



KWR 2024.100 | Oktober 2025

## **WiCE Kansen voor Geconcentreerde Reststromen: gebruik je brijn als je circulair wilt zijn**

Hergebruik van brakwater concentraat;  
experimenteel vooronderzoek met  
ionenwisseling

# Colofon

## WiCE: Hergebruik van brakwater concentraat

Experimenteel vooronderzoek met ionenwisseling

**KWR 2024.100 | Oktober 2025**

### Opdrachtnummer

403997/001/011

### Projectmanager

Julian Muñoz Sierra

### Opdrachtgever(s)

BTO, Aquafin, Aquaminerals, Glastuinbouw Nederland / Stichting Kennis in je Kas, Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard, HVC, SCW Systems, Waterschap Rivierenland  
*Dit project is mede tot stand gekomen in het kader van het innovatieprogramma 'Glastuinbouw Waterproof' van Glastuinbouw Nederland en mede gefinancierd door de Stichting Kennis in je Kas.*

### Auteur(s)

Wolter Siegers, Tessa Vrijhoeven, Danny Harmsen, Luuk de Waal

### Kwaliteitsborger(s)

Emile Cornelissen

### Verzonden naar

Dit rapport is openbaar en verstrekt aan de opdrachtgevers van het adviesproject. Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectueel en industrieel eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Jaar van publicatie  
2025

Meer informatie  
Luuk de Waal  
T 06 53341973  
E [luuk.de.waal@kwrwater.nl](mailto:luuk.de.waal@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)

**KWR**

Oktober 2025 ©

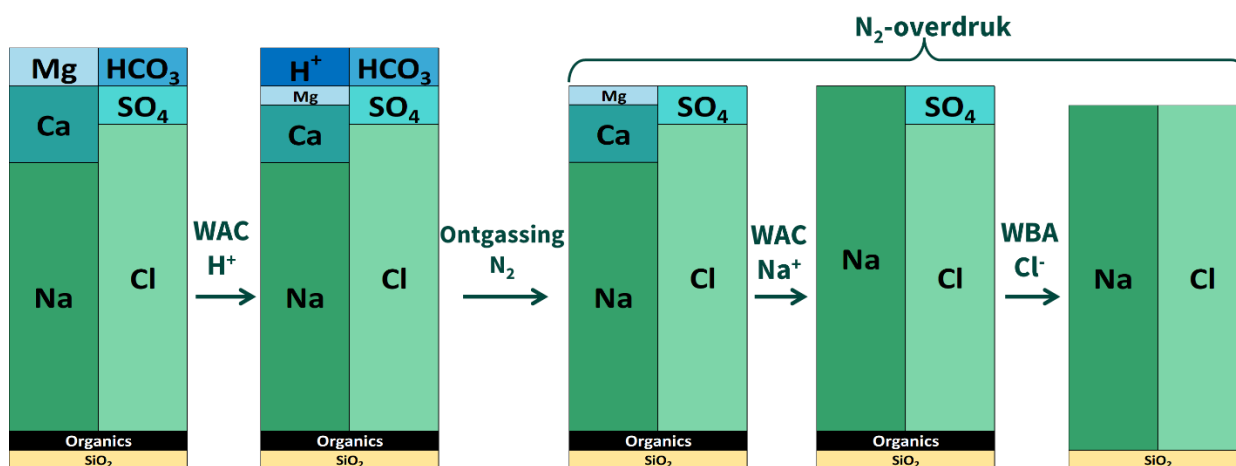
Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen,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

## Samenvatting

Op veel plaatsen is brak grondwater te zout om ongezuiverd te kunnen gebruiken als drinkwater.

Het overgrote deel van de ionen in brak grondwater – ongeveer 65-85 procent - bestaat ‘van nature’ uit natrium (Na) en chloride (Cl). Bij dit deelonderzoek werd bekeken of de overige componenten (calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfaat (SO<sub>4</sub>) en bicarbonaat (HCO<sub>3</sub>)) in brak grondwater matrix uit te wisselen zijn met Na en Cl door ionenwisseling (IEX). Hierdoor ontstaat een hoofdstroom met bijna uitsluitend opgelost ‘keukenzout’ wat met Reversed Osmosis (RO) een zuivere zoetwaterstroom oplevert en het zuivere zout uit het concentraat hergebruikt kan worden. Onderzoek naar de mogelijkheid om de overige componenten van elkaar te scheiden is tevens een doelstelling zodat deze componenten los van elkaar hergebruikt kunnen worden.

Het onderzoek is gestart met een vergelijking van geschikte ionenwisselaars (IEX) voor de verwijdering van Ca, Mg en SO<sub>4</sub> uit een (laag)brakke matrix (TDS 4 g/L). Dit werd gedaan door het maken van adsorptie- isothermen, waarbij is geselecteerd op de best presterende IEX-typen. Met twee geselecteerde IEX typen (Seplite MC290H (voor bicarbonaat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Ca en Mg) en de Seplite MA940 (voor SO<sub>4</sub>)) zijn kolomexperimenten uitgevoerd met brakke(re) matrix (6,8 en 9,6 g/L) én praktijk grondwater uit De Lier (Holstein Flowers, locatie Futura). De ionenwisselaars zijn voor gebruik voor een deel in de Na<sup>+</sup> en Cl<sup>-</sup> vorm gebracht door een regeneratie met NaOH of met HCl in combinatie met NaCl. Circa 200 l praktijkwater is achtereenvolgens behandeld met een zwakzure kationwisselaar (WAC H-vorm, verwijdering HCO<sub>3</sub>, deels Ca en Mg), een zwakzure kationwisselaar (WAC Na-vorm, restverwijdering van Ca en Mg) en een zwakbasische anionwisselaar (WBA Cl-vorm, verwijdering van SO<sub>4</sub>).



Uit het onderzoek bleek het mogelijk om – op basis van laag-brak praktijkwater uit de glastuinbouw en door gebruik van ionenwisseling - een zoutsamenstelling te verkrijgen met een hoge NaCl en Na(K)Cl zuiverheid; 98% en 98,9% respectievelijk. Hiermee is een proof of principle aangetoond dat ionenwisseling kan worden ingezet om brak grondwater uit de praktijk op te werken naar een stroom die geschikt is voor volledig zoetwater hergebruik onder vorming van een vast rest-zout met hoge zuiverheid. Merk op dat er in dit project slechts een zeer beperkte optimalisatie van procesomstandigheden (hars-selectie uit een drietal leveranciers) is uitgevoerd. Verdere optimalisatie biedt daarmee kansen voor nog hogere zuiverheden van het restzout. Hierbij wordt gedacht aan andere typen IEX of optimalisatie van het regeneratieproces door een gradiënt toe te passen van de zoutconcentratie en/of de pH. De adsorptie van Ca, Mg en SO<sub>4</sub> aan het IEX-hars werd succesvol gefit met het Langmuir model met redelijk tot goede R<sup>2</sup> waarden (> 0,98) voor Ca en Mg.

Door het toepassen van een “eigen” recept bij de regeneratie werd een poging gedaan ionen zoals Ca en Mg van elkaar te scheiden. Met de gekozen eigen regeneratiemethode bleek het helaas niet mogelijk om Ca en Mg volledig terug te winnen én van elkaar te scheiden. Het volledig gezamenlijk terugwinnen is echter wel mogelijk door het voorschrift van de fabrikant te volgen. Deze scheiding wordt gezien als een mogelijkheid voor het vergroten van de mogelijkheden van de afzet van het regeneraat voor hergebruik. Wel is aangetoond dat het mogelijk is om een Mg-verrijkte regeneraatstroom te produceren, wat mogelijk gebruikt kan worden om in zuiverder vorm deze zouten terug te gaan winnen. Aanbevolen wordt voor de regeneratie ook andere procedures te onderzoeken, zoals het toepassen van gradiënt regeneratie of het regenereren met andere chemicaliën. Tevens wordt aanbevolen de capaciteit van de verschillende IEX harsen te onderzoeken bij verschillende zoutmatrices.

# Inhoud

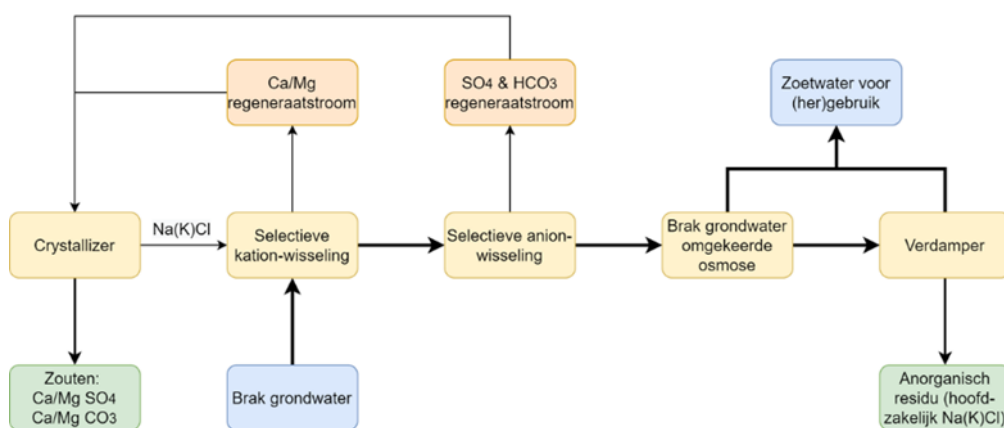
|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Colofon</b>                                                                  | <b>1</b>  |
| <b>Samenvatting</b>                                                             | <b>2</b>  |
| <b>Inhoud</b>                                                                   | <b>4</b>  |
| <b>1 Inleiding</b>                                                              | <b>5</b>  |
| 1.1 Aanleiding                                                                  | 5         |
| 1.2 Experimentele aanpak                                                        | 6         |
| 1.3 Doelstellingen                                                              | 6         |
| <b>2 Uitvoering</b>                                                             | <b>7</b>  |
| 2.1 Gebruikte watertypen                                                        | 7         |
| 2.1.1 Artificieel laag, midden en hoog brakwater voor het isothermonderzoek     | 7         |
| 2.1.2 Praktijk laag brakwater voor het kolomonderzoek                           | 8         |
| 2.2 Gebruikte ionenwisselaars                                                   | 8         |
| 2.3 Isothermen Ca, Mg en SO <sub>4</sub> met verschillende typen ionenwisselaar | 11        |
| 2.4 Doorbraakcurves praktijkwater met de 2 geselecteerde IEX typen              | 14        |
| 2.5 Regeneratie experimenten met de bioreactor                                  | 15        |
| 2.6 Gebruikte analysemethoden                                                   | 17        |
| <b>3 Resultaten</b>                                                             | <b>18</b> |
| 3.1 Meetgegevens en isothermen 1 <sup>e</sup> isothermtesten                    | 18        |
| 3.2 Meetgegevens en isothermen 2 <sup>e</sup> isothermtesten                    | 20        |
| 3.3 Doorbraakcurves en berekeningen van het praktijkwater                       | 21        |
| 3.4 Bepaling van de zuiverheid van het verkregen effluent                       | 23        |
| <b>4 Conclusies en aanbevelingen</b>                                            | <b>26</b> |
| <b>I Literatuur</b>                                                             | <b>27</b> |
| <b>II Meetgegevens isothermen run 1</b>                                         | <b>28</b> |
| <b>III Meetgegevens isothermen run 2</b>                                        | <b>30</b> |
| <b>IV Overige meetgegevens van de kolomexperimenten</b>                         | <b>32</b> |
| <b>V ICP-MS scan en overige analyseresultaten effluent WBA CI-vorm</b>          | <b>34</b> |

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Op veel plaatsen is brak grondwater te zout om ongezuiverd te kunnen gebruiken als bron voor drinkwater. Omgekeerde osmose is hiervoor een goede zuiveringstechniek, mits er onder andere een passende methode voor het verwerken van het concentraat wordt gevonden. Door de hoofdstroom te vereenvoudigen en de componenten ervan uit te wisselen tegen andere componenten en vervolgens het water terug te winnen, wordt het concentraat mogelijk herbruikbaar (zie ook Figuur 1) als grondstof voor andere processen of producten.

Uit analyse van bij KWR beschikbare waterkwaliteitsgegevens van brakgrondwater projecten uit het verleden blijkt dat het overgrote deel van de ionen in brak grondwater – ongeveer 65-85 procent – ‘van nature’ bestaat uit natrium (Na) en chloride (Cl). De overige belangrijkste componenten in het water zijn calcium (Ca), magnesium (Mg), bicarbonaat ( $\text{HCO}_3$ ), sulfaat ( $\text{SO}_4$ ). Bij dit deelonderzoek wordt bekeken of deze overige componenten in dit brakke grondwater uit te wisselen zijn met Na en Cl door ionenwisseling (IEX) zodat er een hoofdstroom ontstaat met, bij voorkeur, bijna uitsluitend (> 99%) deze twee ionen. Bij toepassing van volstroms RO ontstaat dan een hoogkwalitatief zoetwaterstroom en een reststroom met enkel keukenzout (in het concentraat), dat mogelijk bij andere (industriële) sectoren afgezet kan worden, als oplossing of droog na verdamping. Alhoewel deze stoffen in zuivere vorm gemakkelijk verkrijgbaar en goedkoop zijn, kunnen laagwaardige toepassingen zoals strooizout nog wel een optie zijn. De met IEX uitgewisselde zoutbestanddelen, zoals Ca, Mg,  $\text{SO}_4$  en  $\text{HCO}_3$ , zouden op tuinbouwbedrijven of elders een nuttige toepassing kunnen krijgen. Voor eventueel hergebruik is nog wel aanvullend onderzoek nodig en valt buiten de scope van dit onderzoek.



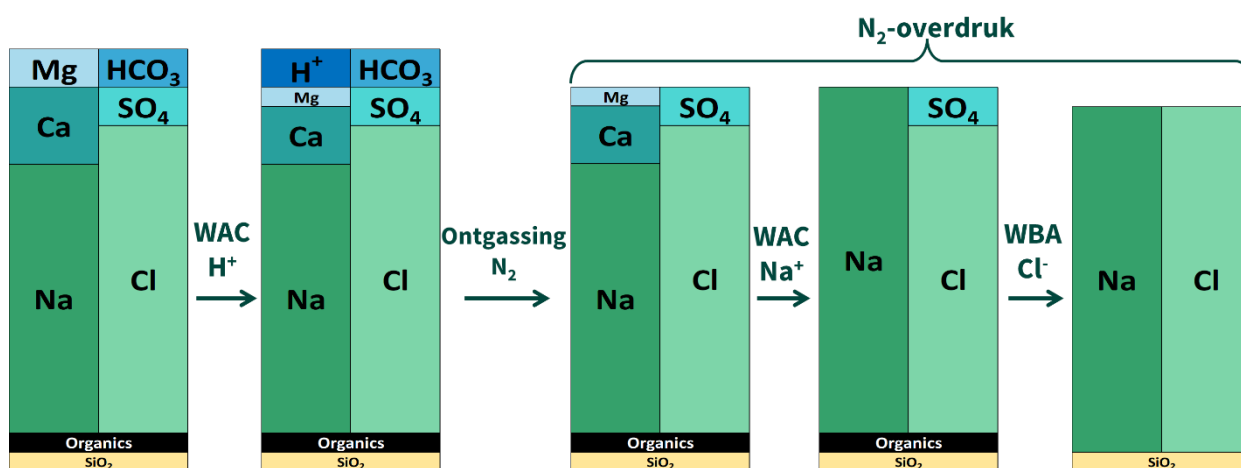
Figuur 1: Schema voor de beoogde behandeling van brak grondwater

Bij dit onderzoek worden deze 3 typen artificieel aangemaakt en met IEX onderzocht door middel van adsorptie-isothermen, waarna een selectie plaatsvindt van de best presterende IEX typen. Daarnaast wordt een praktijkwater met een laag brakwater samenstelling behandeld met de geselecteerde anion en kation IEX typen en wordt onderzocht of de geadsorbeerde Ca en Mg bij de regeneratie van de IEX van elkaar gescheiden kunnen worden.

## 1.2 Experimentele aanpak

Samengevat zag de beoogde aanpak er als volgt uit:

- 1) Conditionering van alle IEX harsen in Na<sup>+</sup> vorm (C-IEX) en Cl<sup>-</sup> vorm (A-IEX);
- 2) Bepaling adsorptie isothermen van vijf kation- en drie anion harsen in laag-brak synthetisch water met praktijk-relevante range van natriumchloride concentraties gericht op calcium-, magnesium- en sulfaat verwijdering;
- 3) Selectie van de best presterende kation- en anion hars onder laag-brak condities;
- 4) Bepaling adsorptie isothermen van de best presterende kation- en anion hars in laag-, middel en hoog-brak synthetisch water met praktijk-relevante range van natriumchloride concentraties gericht op calcium- en sulfaatverwijdering;
- 5) Maximale belading van de geselecteerde kation- en anion hars met praktijkwater met kolomproeven, met als doel het maken van water met vooral NaCl als opgelost zout (zie Figuur 2);
- 6) Uitvoeren van een specifieke regeneratiemethode met als doel Ca te scheiden van Mg uit de brijnstroom.



Figuur 2: Overzicht van (voor)behandelstappen brakwater middels ionenwisseling

Deze punten zijn in het hoofdstuk Uitvoering in detail beschreven. Bepaalde experimentele onderdelen zijn aangepast indien de omstandigheden hiertoe aanleiding gaven.

## 1.3 Doelstellingen

- Het belangrijkste doel van de experimenten beschreven in dit rapport is vast te stellen of en welke IEX harsen (zowel kation- als anionwisseling) geschikt kunnen zijn als voorbehandeling van brak grondwater om grondwater te verkrijgen met vooral Na en Cl als opgeloste zouten;
- Een tweede belangrijk doel is te onderzoeken of Ca en Mg tijdens de regeneratie van de IEX van elkaar gescheiden kunnen worden volgens een van te voren bedacht protocol;
- Een derde doel is het meten van het effect van het behandelen van laag, midden en hoog brakwater met IEX door middel van adsorptie-isothermen, om een beeld te krijgen van de (on)mogelijkheden van het toepassen van IEX.

## 2 Uitvoering

### 2.1 Gebruikte watertypen

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van artificieel aangemaakt brakwater (isotherm onderzoek) en praktijk laag brakwater (kolomonderzoek). Op basis van een inventarisatie onder de projectpartners (m.n. Glastuinbouw Nederland, Dunea en Waternet) zijn de samenstelling van praktijk-beschikbare brak grondwatertypen als basis gebruikt voor de synthetische watersamenstelling van het isotherm onderzoek (zie Tabel 1). Op hoofdlijnen geeft het gehalte totaal opgeloste stof de meeste praktische handvatten om het zoutgehalte in te schatten voor laag, midden en hoog brakwater (TDS respectievelijk 4,0, 6,8 en 9,6 g/L).

*Tabel 1: Overzicht van brakwatertyperingen die gebruikt worden in dit project. De gehalten van de ionen met hoge relevantie tot de onderzoeksvraag zijn gegeven. Het totale zoutgehalte en de ion-sterkte zijn berekend op basis van de volledige set waterkwaliteitsgegevens van "laag" en "hoog" brakwater. De samenstelling van het "medium" scenario betreft een gemiddelde van "laag" en "hoog" en is daarmee niet gebaseerd op een bestaande brakwaterkwaliteit die geïnventariseerd is in deze studie.*

| Brakwater typering         |         | "laag"                       | "medium"                       | "hoog"                       |
|----------------------------|---------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Waterkwaliteits parameters | eenheid | Glastuinbouw locatie De Lier | Gemiddelde De Lier - Meijendel | Drinkwater locatie Meijendel |
| Ca                         | mg/L    | 252                          | 242                            | 231                          |
| Mg                         | mg/L    | 129                          | 222                            | 316                          |
| Cl                         | mg/L    | 2014                         | 3528                           | 5043                         |
| Na                         | mg/L    | 970                          | 1983                           | 2995                         |
| HCO <sub>3</sub>           | mg/L    | 543                          | 399                            | 255                          |
| SO <sub>4</sub>            | mg/L    | 5                            | 357                            | 710                          |
| Ion-sterkte                | mmol/L  | 79,1                         | 150,4                          | 221,6                        |
| Totaal opgeloste stoffen   | g/L     | 4,0                          | 6,8                            | 9,6                          |

#### 2.1.1 Artificieel laag, midden en hoog brakwater voor het isothermonderzoek

Het water is gemaakt van chemisch zuivere zouten (zie Tabel 2) en ultrapuurwater (Milli-Q water) en gesteld op pH 6,2 met HCl en/of NaOH. Volgens berekeningen met het KWR computer programma AquaCalc was de saturatie index van zouten voor alle matrices kleiner dan 0 bij pH 6.2, waardoor er geen neerslagvorming verwacht werd. De typische pH van brak grondwater varieert tussen de 7.0 en 7.5. In Tabel 2 zijn de gegevens van en de hoeveelheden chemicaliën vermeld gebruikt voor de 1<sup>e</sup> isothermreeks.

*Tabel 2: Hoeveelheden benodigde chemicaliën voor de laag brakwater isotherm testen, opgelost in 10 l Milli-Q water*

| Calcium-adsorptie isothermen         | Eenheid | Massa  | Leverancier     | CAS nr     |
|--------------------------------------|---------|--------|-----------------|------------|
| NaHCO <sub>3</sub>                   | mg      | 5.494  | J.T. Baker      | 144-55-8   |
| CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O | mg      | 8.867  | EMSure ACS reag | 10035-04-8 |
| NaCl                                 | mg      | 31.820 | J.T. Baker      | 7647-14-5  |
| Magnesium-adsorptie isothermen       | Eenheid | Massa  |                 |            |

|                                      |                |              |            |           |
|--------------------------------------|----------------|--------------|------------|-----------|
| NaHCO <sub>3</sub>                   | mg             | 5.494        | J.T. Baker | 144-55-8  |
| MgCl <sub>2</sub> ·7H <sub>2</sub> O | mg             | 18.603       | Supelco    | 7791-18-6 |
| NaCl                                 | mg             | 26.354       | J.T. Baker | 7647-14-5 |
| <b>Sulfaat-adsorptie isothermen</b>  | <b>Eenheid</b> | <b>Massa</b> |            |           |
| NaHCO <sub>3</sub>                   | mg             | 5.494        | J.T. Baker | 144-55-8  |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>      | mg             | 15.830       | J.T. Baker | 7757-82-6 |
| NaCl                                 | mg             | 22.857       | J.T. Baker | 7647-14-5 |

In Tabel 3 zijn de inweeggegevens van de chemicaliën vermeld voor het water dat is gebruikt voor de 2<sup>e</sup> isothermreeks met artificieel laag, midden en hoog brakwater.

Tabel 3: Inweeggegevens van de chemicaliën voor laag, midden en hoog brakwater in 10 l Milli-Q water

| <b>Calcium-adsorptie isothermen</b>  | <b>Eenheid</b> | <b>Laag brak</b> | <b>Midden brak</b> | <b>Hoog brak</b> |
|--------------------------------------|----------------|------------------|--------------------|------------------|
| NaHCO <sub>3</sub>                   | mg             | 5.494            | 5.494              | 5.494            |
| CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O | mg             | 8.867            | 8.867              | 8.867            |
| NaCl                                 | mg             | 31.820           | 73.468             | 115.117          |
| <b>Sulfaat-adsorptie isothermen</b>  | <b>Eenheid</b> | <b>Laag brak</b> | <b>Midden brak</b> | <b>Hoog brak</b> |
| NaHCO <sub>3</sub>                   | mg             | 5.494            | 5.494              | 5.494            |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>      | mg             | 5.285            | 5.285              | 5.285            |
| NaCl                                 | mg             | 35.872           | 77.520             | 119.169          |

### 2.1.2 Praktijk laag brakwater voor het kolomonderzoek

Als praktijkwater werd laagbrak water van De Lier (Holstein Flowers, locatie Futura) gebruikt. Dit van oorsprong anaerobe brak grondwater is met 10 stuks 20 l jerrycans naar KWR getransporteerd en bewaard bij 4 °C in een koelcel tot de start van het onderzoek.

## 2.2 Gebruikte ionenwisselaars

In Tabel 4 zijn de gegevens vermeld van de onderzochte ionenwisselaars. Deze harsen zijn geselecteerd op basis van gegevens van verschillende fabrikanten. Er zijn vijf kationwisselaars geselecteerd, waarvan vier zwakzuur (WAC) en één sterkzuur (SAC). Alle kationwisselaars zijn macroporous met een Ion Exchange Capacity (IEC) tussen 2,2 en >4,3 eq/L en hebben een grootte van 0,315-1,60 mm afhankelijk van het type. Een 3-tal typen is geleverd in de H<sup>+</sup> vorm, de overige 2 in de Na<sup>+</sup> vorm. Er zijn drie anionwisselaars geselecteerd, waarvan één zwakbasisch (WBA) en twee sterkbasisch (SBA). De anionwisselaars zijn macroporous met een Ion Exchange Capacity (IEC) tussen 1,3 en >1,5 eq/L en hebben een grootte van 0,3-1,25 mm afhankelijk van het type. Een 2-tal typen is geleverd in de Cl<sup>-</sup> vorm, de andere in de OH<sup>-</sup> vorm.

Tabel 4: Gegevens van de onderzochte ionenwisselaars

| Parameter                | Eenheid           | Resinex-Jacobi                           | Resinex-Jacobi                           | Sunresin                                             | Sunresin                                             | Sunresin                                  | Thermax                     | Resinex-Jacobi                         | Sunresin                                         | Sunresin                                         | Thermax                        |
|--------------------------|-------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|
| Fysieke eigenschappen    | -                 | Resinex KW-H                             | Resinex CH-23                            | Seplite MC290                                        | Seplite MC290                                        | Seplite SC 130 NS H                       | Tulsion CXO-12 MP           | Resinex A-4                            | Seplite MA940                                    | Seplite MA940                                    | Tulsion A-23                   |
| Type                     | -                 | WAC                                      | WAC                                      | WAC H-vorm                                           | WAC Na-vorm                                          | SAC                                       | WAC                         | SBA                                    | WBA OH-vorm                                      | WBA Cl-vorm                                      | SBA                            |
| Fysieke vorm             | -                 | macroporeuze melkwitte bolvormige bollen | macroporeuze melkwitte bolvormige bollen | macroporeuze, lichtgelte tot witte bolvormige bollen | macroporeuze, lichtgelte tot witte bolvormige bollen | donkerbruine tot zwarte bolvormige bollen | macroporous spherical beads | gel-type, witte, bolvormige bollen     | ivoren bollen                                    | ivoren bollen                                    | bolvormig                      |
| Uniformiteitscoëfficiënt | -                 | <1.6                                     | <1.6                                     | <1.6                                                 | <1.6                                                 | <1.6                                      | n.b.                        | <1.6                                   | <1.6                                             | <1.6                                             | n.b.                           |
| Deeltjesgrootte          | mm                | 0,42 - 1,25                              | 0,42 - 1,25                              | 0,315-1,60 mm (98%)                                  | 0,315-1,60 mm (98%)                                  | 0,315-1,25                                | 0,3-1,2 (>90%)              | 0,42 - 1,25 (>90%)                     | 0,315-1,25                                       | 0,315-1,25                                       | 0,3-1,2                        |
| Schijnbare dichtheid     | kg/m <sup>3</sup> | 770                                      | 750                                      | 720-800                                              | 720-800                                              | 780-870                                   | 750-790                     | 670                                    | 650-720                                          | 650-720                                          | 640-680                        |
| Echte dichtheid          | g/cm <sup>3</sup> | 1,17                                     | 1,20                                     | 1,14-1,2                                             | 1,14-1,2                                             | 1,24-1,28                                 |                             | 1,06                                   | 1,0-1,1                                          | 1,0-1,1                                          | n.b.                           |
| Watergehalte             | %                 | 45 - 50                                  | 50-60                                    | 44-58                                                | 44-58                                                |                                           | 47                          | 45-55                                  | 48-58 (Cl-form)                                  | 48-58 (Cl-form)                                  | 53                             |
| Stabiel bij temperatuur  | °C                | <100                                     | <90                                      | <75                                                  | <75                                                  | <140                                      | <100                        | <60                                    | <70                                              | <70                                              | <80                            |
| Stabiel bij pH           | -                 | 0-14                                     | 0-14                                     | 5-14                                                 | 5-14                                                 | 0-14                                      | 5-14                        | 0-14                                   | 0-8                                              | 0-8                                              | 0-9                            |
| Matrix / type            | -                 | crosslinked polyacrylic divinylbenzene   | crosslinked polystyrene divinylbenzene   | crosslinked polyacrylate                             | crosslinked polyacrylate                             | polystyrene crosslinked with DVB          | Polystyrene copolymer       | crosslinked polystyrene divinylbenzene | styrene divinylbenzene copolymer, tertiary amine | styrene divinylbenzene copolymer, tertiary amine | polystyrene copolymer gel-type |
| Functionele groep        | -                 | Carboxylic acid                          | Iminodiacidic                            | Carboxylic acid                                      | Carboxylic acid                                      | Sulfonic acid                             | Carboxylic acid             | Quaternary Ammonium                    | Tertiary amine                                   | Tertiary amine                                   | Quaternary                     |

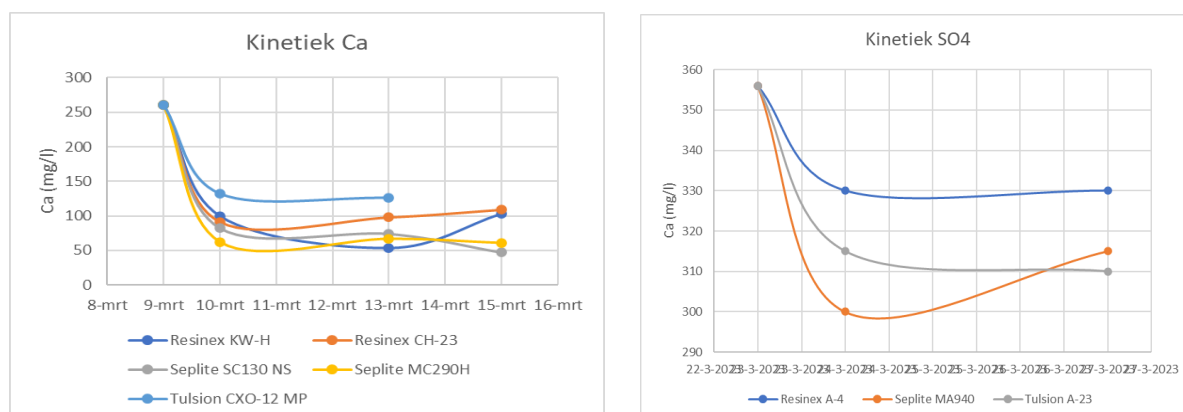
| Parameter                      | Eenheid   | Resinex-Jacobi | Resinex-Jacobi | Sunresin      | Sunresin                       | Sunresin                  | Thermax           | Resinex-Jacobi | Sunresin              | Sunresin                       | Thermax        |
|--------------------------------|-----------|----------------|----------------|---------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------|----------------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| Fysieke eigenschappen          | -         | Resinex KW-H   | Resinex CH-23  | Seplite MC290 | Seplite MC290                  | Seplite SC 130 NS H       | Tulsion CXO-12 MP | Resinex A-4    | Seplite MA940         | Seplite MA940                  | Tulsion A-23   |
|                                |           |                |                |               |                                |                           |                   | um Type 1      |                       |                                | Ammonium group |
| Aangeleverde ion vorm          | -         | H+             | Na+            | H+            | H+                             | Na+                       | H+                | Cl-            | Free Base of Cl-      | Free Base of Cl-               | Cl-            |
| Totale uitwisselingscapaciteit | eq/L      | 4,2 (H+ vorm)  | 2,2 (H+ vorm)  | >4,3          | >4,3                           | >2,0                      | >4,1              | 1.30           | >1,5                  | >1,5                           | >1,3           |
| Bed diepte                     | mm        | >700           | >1000          | >800          | >800                           | >800                      | >600              | >700           | >800                  | >800                           | 600            |
| Service flow snelheid          | BV/h      | 8-40           | 15-45          | 40 m/h        | 40 m/h                         | 10-50 m/h                 |                   | 8-40           | 2-4 BV/h              | 2-4 BV/h                       | 40             |
| Backwash expansie              | %         | 50 - 75        | 50 - 75        | 4 per m/h     | 4 per m/h                      | 4 per m/h                 |                   | 50 - 75        | 20 (at 20°C, per m/h) | 20 (at 20°C, per m/h)          | 50-70          |
| Flow richting                  | -         | Co-flow        | Co-flow        | Counter-flow  | Counter-flow                   |                           |                   | Counter-flow   | Counter-flow          | Counter-flow                   | n.b.           |
| Regeneratie medium             | -         | HCl            | HCl            | HCl           | HCl & NaOH / NaCl              | NaCl / HCl                | HCl               | NaOH           | NaOH                  | NaOH & HCl / NaCl              | NaOH           |
| Concentratie                   | %         | 2- 4           | 7.5            | 3-6           | 3-6 HCl & 2-5 NaOH / 6-13 NaCl | 6-13 NaCl / 1-6 HCl       | 4                 | 2,0            | 2-4                   | 2-4 NaOH & 3-6 HCl / 6-13 NaCl | 4-5            |
| Niveau                         | g/L       | 60-80          | 145            | 70            | 70                             | 60-300 NaCl of 40-300 HCl |                   | 50-80          | 40-80                 | 40-80                          | n.b.           |
| Flow snelheid regeneratie      | BV of m/h | 2-6            | 5 m/h          | 12-14 m/h     | 12-14 m/h                      | 1-10 m/h                  |                   | 6-8            | 5m/h                  | 5m/h                           | n.b.           |
| Flow snelheid spoeling         | BV/h      | 5-30           | 5 m/h          | 5-20 m/h      | 5-20 m/h                       | 1-10 m/h                  |                   | 6-8            | 5-10m/h               | 5-10m/h                        | n.b.           |
| Spoelwater hoeveelheid         | BV        | 4-10           | n.b.           | 3-4           | 3-4                            | 1-2 NaCl of 2-5 HCl       | 3-10              | 2,0            | 5-6                   | 5-6                            | 2-7            |

| Parameter               | Eenheid   | Resinex-Jacobi | Resinex-Jacobi | Sunresin      | Sunresin      | Sunresin            | Therma-x          | Resinex-Jacobi | Sunresin      | Sunresin      | Thermax      |
|-------------------------|-----------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------------|-------------------|----------------|---------------|---------------|--------------|
| Fysieke eigenschappen   | -         | Resinex KW-H   | Resinex CH-23  | Seplite MC290 | Seplite MC290 | Seplite SC 130 NS H | Tulsion CXO-12 MP | Resinex A-4    | Seplite MA940 | Seplite MA940 | Tulsion A-23 |
| Backwash expansie       | %         | <60            | >60            | n.b.          | n.b.          | 4 per m/h           | 75-100            | 0,50           | n.b.          | n.b.          | n.b.         |
| Backwash flow snelheid  | BV of m/h | 10             | 10             | 12-14 m/h     | 12-14 m/h     | 4-12 BV/h           | 8-15 m/h          | 10             | 3-5 m/h       | 3-5 m/h       | 4-6 m/h      |
| Contact time regenerant | min       | n.b.           | n.b.           | 90            | 90            | n.b.                | 20-60             | 20-40          | 120           | 120           | 20-60        |

n.b. = niet bekend

### 2.3 Isothermen Ca, Mg en SO<sub>4</sub> met verschillende typen ionenwisselaar

Voor het bepalen van de isothermen is voor elk type IEX (5 maal kation hars, 3 maal anion hars) een vaste belading gehanteerd, behalve voor het chelerende hars (Resinex CH-23) en een anion hars (Seplite MA940). De harsen zijn gedurende een week blootgesteld aan artificieel brak grondwater (Milli-Q water met opgeloste zouten, zie Tabel 2) in een schudapparaat bij 25 °C. Deze standtijd bleek uit metingen voldoende om een evenwicht te krijgen tussen adsorptie en desorptie van ionen (zie Figuur 3).



Figuur 3: Kinetiek meting van de adsorptie van Ca en SO<sub>4</sub> met de geselecteerde kationwisselaars

Eerst zijn testen met Milli-Q water met een laag brak zoutgehalte (zie Tabel 2) voor calcium (CIEX harsen), magnesium (CIEX harsen) en sulfaat (AIEX harsen) uitgevoerd waarna Langmuir of Freundlich isothermen zijn uitgewerkt voor Mg, Ca en SO<sub>4</sub> (zie paragraaf 3.1).

Op basis van de 1<sup>e</sup> isothermentesten is één CIEX en één AIEX geselecteerd waarmee vervolgens testen met midden- en hoog brakwater voor Ca (CIEX hars), midden- en hoog brakwater voor Mg (CIEX hars) en middel- en hoog brakwater voor SO<sub>4</sub> (AIEX hars) zijn uitgevoerd (2<sup>e</sup> isothermentesten). Hierna is het water geanalyseerd op verschillende ionen (Na, Mg, Ca, SO<sub>4</sub>, Cl) en zijn de resultaten ook verwerkt in Langmuir of Freundlich isothermen (zie paragraaf 3.2).

Op basis van de resultaten van paragraaf 3.2 is de benodigde hoeveelheid van de IEX typen met een factor 3 overmaat berekend op basis van de belading voor vervolg kolomexperimenten, waarbij doorbraakcurves zijn gemaakt met praktijk laag brakwater van De Lier.

### **1<sup>e</sup> isothermtesten: Bepaling isothermen voor Ca, Mg en SO<sub>4</sub> met 8 verschillende IEX typen met artificieel laag brakwater**

Vooraf werden de chemicaliën voor de Ca, Mg en SO<sub>4</sub> matrices afgewogen en werden de laag-brakconcentraat-matrices aangemaakt (zie paragraaf 2.1.1). Alle IEX harsen die reeds in de Na<sup>+</sup> vorm (Resinex CH-23, Seplite SC130 NS H) (CIEX) of Cl<sup>-</sup> vorm (Resinex A-4, Tulsion CXO-12 MP) (AIEX) werden gespoeld met 20 BV ultrapuur water om eventuele conserveringsmiddelen of zouten te verwijderen in een glazen laboratorium kolom met een interne diameter van 3,5 cm en een maximale hoogte van 80 cm.

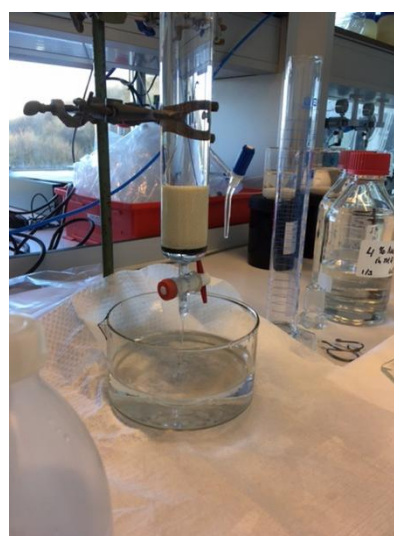
Alle IEX harsen die niet in de gewenste vorm zaten (Resinex KW-H, Seplite MC290, Tulsion CXO-12 MP (CIEX) en Seplite MA940 (AIEX)) werden geconditioneerd naar de Na<sup>+</sup> (CIEX) of Cl<sup>-</sup> (AIEX) vorm door te spoelen met 5 BV 4% NaOH oplossing voor de CIEX harsen en 5 BV 5% HCl oplossing voor de AIEX harsen. Daarna werd gespoeld met 20 BV ultrapuur water en voor dosering aan de flesjes met nogmaals enkele BV Milli-Q met 400 mg/L NaHCO<sub>3</sub> om zoveel mogelijk zuur/loog uit te spoelen met als doel de pH zo constant mogelijk te houden gedurende de isothermen. Hierna werden de IEX harsen aan de lucht gedroogd door ze uit te laten lekken op filtreerpapier gedurende circa 5 min. Met de uitgelekte hoeveelheid en het berekende volume uit de kolom werd een dichtheidsbepaling uitgevoerd.

Vervolgens zijn de gedroogde IEX harsen afgewogen in 250 ml PE-flesjes en werd het met het aangemaakte laag brakwater (200 ml, zie paragraaf 2.1.1) kwantitatief overgebracht in de flesjes, deze werden zo snel mogelijk gesloten en werd turbulentie beperkt vanwege mogelijke CO<sub>2</sub> uitwisseling en hiermee een effect op de pH. Hierna werden de flesjes op een schudder geplaatst en gedurende 1 week geschud bij 25 °C in een incubator. Na 24h en na 96h werd uit de flesjes met één van de lager beladen IEX harsen een monster genomen voor een snelle Ca, Mg en/of SO<sub>4</sub> Hanna testkit meting.

Na een standtijd van 1 week werden de watermonsters gefiltreerd met een 0,45 µm nitrocellulosefilter (Whatman NC 45) onder licht vacuüm en werd de pH gemeten van de monsters met de hoogste IEX dosering. De monsters zijn hierna aangeboden aan het laboratorium voor de analyses. De analyseresultaten zijn uitgewerkt in adsorptie-isothermen en beschreven met een Langmuir en/of Freundlich model (zie paragraaf 3.1). In Tabel 5 zijn de gegevens vermeld van de gebruikte IEX typen en hoeveelheden voor de isothermen. In Figuur 4 is een foto weergegeven van de gebruikte IEX typen.

Tabel 5: Gebruikte IEX typen met concentraties voor de isothermen met laag brakwater

| Calcium-adsorptie   | Adsorptie isotherm reeks (g/l) kation-hars voor de laagbrak matrix |      |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Resinex KW-H        | 0,3                                                                | 0,6  | 0,9 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,6 | 4,8 |
| Resinex CH-23       | 0,75                                                               | 1    | 1,5 | 2   | 3   | 4   | 6   | 8   |
| Seplite MC290       | 0,3                                                                | 0,6  | 0,9 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,6 | 4,8 |
| Seplite SC 130 NS H | 0,3                                                                | 0,6  | 0,9 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,6 | 4,8 |
| Tulsion CXO-12 MP   | 0,3                                                                | 0,6  | 0,9 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3,6 | 4,8 |
| Magnesium-adsorptie | Adsorptie isotherm reeks (g/l) kation-hars voor de laagbrak matrix |      |     |     |     |     |     |     |
| Resinex KW-H        | 0,5                                                                | 0,75 | 1   | 1,5 | 2   | 3   | 4   | 6   |
| Resinex CH-23       | 1                                                                  | 1,5  | 2   | 3   | 4   | 6   | 8   | 12  |
| Seplite MC290       | 0,5                                                                | 0,75 | 1   | 1,5 | 2   | 3   | 4   | 6   |
| Seplite SC 130 NS H | 0,5                                                                | 0,75 | 1   | 1,5 | 2   | 3   | 4   | 6   |
| Tulsion CXO-12 MP   | 0,5                                                                | 0,75 | 1   | 1,5 | 2   | 3   | 4   | 6   |
| Sulfaat-adsorptie   | Adsorptie isotherm reeks (g/l) anion-hars voor de laagbrak matrix  |      |     |     |     |     |     |     |
| Resinex A-4         | 2                                                                  | 3    | 4   | 6   | 8   | 12  | 16  | 24  |
| Seplite MA940       | 1,5                                                                | 2,25 | 3   | 4,5 | 6   | 9   | 12  | 18  |
| Tulsion A-23        | 2                                                                  | 3    | 4   | 6   | 8   | 12  | 16  | 24  |

Figuur 4: Foto van de gebruikte en gespoelde IEX typen; voorbehandeling van de IEX voor omzetting naar de Na<sup>+</sup> vorm

## 2<sup>e</sup> isotherm testen: Bepaling isothermen voor Ca en SO<sub>4</sub> met 2 verschillende IEX typen en artificieel laag, midden en hoog brakwater

Twee geselecteerde van de in totaal 8 geteste ionenwisselaars (voor de resultaten zie paragraaf 3.1), de Seplite MC290H (voor Ca) en de Seplite MA940 (voor SO<sub>4</sub>), werden gebruikt voor het vervolg van isothermonderzoek met artificieel laag, medium en hoog brakwater. Beiden werden volgens de eerder beschreven procedure vooraf overgebracht in respectievelijk de Na- en Cl-vorm. In Tabel 6 zijn de inweeggegevens van de IEX-typen vermeld voor de isothermen van het 2<sup>e</sup> isothermonderzoek. In paragraaf 3.2 zijn de resultaten uitgewerkt.

Tabel 6: Concentraties van de IEX typen voor de isothermen

| Calcium-adsorptie  | Adsorptie isotherm reeks (g/l) kation-hars Seplite MC290 in Na <sup>+</sup> vorm |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| laag brak matrix   | 0,6                                                                              | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 2,7 | 3   | 3,3 | 3,6 | 4,2 | 4,8 |
| medium brak matrix | 1,2                                                                              | 1,8 | 2,4 | 2,7 | 3   | 3,3 | 3,6 | 4,2 | 4,8 | 6,4 |
| hoog brak matrix   | 1,2                                                                              | 1,8 | 2,4 | 3   | 3,3 | 3,6 | 4,2 | 4,8 | 6,4 | 7,2 |
| Sulfaat-adsorptie  | Adsorptie isotherm reeks (g/l) anion-hars Seplite MA940 in Cl <sup>-</sup> vorm  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| laag brak matrix   | 4                                                                                | 6   | 8   | 12  | 18  | 24  | 36  | 48  | 60  | 72  |
| medium brak matrix | 6                                                                                | 9   | 12  | 18  | 24  | 30  | 36  | 48  | 60  | 72  |
| hoog brak matrix   | 6                                                                                | 9   | 12  | 18  | 24  | 30  | 36  | 48  | 60  | 72  |

## 2.4 Doorbraakcurves praktijkwater met de 2 geselecteerde IEX typen

Voor de verwijdering van Ca en Mg werd de Seplite MC290 hars gebruikt, deze werd geleverd in de H<sup>+</sup>-vorm en werd voor een deel vooraf geconditioneerd volgens de in paragraaf 2.1 beschreven procedure gebruikt bij de isotherm bepaling naar de Na<sup>+</sup>-vorm. Voor de verwijdering van SO<sub>4</sub> werd de Seplite MA940 hars gebruikt, deze werd geleverd in de OH<sup>-</sup>-vorm en werd vooraf geconditioneerd volgens de in paragraaf 2.1 beschreven procedure gebruikt bij de isotherm bepaling naar de Cl<sup>-</sup>-vorm.

Voor de kolomexperimenten werd het anaerobe water overgebracht in een 200 l RVS tank, om het opgeloste ijzer te verwijderen werd dit water belucht en gerecirculeerd over een 1 µm kaarsenfilter gedurende 24 h waarbij het water terug in de tank “plonsde” om het te beluchten. Het verwijderde ijzer was duidelijk waarneembaar op het filter.

Het behandelde brakwater is behandeld door het over een glazen midikolom (interne diameter 3,5 cm, hoogte 85 cm) te leiden met 0,82 l Seplite MC290 WAC hars (in de H<sup>+</sup> vorm) en met een maximaal debiet van 21 l/h gericht op Ca/Mg verwijdering. Deze hoeveelheid hars en debiet was gedimensioneerd op basis van de hoeveelheid en concentratie ionen in de voeding. Het gezamenlijk effluent van de kolommen werd opgevangen in genummerde batches van 20 l in plastic jerrycans. De EGV en pH van elke batch werd direct na monsternamen driemaal gemeten. Wanneer de pH en/of de EGV sterk afwijkingen vertoonden in 1 batch ten opzichte van de voorgaande batches, werd de dan nog lopende batch van 20 l afgesloten werd het experiment gestopt. Sterke wijzigingen in pH en/of EGV gemeten in het effluent werden als indicator gebruikt voor doorbraak van het hars, alhoewel doorslagcurves niet specifiek werden gemeten. Hierna werd het totale volume wat de kolom was gepasseerd genoteerd en werd de beladen Seplite MC290 WAC hars (H<sup>+</sup> vorm) bij 4 °C bewaard. In totaal is 160 l brak grondwater behandeld met het MC290 hars in H<sup>+</sup> vorm en werden de 1<sup>e</sup> 120 l gebruikt voor het vervolg.

De 120 l werd overgebracht in het 200 l RVS vat en werd gedurende een nacht doorgeblazen met stikstofgas. Hierna werd een monster genomen voor HCO<sub>3</sub>, TOC, ICPMS Ca Mg Na en Cl, SO<sub>4</sub> na 0,45 µm filtratie. Ook werd de afname van de alkaliniteit gecontroleerd met een Hanna Instruments testkit. Circa 1,2 l vers Seplite MC290 WAC hars werd omgezet in de Na<sup>+</sup> vorm voor het volgende kolomexperiment.

Het brakwater na WAC en beluchting werd behandeld door middel van twee midikolommen (interne diameter 3,5 cm, hoogte 62 cm) met ieder 0,58 l Seplite MC290 WAC hars in de Na<sup>+</sup> vorm met een gemiddeld debiet van 21 l/h per kolom gericht op Ca/Mg verwijdering.

Het gezamenlijk effluent van de kolommen werd opgevangen in genummerde batches van 20 l in jerrycans. De EGV en pH van elk van die batches werd direct na monsternamen twee- of driemaal gemeten. Wanneer de pH en/of de EGV sterk afwijkingen vertoonden in 1 batch ten opzichte van de voorgaande batches, werd de dan nog lopende

batch van 20 l afgemaakt en werd daarna de toevoer naar de IEX-kolom gestopt. Sterke wijzigingen in pH en/of EGV werden als indicator gebruikt voor doorbraak van het hars, alhoewel doorslagcurves niet specifiek werden gemeten. Hierna werd een monster genomen voor  $\text{HCO}_3^-$ , TOC, ICPMS Ca Mg Na en Cl,  $\text{SO}_4$  na 0,45  $\mu\text{m}$  filtratie. Ook werd de afname van de alkaliniteit gecontroleerd met een Hanna Instruments testkit. De afname van de calciumconcentratie werd gecontroleerd door middel van een snelle ICP-MS analyse omdat de Hach testkit geen goede waarden gaf voor Ca. Het Ca bleek volledig afwezig te zijn in alle 6 batches effluentwater. De voorbeladen Seplite MC290 WAC hars in de  $\text{Na}^+$  vorm werd bewaard bij 4 °C.

Voor het laatste kolomexperiment voor de verwijdering van sulfaat werd circa 0,8 l Seplite MA940 hars WBA omgezet in de  $\text{Cl}^-$  vorm volgens de eerder beschreven procedure. Het brakwater na KEX werd behandeld door middel van een midikolom met 0,8 l Seplite MA940 hars (in de  $\text{Cl}^-$  vorm) en met een gemiddeld debiet van 2 l/h. Een automatische monsternemer werd gebruikt om 1 l monsters te nemen na 2 h, en daarna na elke 10 h. Het gezamenlijk effluent van de kolom werd opgevangen in een PE-tank van 200 l. De EGV en pH van elk genomen monster werden in triplo gemeten na afloop van het experiment. Van het totale effluent werd een monster genomen voor  $\text{HCO}_3^-$ , Ca, Mg, Na, K, Si en Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , TOC en ICPMS-Scan na 0,45  $\mu\text{m}$  filtratie. Het water bleek overigens nauwelijks sulfaat te bevatten, ook niet in het ruwe laagbrak water. De voorbeladen Seplite MA940 hars in de  $\text{Cl}^-$  vorm is bewaard bij 4 °C.



Figuur 5: Kolomexperimenten met de Seplite MA940, bij de 2<sup>e</sup> foto het monsternamer apparaat en opslagvat

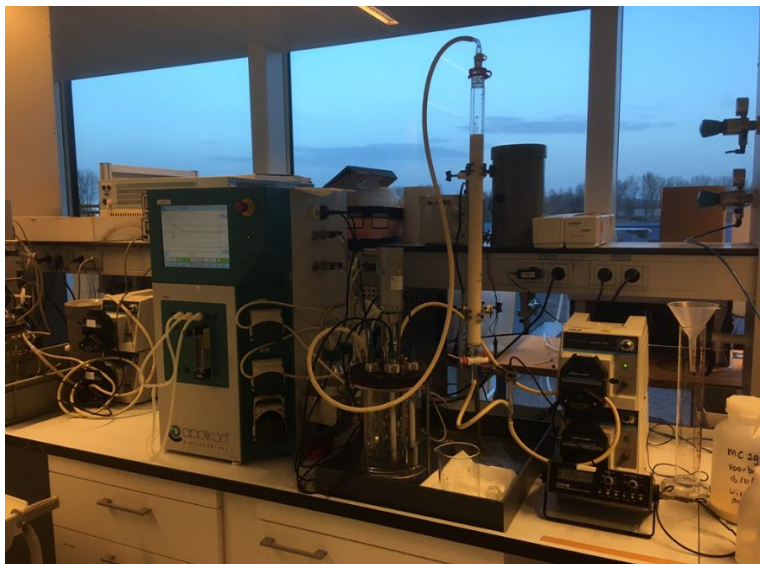
## 2.5 Regeneratie experimenten met de bioreactor

De regeneratie experimenten zijn met behulp van een Applikon bioreactor (zie Figuur 6) uitgevoerd bij een pH van respectievelijk 6,5, 5,5, 4,5 en 3,5 voor elke bewaarde IEX van de kolomexperimenten. Vooraf zijn de pH- en T-sensor van de bioreactor gekalibreerd en werd een doorstroomcel met EGV-meter geplaatst in de recirculatieleiding. Een glazen kolom (inwendige diameter 3,5 cm) was aangesloten in recirculatiemode over het glazen 2,5 l vat, het recirculatiedebiet bedroeg circa 4,1 l/h.

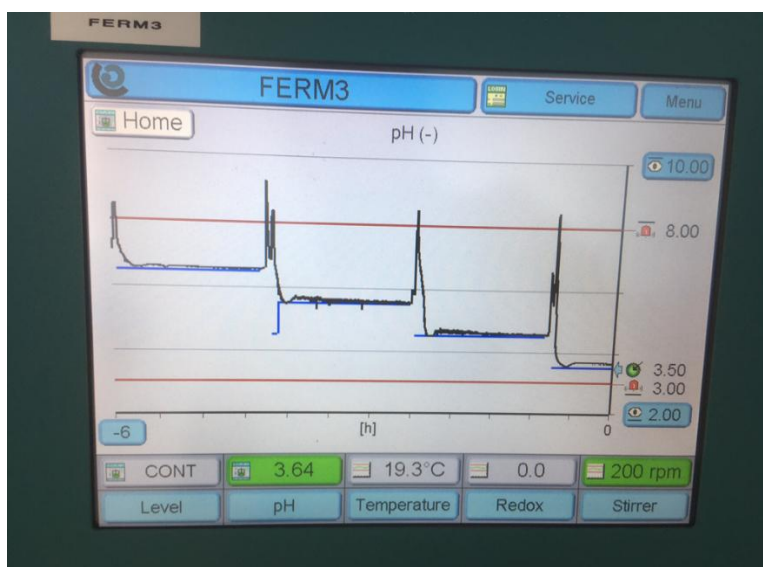
Opgemerkt dient te worden dat voor het regenereren van de Resinex MC290 en de Resinex MA940 niet de aanwijzingen van de fabrikant werden gevolgd, omdat er getracht werd het Ca gescheiden van het Mg terug te winnen. Bij de regeneratie van een WAC H-vorm wordt meestal een 5% HCl oplossing gebruikt, terwijl voor een WAC Na-vorm meestal 5% HCl wordt gebruikt, gevolgd door een 4% NaOH en/of 10% NaCl oplossing om deze in de  $\text{Na}^+$  vorm te krijgen (zie ook Tabel 4). Voor een WBA zoals de Resinex MA940 is de aanbevolen regeneratie rechtstreeks met 2-4% NaOH, om deze IEX in de  $\text{OH}^-$  vorm te krijgen kan dan gespoeld worden met 5% HCl en/of 10% NaCl om deze IEX in de  $\text{Cl}^-$  vorm te krijgen (zie Tabel 4).

Het met zuur gespoelde 2,5 l vat werd in eerste instantie gevuld met regeneratievloeistof (1,2 l voor de CIEX en 1,0 l voor de AIEX; MilliQ-water met 200 mg/L  $\text{HCO}_3^-$  en 100 g/l NaCl), de roerder werd daarna aangezet op 200 rpm. Door het doseren van 0,1 M HCl of 0,1 M NaOH door middel van een slangenpomp rechtstreeks in het 2,5 l vat, werd de pH van het water in de kolf van de bioreactor constant gehouden gedurende het regeneratieproces. Het water werd met behulp van een slangenpomp gerecirculeerd over de kolom die was gevuld met de bewaarde voorbeladen ionenwisselaars van de praktijkwater experimenten.

Van de bewaarde voorbeladen Resinex MC290 (in  $\text{H}^+$  vorm en  $\text{Na}^+$  vorm) werd een volume van 0,3 l, en van de Resinex MA940 (in  $\text{Cl}^-$  vorm) werd een volume van 0,2 l geregenereerd. In eerste instantie werd bij pH 6.5 geregenereerd, hierna werd, gedurende 1,5 h, circa 20,5 BV (CIEX) en circa 29 BV (AIEX) regeneratievloeistof over de kolom gerecirculeerd. Hiervan werd regelmatig de pH, T en EGV gemeten en werd, na elke regeneratie, de vloeistof uit de bioreactor kolf overgegoten in een PE monsterfles. Vervolgens werd verse regeneratievloeistof in het bioreactorvat gedaan. De pH werd achtereenvolgens gesteld op respectievelijk 5.5, 4.5 en 3.5 (zie als voorbeeld zie Figuur 7) en werd met dezelfde stappen de regeneratie uitgevoerd. Na de pH 3.5 regeneratie, werd de hars uit de kolom gehaald en de massa en een drogestof-meting bepaald van het uitgelekte hars.



Figuur 6: Bioreactor met aangesloten kolom met te regenereren ionenwisselaar



Figuur 7: Voorbeeld van pH-regeling in de bioreactor tijdens de regeneratie experimenten

## 2.6 Gebruikte analysemethoden

Van elk verkregen regeneraat werden bij KWR, AQZ en AL-West (AgroLab) analyses uitgevoerd. Voor de CIEX harsen was dit op Na, Cl, Ca, Mg, TOC en ICPMS-scan en voor de ALEX harsen op Na, Cl, SO<sub>4</sub>, TOC en ICPMS Scan.

- KWR:
  - HCO<sub>3</sub>: LAM-042, titratie
  - pH: LAM-043, potentiometrisch
  - DOC: LAM-068 IR gasanalyse
  - ICP-MS: LAM-074 metalen
  - ICP-MS scan: LAM-076 metalen
- AQZ:
  - NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>: eigen methode AQZ
- AL-West:
  - Cl, SO<sub>4</sub>: eigen methode AL-West

## 3 Resultaten

### 3.1 Meetgegevens en isothermen 1<sup>e</sup> isothermtesten

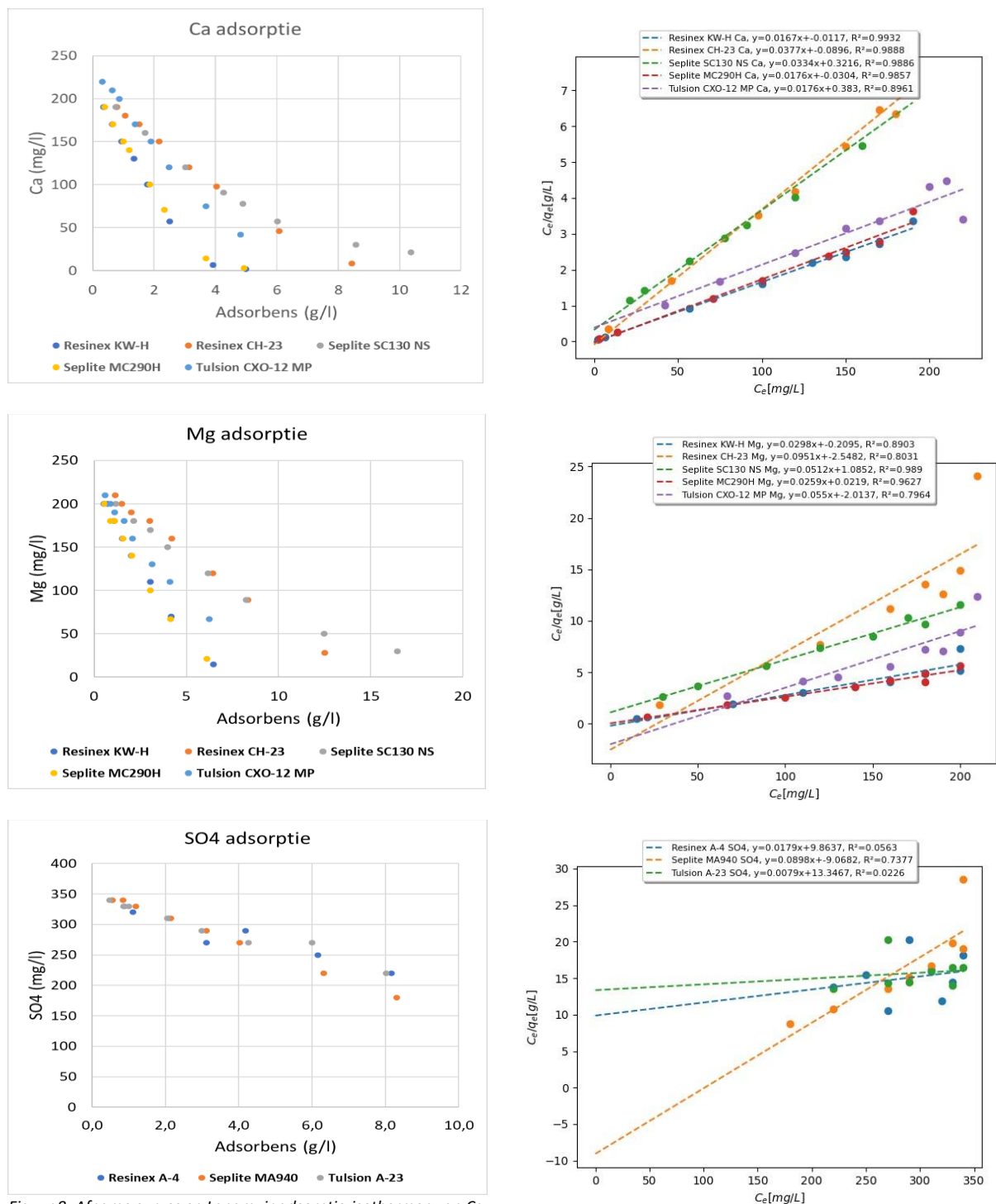
In Tabel 7 zijn de gemeten karakteristieken van de verschillende harsen na de voorbehandeling vermeld. Door het meten van de hoogtes voor en na spoelingen met regeneratievloeistoffen en massa's kon de dichtheid en volume toe- of afnames van de verschillende gebruikte IEX typen worden bepaald. Het bleek dat dichtheden, massa's en volumes soms fors (tot ca 81%) kunnen veranderen na regeneratie van de IEX. Met deze veranderingen moet rekening worden gehouden als de IEX toegepast gaat worden in een proef- of praktijkinstallatie.

Tabel 7: Karakteristieken van de 8 verschillende IEX typen na voorbehandeling voor gebruik bij de isothermen

|                                 |         | Kation harsen  |                |               |                    |                   | Anion harsen   |               |              |
|---------------------------------|---------|----------------|----------------|---------------|--------------------|-------------------|----------------|---------------|--------------|
|                                 | Eenheid | Resinex-Jacobi | Resinex-Jacobi | Sunresin      | Sunresin           | Thermax           | Resinex-Jacobi | Sunresin      | Thermax      |
| Type                            |         | Resinex KW-H   | Resinex CH-23  | Seplite MC290 | Seplite SC130 NS H | Tulsion CXO-12 MP | Resinex A-4    | Seplite MA940 | Tulsion A-23 |
| Aangeleverde vorm               |         | H+             | Na+            | H+            | H+                 | H+                | Cl-            | OH-           | Cl-          |
| Geregenereerd met 250 ml        | -       | 4% NaOH        | n.v.t.         | 4% NaOH       | 4% NaOH            | 4% NaOH           | n.v.t.         | 5% HCL        | n.v.t.       |
| Gespoeld met MQ                 | ml      | 1000           | 1000           | 1000          | 1000               | 1000              | 1000           | 1000          | 1000         |
| Massa aangeleverd ingewogen     | g       | 25,0           | 25,0           | 25,0          | 25,0               | 25,0              | 25,0           | 25,0          | 25,0         |
| Diameter kolom                  | cm      | 3,50           | 3,50           | 3,50          | 3,50               | 3,50              | 3,50           | 3,50          | 3,50         |
| Hoogte in kolom                 | cm      | 3,20           | 3,30           | 3,20          | 3,30               | 3,30              | 3,70           | 3,90          | 3,80         |
| Volume voor regeneratie/spoelen | ml      | 30,8           | 31,7           | 30,8          | 31,7               | 31,7              | 35,6           | 37,5          | 36,5         |
| Dichtheid bed                   | g/ml    | 0,81           | 0,79           | 0,81          | 0,79               | 0,79              | 0,70           | 0,67          | 0,68         |
| Hoogte in kolom na reg/spoelen  | cm      | 4,70           | 3,30           | 4,70          | 3,30               | 5,30              | 3,70           | 4,80          | 3,80         |
| Massa na aan de lucht drogen    | g       | 40,9           | 25,7           | 45,1          | 30,1               | 46,6              | 27,7           | 34,7          | 25,9         |
| Dichtheid bed na drogen         | g/ml    | 0,91           | 0,81           | 1,00          | 0,95               | 0,91              | 0,78           | 0,75          | 0,71         |
| Volume na regeneratie/spoelen   | ml      | 45,2           | 31,7           | 45,2          | 31,7               | 51,0              | 35,6           | 46,2          | 36,5         |
| Volume toename                  | %       | 46,9           | 0,0            | 46,9          | 0,0                | 60,6              | 0,0            | 23,1          | 0,0          |
| Massa toename                   | %       | 63,7           | 2,68           | 80,6          | 20,2               | 86,4              | 10,7           | 38,7          | 3,56         |

In Figuur 8 is de afname van Ca, Mg en SO<sub>4</sub> na IEX behandeling weergegeven van de isothermtesten van de 1<sup>e</sup> isotherm testen, evenals de hieruit berekende adsorptie-isothermen. Het Langmuir model bleek op basis van de R<sup>2</sup> waarden de isothermen voor Ca en Mg het beste te beschrijven, voor SO<sub>4</sub> bleken beide modellen niet geschikt vanwege de zeer lage R<sup>2</sup> waarden. De R<sup>2</sup> waarden van Langmuir/Freundlich waren respectievelijk voor Ca >0,89/<0,83; voor Mg >0,79/<0,93-0,1; voor SO<sub>4</sub> 0,02-0,73/0,2-0,46. Op basis van de concentratie afname en isotherm figuren werden de kation harsen Sunresin Seplite MC290 (voor Ca en Mg) en Sunresin Seplite MA940

gekozen voor de vervollexperimenten vanwege de iets betere performance voor Mg en  $\text{SO}_4$  bij een hogere concentratie.



Figuur 8: Afname curves en Langmuir adsorptie-isothermen van Ca, Mg en  $\text{SO}_4$  met ionenwisselaars in artificieel brakwater bij de 1<sup>e</sup> isothermtesten

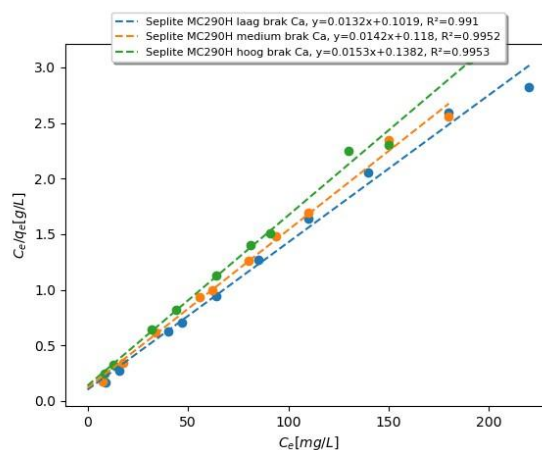
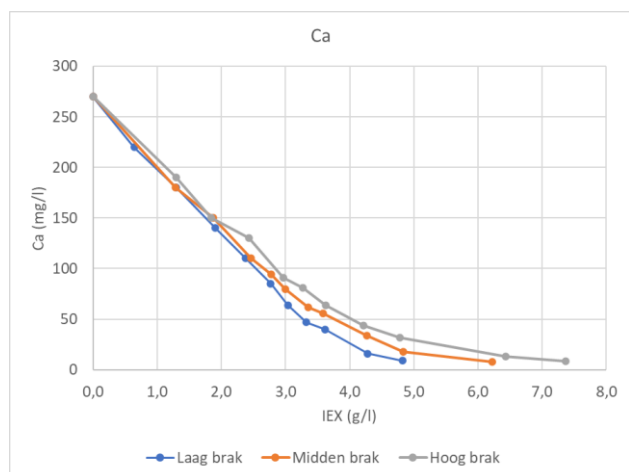
### 3.2 Meetgegevens en isothermen 2<sup>e</sup> isothermtesten

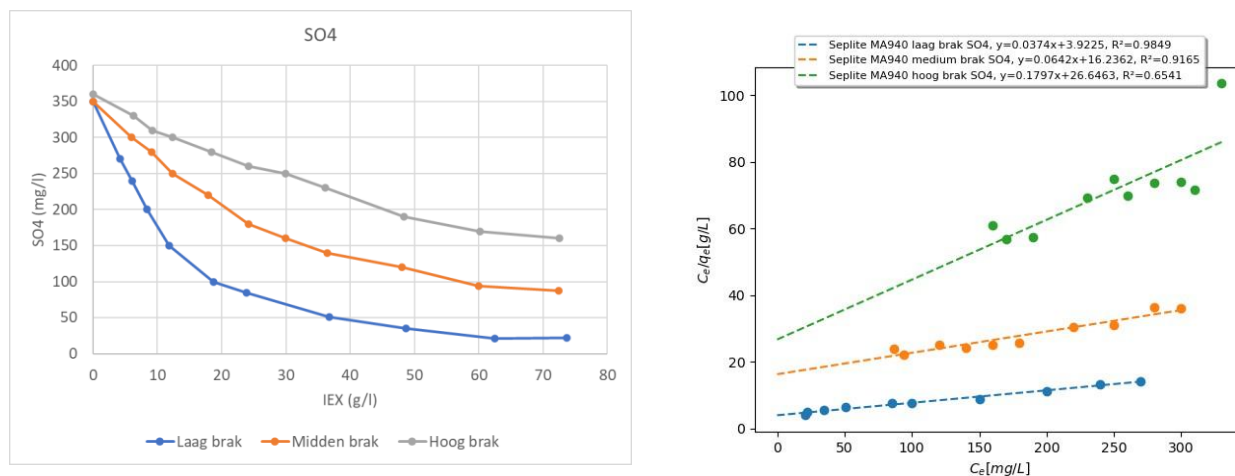
In Tabel 8 zijn de karakteristieken van de IEX typen vermeld voor de experimentele testen voor de 2<sup>e</sup> isothermtesten. Uit deze tabel is de verandering af te lezen van de karakteristieken van de gebruikte IEX typen voor en na voorbehandeling met een regeneratievloeistof. Dit is van belang bij het toepassen van deze typen in een proef- of praktijkinstallatie. Met name de toename/afname van het volume en massa zijn hier van belang.

Tabel 8: Karakteristieken van de 2 geselecteerde IEX typen na voorbehandeling voor gebruik bij de isothermen

|                                               | Eenheid           | Sunresin       | Sunresin        |
|-----------------------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| Physical characteristics                      |                   | Seplite MC290  | Seplite MA940   |
| Real density                                  | g/cm <sup>3</sup> | 1,14-1,2       | 1,0-1,1         |
| Total exchange capacity                       | eq/l              | >4,3           | >1,5            |
| Aangeleverde vorm                             |                   | H <sup>+</sup> | OH <sup>-</sup> |
| Geregenereerd met 0,25 c.q. 1,8 l             | -                 | 4% NaOH        | 5% HCL          |
| Gespoeld met MQ met 400 mg/L HCO <sub>3</sub> | ml                | 1.000          | 9.000           |
| Massa aangeleverd ingewogen                   | g                 | 30,0           | 250             |
| Diameter kolom                                | cm                | 3,50           | 5,00            |
| Hoogte in kolom                               | cm                | 3,90           | 19,0            |
| Volume voor regeneratie/spoelen               | ml                | 37,5           | 373             |
| Dichtheid bed                                 | g/ml              | 0,80           | 0,67            |
| Hoogte in kolom na reg/spoelen                | cm                | 5,80           | 23,9            |
| Massa na aan de lucht drogen                  | g                 | 56,7           | 381             |
| Dichtheid bed na drogen                       | g/ml              | 1,02           | 0,81            |
| Volume na regeneratie/spoelen                 | ml                | 55,8           | 469             |
| Volume toename                                | %                 | 48,7           | 25,8            |
| Massa toename                                 | %                 | 88,9           | 52,5            |

In Figuur 9 is de afname van Ca en SO<sub>4</sub> weergegeven van de isothermtesten van de 2<sup>e</sup> isothermtesten, evenals de berekende Langmuir isothermen. Het Langmuir isotherm model bleek op basis van de R<sup>2</sup> waarden beide isothermen nu ook beter te beschrijven dan het Freundlich model. Voor Ca waren de R<sup>2</sup> waarden van het Freundlich of Langmuir model respectievelijk >0,99/<0,95. Voor SO<sub>4</sub> was dit respectievelijk 0,65-0,98/0,58-0,98, nu bleken beide modellen de SO<sub>4</sub> adsorptie veel beter te beschrijven in vergelijking met de 1<sup>e</sup> adsorptie-isothermen, een verklaring hiervoor kan niet worden gegeven.



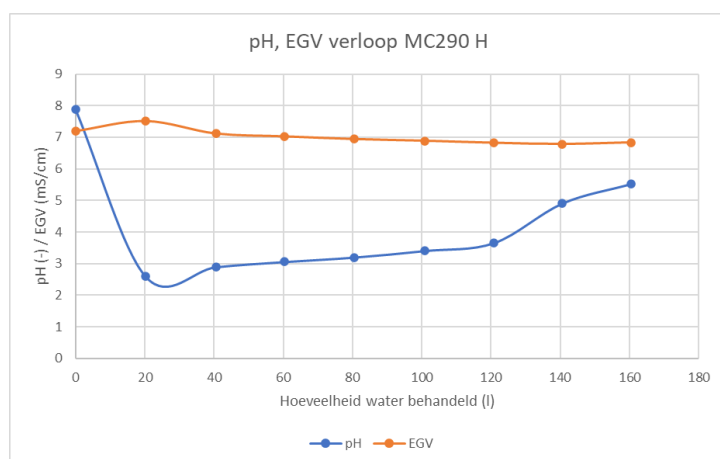


Figuur 9: Afname curves en Langmuir isothermen van Ca en SO<sub>4</sub> met ionenwisselaars in artificieel brakwater bij de 2<sup>e</sup> isothermtesten

Met beide IEX typen zijn de doorbraakcurves gemaakt voor het praktijkwater (voor de uitvoering zie paragraaf 2.4), beschreven in paragraaf 3.3.

### 3.3 Doorbraakcurves en berekeningen van het praktijkwater

In Figuur 10 is het verloop van de pH en EGV weergegeven tijdens het beladen van de Seplite MC290 in de H<sup>+</sup> vorm (WAC) met het laagbrak praktijkwater van de Lier. Het praktijkwater was vooraf belucht en gefiltreerd over 1 µm om het opgeloste ijzer te verwijderen. Na 120 l bleek de pH toe te nemen in het effluent, op basis van deze waarneming is besloten bij het vervolg de eerste 120 l van het effluent in bewerking te nemen voor het vervollexperiment met de MC290 in de Na vorm (WAC Na-vorm), in totaal werd circa 116 l over de 0,81 l IEX geleid.

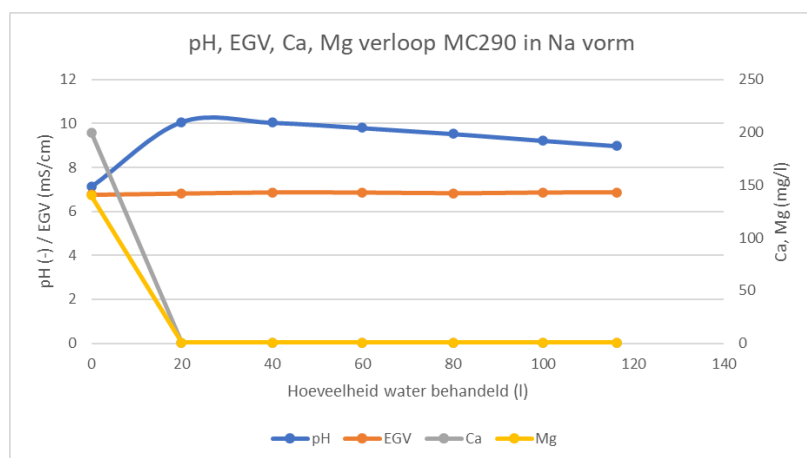


Figuur 10: Verloop van pH en EGV tijdens het beladen van de IEX MC290 (WAC H-vorm) met het praktijkwater

Het water voor het vervollexperiment is verzameld in één vat en geanalyseerd op een aantal parameters. In Tabel 10 zijn de analyses van alle kolomexperimenten vermeld (zie paragraaf 3.3).

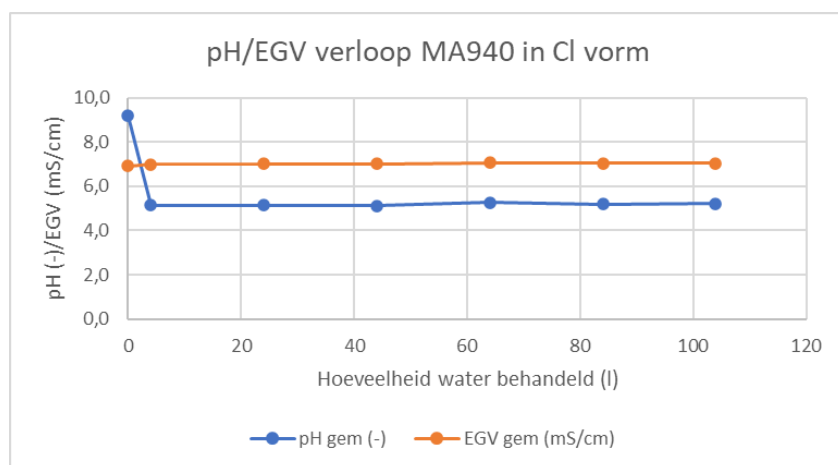
In Figuur 11 is het verloop van pH, EGV, Ca en Mg tijdens het beladen van de IEX MC290 (WAC Na-vorm) met het voorbehandelde praktijkwater weergegeven. Hierbij werd het effluent ook gecontroleerd op de aanwezigheid van Ca en Mg via een indicatieve ICP-MS analyse, Ca en Mg bleken niet aanwezig gedurende het volledige experiment.

De belading van de MC290 (WAC Na-vorm) met Ca en Mg is gebruikt voor het kunnen opstellen van een massabalans voor de regeneratie-experimenten (zie Tabel 9).



Figuur 11: Verloop van pH, EGV, Ca en Mg tijdens het beladen van de IEX MC290 (WAC Na-vorm) met het voorbehandelde praktijkwater

Ongeveer 110 l van het effluent van het MC290 (WAC Na-vorm) experiment is gebruikt voor het beladen van de MA940 Cl-vorm anionwisselaar. In Figuur 12 is het verloop van de pH en EGV weergegeven tijdens het beladen van de IEX MA940 Cl (WBA) met het voorbehandelde praktijkwater. Het water bevatte in het ruwe water weinig tot geen  $\text{SO}_4$ , waardoor het niet mogelijk werd om een massabalans voor  $\text{SO}_4$  op te stellen. Achteraf was het beter geweest sulfaat toe te voegen zodat dit wel mogelijk zou zijn geworden.



Figuur 12: Verloop van pH en EGV tijdens het beladen van de IEX MA940 (WBA Cl-vorm) met het voorbehandelde praktijkwater

De belading van de MC290 WAC H-vorm en MC290 WAC Na-vorm met Ca en Mg is gebruikt voor het kunnen opstellen van een recovery- of massabalans voor de regeneratie-experimenten. In Tabel 9 is het resultaat van de recovery balans voor Ca en Mg vermeld.

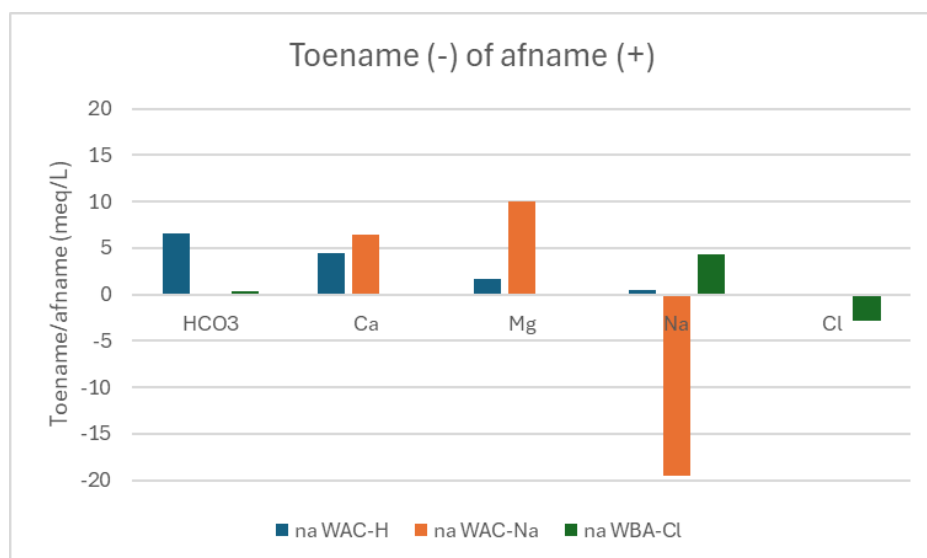
Tabel 9: Recovery balans van Ca en Mg van de kolomexperimenten met de WAC H-vorm en WAC Na-vorm IEX

| Type IEX       | Belading<br>(mg/L IEX) | Na regeneratie<br>(mg/L IEX) | Recovery<br>(%) |
|----------------|------------------------|------------------------------|-----------------|
| WAC H-vorm Ca  | 17.561                 | 11.773                       | 67              |
| WAC Na-vorm Ca | 13.000                 | 1.138                        | 8,8             |
| WAC H-vorm Mg  | 3.902                  | 4.002                        | 103             |
| WAC Na-vorm Mg | 12.000                 | 3.741                        | 31              |

Uit Tabel 9 blijkt dat na de regeneratie de recovery voor Mg 103% is, waaruit wordt geconcludeerd dat de WAC H-vorm (voor Mg) goed heeft gewerkt. Vooral voor Ca bij de WAC Na-vorm werd nog geen 10 % teruggevonden van het geadsorbeerde Ca, voor Mg was deze ook laag (circa 30 %). Dit werd niet verwacht, met name omdat regeneratie van ionenwisseling over het algemeen vrij robuust en goed werkt. Een meest aannemelijke verklaring is dat de gebruikte WAC Na-vorm van oorsprong een WAC H-vorm is en is omgezet van de H<sup>+</sup> naar de Na<sup>+</sup> vorm. Een directe regeneratie met NaCl zou hierom mogelijk minder goed kunnen werken en had de IEX volgens aanwijzingen van de fabrikant eerst met HCl geregenereerd moeten worden, gevolgd door NaCl (zie ook uitleg in paragraaf 2.5). Dit zou echter storend zijn geweest voor de gekozen aanpak om de IEX harsen bij verschillende pH (en constant zoutgehalte) per batch te regenereren. De regeneratie van de WAC H-vorm verliep beter, 67 % voor Ca en 103 % voor Mg, echter ook hier is niet alle Ca van de WAC H-vorm teruggevonden in het regeneraat. Aanbevolen wordt om dit verschil (Ca ten dele, Mg volledig teruggewonnen) verder te onderzoeken voor WAC-H vorm harsen; mogelijk dat de scheiding tussen Ca en Mg op deze manier bewerkstelligd zou kunnen worden met een aangepaste concentratie of pH. Aangezien Ca typisch een factor 10 hoger in concentratie aanwezig is in zoetwater dan magnesium zal het aandeel Ca wat teruggevonden wordt (door optimalisatie van deze regeneratie-aanpak) <<67% moeten worden. Bij de toegepaste regeneratie kwam er dus circa 1,5x meer Mg in vergelijking tot Ca los voor het WAC H-vorm hars. Opgemerkt wordt dat voor het WAC Na-vorm hars (circa 10% Ca recovery en 30% Mg recovery) er dus circa 3 maal meer Mg in vergelijking tot Ca los kwam. Door te streven naar 100% Mg verwijdering (wat voor het WAC H-vorm hars al gelukt is) en een zo laag mogelijke Ca-verwijdering, kunnen Mg en Ca mogelijk beter gescheiden worden van elkaar. Wanneer het Mg van de hars af is, kan een HCl regeneratie een Ca-rijke regeneraatstroom opleveren. Met het huidige (niet-geoptimaliseerde) procedé is het dus wel gelukt om een Mg-verrijkte en potentieel een zuivere Ca regeneraatstroom te genereren. Meer onderzoek is nodig naar een betere scheiding van Ca en Mg tijdens de regeneratie.

### 3.4 Bepaling van de zuiverheid van het verkregen effluent

In Figuur 13 is de toe- of afname in meq/L van respectievelijk HCO<sub>3</sub>, Ca, Mg, Na en Cl na het toepassen van WAC H-vorm, WAC Na-vorm en WBA Cl-vorm tijdens de kolomexperimenten weergegeven. Uit deze figuur blijkt onder andere dat tijdens het WAC H-vorm experiment meer Ca dan Mg werd verwijderd, bij de WAC Na-vorm was dit andersom.



Figuur 13: Toe- of afname in meq/L van respectievelijk HCO<sub>3</sub>, Ca, Mg, Na en Cl na het toepassen van WAC H-vorm, WAC Na-vorm en WBA Cl-vorm tijdens de kolomexperimenten

In Tabel 10 zijn tevens de analyseresultaten vermeld van de belangrijkste parameters van het water dat is gebruikt voor de kolomexperimenten. Uit Tabel 10 blijkt dat de WAC naast een deel van het Ca en Mg met name het bicarbonaat heeft verwijderd door de omzetting met het vrijgekomen H<sup>+</sup> van de WAC H-vorm, hetgeen ook het doel was. Na de WAC Na-vorm is alle Ca en Mg verwijderd, het Na is toegenomen. Omdat het ruwe water geen sulfaat bevatte kunnen hier ook geen conclusies over worden getrokken. Bij toepassing van de WBA Cl-vorm werd ook een deel van het DOC verwijderd (circa 75 %), dit betreft waarschijnlijk negatief geladen humus- en/of fulvinezuren. Het Fe-gehalte lijkt wat te zijn toegenomen in het effluent van de WBA Cl-vorm, mogelijk doordat Fe, indien gecomplexeerd met humus- of fulvinezuren, los zou kunnen komen tijdens het ALEX adsorptieproces met de WBA Cl-vorm.

Tabel 10: Analyseresultaten van het verzamelde influent en effluent water van de kolom experimenten met het praktijkwater

| Officiële lab resultaten |        | 08-11-2023              | 16-11-2023    | 6-12-2023      | 8-12-2023      |
|--------------------------|--------|-------------------------|---------------|----------------|----------------|
|                          |        | Ruw water na beluchting | na WAC H-vorm | na WAC Na-vorm | na WBA Cl-vorm |
| pH                       | -      | 8                       | 6,9           | 9,2            | 4,8            |
| T (pH)                   | °C     | 20,1                    | 20,0          | 20,0           | 19,6           |
| HCO <sub>3</sub>         | mg/L   | 410                     | 8,5           | 20,0           | <6,1           |
| Ca                       | mg/L   | 220                     | 130           | < 1            | < 1            |
| Fe                       | µg/l   | 1,7                     | n.g.          | n.g.           | 30,0           |
| Mg                       | mg/L   | 140                     | 120           | < 1            | < 1            |
| Na                       | mg/L   | 960                     | 950           | 1.400          | 1.300          |
| SO <sub>4</sub>          | mg/L   | <5                      | <5            | <5             | <5             |
| Chloride                 | mg/L   | n.g.                    | 2.000         | 2.000          | 2.100          |
| DOC                      | mg C/L | n.g.                    | 6,4           | 6,4            | 1,5            |

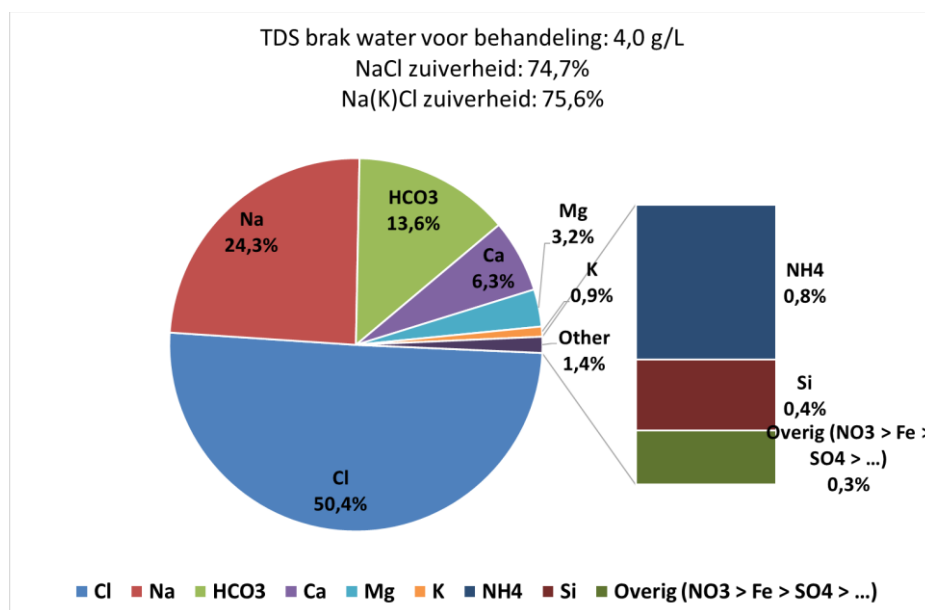
In Tabel 11 is de berekening van de ionenbalans vermeld voor en na behandeling met respectievelijk WAC H-vorm, WAC Na-vorm en WBA Cl-vorm, deze balans blijkt vrijwel sluitend te zijn. Een verandering van bijvoorbeeld 100 mg/L Cl (= 2,9 meq/L, door de sterke verdunning van de monsters voor de analyse was dit ongeveer de afwijking van het analyseresultaat), kan de balans al kloppend maken.

Tabel 11: Ionenbalans in mg/L en meq/L van het water voor en na behandeling met respectievelijk WAC H-vorm, WAC Na-vorm en WBA Cl-vorm IEX

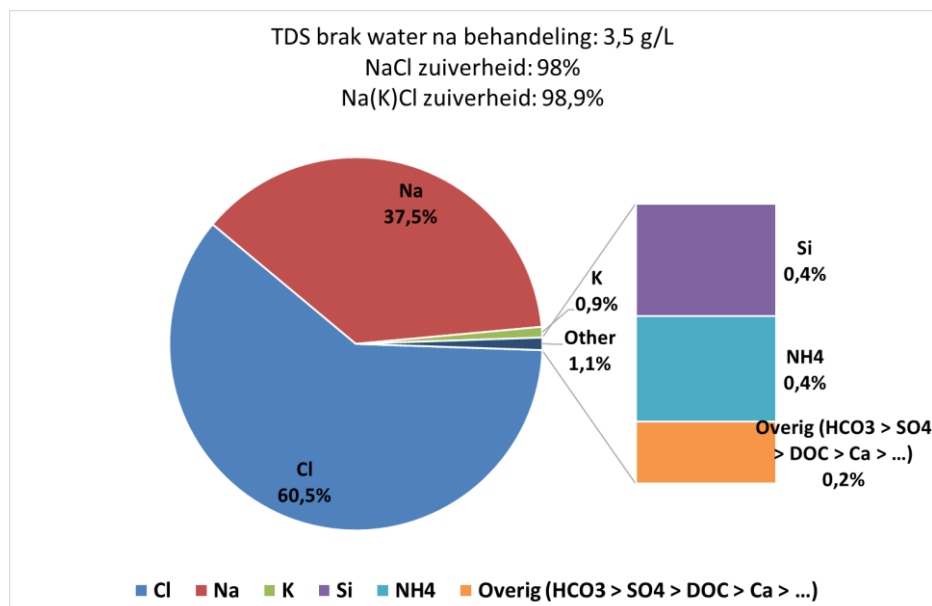
| Parameter        | MW   | Valentie | Ruw na beluchting |       | na WAC H-vorm |       | na WAC Na-vorm |       | na WBA Cl-vorm |       |
|------------------|------|----------|-------------------|-------|---------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
|                  |      |          | mg/L              | meq/L | mg/L          | meq/L | mg/L           | meq/L | mg/L           | meq/L |
| pH               |      |          | 8                 |       | 6,9           |       | 9,2            |       | 4,8            |       |
| NH <sub>4</sub>  | 18   | 1        | 14                | 0,8   | 14            | 0,8   | 14             | 0,8   | 14             | 0,8   |
| K                | 39   | 1        | 32                | 0,8   | 32            | 0,8   | 32             | 0,8   | 32             | 0,8   |
| HCO <sub>3</sub> | 61   | -1       | 410               | -6,7  | 8,5           | -0,1  | 20             | -0,3  | 3              | 0,0   |
| Ca               | 40   | 2        | 220               | 11,0  | 130           | 6,5   | 0,5            | 0,0   | 0,5            | 0,0   |
| Mg               | 24   | 2        | 140               | 11,7  | 120           | 10,0  | 0,5            | 0,0   | 0,5            | 0,0   |
| Na               | 23   | 1        | 960               | 41,7  | 950           | 41,3  | 1.400          | 60,9  | 1.300          | 56,5  |
| SO <sub>4</sub>  | 96   | -2       | 2,5               | -0,1  | 2,5           | -0,1  | 2,5            | -0,1  | 2,5            | -0,1  |
| Chloride         | 35,5 | -1       | 2.000             | -56,3 | 2.000         | -56,3 | 2.000          | -56,3 | 2.100          | -59,2 |
| Som              |      |          |                   | 2,1   |               | 2,1   |                | 5,0   |                | -1,8  |

In Figuur 14 en respectievelijk Figuur 15 is de samenstelling weergegeven van het ruwe water en het behandelde water na voorbehandeling met de WAC H-vorm, WAC Na-vorm en WBA Cl-vorm IEX. Het blijkt dat met de IEX voorbehandeling een laagbrakwater is te maken dat qua zoutensamenstelling voor 98% uit NaCl en 99% uit Na(K)Cl bestaat.

Mogelijk kan door optimalisatie van het IEX proces een nog zuiverder zoutensamenstelling worden verkregen door bijvoorbeeld het testen van andere IEX typen en/of combinaties hiervan. In Bijlage V zijn de analysesresultaten gegeven van het effluent van de WBA Cl-vorm, het uiteindelijke verkregen water na behandeling.



Figuur 14: Samenstelling van het ruwe brakwater van De Lier



Figuur 15: Samenstelling van het regeneraat na behandeling van het ruwe brakwater van De Lier met de WAC H-vorm, WAC Na-vorm en WBA Cl-vorm IEX typen

## 4 Conclusies en aanbevelingen

- Door het gebruik van achtereenvolgens een WAC H-vorm (verwijdering tijdelijke hardheid Ca en Mg), gevolgd door WAC Na-vorm (verwijdering rest Ca en Mg) en WBA Cl-vorm (verwijdering  $\text{SO}_4$ ) ionenwisseling is het mogelijk gebleken om van laagbrak grondwater (Na(K)Cl zuiverheid 76%, totaal zoutgehalte 4 gram/L) een zoutsamenstelling te verkrijgen dat voor 99 % uit Na(K)Cl bestaat. Hiermee lijkt de beoogde doelstelling behaald. Opgemerkt dient te worden dat  $\text{SO}_4$  niet aanwezig was in het oorspronkelijke water, mogelijk zou dit nog van invloed kunnen zijn op het eindresultaat.
- Mogelijk kan door optimalisatie van de ionenwisseling processen een nog hogere zuiverheid worden verkregen. Hierbij kan worden gedacht aan andere merken/types of combinaties van ionenwisselaar en/of optimalisatie van het moment van regenereren, dit zou dan verder onderzocht moeten worden.
- De adsorptie van Ca, Mg en  $\text{SO}_4$  lijken het best te kunnen worden gefit met het Langmuir model in vergelijking met het Freundlich model, hierbij werden vooral voor Ca goede  $R^2$  waarden ( $> 0,98$ ) verkregen.
- Uit de recovery balans na de regeneratie blijkt dat de regeneratie zoals die is uitgevoerd het hars niet volledig heeft geregenereerd. Voor Ca werd bij de WAC Na-vorm slechts 10 % en voor Mg circa 30 % teruggevonden. Voor de WAC H-vorm waren de resultaten wat beter (respectievelijk 67 % voor Ca en 103 % voor Mg). Volledige(re) regeneratie kan waarschijnlijk wel bereikt worden door het volgen van de aanwijzingen van de fabrikant. Bij dit onderzoek was ervoor gekozen volgens eigen recept te regenereren met als doel ionen tijdens de regeneratie van elkaar te scheiden.
- Het bleek echter met de gekozen regeneratie procedure niet mogelijk Ca en Mg volledig te scheiden. Wel is aangetoond dat het mogelijk is om (onder niet-geoptimaliseerde condities) een Mg-verrijkte regeneraatstroom te produceren. Voor de WAC H-vorm hars werd circa 100% van de beladen Mg teruggewonnen en Ca slechts ten dele. Er heeft dus door de toegepaste regeneratie een fractionering van Ca en Mg plaatsgevonden wat mogelijk gebruikt kan worden om in zuiverdere vorm deze zouten terug te gaan winnen. Aanbevolen wordt dit verder te onderzoeken.
- Aanbevolen wordt voor de regeneratie ook andere procedures nader te onderzoeken, zoals het toepassen van gradiënt regeneratie of het regenereren met andere chemicaliën met Na en Cl voor respectievelijk de kation- of anionwisselaar.
- Aanbevolen wordt om batch-regeneratie van met Ca en Mg beladen WAC H-vorm en WAC Na-vorm harsen nader te onderzoeken door:
  - te checken of na 100 g/L NaCl regeneratie verdere behandeling van het WAC H-vorm hars een 100% zuivere Ca regeneraatstroom oplevert;
  - te onderzoeken wat de optimale pH en/of zoutgehalte (combinatie) van de regeneratievloeistof zijn om zoveel mogelijk Mg terug te winnen ten opzichte van Ca.
- Bij vervolgonderzoek zou het samenvoegen van regeneraatmengsels onderzocht kunnen worden, hiermee zou bijvoorbeeld een neerslag van  $\text{CaSO}_4$  kunnen worden verkregen, wat eventueel kan worden hergebruikt. Verder onderzoek hiernaar is dan nodig.
- Aanbevolen wordt het effect van een hoge zoutconcentratie op de belading van Ca, Mg en  $\text{SO}_4$  op de verschillende IEX typen te kwantificeren, hiermee wordt een beter beeld verkregen van de mogelijkheden van de toepassing van IEX. Dit kan door isothermen te maken van Ca, Mg en  $\text{SO}_4$  bij een lage zoutconcentratie (zoetwaterconditie als referentiewaarde), of door een bepaling van de IEX capaciteit door middel van titratie in verschillende zoutmatrices.

# I Literatuur

H.R. Flodman, B.I. Dvorak (2012): "Brine reuse in Ion-Exchange softening: Salt discharge, hardness leakage and capacity tradeoffs". *Water Environment Research*, Vol 84 Number 6;

J.D. Pless et al. (2006): "Desalination of brackish water using Ion-exchange media". *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006, 45, 4652-4756.

N. Van Linden, R. Shang, G. Stockinger, B. Heijman, and H. Spanjers, "Separation of natural organic matter and sodium chloride for salt recovery purposes in zero liquid discharge," *Water Resour Ind*, vol. 23, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.wri.2019.100117.

[illegible]

[illegible]

### III Meetgegevens isothermen run 2

| Ca reeks           |          |          |         |        |        |          |         |        |
|--------------------|----------|----------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|
| Start              |          |          |         |        |        |          |         |        |
|                    |          |          |         |        |        |          |         |        |
|                    |          |          |         |        |        |          |         |        |
| Type               | conc IEX | conc IEX | pH eind | Ca     | Ca     | Ca       | Ca      | Na     |
|                    |          |          |         |        | 1/ce   | belading | 1/qe    |        |
|                    | (mg/l)   | (g/l)    | (-)     | (mg/l) | (l/mg) | (mg/g)   | (g/mg)  | (mg/l) |
| Blanco laag brak   | 0,0      | 0,0      | 6,55    | 270    | 0,0037 | #DIV/0!  | #DIV/0! | 1500   |
| Seplite MC290H     | 641,8    | 0,6      | 6,5     | 220    | 0,0045 | 77,9115  | 0,0128  | 1500   |
| laag brak water    | 1297,1   | 1,3      | 6,46    | 180    | 0,0056 | 69,3866  | 0,0144  | 1600   |
|                    | 1908,2   | 1,9      | 6,42    | 140    | 0,0071 | 68,1286  | 0,0147  | 1600   |
|                    | 2380,7   | 2,4      | 6,38    | 110    | 0,0091 | 67,2066  | 0,0149  | 1700   |
|                    | 2765,3   | 2,8      | 6,35    | 85     | 0,0118 | 66,9003  | 0,0149  | 1700   |
|                    | 3033,9   | 3,0      | 6,37    | 64     | 0,0156 | 67,9001  | 0,0147  | 1700   |
|                    | 3325,2   | 3,3      | 6,38    | 47     | 0,0213 | 67,0644  | 0,0149  | 1800   |
|                    | 3611,5   | 3,6      | 6,37    | 40     | 0,0250 | 63,6846  | 0,0157  | 1800   |
|                    | 4279,3   | 4,3      | 6,42    | 16     | 0,0625 | 59,3556  | 0,0168  | 1800   |
|                    | 4827,9   | 4,8      | 6,47    | 9,0    | 0,1111 | 54,0611  | 0,0185  | 1800   |
| Blanco medium brak | 0,0      | 0,0      | 6,56    | 270    | 0,0037 | #DIV/0!  | #DIV/0! | 3200   |
| Seplite MC290H     | 1279,6   | 1,3      | 6,44    | 180    | 0,0056 | 70,3346  | 0,0142  | 3400   |
| medium brak water  | 1876,0   | 1,9      | 6,41    | 150    | 0,0067 | 63,9670  | 0,0156  | 3400   |
|                    | 2464,9   | 2,5      | 6,39    | 110    | 0,0091 | 64,9108  | 0,0154  | 3300   |
|                    | 2776,5   | 2,8      | 6,37    | 94     | 0,0106 | 63,3887  | 0,0158  | 3400   |
|                    | 2991,8   | 3,0      | 6,36    | 80     | 0,0125 | 63,5061  | 0,0157  | 3500   |
|                    | 3355,7   | 3,4      | 6,37    | 62     | 0,0161 | 61,9839  | 0,0161  | 3500   |
|                    | 3584,4   | 3,6      | 6,36    | 56     | 0,0179 | 59,7036  | 0,0167  | 3500   |
|                    | 4269,4   | 4,3      | 6,38    | 34     | 0,0294 | 55,2766  | 0,0181  | 3400   |
|                    | 4831,2   | 4,8      | 6,42    | 18     | 0,0556 | 52,1610  | 0,0192  | 3600   |
|                    | 6219,1   | 6,2      | 6,56    | 7,6    | 0,1316 | 42,1923  | 0,0237  | 3500   |
| Blanco hoog brak   | 0,0      | 0,0      | 6,51    | 270    | 0,0037 | #DIV/0!  | #DIV/0! | 4900   |
| Seplite MC290H     | 1290,7   | 1,3      | 6,43    | 190    | 0,0053 | 61,9829  | 0,0161  | 5100   |
| hoog brak water    | 1838,5   | 1,8      | 6,37    | 150    | 0,0067 | 65,2689  | 0,0153  | 5100   |
|                    | 2425,8   | 2,4      | 6,35    | 130    | 0,0077 | 57,7122  | 0,0173  | 5100   |
|                    | 2960,8   | 3,0      | 6,33    | 91     | 0,0110 | 60,4562  | 0,0165  | 5400   |
|                    | 3268,0   | 3,3      | 6,32    | 81     | 0,0123 | 57,8342  | 0,0173  | 5300   |
|                    | 3629,4   | 3,6      | 6,32    | 64     | 0,0156 | 56,7579  | 0,0176  | 5300   |
|                    | 4211,3   | 4,2      | 6,33    | 44     | 0,0227 | 53,6653  | 0,0186  | 5300   |
|                    | 4786,7   | 4,8      | 6,36    | 32     | 0,0313 | 49,7214  | 0,0201  | 5300   |
|                    | 6429,6   | 6,4      | 6,45    | 13     | 0,0769 | 39,9711  | 0,0250  | 5300   |
|                    | 7363,0   | 7,4      | 6,54    | 8,7    | 0,1149 | 35,4881  | 0,0282  | 5300   |

| <b>SO4 reeks</b>   |          |          |         |        |        |          |         |        |
|--------------------|----------|----------|---------|--------|--------|----------|---------|--------|
| <b>Start</b>       |          |          |         |        |        |          |         |        |
|                    |          |          |         |        |        |          |         |        |
|                    |          |          |         |        |        |          |         |        |
| Type               | conc IEX | conc IEX | pH eind | SO4    | SO4    | SO4      | SO4     | Cl     |
|                    |          |          |         |        | 1/ce   | belading | 1/qe    |        |
|                    | (mg/l)   | (g/l)    | (-)     | (mg/l) | (l/mg) | (mg/g)   | (g/mg)  | (mg/l) |
| Blanco laag brak   | 0,0      | 0,0      | 6,55    | 350    | 0,0029 | #DIV/0!  | #DIV/0! | 2300   |
| Seplite MA940      | 4175,4   | 4,2      | 6,3     | 270    | 0,0037 | 19,1597  | 0,0522  | 2300   |
| laag brak water    | 6049,7   | 6,0      | 6,22    | 240    | 0,0042 | 18,1827  | 0,0550  | 2300   |
|                    | 8398,7   | 8,4      | 6,16    | 200    | 0,0050 | 17,8598  | 0,0560  | 2200   |
|                    | 11866,1  | 11,9     | 6,12    | 150    | 0,0067 | 16,8547  | 0,0593  | 2400   |
|                    | 18786,8  | 18,8     | 6,02    | 100    | 0,0100 | 13,3072  | 0,0751  | 2300   |
|                    | 23852,7  | 23,9     | 6,05    | 85     | 0,0118 | 11,1098  | 0,0900  | 2400   |
|                    | 36793,0  | 36,8     | 5,99    | 51     | 0,0196 | 8,1265   | 0,1231  | 2500   |
|                    | 48647,7  | 48,6     | 5,89    | 35     | 0,0286 | 6,4751   | 0,1544  | 2700   |
|                    | 62436,5  | 62,4     | 5,93    | 21     | 0,0476 | 5,2694   | 0,1898  | 2400   |
|                    | 73686,6  | 73,7     | 5,75    | 22     | 0,0455 | 4,4513   | 0,2247  | 2400   |
| Blanco medium brak | 0,0      | 0,0      | 6,54    | 350    | 0,0029 | #DIV/0!  | #DIV/0! | 4300   |
| Seplite MA940      | 6013,7   | 6,0      | 6,23    | 300    | 0,0033 | 8,3144   | 0,1203  | 4600   |
| midden brak water  | 9079,2   | 9,1      | 6,17    | 280    | 0,0036 | 7,7099   | 0,1297  | 5200   |
|                    | 12359,5  | 12,4     | 6,12    | 250    | 0,0040 | 8,0909   | 0,1236  | 4500   |
|                    | 17924,5  | 17,9     | 6,04    | 220    | 0,0045 | 7,2526   | 0,1379  | 4500   |
|                    | 24237,5  | 24,2     | 5,99    | 180    | 0,0056 | 7,0139   | 0,1426  | 4600   |
|                    | 29960,3  | 30,0     | 5,97    | 160    | 0,0063 | 6,3417   | 0,1577  | 4700   |
|                    | 36420,2  | 36,4     | 5,98    | 140    | 0,0071 | 5,7660   | 0,1734  | 4400   |
|                    | 48077,4  | 48,1     | 5,88    | 120    | 0,0083 | 4,7840   | 0,2090  | 4600   |
|                    | 60008,4  | 60,0     | 5,85    | 94     | 0,0106 | 4,2661   | 0,2344  | 4500   |
|                    | 72423,7  | 72,4     | 5,87    | 87     | 0,0115 | 3,6314   | 0,2754  | 4500   |
| Blanco hoog brak   | 0,0      | 0,0      | 6,59    | 360    | 0,0028 | #DIV/0!  | #DIV/0! | 6600   |
| Seplite MA940      | 6272,9   | 6,3      | 6,31    | 330    | 0,0030 | 3,1883   | 0,3136  | 6800   |
| hoog brak water    | 9236,6   | 9,2      | 6,28    | 310    | 0,0032 | 4,3306   | 0,2309  | 6500   |
|                    | 12339,7  | 12,3     | 6,22    | 300    | 0,0033 | 4,0520   | 0,2468  | 6400   |
|                    | 18401,1  | 18,4     | 6,15    | 280    | 0,0036 | 3,8041   | 0,2629  | 6800   |
|                    | 24210,2  | 24,2     | 6,16    | 260    | 0,0038 | 3,7174   | 0,2690  | 6800   |
|                    | 29935,7  | 29,9     | 6,13    | 250    | 0,0040 | 3,3405   | 0,2994  | 6800   |
|                    | 36127,9  | 36,1     | 6,05    | 230    | 0,0043 | 3,3215   | 0,3011  | 6600   |
|                    | 48347,6  | 48,3     | 6,08    | 190    | 0,0053 | 3,3094   | 0,3022  | 6400   |
|                    | 60128,0  | 60,1     | 6,01    | 170    | 0,0059 | 2,9936   | 0,3340  | 6500   |
|                    | 72494,0  | 72,5     | 6,01    | 160    | 0,0063 | 2,6209   | 0,3815  | 6200   |

## IV Overige meetgegevens van de kolomexperimenten

### Kolomexperimenten met praktijkwater

| Experiment IEX MC290 in de H vorm |       |       |      |          |        |          |        |      |      |      |         |         |         |
|-----------------------------------|-------|-------|------|----------|--------|----------|--------|------|------|------|---------|---------|---------|
| Datum                             | Tijd  | Tijd  | Tijd | Batch nr | Volume | Water hh | Debiet | pH 1 | pH 2 | pH 3 | EGV 1   | EGV 2   | EGV 3   |
|                                   |       | (h)   | (h)  | vat      | (kg)   | (l)      | (l/h)  | (-)  | (-)  | (-)  | (uS/cm) | (uS/cm) | (uS/cm) |
| 16-11-2023                        | 06:55 | 0     | 0    |          | n.v.t. | 0        | n.v.t. | 7,85 | 7,92 | 7,91 | 7,2     | 7,18    | 7,18    |
| 16-11-2023                        | 07:50 | 0,92  | 0,92 | 1        | 20,3   | 20,3     | 22,15  | 2,6  | 2,58 | 2,59 | 7,49    | 7,51    | 7,51    |
| 16-11-2023                        | 08:40 | 1,75  | 0,83 | 2        | 20,2   | 40,5     | 24,24  | 2,87 | 2,9  | 2,89 | 7,12    | 7,11    | 7,11    |
| 16-11-2023                        | 09:30 | 2,58  | 0,83 | 3        | 19,9   | 60,4     | 23,88  | 3,05 | 3,05 | 3,06 | 7,04    | 7,01    | 7,02    |
| 16-11-2023                        | 10:25 | 3,50  | 0,92 | 4        | 20,1   | 80,5     | 21,93  | 3,2  | 3,2  | 3,18 | 6,94    | 6,94    | 6,94    |
| 16-11-2023                        | 11:20 | 4,42  | 0,92 | 5        | 20,3   | 100,8    | 22,15  | 3,44 | 3,44 | 3,32 | 6,9     | 6,88    | 6,88    |
| 16-11-2023                        | 12:15 | 5,33  | 0,92 | 6        | 20,1   | 120,9    | 21,93  | 3,67 | 3,65 | 3,64 | 6,83    | 6,82    | 6,82    |
| 16-11-2023                        | 13:07 | 6,20  | 0,87 | 7        | 19,7   | 140,6    | 22,73  | 4,88 | 4,89 | 4,94 | 6,79    | 6,78    | 6,79    |
| 16-11-2023                        | 14:02 | 7,12  | 0,92 | 8        | 19,9   | 160,5    | 21,71  | 5,51 | 5,52 | 5,53 | 6,86    | 6,82    | 6,83    |
| 16-11-2023                        |       | -6,92 |      | 9        |        |          |        |      |      |      |         |         |         |
| 16-11-2023                        |       | -6,92 |      | 10       |        |          |        |      |      |      |         |         |         |
|                                   |       |       |      | totaal   | 160,5  | l        |        |      |      |      |         |         |         |

| Experiment IEX MC290 in de Na vorm |       |      |      |          |        |          |        |       |       |       |         |         | indicatieve ICP-MS meting |
|------------------------------------|-------|------|------|----------|--------|----------|--------|-------|-------|-------|---------|---------|---------------------------|
| Datum                              | Tijd  | Tijd | Tijd | Batch nr | Volume | Water hh | Debiet | pH 1  | pH 2  | pH 3  | EGV 1   | EGV 2   | EGV 3                     |
|                                    |       | (h)  | (h)  | vat      | (kg)   | (l)      | (l/h)  | (-)   | (-)   | (-)   | (uS/cm) | (uS/cm) | (uS/cm)                   |
| 27-11-2023                         | 09:15 |      |      |          |        |          |        |       |       |       |         |         |                           |
| 27-11-2023                         | 09:00 |      |      |          |        |          |        |       |       |       |         |         |                           |
| 27-11-2023                         | 09:05 | 0    | 0    | infl     | n.v.t. | 0        | n.v.t. | 6,97  | 7,16  | 7,24  | 6,77    | 6,77    | 6,78                      |
| 27-11-2023                         | 10:01 | 0,93 | 0,93 | 11       | 19,94  | 19,94    | 21,36  | 9,96  | 10,14 | 10,13 | 6,84    | 6,8     | 6,81                      |
| 27-11-2023                         | 10:58 | 4,05 | 0,95 | 12       | 20,1   | 40,04    | 21,16  | 10,03 | 10,05 | 10,06 | 6,88    | 6,84    | 6,85                      |
| 27-11-2023                         | 11:57 | 5,03 | 0,98 | 13       | 19,97  | 60,01    | 20,31  | 9,67  | 9,85  | 9,89  | 6,85    | 6,85    | 6,86                      |
| 27-11-2023                         | 12:56 | 6,02 | 0,98 | 14       | 20,03  | 80,04    | 20,37  | 9,48  | 9,56  | 9,56  | 6,82    | 6,83    | 6,84                      |
| 27-11-2023                         | 13:52 | 6,95 | 0,93 | 15       | 20     | 100,04   | 21,43  | 9,2   | 9,17  | 9,3   | 6,83    | 6,86    | 6,87                      |
| 27-11-2023                         | 14:38 | 7,72 | 0,77 | 16       | 16,3   | 116,34   | 21,26  | 8,89  | 9,02  | 9,03  | 6,87    | 6,85    | 6,87                      |

| Experiment IEX M940 in de Cl vorm |          |          |          |      |         |      |         |      |         |        |         |        |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|------|---------|------|---------|------|---------|--------|---------|--------|
| Datum                             | Looptijd | Water hh | Monster  | pH 1 | EGV 1   | pH 2 | EGV 2   | pH 3 | EGV 3   | pH gem | EGV gem | CaCO3  |
|                                   | (h)      | (l)      |          | (-)  | (mS/cm) | (-)  | (mS/cm) | (-)  | (mS/cm) | (-)    | (mS/cm) | (mg/l) |
| 6-12-2023                         | 0        | 0        | Influent | 9,16 | 6,88    | 9,14 | 6,96    | 9,22 | 6,94    | 9,17   | 6,93    | 51     |
| 6-12-2023                         | 2        | 4        | Effl 1   | 5,0  | 6,94    | 5,32 | 7,00    | 5,12 | 7,00    | 5,14   | 6,98    | 4      |
| 6-12-2023                         | 12       | 24       | Effl 2   | 5,1  | 6,96    | 5,22 | 7,03    | 5,10 | 7,03    | 5,14   | 7,01    | 5      |
| 7-12-2023                         | 22       | 44       | Effl 3   | 5,0  | 6,97    | 5,24 | 7,03    | 5,10 | 7,03    | 5,11   | 7,01    | 5      |
| 7-12-2023                         | 32       | 64       | Effl 4   | 5,29 | 7,08    | 5,29 | 7,06    | 5,19 | 7,05    | 5,26   | 7,06    | 5      |
| 8-12-2023                         | 42       | 84       | Effl 5   | 5,2  | 7,04    | 5,24 | 7,04    | 5,15 | 7,04    | 5,20   | 7,04    | 5      |
| 8-12-2023                         | 52       | 104      | Effl 6   | 5,22 | 7,04    | 5,25 | 7,04    | 5,19 | 7,04    | 5,22   | 7,04    | 4      |
| 7-12-2023                         | 24       | 48       | Effl 3b  | 4,8  | 6,98    | n.g. | n.g.    | n.g. | n.g.    | #N/A   | #N/A    | 9      |

## Regeneratie experimenten

| Experiment 2               |       | Hars: |       |  | MC290 H  |      | EGV   | T    |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|----------------------------|-------|-------|-------|--|----------|------|-------|------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--|-------------|--------------|
| Datum                      | Tijd  |       |       |  | pH       |      |       |      |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
| 24-1-2024                  | 08:30 | 0     | 0     |  | 6,5      | 6,52 | 122,4 | 19,2 |       | fles loog en zuur vooraf wegen                                                          |                                   |  |             |              |
|                            | 08:45 | 15    | 3,42  |  | 6,5      | 6,42 | 112,3 | 19,3 |       | zo'n 20 BV's aanhouden per experiment (1,5 h looptijd)                                  |                                   |  |             |              |
|                            | 09:00 | 30    | 6,84  |  | 6,5      | 6,41 | 112   | 19,4 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 09:15 | 45    | 10,26 |  | 6,5      | 6,43 | 111,7 | 19,5 |       | ml 0,1 M                                                                                | teststaafje Ca                    |  |             |              |
|                            | 09:30 | 60    | 13,68 |  | 6,5      | 6,44 | 111,4 | 19,5 | loog: | 31,42                                                                                   |                                   |  |             |              |
|                            | 10:00 | 90    | 20,52 |  | 6,5      | 6,44 | 110,9 | 19,6 | zuur: | 11,68                                                                                   | Ca > 4 mol/m3                     |  |             |              |
|                            | 11:15 | 0     | 0     |  | 5,5      | 5,51 | 121,7 | 19,2 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 11:30 | 15    | 3,42  |  | 5,5      | 5,49 | 120,8 | 19,5 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 11:45 | 30    | 6,84  |  | 5,5      | 5,49 | 121   | 19,6 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 12:00 | 45    | 10,26 |  | 5,5      | 5,5  | 121,2 | 19,7 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 12:15 | 60    | 13,68 |  | 5,5      | 5,5  | 121,3 | 19,7 | loog: | 9,55                                                                                    |                                   |  |             |              |
|                            | 12:45 | 90    | 20,52 |  | 5,5      | 5,49 | 121,6 | 19,9 | zuur: | 27,79                                                                                   | Ca > 4 mol/m3                     |  | massa's IEX | dried on air |
|                            | 13:00 | 0     | 0     |  | 4,5      | 4,51 | 122,3 | 19,1 |       |                                                                                         |                                   |  | 300 ml      |              |
|                            | 13:15 | 15    | 3,42  |  | 4,5      | 4,5  | 122,2 | 19,5 |       |                                                                                         |                                   |  | 255,81 g    |              |
|                            | 13:30 | 30    | 6,84  |  | 4,5      | 4,51 | 122,4 | 19,7 |       |                                                                                         |                                   |  | 0,85 g/ml   |              |
|                            | 13:45 | 45    | 10,26 |  | 4,5      | 4,51 | 122,5 | 19,8 |       |                                                                                         |                                   |  | 45,58 %ds   |              |
|                            | 14:00 | 60    | 13,68 |  | 4,5      | 4,5  | 122,6 | 19,8 | loog: | 0                                                                                       | weegschaal nakijken, verloopt wat |  |             |              |
|                            | 14:30 | 90    | 20,52 |  | 4,5      | 4,5  | 122,7 | 19,9 | zuur: | 35,79                                                                                   | Ca > 4 mol/m3                     |  |             |              |
| 25-1-2024                  | 10:00 | 0     | 0     |  | 3,5      | 3,5  | 120,4 | 19   |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 10:15 | 15    | 3,42  |  | 3,5      | 3,58 | 120,3 | 19,2 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 10:30 | 30    | 6,84  |  | 3,5      | 3,59 | 120   | 19,3 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 10:45 | 45    | 10,26 |  | 3,5      | 3,59 | 119,6 | 19,4 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            | 11:00 | 60    | 13,68 |  | 3,5      | 3,6  | 119,3 | 19,4 | loog: | 0                                                                                       |                                   |  |             |              |
|                            | 11:30 | 90    | 20,52 |  | 3,5      | 3,6  | 118,6 | 19,5 | zuur: | 86,01                                                                                   | Ca > 4 mol/m3                     |  |             |              |
| Experiment 3               |       | Hars: |       |  | MC290 Na |      |       |      |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
| Datum                      | Tijd  |       |       |  | pH       |      | EGV   | T    |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
| 31-1-2024                  | 07:45 | 0     | 0     |  | 6,5      | 6,54 | 122,4 | 18,9 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
| hoogte kolom 47 cm droog   |       | 15    | 3,42  |  | 6,5      | 6,58 | 110,8 | 19   |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 6,5      | 6,59 | 110,6 | 19   |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 6,5      | 6,58 | 110,5 | 19,2 |       | ml 0,1 M                                                                                | teststaafje Ca                    |  | massa's IEX | dried on air |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 6,5      | 6,58 | 110,3 | 19,2 | loog: | 0                                                                                       |                                   |  | 300 ml      |              |
|                            | 09:15 | 90    | 20,52 |  | 6,5      | 6,55 | 110   | 19,4 | zuur: | 52,12                                                                                   | Ca > 4 mol/m3                     |  | 252,38 g    |              |
|                            | 09:30 | 0     | 0     |  | 5,5      | 5,52 | 122,8 | 18,9 |       |                                                                                         |                                   |  | 0,84 g/ml   |              |
|                            |       | 15    | 3,42  |  | 5,5      | 5,64 | 121,4 | 19,1 |       |                                                                                         |                                   |  | 43,82 %ds   |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 5,5      | 5,64 | 120,8 | 19,2 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 5,5      | 5,58 | 120,2 | 19,3 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 5,5      | 5,61 | 119,9 | 19,3 | loog: | 0                                                                                       |                                   |  |             |              |
|                            | 11:00 | 90    | 20,52 |  | 5,5      | 5,6  | 119,1 | 19,5 | zuur: | 81,78                                                                                   | Ca > 4 mol/m3                     |  |             |              |
|                            | 11:28 | 0     | 0     |  | 4,5      | 4,51 | 122,7 | 18,9 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 15    | 3,42  |  | 4,5      | 4,62 | 121,7 | 19,1 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 4,5      | 4,55 | 121,1 | 19,2 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 4,5      | 4,61 | 120,4 | 19,4 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 4,5      | 4,62 | 120,3 | 19,4 | loog: | 0                                                                                       | weegschaal nakijken, verloopt wat |  |             |              |
|                            | 12:58 | 90    | 20,52 |  | 4,5      | 4,53 | 119,3 | 19,5 | zuur: | 91,18                                                                                   | Ca > 4 mol/m3                     |  |             |              |
|                            | 13:20 | 0     | 0     |  | 3,5      | 3,56 | 120,4 | 19   |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 15    | 3,42  |  | 3,5      | 3,76 | 119,6 | 19,3 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 3,5      | 3,76 | 118,6 | 19,4 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 3,5      | 3,74 | 117,9 | 19,4 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 3,5      | 3,75 | 117,1 | 19,5 | loog: | 0                                                                                       |                                   |  |             |              |
|                            | 14:50 | 90    | 20,52 |  | 3,5      | 3,7  | 115,4 | 19,6 | zuur: | 131,55                                                                                  | Ca > 4 mol/m3                     |  |             |              |
| Experiment 4               |       | Hars: |       |  | MC940 Cl |      |       |      |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
| Datum                      | Tijd  |       |       |  | pH       |      | EGV   | T    |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
| 1-2-2024                   | 08:30 | 0     | 0     |  | 6,5      | 6,55 | 120,8 | 18,7 |       | beetje hars in de leiding naar de reactor, eruit gezogen elke keer voor plaatsen nieuwe |                                   |  |             |              |
| hoogte kolom 32,5 cm droog |       | 15    | 3,42  |  | 6,5      | 6,61 | 114,3 | 18,8 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 6,5      | 6,57 | 114,3 | 18,9 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 6,5      | 6,56 | 113,4 | 18,9 |       | ml 0,1 M                                                                                | teststaafje Ca                    |  | massa's IEX | dried on air |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 6,5      | 6,55 | 113,2 | 18,9 | loog: | 0                                                                                       | n.v.t.                            |  | 200 ml      |              |
|                            | 10:00 | 90    | 20,52 |  | 6,5      | 6,53 | 112,9 | 19   | zuur: | 46,34                                                                                   |                                   |  | 186,2 g     |              |
|                            | 10:10 | 0     | 0     |  | 5,5      | 5,57 | 120,1 | 18,3 |       |                                                                                         |                                   |  | 0,93 g/ml   |              |
|                            |       | 15    | 3,42  |  | 5,5      | 5,69 | 118,9 | 18,7 |       |                                                                                         |                                   |  | 38,0 %ds    |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 5,5      | 5,59 | 118,3 | 18,9 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 5,5      | 5,53 | 118,1 | 19   |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 5,5      | 5,55 | 117,8 | 19,1 | loog: | 0                                                                                       |                                   |  |             |              |
|                            | 11:40 | 90    | 20,52 |  | 5,5      | 5,56 | 117,6 | 19,2 | zuur: | 55,09                                                                                   |                                   |  |             |              |
|                            | 11:55 | 0     | 0     |  | 4,5      | 4,55 | 120,5 | 18,8 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 15    | 3,42  |  | 4,5      | 4,63 | 119,6 | 19   |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 4,5      | 4,62 | 119,2 | 19,2 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 4,5      | 4,54 | 118,8 | 19,3 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 4,5      | 4,6  | 118,7 | 19,3 | loog: | 0                                                                                       |                                   |  |             |              |
|                            | 13:25 | 90    | 20,52 |  | 4,5      | 4,53 | 118,2 | 19,4 | zuur: | 60,45                                                                                   |                                   |  |             |              |
|                            | 13:35 | 0     | 0     |  | 3,5      | 3,62 | 120,2 | 18,8 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 15    | 3,42  |  | 3,5      | 3,65 | 119,3 | 19,2 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 30    | 6,84  |  | 3,5      | 3,64 | 118,3 | 19,3 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 45    | 10,26 |  | 3,5      | 3,63 | 117,9 | 19,3 |       |                                                                                         |                                   |  |             |              |
|                            |       | 60    | 13,68 |  | 3,5      | 3,61 | 117,2 | 19,4 | loog: | 0                                                                                       |                                   |  |             |              |
|                            | 15:05 | 90    | 20,52 |  | 3,5      | 3,61 | 116   | 19,5 | zuur: | 97,13                                                                                   |                                   |  |             |              |

## V ICP-MS scan en overige analyseresultaten effluent WBA CI-vorm

|                    |                      |         |
|--------------------|----------------------|---------|
| pH                 | pH                   | 4,8     |
| Temperatuur (pH)   | °C                   | 19,6    |
| Waterstofcarbonaat | mg/l                 | <6,1    |
| DOC                | mg C/l               | 1,5     |
| ICP-MS             |                      |         |
| Calcium            | mg/l                 | <1,0    |
| Kalium             | mg/l                 | 32      |
| Magnesium          | mg/l                 | <1,0    |
| Natrium            | mg/l                 | 1300    |
| Silicium           | mg/l                 | 15      |
| ICP-MS Scan        |                      |         |
| Lithium            | µg/l                 | 25      |
| Beryllium          | µg/l                 | 0,01    |
| Boor               | µg/l                 | 410     |
| Natrium            | µg/l                 | 1180900 |
| Magnesium          | µg/l                 | 14      |
| Aluminium          | µg/l                 | 2,4     |
| Kalium             | µg/l                 | 30900   |
| Calcium            | µg/l                 | 640     |
| Scandium           | µg/l                 | <1,0    |
| Titanium           | µg/l                 | <0,50   |
| Vanadium           | µg/l                 | 0,12    |
| Chroom             | µg/l                 | 3,1     |
| Mangaan            | µg/l                 | 1,1     |
| IJzer              | µg/l                 | 30      |
| Kobalt             | µg/l                 | 0,06    |
| Nikkel             | µg/l                 | 1,6     |
| Koper              | µg/l                 | 7,6     |
| Zink               | µg/l                 | 14      |
| Gallium            | µg/l                 | <0,01   |
| Germanium          | µg/l                 | 0,03    |
| Arseen             | µg/l                 | <0,50   |
| Seleen             | µg/l                 | 8,1     |
| Rubidium           | µg/l                 | 6,4     |
| Strontium          | µg/l                 | 0,23    |
| Yttrium            | µg/l                 | <0,01   |
| Zirkonium          | µg/l                 | <0,05   |
| Niobium            | µg/l                 | <0,05   |
| Molybdeen          | µg/l                 | 0,72    |
| Ruthenium          | µg/l                 | <0,01   |
| Palladium          | µg/l                 | 0,4     |
| Zilver             | µg/l                 | <0,02   |
| Cadmium            | µg/l                 | 0,02    |
| Indium             | µg/l                 | <0,01   |
| Tin                | µg/l                 | <0,05   |
| Antimoon           | µg/l                 | <0,02   |
| Telluur            | µg/l                 | <0,05   |
| Cesium             | µg/l                 | 0,03    |
| Barium             | µg/l                 | 0,20    |
| Lanthanium         | µg/l                 | <0,01   |
| Cerium             | µg/l                 | <0,01   |
| Praseodymium       | µg/l                 | <0,01   |
| Neodymium          | µg/l                 | <0,01   |
| Samarium           | µg/l                 | <0,01   |
| Europium           | µg/l                 | <0,01   |
| Gadolinium         | µg/l                 | <0,01   |
| Terbium            | µg/l                 | <0,01   |
| Dysprosium         | µg/l                 | <0,01   |
| Holmium            | µg/l                 | <0,01   |
| Erbium             | µg/l                 | <0,01   |
| Thulium            | µg/l                 | <0,01   |
| Ytterbium          | µg/l                 | <0,01   |
| Lutenium           | µg/l                 | <0,01   |
| Hafnium            | µg/l                 | <0,02   |
| Tantalum           | µg/l                 | <0,02   |
| Wolfraam           | µg/l                 | <0,02   |
| Renium             | µg/l                 | <0,01   |
| Osmium             | µg/l                 | <0,01   |
| Iridium            | µg/l                 | <0,01   |
| Platina            | µg/l                 | <0,01   |
| Thallium           | µg/l                 | 0,02    |
| Lood               | µg/l                 | 1,0     |
| Bismut             | µg/l                 | <0,05   |
| Thorium            | µg/l                 | <0,10   |
| Uranium            | µg/l                 | <0,01   |
| Aqualab Zuid       |                      |         |
| Ammonium S         | mg/l NH <sub>4</sub> | 14      |
| Chloride           | mg/l Cl              | 2100    |
| Nitraat S          | mg/l NO <sub>3</sub> | <0,2    |
| Sulfaat            | mg/l SO <sub>4</sub> | <5      |