (%)
Fe	g/l	37,0	7,1	92,5	19,2
As	mg/l	1,8	1,9	99,6	107
TOC	mg C/l	600	300	180	50

Parameter in het waterijzer	Eenheid	Gemiddeld	SD
Fe	g/l	40,0	1,4
As	mg/l	1,8	0,09
TOC	mg C/l	327	18

In vier monsters van het HerCauWer-vlokmiddel, geleverd op opeenvolgende data, zijn door middel van ICP-MS scan metingen ook een reeks metalen en organisch koolstof (TOC) gemeten na destructie. In Tabel 3 is hiervan de belangrijkste samenstelling gegeven, uitgedrukt in mg/l en in Bijlage I het gehalte (%). In deze tabellen zijn alleen de metalen vermeld die met een concentratie > 1 mg/l in het HerCauWer-vlokmiddel aanwezig waren.

Tabel 3: Concentraties van TOC en metalen in HerCauWer-vlokmiddel monsters (n=4) op de verschillende leverdata

Datum	26-aug-21	30-aug-21	9-sep-21	24-sept-21
Parameter	Concentratie (mg/l)			
TOC	1015	735	555	340
Fe	35.124	41.671	42.216	49.685
Ca	800	1.093	1.147	2.373
Al	75	88	99	234
Mg	65	101	114	67
Mn	58	79	74	57
Na	38	49	47	22
V	29	34	33	28
K	21	29	36	45
Ti	16	18	15	14
Sn	7	0	0	0
Cr	6	9	9	5
Sr	6	5	5	17
Zn	2	3	3	3
As	2	1	1	2
Ga	1	2	2	1
Ge	1	2	2	1
Ni	1	1	1	1
Cu	1	1	1	1
Som	37268	43922	44361	52897
Gehalte Fe op totaal (%)	94	95	95	94

3.3 Dosering, monsterneming en analyses van de vlokmiddelen

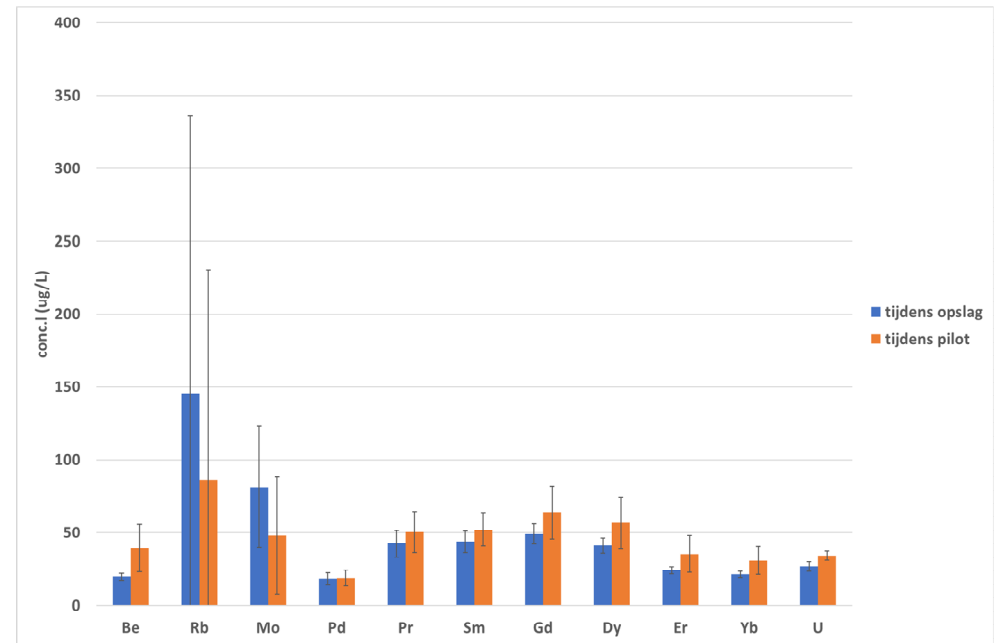
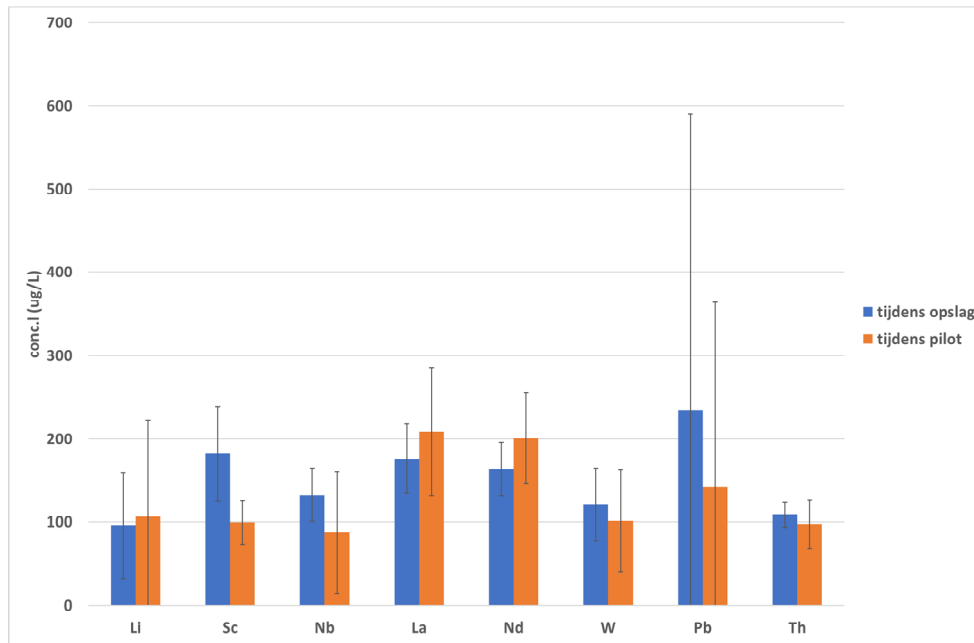
3.3.1 Effecten van opslag op het HerCauWer-vlokmiddel

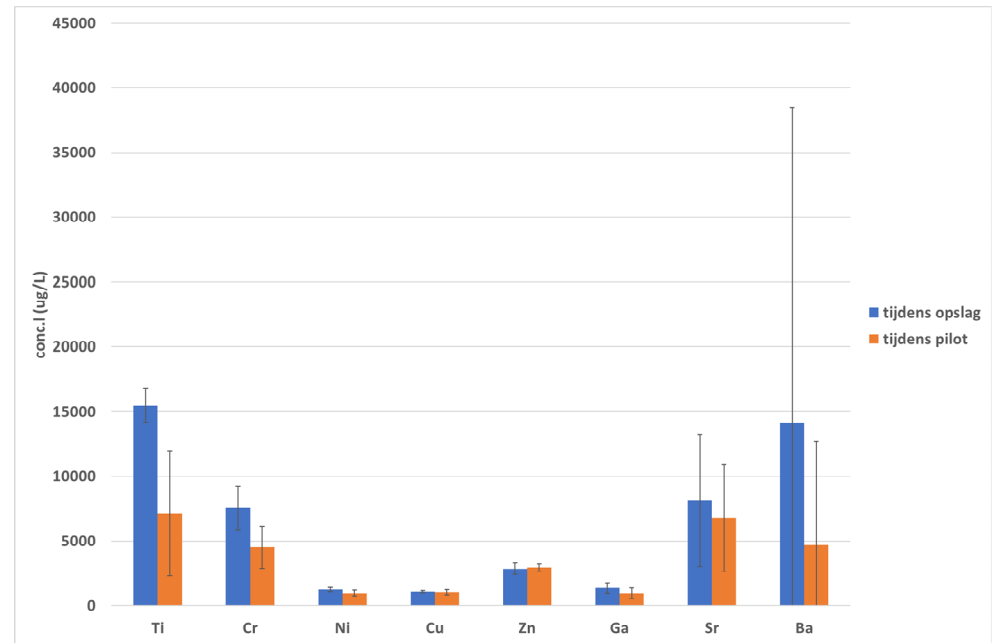
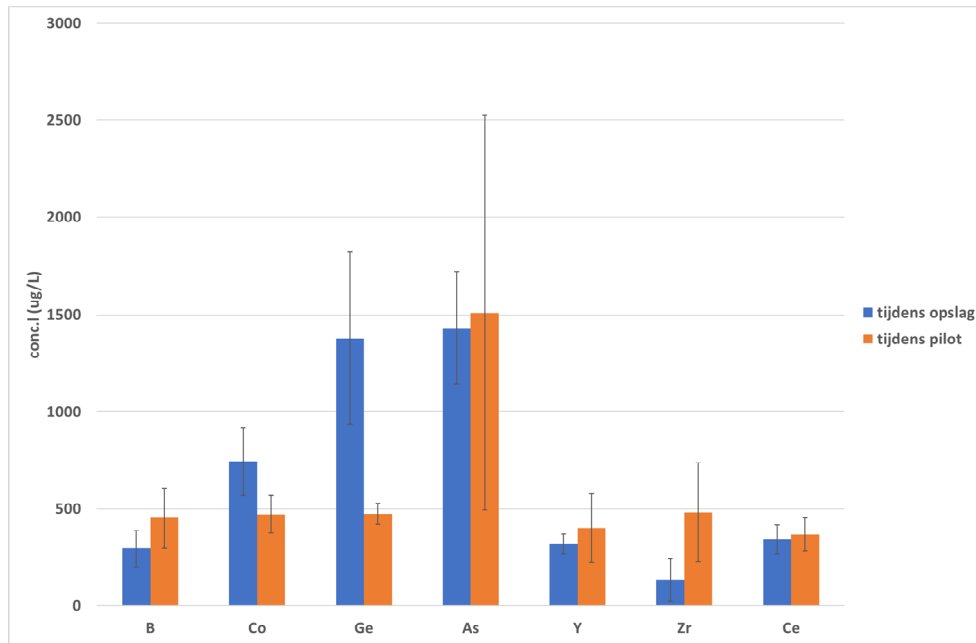
Voor en tijdens de doseerproef in 2022 is zowel door Feralco als door WBD een aantal monsters aangeleverd voor de analyse op ijzer, TOC en overige (zware) metalen. Het materiaal is relatief lang in opslag bewaard, en tijdens die periode zijn op verschillende tijdstippen analyses uitgevoerd (zie Tabel 14 in Bijlage II). De gemiddelde waarden van de analyses tijdens de opslag en tijdens de pilot-experimenten zijn vergeleken in Figuur 5. Hoewel er verschillen gemeten zijn, vallen de meeste wel binnen de onzekerheidsmarge op de metingen. Er zijn enkele uitzonderingen, die zijn weergegeven in Tabel 4.

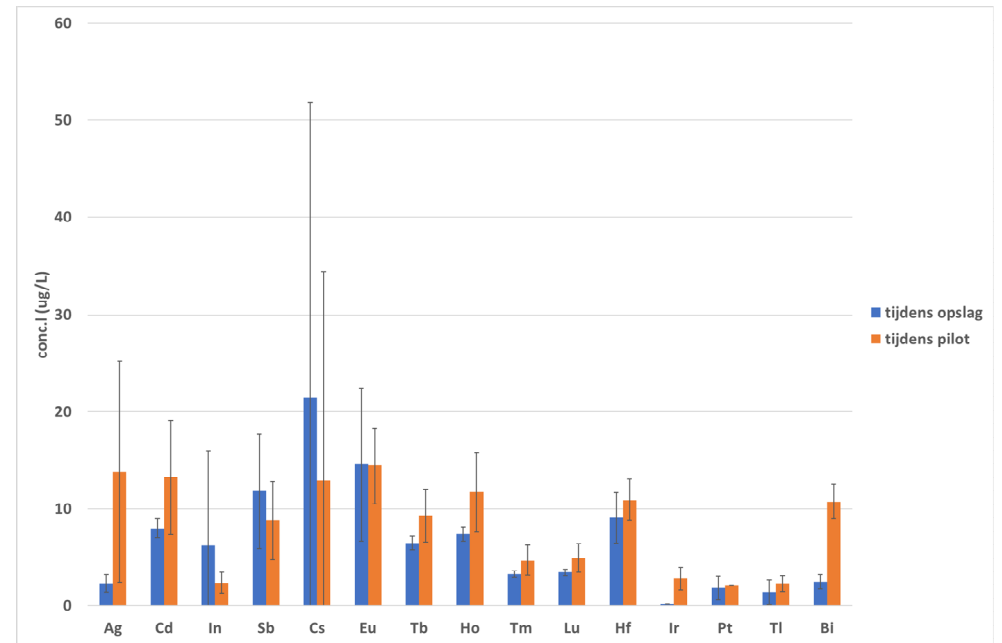
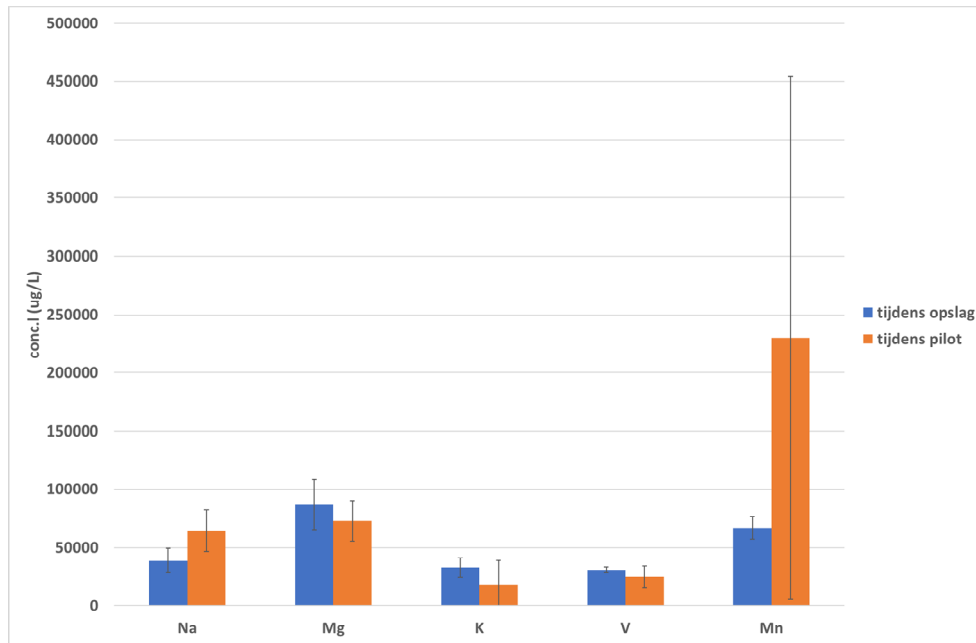
Tabel 4: Verschillen tussen opslag en pilot

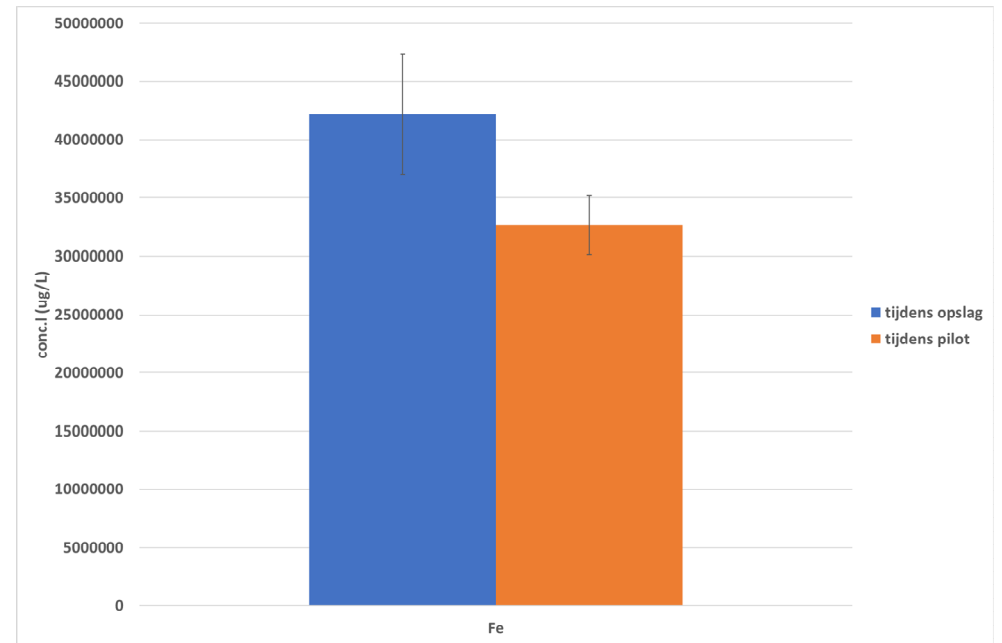
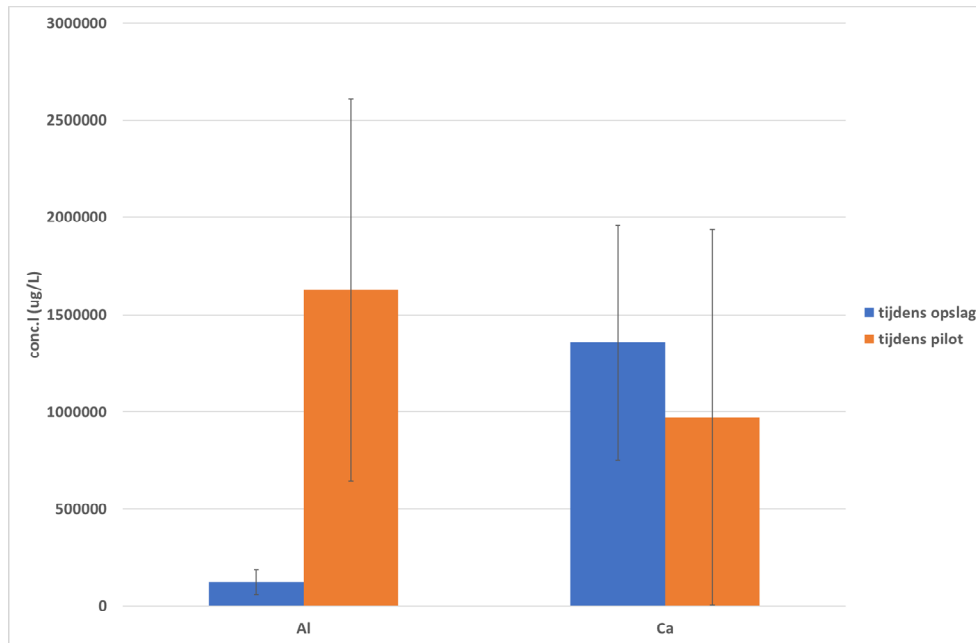
Toegenomen in pilot		Afgenomen in pilot	
element	Vershil ($\mu\text{g/L}$)	element	Vershil ($\mu\text{g/L}$)
Be	20 → 39	Zr	680 → 481
Ag	2 → 14	Co	741 → 472
Ir	0 → 3	Ge	1375 → 474
Bi	2 → 11	Ti	$1,55 \cdot 10^4 \rightarrow 7,11 \cdot 10^3$
Al	$0,12 \cdot 10^5 \rightarrow 1,62 \cdot 10^6$	Cr	7571 → 4533
		Fe	$42,2 \cdot 10^6 \rightarrow 3,26 \cdot 10^6$

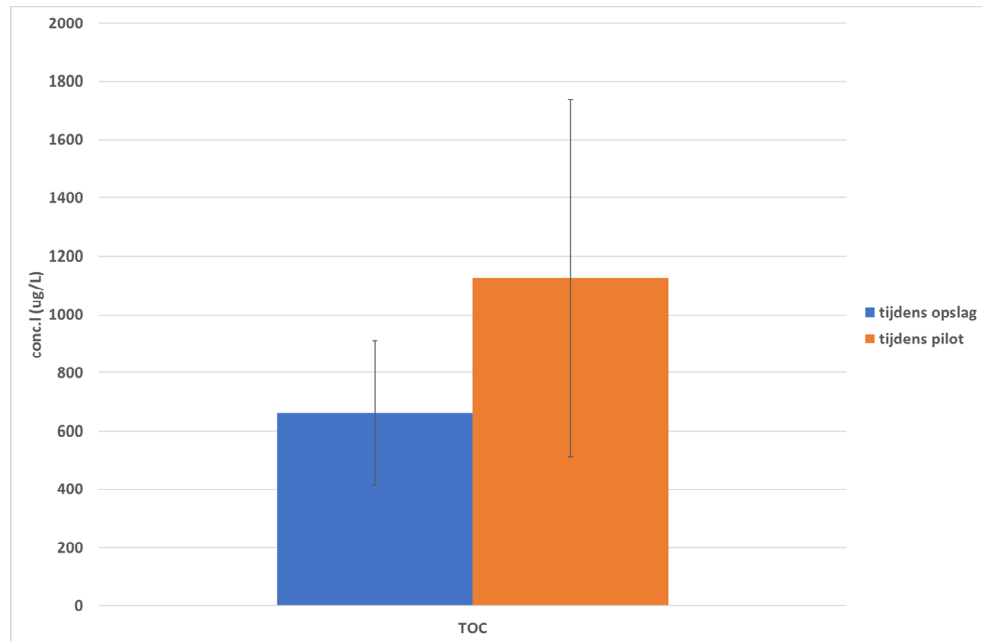
Een afname van de concentratie in het water is te verklaren door de vorming van neerslag, waarop of waarin ook bepaalde elementen meegenomen kunnen worden. Een toename is daardoor echter niet te verklaren, mogelijk heeft het te maken met metalen die vanuit het slib langzaam nog zijn opgelost. Op dit moment is niet duidelijk waardoor de verschillen veroorzaakt kunnen zijn, maar aangezien het in veel gevallen om erg lage concentraties gaat en in de zuivering nog een flinke verdunning optreedt (met een factor 3000) is het zeer waarschijnlijk niet echt relevant voor de toepassing van het aangezuurde waterijzer als vlokmiddel. Bovendien zijn deze elementen/stoffen tijdens de drinkwaterzuivering ook door middel van coagulatie/flocculatie/sedimentatie uit het water verwijderd, wat in dit geval dus weer zou kunnen gebeuren. Dit is echter niet uitgezocht.











Figuur 5: Vergelijking gehalten van verschillende elementen tijdens de opslag en tijdens dosering in het pilot-experiment. Het Sn-gehalte in het opgeslagen HerCauWer-vlokmiddel bedroeg $1794 \pm 2790 \mu\text{g/L}$, terwijl in tijdens de pilot $179 \pm 136 \mu\text{g/L}$ werd gemeten. Vanwege het grote verschil en de grote onzekerheid tussen de metingen, zijn deze waarden niet grafisch weergegeven.

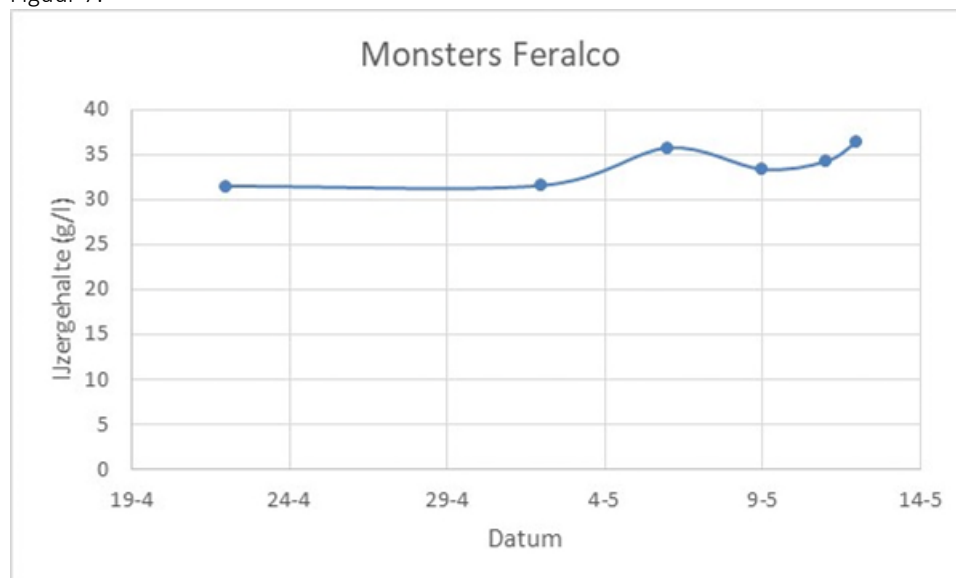
3.3.2 Analyses van ijzergehaltes in het vlokmiddel tijdens de pilottest

In Tabel 5 is een overzicht gegeven van het gehalte aan ijzer en de standaarddeviatie in het vlokmiddel; ter vergelijking is ook het commerciële product tweemaal geanalyseerd en in de tabel opgenomen.

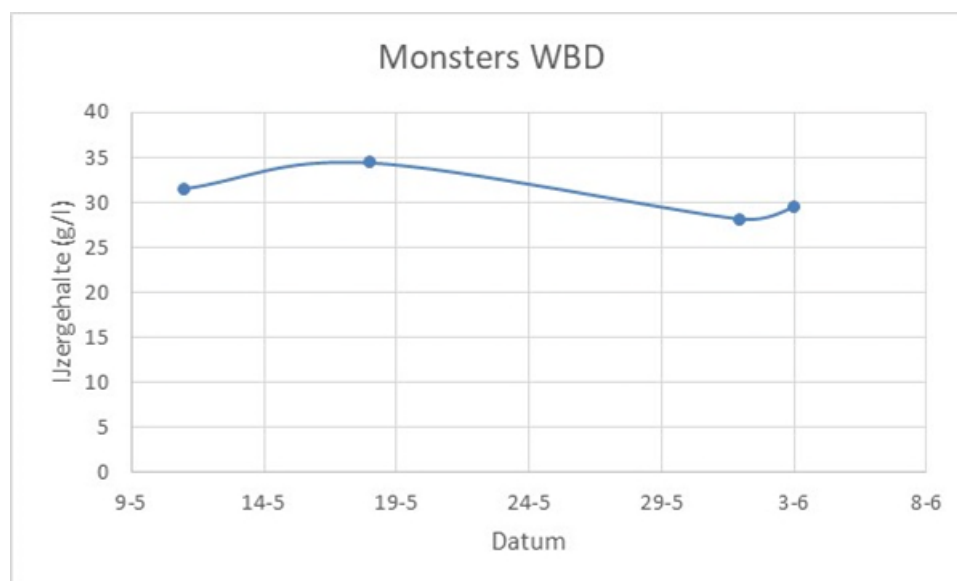
Tabel 5: Gemiddelde Fe-gehaltenes (gemeten met ICP-MS) aan ijzer in de verschillende aangeleverde batches

Monsteromschrijving	Gehalte (g Fe/L)
Monsters van HerCauWer-vlokmiddel uit IBC's aangeleverd door Feralco	33,8 ± 2,0
Monsters van HerCauWer-vlokmiddel, aangeleverd door WBD	30,9 ± 2,7
Monsters van commercieel vlokmiddel aangeleverd door WBD	61,1 ± 1,8

In het HerCauWer-vlokmiddel zit ongeveer de helft aan ijzer in vergelijking met het commerciële product. De monsters zijn op verschillende tijdstippen genomen, de verschillende ijzergehaltes zijn uitgezet in Figuur 6 en Figuur 7.



Figuur 6: Ijzergehalte in de door Feralco aangeleverde monsters, dit betreft monsters uit de IBC's en tank



Figuur 7: Ijzergehalte in tijd in de door WBD aangeleverde monsters, dit betreft het gedoseerde coagulant

Het ijzergehalte blijft in de tijd redelijk constant al lijkt tijdens de laatste doseerperiode, begin juni, het gehalte aan ijzer water circa 10% lager te zijn geweest. Het is overigens niet bekend wat hiervan de oorzaak is geweest, mogelijk is het een artefact van de meting.

De resultaten die met de Hanna-testkit werden verkregen zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Ijzergehaltes tijdens doseerexperimenten (gemeten met behulp van de Hanna-testkit)

Datum	Ijzergehalte (g/L)
11/05/2022	34,6
18/05/2022	36,5
01/06/2022	32,3

Deze metingen laten zien dat het ijzergehalte tijdens de doseerproef redelijk constant bleef, en dat het niet nodig was de dosering aan te passen.

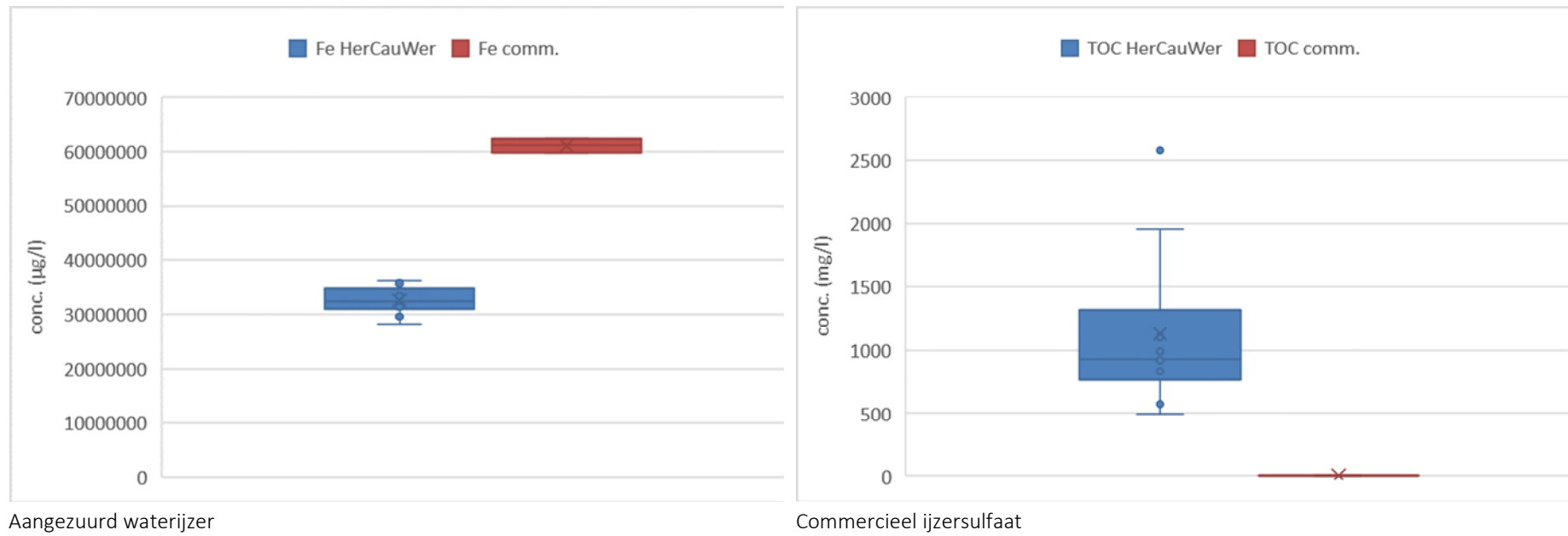
3.3.3 Analyses van metalen en TOC in het vlokmiddel tijdens de pilottest

In Tabel 15 in bijlage II zijn de resultaten van een uitgebreide ICP-MS analyse weergegeven voor (zware) metalen en TOC van tien monsters van het HerCauWer-vlokmiddel; tevens is ter vergelijking de analyse van het commerciële vlokmiddel, dat in Bath wordt gebruikt, vermeld in de twee rechter kolommen. Het commerciële vlokmiddel bevat circa tweemaal zoveel ijzer, bevat geen meetbaar TOC maar bevat wel een deel van de metalen, meestal in een lagere concentratie, die ook zijn aangetroffen in het HerCauWer-vlokmiddel.

Deze gehalten zijn grafisch weergegeven in Figuur 8 en Figuur 9. Hierbij zijn de gehalten seleen, ruthenium, telluur, tantalium, renium en osmium niet opgenomen, omdat die in alle gevallen onder de detectiegrens waren. In andere gevallen, waarbij bij een aantal monsters de concentratie onder de detectiegrens uitkwam, is de detectiegrens als waarde genomen. Het lijkt alsof de spreiding in de analyseresultaten van het commerciële vlokmiddel kleiner is, maar dat wordt veroorzaakt door het feit dat het commerciële materiaal slechts twee keer is geanalyseerd, terwijl het aangezuurde waterijzer tien keer is geanalyseerd.

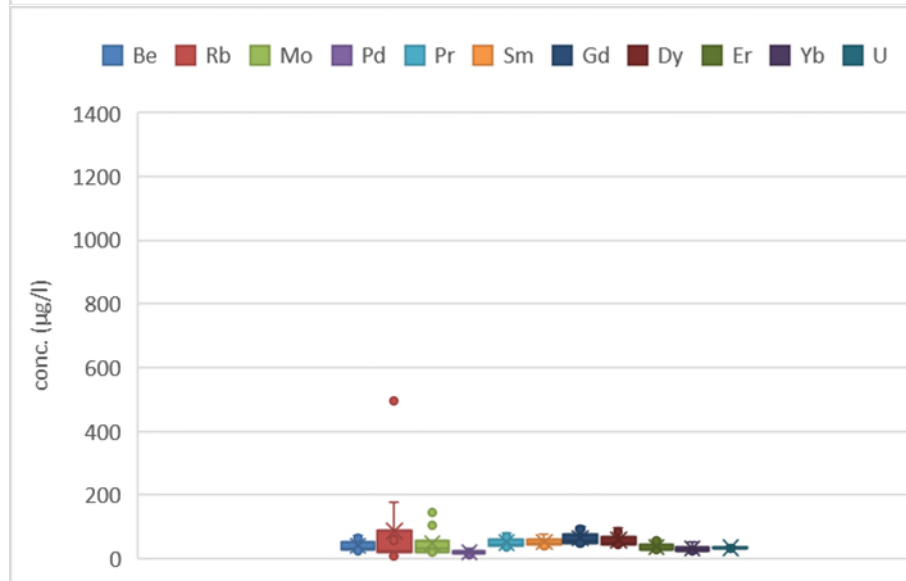
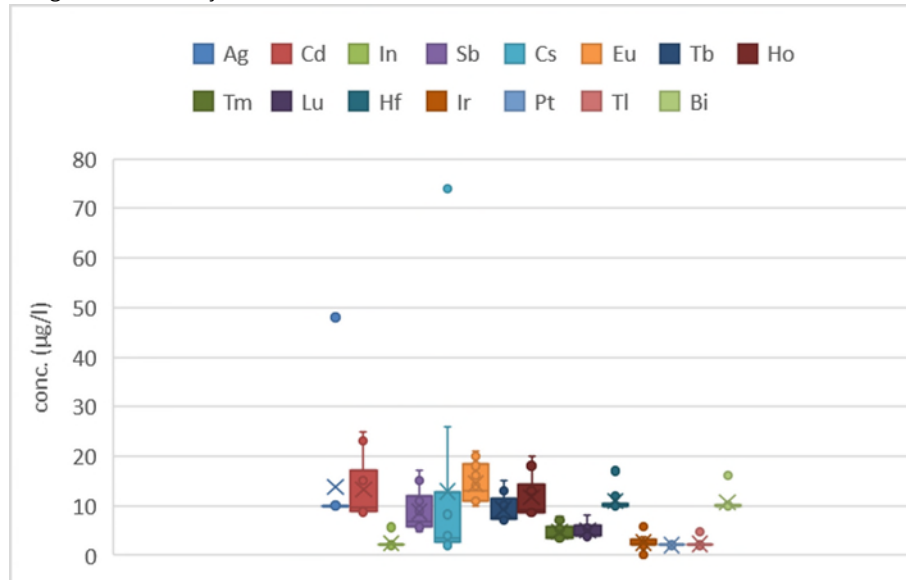
Zoals al eerder aangegeven is het ijzergehalte in het commerciële vlokmiddel bijna twee keer zo hoog als in het aangezuurde waterijzer (31-36 g/L t.o.v. 59-62 g/L). Dit betekent dat de dubbele hoeveelheid volume gedoseerd moet worden om een vergelijkbaar effect te verkrijgen. Bovendien leek het hier iets lager te zijn dan oorspronkelijk gemeten in de IBC's. Het TOC-gehalte van het HerCauWer materiaal is daarentegen veel hoger (gemiddeld 930 mg/L ten opzichte van een vrijwel 0). Dit hoeft echter geen bezwaar te zijn voor de uiteindelijke waterkwaliteit van het effluent, enerzijds vanwege de sterke verdunning die optreedt (met een factor 3.000 – 4000; er is ongeveer 8.500 m³ HerCauWer-vlokmiddel gedoseerd op 36*10⁶ m³ afvalwater) en anderzijds vanwege de verdere waterzuivering in de RWZI, waarbij een deel van dit TOC weer in het slib terecht kan komen. Dit laatste is ook aannemelijk, omdat het tijdens de drinkwaterzuivering ook op deze manier met het waterijzer neersloeg, al kan de behandeling met zuur hier wel invloed op hebben. Op basis van ervaringen met de slibvorming wordt ingeschat dat ongeveer 80 % van de metalen in het slib terecht zal komen en slechts 20 % in het effluent, waardoor een verdunningsfactor van bijna 20.000 wordt gehaald. Een deel kan worden afgebroken tijdens de behandeling. Vergelijkbare overwegingen gelden voor de metalen die in het aangezuurde waterijzer worden aangetroffen. In de meeste gevallen zijn de gehalten hier hoger dan in het commerciële vlokmiddel, maar nog steeds erg laag, en hoeft dat door de verdunning en de verdere behandeling van het water geen problemen op te leveren. Wanneer wordt aangenomen dat alle componenten in het water zullen blijven, en rekening wordt gehouden met een verdunning van 2.400 L HerCauWer-vlokmiddel (per dag) op 7000 m³ afvalwater per dag per straat, komen bijna alle concentraties onder de detectiegrens. Vanadium zou in een concentratie van rond de 8 µg/L aangetroffen kunnen worden, mangaan in een concentratie van circa 80 µg/L en aluminium met een concentratie van ongeveer 550 µ/L. Het gaat echter om materiaal afkomstig uit eerder via coagulatie/flocculatie/sedimentatie uit het water verwijderd materiaal, dus het is waarschijnlijk dat dat ook nu weer (grotendeels) zal worden ingevangen. Dit geldt zeker voor mangaan.

Wat wel opvalt is dat het aluminiumgehalte van het HerCauWer-vlokmiddel significant hoger is in deze metingen dan tijdens de eerste metingen (circa 0,8-2,5 g/L t.o.v. 0,1-0,2 g/L), en ook hoger dan in het commerciële vlokmiddel (gemiddeld 14 mg/L). Ook dit hoeft geen probleem te zijn, en kan zelfs de werking bevorderen (aluminium wordt immers ook toegepast als vlokmiddel). Voor sommige elementen geldt echter het omgekeerde, en bevat het commerciële vlokmiddel significant veel meer dan het aangezuurde waterijzer. Dit geldt voor Nb, Sn, Mo, Co, Ge, Ti, Cr, en Ni. Een aandachtspunt is mogelijk het arseengehalte in het waterijzer, want uit onderstaande resultaten blijkt wel dat bij het type dat hier is gebruikt het arseengehalte significant hoger is dan in het commerciële ijzersulfaat. Voor toepassing in afvalwaterzuivering hoeft dit geen probleem te zijn, maar zeker bij mogelijke toepassing in drinkwater is het wel aan te raden uit te gaan van een waterijzer dat minder, of liever geen, arseen bevat.

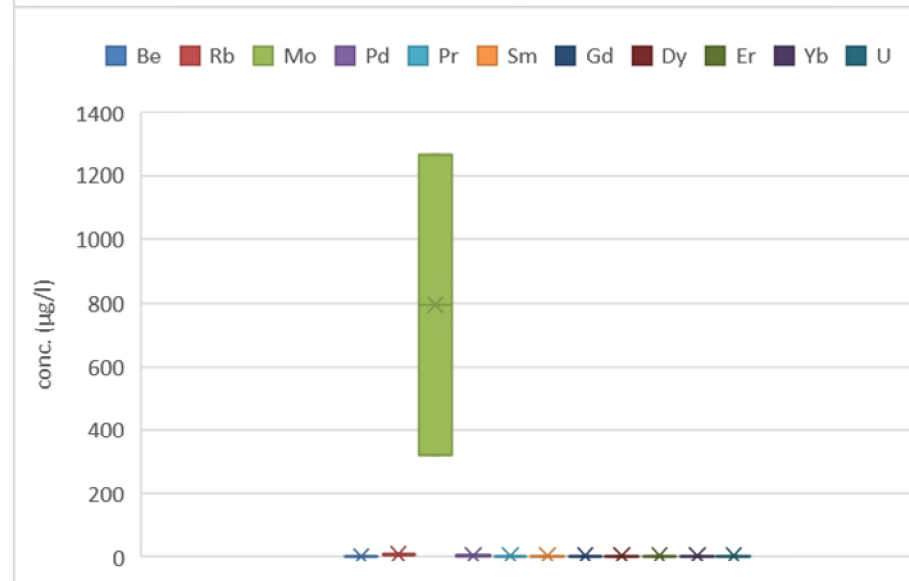
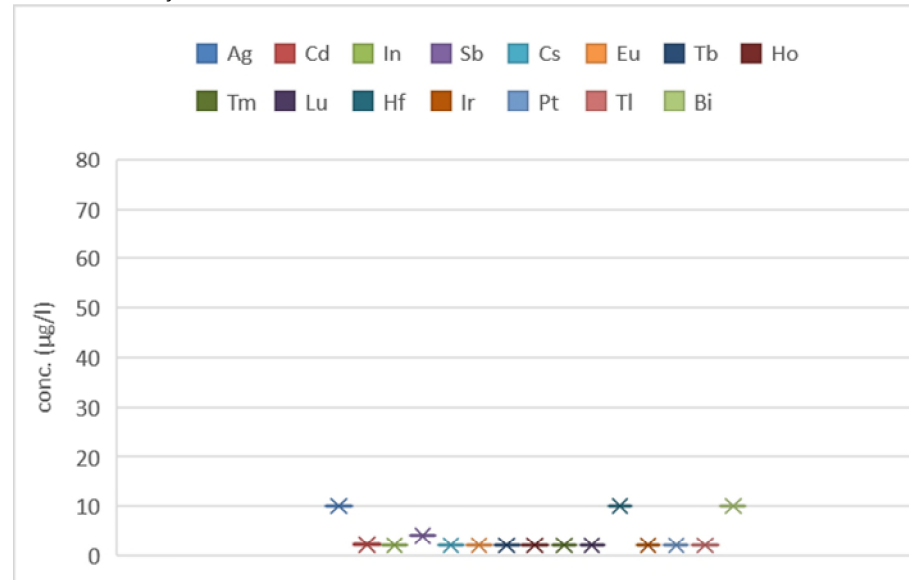


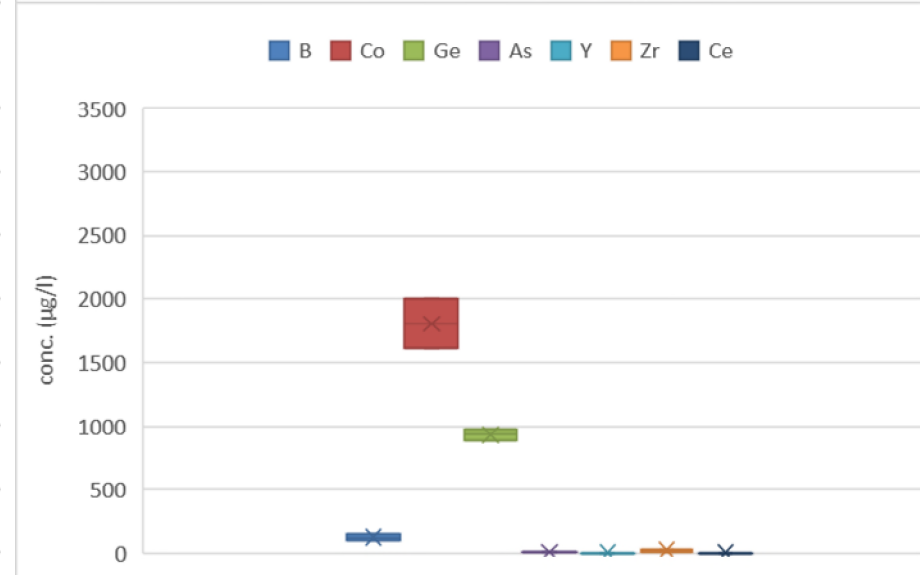
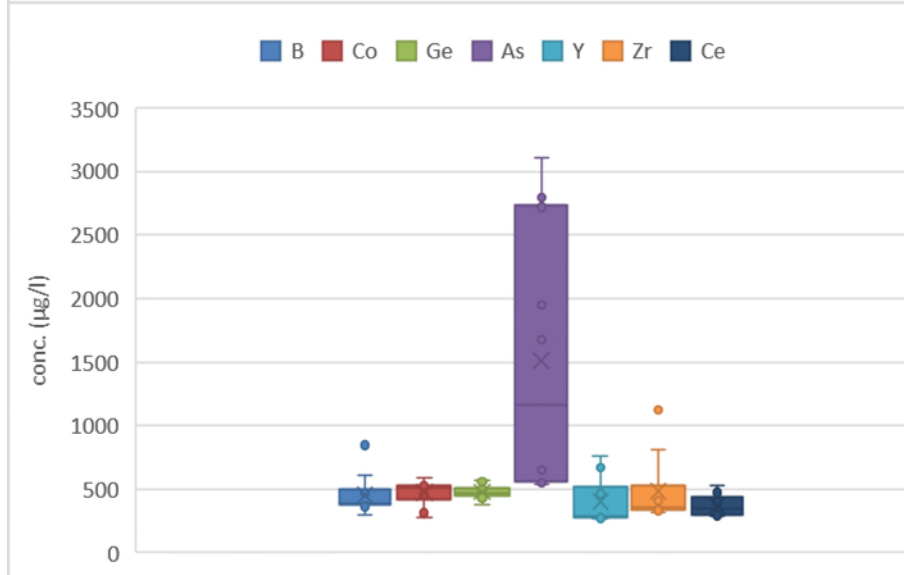
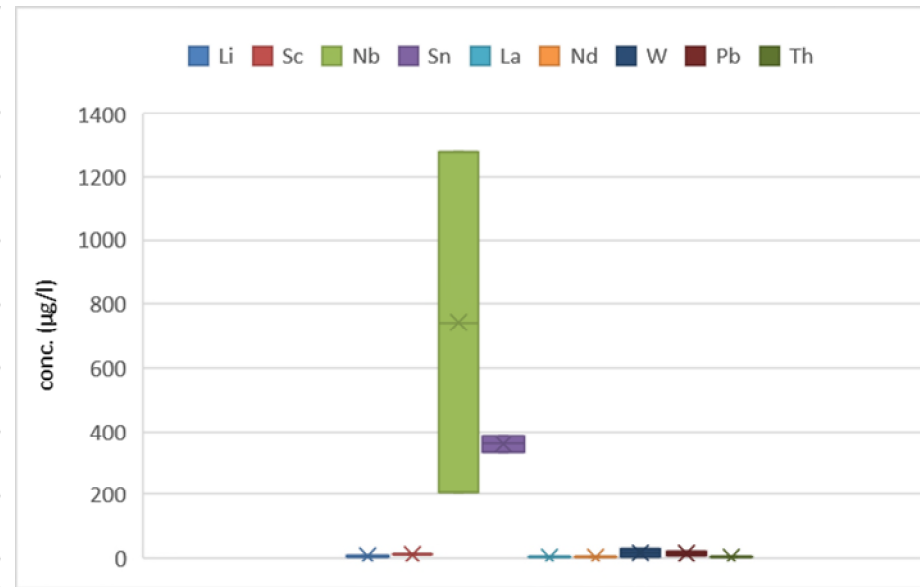
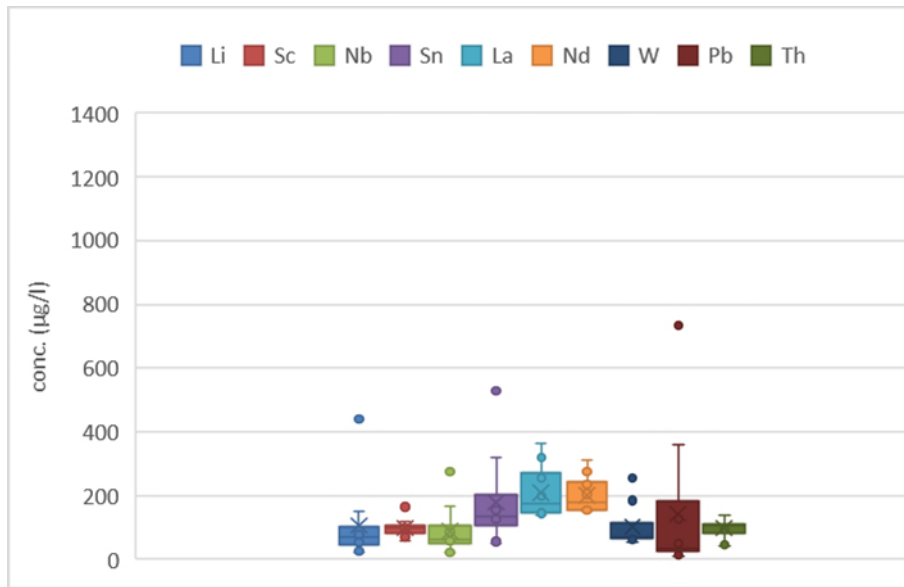
Figuur 8: Gehaltes aan Fe en TOC in aangezuurd waterijzer en in commercieel ijzersulfaat

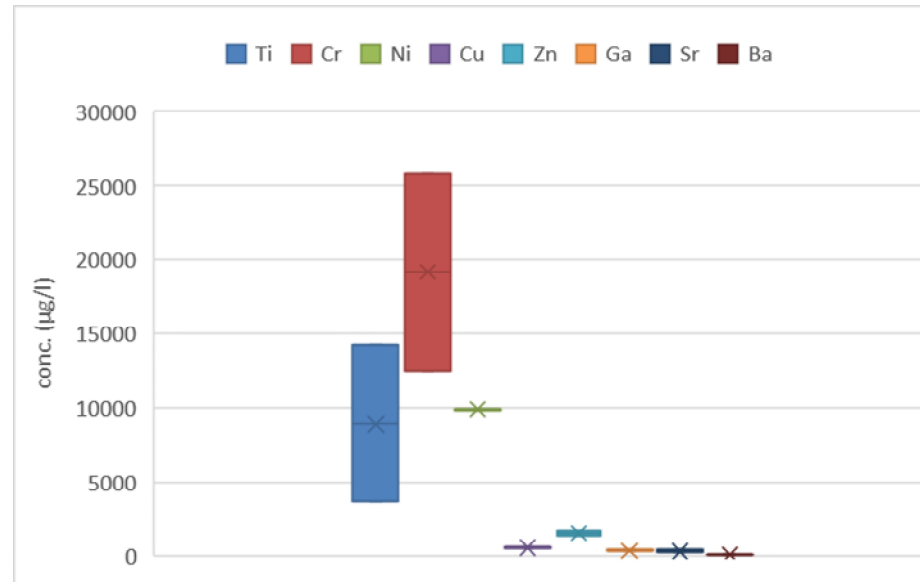
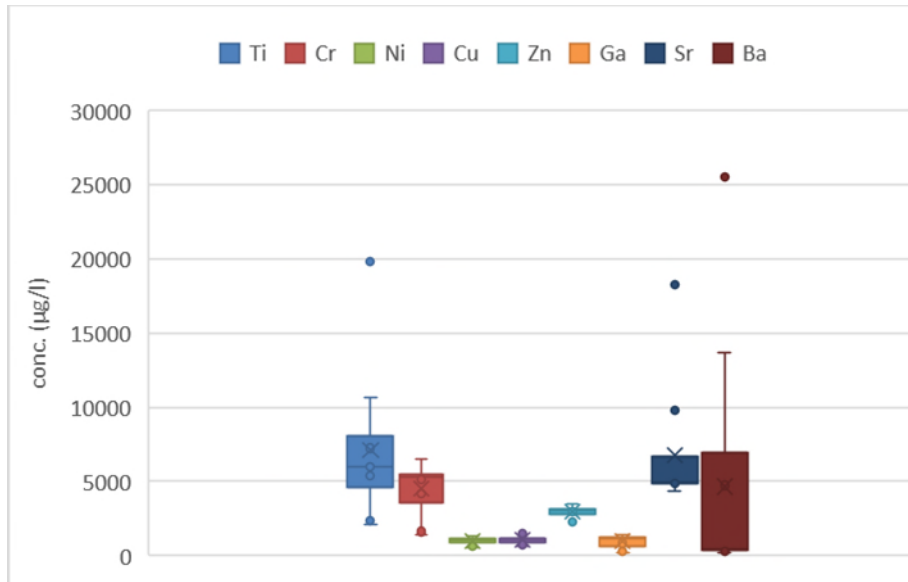
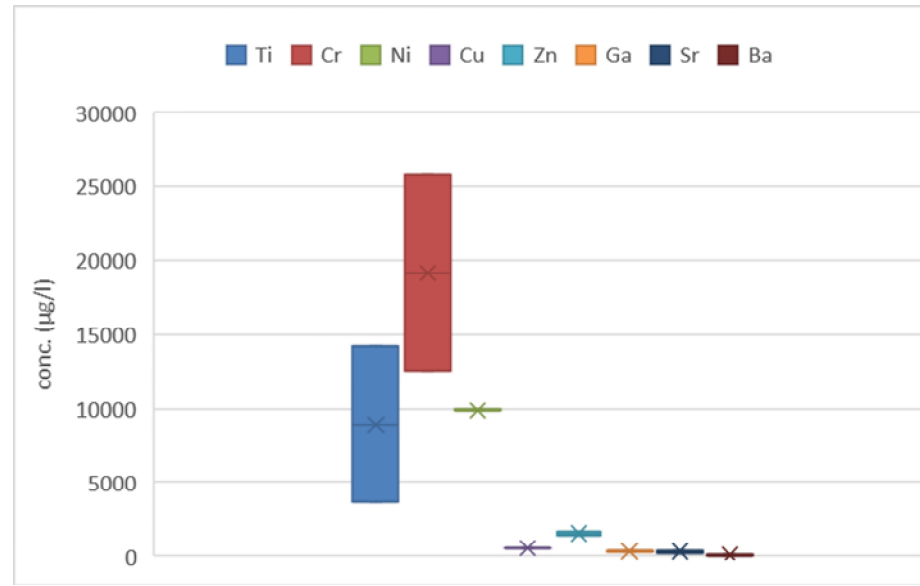
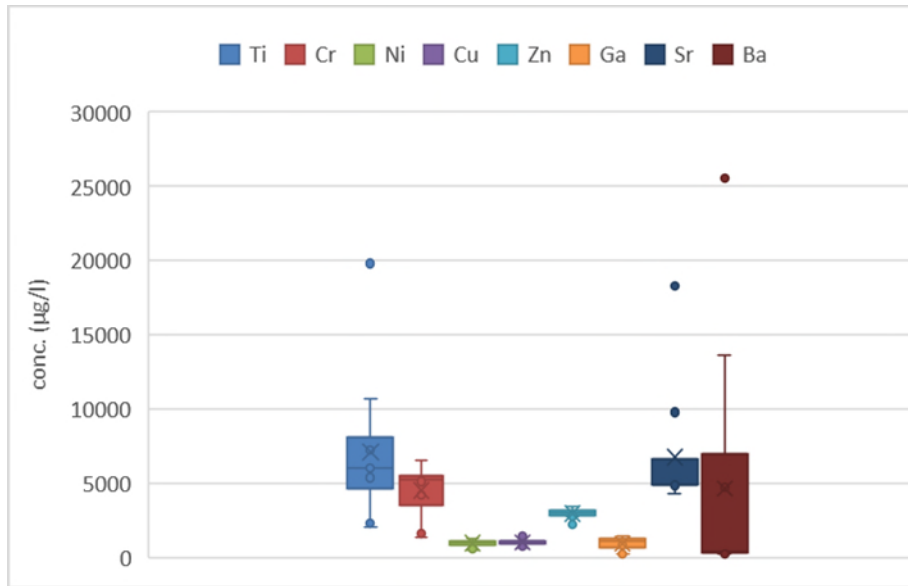
Aangezuurd waterijzer

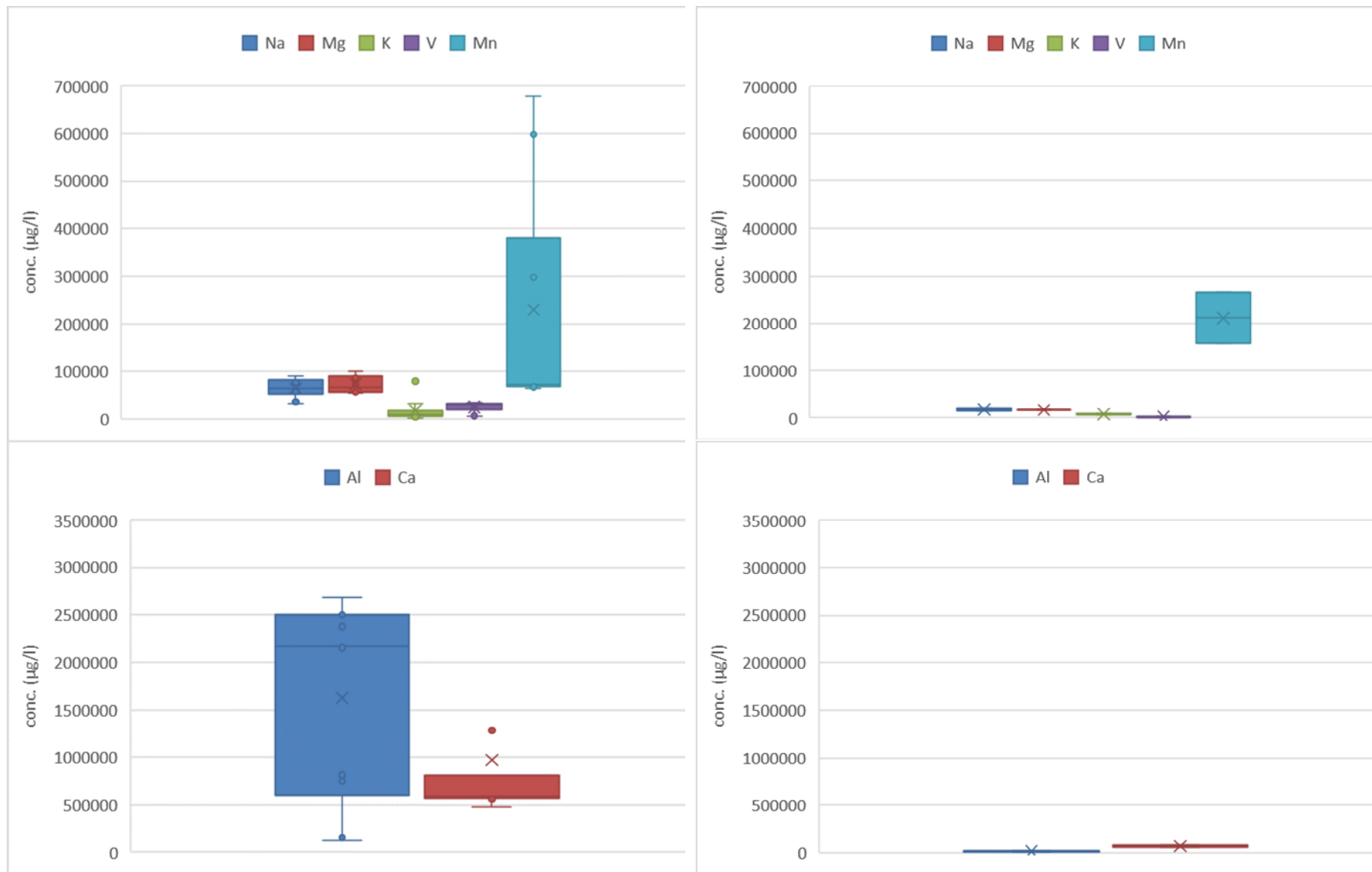


Commercieel ijzersulfaat









Figuur 9: Overzicht van concentraties elementen in aangezuurd waterijzer en commercieel vlokmiddel

3.4 Effecten van de vlokmiddel dosering op metingen in het influent water

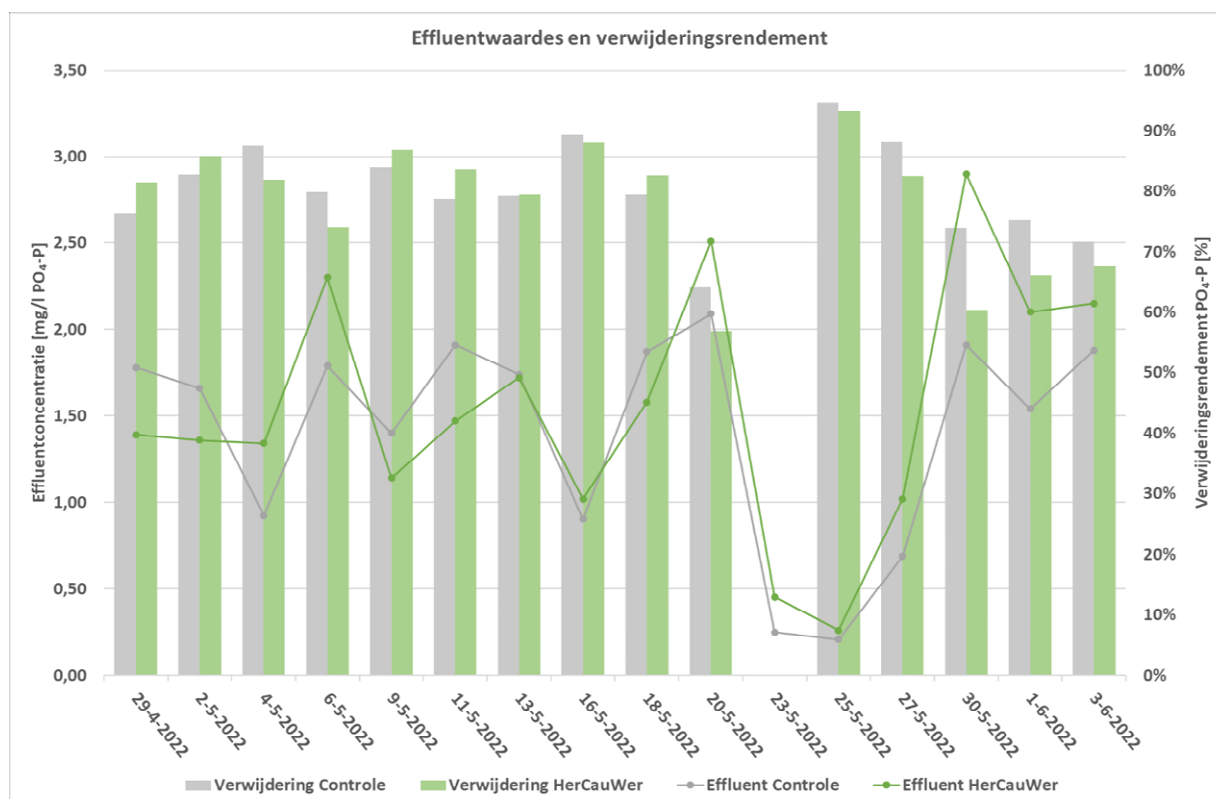
3.4.1 Effecten op fosfaatgehalte

In deze paragraaf zijn de resultaten op volgorde van belangrijkheid (gemeten door Aquon en WBD) vermeld van de doseerproeven. Op RWZI Bath worden twee verschillende metaalzouten gedoseerd in de beluchtingstank. IJzersulfaat wordt vooral gebruikt om fosfaat te verwijderen. Daarnaast wordt in de winter (poly)aluminiumchloride gedoseerd voor fosfaatverwijdering en om de SVI te verlagen, waardoor draadvormende bacteriën tegen worden gegaan, die zorgen voor (te) lichte slibvlokken veroorzaken. Een deel van de metingen is hier verkort weergegeven. De volledige dataset is opgenomen in Bijlage II van het rapport.

In Tabel 7 zijn de gemiddelde resultaten vermeld van de fosfaatmetingen en -verwijdering in beide straten gedurende het experiment. In Figuur 10 is het verloop visueel weergegeven, in Bijlage II zijn alle metingen vermeld. De parameter Me/P geeft aan hoeveel metaal (ijzerproduct) nodig is om fosfaat te verwijderen, met andere woorden hoe effectief de fosfaatverwijdering is op basis van het ijzergehalte (uitgedrukt in mol Fe/mol P).

Tabel 7: Resultaten van de gemiddelde concentraties en verwijdering van fosfaat gedurende de doseerperiode. Controle is straat 4, HerCauWer is straat 5

Datum	PO ₄ -P [mg/L]			Verwijderingsrendement η [%]		Me/P-verwijdering [mol Fe/mol P]	
	Influent	Controle	HerCauWer	Controle	HerCauWer	Controle	HerCauWer
Gemiddeld	7,62	1,36	1,45	80,8%	79,4%	0,15	0,11
StDev	1,71	0,68	0,72	9%	11%	0,04	0,04
GemDev	1,35	0,57	0,55	6%	8%	0,03	0,03



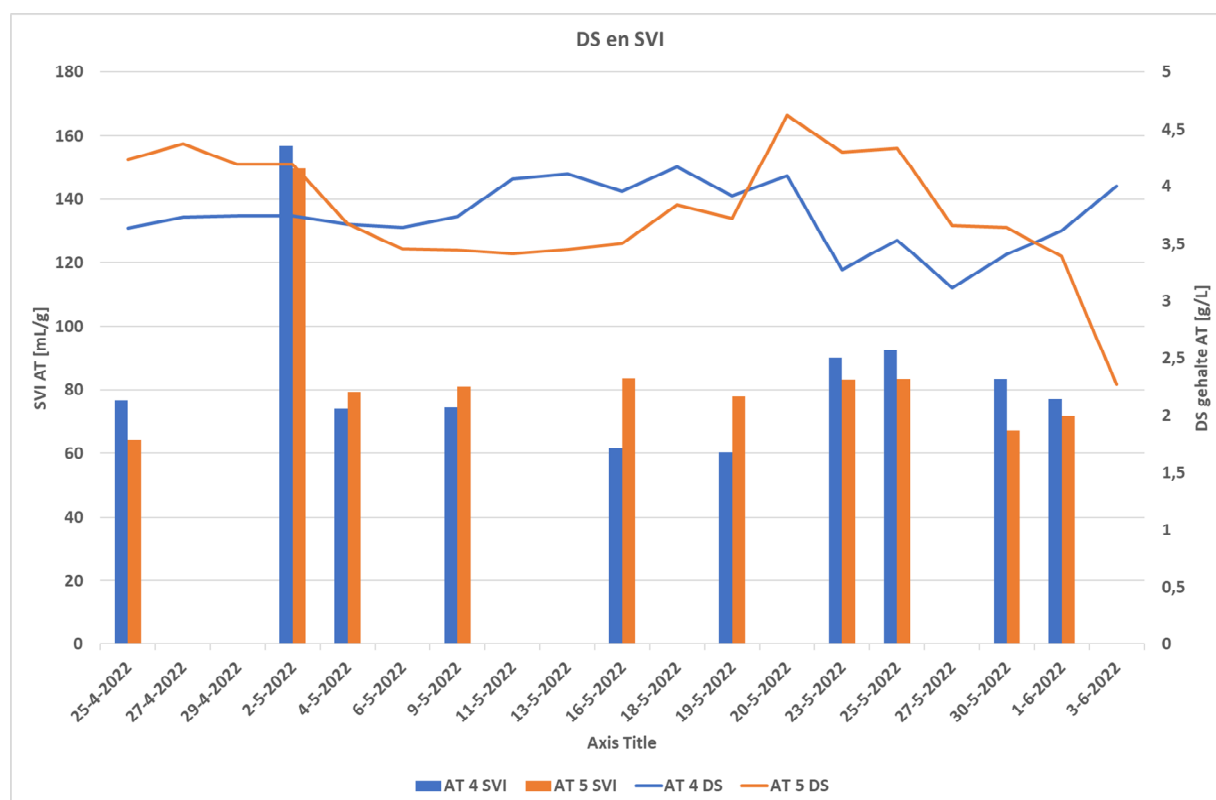
Figuur 10: Effluentwaarden en verwijderingsrendement van fosfaat gedurende de proefperiode

Uit Figuur 10 en Tabel 7 blijkt dat er slechts kleine, niet significante verschillen zijn tussen straten 4 en 5: het blijkt dat beide vlokmiddelen in vergelijkbare mate fosfaat hebben verwijderd. Tegen het einde van de proefperiode lag de verwijdering in straat 5 wat lager, wat kan worden verklaard door een tijdelijke lagere dosering (38 i.p.v. 100 L/h) en een lager ijzergehalte in het HerCauWer-vlokmiddel (circa 28 i.p.v. circa 32 g Fe/L). Dat lagere ijzergehalte werd twee keer achter elkaar gemeten.

Voor de controlestraat is de Me/P-verhouding bepaald op 0,15 mol Fe per mol P en voor HerCauWer op 0.11 mol Fe per mol P. Dat zou betekenen dat er minder mol ijzer nodig is van het HerCauWer-vlokmiddel om dezelfde hoeveelheid P te verwijderen. Dit verschil is mogelijk veroorzaakt doordat het HerCauWer-vlokmiddel voor een deel al uit Fe(III)- en Al-sulfaat bestaat terwijl het commerciële vlokmiddel uit Fe(II)-sulfaat bestaat waarbij eerst nog een omzetting van Fe(II) naar Fe(III) moet plaatsvinden.

3.4.2 Overige effecten

In Figuur 11 zijn de resultaten van de metingen van het slibvolume index (SVI) en het droge stofgehalte (DS) in het slib van beide straten weergegeven.



Figuur 11: Droge stof gehalte en slibvolume index waarden van het slib van beide straten gedurende de proefperiode

Uit Figuur 11 kan worden geconcludeerd dat zowel de DS als SVI waarden van beide straten elkaar niet veel ontlopen: er zijn geen significante verschillen in de prestatie van beide straten. Met andere woorden: het HerCauWer-vlokmiddel geeft resultaten die goed overeenkomen met resultaten behaald met commercieel vlokmiddel. Er lijken geen negatieve effecten op te treden in het gevormde slib.

In Tabel 8 zijn de gemiddelde waarden en verwijdering van de overige gemeten parameters vermeld.

Tabel 8: Gemeten waarden en verwijdering van de overige gemeten parameters in de referentiestraat ("controle") en met het HerCauWer-product

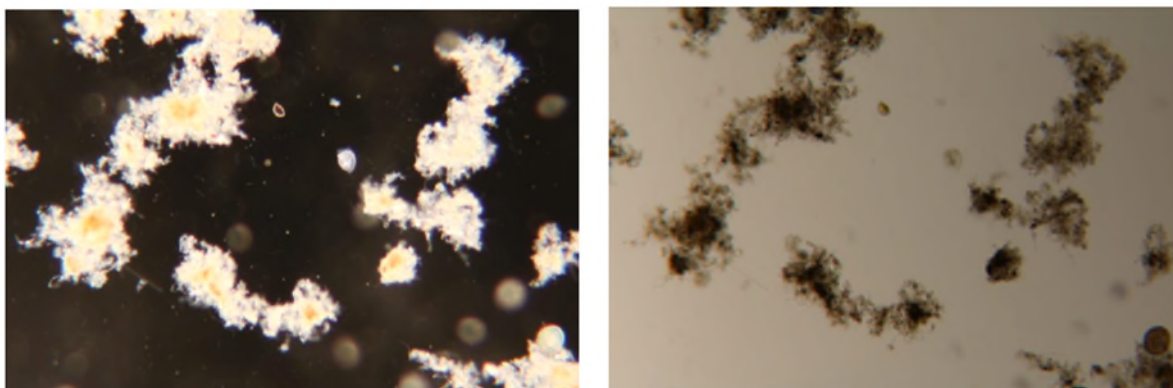
Parameter	Influent	Controle	HerCauWer	Verwijdering controle (%)	Verwijdering HerCauWer (%)
CZV (mg/L)	693 +/- 231	59,7 +/- 13,8	59,0 +/- 14,4	91,4	91,4
BZV (mg/L)	300 +/- 104	4,3 +/- 4,9	3,9 +/- 3,7	98,6	98,7
TZV (mg/L)	991 +/- 288	80,1 +/- 29,7	79,7 +/- 29,3	91,9	92,0
NKj (mg/L)	65,2 +/- 14,5	4,5 +/- 4,1	4,5 +/- 4,3	93,2	93,2
Ntot (mg/L)	65,2 +/- 14,5	11,6 +/- 3,4	12,1 +/- 3,7	82,2	81,5
Ptot (mg/L)	10,9 +/- 2,3	1,6 +/- 0,7	1,7 +/- 0,8	85,7	84,4
Onopgeloste bestanddelen (mg/L)	200 +/- 30	6,6 +/- 5,1	5,7 +/- 3,2	96,7	97,1

Uit Tabel 8 blijkt dat ook voor de overige parameters beide straten goed vergelijkbaar zijn geweest.

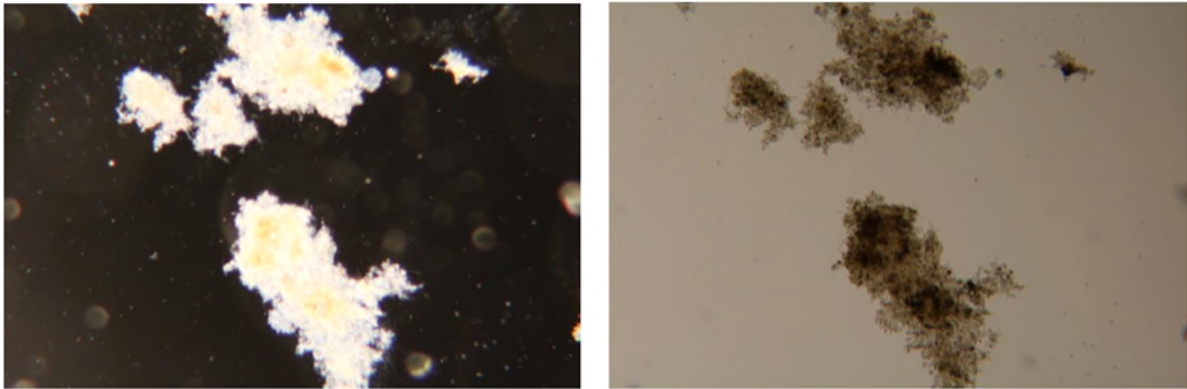
3.5 Vlokstructuur analyse

Er is microscopisch onderzoek uitgevoerd naar de vlokstructuur in het afvalwater na dosering van de vlokmiddelen in beide onderzoekstraten. Hierbij is zowel gekeken naar het HerCauWer-vlokmiddel op RWZI Bath als naar de vlokstructuur met dosering van commercieel vlokmiddel. Voor het onderzoek is circa 10 ml actief slib verzameld en verstuurd naar Feralco. Hieruit is vervolgens één druppel actief slib genomen voor het microscopisch onderzoek. Er is gebruik gemaakt van twee soorten belichting, omdat beide soorten iets andere informatie geven.

Op 19 april 2022 (zie Figuur 12 en Figuur 13) is een eerste beoordeling uitgevoerd op straten 4 en 5 waarbij op beide straten het commerciële vlokmiddel werd gedoseerd, hierbij is geen verschil geconstateerd. Vervolgens is straat 5 gebruikt voor het testen met het HerCauWer-vlokmiddel; straat 4 is hierbij als referentie gebruikt.

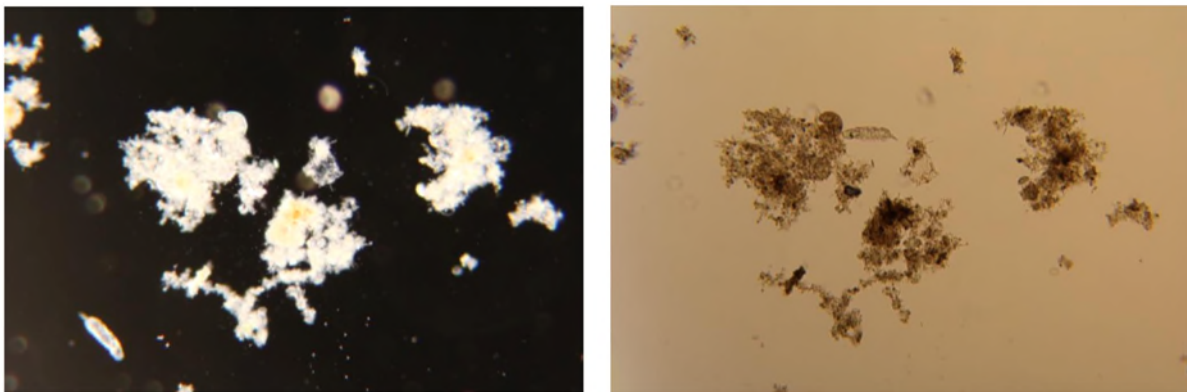


Figuur 12: Vergroting van de vlokstructuur (100 *) van actief slib van straat 5 na het doseren van commercieel vlokmiddel, op 19/4/22. Deze straat wordt gebruikt voor het doseren van het HerCauWer-vlokmiddel

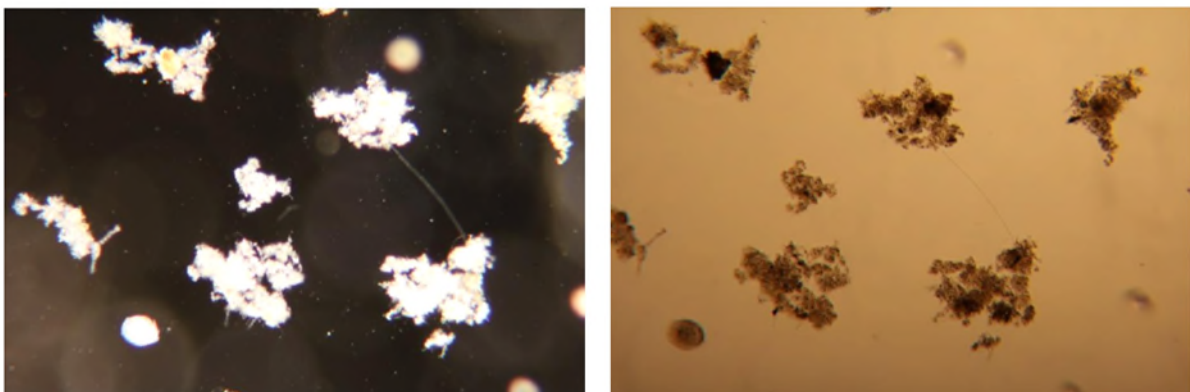


*Figuur 13: Vergroting van de vlokstructuur (100 *) van actief slib van straat 4 na het doseren van commercieel vlokmiddel, op 19/4/22. Deze straat wordt gebruikt voor het vergelijken met de dosering op straat 5*

In Figuur 14 en Figuur 15 zijn de metingen van 3 juni 2022 met de microscoop weergegeven, die op locatie zijn gedaan tijdens het doseren van het HerCauWer-vlokmiddel.



*Figuur 14: Vergroting van de vlokstructuur (100 *) van actiefslib van straat 5 na het doseren van het HerCauWer-vlokmiddel, op 3/6/22. Deze straat wordt gebruikt voor het doseren van het HerCauWer-vlokmiddel*



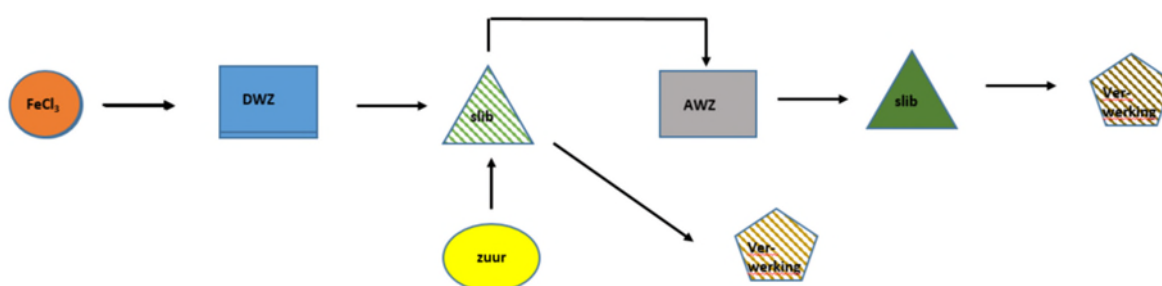
*Figuur 15: Vergroting van de vlokstructuur (100 *) van actiefslib van straat 4 na het doseren van commercieel vlokmiddel, op 3/6/22. Deze straat wordt gebruikt voor het vergelijken met de dosering op straat 5*

De vlokstructuur is in beide straten onregelmatig en open, de kleine vlokken in straat 4 zijn gelijk aan de kleine vlokken in straat 5 en er zijn in beide gevallen geen draadvormers waarneembaar. De aanwezigheid en het type draadvormers worden bepaald door de periode en de zuivering, waarbij ook de voeding van invloed is. Er zijn geen verschillen waargenomen tussen commercieel ijzersulfaat en HerCauWer-vlokmiddel op dit terrein.

4 Duurzaamheids- en kostenaspecten

4.1 Inleiding

In het vorige rapport, waarin de laboratoriumresultaten zijn beschreven [Hofman e.a. 2019] is een levenscyclus berekend, en zijn de verbruikskosten van HerCauWer-vlokmiddel uitgerekend. In dit hoofdstuk wordt een update gegeven van die resultaten, aan de hand van de huidige bevindingen met de pilot-opstelling. Het systeem dat is onderzocht is schematisch weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16: Gebruik van geëxtraheerd waterijzer uit drinkwaterzuivering in afvalwaterzuiveringsproces

4.2 Levenscyclusanalyse

In het vorige onderzoek is een uitgebreide levenscyclusanalyse (LCA) uitgevoerd. Hiervoor is gebruik gemaakt van SimaPro 8.1.1.16 software. De achtergrondinformatie hiervoor is afkomstig uit de EcoInvent 3.0 database. De berekeningen zijn uitgevoerd met ReCiPe Endpoint E V1.10/Europe ReCiPe E/A, en uitgedrukt in ecopunten. Voor de data is gebruik gemaakt van data die gelden voor de wereld ("ROW" in de EcoInvent database) (bij verschillende chemicaliën bevat de database verschillende gegevens die betrekking hebben op verschillende landen). In de berekeningen zijn alleen "consumables" van de chemicaliën in aanmerking genomen, niet de eventuele bouw van installaties en aanleg van leidingen. Als functionele eenheid is 1 kg ijzer (Fe) genomen. De berekeningen zijn zowel in kg CO₂ per kg ijzer als in ecopunten per kg ijzer uitgedrukt. In de hier gerapporteerde analyse komen 1.000 ecopunten (Pt) overeen met de milieu-impact van één West-Europees persoon per jaar [Baayen 2000].

Het is heel belangrijk de systeemgrenzen duidelijk aan te geven in een dergelijke LCA. Er is gekeken naar de vorming van het vlokmiddel met behulp van een zuur, dat vrijkomt als afvalstroom tijdens andere, industriële, processen. Het feit dat het gevormde waterijzer nu niet in andere toepassingen gebruikt kan worden (zoals in vergisters) is buiten beschouwing gelaten. Verder is niet meegenomen dat de samenstelling van het slib dat in de afvalwaterzuivering wordt gevormd, mogelijk iets afwijkt ten opzichte van het huidige slib, al lijken de nieuwe resultaten niet aan te geven dat dit verschil heel groot zal zijn. Een gedetailleerde beschrijving van de LCA-studie is gegeven in het eerste rapport van dit project [Hofman e.a. 2019].

Door het slib uit de drinkwaterzuivering te gebruiken in de afvalwaterzuivering, bestaat de grootste milieuwinst uit het feit dat er minder vers ijzerzout nodig is in de AWZ. Bovendien blijft er minder slib over in de DWZ. Het slib van de DWZ bestaat grotendeels uit ijzerverbindingen, en het ijzer wordt voor een substantieel deel geëxtraheerd. Ook andere elementen als Ba, Ca en Mn worden voor een groot deel uit het slib geëxtraheerd.

Dit betekent dat er van het oorspronkelijke waterijzer een klein volume slib overblijft met relatief veel organische materiaal, en mogelijk nog wat metalen. Afhankelijk van de oorsprong van het slib zal hier ook nog wat ijzer in zitten, maar het is te betwijfelen of deze ijzerverbindingen te gebruiken zijn in een vergistingsinstallatie (een toepassing waarin waterijzer vaak gebruikt wordt). Het resterende slib heeft bovendien een lage pH-waarde. Mogelijk kan het geneutraliseerd worden door kalkkorrels (uit onthardingsinstallaties van de DWZ) toe te voegen. Dit restant slib kan geloosd worden of wellicht aan het influent van een AWZ worden toegevoegd. Hier is in het huidige onderzoek verder niet naar gekeken.

In het pilot-onderzoek kreeg het aangezuurde mengsel eerst de kans te bezinken, en werd alleen het supernatant gedoseerd, met name om problemen met de dosering te voorkomen. Door een bepaald type pomp te gebruiken is het waarschijnlijk mogelijk het hele mengsel direct aan het influent van de RWZI te doseren. Aangezien vrij weinig bekend is over hoeveelheid slib die op deze manier wordt gevormd en de exacte samenstelling hiervan, is deze component in de huidige LCA-studie niet meegenomen. Er is ook geen vergelijking gemaakt met andere toepassingen van waterijzer, bijvoorbeeld in vergistingsinstallaties, omdat ook hier verschillende scenario's mogelijk zijn.

Het slib dat in de AWZ ontstaat na toepassing van ijzer-extract heeft mogelijk een iets andere samenstelling dan bij gebruik van verse ijzervzouten. Dit wordt veroorzaakt door stoffen als mangaan die zich in het extract bevinden en nu in dit slib neerslaan. Daarentegen bevat het commerciële vlokmiddel andere metalen, die minder gewenst zijn, zoals chroom en kobalt. Aangezien er echter relatief weinig ijzervzout nodig is als vlokmiddel, kan worden aangenomen dat dit effect klein zal zijn. Dit aspect is in deze LCA-studie niet meegenomen, omdat er weinig bekend is over de effecten hiervan.

In de LCA-studie zijn wel meegenomen de benodigde hoeveelheden zuur en ijzervzout, en het transport van zowel ijzervzouten, zuren en extract.

Uit de vorige studie bleek dat de milieu-impact van het geëxtraheerde waterijzer significant lager is dan die van commerciële vlokmiddelen, mits gebruik wordt gemaakt van "afvalzuren" die in andere productieprocessen gevormd worden. In de huidige pilotstudie is dat om praktische redenen niet gebeurd (er is technisch zwavelzuur met een gehalte van 96 % gebruikt), maar er is geen reden om te veronderstellen dat bij een grootschalige toepassing van dit proces niet gebruik kan worden gemaakt van "afvalzuren". Wel kan hiervan het gehalte aan zwavelzuur lager zijn, waardoor meer zure oplossing nodig is om op de gewenste pH te komen.

De berekening van de impact van commercieel FeCl_3 kwam uit op 1,17 Pt²/kg Fe, die van $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ en FeSO_4 op respectievelijk 0,40 en 0,30 Pt. De impact van het HerCauWer-vlokmiddel (geëxtraheerd $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) werd echter ingeschat op circa 0,002 Pt, wat significant veel lager is.

Voor deze pilot werd gebruik gemaakt van 95 – 100 kg H_2SO_4 per ton product, waarbij het gemiddelde ijzergehalte van dat product 37 g/L bedroeg. Dat komt ongeveer neer op 94 kg H_2SO_4 (gerekend met zwavelzuurgehalte van 96 %) per ton, ofwel ongeveer 94 kg H_2SO_4 op 37 kg Fe (aangenomen dat de dichtheid van het waterijzer ongeveer 1 was, was gezien het lage vaste stofgehalte ongeveer zal kloppen). Dit betekent dat per g Fe 2,54 g H_2SO_4 nodig was. In de vorige LCA werd uitgegaan van een basisscenario met een verhouding van 2,63 g H_2SO_4 per g Fe, wat redelijk overeenkomt. Een sensitiviteitsanalyse op de milieu-impact voor de benodigde hoeveelheid zuur gaf de volgende resultaten (Tabel 9):

² Pt = ecopunten. De jaarlijkse impact van één Europeaan wordt per definitie gesteld op 1000 Pt [Baayen 2000].

Tabel 9: Sensitiviteitsanalyse op de hoeveelheid benodigde zuur in mPt en mCO₂-equivalenten per kg Fe

scenario	Basis (H ₂ SO ₄ : Fe = 2,63 g/g)		Basis + 10 %		Basis + 20 %		Basis + 30 %		Basis + 40 %	
	mPt	mCO ₂	mPt	mCO ₂	mPt	mCO ₂	mPt	mCO ₂	mPt	mCO ₂
HerCauWer	2,03	12	2,42	14,3	2,84	16,8	3,30	19,5	3,80	22,4
Commercieel Fe ₂ (SO ₄) ₃	400	1030	--	--	--	--	--	--	--	--
Commercieel FeSO ₄	304	782	--	--	--	--	--	--	--	--

Hieruit kan worden geconcludeerd dat op grond van de bevindingen in het pilotonderzoek de LCA-resultaten nog steeds geldig zijn, en dat de impact van aangezuurd waterijzer op basis van CO₂-equivalenten ongeveer 2 % en op basis van Pt ongeveer 1 % is van de impact van commercieel FeSO₄. Ofwel, de impact van HerCauWer-vlokmiddel is ongeveer een factor 50 tot 100 lager dan die van commercieel vlokmiddel.

In dit onderzoek is de impact van het zuur, als afvalstroom, op 0 gesteld, maar het is de vraag of dit terecht is, als er een economische waarde aan wordt toegekend. Hier moet eigenlijk een economische weging voor worden toegepast.

Uit de vorige studie was gebleken dat de factor transport een kleine bijdrage levert aan de totale milieu-impact van het product. Het is aan te bevelen de extractie van het waterijzer hetzij op de drinkwater-, hetzij op de afvalwaterzuiveringslocatie uit te voeren, omdat dan zo min mogelijk transport nodig is, en bij voorkeur waterijzer te gebruiken dat in de omgeving wordt gevormd. Aangezien hier echter ook andere aspecten een rol bij spelen (zoals de opslag van chemicaliën, veiligheidsaspecten en het bouwen en onderhouden van de installatie), kan het misschien in de praktijk beter zijn op een meer centraal punt de extractie uit te voeren.

4.3 Kostenaspecten

In het vorige rapport [Hofman e.a. 2019] is ook een analyse gemaakt van de verwachte verbruikskosten. Hiervoor is uitgegaan van de volgende parameters (Tabel 10):

Tabel 10: Gemiddelde parameters berekening kostprijs; data afkomstig van AquaMinerals

Parameter	Hoeveelheid (2019)
Totaal volume slib	65.000 ton
Geschikt volume slib	62.000 ton
Droge stofgehalte	9,1%
Fe-gehalte	350 g/kg
Maximale hoeveelheid slib te gebruiken als vlokmiddel	50%
Rendement Fe-oplossen	75%
Kosten slib	€6,50/ton*)
Kosten technisch H ₂ SO ₄	€60.00/ton

*) Op dit moment zijn de omstandigheden erg instabiel, en wisselen de kosten voor slib maar ook de opbrengst voor coagulant sterk. Er is besloten deze data te hanteren, omdat deze afkomstig zijn uit de meest recente stabiele situatie (informatie van AquaMinerals).

Dit bracht de kostprijs van het uit waterijzer gevormde ijzersulfaat op ongeveer €68/ton voor een 40 % oplossing, rekening houdend met een effectiviteit van 75 % voor het oplossen van het ijzer, en een extra hoeveelheid van 10 % zuur voor het op pH brengen van de oplossing. Zou 20 % extra zuur nodig zijn, bijvoorbeeld voor het oplossen van andere componenten uit het waterijzer, dan zou dat de kostprijs op ongeveer €71/ton brengen, wat nog steeds significant lager is dan de €125/ton die in 2019 voor een ton commercieel ijzersulfaat moest worden betaald.

Actueel (juli 2022) zijn door allerlei internationale ontwikkelingen de prijzen van energie en chemicaliën sterk gestegen, en zijn vlokmiddelen op dit moment zelfs schaars te noemen. De prijs van H_2SO_4 is gestegen van €60.00 naar €190 – 200/ton. Hierdoor is de prijs van het HerCauWer-vlokmiddel ook gestegen naar ongeveer €156/ton, rekening houdend met een oplosefficiëntie van 75 % en 20 % extra zuurverbruik voor het op pH brengen van de oplossing en het oplossen van andere componenten dan ijzer. Als dit extra verbruik slechts 10 % is komt de kostprijs uit op ongeveer €147/ton, dus een reële aanname is dat de kostprijs circa €150/ton zal zijn. Met het in dit onderzoek gebruikte waterijzer bleek inderdaad geen 20 % extra zuur nodig te zijn. Daar staat tegenover dat de prijzen voor het commerciële vlokmiddel inmiddels zijn gestegen van €125/ton (40 % $FeCl_3$ -oplossing) naar circa €175 – 200/ton. Dit betekent dat het HerCauWer-vlokmiddel nog steeds concurrerend is wat prijs betreft met het commerciële ijzersulfaat.

Een aspect wat in deze berekening nog niet is meegenomen is circulariteit en duurzaamheid. Uit de LCA-analyse blijkt dat de CO_2 -voetafdruk van het geëxtraheerde materiaal ongeveer 16,8 mCO_2 -equivalenten per kg Fe is, terwijl die van commercieel $FeSO_4$ ongeveer 782 mCO_2 -equivalenten bedraagt. Hierbij is als een worst case benadering aangenomen dat er inderdaad 20 % extra H_2SO_4 nodig zou zijn voor de oplossing (wat bij het slib van Loenderveen bijvoorbeeld niet het geval is, daar is 10 % voldoende). Uitgaande van een oplossing van 40 % $FeSO_4$, zoals ook in de berekening hierboven is gedaan, betekent dit dat een ton commercieel $FeSO_4$ (40 % oplossing) 147 kg Fe bevat en dus een voetafdruk heeft van $1,15 \cdot 10^5$ mCO_2 -eq. Voor een HerCauWer-vlokmiddel met hetzelfde ijzergehalte geldt dan een voetafdruk van $2,47 \cdot 10^3$ mCO_2 -eq. Bij een CO_2 -beprijzing van €127/ton (informatie van AquaMinerals) maakt dit ook financieel een verschil: €14,61/ton commercieel materiaal ten opzichte van €0,31 voor het hergebruikte waterijzer. Deze kosten komen dan dus bovenop de hierboven genoemde kosten, waarmee de kosten voor het hergebruikte materiaal uitkomen op circa €150/ton, terwijl die van het commerciële ijzersulfaat ongeveer €190 – 215/ton bedragen.

Bij deze kostprijsberekening is echter nog geen rekening gehouden met de benodigde investeringen, die sterk afhankelijk zullen zijn van de schaalgrootte.

Het is erg lastig om in de huidige tijd de kosten exact te bepalen, omdat deze op de markt dagelijks (sterk) fluctueren. Bovendien blijkt vlokmiddel niet altijd even goed leverbaar te zijn, vanwege tekorten aan bijvoorbeeld zoutzuur op de markt.

Daarnaast hebben AquaMinerals en haar aandeelhouders afgesproken dat ze reststoffen in watercyclus willen inzetten, wat niet financieel is te meten maar wel een grote meerwaarde heeft in de circulaire economie. Voor de business case is het wel aan te raden te kijken of waterijzer uit een drinkwaterzuivering kan worden ingezet als vlokmiddel bij een RWZI in de directe omgeving van die drinkwaterzuivering. Dit zal vanwege praktische overwegingen en kosten met betrekking tot transport het gunstigste zijn.

4.4 Conclusies

Op grond van de data uit het pilotonderzoek en op basis van nieuwe gegevens met betrekking tot kosten kan worden geconcludeerd dat de bevindingen uit het eerdere rapport [Hofman e.a. 2019] nog steeds geldig zijn.

De milieu-impact van het aangezuurde waterijzer bedraagt ongeveer 1 % van die van commercieel FeSO₄ op basis van ecopunten, en 2 % op basis van CO₂-equivalenten. Hiermee is de impact van het HerCauWer materiaal significant kleiner dan die van het commerciële middel.

De verbruikskosten inclusief CO₂-beprijzing van het hergebruikte waterijzer bedragen ongeveer 75 % van die van commercieel FeSO₄. De kostenraming moet niet als absoluut worden beschouwd, omdat de kosten voor zowel zuren als vlokmiddelen op de markt tegenwoordig dagelijks sterk wisselen.

Afgezien van bovenstaande berekeningen geldt altijd dat het op deze manier hergebruiken van waterijzer zeker bijdraagt aan de circulaire economie. Bovendien kan dit een oplossing zijn voor het probleem van de huidige schaarste aan vlokmiddel op de markt.

Samenvattend kan dan ook worden gesteld dat het zeker interessant is om waterijzer uit de drinkwaterzuivering in te zetten als vlokmiddel in de afvalwaterzuivering.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- Het blijkt vrij eenvoudig om waterijzer door aanzuring om te zetten in een stabiel vlokmiddel;
- Het HerCauWer-vlokmiddel bevat naast Fe en andere (zware) metalen ook TOC. Dit lijkt vooralsnog geen probleem te vormen, met name vanwege de enorme verdunning en deels mogelijke afvang in het slib. Eventueel zou hier verder onderzoek naar gedaan kunnen worden. Ook het commerciële vlokmiddel bevat andere (zware) metalen, echter geen TOC en heeft lagere Al en Ca gehalten. Daarnaast bevat het commerciële vlokmiddel meer voor Nb, Sn, Mo, Co, Ge, Ti, Cr, en Ni.
- In vergelijking met commercieel vlokmiddel bevat het HerCauWer-vlokmiddel ongeveer de helft aan ijzer, waardoor in de praktijk een bijna 2 maal hoger volume gedoseerd moet worden;
- Het HerCauWer-vlokmiddel presteert per hoeveelheid toegepast ijzer vergelijkbaar met het door WBD gebruikte commerciële vlokmiddel voor de verwijdering van fosfaat. De Me/P verhouding is lager voor het HerCauWer-vlokmiddel, mogelijk veroorzaakt doordat het vlokmiddel meer Fe(III) en ook een kleine hoeveelheid Al bevat;
- Het HerCauWer-vlokmiddel heeft geen negatief effect op overige processen en de kwaliteit van het water; de microscopische vlokstructuren, SVI- en DS-waarden waren vergelijkbaar in beide teststraten.
- Op grond van een beknopte LCA-studie kan worden geconcludeerd dat de milieu-impact van het HerCauWer product ongeveer 1-2 % bedraagt van die van commercieel ijzersulfaat, en daarmee significant lager is dan die van commercieel materiaal.
- Een analyse van de verbruikskosten laat zien dat het HerCauWer-vlokmiddel uit deze studie significant goedkoper is dan commercieel ijzersulfaat. Indien ook de CO₂-beprijzing mee wordt gewogen, komen de kosten voor het HerCauWer-vlokmiddel uit op ongeveer 75 % van die van het commerciële vlokmiddel.
- Het hergebruiken van waterijzer uit de drinkwaterzuivering in afvalwaterzuiveringsprocessen draagt bij aan een meer circulaire economie.
- Het hergebruiken van waterijzer uit de drinkwaterzuivering in afvalwaterzuiveringsprocessen is een oplossing voor (zeker een deel van) het huidige probleem met schaarste aan commerciële vlokmiddelen. Dit hangt echter mede af van de kwaliteit/samenstelling van het waterijzer, en zal per geval goed bekeken moeten worden.

5.2 Aanbevelingen

- Er moet worden uitgezocht of het mogelijk is om het aangezuurde waterijzer in zijn geheel, dus zonder het eerst te laten bezinken, toe te voegen aan het influent van de RWZI. In dit onderzoek was dat in verband met de gebruikte pompen een risico, maar door een ander type pomp te gebruiken zou het wel mogelijk kunnen zijn. De vraag is dan wat het eventuele effect is van niet opgeloste bestanddelen op de bedrijfsvoering van de RWZI, en dan voornamelijk op het slib en de ontwatering van het slib.
- Er moet worden uitgezocht welke typen waterijzer, van welke drinkwaterproductielocaties, geschikt zijn om te worden opgewerkt tot HerCauWer-vlokmiddel.
- Er moet worden vastgesteld of de aanwezigheid van TOC in het HerCauWer-vlokmiddel inderdaad geen (negatieve) effecten oplevert voor de zuivering en de verdere slibverwerking?

- Er is nu voor de LCA-studie aangenomen dat het gebruikte “afvalzuur” een impact 0 zou hebben, maar het is de vraag hoe dit meegenomen moet worden als deze afvalstroom op deze manier een economische waarde krijgt. Hier zou verder onderzoek naar gedaan moeten worden.
- Er moet onderzoek worden gedaan naar de optimale realisatie van het hergebruik van waterijzer. Is het mogelijk het aanzuren/oplossen van waterijzer bij het drinkwaterbedrijf of bij de RWZI te doen, waardoor het transport kan worden beperkt? Waarschijnlijk heeft hergebruik in de regio dan de voorkeur. Indien het om waterijzer van één bepaalde locatie gaat zal de samenstelling ervan niet heel sterk fluctueren. Of heeft het de voorkeur toch ergens een centrale installatie hiervoor te bouwen? Dit vergt meer transport van zowel waterijzer als HerCauWer-vlokmiddel, maar heeft wel schaalvoordelen. Dat zou gunstig kunnen zijn voor de kosten, maar ook om een constante kwaliteit van het vlokmiddel op grote schaal te kunnen waarborgen.
- Er moet worden uitgezocht of het mogelijk is een hoger Fe-gehalte te bereiken bij de bereiding van het vlokmiddel?
- Een onderzoeksvraag die nog open staat is of het toepassen van het HerCauWer-vlokmiddel voordelen biedt tijdens de overgang van winter naar zomer, door de aanwezigheid van aluminium in dit vlokmiddel. In de winter wordt immers ook aluminiumvlokmiddel toegepast in Bath, in de rest van het jaar alleen ijzerhoudend vlokmiddel.
- Voor de business case is het belangrijk deze lokaal uit te werken, en te kijken of slib uit een drinkwaterzuivering in de directe omgeving kan worden ingezet bij een RWZI.

6 Literatuur

- [1] Roberta Hofman-Caris, Danny Harmsen, Wolter Siegers, Tessa van den Brand (2019): Hergebruik van Coagulant uit Waterijzer; KWR 2019.086 TKI eindrapport.
- [2] Baayen, H. (2000) Eco-indicator 99; manual for designers; A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Hague, The Netherlands.

I Gehaltes metalen in verschillende batches vlokmiddel

Tabel 11: Gehaltes aan metalen in HerCauWer-vlokmiddel batches van genoemde datums

Datum	26-aug-21	30-aug-21	9-sep-21	24-aug-21
Parameter	Gehalte (%)			
TOC	2,72	1,67	1,25	0,64
Fe	94,24	94,87	95,16	93,82
Ca	2,15	2,49	2,59	4,48
Al	0,20	0,20	0,22	0,44
Mg	0,17	0,23	0,26	0,13
Mn	0,16	0,18	0,17	0,11
Na	0,10	0,11	0,11	0,04
V	0,08	0,08	0,07	0,05
K	0,06	0,07	0,08	0,08
Ti	0,04	0,04	0,03	0,03
Sn	0,02	0,00	0,00	0,00
Cr	0,02	0,02	0,02	0,01
Sr	0,01	0,01	0,01	0,03
Zn	0,01	0,01	0,01	0,00
As	0,00	0,00	0,00	0,00
Ga	0,00	0,00	0,00	0,00
Ge	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00
Som	99,99	99,99	99,99	99,88

Tabel 12: Gegevens van de zuurbehandeling van het waterijzer

Eisensulfatlösungen von Feralco Nederland						HW	
						freie Säure nach Herz	
Datum	Probe	Fe II	Fe III	Fe ges.	Dichte/20°C	Verbr.	H2SO4
		Gew. %	Gew. %	g/L	g/mL	0,1 n NaOH	%
						ml	Herz
8-9-2021	1: Batch 1 vom 26.08.2021	0,90	2,82	42,48	1,1420	6,16	2,65
8-9-2021	2: Batch 1 vom 26.08.2021	0,90	2,75	41,61	1,1400	6,63	2,85
8-9-2021	3: Batch 1 vom 26.08.2021	0,88	2,76	41,50	1,1400	6,52	2,80
21-9-2021	1: Batch 010221 vom 01.09.2021	1,56	1,1	28,93	1,0875	1,22	0,55
21-9-2021	2: Batch 010221 vom 01.09.2021	1,58	1,1	29,14	1,0872	1,19	0,54
21-9-2021	3: Batch 110321 vom 02.09.2021	1,78	1,38	34,76	1,1000	1,25	0,56
21-9-2021	4: Batch 010321 vom 02.09.2021	1,76	1,41	34,86	1,0997	1,21	0,54
21-9-2021	5: Batch 010421 vom 06.09.2021	1,78	1,33	34,30	1,1030	1,28	0,57
21-9-2021	6: Batch 010421 vom 06.09.2021	1,35	1,33	29,56	1,1030	1,35	0,60
21-9-2021	7: Batch 010521 vom 07.09.2021	1,65	1,38	33,33	1,1000	2,20	0,98
21-9-2021	8: Batch 01521 vom 07.09.2021	1,63	1,34	32,68	1,1002	1,44	0,64
21-9-2021	9: Batch 03021 vom 08.09.2021	2,07	1,98	45,99	1,1356	1,27	0,55
21-9-2021	10: Batch 0301 vom 09.09.2021	2,13	1,93	46,37	1,1421	1,38	0,59
27-9-2021	1: Batch 030221 vom 13.09.2021	2,07	1,79	43,72	1,1327	1,25	0,54
27-9-2021	2: Batch 040121 vom 16.09.2021	0,41	2,70	34,16	1,0985	0,00	0,00
27-9-2021	3: Batch 040221 vom 17.09.2021	0,37	2,71	33,80	1,0975	0,00	0,00
27-9-2021	4: Batch 040321 vom 20.09.2021	0,28	3,34	40,97	1,1318	0,00	0,00
27-9-2021	5: Batch 040421 vom 20.09.2021	0,20	3,23	38,20	1,1138	0,00	0,00
28-9-2021	6: Batch 030221 vom 13.09.2021	2,07	1,84	44,30	1,1329	1,24	0,54
28-9-2021	7: Batch 040121 vom 16.09.2021	0,41	2,75	34,72	1,0986	0,00	0,00
28-9-2021	8: Batch 040221 vom 17.09.2021	0,36	2,77	34,36	1,0977	0,00	0,00
28-9-2021	9: Batch 040321 vom 20.09.2021	0,26	3,42	41,65	1,1318	0,00	0,00
28-9-2021	10: Batch 040421 vom 20.09.2021	0,19	3,23	38,03	1,1119	0,00	0,00
5-10-2021	1: Batch 020221 vom 22.09.2021	1,68	1,16	31,28	1,1014	1,48	0,66
5-10-2021	2: Batch 020221 vom 23.09.2021	1,75	1,29	33,59	1,1049	1,80	0,80
5-10-2021	3: Batch 020421 vom 24.09.2021	1,80	1,32	34,64	1,1104	2,95	1,30
5-10-2021	4: Batch 020321 vom 24.09.2021	1,92	0,78	29,20	1,0816	2,89	1,31
5-10-2021	5: Batch 020421 vom 24.09.2021	2,07	1,4	38,48	1,1088	2,98	1,32
5-10-2021	6: Batch 020321 vom 24.09.2021	1,89	0,89	30,11	1,0832	2,36	1,07
5-10-2021	7: Batch 030321 vom 29.09.2021	1,88	1,63	39,43	1,1235	1,89	0,82
5-10-2021	8: Batch 030321 vom 23.09.2021	1,89	1,6	39,26	1,1250	1,98	0,86
5-10-2021	9: Batch 030421 vom 30.09.2021	2,12	1,9	45,70	1,1367	1,93	0,83
5-10-2021	10: Batch 030421 vom 30.09.2021	2,09	1,92	45,75	1,1408	2,11	0,91

II Overige analyses

Tabel 13: Fosfaatanalyses in influent en in het effluent van straat 4 (de controle straat) en van straat 5 (de "HerCauWer" straat)

Datum	PO ₄ -P [mg/L]			Verwijderingsrendement η [%]	
	Influent	Controle	HerCauWer	Controle	HerCauWer
29-4-2022	7,50	1,78	1,39	76%	81%
2-5-2022	9,57	1,66	1,36	83%	86%
4-5-2022	7,38	0,92	1,34	87%	82%
6-5-2022	8,87	1,79	2,30	80%	74%
9-5-2022	8,66	1,40	1,14	84%	87%
11-5-2022	8,96	1,91	1,47	79%	84%
13-5-2022	8,38	1,74	1,72	79%	79%
16-5-2022	8,52	0,90	1,02	89%	88%
18-5-2022	9,10	1,87	1,58	79%	83%
20-5-2022	5,82	2,09	2,51	64%	57%
23-5-2022		0,25	0,45		
25-5-2022	3,89	0,21	0,26	95%	93%
27-5-2022	5,81	0,69	1,02	88%	82%
30-5-2022	7,31	1,91	2,90	74%	60%
1-6-2022	6,20	1,54	2,10	75%	66%
3-6-2022	6,62	1,88	2,15	72%	68%
Gem.		1,42	1,44	80,6%	80,1%
StDev		0,64	0,65	8%	10%
GemDev		0,52	0,48	6%	7%

Tabel 14: Analyses van het waterijzer van enkele monsters uit de IBC's tijdens opslag in Sluiskil, dus voordat de experimenten ermee werden uitgevoerd.

		07-08-2021 7-aug-21	22-08-2021 22-aug-21	26-08-2022 26-aug021	30-08-2021 30-aug-21	09-09-2021 9-sep-21	17-09-2021 17-sep-21	20-09-2021 20-sep-21	24-08-2021 24-aug-21	24-08-2021 24-aug-21
Arseen na salpeterzuurdestructie	µg/l	350	470	1645	1080	845	2445	5900	1895	1760
IJzer na salpeterzuurdestructie	g/l	31	33	39	46	45	27	38	41	39
TOC na salpeterzuurdestructie	mg C/l	855	570	1015	735	555	165	320	340	315
Lithium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	56	49	74	-	-	205	-
Beryllium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	16	20	21	-	-	22	-
Boor na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	240	265	220	-	-	455	-
Natrium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	37520	48675	46755	-	-	22400	-
Magnesium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	64620	101210	113875	-	-	67380	-
Aluminium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	74730	88490	98605	-	-	234050	-
Kalium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	21485	29140	36015	-	-	44975	-
Calcium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	800205	1092770	1147210	-	-	2373105	-
Scandium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	135	220	255	-	-	120	-
Titanium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	15610	17550	14780	-	-	14055	-
Vanadium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	28930	34120	33080	-	-	27735	-
Chroom na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	6455	8870	9465	-	-	5495	-
Mangaan na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	58255	78870	74310	-	-	56885	-
IJzer na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	35124260	41671250	42216010	-	-	49685455	-
Kobalt na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	625	875	945	-	-	520	-
Nikkel na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1085	1350	1440	-	-	1090	-
Koper na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1005	1185	1115	-	-	1045	-
Zink na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	2345	3180	3445	-	-	2500	-
Gallium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1190	1630	1780	-	-	785	-
Germanium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1180	1700	1875	-	-	745	-
Arseen na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1800	1255	1060	-	-	1610	-
Seleen na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	41	41	45	-	-	59	-
Rubidium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	33	33	41	-	-	475	-
Strontium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	5500	5155	5020	-	-	16970	-
Yttrium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	255	365	370	-	-	290	-
Zirkonium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	620	610	465	-	-	775	-
Niobium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	110	130	105	-	-	185	-
Molybdeen na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	99	54	32	-	-	140	-
Ruthenium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	<0,20	0,38	0,42	-	-	<0,20	-
Palladium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	14	17	17	-	-	25	-
Zilver na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1,9	1,9	1,5	-	-	3,8	-
Cadmium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	6,3	8,6	8,5	-	-	8,5	-
Indium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	23	0,93	0,70	-	-	<0,20	-
Tin na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	6625	170	110	-	-	270	-
Antimoon na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	9,3	8,7	7,2	-	-	22	-
Telluur na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1,8	2,8	2,8	-	-	1,5	-
Cesium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	4,3	3,8	3,5	-	-	74	-
Barium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	55	49	58	-	-	56315	-
Lanthanium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	125	175	165	-	-	240	-
Cerium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	245	345	335	-	-	450	-
Praseodymium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	30	41	42	-	-	56	-
Neodymium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	120	160	165	-	-	210	-
Samarium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	33	44	44	-	-	54	-
Europium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	8,1	11	11	-	-	28	-
Gadolinium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	38	50	50	-	-	58	-
Terbium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	5,3	7,1	7,0	-	-	6,5	-
Dysprosium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	33	42	42	-	-	47	-
Holmium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	6,3	8,1	8,0	-	-	7,2	-
Erbium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	20	25	24	-	-	27	-
Thulium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	2,7	3,3	3,3	-	-	3,7	-
Ytterbium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	18	22	21	-	-	24	-
Lutetium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	2,9	3,5	3,4	-	-	3,9	-
Hafnium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	9,3	7,8	6,0	-	-	13	-
Tantalium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	<0,40	0,48	<0,40	-	-	<0,40	-
Wolfram na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	135	92	72	-	-	185	-
Renium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	<0,20	<0,20	<0,20	-	-	<0,20	-
Osmium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	<0,20	<0,20	<0,20	-	-	<0,20	-
Iridium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	<0,20	<0,20	<0,20	-	-	<0,20	-
Platina na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	1,2	1,1	1,0	-	-	3,9	-
Thallium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	0,62	0,67	0,66	-	-	3,6	-
Lood na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	41	28	17	-	-	850	-
Bismut na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	2,3	1,6	<1,0	-	-	3,4	-
Thorium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	98	105	98	-	-	135	-
Uranium na salpeterzuurdestructie	µg/l	-	-	23	27	25	-	-	32	-

- = Analyse niet gevraagd.

Tabel 15: Gehaltes aan metalen (in µg/L) en TOC (in mg C/L) in de monsters aangeleverd door Feralco op verschillende datums tijdens het experiment, in de beide laatste kolommen is het gebruikte commerciële product ter vergelijking toegevoegd. Alle gehalten zijn gemeten met behulp van ICP/MS-scan na salpeterzuurdestructie

Element	datum	HerCauWer										Commercieel FeSO ₄	
		22-04-2022	02-05-2022	06-05-2022	09-05-2022	11-05-2022	12-05-2022	11-05-2022	18-05-2022	01-06-2022	03-06-2022	11-05-2022	01-06-2022
Lithium	Li	84	63	440	79	75	150	69	53	22	26	2	7,1
Beryllium	Be	26	24	33	28	28	49	25	44	65	71	2	0,2
Boor	B	375	360	845	400	390	610	295	385	380	465	100	145
Natrium	Na	58055	75620	81535	65075	64335	89420	59930	82060	32665	36600	14460	20130
Magnesium	Mg	56870	53330	95050	60200	59155	85800	56190	72770	88400	100875	15620	17245
Aluminium	Al	2184885	2155050	2684540	2512470	2501240	814395	2377400	749390	124935	155765	9565	17975
Kalium	K	13485	11725	79260	8290	8000	31610	7290	9170	2450	2905	6420	8195
Calcium	Ca	652085	578185	3797490	616805	595190	1280975	573380	579800	477570	555580	55340	81265
Scandium	Sc	97	92	165	100	100	120	100	88	60	70	10	10
Titanium	Ti	7235	6020	19795	6000	6000	10655	5645	5385	2070	2335	3660	14195
Vanadium	V	30705	29495	33560	31850	31445	25045	30815	23445	6040	6900	720	1760
Chroom	Cr	5390	5125	6510	5580	5470	4640	5400	4200	1390	1625	12525	25765
Mangaan	Mn	67310	64765	71605	71020	70120	307275	69330	298155	597615	679295	157515	265315
IJzer	Fe	31447690	31524835	35704740	33336350	34171505	36315130	31502485	34499340	28133805	29519230	59860370	62425250
Kobalt	Co	510	495	590	535	530	490	530	455	270	310	2000	1605
Nikkel	Ni	1060	1025	1290	1100	1095	1010	1120	930	520	605	9850	9935
Koper	Cu	1110	1080	1470	1110	1110	1100	1100	940	645	745	570	525
Zink	Zn	3175	3125	3445	3115	3065	2945	3020	2775	2800	2260	1685	1365
Gallium	Ga	1150	1125	1425	1260	1240	835	1210	765	230	265	290	375

Germanium	Ge	455	445	560	475	470	565	465	495	380	430	885	975
Arseen	As	650	535	1675	560	555	2720	545	1950	2795	3105	10	11
Seleen	Se	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Rubidium	Rb	58	24	495	25	23	175	21	21	6,8	8,8	4,8	7,1
Strontium	Sr	5635	4930	18265	4905	4925	9790	4870	5075	4300	4860	230	380
Yttrium	Y	270	265	290	275	275	465	275	460	670	760	2	2
Zirkonium	Zr	435	355	1120	340	340	805	330	405	315	360	11	33
Niobium	Nb	85	62	275	64	62	165	62	58	22	21	205	1280
Molybdeen	Mo	37	28	145	21	20	105	20	36	31	37	320	1270
Ruthenium	Ru	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Palladium	Pd	14	13	31	18	17	23	13	17	20	22	3,6	2,6
Zilver	Ag	10	10	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Cadmium	Cd	8,9	8,7	9,7	9,2	9,3	15	8,5	15	23	25	2	2,4
Indium	In	2	2	5,6	2,0	2	2	2	2	2	2	2	2
Tin	Sn	155	125	530	130	125	320	135	165	50	56	385	335
Antimoon	Sb	6,9	5,9	15	6,0	5,6	17	4,7	9,0	6,6	11	4	4
Telluur	Te	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Cesium	Cs	8,2	4,0	74	3,4	3,4	26	3,3	2,7	2	2	2	2
Barium	Ba	4720	425	13640	365	400	25560	230	480	270	540	45	64
Lanthanum	La	150	140	200	145	145	255	145	225	320	365	2	2
Cerium	Ce	295	285	405	295	295	430	290	390	470	530	2	2
Praseodymium	Pr	37	38	52	38	39	59	39	54	69	78	2	2

Neodymium	Nd	155	150	205	155	155	235	155	215	275	310	2	2
Samarium	Sm	42	41	53	42	43	59	42	55	67	75	2	2
Europium	Eu	12	10	16	11	11	21	11	14	18	20	2	2
Gadolinium	Gd	49	47	58	50	49	73	50	68	92	100	2	2
Terbium	Tb	7,2	7,0	7,9	7,1	7,3	11	7,3	10	13	15	2	2
Dysprosium	Dy	44	42	48	43	43	64	44	62	83	94	2	2
Holmium	Ho	8,5	8,3	9,4	8,8	8,5	13	9,0	13	18	20	2	2
Erbium	Er	26	25	28	26	26	39	26	40	55	61	2	2
Thulium	Tm	3,5	3,5	3,7	3,5	3,5	5,3	3,6	5,2	7,1	7,9	2	2
Ytterbium	Yb	24	23	25	24	24	34	24	34	45	50	2	2
Lutetium	Lu	3,8	3,8	4,0	3,9	3,8	5,5	4,0	5,4	7,1	8,0	2	2
Hafnium	Hf	10	10	17	10	10	12	10	10	10	10	10	10
Tantalium	Ta	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Wolfram	W	89	71	255	69	68	185	70	88	56	63	4	27
Renium	Re	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Osmium	Os	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Iridium	Ir	2,1	2	5,8	3,6	2,7	2,9	2	2	2	2,0	2	2
Platina	Pt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2,1	2
Thallium	Tl	2	2	4,7	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Lood	Pb	125	49	735	34	34	360	32	35	11	14	5,9	19
Bismut	Bi	10	10	16	10	10	10	10	10	10	11	10	10
Thorium	Th	110	105	140	115	110	105	110	94	41	45	2	2
Uranium	U	31	30	35	32	32	36	32	36	36	41	2	2

TOC		1105	985	2580	920	830	1960	850	940	495	575	2	2,7
-----	--	------	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	---	-----

Tabel 16: Metingen aan het RWZI-water

Rapportagedagen	Debiet Influent	CZV [mg/L]			BZV [mg/L]			TZV [mg/L]			NKj [mg/L]			Ntot [mg/L]			Ptot [mg/L]			PO4 [mg/L]			Onopgeloste bestanddelen [mg/L]			Asrest			
		Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	Influent	NBT 4	NBT 5	
Maandag	25-4-2022	Monstervaten waren leeg																											
Woensdag	27-4-2022	Koningsdag																											
Vrijdag	29-4-2022	58200	470	54	56	290	2,0	3,7	775	70	69	66,7	3,5	2,8	66,7	10,9	10,7	11,0	1,8	1,6	7,5	1,8	1,4		4,8	4,0			
Maandag	2-5-2022	52150	700	69	70	315	1,2	1,7	1029	84	85	72,1	3,3	3,2	72,1	10,2	11,1	13,0	1,8	1,4	9,6	1,7	1,4	200	4,0	6,4			
Woensdag	4-5-2022	60809	810	70	80	350	1,9	2,6	1159	92	103	76,3	4,8	5,1	76,3	14,1	15,7	12,0	1,0	1,5	7,4	0,9	1,3		4,0	4,0			
Vrijdag	6-5-2022	55020	810	71	73	310	2,3	2,9	1130	87	89	70,1	3,6	3,4	70,1	11,7	11,3	12,0	1,6	2,3	8,9	1,8	2,3		5,2	4,0			
Maandag	9-5-2022	55240	700	70	70	340	2,8	2,6	1029	89	90	72,1	4,1	4,4	72,1	12,0	12,4	12,0	1,4	1,2	8,7	1,4	1,1		4,0	4,0			
Woensdag	11-5-2022	53540	690	66	66	240	2,5	2,2	1010	79	79	70,1	2,8	2,8	70,1	11,4	11,3	11,0	1,9	1,6	9,0	1,9	1,5		4,0	4,0			
Vrijdag	13-5-2022	54890	770	63	65	340	3,3	2,9	1120	76	79	76,6	2,8	3,1	76,7	11,4	11,5	12,0	1,8	1,8	8,4	1,7	1,7		15,0	15,0			
Maandag	16-5-2022	51740	680	62	61	300	2,8	3,1	1010	74	74	72,3	2,7	2,8	72,4	11,3	11,5	12,0	1,1	1,2	8,5	0,9	1,0		4,0	4,1			
Woensdag	18-5-2022	69450	1200	68	67	500	5,5	5,8	1586	101	100	84,4	7,2	7,3	84,4	15,6	15,7	15,0	2,1	1,8	9,1	1,9	1,6		6,4	6,9			
Vrijdag	20-5-2022	226019	1100	89	78	480	22,0	17,0	1453	176	168	77,3	19,1	19,6	77,3	20,8	20,8	12,0	2,9	3,0	5,8	2,1	2,5		23,0	12,0			
Maandag	23-5-2022	49530	39	35		5,0	2,6		50	44		2,4	2,0		5,6	4,6		0,5	0,6						5,5	4,9			
Woensdag	25-5-2022	70450	400	50	47	110	3,1	2,4	545	68	64	31,8	3,9	3,7	31,9	11,2	10,7	5,7	0,4	0,4	3,9	0,2	0,3		5,2	4,0			
Vrijdag	27-5-2022	56160	390	39	34	140	3,2	2,4	584	48	42	42,5	1,9	1,7	42,5	7,4	7,3	7,8	0,8	1,1	5,8	0,7	1,0		4,7	4,0			
Maandag	30-5-2022	90450	570	42	43	260	4,4	4,4	849	61	63	61,1	4,1	4,3	61,1	13,5	13,7	9,6	2,1	3,1	7,3	1,9	2,9		6,2	4,5			
Woensdag	1-6-2022	67880	480	53	52	220	2,7	1,9	707	63	62	49,6	2,2	2,1	49,6	9,3	9,6	8,4	1,7	2,3	6,2	1,5	2,1	170	4,0	4,0			
Vrijdag	3-6-2022	51460	620	50	52	270	3,5	3,6	873	63	66	55,4	2,9	3,0	55,4	9,3	15,5	9,6	2,1	2,3	6,6	1,9	2,2	230	5,3	5,8			
is lagere dosering geweest																													
gemiddeld			692,7	59,7	59,3	297,7	4,3	3,9	990,6	80,1	79,7	65,2	4,5	4,5	65,2	11,6	12,1	10,9	1,6	1,7	7,5	1,4	1,5	200,0	6,6	5,7			
stdev			231,4	13,77	14,37	104,4	4,86	3,65	288,0	29,65	29,26	14,5	4,10	4,26	14,5	3,43	3,74	2,3	0,67	0,76	1,6	0,61	0,72	30,0	5,12	3,22			
verwijdering (%)			91,4	91,4		98,6	98,7		91,9	92,0		93,2	93,2		82,2	81,5		85,7	84,4		81,2	79,4			96,7	97,1			
stdev (%)				2,0	2,1		1,6	1,2		3,0	3,0		6,3	6,5		5,3	5,7		6,2	7,0		8,2	9,5		2,8	1,6			