

Effect van variaties in chloride concentratie op de efficiency van een warmte- en koudeopslag system.

BSc Eindproject

Auteur

Ivor Stevens

Technische Universiteit Delft

Faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen

Begeleider

Ir. J.M. Bloemendal

Delft, Juni 2016

Voorwoord

Dit rapport is opgesteld in het kader van het Civiele BSc programma op de Technische Universiteit in Delft. Dit BSc eindproject is bedoelt om het effect te onderzoeken van de dichtheid gedreven stroming op de efficiency van warmte- en koudeopslag (WKO) systemen. De nadruk wordt gelegd op het aandeel van de chloride concentratie op de dichtheid en de gevolgen hiervan.

Hierbij word ik begeleid door Ir. J.M. Bloemendal.

Als eerste wil ik de begeleider Ir. J.M. Bloemendal bedanken voor de uitvoerige hulp gedurende het project. Verder wil ik Koen Geul Bedanken voor zijn steun voor het SEAWAT programma. Ook wil ik Mark Bakker en Bas des Tomes bedanken voor de hulp met het FloPy programma. Als laatste wil ik mijn ouders en mijn huisgenoten bedanken voor de steun en kritiek tijdens het opstellen van dit rapport.

Ivor Stevens

Delft, Juni 2016

Samenvatting

Dit onderzoek is uitgevoerd om de dichtheid gedreven stroming door chloride concentratie te bestuderen en het effect hiervan op de efficiency van warmte- en koudeopslag systemen (WKO). Hierbij wordt gekeken naar de situatie in Amsterdam. Hier is namelijk een aanzienlijke aquifer aanwezig die goed gebruikt kan worden voor WKO systemen. Het onderzoek heeft zich specifiek gericht op Monobron systemen. Een Monobron systeem is een open vorm van WKO, waarbij de warme en koude bron boven elkaar zijn gesitueerd.

Er is echter een verschil in dichtheid op verschillende diepten. Dit wordt veroorzaakt doordat de zee, met een hoge dichtheid, ook invloed heeft op het grondwater. Naar de diepte toe, wordt het grondwater zwaarder. Zwaartekracht zorgt ervoor dat water met een relatief hoge dichtheid zakt en dat water met een relatief lage dichtheid stijgt. De thermische energie zakt of stijgt hierbij mee. Een deel van deze thermische energie wordt dan verloren.

Bij het initiële gebruik van een Monobron is er een gradiënt in de chloride concentratie. De koude bron ligt in een hogere chloride concentratie dan de warme bron. Bij het gebruik van een Monobron wordt het water uit de ene bron in de andere bron geïnfiltreerd. Dit water gaat zich mengen met het aanwezige water. Dit mengen heeft als effect dat het chloride gehalte van het geïnfiltreerde water uiteindelijk een gemiddelde waarde wordt van beide concentraties.

Om het effect van de dichtheid gedreven stroming te bepalen, zijn er scenario's gemaakt waarbij de ontwerp dimensies variabel zijn. Elk scenario is berekend voor zowel met als zonder dichtheid gedreven stroming. Hierna worden de scenario's beoordeeld op de efficiency op zowel korte als lange termijn.

Hieruit blijkt dat de dichtheid gedreven stroming door de variaties in chloride concentratie een negatief effect heeft op de efficiency van een Monobron. In het eerste jaar ligt dit verlies tussen de 1% en 3% en na 10 jaar ligt dit verlies tussen de 0% en 5%. Dit effect is echter niet van zeer grote significantie en kan verwaarloosd worden in vergelijking met het verlies wat optreedt wanneer de dichtheid gedreven stroming niet wordt meegenomen.

Een kleinere onderlinge verticale afstand zorgt voor een kleiner verschil in dichtheid tussen de bronnen. Dit zorgt in de begin jaren voor een kleiner verlies door dichtheid gedreven stroming. Vanaf jaar 3 dat de Monobron in werking is zorgt het isolerende effect van een grotere onderlinge afstand voor een hogere efficiency. Een grote onderlinge afstand tussen de bronnen zorgt voor slechte begin jaren, maar een hoge efficiency bij langdurig gebruik.

De Monobron zorgt voor een verandering in de oorspronkelijke chloride concentratie verdeling. Dit effect is merkbaar tot anderhalf maal de thermische straal. Hierbuiten is het verschil met de oorspronkelijke verdeling en de situatie na langdurig gebruik van de Monobron verwaarloosbaar.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
1.1 WKO.....	1
1.2 Monobron en Doublet.....	1
2. Doel & Aanpak.....	3
2.1 Doel	3
2.2 Aanpak.....	3
2.2.1 Inzicht in optredende processen via bestudering van theorie.....	3
2.2.2 Kwantificering door modellering van een case studie.	4
3. Theorie.....	5
3.1 Beschrijving optredende processen.	5
3.2 Kwantificering dichtheidsstroming.....	6
3.2.1 MODFOW	7
3.2.2 MT3DMS.....	7
3.2.3 Dichtheidsstroming	8
4. Beschrijving case	9
4.1 Model parameters.....	9
4.1.1 Chloride concentratie	9
4.1.2 Hydraulische conductiviteit.....	10
4.1.3 Overige parameters.....	10
4.2 Toegepaste Variabelen.....	11
4.2.1 Opslagvolume.....	11
4.2.2 Filterlengte en tussenafstand.....	12
4.3 Scenario's	12
4.4 Beoordeling	13
5. Resultaten.....	14
5.1 Zonder dichtheid gedreven stroming.....	14
5.1.1 Groep A. Variabel opslagvolume	14
5.1.2 Groep B. Variabele tussenafstand.....	14
5.1.3 Groep C. Variabel opslagvolume, filterlengte en tussenafstand.....	15
5.2 Met dichtheid gedreven stroming.....	15
5.2.1 Groep A. Variabel opslagvolume met dichtheid gedreven stroming.	15
5.2.2 Groep B. Variabele tussenafstand met dichtheid gedreven stroming.	15

5.2.3 Groep C. Variabel opslagvolume, filterlengte en tussenafstand met dichtheid gedreven stroming.	16
5.3 Vergelijking.....	16
5.3.1 Groep A vergelijking met en zonder dichtheid gedreven stroming.	16
5.3.2 Groep B vergelijking met en zonder dichtheid gedreven stroming.	17
5.3.3 Groep C vergelijking met en zonder dichtheid gedreven stroming.	19
5.4 Effect van een Monobron installatie op de aanwezige chloride concentratie.	21
5.5 Discussie.	24
6. Conclusies.....	25
7. Aanbevelingen.....	26
Referenties	27
Bijlage A.....	a
Bijlage B.....	b

1. Inleiding

1.1 WKO

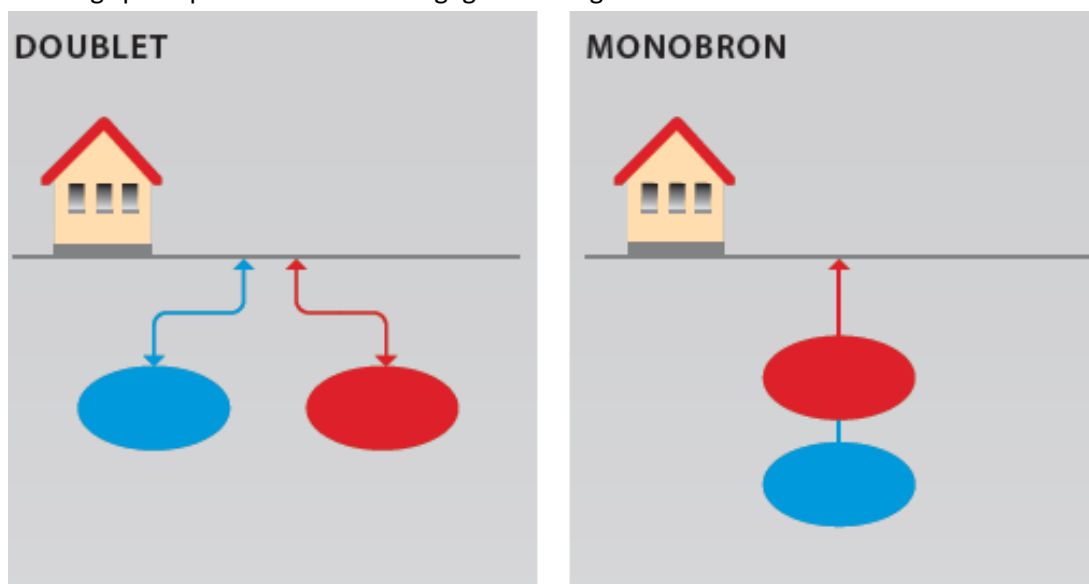
Op het moment is er een grote vraag naar reductie van CO₂ uitstoot. Circa 40 % van de CO₂ uitstoot wordt momenteel veroorzaakt door de verwarming en koeling van gebouwen. Daarom is het belangrijk om de verwarming en koeling van gebouwen te verduurzamen bijvoorbeeld door middel van bodemenergie.

Warmte- en koudeopslag (WKO) is een manier om thermische energie op te slaan in de bodem. De bodem kan worden gezien als een grote batterij. Gedurende de winter is er behoefte aan warmte. In dit seizoen is er thermische energie nodig om gebouwen te verwarmen. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van het relatief warme grondwater. Dit grondwater kan gebruikt worden om het gebouw mee te verwarmen. Nadat de warmte afgifte heeft plaatsgevonden kan het op een ander punt de grond in geïnfiltrteerd worden.

Gedurende de zomer kan dit koude water weer opgepompt worden om de koelvraag te vullen. Hierbij ontstaat weer warm water, wat in de winter weer gebruikt kan worden om de warmtevraag te vullen.

1.2 Monobron en Doublet

Er zijn 2 basis methoden om gebruik te maken van het WKO systeem. Doublet of Monobron. Het werkings principe van beide is weergegeven in Figuur 1 .



Figuur 1. Doublet en Monobron. (Algemeen Cahier)

Bij een Doublet wordt het koude en warme water opgeslagen in bellen waarbij een grote horizontale afstand aanwezig is tussen de koude en warme bron. Deze horizontale afstand zorgt ervoor dat de bellen niet met elkaar in aanraking komen, zodat verlies wordt voorkomen. Deze manier van opslag heeft een grote capaciteit, omdat de bronnen gebruik kunnen maken van de gehele aquifer.

Bij de Monobron wordt het koude en warme water opgeslagen in bellen die onder elkaar zijn gesitueerd. Een verticale afstand zorgt ervoor dat de bellen niet met elkaar in aanraking komen. Deze manier van opslag heeft een kleinere capaciteit, omdat niet de gehele verticale afstand van de aquifer gebruikt kan worden. Er is namelijk een isolerende tussenafstand tussen de bronnen nodig.

Monobronnen worden veel toegepast in dikke aquifers, waarbij de dichtheid van het grondwater kan variëren over de diepte. Er is nog weinig bekend over het effect van een variërende dichtheid op WKO systemen.

2. Doel & Aanpak

2.1 Doel

Het doel van dit onderzoek is om te bepalen of de dichtheid gedreven stroming door variaties in chloride concentratie een groot effect heeft op de efficiency van de Monobron en welke ontwerp aspecten daarbij een rol spelen.

Dit splitsen we op in een twee deelvragen:

- In welke mate zorgt de door de dichtheid gedreven stroming in een standaard Monobron voor een vermindering in efficiency?

Met deze deelvraag wordt beantwoord in hoeverre de dichtheid gedreven stroming effect heeft op de efficiency. Er kan onderzocht worden naar de effecten op lange en korte termijn. Zijn de effecten significant genoeg om er maatregelen voor te nemen?

- Wat is het effect van meerdere cycli op de verdeling in chloride concentratie.

Door het continue gebruik van een Monobron installatie wordt er grondwater van ondiepe lagen geïnfiltreerd in diepe lagen en vice versa. De verschillende chloride concentraties worden hierbij meegenomen, wat resulteert in een verandering in de originele chloride concentratie. Er kan dus onderzocht worden in hoeverre dit effect merkbaar is.

2.2 Aanpak

Om de deelvragen te beantwoorden wordt de volgende aanpak gevolgd.

2.2.1 Inzicht in optredende processen via bestudering van theorie.

Om inzicht te vergaren over WKO systemen in het algemeen is er gebruik gemaakt van het Cahier Bodemenergie warm aanbevolen (Bloemendal, 2013). Hierin zijn de basis principes van de werking van WKO systemen uitgelegd. Met behulp van vergelijkbare onderzoeken, zoals het rapport over zoetwater opslag in zoute aquifers (van Ginkel, 2007) en het rapport over toekomstig gebruik van WKO systemen (Caljé, 2010) is de benodigde theorie en data verkregen voor het gebruik in dit rapport.

Met behulp van het artikel over dichtheid compensatie (van Lopik, 2016) zijn de effecten van chloride concentratie op de dichtheid beschreven. Om de dichtheid gedreven stroming te modelleren is er gebruik gemaakt van de SEAWAT handleiding (CD Langevin et al. 2008) en FloPy beschrijving (M. Bakker, 2003)

2.2.2 Kwantificering door modellering van een case studie.

Als case studie wordt er gekeken naar een standaard Monobron installatie in Amsterdam. Er wordt gebruik gemaakt van de aanwezige aquifer, waarin bovenin de warme bron is gesitueerd en onderin de koude bron is gesitueerd. Er wordt een tijdsperiode van 10 jaar aangehouden om de efficiency te bepalen over de jaren.

De volgende varianten worden behandeld.

Variant 1. Zonder dichtheid gedreven stroming.

Hiervoor worden er verschillende scenario's opgebouwd. Eerst wordt gekeken naar het effect van een variërend jaarlijks opslagvolume. Dit wordt vergeleken aan de hand van de efficiency. De term 'efficiency' wordt in het volgende hoofdstuk verder uitgelegd. Vervolgens wordt gekeken naar het effect van een variërend opslagvolume met bijbehorende filterlengte en tussenafstand. De tussenafstand is de verticale afstand tussen de bovenste filter (koude bron) en de onderste filter (warme bron). Als laatste wordt er gekeken naar een variërende tussenafstand, waarbij de rest constant is.

Variant 2. Met dichtheid gedreven stroming.

Hierbij worden dezelfde scenario's opgebouwd als bij variant 1. Het verschil is dat hierbij wel de dichtheid stroming door variërend chloride concentratie wordt meegenomen. Door variant 1 met variant 2 te vergelijken, kan er worden gekeken naar het effect van de dichtheid gedreven stroming.

Hierna wordt nog bekeken wat het effect is van de Monobron op de chloride concentratie in de verschillende dieptes. Hierbij wordt ook de vergelijking gemaakt tussen met en zonder dichtheid gedreven stroming.

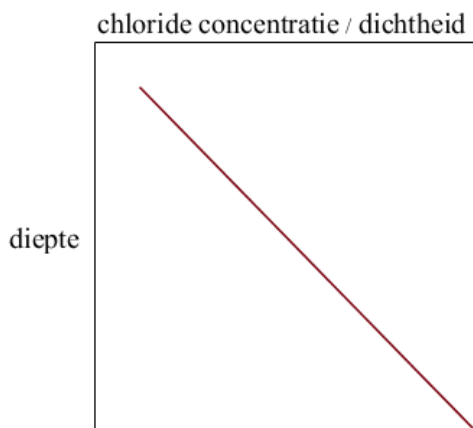
3. Theorie

In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de uitleg over de chloride concentratie in Amsterdam en de effecten ervan op de verplaatsing van de bronenergie. Vervolgens wordt uitgelegd welke programma's gebruikt worden in de berekening en welke fundamentele formules deze programma's gebruiken.

3.1 Beschrijving optredende processen.

Voor de situatie in Amsterdam is de grondwaterkwaliteit niet uniform over de diepte. Hoe dieper in de bodem men kijkt, hoe hoger de chloride concentratie. Dit wordt veroorzaakt door de geringe afstand van de Noordzee. Het zeewater infiltreert namelijk landinwaarts door de aanwezige zand lagen en mengt zich daar met het aanwezige water.

Het resultaat ervan is dat er een verdeling ontstaat in chloride concentratie in verhouding tot de diepte. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.

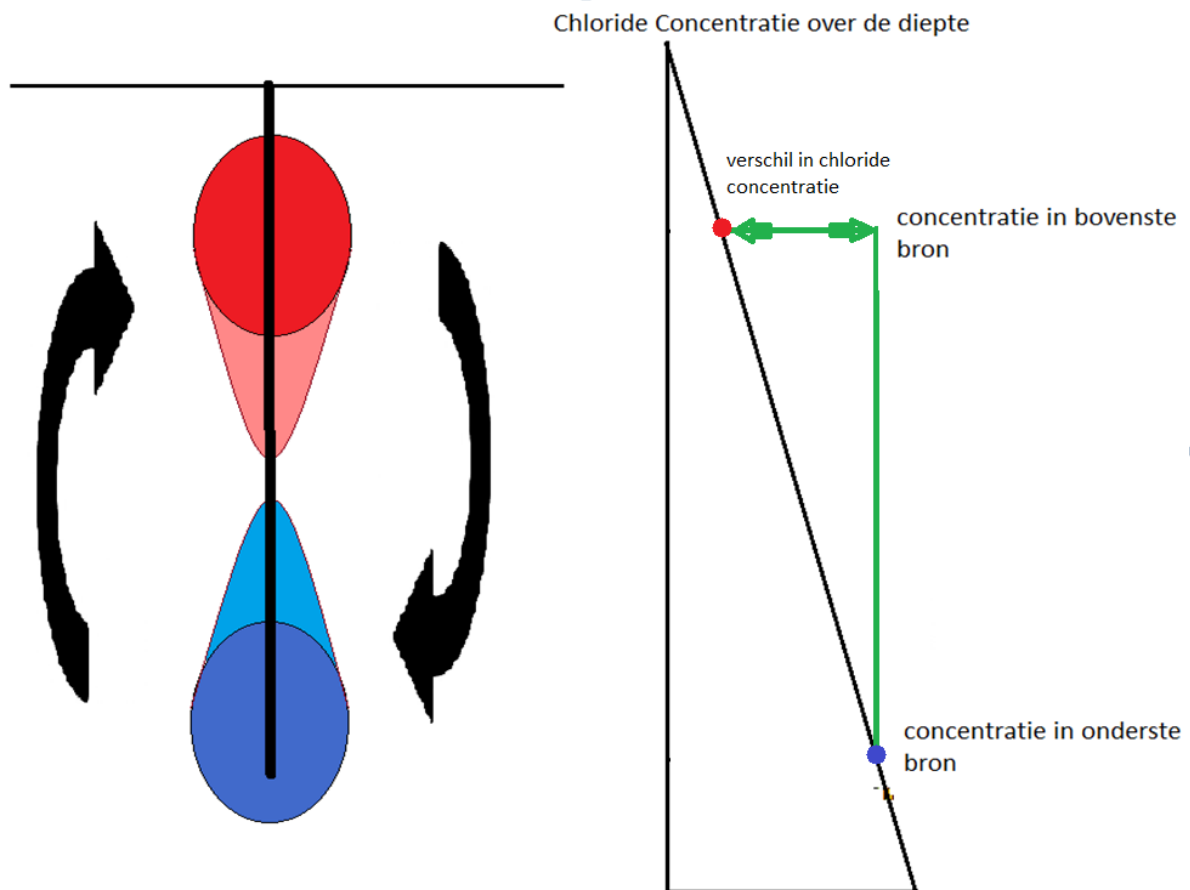


Figuur 2. Dichtheid over de diepte.

Bij het gebruik van een monobron wordt het warme water van de ondiepe laag koud in een diepe laag geïnfiltreerd. Tijdens het pompen wordt ook de chloride concentratie in het water meegepompt.

Gedurende de zomer wordt er water uit diepe laag, met de hoge chloride concentratie, geïnfiltreerd in de ondiepe laag, waar een lage chloride concentratie aanwezig is. Hierdoor ontstaat een verschil in dichtheid. In figuur 3 is dit rechts schematisch weergegeven. Het geïnfiltreerde water is zwaarder dan het omliggende water. Het verschil in dichtheid veroorzaakt een dichtheid gedreven stroming. Hierdoor zal het geïnfiltreerde water zakken. In figuur 3 is dit links weergegeven met het licht rode vlak.

In de winter wordt er juist water uit de ondiepe laag, met een lage dichtheid, geïnfiltreerd in de diepe laag, waar een hoge chloride concentratie aanwezig is. Het geïnfiltreerde water heeft een lagere dichtheid dan het omliggende water en zal daardoor opdrijven. Dit is weergegeven met het licht blauwe vlak in figuur 3. Na verloop van de tijd wordt de chloride concentratie in de twee bellen gelijk aan elkaar.



**Figuur 3. Links: Effect van dichtheid gedreven stroming op energieverplaatsing.
Rechts: Verschil in dichtheid door chloride concentratie.**

Het gevolg hiervan bij een Monobron is dat de thermische energie van de bronnen naar elkaar toe zullen bewegen. Wanneer de thermische energie van beide bronnen met elkaar in aanraking komen wordt de thermische energie geneutraliseerd. De verloren thermische energie door de dichtheid gedreven stroming zorgt voor een reductie in efficiency.

3.2 Kwantificering dichtheidsstroming.

Om het effect van dichtheid gedreven stroming te beschouwen is er een rekenmethode nodig. Er is gekozen om gebruik te maken van de, door de U.S. Geological Survey beschikbaar gemaakte programma's MODFLOW, MT3DMS en SEAWAT. Deze programma's berekenen een bepaald stromingsgedrag aan de hand van ingevoerde waarden.

3.2.1 MODFLOW

Het MODFLOW programma modelleert de stroming van grondwater. Dit wordt berekend aan de hand van drukverschillen. Water stroomt van een hoog piëzometrisch niveau naar een laag piëzometrisch niveau. De stroming ondergaat weerstand door de mate van doorlaatbaarheid van het medium, de hydraulische conductiviteit.

Stroming door de bodem voor 3 dimensies wordt beschreven door: (Harbaugh, 2005)

$$\nabla(K\nabla h) + W = S_s \frac{\delta h}{\delta t}$$

Waarbij:

K	Hydraulische conductiviteit langs de corresponderende assen.	(m/d)
h	Piëzometrisch niveau.	(m)
W	Instroming in of uit het systeem.	(d ⁻¹)
S_s	Specifieke opslag.	(d ⁻¹)
t	Tijd.	(d)
∇	Gradiënt in x, y en z richting	-

Een lage verticale hydraulische conductiviteit zorgt ervoor dat het water niet in verticale richting stroomt. Dit werkt de dichtheid gedreven stroming tegen. Met de instroming (W) wordt het effect van het infiltreren en onttrekken meegenomen in de berekening. De specifieke opslag neemt de porositeit van het medium in rekening.

3.2.2 MT3DMS

Het effect van de stroming en menging van de chloride concentratie moet ook meegenomen worden in de berekening. Voor de advectie, dispersie en sorptie wordt gebruik gemaakt van MT3DMS. Advectie is het meeliften van de chloride met de waterstroom. Met dispersie wordt het uitwaaiers effect meegenomen van de chloride concentratie en de temperatuur. Met sorptie wordt de uitwisseling van temperatuur tussen het zand en het water berekend. De toegepaste formule is hieronder weergegeven (Zeng & Wang, 1999):

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}\right) \frac{\delta(\theta C)}{\delta t} = \nabla \left[\theta \left(D_m + \alpha \frac{q}{\theta} \right) \nabla C \right] - \nabla(qC) - q'_s C_s$$

Waarbij:

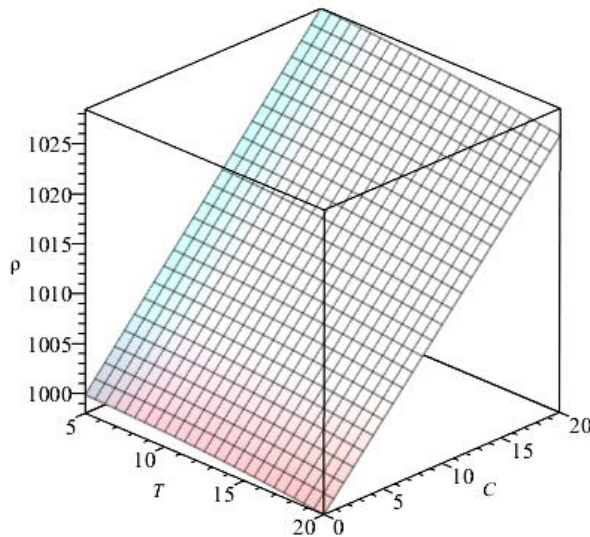
ρ_b	Dichtheid	(kg/m ³)
K_d	Distributie coëfficiënt	(m ³ /kg)
θ	Porositeit	-
C	Concentratie	(kg/m ³)
D_m	Moleculaire difussie coefficient	(m ² /d)
α	Dispersiviteit	(m)
q	Specifiek debiet	(m/d)
q_s	Specifiek debiet van 'Sinks or Sources'	(m/d)
C_s	Sink or Sources concentratie	(kg/m ³)

Met de Sinks or Sources wordt het effect van de infiltratie en onttrekking op de chloride concentratie en temperatuur in rekening genomen.

3.2.3 Dichtheidsstroming

Met het SEAWAT programma implementeert het MT3DMS programma in het MODFLOW programma. Het effect van de variabele dichtheid door chloride concentratie wordt nu meegenomen in de berekening van het piëzometrisch niveau.

Het effect van de chloride concentratie op de dichtheid van het grondwater in combinatie met temperatuur is weergegeven in het figuur 4.(Lopik, 2016)



Figuur 4. Relatie tussen de dichtheid(ρ) in kg/m^3 , temperatuur(T) in $^{\circ}\text{C}$ en de chloride concentratie(C) in kg/m^3 van water.

Hierin is te zien dat de temperatuur bijna geen invloed heeft op de dichtheid in vergelijking met de verschillen in chloride concentraties. De hellingshoek is veel lager voor de temperatuur dan voor de chloride concentratie. Het effect van de temperatuur op de dichtheid wordt daarom verwaarloosd. Bij een temperatuur van 13 graden wordt de volgende vergelijking gevonden voor de dichtheid afhankelijk van de chloride concentratie:(Lopik, 2016)

$$\rho = 999.17 + 1.4050 * C$$

De dichtheid (ρ) en de chloride concentratie (C) is in kg/m^3

4. Beschrijving case

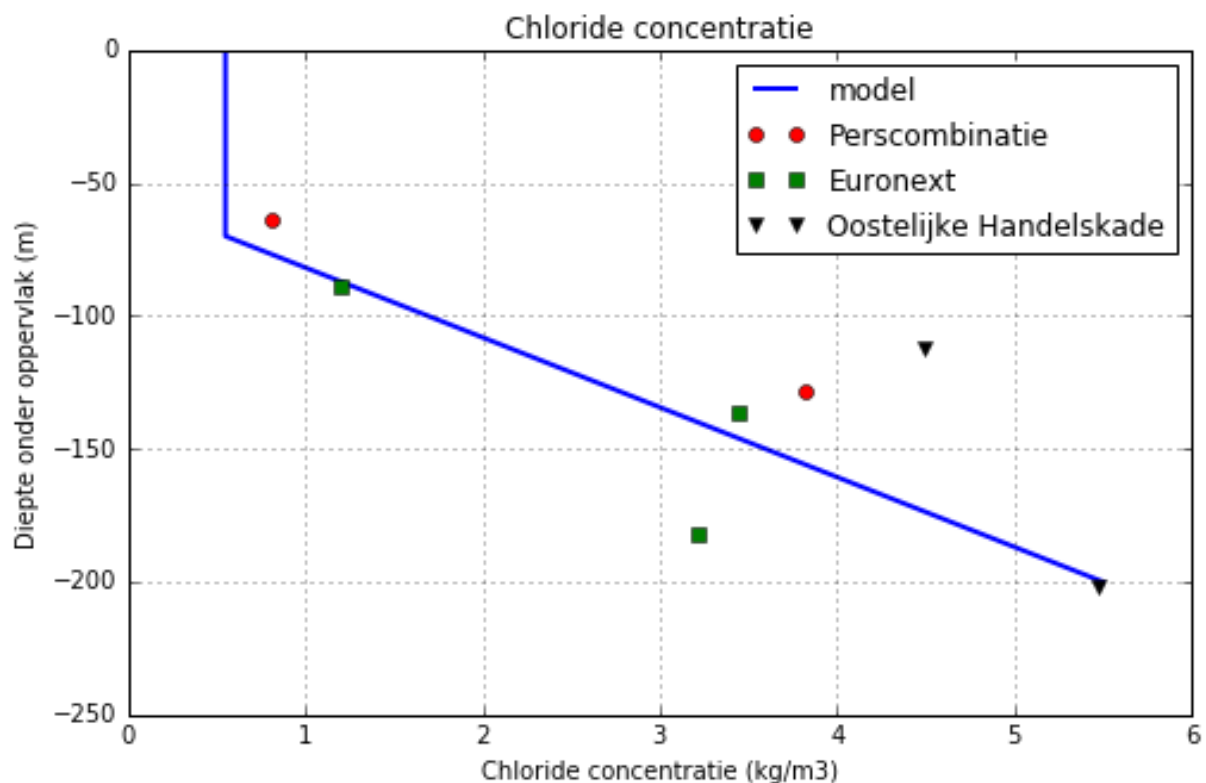
In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de model parameters, de berekende scenario's en de beoordeling. Bij de paragraaf over de model parameters worden alle constante waarden die toegepast zijn in de berekening van de scenario's gedefinieerd. Vervolgens worden de verschillende scenario's bepaald en uitgelegd. In de beoordeling wordt uitgelegd hoe de verschillende scenario's aan elkaar kunnen worden vergeleken.

4.1 Model parameters

In Bijlage A is weergegeven hoe de ondergrond van Amsterdam is opgebouwd. De laag die voor WKO wordt gebruikt is de formatie van Peize, daarom worden de eigenschappen van die laag toegepast in het model.

4.1.1 Chloride concentratie

In dit onderzoek wordt specifiek gekeken naar het effect van chloride op de efficiency. De chloride concentraties zijn weergegeven in figuur 5.



Figuur 5. Aangenomen chloride concentratie. (Caljé, 2010)

De chloride concentraties van het grondwater onder het centrum van Amsterdam zijn afkomstig van de grondwater map van Nederland (Speelman & Houtman, 1979), gecombineerd met metingen van nabij gelegen bronnen. De chloride concentratie is constant op 0.55 kg/m^3 tot een diepte van 70 m, vanaf waar de concentratie lineair toeneemt tot 5.5 kg/m^3 op 200 meter diepte.

4.1.2 Hydraulische conductiviteit

Hydraulische conductiviteit is de doorlaatbaarheid (m/d) van de aquifer. Dit verschilt per laag. De verticale conductiviteit is 1/10 van de horizontale component (Caljé, 2010). In tabel 1 is de conductiviteit voor het gebied van de case (Amsterdam) weergegeven.

Tabel 1. Conductiviteit per laag.(Caljé, 2010)

Laag	Diepte (NAP)	Horizontale Conductiviteit (m/d)	Verticale Conductiviteit (m/d)
Toplaag	0 tot -70	1.	0.1
Aquifer	-70 tot -170	35	3.5
Aquitard	-170 tot -175	0.0001	0.00001
Basislaag (Waalre)	-175 tot -220	5	0.5

4.1.3 Overige parameters

Bij het modelleren zijn ook waarden nodig, die de eigenschappen van het water en de bodem kwantificeren. Deze zijn is weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Parameters. (caljé 2010)

Parameter	Waarde	Eenheid	Afkorting
Thermische conductiviteit	1.76	W/(m°C)	k_T
Thermische conductie	0.104	m/d	
Warmte capaciteit water	4.19	kJ/(kg°C)	c_w
Warmte capaciteit zand	0.89	kJ/(kg°C)	c_a
Retardatie factor	2.03		R
Thermische distributie factor voor zand	$2.12 \cdot 10^{-4}$	m ³ /kg	
Bulk dichtheid van de aquifer	1749	kg/m ³	ρ_s
Effectieve moleculaire diffusie coëfficiënt	$1.0 \cdot 10^{-10}$	m ² /d	$D_{m_salinity}$
Longitudinale dispersiviteit	5	m	α_L
Horizontale dwarse dispersiviteit	0.5	m	α_{TH}
Verticale dwarse dispersiviteit	0.05	m	α_{TV}
Porositeit	0.35	-	θ

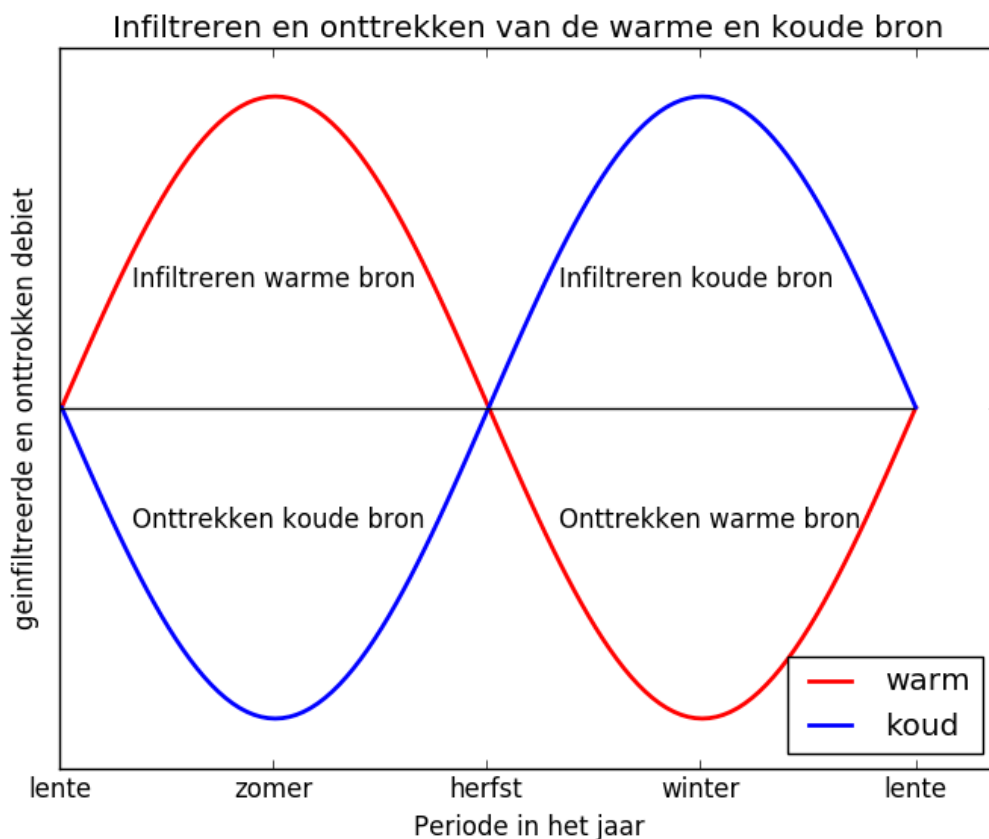
4.2 Toegepaste Variabelen

Als variabelen voor de verschillende scenario's wordt opslagvolume, filterlengte en tussenafstand gebruikt.

4.2.1 Opslagvolume

Per jaar wordt een bepaald ontwerp opslagvolume geïnfiltreerd en onttrokken. Als uitgangspunt is het opslagvolume van de Monobron bij de Rai Amsterdam genomen. Dit is zo gekozen omdat er veel gegevens beschikbaar waren over deze specifieke Monobron. De Monobron bij de Rai Amsterdam heeft een vergund opslagvolume van 60.000 kubieke meter water per jaar. Om het effect van verschillende opslagvolumes te onderzoeken zijn 3 andere waarden hiervan meegenomen. De meest gebruikte dimensies voor het opslagvolume liggen tussen de 30.000 en 60.000 kubieke meter. Dan is er ook gekeken naar grote Monobron installaties met een opslagvolume van 100.000 kubieke meter en kleine Monobron installaties met een opslagvolume van 10.000 kubieke meter.

Het debiet van de scenario's is als een sinus functie gedefinieerd en als zodanig in het model als randvoorwaarde opgelegd. De pieken van deze functie liggen in de zomer en in de winter, zie Figuur 6. Het totale oppervlak onder de sinus functie is gelijk aan het opslagvolume.



Figuur 6. Het infiltreren en onttrekken van de warme bron gedurende het jaar.

4.2.2 Filterlengte en tussenafstand

De filterlengte is de afstand van de bovenzijde van de bron tot de onderzijde van de bron. Een langere filterlengte zorgt voor een lange en smalle cilinder vormige bron. Een korte filterlengte zorgt voor een korte en brede cilinder vormige bron. De optimale verhouding tussen de filterlengte(L) in meter en de straal(R) in meter van de bron is : (Doughty, 1982)

$$\frac{L}{R} = 1.5$$

De thermische straal van de bron is:

$$R = \sqrt{\frac{c_w * V}{c_a * \pi * L}}$$

Waarin c_w en c_a gelijk zijn aan de warmte capaciteit van water en zand. V is het opslagvolume. Gecombineerd geeft dit:

$$L = \sqrt[3]{\frac{c_w * V * 1.5^2}{c_a * \pi}}$$

De tussenafstand is de afstand tussen de onderzijde van de warme bron en de bovenzijde van de koude bron. Door de tussenafstand te variëren kan het effect van de dichtheid gedreven stroming beter bestudeerd worden.

4.3 Scenario's

De scenario's zijn in 3 groepen verdeeld, waarbij in elke groep het basis geval in betrokken zit. Het Basis scenario is de Monobron bij de Rai Amsterdam.

Als eerste wordt er gekeken naar het effect van een variabel opslagvolume. De filterlengte en de tussenafstand zijn constant 25 m.

Tabel 3. Variabel opslagvolume.

Scenario's	Opslagvolume per bron (m ³ /jaar)	Filterlengte boven en onder (m)	Tussenafstand (m)
A1	100.000	25	25
Basis	60.000	25	25
A2	30.000	25	25
A3	10.000	25	25

Vervolgens wordt er gekeken naar de efficiency bij een variërende tussenafstand. Dit is vooral om de variant met dichtheid gedreven stroming te vergelijken met de situatie zonder dichtheid gedreven stroming.

Tabel 4. Variabele tussenafstand.

Scenario's	Opslagvolume per bron (m ³ /jaar)	Filterlengte boven en onder (m)	Tussenafstand (m)
B1	60.000	25	15
B2	60.000	25	20
Basis	60.000	25	25
B3	60.000	25	30
B4	60.000	25	35

Als laatste wordt de situatie bekeken waarbij de filterlengte en tussenafstand gedimensioneerd worden aan de hand van het opslagvolume. Zie Tabel 5.

Tabel 5. Variabel opslagvolume met bijbehorende afmetingen.

Scenario's	Opslagvolume per bron (m ³ /jaar)	Filterlengte boven en onder (m)	Tussenafstand (m)
C1	100.000	30	30
Basis	60.000	25	25
C2	30.000	20	20
C3	10.000	14	14

Elk scenario wordt zowel met als zonder dichtheid gedreven stroming berekend. Dit wordt weergegeven met een toevoeging van 'z' of 'm' voor respectievelijk zonder en met dichtheid gedreven stroming in de berekening.

De code waarmee de scenario's geschreven worden is weergegeven in Bijlage B. Deze code begint met de parameters, die eventueel aangepast kunnen worden. Na het runnen van de code genereert FloPy de nieuwe temperatuurverdeling en de nieuwe chloride concentratie verdeling over. Hieruit kan aan de hand van de efficiency berekening de scenario's met elkaar worden vergeleken. Dit wordt in de volgende paragraaf uitgelegd.

4.4 Beoordeling

Om de efficiency te kwantificeren wordt er gebruik gemaakt van de volgende definitie.

$$Efficiency = \frac{Energy_{in}}{Energy_{uit}} * 100\% = \frac{V_{geïnfiltreerd} * (T_{warm} - T_{grondwater})}{V_{onttrokken} * (T_{onttrokken} - T_{grondwater})} * 100\%$$

Waar de $Energy_{in}$ gelijk is aan het volume van het geïnfiltreerde water in de warme bron vermenigvuldigd met het temperatuur verschil t.o.v. het grondwater. De temperatuur van het geïnjekteerde water in de warme bron is 20 °C en de temperatuur van het geïnjekteerde water in de koude bron is 4 °C. De grondwater temperatuur is aangenomen op 12 °C. De $Energy_{uit}$ is gelijk aan het volume van het onttrokken water van de warme bron vermenigvuldigd met het temperatuur verschil t.o.v. het grondwater.

5. Resultaten

In dit hoofdstuk wordt de resultaten van de scenario's, zoals die in paragraaf 4.3 zijn gedefinieerd, weergegeven aan de hand van de efficiency per jaar. Deze resultaten worden met elkaar vergeleken in paragraaf 5.3. In paragraaf 5.4 wordt het effect op de verdeling van chloride concentratie behandeld. Tot slot worden in de Discussie paragraaf(5.5) het efficiency effect van de dichtheid gedreven stroming aanvullend behandeld.

5.1 Zonder dichtheid gedreven stroming

In de eerste variant wordt gekeken naar de situatie zonder dichtheid gedreven stroming.

5.1.1 Groep A. Variabel opslagvolume.

Als eerste wordt er gekeken naar het effect van een variabel volume. In tabel 6 zijn de input waarden van de filterlengte en tussenafstand gelijk bij een variërend opslagvolume.

Tabel 6. Variabel opslagvolume.

Scenario's	Opslagvolume per bron (m ³ /jaar)	Efficiency jaar 1 (%)	Efficiency jaar 10 (%)
A1z	100.000	65.8	81.6
Basis z	60.000	62.9	80.6
A2z	30.000	58.3	78.5
A3z	10.000	49.5	73.0

Uit de tabel 6 blijkt dat een hoger opslagvolume ook een hogere efficiency heeft. Het verschil tussen de efficiency waarden van jaar 1 zijn twee keer zo groot als de efficiency waarden van jaar 10. In het eerste jaar is de efficiency het laagst bij een klein opslagvolume, maar deze groeit wel het snelste over de jaren. Bij een bron met een groot opslagvolume is de begin waarde van de efficiency hoger, maar deze groeit wel het langzaamste.

5.1.2 Groep B. Variabele tussenafstand.

Vervolgens wordt er gekeken naar de efficiency bij een variërende tussenafstand. Dit is vooral om de variant met dichtheid gedreven stroming te vergelijken met de situatie zonder dichtheid gedreven stroming. Het opslagvolume is gelijk aan 60.000 m³ per jaar.

Tabel 7. Variabele tussenafstand.

Scenario's	Tussenafstand (m)	Efficiency jaar 1 (%)	Efficiency jaar 10 (%)
B1z	15	62.8	78.8
B2z	20	62.9	80.2
Basis z	25	62.9	80.6
B3z	30	62.9	81.4
B4z	35	63.0	81.5

Uit tabel 7 is duidelijk dat de efficiency zowel in jaar 1, als in jaar 10 toeneemt door een grotere tussenafstand. Het verschil in jaar 1 is echter verwaarloosbaar en het verschil in jaar 10 bedraagt circa 3%. De toename in efficiency van scenario B3 naar scenario B4 is verwaarloosbaar klein.

5.1.3 Groep C. Variabel opslagvolume, filterlengte en tussenafstand

Vervolgens wordt de situatie bekeken waarbij de filterlengte en tussenafstand gedimensioneerd worden aan de hand van het volume. De filterlengte is gelijk aan de tussenafstand. Zie Tabel 8.

Tabel 8. Variabel opslagvolume, filterlengte en tussenafstand.

Scenario's	Opslagvolume per bron (m ³ /jaar)	Filterlengte en tussenafstand (m)	Efficiency jaar 1 (%)	Efficiency jaar 10 (%)
C1z	100.000	30	66.1	83.5
Basis z	60.000	25	62.9	80.6
C2z	30.000	20	58.5	77.8
C3z	10.000	14	51.3	71.8

Bij een toepassing van de juiste filterlengte en tussenafstand zijn hogere efficiency waarden te zien in jaar 1, al is het verschil zeer klein. Er is echter geen toename in de efficiency in jaar 10 voor de bronnen met een opslagvolume van 30.000 m³ en 10.000 m³, ten opzichte Tabel 6.

5.2 Met dichtheid gedreven stroming

In deze variant wordt gekeken naar de situatie met dichtheid gedreven stroming. Hierbij worden weer dezelfde bron eigenschappen toegepast, maar nu is er wel dichtheid gedreven stroming in de berekening meegenomen.

5.2.1 Groep A. Variabel opslagvolume met dichtheid gedreven stroming.

Net als bij variant 1 wordt er gekeken naar het effect van een variabel opslagvolume. In tabel 9 zijn de input waarden van de filterlengte en tussenafstand gelijk (25 meer) bij een variërend opslagvolume.

Tabel 9. Variabel opslagvolume met dichtheid gedreven stroming.

Scenario's	Opslagvolume per bron (m ³ /jaar)	Efficiency jaar 1 (%)	Efficiency jaar 10 (%)
A1m	100.000	64.2	81.8
Basis m	60.000	61.2	78.0
A2m	30.000	56.0	76.1
A3m	10.000	47.1	71.1

Uit Tabel 9 blijkt dat de waarden van de efficiency bij een berekening, waarbij de dichtheid gedreven stroming wel is meegenomen, dezelfde eigenschappen heeft als zonder. Het verschil is dat het van -0.2 tot 2.6% lager ligt.

5.2.2 Groep B. Variabele tussenafstand met dichtheid gedreven stroming.

Vervolgens wordt er gekeken naar de efficiency bij een variabele tussenafstand. Door de verschillende dieptes van de bronnen is er een verschil in chloride concentratie, wat als gevolg heeft dat er een verschil is in dichtheid tussen de warme- en koudebron. Het effect hiervan is dat het grotere verschil in dichtheid een grotere verticale stroming veroorzaakt.

Tabel 10. Variabele tussenafstand met dichtheid gedreven stroming.

Scenario's	Tussenafstand (m)	Efficiency jaar 1 (%)	Efficiency jaar 10 (%)
B1m	15	61.8	75.3
B2m	20	61.4	76.7
Basis m	25	61.2	78.0
B3m	30	60.7	79.3
B4m	35	60.3	80.3

De efficiency neemt af naar mate de afstand tussen de bronnen groter wordt. Dit is te zien in het eerste jaar. Na 10 jaar is de verdeling echter helemaal omgekeerd. De bron met de grootste tussenafstand is met 5% duidelijk efficiënter dan de bron met de kleine tussenafstand. Dit komt doordat in het 1^e jaar de dichtheid gedreven stroming domineert en een grotere verticale afstand een groter verschil in dichtheid met zich meebrengt. Na 10 jaar is de chloride concentratie gestabiliseerd en domineert de onderlinge interactie door natuurlijke dynamiek. Op lange termijn is een grote afstand dus juist positief.

5.2.3 Groep C. Variabel opslagvolume, filterlengte en tussenafstand met dichtheid gedreven stroming.

Vervolgens wordt de situatie bekeken waarbij de filterlengte en tussenafstand gedimensioneerd worden aan de hand van het volume. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11. Variabel opslagvolume met bijbehorende afmetingen en dichtheid gedreven stroming.

Scenario's	Opslagvolume per bron (m ³ /jaar)	Filterlengte en tussenafstand (m)	Efficiency jaar 1 (%)	Efficiency jaar 10 (%)
C1m	100.000	30	64.2	81.8
Basis m	60.000	25	61.2	78.0
C2m	30.000	20	57.1	73.6
C3m	10.000	14	50.6	66.4

De waarden van de efficiency voor de scenario's laten duidelijk zien dat een grotere bron een aanzienlijk grotere efficiency heeft voor zowel jaar 1 als jaar 10.

5.3 Vergelijking

Om de scenario's onderling te vergelijken zijn in deze paragraaf de verschillen tussen de scenario's met en zonder dichtheid gedreven stroming weergegeven.

5.3.1 Groep A vergelijking met en zonder dichtheid gedreven stroming.

In Tabel 12 is een vergelijking toegepast tussen de variant met en zonder dichtheid gedreven stroming bij een variabel opslagvolume.

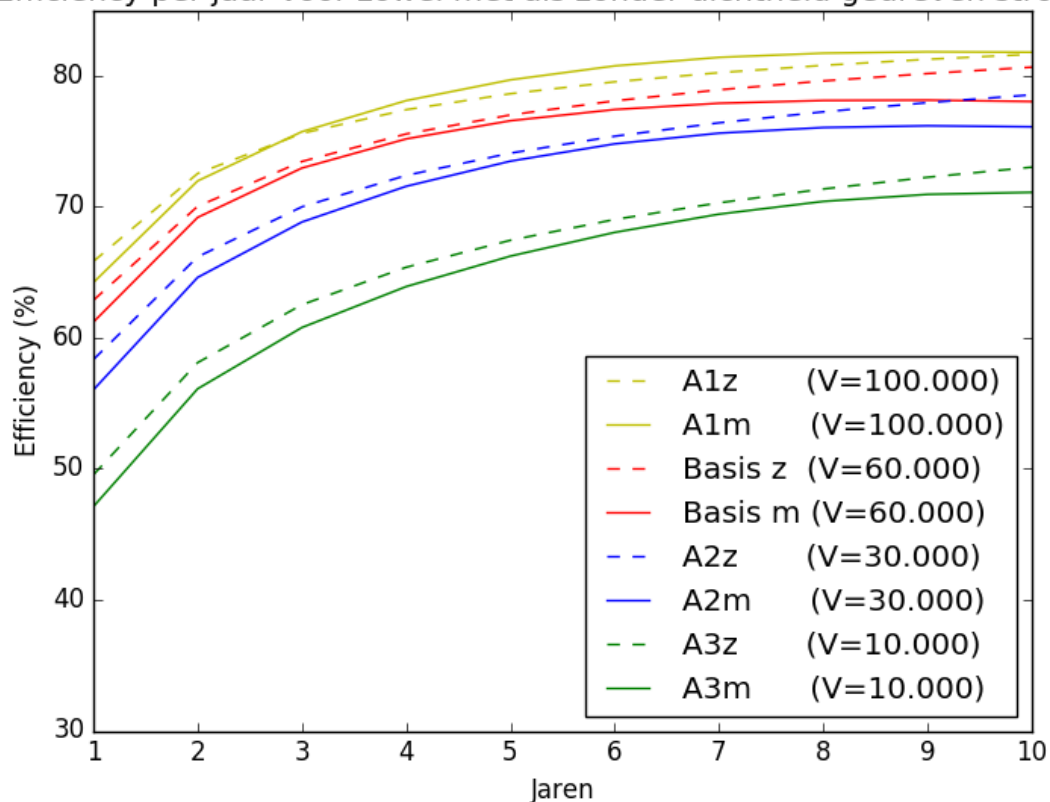
Tabel 12. Vergelijking van de scenario's bij variabel opslagvolume.

Scenario's	Efficiency vermindering jaar 1 (%)	Efficiency vermindering jaar 10 (%)
A1z-A1m (V=100.000)	1.6	-0.2*
Basis z-Basis m (V=60.000)	1.7	2.6
A2z-A2m (V=30.000)	2.3	2.4
A3z-A3m (V=10.000)	2.4	1.9

*Deze waarde kan in twijfel getrokken worden, aangezien deze niet consistent is met de andere waarden.

De efficiency vermindering gaat niet over de 3 % heen. Dat is dus geen groot verlies in vergelijking met het bestaande verlies bij de situatie zonder dichtheid gedreven stroming. Opmerkelijk is dat de efficiency van scenario A1m zelfs beter is dan scenario A1z. In het figuur 7 is het verloop van de efficiency over de jaren voor de scenario's bij een variabel opslagvolume geplot.

Efficiency per jaar voor zowel met als zonder dichtheid gedreven stroming



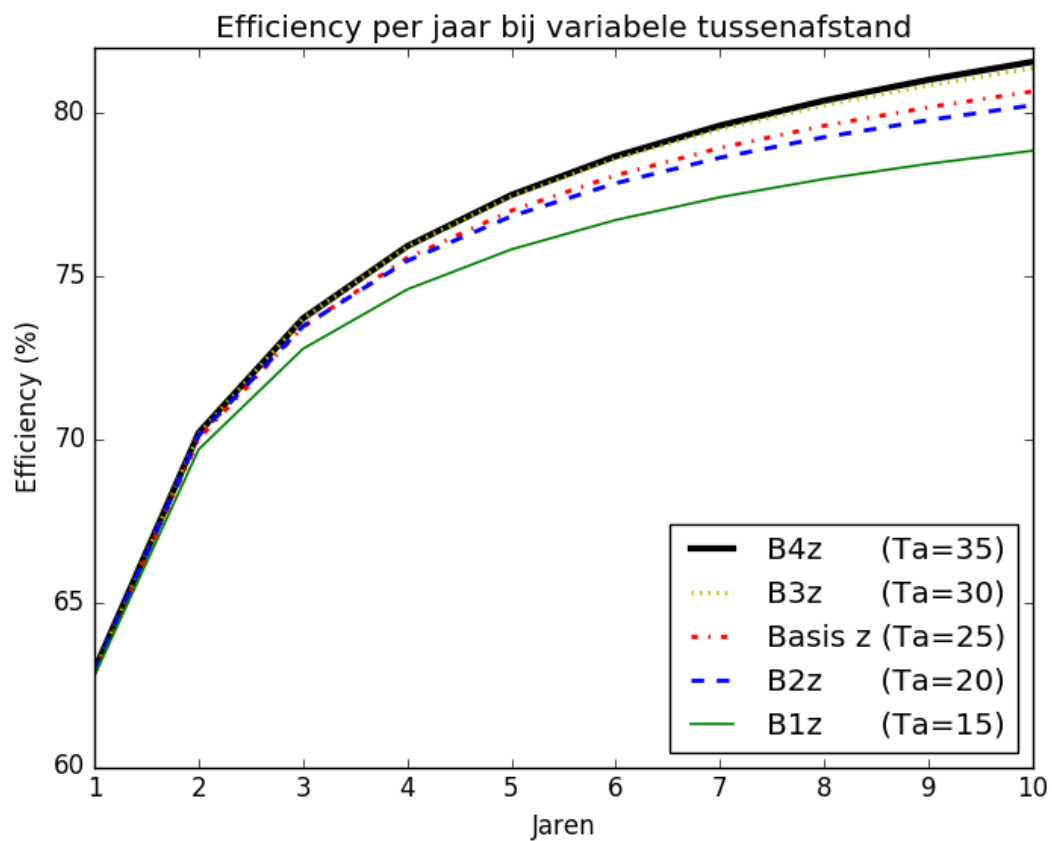
Figuur 7. Efficiency per jaar voor de scenario's met en zonder dichtheid gedreven stroming bij een variabel opslagvolume (V).

5.3.2 Groep B vergelijking met en zonder dichtheid gedreven stroming.

In Tabel 13 is een vergelijking toegepast tussen de variant met en zonder dichtheid gedreven stroming bij een variabele tussenafstand.

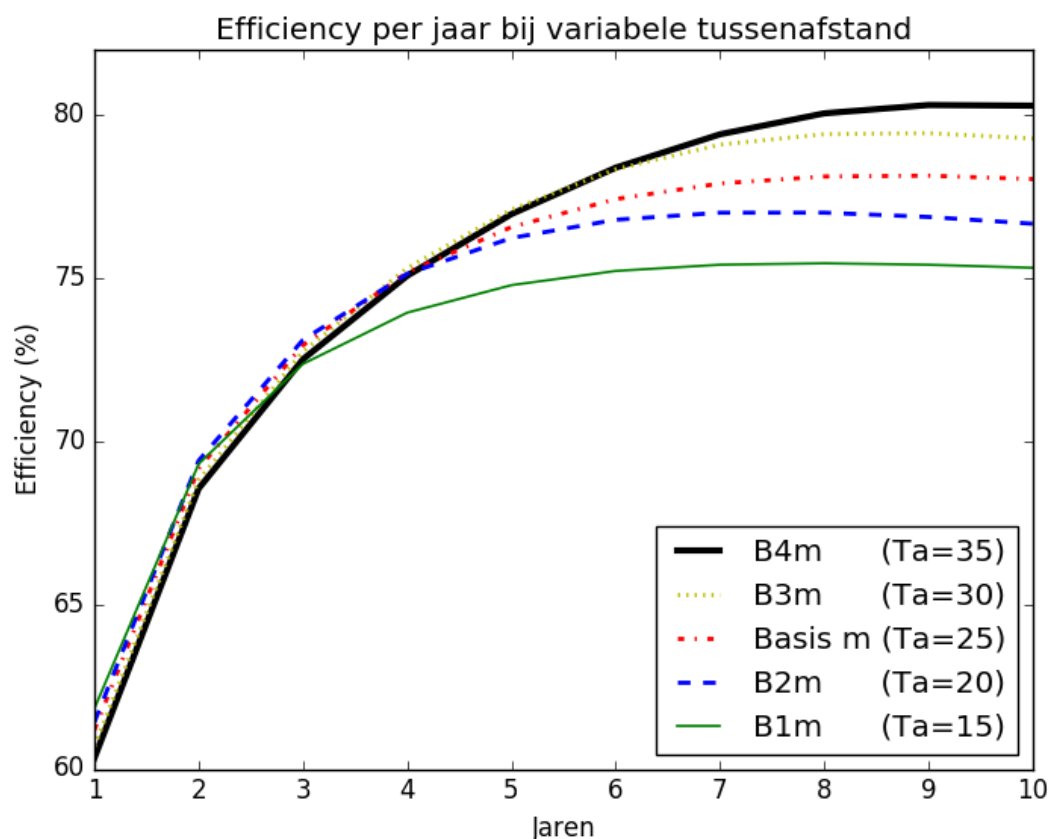
Tabel 13. Vergelijking van de scenario's bij een variabele tussenafstand(T_a).

Scenario's	Efficiency vermindering jaar 1 (%)	Efficiency vermindering jaar 10 (%)
B1z-B1m ($T_a=15$)	1.0	3.5
B2z-B2m ($T_a=20$)	1.5	3.5
Basis z-Basis m ($T_a=25$)	1.7	2.6
B3z-B3m ($T_a=30$)	2.2	2.2
B4z-B4m ($T_a=35$)	2.7	1.2



Figuur 8. Efficiency bij een variabele tussenafstand(T_a) en zonder dichtheid gedreven stroming.

Figuur 8 laat zien dat een lagere tussenafstand ook een lagere efficiency op langer termijn tot gevolg heeft. Dit komt omdat de verloren energie van de warme en koude bron snel met elkaar in aanraking komen, wanneer er een kleine tussenafstand zit.



Figuur 9. Efficiency per jaar bij een variërende tussenafstand(T_a), waarbij de dichtheid gedreven stroming wel is meegenomen.

Het scenario met de grootste tussenafstand heeft op het begin de laagste efficiency, maar haalt na verloop van tijd, circa 3 jaar, toch de andere varianten in. Dit duidt erop dat een grote tussenafstand een goede optie is voor de lange termijn WKO systemen.

5.3.3 Groep C vergelijking met en zonder dichtheid gedreven stroming.

In Tabel 14 is een vergelijking toegepast tussen de variant met en zonder dichtheid gedreven stroming bij een variabel opslagvolume, tussenafstand en filterlengte.

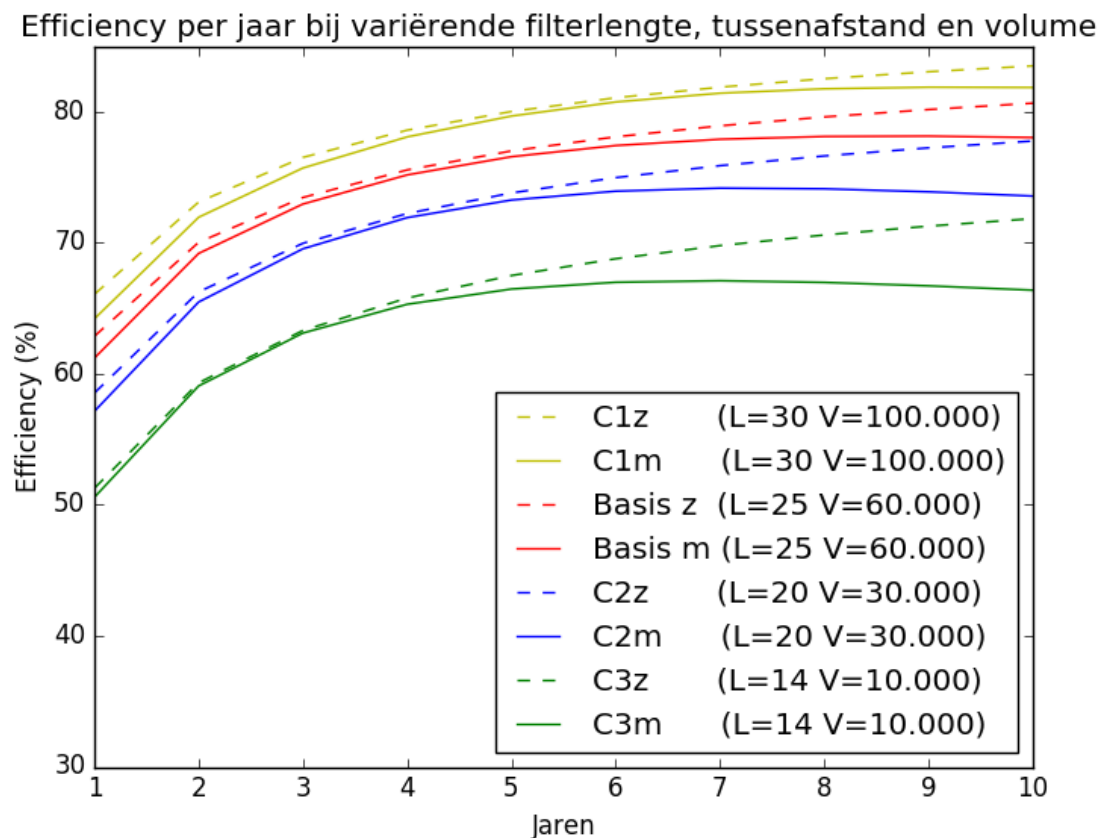
Tabel 14. Vergelijking van de scenario's bij een variabel opslagvolume, tussenafstand en filterlengte.

Scenario's	Efficiency vermindering jaar 1 (%)	Efficiency vermindering jaar 10 (%)
C1z-C1m ($V=100.000$, $L=30$)	1.9	1.7
Basis z-Basis m ($V=60.000$, $L=25$)	1.7	2.6
C2z-C2m ($V=30.000$, $L=20$)	1.4	4.2
C3z-C3m ($V=10.000$, $L=14$)	0.7	5.4

Uit Tabel 14 blijkt dat de dichtheidsstroming in het eerste jaar vooral de grotere bron negatief beïnvloed. Dit komt door de grotere tussenafstand die bij de grotere bron wordt meegenomen. Het verschil in dichtheid is groter bij de grote bron, maar dit effect wordt later gecompenseerd doordat aparte bronnen efficiënter zijn. In het laatste jaar is er te zien dat de dichtheid gedreven stroming

juist een negatiever effect heeft op de kleine bron. Bij de grote Monobron is na 10 jaar een constante dichtheid over de diepte ontstaan. Bij de bron van 10.000 m^3 is er nog niet zoveel water met hoge en lage dichtheid gemengd. De grote bron is ook minder gevoelig, doordat de grote hoeveelheid het dichtheid gedreven stromings effect verwaarloosd.

In figuur 10 is het verloop van de efficiency over de jaren voor de scenario's zonder en met dichtheid gedreven stroming uitgezet. Hierbij wordt bij het variërende opslagvolume ook de bijpassende filterlengte en tussenafstand toegepast.

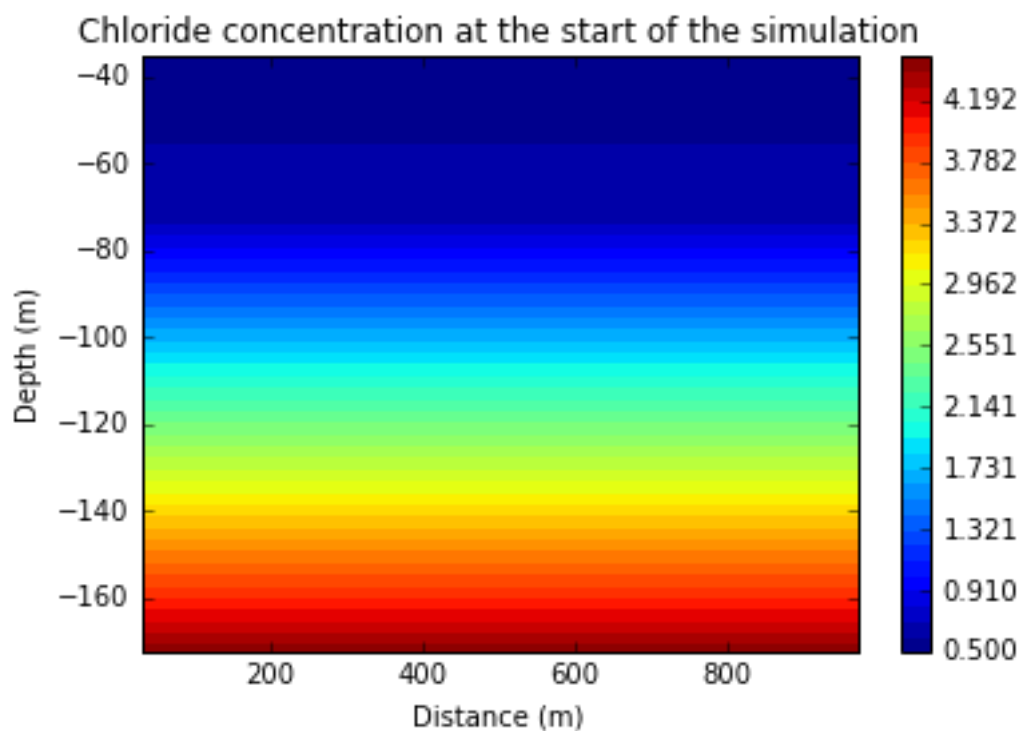


Figuur 10. Efficiency per jaar bij een variërende filterlengte(L), tussenafstand(L) en opslagvolume(V).

Uit het figuur 10 blijkt dat de dichtheid gedreven stroming bij alle scenario's voor een gereduceerde efficiency zorgt. In het eerste jaar is het verlies groter voor de grote bron, waarna dit verlies afneemt totdat het weer toeneemt vanaf jaar 6. Bij de kleine bron is het verlies op het begin het kleinste. Vanaf jaar 3 begint het verlies weer toe te nemen.

5.4 Effect van een Monobron installatie op de aanwezige chloride concentratie.

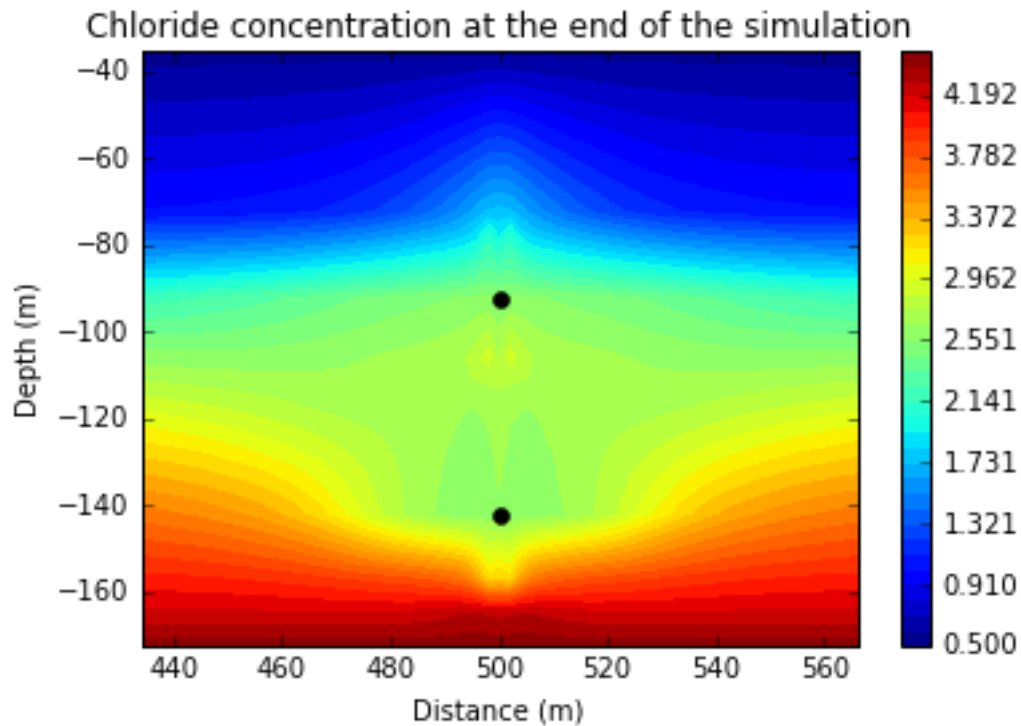
De chloride concentratie is in eerste instantie opgebouwd zoals in figuur 11. Doordat er water uit de verschillende dieptes met elkaar gemengd worden ontstaat er een andere verdeling. In dit hoofdstuk wordt de nieuwe verdeling van de chloride concentratie na 10 jaar gebruik van de Monobron behandeld.



Figuur 11. Start chloride concentratie verdeling over de diepte.

Eerst wordt er gekeken naar de situatie bij Rai Amsterdam, het Basis scenario. Hierbij is dus een jaarlijks opslagvolume van 60.000 m^3 , een filterlengte van 25 meter en een tussenafstand van 25 meter. Na 10 jaar geeft dit de volgende verdeling in chloride concentratie. Zie Figuur 12.

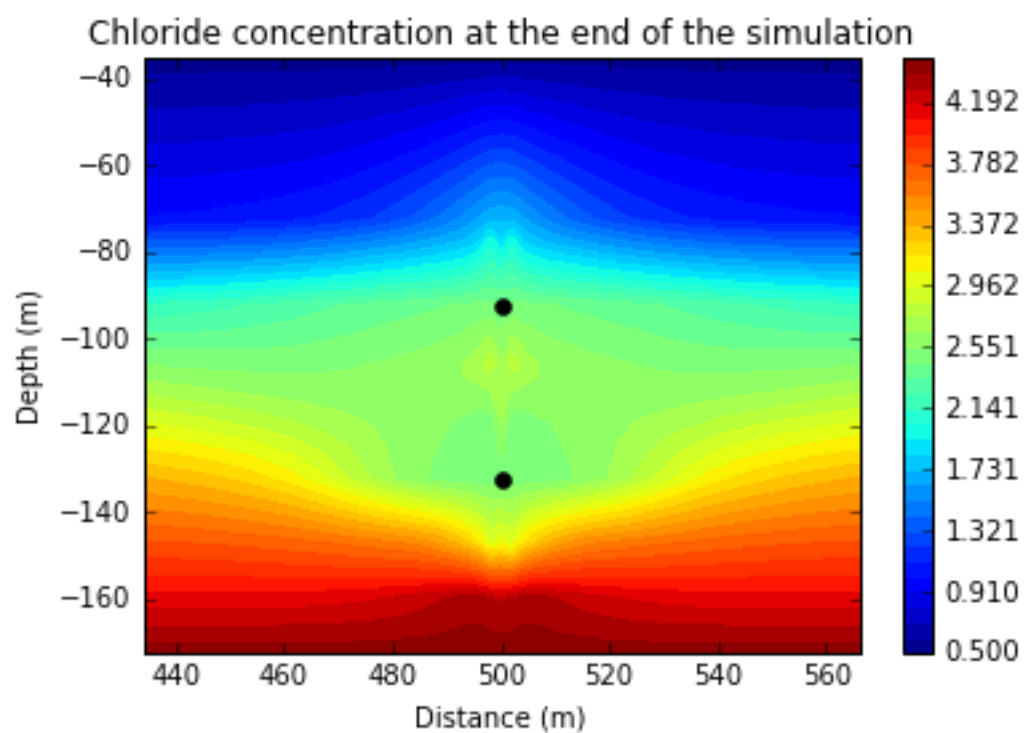
Het effect van een Monobron installatie zorgt voor een vereffening in chloride concentratie tussen de warme bron en de koude bron. De gemiddelde concentratie over de diepte is gestegen. Dit komt omdat er wordt begonnen met het onttrekken van de koude bron en het infiltreren van de warme bron.



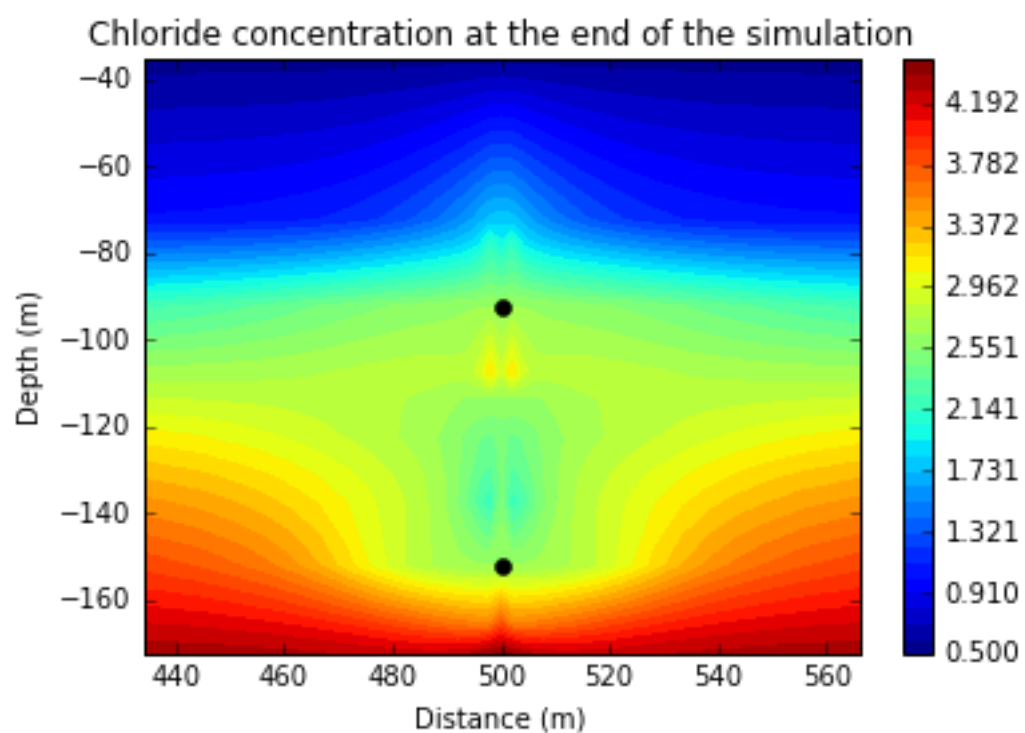
Figuur 12. Chloride concentratie na 10 jaar voor de Basis scenario met dichtheid gedreven stroming.

Als er nu een vergelijking wordt gemaakt tussen de scenario's B1m en B4m, kan het effect van verschillende tussenafstanden bekeken worden. Bij deze scenario B1m wordt een tussenafstand van 15 meter toegepast en bij scenario B4m wordt een tussenafstand van 35 meter toegepast. Het resultaat is in figuur 13 en 14 weergegeven.

De chloride concentratie verdeling rond de bovenste bron is vergelijkbaar in zowel figuur 13 als figuur 14. De chloride concentratie verdeling rond de onderste bron is echter verschillend. Hoe groter de tussenafstand, hoe groter het effect op de aanwezige chloride concentratie verdeling. Bij de tussenafstand van 35 meter is te zien dat op grote diepte een lagere concentratie aanwezig is. Vanaf een horizontale afstand van 60 meter is echter het verschil tussen de 35 meter variant en de 15 meter variant verwaarloosbaar.



Figuur 13. Scenario B1m. Chloride concentratie na 10 jaar bij een tussenafstand van 15 meter.



Figuur 14. Scenario B4m. Chloride concentratie na 10 jaar bij een tussenafstand van 35 m.

5.5 Discussie.

De absolute efficiency waarden, zoals die door het rapport heen gegeven zijn, zijn van minder groot belang. Deze waarden zijn namelijk erg afhankelijk van de ingevoerde parameters. Wat wel belangrijk is, zijn de verschillen tussen de efficiency waarden. Hiermee wordt aangegeven wat het effect is van de dichtheid gedreven stroming.

In de berekeningen is de thermische retardatie factor niet meegenomen. Als dit wel was meegenomen was de efficiency in het eerste jaar waarschijnlijk lager, maar op lange termijn zal het een isolerende werking hebben. Dit komt doordat de geïnfiltreerde warmte uit het water wordt verloren in het zand. In de opeenvolgende cycli is deze warmte echter nog aanwezig en wordt dit verlies steeds minder, totdat, door de isolerende werking, het een positief effect zal hebben.

De parameters beschrijven een model, die de werkelijkheid probeert te benaderen. De werkelijkheid is echter gecompliceerder dan het toegepaste model. Zo is de hydraulische conductiviteit van de aquifer zeer wisselend. Toch is er gekozen voor een enkele waarde voor deze laag. De lagen in de aquifer kunnen ook delen met klei of grind bevatten, die de stroming respectievelijk negatief en positief beïnvloeden. Horizontale klei lagen zullen de resultaten positief beïnvloeden, omdat deze de stroming horizontaal houden.

In Amsterdam is in de aquifer een grondwater stroming aanwezig die richting de zee stroomt. Deze component is niet meegenomen in de berekeningen. Het effect van deze stroming is dat de verliezen groter zullen zijn. Hoeveel is afhankelijk van de filterlengte en het opslagvolume. Een kleine straal zorgt ervoor dat bij een horizontale verschuiving de thermische energie buiten het bereik van de bron komt te liggen. Bij een kortere filterlengte en dus een grote straal heeft een horizontale verplaatsing geen groot effect op de efficiency.

De optimale verhouding, zoals die gegeven is in paragraaf 4.2.2 genereert filterlengte's die veel groter (factor 2) zijn dan de filterlengte's die in de praktijk worden toegepast. Dit is het geval, omdat de afweging van de kosten niet in de optimale verhouding zijn meegenomen. Er is dus gekozen om waarden uit de praktijk toe te passen.

Voor de berekening is een tijdsperiode van 10 jaar toegepast. Bij de meeste modellen, waarbij de dichtheid gedreven stroming niet is meegenomen, lijken de efficiency lijnen nog verder te stijgen. De opbrengst na 20 jaar kan dus bij variant 1 nog hoger liggen dan de waarden na 10 jaar. Bij variant 2, waar wel dichtheid gedreven stroming is meegenomen, is de toename in efficiency erg klein in de laatste jaren. Er kan dus verwacht worden dat de efficiency niet verder zal toenemen of afnemen na de 10 jaar.

Het geïnjekteerde water is gesimuleerd als een sinus functie. Deze beschrijving is niet 100% realistisch, want het weer en de energievraag zijn veel grilliger. Sommige dagen zal er dus een grotere behoefte aan warmte of koude zijn dan de dagen erna en ervoor. Het effect is dat wanneer er veel tijd zit tussen het infiltreren en onttrekken er meer thermische energie verloren zal gaan door de dichtheid gedreven stroming.

6. Conclusies.

Dichtheid gedreven stroming heeft een negatief effect.

Het effect van de dichtheid gedreven stroming heeft een negatieve impact op de efficiency van een WKO systeem. De mate waarin dit gebeurt is echter in de schaal van 3%. Bij een Monobron installatie met een verlies van 20 tot 30 % is 3 % extra verlies geen groot probleem.

Een Monobron wordt efficiënter naar mate er meer water in geïnjecteerd wordt. Door een grotere bel is het verlies zowel met als zonder dichtheid gedreven stroming relatief kleiner. De dimensies van de filterlengte en tussenafstand zijn ook van invloed op de efficiency, maar minder dan het effect van een groter opslagvolume. Hoe groter een bel wordt, des te kleiner wordt het oppervlak in verhouding tot het opslagvolume. Aangezien het verlies aan de rand van de bel optreedt is de Monobron in het voordeel met een groot opslagvolume. Het verlies van de dichtheid gedreven stroming wordt relatief kleiner hoe groter de bron dimensies.

Onderlinge afstand is alleen in het begin van invloed bij dichtheid gedreven stroming.

In het eerste jaar is de Monobron efficiënter wanneer de bronnen dicht bij elkaar liggen. Wanneer de bronnen dicht bij elkaar liggen zijn de verschillen in dichtheid door de chloride concentratie kleiner dan wanneer de bronnen verder uit elkaar liggen. Wanneer er echter gekeken wordt naar de laatste jaren, blijkt dat een grote onderlinge afstand juist voor een positief effect op de efficiency zorgt. In Figuur 9 is te zien dat een grote tussenafstand op lange termijn een betere efficiency geeft. Het isolerende effect van een grotere tussenafstand is uiteindelijk van groter belang dan de dichtheid gedreven stroming.

Een Monobron zorgt voor een merkbaar effect tot anderhalf maal de thermische straal.

Het effect van de Monobron installatie op de aanwezige verdeling van de chloride concentratie is aanzienlijk, zoals te zien is in Figuur 14. Het effect is nog merkbaar op 40 meter vanaf het centrum van de bron, maar wanneer er een WKO installatie op 60 meter of meer wordt geplaatst krijgt deze te maken met de oorspronkelijke chloride concentratie verdeling.

7. Aanbevelingen.

In de berekeningen is er geen rekening gehouden met de thermische retardatie, omdat dit nog niet in de huidige FloPy te programmeren is. Het is wel een factor waar rekening mee gehouden zou moeten worden en zou daarom in een vervolgonderzoek meegenomen moeten worden.

Een ander onderzoek kan worden gedaan naar mogelijke oplossingen voor het Monobron systeem. Zo kan de dichtheid gedreven stroming tegen worden gegaan door bijvoorbeeld 2 extra filters te plaatsen. Deze filters kunnen geplaatst worden aan de bovenkant van de warme bron en aan de onderkant van de koude bron. Vanuit deze filters wordt er water verplaatst naar een punt tussen de warme en koude bron in. Dit zorgt ervoor dat de bronnen uit elkaar gedrukt worden en zo de thermische energie op zijn plaats blijft.

Een andere optie is het toepassen van een inhomogene filter. Als er een filter ontworpen wordt die meer infiltreert in de onderzijde van de koude bron en de bovenzijde van de warme bron, terwijl die juist meer onttrekt in de bovenzijde van de koude bron en de onderzijde van de warme bron, kan de verplaatste thermische energie op de juiste plek onttrokken worden.

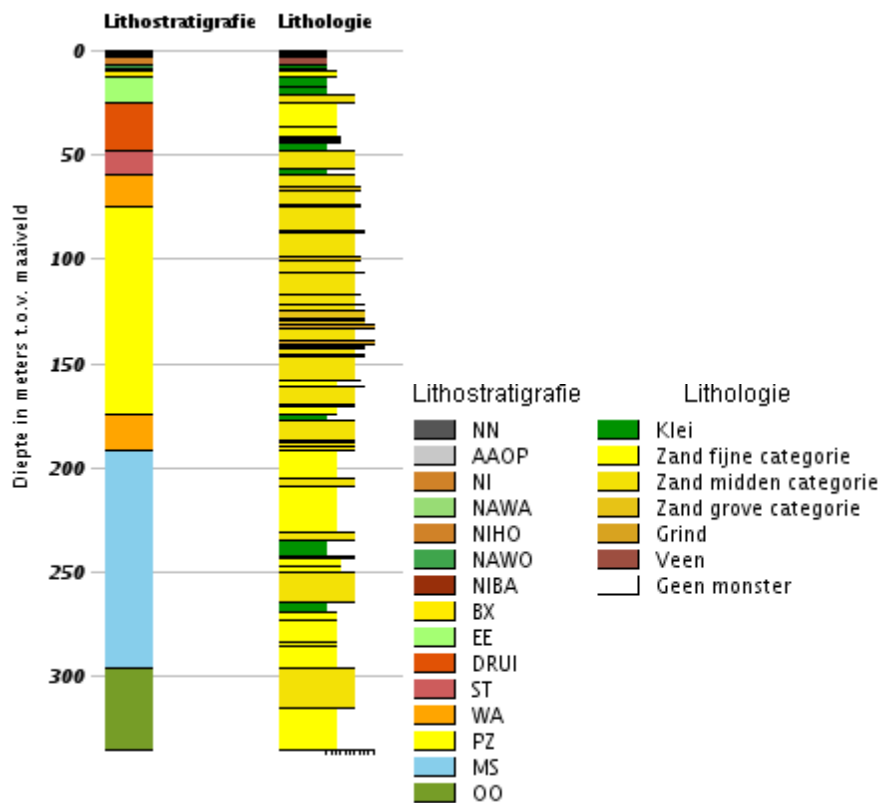
Het effect van dichtheid gedreven stroming door variaties in chloride concentratie bij doubletten kan ook onderzocht worden. Hierbij is het verwachte effect echter nog kleiner, omdat de bronnen in dezelfde laag gesitueerd zijn.

Referenties

- Bakker M., Post V., Hughes J., Langevin C., Francés A., White J. (2013) *Enhanced FloPy scripts for Constructing and Running MODFLOW-Based Models*
- Bloemendal M., Mathijssen H. (2013) *Cahier Bodemenergie warm aanbevolen*.
- Caljé R.J., (2010). *Future use of Aquifer Thermal Energy Storage below the historic centre of Amsterdam*. Amsterdam
- Dinoloket, *Ondergrondgegevens*, geraadpleegd 1 mei 2016.
<https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>
- Doughty C., Hellstrom G., & Fu Tsang C. (1982). *A Dimensionless Parameter Approach to the Thermal Behaviour of an Aquifer Thermal Energy Storage System*. Water Resources Research
- Harbaugh A.W., (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model--the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16*, variously p. Reston, Virginia
- Langevin C.D., Shoemaker W.B., Guo W. (2003). *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT)*. Tallahassee, Florida
- Langevin C. D., Thorne D. T., Dausman A. M., Sukop M. C., & Guo W. (2008). *SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport*. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey
- van Ginkel M., (2007). *Feasibility study for fresh water storage in saline aquifers by means of the Fresh Storage Saline Extraction well, with a focus on the Red Sea coast, Egypt*. Delft
- van Lopik J. H., Hartog N., Zaadnoordijk W.J. (2016). *The use of salinity contrast for density difference compensation to improve the thermal recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems*.
- Speelman H., & Houtman H. (1979). *Grondwaterkaart van Nederland, Amsterdam*. Delft: Dienst Grondwaterverkenning TNO
- Zheng C., & Wang P. P. (1999). *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies transport model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide*. Tuscaloosa, Alabama: U.S. Army Corps of Engineers.

Bijlage A

Bodem eigenschappen in Amsterdam.



Waarbij:

Afkorting	Voluit	Grondsoort
NN	Onbekend	-
AAOP	Opgebrachte grond	Zand
NI	Formatie Nieuwkoop	Veen
NAWA	Formatie Walcheren	Zeef fijn tot matig fijn zand
NIHO	Hollandveen Laagpakket	Veen
NAWO	Laagpakket Wormer	Zeef fijn tot matig fijn zand
NIBA	Basisveen Laag	Veen
BX	Formatie Boxtel	Zand, leem, veen
EE	Eem formatie	Matig fijn zand
Drui	Laagpakket Uitdam	Zand, klei, leem
ST	Formatie Sterksel	Zand, Grind
WA	Formatie Waalre	Zeef fijn tot zeer grof zand
PZ	Formatie Peize	Matig tot zeer grof zand
MS	Formatie Maassluis	Fijn tot grof zand, klei
OO	Formatie Oosterhout	Matig tot grof zand

Bijlage B

In deze bijlage is het script gegeven waarmee de temperatuur en chloride concentratie wordt berekend. In groen is de uitleg gegeven.

```
# alle imports
%matplotlib inline
import numpy as np
import flopy
import matplotlib.pyplot as plt
import flopy.utils.binaryfile as bf
from shutil import copyfile
import shutil
import tempfile
workspace = os.path.join('data')
# aanmaken 'workspace'
if not os.path.exists(workspace):
    os.makedirs(workspace)

# alle input
year=10          # aantal jaar
l=1000           # breedte en lengte van mijn model (in meter)
stapgrootte=[2,3,5,10,20,30,50,100,200,300] ; step=5 ; middle =2 #step=aantal stappen van die
grootte (m)
delv = [70,5,5, 25 ,2,7,7,7,2, 25 ,5,10,5,45]
warm=3 ;koud=9          # welke laag de bronnen zitten(-1)
ntemp=12.;wtemp=20;ktemp=4      # temperatuur van aanwezige, koude en warme bron
bchlo=0.55;delchlo=(4.95/130)   # basis concentratie chloride en richtingscoëff concentratie
chloride
modelname = 'istevens'          # modelnaam
hk70=1. ; hk170=35. ;hk175=0.0001; hk220=5.# hydraulische conductiviteit m/d
#MT3DMS
ncomp=2          # Aantal concentraties 'species'
prsim=0.35       # Porositeit
chkmas=False     # Print massa balans
dt0=1            # Initiële transport stap
species_names=['heat','chloride']
# Dsp
al=5             # Longitudinale dispersiviteit
trpt=0.5         # Horizontale dwarse disperiviteit
trpv=0.05        # Verticale dwarse dispersiviteit
dmcoef=1.e-10    # effective molecular diffusion coeff
# rct
rhob = 1749      # (1-porositeit)*dichtheid grond, kg/m3 pr=0.35 rs=2.690
isothm=1         # lineair
ireact=0         # geen kinetische reactie
igetsc=0         # Geabsorbeerd evenwicht met opgeloste phase
sp1=0.00021241# Kd sorptie parameter (de mogelijkheid om voor meerdere species sorptie
parameters te gebruiken is nog onder ontwikkeling)
sp2=0
# vdf
iwtable=1        # Applicatie van variabele dichtheid voor stijghoogte waterniveau.
```

```

densemin=0          # Geen minimum dichtheid
densemax=0          # Geen maximum dichtheid
denseref=999.2      # referentie dichtheid
drhodc=1.405        # effect van chloride op de dichtheid 1.405
drhodc2=0.          # effect van temp op de dichtheid

```

```

V=60000             # Jaarlijks toegestaan volume
# einde input

```

opdeel formule: Dit gebruikt de stapgrootte en dimensies om een dx en dy array te maken

```
a=0;count=0; x=(l-middle)/2.
```

```
for i in range (100):
```

```
    if x>=(a+step*stapgrootte[i]):
```

```
        a=a+step*stapgrootte[i]
```

```
        count=count+1
```

```
    if x<(a+step*stapgrootte[i]):
```

```
        keer=int((x-a)/ stapgrootte[i])
```

```
        rest=(x-a)-keer*stapgrootte[i]
```

```
        d = stapgrootte[i]
```

```
        break
```

```
blocks=np.zeros(count*step+keer)
```

```
for i in range (count):
```

```
    blocks[0+i*step:step+i*step]=stapgrootte[i]
```

```
blocks[count*step:count*step+keer]=d
```

```
blocks[-1]=blocks[-1]+rest
```

```
total=np.zeros(2*len(blocks)+1)
```

```
total[0:len(blocks)]=blocks[:-1] ;total[len(blocks)]=middle; total[len(blocks)+1:]=blocks
```

```
mid = (len(total)+1)/2-1
```

einde opdeel formule met total als array voor de dx en dy

```
nrow = len(total)      # aantal rijen
```

```
ncol = len(total)      # aantal kolumnen
```

```
delr=delc = total      # tussenafstand
```

```
nlay = len(delv)       # aantal lagen
```

```
bo=np.zeros(len(delv)+1)# bo=botm met nul als begin
```

```
for i in range(len(delv)):
```

```
    bo[i+1]=delv[i]+bo[i]
```

```
botm=bo[1:]*-1        # botm is de bodem van elke laag
```

```
z = np.zeros(len(botm)) #middelpunten van de lagen
```

```
for i in range(len(botm)):
```

```
    z[i]=(bo[i]+bo[i+1])/2
```

```
x = np.zeros(len(total)+1) #middelpunten van de rijen en kolumnen
```

```
xi= np.zeros(len(total)+1)
```

```
for i in range(len(total)):
```

```
    xi[i+1]=xi[i]+total[i]
```

```
    x[i] = (xi[i]+xi[i+1])/2
```

```
x=x[0:-1]
```

```

# hydraulische conductiviteit
hk=np.zeros((nlay,nrow,ncol));vka=np.zeros((nlay,nrow,ncol))
for i in range(nlay):
    if -z[i]<=70:
        hk[i,:,:]=hk70 ; vka[i,:,:]=hk70/10.
    if -z[i]>70 and -z[i]<=170:
        hk[i,:,:]=hk170 ; vka[i,:,:]=hk170/10.
    if -z[i]>170 and -z[i]<=175:
        hk[i,:,:]=hk175 ; vka[i,:,:]=hk175/10.
    if -z[i]>175:
        hk[i,:,:]=hk220 ; vka[i,:,:]=hk220/10.
# constant piëzometrisch niveau aan de grenzen van het model
ibound = np.ones((nlay, nrow, ncol), dtype=np.int32)
ibound[:,0,:]=-1 ; ibound[:, :,0]=-1 ; ibound[:, -1, :]=-1 ; ibound[:, :, -1]=-1 ; ibound[-1, :, :]=-1
# constante concentratie aan de grenzen van het model
icbund=np.ones((nlay,nrow,ncol),dtype=np.int32)
icbund[:,0,:]=-1 ; icbund[:, :,0]=-1 ; icbund[:, -1, :]=-1 ; icbund[:, :, -1]=-1 ; icbund[-1, :, :]=-1

# initiële temperatuur en chloride concentratie verdeling
temp=np.ones((4*year*30+1,nlay,ncol,nrow))*ntemp
chlo=np.ones((4*year*30+1,nlay,ncol,nrow))
for i in range(nlay):
    if -z[i]<=70:
        chlo[0,i,:,:]=bchlo
    if -z[i]>70:
        chlo[0,i,:,:]=bchlo+delchlo*(-z[i]-70)
# het dagelijks debiet voor het model
q=np.zeros(120)
for i in range(120):
    q[i]=abs((V*3.1415/(4*182))*np.sin(i*(364/120.)*3.1415/182))

```

Aangezien er geen mogelijkheid is in FloPy om de concentratie die uit de ene bron gehaald wordt in de andere bron te stoppen is er een loop nodig die na elke tijdstap de initiële chloride en temperatuur concentraties aanpast.

```

# start loop
for i in range(4*year*30):
    wyear=int(i/120)    # welk jaar
    qa=q[i-wyear*120]  # welk debiet
    # opbouw van het modflow model
    mf = flopy.modflow.Modflow(modelname, exe_name='mf2005',model_ws=workspace)
    dis = flopy.modflow.ModflowDis(mf,nlay=nlay,nrow=nrow,ncol=ncol,delr=delr,delc=delc,top=0.,
                                    botm=botm,perlen=(364/120.))

    bas = flopy.modflow.ModflowBas(mf, ibound)
    lpf = flopy.modflow.ModflowLpf(mf, hk=hk, vka=vka,ipakcb=53)
    # well voor de stroming van de bron
    # ssm voor de chloride concentratie
    itype = flopy.mt3d.Mt3dSsm.itype_dict()
    wel_data={};ssm_data={};wel_sp=[]
    if 0<=(i-wyear*120)<60:
        wel_sp.append([warm,mid,mid,qa])
        wel_sp.append([koud,mid,mid,-qa])
        ssm_data[0] = [warm,mid,mid,chlo[i,koud,mid,mid],itype['WEL'],chlo[i,koud,mid,mid],wtemp]

    if 60<=(i-wyear*120)<120:
        wel_sp.append([warm,mid,mid,-qa])
        wel_sp.append([koud,mid,mid,qa])
        ssm_data[0] = [koud,mid,mid,chlo[i,warm,mid,mid],itype['WEL'],chlo[i,warm,mid,mid],ktemp]

    wel_data[0]=wel_sp
    wel = flopy.modflow.ModflowWel(mf, stress_period_data=wel_data)
    pcg = flopy.modflow.ModflowPcg(mf, hclose=1.e-2)
    oc = flopy.modflow.ModflowOc(mf)

    # MT3DMS model voor temperatuur en chloride concentratie
    mt = flopy.mt3d.Mt3dms(modelname, 'nam_mt3dms', mf, model_ws=workspace)
    btn = flopy.mt3d.Mt3dBtn(mt,ncomp=ncomp,mcomp=2,
                             prsity=prsity,nprs=1,timprs=[364/120],nstp=1,icbund=icbund,
                             sconc=chlo[i,:,:],sconc2=temp[i,:,:],chkmas=chkmas, dt0=dt0)
    adv = flopy.mt3d.Mt3dAdv(mt, mixelm=-1)
    dsp = flopy.mt3d.Mt3dDsp(mt, al=al, trpt=trpt, trpv=trpv, dmcoef=dmcoef,dmcoef2=dmcoef)
    gcg = flopy.mt3d.Mt3dGcg(mt, iter1=100)
    ssm = flopy.mt3d.Mt3dSsm(mt,stress_period_data=ssm_data)
    rct=flopy.mt3d.Mt3dRct(mt,isothm=isothm,ireact=ireact,igetsc=igetsc,rhob=rhob,sp1= sp1)

    # SEAWAT model
    mswt = flopy.seawat.Seawat(modelname, 'nam_SWT', mf, mt,
                                model_ws=workspace, exe_name = 'data/swt_v4')
    vdf = flopy.seawat.SeawatVdf(mswt,densemin=densemin,
                                densemax=densemax, denseref=denseref,drhodc=drhodc,drhodc2=drhodc2)
    # schrijven en uitvoeren
    mf.write_input()
    mt.write_input()
    mswt.write_input()
    shutil.copy('istevens.rct','data\istevens.rct') # er is geen mogelijkheid om de retardatie anders te
    schrijven

```



```
mwt.run_model(silent=True, report=False, pause=False)
# data lezen en initiele condities voor de volgende stap aanpassen
data1raw=bf.UcnFile(os.path.join(workspace, 'MT3D001.ucn'))
chlo[i+1,:,:]=data1raw.get_alldata()[0,:,:];
data2raw=bf.UcnFile(os.path.join(workspace, 'MT3D002.ucn'))
temp[i+1,:,:]=data2raw.get_alldata()[0,:,:];
```

Hierna kunnen de chlo en temp files gebruikt worden om efficiency te meten en grafieken te maken.