

## **Slimmer inlaten in de Haarlemmermeerpolder**

**Efficiënter doorspoelen en beperken van verzilting  
van het oppervlaktewater door zoute kwel**



## **Slimmer inlaten in de Haarlemmermeerpolder**

**Efficiënter doorspoelen en beperken van verzilting van het  
oppervlaktewater door zoute kwel**

1210766-000

**Titel**  
Slimmer inlaten in de Haarlemmermeerpolder

**Project** 1210766-000      **Kenmerk** 1210766-000-BGS-0006      **Pagina's** 62

<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteur</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Review</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Goedkeuring</b>	<b>Paraaf</b>
	dec. 2015	Ilmar Kelderman		Joost Delsman		Harm Duel	

**Status**  
definitief

## 1 Ten geleide

De Haarlemmermeer is een van de grootverbruikers van zoetwater in het beheersgebied van het Hoogheemraadschap van Rijnland, water dat nodig is voor het doorspoelen van de significante zoutlast van deze diepe polder. Eerder onderzoek in de Haarlemmermeer (Delsman, 2015) toonde aan dat dit doorspoelen niet altijd de beoogde effecten heeft: inlaatwater beperkt zich tot een klein aantal sloten, en wordt snel bijgemengd met zoute kwel tot een onacceptabele kwaliteit. Maar een beperkt deel van de percelen profiteert hierdoor van dit zoete water. Daarnaast worden de meeste inlaten niet gestuurd, ze worden aan het begin van het groeiseizoen open gezet, en weer gesloten aan het eind van het groeiseizoen. Een doelmatig beheer van de inlaten lijkt dan ook mogelijk.

Voor u ligt het eindrapport van het project 'Slimmer inlaten in de Haarlemmermeer'. In dit project is gekeken of met relatief eenvoudige maatregelen een duidelijke verbetering in het beheer van de inlaten is te behalen. Ofwel door zoetwater voor meer percelen beschikbaar te maken, ofwel door de hoeveelheid ingelaten zoetwater te beperken. Het project is ingevuld als begeleiding van een stage van WUR MSc student Ilmar Kelderman, in de periode februari tot juni 2015.

Voortbouwend op eerder werk (Delsman, 2015), is een Sobek waterkwantiteits- en kwaliteitsmodel gemaakt van alle waterlopen in peilvak 9 van de Haarlemmermeer. Het model berekent de ruimtelijke verspreiding van water en chloride van verschillende herkomst (inlaatwater, drainage, wellen, neerslag) in het peilvak. Na calibratie weet het model de stroming van water en chloride in het peilvak goed te reproduceren. Vervolgens zijn verschillende maatregelen in het model geïmplementeerd: lokale peilverhoging, betere scheiding van zoet en zout, inlaten alleen wanneer nodig. Uit het onderzoek blijkt dat met beperkte maatregelen de efficiëntie van doorspoelen kan worden vergroot. Wel moet nog verder worden onderzocht hoe de verschillende maatregelen zich in een grotere range van condities gedragen, bijvoorbeeld in een natte situatie.

De resultaten dragen bij aan een verder begrip van de stroming van water en zout in poldersloten in de Haarlemmermeer. De onderzochte maatregelen bieden potentie om, eerst als pilot, in het gebied te worden toegepast.

Joost Delsman  
Deltares

## Slimmer inlaten in de Haarlemmermeerpolder

Efficiënter doorspoelen en beperken van verzilting van het oppervlaktewater door zoute kwel

MSc internship Hydrology and Quantitative Water Management,  
HWM-70424,  
Wageningen University

Naam: Ilmar Kelderman  
Registratienummer: 900810426100

Begeleider stage (Deltares, Utrecht):  
dr. J.R. (Joost) Delsman  
Begeleider universiteit (Wageningen University):  
dr.ir. A.J.F. (Ton) Hoitink

Plaats en datum:  
Wageningen, juni 2015

In samenwerking met:  
Deltares, Utrecht  
Hoogheemraadschap Rijnland, Leiden

## Samenvatting

In de Haarlemmermeerpolder zorgt sterke zoute kwel voor verzilting van het oppervlaktewater. Om het water in de sloten niet te sterk te laten verzilten en geschikt te houden voor agrarische doeleinden, wordt er water vanuit de omliggende Ringvaart ingelaten en door de polder geleid (doorspoeling). Dit doorspoelen is echter minder effectief dan gedacht, inlaatwater bereikt maar een klein deel van de sloten en mengt al snel met zout kwelwater. Ook is de verwachting dat in de toekomst de beschikbaarheid van zoetwater voor doorspoelen zal afnemen, terwijl de zoute kwel in de Haarlemmermeerpolder juist verder zal toenemen. Om inzicht te krijgen in de chlorideconcentraties en de ruimtelijke verdeling van het oppervlaktewater op lokale schaal, is een gedetailleerd model in SOBEK gemaakt van de stroming van het oppervlaktewater in een peilvak van 10 km<sup>2</sup> in de Haarlemmermeerpolder. In verschillende scenario's is het effect onderzocht van maatregelen om het doorspoelen te wijzigen: doorspoeling verminderen, effectiever doorspoelen (dezelfde hoeveelheid inlaatwater beter gebruiken) en efficiënter doorspoelen (alleen inlaatwater gebruiken wanneer dit nodig is).

Wanneer er niet wordt doorgespoeld tijdens droge periodes, zijn de chlorideconcentraties sterk verhoogd ten opzichte van de situatie met doorspoeling. Tijdens periodes met veel neerslag is er echter weinig verschil tussen de situatie met en zonder doorspoeling. Bij halvering van de hoeveelheid inlaatwater is de chlorideconcentratie tijdens droge periodes ook verhoogd, maar deze verhoging is veel minder sterk dan in de situatie zonder doorspoeling. Peilverhoging van een sloot met veel zoute kwel vermindert de zoutvracht op het water dat in de polder uitgemalen en zorgt voor een grotere beschikbaarheid van zoetwater in het peilvak. De sloot zelf krijgt een constante, hoge concentratie van chloride doordat er geen drainagewater meer in de sloot terecht komt. Wel kunnen de aangrenzende percelen extra verzilten door infiltratie van zoutwater vanuit de sloot. Het scheiden van zoet- en zoutwater (door plaatsing van schotten in sloten waar veel zoute kwel plaatsvindt en dit water via een andere route laten stromen dan het inlaatwater) kan op een relatief eenvoudige manier het verzilten van inlaatwater tegengaan, waardoor er meer zoetwater beschikbaar blijft op grotere afstand van de inlaten. Wanneer er op een bepaald moment gestopt wordt met inlaten tijdens een droge periode, neemt in drie weken tijd de beschikbaarheid van zoetwater in het peilvak relatief snel af, waarna de afname van de zoetwaterbeschikbaarheid weer vertraagt. De afname van zoetwaterbeschikbaarheid gaat daarna in eenzelfde tempo door als in de situatie zonder doorspoeling. Na een periode zonder doorspoelen duurt het ongeveer een week tot de hoeveelheid beschikbaar zoetwater weer vergelijkbaar is met de situatie waarbij het hele seizoen wordt doorgespoeld.

Peilverhogingen in sloten met veel zoute kwel, het scheiden van zoet- en zoutwater en het alleen doorspoelen wanneer het water nodig is, blijken geschikte maatregelen om de doorspoeling te verbeteren. Voor een succesvolle toepassing van deze eerste twee maatregelen op andere locaties in diepe polders met zoute kwel, is het echter nodig dat de locaties bekend zijn waar precies de sterke zoute kwel plaatsvindt. Deze locaties kunnen achterhaald worden met behulp van EC-routing van de waterlopen tijdens een droge periode.

## Voorwoord

Dit verslag is het eindproduct van mijn masterstage bij Deltares in Utrecht. Ik heb de afgelopen vier maanden met veel plezier gewerkt aan mijn stageonderzoek, als laatste onderdeel van mijn Master Earth and Environment aan Wageningen University.

Graag wil ik mijn stagebegeleider Joost Delsman van Deltares bedanken voor al zijn hulp, nuttig commentaar en fijne samenwerking. Ondanks een erg drukke tijd door de geboorte van zijn dochter en zijn promotie, heeft hij genoeg tijd en aandacht kunnen geven aan het begeleiden van deze stage. Het was leuk om een begeleider te hebben die zo geïnteresseerd was in de resultaten van het onderzoek.

Ook wil ik Erwin Meijers van Deltares bedanken voor zijn hulp en goede uitleg bij het opzetten van het SOBEK model.

Verder wil ik Ton Hoitink, mijn begeleider vanuit Wageningen University, bedanken voor het geven van nuttige feedback tijdens de stage en het lezen en beoordelen van mijn stageverslag.

Birgitta van der Wateren, Jan Jelle Reitsma en Mark Kramer van Hoogheemraadschap Rijnland wil ik bedanken voor de goede samenwerking en het mogelijk maken van de stage. Hopelijk heeft mijn onderzoek op een positieve manier bij kunnen dragen aan het begrip van het watersysteem van Hoogheemraadschap Rijnland.

Als laatste wil ik de medewerkers en stagiairs van Deltares bedanken voor het wegwijs maken en de gezellige tijd bij Deltares in Utrecht.

## Inhoud

<b>1 Ten geleide</b>	<b>iv</b>
<b>2 Inleiding</b>	<b>1</b>
2.1 Probleembeschrijving	1
2.2 Doelstelling	1
2.3 Opzet onderzoek	2
2.4 Leeswijzer	3
<b>3 Onderzoeksgebied</b>	<b>4</b>
3.1 Haarlemmermeerpolder	4
3.1.1 Geologie	5
3.1.2 Zoute-wellen	5
3.1.3 Doorspoelen met inlaatwater	6
3.1.4 Herkomst verschillende typen water	7
3.2 Data	8
<b>4 Methode</b>	<b>10</b>
4.1 Opbouw basismodel	10
4.1.1 Drainagefluxen (RSGEM)	10
4.1.2 Stromingsmiddel (SOBEK 1D FLOW)	11
4.1.3 Model waterfracties en zoutconcentraties (SOBEK 1D WAQ)	15
4.2 Scenario's	16
4.2.1 Scenario 1 (geen inlaat)	16
4.2.2 Scenario 2 (halveren inlaathoeveelheid)	16
4.2.3 Scenario 3 (peilopzet in een sloot met wellen)	16
4.2.4 Scenario 4 (scheiden van zoetwater en zoutwater)	17
4.2.5 Scenario 5 (tijdens een droge periode inlaten stoppen)	18
4.2.6 Scenario 6 (tijdens een droge periode inlaten hervatten)	19
<b>5 Resultaten</b>	<b>20</b>
5.1 Basismodel	20
5.1.1 Kalibratie drainagefluxen (RSGEM)	20
5.1.2 Validatie stromingsmodel (SOBEK 1D FLOW)	20
5.1.3 Validatie model waterfracties en zoutconcentratie (SOBEK 1D WAQ)	22
5.2 Scenario's	28
5.2.1 Scenario 1 (geen inlaat)	28
5.2.2 Scenario 2 (halveren inlaathoeveelheid)	29
5.2.3 Scenario 3 (peilopzet in een sloot met wellen)	31
5.2.4 Scenario 4 (scheiden van zoetwater en zoutwater)	33
5.2.5 Scenario 5 (tijdens een droge periode inlaten stoppen)	35
5.2.6 Scenario 6 (tijdens een droge periode inlaten hervatten)	38
<b>6 Discussie</b>	<b>40</b>
6.1 Basismodel	40
6.2 Scenario's	41
<b>7 Conclusies</b>	<b>43</b>



<b>8 Aanbevelingen</b>	<b>45</b>
8.1 Toepassing van de maatregelen	45
8.2 Verder onderzoek met het model	45
8.3 Softwareverbeteringen	46
<b>9 Referenties</b>	<b>47</b>
 <b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Resultaat van G-EMMA analyse onderzoek Joost Delsman, gebruikt als kalibratiedata voor het model</b>	<b>A-1</b>
<b>B Situatieschets scenario 4</b>	<b>B-1</b>
<b>C EC beelden</b>	<b>C-1</b>
<b>D Chlorideconcentraties SOBEK basismodel en scenario's</b>	<b>D-1</b>
<b>E Fracties herkomst uitgemalen water SOBEK basismodel en scenario's</b>	<b>E-1</b>
<b>F Zoutconcentratie SOBEK basismodel versus metingen</b>	<b>F-1</b>
<b>G Zoutconcentraties SOBEK basismodel en scenario 4</b>	<b>G-1</b>

## 2 Inleiding

### 2.1 Probleembeschrijving

In de Haarlemmermeerpolder zorgt sterke zoute kwel voor verzilting van het oppervlaktewater. Om het water in de sloten niet te sterk te laten verzilten en geschikt te houden voor agrarische doeleinden wordt er daarom water ingelaten vanuit de omliggende Ringvaart. Dit zoete water wordt door de sloten in de polder geleid, mengt met het zoute water dat via zoute kwel in de sloten terecht komt en wordt aan de andere kant van de polder weer uitgemalen. Dit proces wordt doorspoelen genoemd.

De Haarlemmermeerpolder is onderdeel van het beheergebied van Hoogheemraadschap Rijnland. Om het waterpeil te handhaven en voldoende water inlaatwater beschikbaar te houden voor doorspoeling, wordt water aangevoerd vanuit de Hollandsche IJssel bij Gouda via de 'boezem', een centraal systeem van watergangen, meren en plassen (Rijnland, 2009). Bij Gouda wordt in een normale zomer tussen de 40 en 60 Mm<sup>3</sup> water aangevoerd (Rijnland, 2008).

Het doorspoelen van de Haarlemmermeerpolder kost relatief veel zoetwater van het beheersgebied van Rijnland, ca. 20 Mm<sup>3</sup> per zomer (Dik, Kroes, Smit, & Veldhuizen, 2005). Verder is uit onderzoek gebleken dat het doorspoelen minder effectief is dan gedacht (Delsman J. , 2015). Het inlaatwater bereikt maar een beperkt aantal sloten en krijgt al snel hoge zoutconcentraties door menging met zout kwelwater. Ook wordt de hoeveelheid inlaatwater op dit moment weinig gestuurd door factoren als de droogtesituatie en waterbehoefte (de inlaten worden nu handmatig geopend van 1 april tot 1 oktober). De verwachting is dat in de toekomst de beschikbaarheid van zoetwater om de polder door te spoelen zal afnemen, terwijl de zoute kwel in de Haarlemmermeerpolder juist verder zal toenemen (De Louw, Oude Essink, & Maljaars, 2007). Om deze redenen is het belangrijk om meer inzicht te krijgen hoe het inlaatwater zich op lokaal niveau verspreid (in de sloten) en te onderzoeken of er maatregelen mogelijk zijn om dit water effectiever en efficiënter te gebruiken.

### 2.2 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in de huidige zoutconcentraties van het oppervlaktewater in een deel van de Haarlemmermeerpolder en daarnaast het effect op kleine schaal te onderzoeken van een aantal mogelijke maatregelen waarbij op andere manieren wordt doorgespoeld met inlaatwater.

Er is nog weinig ervaring met het modelleren van zoutconcentraties op een dergelijk kleine schaal, omdat er onvoldoende data beschikbaar was om een model op deze kleine schaal op te kunnen zetten. Onderzoek naar zoute kwel in de Haarlemmermeerpolder (Delsman, Oude Essink, Beven, & Stuyfzand, 2013) heeft echter waardevolle data voortgebracht waarmee dit mogelijk is geworden. Voor dit onderzoek is gedurende een jaar zeer frequent de chemische samenstelling van het water bepaald dat een gedeelte van de Haarlemmermeerpolder uitgemalen is (bij het gemaal van peilvak 9-19). Naast de gemeten zoutconcentratie is met behulp van een 'end-member mixing analyse' de herkomst van het water bepaald voor vijf verschillende typen water.

In het onderzoek worden de volgende hoofd- en deelvragen beantwoord:

- Is het mogelijk om het doorspoelen van inlaatwater in peilvak 9-19 van de Haarlemmermeerpolder efficiënter te maken, zodat de verzilting van het oppervlaktewater door zoute kwel beperkt wordt?
  - Door welke processen wordt de zoutconcentratie in de sloten in de Haarlemmermeerpolder gestuurd?
  - Kunnen de drainagefluxen in peilvak 9-19 representatief gemodelleerd worden?
  - Kunnen de zoutconcentraties en watertypen in de sloten van peilvak 9-19 representatief gemodelleerd worden?
  - Wat zijn de effecten van het verminderen van de hoeveelheid inlaatwater op de zoutconcentratie in het oppervlaktewater?
  - Kan er effectiever gebruik gemaakt worden van dezelfde hoeveelheid inlaatwater, waardoor er meer zoetwater beschikbaar is?
  - Hoe snel verandert de zoutconcentratie en beschikbaarheid van zoet water in het peilvak tijdens een droge periode bij het stoppen en hervatten van inlaten?

### 2.3 Opzet onderzoek

Er is een gedetailleerd model gemaakt van het oppervlaktewater van een deel van de Haarlemmermeerpolder. Het model is gebaseerd op de situatie in peilvak 9-19, een gebied van ongeveer 10 km<sup>2</sup> in het zuidoosten van de Haarlemmermeerpolder. Naast het analyseren van de doorspoeling met inlaatwater in de huidige situatie, is berekend hoe de situatie wordt wanneer er minder inlaatwater wordt gebruikt voor het doorspoelen. Ook is er onderzocht of met kleinschalige maatregelen de doorspoeling effectiever gemaakt kan worden, zodat er met dezelfde hoeveelheid inlaatwater meer zoet water beschikbaar blijft in de sloten en dit zoete water beter verdeeld wordt door het peilvak. Verder is er gekeken naar een situatie waarbij het doorspoelen efficiënter plaatsvindt en er alleen water wordt ingelaten wanneer dit nodig is voor bijvoorbeeld beregening.

Naast een basismodel van de huidige situatie zijn zes nieuwe scenario's uitgewerkt en doorgerekend. Het gaat om de volgende scenario's:

#### **Minder doorspoelen:**

- Scenario 1: Geheel stoppen met inlaten.
- Scenario 2: Halveren van de hoeveelheid inlaatwater.

#### **Effectiever doorspoelen (evenveel inlaatwater beter gebruiken):**

- Scenario 3: Het verhogen van het waterpeil in een specifieke sloot met veel zoute kwel.
- Scenario 4: Scheiden van zoetwater en zoutwater om het inlaatwater langer zoet te houden.

#### **Efficiënter doorspoelen (alleen inlaatwater gebruiken wanneer nodig):**

- Scenario 5: Op een moment tijdens een droge periode stoppen met doorspoelen (met en zonder peilverhoging voor het stoppen van doorspoelen).
- Scenario 6: Op een moment tijdens een droge periode hervatten van doorspoelen na een periode zonder doorspoeling.

## 2.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt achtergrondinformatie gegeven over het onderzoeksgebied en de processen waarop het model gebaseerd is. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de opbouw van het basismodel en de verschillende scenario's beschreven. De resultaten van het basismodel en de verschillende scenario's worden gepresenteerd in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 volgt de discussie en er wordt afgesloten met de conclusies (hoofdstuk 6) en aanbevelingen (hoofdstuk 7) van het onderzoek.

### 3 Onderzoeksgebied

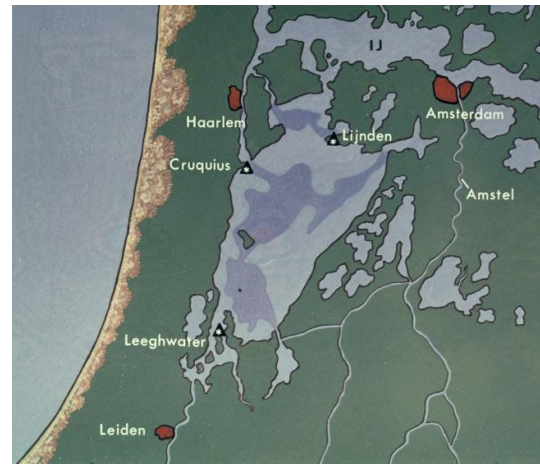
#### 3.1 Haarlemmermeerpolder

De Haarlemmermeerpolder ligt in het westen van Nederland tussen Leiden en Amsterdam. De polder is in 1852 ontstaan bij het droogleggen van de toenmalige Haarlemmermeer. De maaiveldhoogte van de Haarlemmermeerpolder varieert tussen de -3 en -6 m NAP.

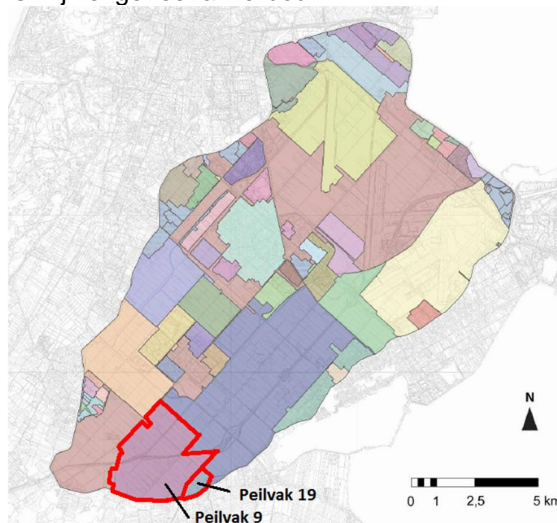
Ongeveer 25% van de Haarlemmermeerpolder is tegenwoordig bebouwd gebied. De grootste dorpen zijn Hoofddorp en Nieuw-Vennep, verder zijn er ook bedrijventerreinen en bevindt de luchthaven Schiphol zich in het noordelijke deel van de polder. Twee belangrijke snelwegen en spoorlijnen doorsnijden het gebied. Verder heeft de Haarlemmermeerpolder grotendeels een agrarische functie, er vindt hoofdzakelijk akkerbouw plaats.

Rond de Haarlemmermeerpolder ligt de Ringvaart, onderdeel van het boezemsysteem van Hoogheemraadschap Rijnland. Verder loopt er een kanaal (Hoofdvaart) in noord-zuid richting door polder. Aan de zuidkant van dit kanaal bevindt zich Gemaal Leeghwater en aan de noordkant Gemaal Lijnden.

De Haarlemmermeerpolder is onderverdeeld in peilvakken (Zie Figuur 3.2) met elk een eigen beheer van het waterpeil. Peilvakken 9 en 19 waarvan het model in dit onderzoek gemaakt is, liggen in het zuiden van de Haarlemmermeerpolder. Het landgebruik in deze twee peilvakken is vrijwel geheel akkerbouw.



Figuur 3.1: De Haarlemmermeer voor de drooglegging



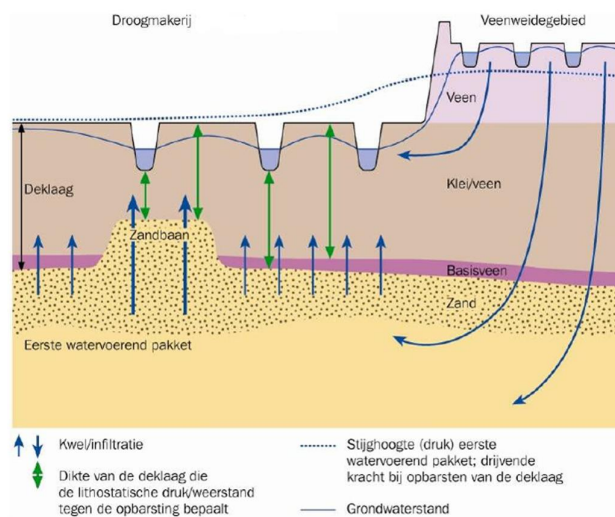
Figuur 3.2: Peilvakken in de Haarlemmermeerpolder en de locatie van peilvak 9 en 19

### 3.1.1 Geologie

Aan het eind van het Pleistoceen ( $\pm 13000$  v. Chr.) lag de zeespiegel van de Noordzee op -45 NAP en was het gebied waar zich nu de Haarlemmermeerpolder bevindt, bedekt door dekzanden met vlechtende riviersystemen. Door stijging van de zeespiegel in het begin van het Holoceen steeg het grondwater in het gebied mee en vond er uitgebreide veenvorming plaats (gevormd tot  $\pm 6500$  v. Chr.), dit wordt het 'Basisveen' genoemd. Het grondwater in de ondiepe (0 - 20 m) en diepe (> 20 m) ondergrond was op dat moment zoet. Door de verdere stijging van de zeespiegel brak de zee door in het gebied en ontstond er een waddegebied met strandwallen en geulen door eerdere afzettingen heen. Op de plekken waar de slechtdoorlatende lagen weg waren geërodeerd, kon het zoute zeewater snel en tot op grote diepte doordringen (doordat zoutwater zwaarder is dan zoetwater i.v.m. een grotere dichtheid). 4400 jaar geleden nam de invloed van de zee af door uitbouw van strandwallen op de huidige kustlijn. Achter deze strandwallen ontstond een veengebied. Doordat neerslag in het veengebied infiltreerde, werd het grondwater in de bovenste laag van de ondergrond weer zoet. Door invloeden van de mens (ontwatering van de veengebieden, aanleg polders) kwam het maaiveld onder zeeniveau te liggen en door de druk van het zeewater op het grondwater ontstond er (sterke) kwel in de laaggelegen delen van het gebied (Delsman, et al., 2014). Door deze kwel verplaatst het diepere grondwater op dit moment steeds verder richting het maaiveld en neemt de hoeveelheid zoetwater in de bovenste laag van de ondergrond steeds verder af. Op deze manier wordt in diepe polders de kwel steeds zouter, doordat grondwater afkomstig grotere diepte het maaiveld bereikt (Rijnland, 2005).

### 3.1.2 Zoute-wellen

Het zoute grondwater, dat aanwezig is in het eerste watervoerende pakket, kan op drie manieren het oppervlaktewater bereiken in diepe polders (droogmakerijen) zoals de Haarlemmermeerpolder: als diffuse kwel door de gehele deklaag, als kwel via de aanwezige zandbanen in de deklaag (afzettingen van geulen die in het begin van het Holoceen zijn ontstaan) en als sterke lokale kwel via diepe wellen die in direct contact staan met het eerste watervoerende pakket (De Louw P., Oude Essink, Stuyfzand, & Van der Zee, 2010). Zie Figuur 3.3 voor een schematische weergave van deze verschillende typen van zoute kwel.



Figuur 3.3: Verschillende typen van zoute kwel in een diepe polder (droogmakerij)

In peilvak 9 en 19 zijn voor zover bekend geen grote zandbanen aanwezig en daarom is aangenomen dat hier vooral kwel plaatsvindt via diffuse kwel en diepe wellen. De diffuse kwel heeft een veel lagere zoutconcentratie dan de diepe wellen die in directe verbinding staan met het eerste watervoerende pakket. Het grootste deel van het zout dat in het oppervlaktewater terecht komt is dan ook afkomstig van diepe wellen (Vink, 2010).

Diepe wellen bevinden zich vooral op locaties met een groot 'opbarstingsrisico', daarom is de kans op wellen het grootst als de locaties de volgende eigenschappen hebben (De Louw, Oude Essink, & Maljaars, 2007):

- In sloten (hier is een gering/relatief laag gewicht van de deklaag)
- Ter hoogte van zandbanen in de bodem (hier is minder weerstand van de bodem)
- Aan de rand van diepe polders (hoge kweldruk t.o.v. grondwaterstand, zie ook Figuur 3.3)

Er wordt verwacht dat de zoutconcentratie van diepe wellen met 50-100% toegenomen zal zijn in 2100 (Oude Essink, Van Baaren, & De Louw, 2010) als gevolg van het autonome proces van verzilting dat plaatsvindt sinds het droogmalen van de polder (rond 1850) waarbij steeds zouter grondwater omhoog komt.

In eerder onderzoek is onderzocht of het mogelijk is om wellen te dichten en zo de hoeveelheid zoute kwel te verminderen. Dit blijkt echter lastig en alleen mogelijk op plaatsen met relatief veel weerstand van de grond en weinig ruimtelijke verspreiding van een wel (een beperkte oppervlakte waar een wel invloed heeft via openingen/scheuren in de grond). Daarnaast zorgt het dichten van wellen voor een hogere diffuse kwel, de totale kwelhoeveelheid neemt echter niet af. Deze diffuse kwel zorgt echter wel voor minder verzilting dan het water van diepe wellen (De Louw, Oude Essink, & Maljaars, 2007).

### 3.1.3 Doorspoelen met inlaatwater

Om de verzilting van het oppervlaktewater door zoute kwel te beperken, wordt er gedurende de periode 1 april t/m 1 oktober water vanuit de boezem ingelaten in de diepe polders zoals de Haarlemmermeerpolder waar veel zoute kwel plaatsvindt. Volgens het beleid van het Hoogheemraadschap Rijnland gebeurt het inlaten van water om de volgende drie redenen (Dik, Kroes, Smit, & Veldhuizen, 2005):

- Peilhandhaving
- Reductie van chloride-concentratie (Cl)
- Algemene verbetering van de waterkwaliteit

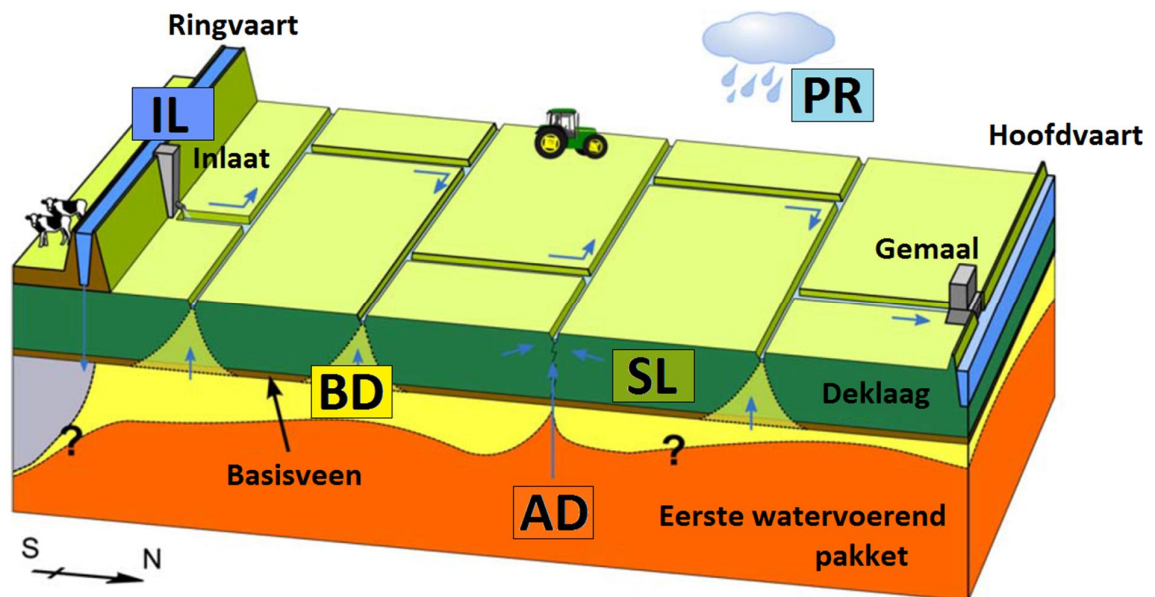
In de Haarlemmermeerpolder wordt er op twee manieren water ingelaten, via gemaal Leeghwater in de Hoofdvaart en via ongeveer 100 kleinere inlaten rondom de Haarlemmermeerpolder (Dik, Kroes, Smit, & Veldhuizen, 2005).

Aan de zuidkant van de Haarlemmermeerpolder wordt water ingelaten door gemaal Leeghwater vanuit de Ringvaart (boezem) in de Hoofdvaart (die zuid-noord door de Haarlemmermeerpolder loopt). Dit water wordt door de Hoofdvaart naar het noorden gevoerd en aan de noordkant van de Haarlemmermeerpolder bij gemaal Lijnden de polder weer uitgemalen verder richting het Noordzeekanaal. Het inlaten van water bij gemaal Leeghwater wordt gestuurd door de chlorideconcentratie in de Hoofdvaart. Tussen 1 april en 1 oktober wordt er water ingelaten bij gemaal Leeghwater zodra de chlorideconcentratie van het water dat bij gemaal Lijnden uitgemalen wordt, boven de 600 mg/L komt.

Verder wordt via de ongeveer 100 kleinere inlaten ook water vanuit de Ringvaart rechtstreeks de peilvakken ingelaten en via de sloten door de polder naar gemalen langs de Hoofdvaart gevoerd. Bij deze kleinere gemalen wordt het water vervolgens in de Hoofdvaart uitgemalen en stroomt het verder richting gemaal Lijnden waar het water ook richting het Noordzeekanaal wordt uitgemalen. De kleine inlaten worden handmatig geopend en gesloten. In de praktijk betekent het dat deze kleine inlaten gedurende de periode 1 april t/m 1 oktober vrijwel altijd open staan. Het is echter niet bekend op welke schaal dit inlaatwater ook daadwerkelijk voor beregening gebruikt wordt (Vink, 2010).

### 3.1.4 Herkomst verschillende typen water

In recent onderzoek (Delsman, Oude Essink, Beven, & Stuyfzand, 2013) is gedurende een jaar de chemische samenstelling van het water bepaald wat door het gemaal van peilvak 9-19 is uitgemalen. Ook is de chemische samenstelling bepaald van vijf typen water die onderscheidend zijn in hydrologie en zoutconcentratie (inlaat **IL**, diepe wellen **AD**, freatisch grondwater **SL**, diffuse kwel onder sloten **BD**, neerslag **PR**). Zie Figuur 3.4 voor een schematische weergave van de vijf typen water die onderscheiden worden en Tabel 3.1 voor de oorspronkelijke naamgeving en bijbehorende mediane chlorideconcentraties (Delsman, Oude Essink, Beven, & Stuyfzand, 2013).



Figuur 3.4: Schematische weergave van de herkomst van de typen water



Tabel 3.1: Chlorideconcentraties en naamgeving van de typen water

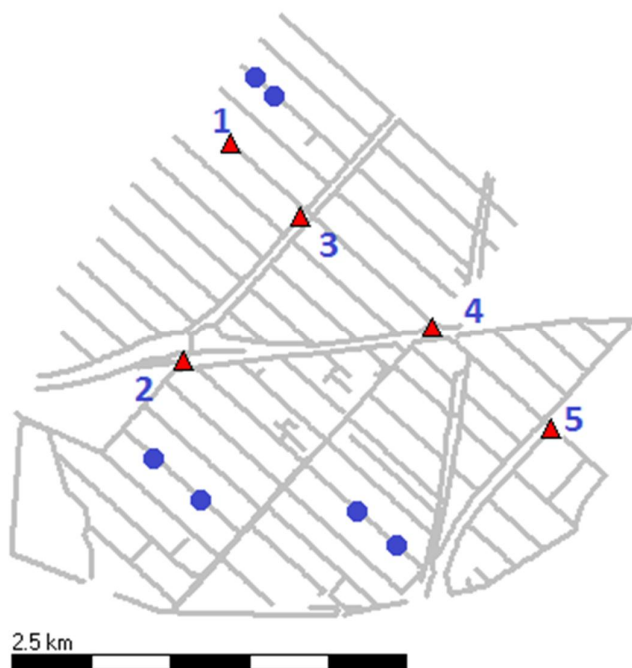
Type water	Cl (mg/L)
Inlaatwater, <b>IL</b> 'inlet'	136
Diepe wellen, <b>AD</b> 'deep aquifer groundwater, discharged through boil seepage'	5453
Freatisch grondwater, <b>SL</b> 'shallow, phreatic groundwater discharged mostly through tile drains'	75
Diffuse kwel onder sloten, <b>BD</b> 'groundwater below ditches, representing diffuse seepage'	336
Neerslag, <b>PR</b> 'precipitation'	6

Met de 362 watermonsters die gedurende het jaar verzameld zijn bij het gemaal Heye is een 'Generalized Likelihood Uncertainty Estimation End-Member Mixing Analysis' (GLUE-EMMA/G-EMMA) toegepast met 9 onderscheidende conservatieve stoffen in het water (Delsman, Oude Essink, Beven, & Stuyfzand, 2013). Hiermee zijn de mediaan en bijbehorende onzekerheden (25%-75% en 5%-95%) van de fracties van de verschillende watertypen bepaald. Deze zijn vervolgens vermenigvuldigd met de gemeten afvoer van het gemaal om de fluxen van de verschillende watertypen te bepalen (Zie bijlage A). Deze resultaten worden in dit stageonderzoek gebruikt als kalibratiedata voor de opbouw van het model om de watertypen en zoutconcentraties in de Haarlemmermeerpolder te modelleren.

### 3.2 Data

De volgende gegevens zijn gebruikt voor het onderzoek:

- Afvoer van 5 typen water met verschillende herkomst (Delsman, Oude Essink, Beven, & Stuyfzand, 2013):
  - Hoofdgemaal Heye (11 oktober 2011 t/m 4 oktober 2012)
- Ruimtelijk beeld specifieke geleidbaarheid (EC) van de waterlopen in het peilvak (Delsman J. , 2015):
  - Droge situatie (mei 2011)
  - Natte situatie (februari 2013)
- Specifieke geleidbaarheid (EC) op 5 verschillende locaties in het peilvak (Delsman J. , 2015), voor de locaties zie Figuur 3.5:
  1. Hoofdgemaal Heye
  2. Fietsbrug over Kagertocht bij snelweg
  3. Noordwesten van Kagertocht nabij Lisserweg
  4. Lissertocht bij carpoolplaats
  5. Stuw peilvak 19
- Grondwaterstanden op 6 locaties in de percelen (Delsman J. , 2015), zie Figuur 3.5.
- Dagelijkse neerslag en verdamping van meteorologisch station Schiphol (KNMI, 2011-2013)
- Ligging van de waterlopen en hydraulische profielen in GIS-bestand, uit 'Legger oppervlaktewateren van Rijnland' (Rijnland, 2011).
- Gemeten maximale capaciteit van de inlaten (Delsman J. , 2015).



Figuur 3.5: Meetlocaties van grondwaterstanden (blauwe cirkels) en EC (rode driehoeken). 1 hoofdgemaal Heye, 2 fietsbrug, 3 noordwesten Kagertocht, 4 Lissertocht bij carpoolplaats, 5 stuw peilvak 19

## 4 Methode

### 4.1 Opbouw basismodel

Om de zoutconcentratie in de sloten van het peilvak te modelleren wordt gebruik gemaakt van een gekoppeld model van versie 2.14 van SOBEK 1D FLOW (Rural) en SOBEK 1D WAQ (module voor het modelleren van waterkwaliteit) (Deltares, 2015). Eerst wordt de stroming van het water in een eendimensionaal netwerk van de sloten in het onderzoeksgebied gemodelleerd met SOBEK 1D FLOW. Vervolgens krijgt het water een concentratie van (passieve) stoffen toegekend en wordt de menging en verplaatsing van deze stoffen gemodelleerd met SOBEK 1D WAQ aan de hand van de eerder berekende stroming van het water door SOBEK 1D FLOW.

De drainagefluxen die als input nodig zijn voor het SOBEK FLOW model worden voorafgaand berekend buiten SOBEK met behulp van een losstaand neerslag-afvoermodel (RSGEM, Rapid Saline Groundwater Exfiltration Model) (Delsman, De Louw, Oude Essink, & De Lange, 2014). Dit model is geschikt voor het modelleren van de diffuse kwel onder sloten en het freatisch grondwater dat voornamelijk via drains wordt afgevoerd naar de sloten.

#### 4.1.1 Drainagefluxen (RSGEM)

RSGEM is een lumped waterbalansmodel dat de stroming van water en zout van een landbouwperceel naar het oppervlaktewater beschrijft. In het model wordt de diepte van de scheiding tussen zout- en zoetwater berekend met behulp van het stromingspatroon van het grondwater (formule van Hooghoudt), dat beïnvloed wordt door veranderingen van de grondwaterspiegel, neerslag/verdamping en drainage. De drainagekwelfluxen zijn opgedeeld in twee verschillende gedeeltes, de hoeveelheid water afkomstig van onder en van boven de zoet-zoutgrens. Hiermee kan de zoutconcentratie van de kwelfluxen berekend worden. Met het model worden de fluxen voor zowel de diffuse kwel onder de sloten (Qditch) en de flux van het freatisch grondwater via drains (Qdrain) berekend.

Het maaiveld is ingesteld op -4.9 m NAP, dit is het referentieniveau voor de waterpeilen in het model. Het zomerpeil op -1.5 m t.o.v. maaiveld (-6.4 m NAP) en het winterpeil op -1.65 m t.o.v. het maaiveld (-6.55 m NAP). De stijghoogte van het eerste watervoerend pakket is +0.5 m boven maaiveld (-4.4 m NAP). Met het model is een simulatie gedaan voor het hele peilvak, er worden geen ruimtelijke verschillen meegenomen, door beperkingen van de beschikbare kalibratiedata. De berekende fluxen worden voor het hele peilvak gebruikt.

Het RSGEM model is gekalibreerd met de beschikbare data van de grondwaterstanden van het freatisch grondwater in de percelen en de beschikbare datareeks met afvoer van diffuse kwel (BD) en freatisch grondwater van drains (SL) bij het gemaal (van de GLUE end-member mixing analyse). De kalibratie is gedaan met behulp van een 'Generalized Likelihood Uncertainty Estimation' (GLUE). Hierbij zijn 100000 simulaties uitgevoerd van het RSGEM model met verschillende parameters. Uiteindelijk waren er 28 parametersets van 'behavioural runs' die voldeden aan de ingestelde voorwaarden, waarbij extra gewicht is gegeven aan de lage afvoeren van Qdrain in de zomerperiode (zodat de drainage niet overschat wordt in deze periode). Met deze 28 verkregen parametersets is het RSGEM model gerund in dagelijkse tijdstappen gedurende de periode van 1 januari 2011, 0:00 uur t/m 1 januari 2014, 0:00 uur.

De drainagefluxen worden als laterale fluxen gekoppeld aan de sloten in de SOBEK 1D FLOW schematisatie. Vervolgens krijgen de drainagefluxen een constante chlorideconcentratie toegekend in SOBEK 1D WAQ.

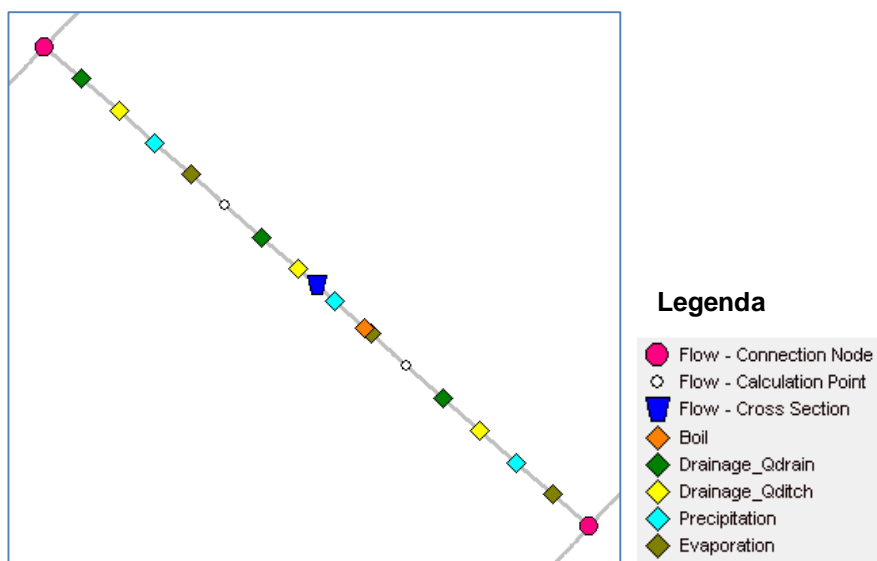
#### 4.1.2 Stromingsmiddel (SOBEK 1D FLOW)

De schematisatie wordt opgebouwd met behulp van een GIS bestand van de 'Legger Oppervlaktewateren' van Hoogheemraadschap Rijnland, met hierin de ligging en hydraulische dwarsprofielen van alle waterlopen in het peilvak. Het model is opgebouwd uit een netwerk van eendimensionale waterlopen. Door beperkingen in rekestijd zijn niet alle 28 resultaten van de GLUE analyse uit RSGEM gebruikt als input voor de drainagefluxen, maar is de mediaan hiervan gebruikt.

Zie Figuur 4.1 voor een fragment van de schematisatie van het model in SOBEK. Op alle punten waar meerdere sloten bij elkaar komen is een 'flow – connection node' aanwezig (in totaal 233). Tussen de verschillende 'flow connection nodes' is per sloot een 'cross section' gedefinieerd waarin de hydraulische eigenschappen van elke sloot opgelegd wordt (in totaal 256), daarnaast is elke 100m een 'calculation point' aanwezig tussen de 'flow connection nodes' (in totaal 496). Verder zijn er extra netwerkpunten toegevoegd waar het water het model in en uit kan stromen, zie Tabel 4.1 voor een overzicht van alle opgelegde randvoorwaarden.

Tabel 4.1: Randvoorwaarden schematisatie SOBEK 1D FLOW

	Aantal	Node type	Randvoorwaarde
Gemalen	2	'Flow – boundary'	Opgelegd waterpeil / geen flux
Inlaten	5	'Point lateral flow'	Opgelegde flux (tijdreeks)
Diepe wellen	20	'Point lateral flow'	Constante flux
Drainage_Qdrain	752 (458 actief)	'Point lateral flow'	Opgelegde flux (tijdreeks)
Drainage_Qditch	752 (458 actief)	'Point lateral flow'	Opgelegde flux (tijdreeks)
Neerslag	752	'Point lateral flow'	Opgelegde flux (tijdreeks)
Verdamping	752	'Point lateral flow'	Opgelegde flux (tijdreeks)

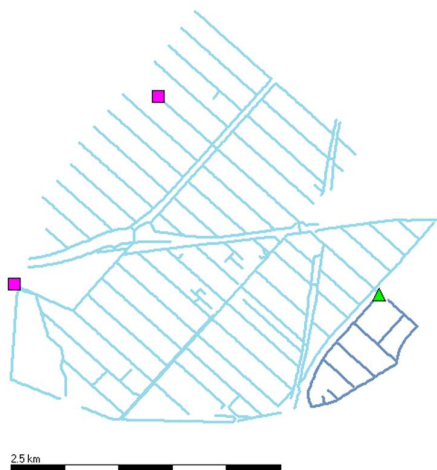


Figuur 4.1: Fragment van de schematisatie in SOBEK

### Gemalen

Peilvak 19 (donkerblauwe waterlopen in Figuur 4.2) is met een stuw verbonden met peilvak 9 (lichtblauwe waterlopen in Figuur 4.2) en watert af op dit peilvak. Peilvak 19 heeft een afwijkend waterpeil van -6.2 m NAP, dat met de stuw ingesteld wordt in het model.

In peilvak 9 zijn twee gemalen die het water van het peilvak naar de Hoofdvaart uitmalen. In dit peilvak is normaal gesproken alleen het noordelijke gemaal (Heye) actief. Dit gemaal zorgt ervoor dat het waterpeil in het gehele peilvak 9 constant gehouden wordt. In het model is dit gemaal ingesteld met een vast peil van -6.4 m NAP (zomerpeil) als randvoorwaarde. De kleine fluctuaties door het aan- en afslaan van het gemaal worden niet gesimuleerd. Zodra het water boven het ingestelde peil komt in het model, wordt het direct afgevoerd. Het westelijke gemaal (Heyepad) wordt incidenteel gebruikt voor extra capaciteit, wanneer één gemaal niet voldoende is om het waterpeil te kunnen handhaven in het peilvak. In het model is dit gemaal niet actief en ingesteld met een vaste flux van 0 m<sup>3</sup>/s (geen flux).



Figuur 4.2: Schematisatie van waterlopen in peilvak 9 (lichtblauw) en peilvak 19 (donkerblauw), met stuw van peilvak 19 (driehoek) en de gemalen van peilvak 19 (vierkant).

### Inlaten

Er zijn vijf inlaten aan de zuidrand van het gebied. Deze inlaten hebben gedurende een deel van het jaar een constante flux en zijn actief in de periode van 1 april t/m 1 oktober. Buiten deze periode zijn de inlaten niet actief. In Tabel 4.2 staan de inlaathoeveelheden per inlaat, deze fluxen zijn de in het veld gemeten maximale inlaathoeveelheden van de inlaten. Voor de locaties van de inlaten, zie Figuur 4.3.

Tabel 4.2: Overzicht van de inlaatfluxen

Inlaten	1 april t/m 1 oktober	1 oktober t/m 1 april
Inlaat 1	0.0162 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 2	0.0236 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 3a	0.0306 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 3b	0.0097 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 4	0.0155 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s
<b>Totaal</b>	<b>0.0956 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>0 m<sup>3</sup>/s</b>

### Diepe wellen

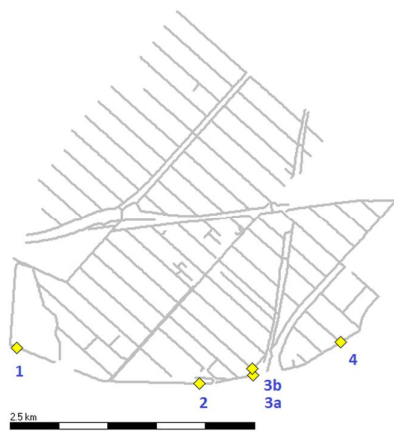
Er zijn 20 diepe wellen toegevoegd aan de schematisatie met een totale kwelflux van 0.32 mm/d. Deze kwelflux is het gemiddelde van de beschikbare datareeks met afvoer van de diepe wellen (AD) bij het gemaal (van de GLUE end-member mixing analyse). De totale kwelflux wordt random verdeeld via een normale verdeling met een standaardafwijking van 10% over deze 20 diepe wellen. Elke wel krijgt een constante flux opgelegd. Er wordt een constante kwel door de wellen aangenomen omdat het slootpeil door het gemaal constant gehouden wordt.

Met de kwelflux van de diepe wellen van 0.32 mm/d, de stijghoogte van het eerste watervoerende pakket van +0.5 m NAP (waar het diepe welwater van afkomstig is) en het slootpeil van -1.5 m NAP, is de weerstand van de deklaag bepaald van 6250 dagen (Zie Vergelijking 3.1). Op deze manier kan ook de kwelflux van de diepe wellen voor afwijkende slootpeilen berekend worden (in scenario 3 en 5). De gebruikte kwelfluxen zijn ten opzichte van de oppervlakte van het hele peilvak en geven daarom een hoge waarde voor de weerstand van de deklaag. In werkelijkheid is er echter maar een klein gedeelte van de oppervlakte van het peilvak waar deze wellen zich bevinden. De daadwerkelijke weerstand van de flux in de wellen zelf is dus vele malen lager.

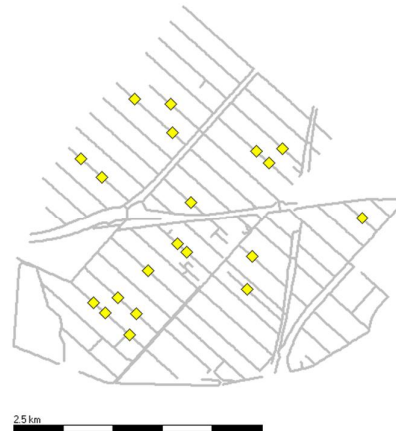
$$q = \frac{(h_{\text{aquifer}} - h_{\text{sloot}})}{C_{\text{deklaag}}} \rightarrow 3.2 \cdot 10^{-4} = \frac{(0.5 - -1.5)}{6250}, \quad (\text{Vergelijking 3.1})$$

$q$	=	kwelflux	wellen	(m/d),
$h_{\text{aquifer}}$	=	stijghoogte	eerste	watervoerend
$h_{\text{sloot}}$	=		slootpeil	pakket
$C_{\text{deklaag}}$	=	weerstand van de deklaag	(d)	(m),

Zie Figuur 4.4 voor de locaties van de diepe wellen. De locaties van de wellen zijn op aannemelijke locaties geplaatst aan de hand van beschikbare data over de ruimtelijke verdeling van zoutconcentraties. Het is voornamelijk gebaseerd op het ruimtelijke EC-beeld van het peilvak gedurende een droge periode in mei 2011 (Zie bijlage C). De wellen zijn geplaatst in de sloten met hoge EC, om op deze manier een zo representatief mogelijk beeld van de ruimtelijke variatie van de zoutconcentratie te verkrijgen, dat voornamelijk door de aanwezigheid van wellen beïnvloed wordt.



Figuur 4.3: Locaties van de inlaten

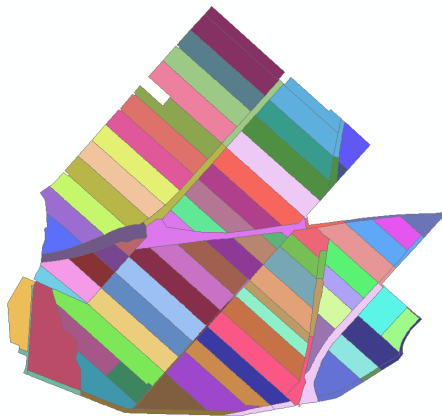


Figuur 4.4: Locaties van de diepe wellen

### Drainage Odrain, Drainage Oditch, Neerslag, Verdamping

Voor de drainagefluxen, neerslag en verdamping zijn er per segment vier netwerkpunten toegevoegd met een laterale flux (tussen de 'calculation points' of 'connection nodes'). Zie Figuur 4.1 voor een voorbeeld van de schematisatie met de verdeling van deze netwerkpunten.

De fluxen van Qdrain en Qditch uit het RSGEM model zijn als input gebruikt voor de drainagefluxen in de schematisatie in SOBEK en zijn daarvoor vermenigvuldigd met de oppervlakte van het (indien mogelijk aan het noordoosten) aangrenzende perceel van een waterloop (zie Figuur 4.5 voor een kaartje met alle percelen). Op deze manier worden de drainagefluxen van alle percelen verdeeld over de sloten van het model. De drainage vindt op deze manier vooral plaats in de sloten die in noordwest-zuidoostelijke richting lopen. In werkelijkheid komen de drains van de percelen ook voornamelijk in deze sloten uit. De overige sloten (die geen perceel aan de zuidwestkant hebben) hebben een flux van Qdrain en Qditch van 0 m<sup>3</sup>/s (geen flux). Het was niet mogelijk om de kwelfluxen als diffuse laterale flux in het model te definiëren, door een fout in de software van SOBEK (versie 2.14), waardoor de waterbalansen in het model niet sluitend waren.



Figuur 4.5: Kaartje met de percelen in peilvak 9 en 19.

Voor de neerslag en verdamping zijn gegevens gebruikt van het nabij gelegen meteorologisch station Schiphol (KNMI) dat aan de noordkant van de Haarlemmermeerpolder ligt. Als input voor de punt laterale fluxen zijn de dagelijkse waarden van neerslag en

verdamping (potentiele evapotranspiratie, Makkink) gebruikt en deze zijn daarvoor vermenigvuldigd met de oppervlakte van het stuk van de sloot (segment) waarin het netwerkpunt ligt. Op deze manier is de neerslag (positieve flux) en verdamping (negatieve flux) voor alle waterlopen ingevoerd. Het was niet mogelijk om de SOBEK RR module te gebruiken voor neerslag en verdamping, omdat hierin bij de laterale fluxen geen concentraties kunnen worden ingesteld voor de SOBEK 1D WAQ module, waarmee de zoutconcentratie en typen water gemodelleerd kunnen worden.

#### 4.1.3 Model waterfracties en zoutconcentraties (SOBEK 1D WAQ)

Nadat de stroming van het water is berekend met SOBEK 1D FLOW, wordt vervolgens met de SOBEK 1D WAQ module (Delwaq) de fracties van de typen water en de chlorideconcentratie berekend in alle waterlopen in het model.

Voor de laterale fluxen (fluxen die als randvoorwaarden van het model opgelegd zijn) is per soort laterale flux de chlorideconcentratie en ook een 'concentratie' 1 (als fractie) van het bijbehorende type water opgelegd (Zie Tabel 4.3 voor een overzicht van de fracties/concentraties). Daarnaast is ook de chlorideconcentratie per soort laterale flux apart in het model meegenomen, zodat ook gekeken kan worden welk deel van de zoutvrucht van welke bron afkomstig is. Voor de laterale fluxen 'Verdamping' en 'Gemalen' zijn geen concentraties gedefinieerd omdat deze fluxen negatief zijn en alleen het model verlaten, er kan dus geen water (en daarmee een bepaalde concentratie van een stof) via deze fluxen het model binnenkomen.

Voor de laterale flux 'Verdamping' is extra ingesteld dat er ook geen stoffen via deze laterale flux het model kunnen verlaten (dit geldt alleen voor de chlorideconcentraties en niet voor de fracties van typen water). Bij verdamping van water wordt hierdoor de chlorideconcentratie verhoogd, omdat chloride bij verdamping het water niet verlaat, maar in het overgebleven water aanwezig blijft. Bij de fracties van typen water moet de fractie echter niet verhoogd worden door verdamping omdat er aangenomen wordt in het model dat alle typen water evenredig het model verlaten via verdamping (en de totale fractie van alle typen water kan niet hoger dan 1 worden).

Tabel 4.3: De fractie van typen water en de chlorideconcentratie per soort laterale flux

Soort laterale flux	Fractie IL (-)	Fractie AD (-)	Fractie SL (-)	Fractie BD (-)	Fractie PR (-)	Concentratie chloride (mg/L)
Inlaten	1	0	0	0	0	136
Diepe wellen	0	1	0	0	0	5453
Drainage_Qdrain	0	0	1	0	0	75
Drainage_Qditch	0	0	0	1	0	336
Neerslag	0	0	0	0	1	6
Verdamping	-	-	-	-	-	-
Gemalen	-	-	-	-	-	-

Alle fracties/concentraties worden als passieve (conservatieve) stof in het model ingevoerd via de laterale fluxen. Voor elk segment van het SOBEK 1D FLOW model wordt met behulp van een massabalans de concentratie van elke stof bijgehouden. Eerder onderzoek naar profielen van EC-concentraties in sloten liet zien dat er in het peilvak scherpe gradiënten zijn op plekken waar het zoetwater en het zoutwater (afkomstig van wellen) elkaar raken (Val Alonso, 2011), er wordt daarom aangenomen dat er weinig dispersie van chloride in het water in het peilvak plaatsvindt. Er is een lage dispersiewaarde van 0.001 ingesteld voor de SOBEK 1D WAQ module. Hierdoor vindt er nauwelijks dispersie van stoffen plaats in het model, er vindt bijna alleen maar directe menging van stoffen plaats in de fluxen die samenkomen.



De discretisatie in de tijd gebeurt in dezelfde uurlijkse tijdstappen als het SOBEK 1D FLOW model, gedurende de periode van 1 januari 2011, 0:00 uur t/m 1 januari 2014, 0:00 uur.

Op tijdstap 1 hebben alle stoffen nog een concentratie van 0 in alle segmenten van het model. Alleen de stof 'Origineel water' heeft dan overal concentratie 1. Op deze manier kan gecontroleerd worden wanneer al het originele water (met fractie/ concentratie 0 van de andere gedefinieerde stoffen) het model verlaten heeft, zodat al het water in het peilvak een correcte fractie/concentratie heeft die afkomstig is van een van de laterale fluxen. Daarnaast heeft al het water dat op tijdstap 1 aanwezig is en dat via laterale fluxen binnenkomt een controlefractie 'Check' van 1, om na te gaan of de waterbalans kloppend is en er geen stoffen in concentratie veranderen door een fout in de waterbalans.

## 4.2 Scenario's

### 4.2.1 Scenario 1 (geen inlaat)

In scenario 1 is de situatie gemodelleerd wanneer er gedurende het hele jaar geen water meer wordt ingelaten (Zie Tabel 4.4). Verder blijft het model hetzelfde, er is geen verandering van overige randvoorwaarden.

### 4.2.2 Scenario 2 (halveren inlaathoeveelheid)

In scenario 2 is de situatie gemodelleerd wanneer de hoeveelheid inlaatwater tijdens het inlaatseizoen van 1 april t/m 1 oktober gehalveerd wordt (Zie Tabel 4.4). Verder blijft het model hetzelfde, er is geen verandering van overige randvoorwaarden.

Tabel 4.4: Hoeveelheid inlaatwater van 1 april t/m 1 oktober voor het basismodel, scenario 1 en scenario 2

Inlaten	Hoeveelheid inlaatwater (van 1 april t/m 1 oktober)		
	Basismodel	Scenario 1	Scenario 2
Inlaat 1	0.0162 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	0.0081 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 2	0.0236 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	0.0118 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 3a	0.0306 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	0.0153 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 3b	0.0097 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	0.0049 m <sup>3</sup> /s
Inlaat 4	0.0155 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	0.0078 m <sup>3</sup> /s
<b>Totaal</b>	<b>0.0956 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>0 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>0.0479 m<sup>3</sup>/s</b>

### 4.2.3 Scenario 3 (peilopzet in een sloot met wellen)

Voor scenario 3 is er gekeken naar de effecten van het verhogen van het peil in een sloot waarin zich veel diepe wellen bevinden. Voor dit scenario is een sloot met wellen gekozen in het zuidwesten van peilvak 9 (Zie Figuur 4.6). In de aangegeven sloot wordt het waterpeil verhoogd met 1 meter door het plaatsen van een stuw aan de noordwestzijde van de sloot vlak voor het water daar de Kagertocht instroomt. Aan de zuidoostzijde loopt de sloot dood, hier is geen stuw nodig in dit geval.

De peilverhoging heeft invloed op de drainagefluxen (Q<sub>drain</sub> en Q<sub>ditch</sub>) en de flux van de diepe wellen in de sloot.

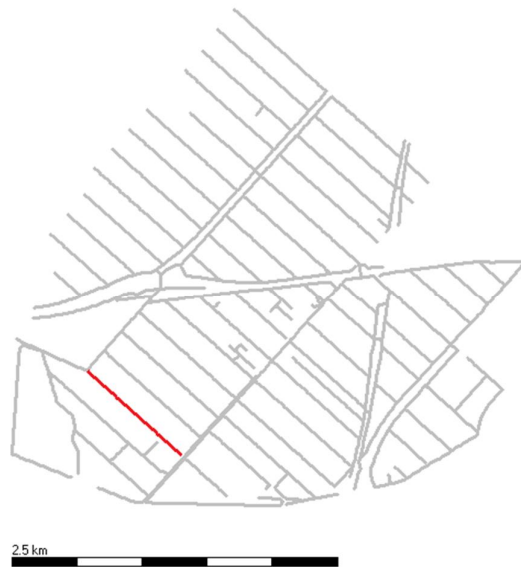
Er wordt aangenomen dat door de peilverhoging de drains niet meer gebruikt worden in de sloot (omdat ze anders onder water zouden komen te staan) en de drains in een andere sloot afwateren waar geen peilverhoging plaatsvindt. De laterale fluxen van Q<sub>drain</sub> in de sloot met verhoogd peil wordt daarom op 0 m<sup>3</sup>/s (geen flux) ingesteld. De flux is niet meegenomen in een andere waterloop van de schematisatie, omdat de flux van Q<sub>drain</sub> in deze sloot maar 2.4% is van de totale Q<sub>drain</sub> flux in het peilvak en relatief weinig invloed heeft op de totale afvoer. Wanneer de maatregel op meer sloten in het peilvak toegepast zou worden, moet

deze drainageflux in het model wel aan een andere (naast het perceel gelegen) sloot gekoppeld worden, zodat er geen grote afwijkingen ontstaan in de waterbalans.

Voor de drainageflux  $Q_{ditch}$  wordt het RSGEM model opnieuw gerund met het verhoogde waterpeil als nieuwe randvoorwaarde om zo de flux van  $Q_{ditch}$  in de nieuwe situatie te berekenen. Hiervoor wordt voor alle parametersets van de 'behavioural runs' (Zie Sectie 4.1.1) het model gerund met deze gewijzigde randvoorwaarde van het waterpeil. De mediaan van de modeluitkomsten van  $Q_{ditch}$  in het RSGEM model is gebruikt als input voor de laterale fluxen van  $Q_{ditch}$  in het SOBEK 1D FLOW model (alleen voor de sloot met peilverhoging).

Voor de diepe wellen wordt de nieuwe kwelflux in de sloot met +1 m peilverhoging berekend met behulp van Vergelijking 3.1. De kwelflux wordt dan gehalveerd ten opzichte van de sloten zonder peilverhoging ( $3.2 \cdot 10^{-4}$  m/d) en komt uit op  $1.6 \cdot 10^{-4}$  m/d. De laterale fluxen van de diepe wellen die zich in de sloot met peilverhoging bevinden, worden daarom vermenigvuldigd met een factor van 0.5.

Voor alle overige sloten blijven de randvoorwaarden ongewijzigd ten opzichte van het basismodel.



Figuur 4.6: Locatie van de sloot met peilverhoging (rood)

#### 4.2.4 Scenario 4 (scheiden van zoetwater en zoutwater)

Bij dit scenario wordt door een wijziging van de stroming van het water geprobeerd het zoetwater en zoutwater in het peilvak zo lang mogelijk te scheiden, zodat het zoete inlaatwater zo ver mogelijk het peilvak in kan stromen. Er wordt niets veranderd aan de randvoorwaarden van het model, alleen de schematisatie wordt enigszins gewijzigd door het plaatsen van enkele stuwen in sloten (als schotten die boven het water uitsteken) en het verbinden van sloten die in het basismodel juist niet met elkaar verbonden zijn.

Er wordt geprobeerd zoveel mogelijk zoetwater aan de westkant via de Kagertocht onder de snelweg door te laten stromen (locatie fietsbrug, zie Figuur 3.5) en juist zoveel mogelijk

zoutwater van de wellen via de Lissertocht (locatie carpoolplaats, zie Figuur 3.5) aan de oostkant onder de snelweg door te laten stromen.

Om dit te bereiken moeten er vier schotten worden geplaatst in de sloten met wellen om te voorkomen dat het zoute water richting het noordwesten naar de Kagertocht stroomt. Langs de Kaagweg worden de sloten zo verbonden dat het zoutwater aan de westkant van de Kaagweg naar het noorden kan stromen. Bij de Kaagweg wordt met behulp van duikers (om de sloten aan de westkant in noord-zuidrichting te verbinden) het zoute water gescheiden van het zoete water dat van de oostkant van de Kaagweg afkomstig is (en dat in westelijke richting stroomt onder de weg en de zoute sloot door via de sloten zonder wellen). Op deze manier kan zoet water richting het westen stromen zonder dat het zout wordt, vindt er weinig menging plaats van zoet/zout water bij de Kaagweg en komt er meer inlaatwater in het noordelijk deel van het peilvak via de westelijke verbinding onder de snelweg. Zie bijlage B voor meer details over dit scenario.

#### 4.2.5 Scenario 5 (tijdens een droge periode inlaten stoppen)

In dit scenario wordt de voorbereiding op een droge periode gesimuleerd waarbij geen inlaatwater meer beschikbaar is om door te spoelen. Er wordt ook gekeken naar het verschil tussen wel en geen peilverhoging voor het stoppen met inlaten.

##### 4.2.5.1 Scenario 5a (met peilverhoging)

Vlak voordat er gestopt wordt met inlaten, wordt op 10 mei 2011 (tijdens een droge periode) het peil in het gehele peilvak verhoogd met 20 cm. Zodra de peilverhoging is bereikt, wordt er gestopt met inlaten. Voor dit scenario wordt er berekend hoe lang het duurt voordat de peilverhoging bereikt wordt en hoe lang er vervolgens zoet water in het peilvak aanwezig blijft na het stoppen met inlaten.

De situatie met peilverhoging heeft invloed op de drainagefluxen ( $Q_{\text{drain}}$  en  $Q_{\text{ditch}}$ ) en de flux van de diepe wellen in het peilvak. De overige randvoorwaarden blijven ongewijzigd ten opzichte van het basismodel.

Er wordt aangenomen dat het waterpeil onder het niveau van de drains blijft, er kan geen negatieve flux van  $Q_{\text{drain}}$  plaatsvinden in het RSGEM model. Voor de drainagefluxen  $Q_{\text{drain}}$  en  $Q_{\text{ditch}}$  wordt het RSGEM model opnieuw gerund met de tijdreeks van het stijgende waterpeil (berekend door SOBEK 1D FLOW) als nieuwe randvoorwaarde om zo de fluxen van  $Q_{\text{drain}}$  en  $Q_{\text{ditch}}$  in de nieuwe situatie te berekenen. Hiervoor wordt voor alle parametersets van de 'behavioural runs' (Zie Sectie 4.1.1) het model gerund met deze gewijzigde randvoorwaarde van het waterpeil. De mediaan van de modeluitkomsten van  $Q_{\text{drain}}$  en  $Q_{\text{ditch}}$  in het RSGEM model zijn gebruikt als input voor de laterale fluxen van  $Q_{\text{drain}}$  en  $Q_{\text{ditch}}$  in het SOBEK 1D FLOW model.

Voor de diepe wellen wordt de nieuwe kwelflux berekend (voor de periode na de peilverhoging van +20 cm) De kwelflux ten opzichte van de situatie zonder peilverhoging ( $3.2 \cdot 10^{-4}$  m/d) is afgenomen met 10% en wordt  $2.88 \cdot 10^{-4}$  m/d. De laterale fluxen van de diepe wellen worden daarom vermenigvuldigd met een factor van 0.9 vanaf het moment dat de peilverhoging heeft plaatsgevonden.

##### 4.2.5.2 Scenario 5b (zonder peilverhoging)

Er wordt ook gekeken naar het verschil met de situatie waarbij er op hetzelfde moment gestopt wordt met inlaten, maar waarbij geen peilverhoging plaatsvindt.

De situatie zonder peilverhoging heeft geen invloed op de drainagefluxen en de flux van de diepe wellen. Er wordt alleen gestopt met inlaten (op hetzelfde moment als de situatie met peilverhoging, om de situaties met/zonder peilverhoging goed te kunnen vergelijken). De overige randvoorwaarden blijven ongewijzigd ten opzichte van het basismodel.

#### 4.2.6 Scenario 6 (tijdens een droge periode inlaten hervatten)

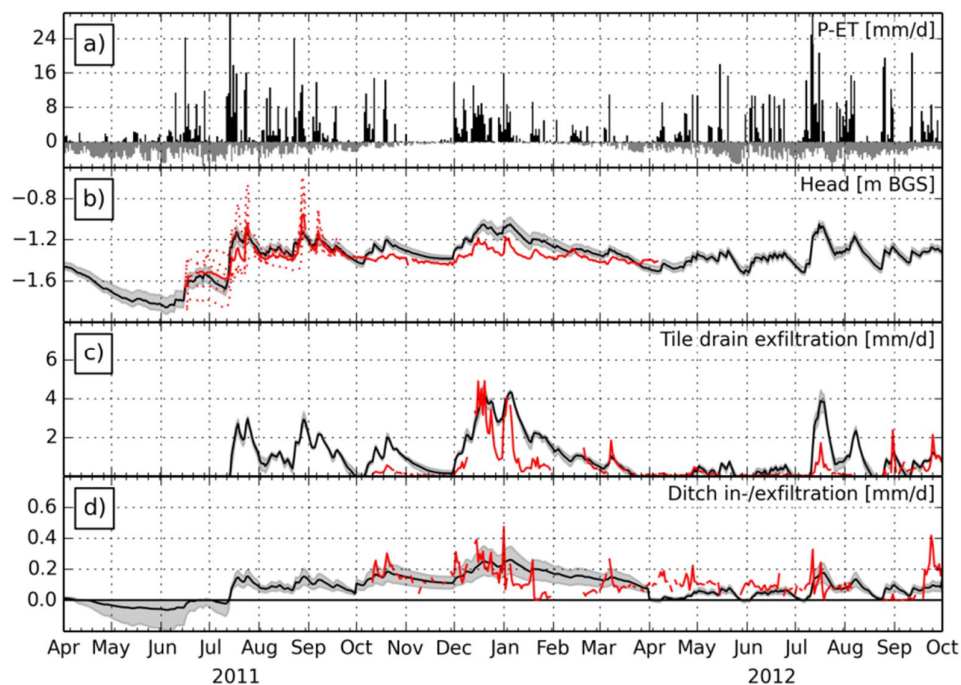
In dit scenario wordt er gekeken naar de situatie waarbij (na een droge periode zonder inlaten) de inlaten weer geopend worden. Tussen 1 april 2011 (wanneer normaal gesproken de inlaten geopend worden) en 10 mei 2011 wordt er geen water ingelaten. Pas op 11 mei 2011 (tijdens een droge periode) worden de inlaten geopend. De overige randvoorwaarden blijven ongewijzigd ten opzichte van het basismodel. Voor dit scenario wordt er berekend hoe lang het duurt voordat de situatie weer vergelijkbaar is met het basismodel en er evenveel zoetwater beschikbaar is.

## 5 Resultaten

### 5.1 Basismodel

#### 5.1.1 Kalibratie drainagefluxen (RSGEM)

In Figuur 5.1 is het resultaat van de kalibratie van het RSGEM model weergegeven. De gemodelleerde grondwaterstand komt goed overeen met de door het RSGEM model gesimuleerde grondwaterstand (Zie Figuur 5.1b). De flux van het freatisch grondwater via drains,  $Q_{\text{drain}}$  (Zie Figuur 5.1c), en van de diffuse kwel in sloten,  $Q_{\text{ditch}}$  (Zie Figuur 5.1d), worden soms onder- of overschat ten opzichte van de observaties. In natte periodes (Zie Figuur 5.1a voor de neerslag en verdamping) wordt de gesimuleerde  $Q_{\text{drain}}$  overschat, dat is vooral zichtbaar in oktober 2011 en juli 2012. Voor de diffuse kwel  $Q_{\text{ditch}}$  vindt er in sommige periodes tijdens de zomer een onderschatting plaats van deze flux ten opzichte van de observaties. Deze verschillen zullen naar verwachting geen sterk effect hebben op chlorideconcentraties in het peilvak, omdat er tijdens droge periodes wanneer er juist de meeste verzilting plaatsvindt, relatief kleine drainagefluxen worden gemeten en gesimuleerd die daardoor relatief weinig invloed hebben op de chlorideconcentratie in het peilvak.



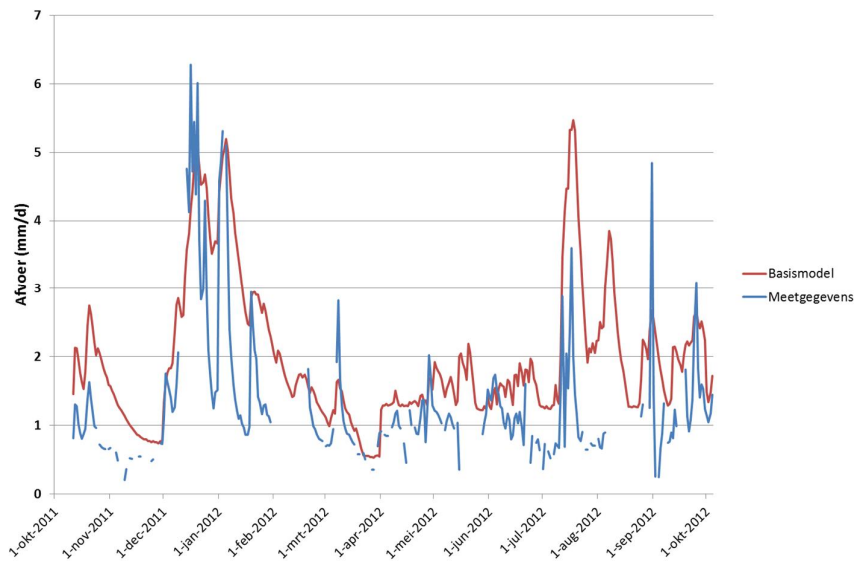
Figuur 5.1: Resultaat GLUE kalibratie van het RSGEM model: (a) input neerslag en verdamping voor model, (b) grondwaterstand, (c) flux van freatisch grondwater via drains, (d) flux van diffuse kwel/infiltratie in sloten. Voor figuur b-d: zwarte lijn: de mediaan van modelresultaat, grijze band: 5%-95% onzekerheidsband van modelresultaten, rode lijn: observaties gebruikt als kalibratiedata.

#### 5.1.2 Validatie stromingsmodel (SOBEK 1D FLOW)

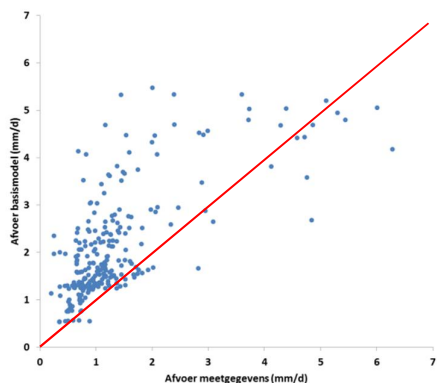
Door beperkingen in functionaliteit en rekentijd van SOBEK heeft er geen verdere kalibratie plaatsgevonden van het SOBEK 1D FLOW model zelf. De kalibratie van dit model heeft plaatsgevonden bij de laterale fluxen die als input van het model dienen. De resultaten van

het basismodel worden vergeleken met meetresultaten om te valideren in hoeverre het basismodel overeenkomt met de werkelijkheid.

De peilen blijven in het gehele peilvak zoals opgelegd (zomerpeil), er vallen nergens sloten droog gedurende de hele simulatieperiode. Zie Figuur 5.2 voor een vergelijking tussen de gesimuleerde en geobserveerde afvoer van het gemaal Heye (uitstroompunt van het peilvak). Het afvoerpatroon van het basismodel heeft een vergelijkbare dynamiek als van de meetgegevens. De pieken van de afvoer vinden grotendeels op dezelfde momenten plaats. Echter wordt de afvoer van het basismodel gedurende vrijwel de gehele periode enigszins overschat ten opzichte van de meetgegevens. In Figuur 5.3 is een scatterplot weergegeven van de gesimuleerde en gemeten waarden van de afvoer. De belangrijkste verklaring voor de afwijking tussen het model en de observaties is waarschijnlijk dat voor de inlaten de in het veld gemeten maximale inlaathoeveelheden gebruikt zijn, terwijl er in praktijk mogelijk minder water ingelaten is. Er heeft geen kalibratie plaatsgevonden van deze flux. Om de invloed van een lagere inlaathoeveelheid te bekijken is in scenario 2 de inlaathoeveelheid gehalveerd. Een andere oorzaak kan activiteit van het tweede gemaal Heyepad zijn (die in het model niet actief is gesimuleerd), waardoor er in werkelijkheid meer water afgevoerd is dan gemeten bij gemaal Heye. Daarnaast is in sommige periodes de flux van Qdrain in het RSGEM model overschat wat een hogere afvoer in het basismodel geeft dan er in werkelijkheid heeft plaatsgevonden (Zie sectie 5.1.1).



Figuur 5.2: Tijdreeks van de gemeten en gesimuleerde afvoer van het basismodel

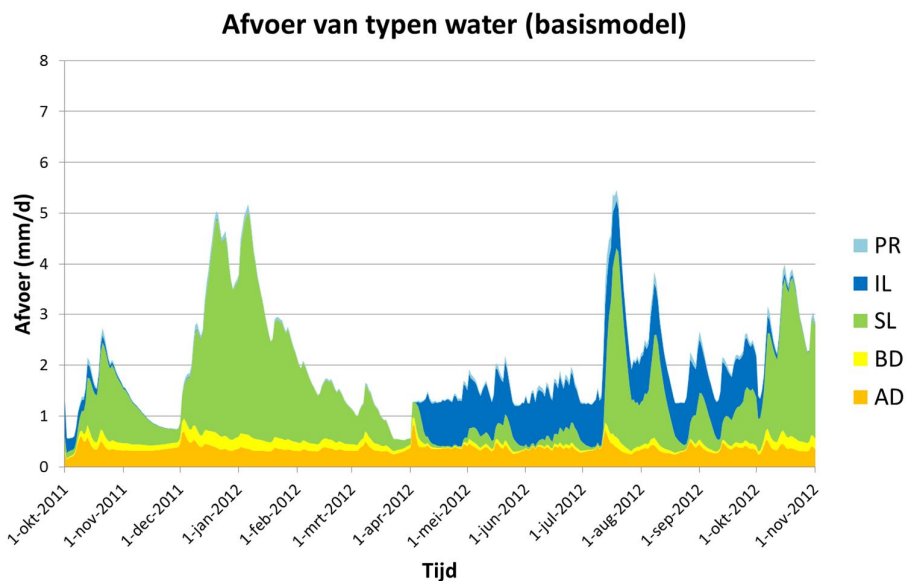


Figuur 5.3: Scatterplot van de gemeten en gesimuleerde afvoer van het basismodel

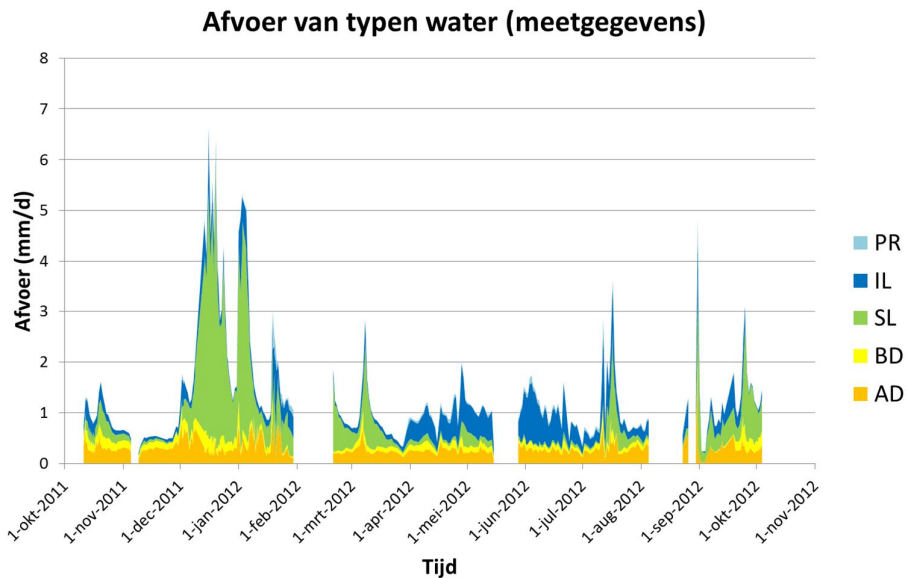
### 5.1.3 Validatie model waterfracties en zoutconcentratie (SOBEK 1D WAQ)

Wanneer de afvoer (bij hoofdgemaal Heye) van de verschillende typen water van het basismodel (Figuur 5.4) vergeleken wordt met de meetgegevens (Figuur 5.5), is een vergelijkbaar patroon te zien in de afvoer. Voor de verschillende typen water is een overeenkomende dynamiek zichtbaar, afgezien van de al eerder genoemde over- en onderschatting van IL, SL en BD. De hoeveelheid rechtstreekse neerslag is net als bij de meetgegevens verwaarloosbaar klein.

Voor de naamgeving van de gebruikte afkortingen en de chlorideconcentraties van de typen water, zie Tabel 3.1. In bijlage B staan de afvoer en fractie van de typen water voor de hele modelperiode (1 januari 2011, 0:00 uur t/m 1 januari 2014, 0:00 uur).



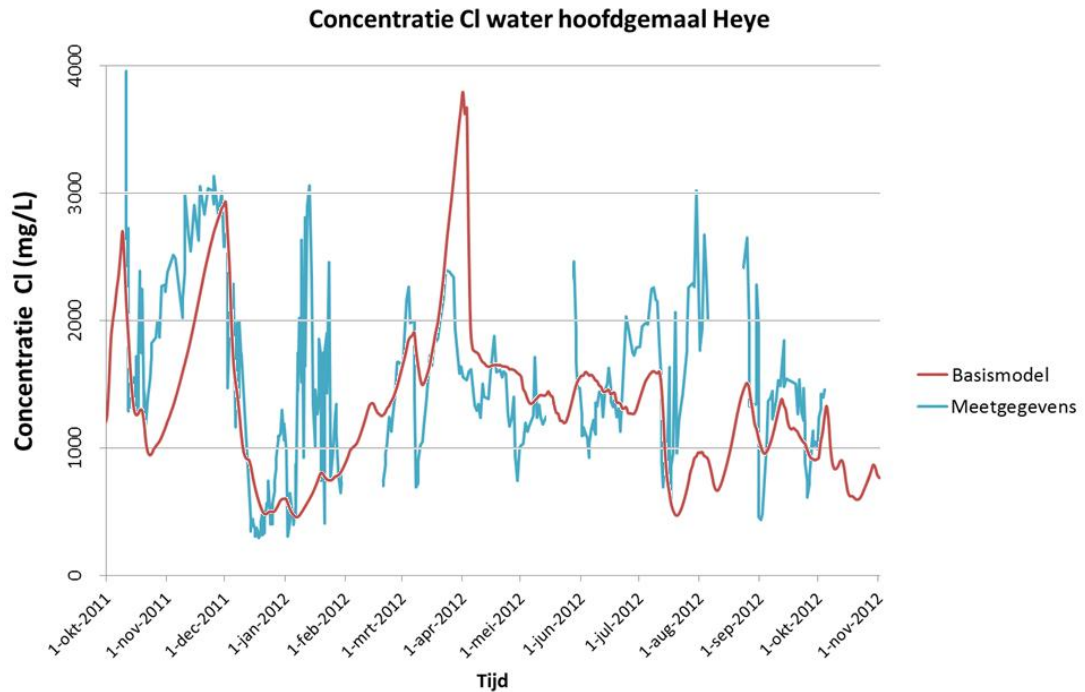
Figuur 5.4: Afvoer van typen water van basismodel



*Figuur 5.5: Afvoer van typen water van meetgegevens*

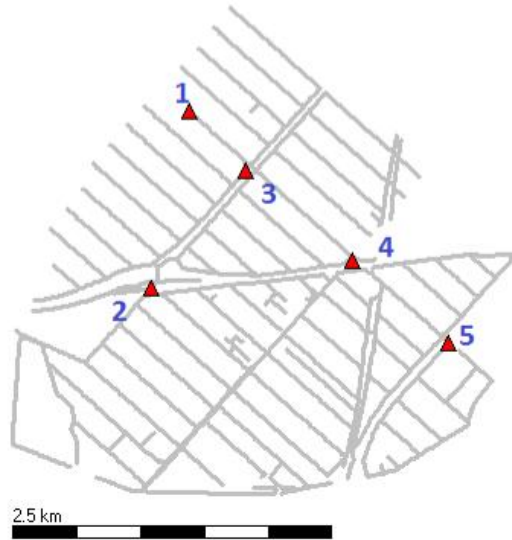
Als vervolgens de gesimuleerde chlorideconcentratie vergeleken wordt met de meetgegevens, blijkt dat deze goed overeenkomen (zie Figuur 5.6). Er zijn drie momenten waarop de gemodelleerde chlorideconcentratie afwijken van de meetgegevens (januari 2012, begin april 2012 en begin augustus 2012). De onderschatting van de chlorideconcentratie door het model in januari en augustus komt waarschijnlijk doordat op dat moment het tweede gemaal (Heyepad) ook actief was, wat de stroming van water ten opzichte van het basismodel verstoord heeft. De piek in het basismodel eind maart is niet aanwezig in de meetgegevens omdat er in werkelijkheid waarschijnlijk al eerder dan 1 april begonnen is met inlaten op dat moment. Dat is ook te zien in Figuur 5.5 waar het inlaatwater al eerder dan 1 april gemeten is bij het hoofdgemaal Heye, terwijl in het basismodel het inlaatwater pas ongeveer een week later het hoofdgemaal bereikt (Figuur 5.4).



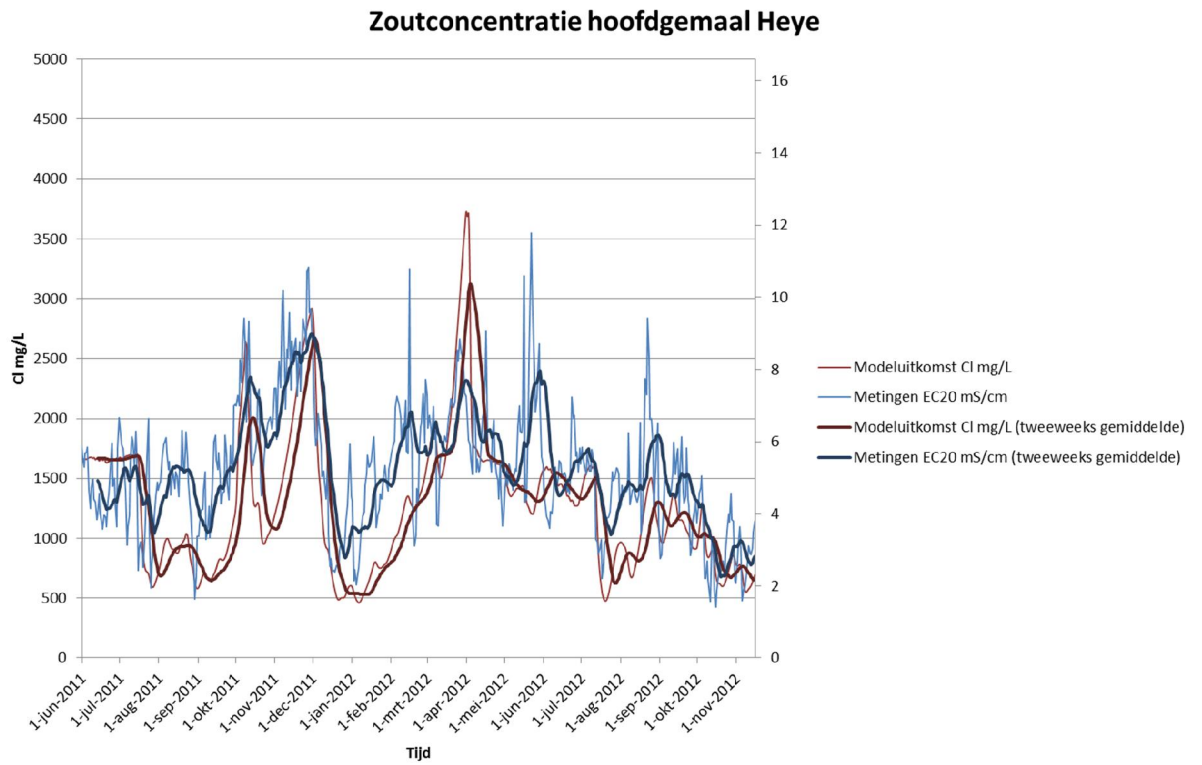


Figuur 5.6: Gemeten en door basismodel gesimuleerde chlorideconcentratie bij hoofdgemaal Heye

Behalve de gemeten chlorideconcentraties bij het hoofdgemaal zijn er ook tijdreeksen van de specifieke geleidbaarheid (EC) beschikbaar op vijf plaatsen in het peilvak (zie Figuur 5.7). Omdat de EC in het water een goede schatting geeft van de zoutconcentratie van het water, zijn de gemeten EC en gesimuleerde chlorideconcentraties op deze plaatsen in het peilvak met elkaar vergeleken (om te kijken of het basismodel overeenkomt met de werkelijkheid). Voor de vergelijking zijn de y-assen zo geschaald dat de verhouding tussen EC en chloride ongeveer overeenkomt met een globale omrekenfactor (EC van 12 mS/cm wordt aangenomen overeen te komen met een chlorideconcentratie van 3600 mg/L). Deze verhouding is afgeleid van de meetgegevens van watermonsters in het peilvak (Delsman, Oude Essink, Beven, & Stuyfzand, 2013). Zie Figuur 5.7 voor de meetlocaties van de EC-reeksen.



Figuur 5.7: Locaties van EC-metingen: (1) hoofdgemaal Heye, (2) fietsbrug, (3) noordwesten Kagertocht, (4) Lissertocht bij carpoolplaats, (5) stuw van peilvak 19.



Figuur 5.8: Tijdreeks met gemeten EC en gesimuleerde chlorideconcentratie bij Hoofdgemaal Heye

Bij Hoofdgemaal Heye (Figuur 5.8) komt het verloop van de EC sterk overeen met de gemeten chlorideconcentratie in Figuur 5.6, ook hier is er een duidelijke overeenkomst in de dynamiek en concentratie. Het basismodel geeft ook op dezelfde momenten als bij de gemeten zoutconcentratie een overschatting of onderschatting van ten opzichte van de EC.

Bij de fietsbrug (Figuur F.1 in bijlage F) is er een duidelijke overeenkomst tussen de gesimuleerde chlorideconcentratie en gemeten EC. Alleen begin oktober en eind november 2011 zijn er twee afwijkende pieken in het basismodel. In de modelsimulatie worden op deze beide momenten na een relatief droge periode opeens veel drainwater afgevoerd waardoor de afvoer bij het hoofdgemaal sterk omhoog gaat. Omdat er nog veel zoutwater in het peilvak aanwezig is in het model op dat moment, wordt dit eerst afgevoerd door het gemaal voordat het zoetere water uit de drains het gemaal bereikt. In werkelijkheid is er op dat moment waarschijnlijk minder drainwater afgevoerd, waardoor de afvoer van het zoute water veel meer geleidelijk heeft plaatsgevonden. In Figuur 5.5 is eind november 2011 namelijk ook een veel lagere drainafvoer te zien dan gesimuleerd in het basismodel (Figuur 5.4). De te lage concentratie in het basismodel in februari 2012 heeft waarschijnlijk te maken met activiteit van het tweede gemaal Heye dat de stroming van het water verstoord heeft op dat moment, waardoor het basismodel niet overeen komt met de werkelijkheid.

Bij het noordwesten van de Kagertocht (Figuur F.2 in bijlage F) en bij de Lissertocht vlakbij de carpoolplaats (Figuur F.3 in bijlage F) komen de gesimuleerde chlorideconcentraties goed overeen met de gemeten EC.

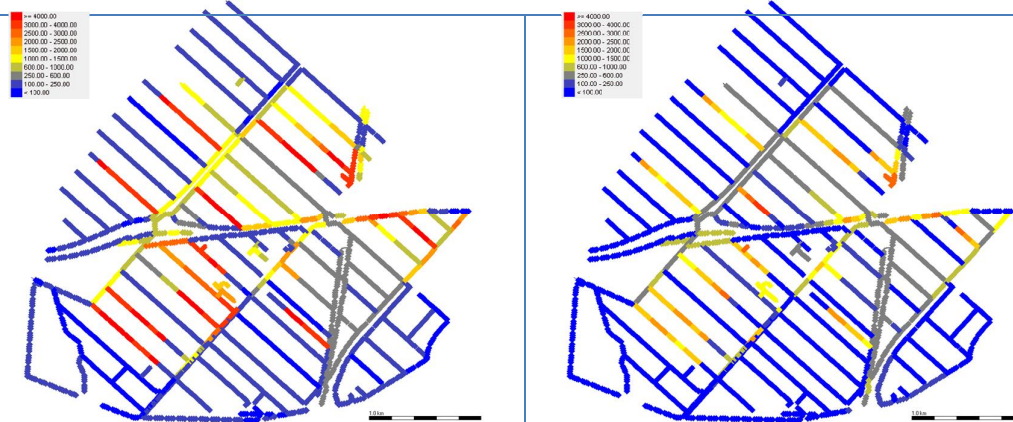
Bij de stuw van peilvak 19 (Figuur F.4 in bijlage F) wordt een lage chlorideconcentratie gesimuleerd doordat er geen wellen in het peilvak zijn geplaatst in de schematisatie en hier dus voornamelijk zoet inlaatwater en drainagewater langs stroomt. De gemeten EC-waarden zijn echter structureel hoger, wat impliceert dat er ergens in het peilvak 19 ook een (kleine) diepe wel zit die niet meegenomen is in de modelschematisatie.

In

Figuur 5.9 is het ruimtelijk chloridebeeld te zien van het basismodel van vier verschillende momenten (10-05-2011, 08-08-2011, 22-12-2011, 10-02-2013). Van mei 2011 en februari 2013 zijn er ook een ruimtelijk EC beelden beschikbaar, deze zijn ook weergegeven in Figuur 5.9. De ruimtelijke variatie van chlorideconcentraties die in de EC beelden te zien is, is ook duidelijk zichtbaar in de modelresultaten.

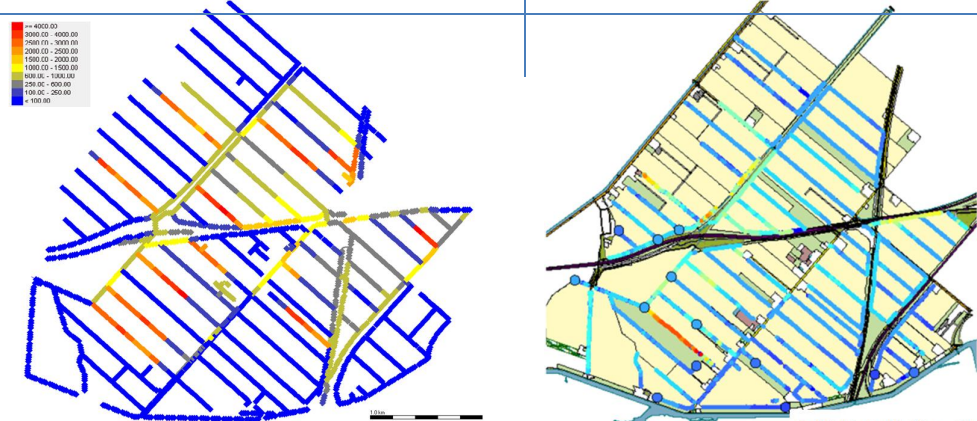


12-05-2011 (zeer droge situatie, links model, rechts meetresultaat)



08-08-2011 (natte situatie)

22-12-2011 (zeer natte situatie)



10-02-2013 (natte situatie, links model, rechts meetresultaat)

Figuur 5.9: Ruimtelijk beeld van de chlorideconcentratie in het peilvak, voor het basismodel op 12-05-2011, 08-08-2011, 22-12-2011 en 10-02-2013

## 5.2 Scenario's

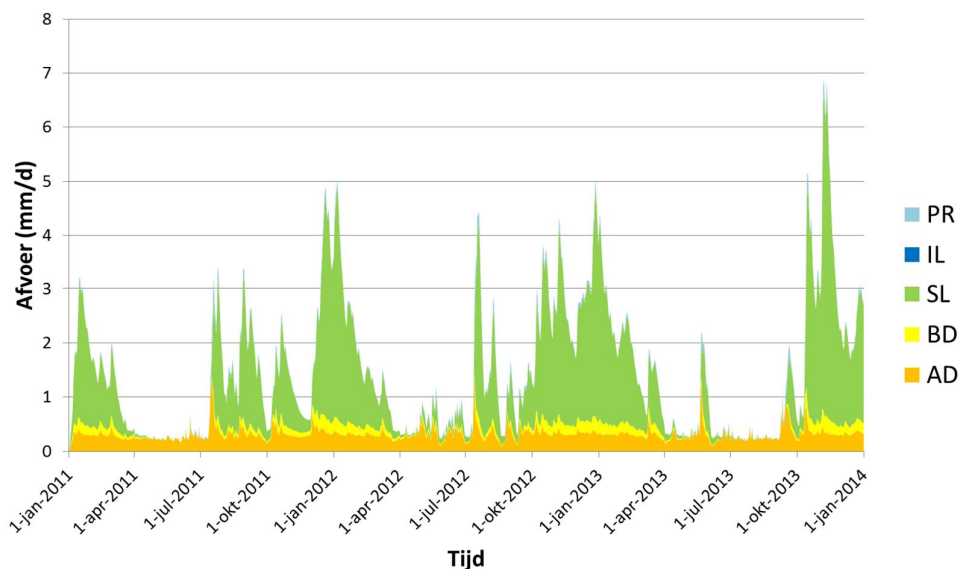
### 5.2.1 Scenario 1 (geen inlaat)

Wanneer er helemaal geen inlaatwater wordt ingelaten gedurende het hele jaar, bestaat het afgevoerde water bij gemaal Heye in droge periodes vrijwel alleen maar uit water afkomstig van diepe wellen (Zie Figuur 5.10 en bijlage E). De flux is minder groot door het ontbreken van inlaatwater, maar er blijft de hele periode water afgevoerd worden door het gemaal Heye, de waterpeilen komen niet onder het ingestelde peil en er blijft voldoende water aangevoerd worden door de diepe wellen voor peilhandhaving.

De chlorideconcentratie van het water dat bij gemaal Heye uitgemalen wordt, neemt sterk toe in droge periodes omdat er geen inlaatwater aangevoerd wordt om het water van de diepe wellen te verdunnen. De chlorideconcentratie wordt bij gemaal Heye zelfs iets hoger dan de oorspronkelijke concentratie van het water dat via de diepe wellen de sloten inkomt (5453 mg/L), dit wordt veroorzaakt door verdamping en geen toevoer van drainagewater en neerslag in droge periodes. Zodra weer een natte periode begint met veel drainagewater SL (bijvoorbeeld vanaf halverwege juli 2011) is de oorspronkelijke chlorideconcentratie bij gemaal Heye snel hersteld en is er geen/weinig verschil in chlorideconcentratie ten opzichte van het basismodel (zie Figuur 5.12), hoewel dan ook nog steeds inlaatwater aangevoerd wordt (in het basismodel).

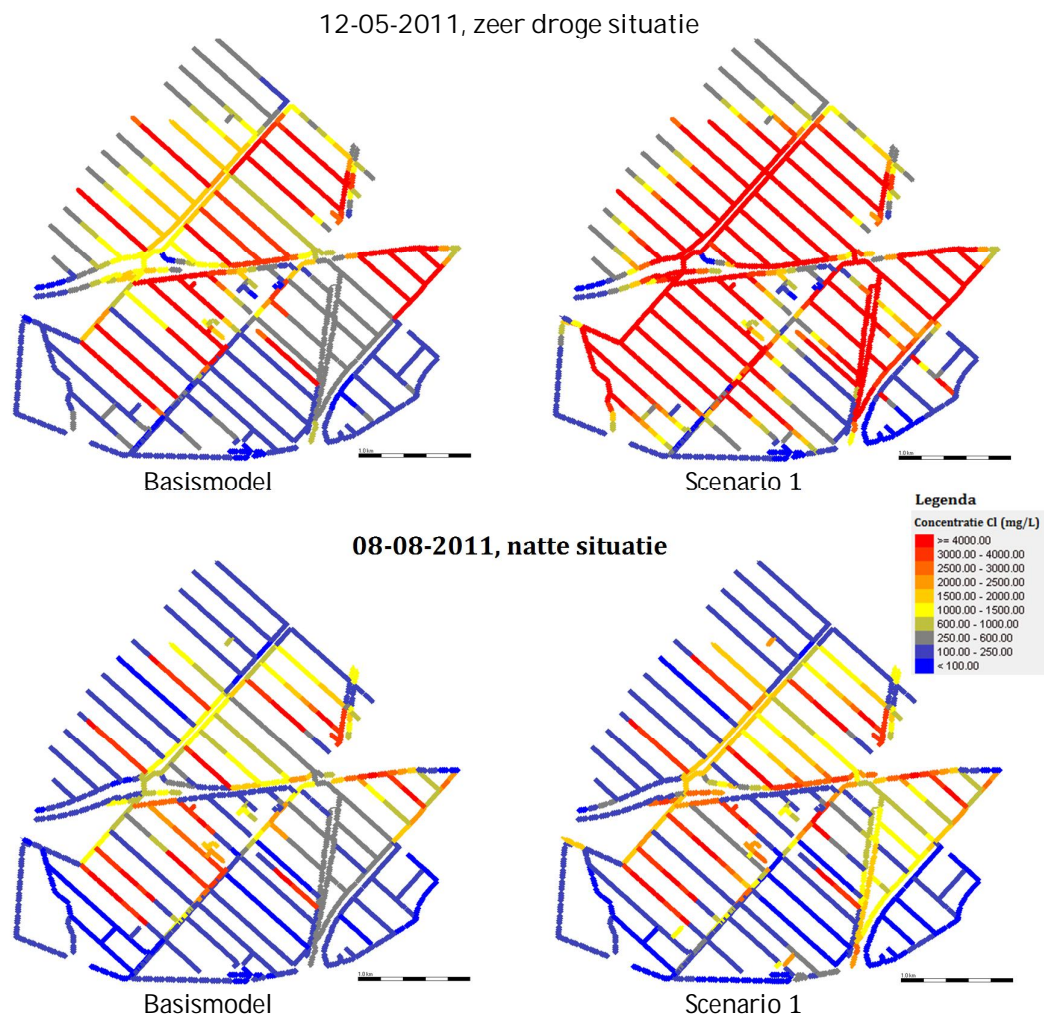
Het volume van zoetwater in het hele peilvak ( $Cl < 600$  mg/L) neemt sterk af tijdens een droge periode zonder doorspoeling. Zodra een natte periode begint, herstelt de zoete situatie zoals in het basisscenario weer grotendeels (zie Figuur 5.13). Tijdens een droge periode is er een verschil van  $40000$  m<sup>3</sup> beschikbaar zoetwater tussen het niet inlaten ( $20000$  m<sup>3</sup> in scenario 1) en wel inlaten ( $60000$  m<sup>3</sup> in het basismodel). Tijdens een natte periode is er geen groot verschil zichtbaar. Dit is ook zichtbaar in de kaartjes van Figuur 5.11.

### Afvoer van typen water (scenario 1)



Figuur 5.10: Afvoer van typen water bij gemaal Heye (situatie scenario 1)

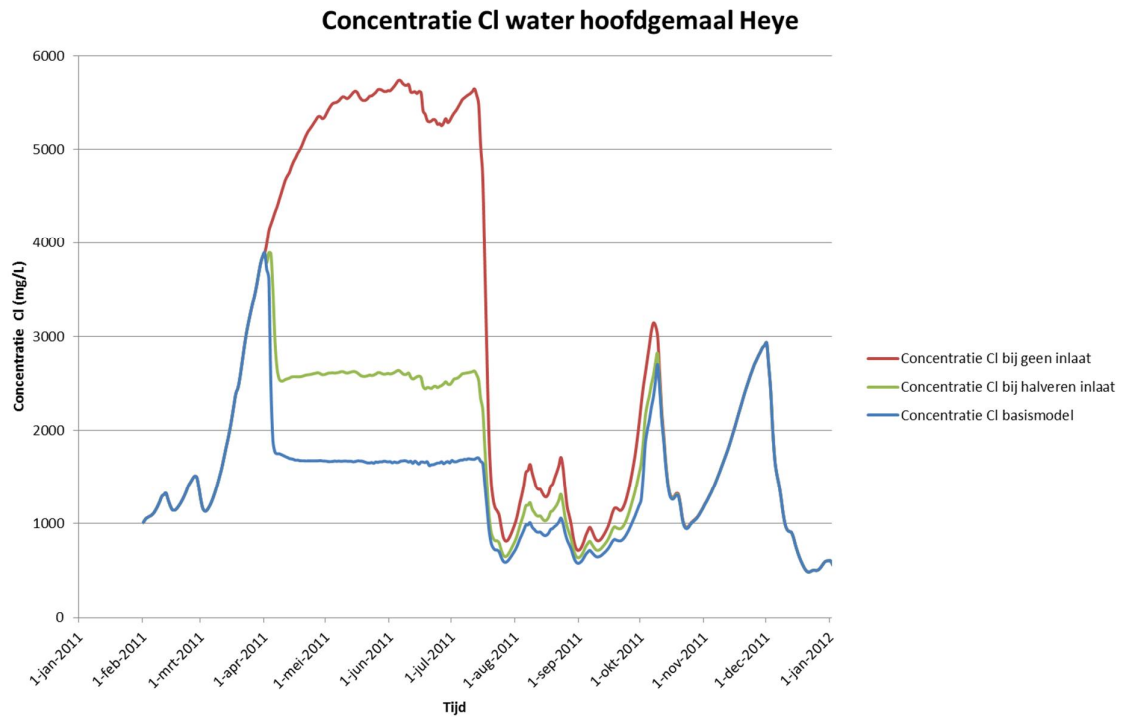




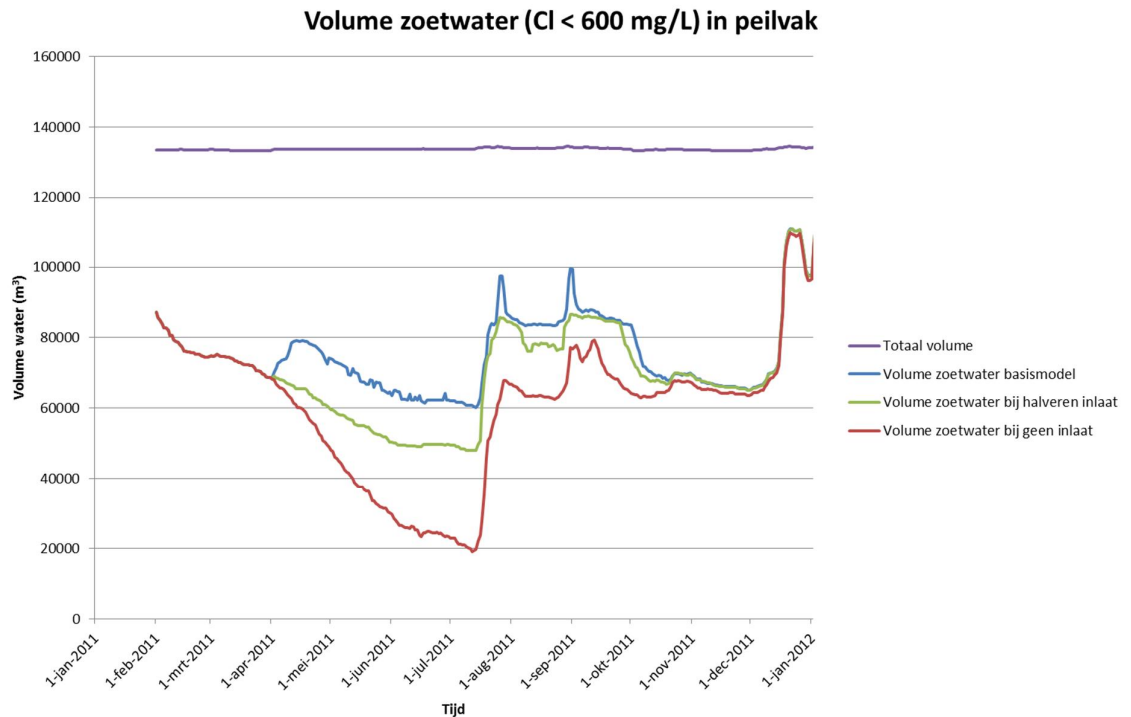
Figuur 5.11: Vergelijking van de ruimtelijke verdeling van chlorideconcentraties tussen het basismodel en scenario 1 voor een zeer droge situatie (12-05-2011) en een natte situatie (08-08-2011)

### 5.2.2 Scenario 2 (halveren inlaathoeveelheid)

In het basismodel is tijdens droge periode ongeveer 30% water van diepe wellen en 70% water van inlaat. Bij halvering van de inlaathoeveelheid wordt deze verhouding ongeveer 50% water van diepe wellen en 50% water van inlaat (Zie ook bijlage E), doordat de flux van de diepe wellen niet is veranderd. De chlorideconcentratie neemt veel minder sterk af als de IL flux van geen inlaat ( $1.0 \cdot \text{chlorideconcentratieAD}$ ) naar halve inlaathoeveelheid gaat ( $0.5 \cdot \text{chlorideconcentratieIL} + 0.5 \cdot \text{chlorideconcentratieAD}$ ), dan wanneer de flux van halve naar normale inlaathoeveelheid gaat ( $0.3 \cdot \text{chlorideconcentratieAD} + 0.7 \cdot \text{chlorideconcentratieIL}$ ), zie ook Figuur 5.12. Dit komt omdat de relatieve vergroting van de hoeveelheid inlaatwater dan veel hoger is. Daarnaast neemt ook het volume zoetwater in het peilvak veel minder sterk af bij het halveren van de inlaat dan bij het geheel stoppen van de inlaat (zie Figuur 5.13).



Figuur 5.12: Chlorideconcentratie bij hoofdgemaal Heye, voor scenario 1 (geen inlaat), scenario 2 (halveren inlaathoeveelheid) en het basismodel

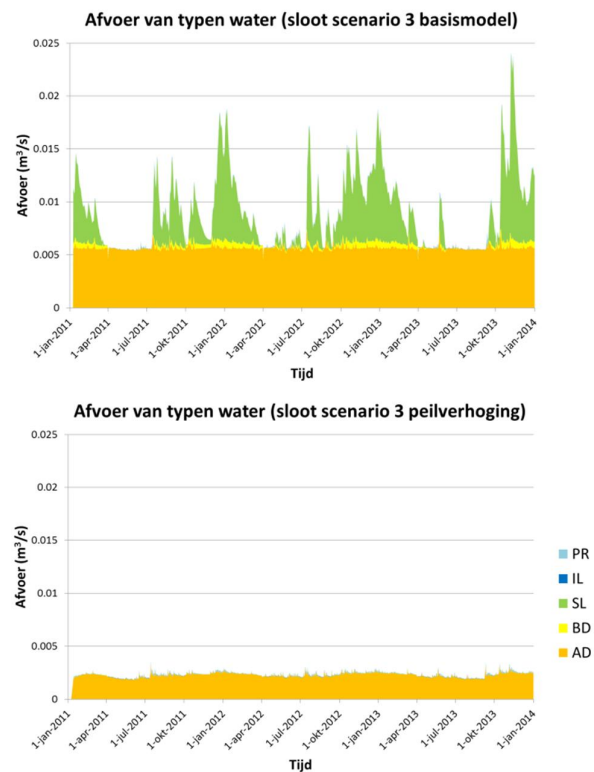


Figuur 5.13: Volume zoetwater ( $Cl < 600 \text{ mg/L}$ ) in het hele peilvak 9-19, voor scenario 1 (geen inlaat), scenario 2 (halveren inlaathoeveelheid) en het basismodel

### 5.2.3 Scenario 3 (peilopzet in een sloot met wellen)

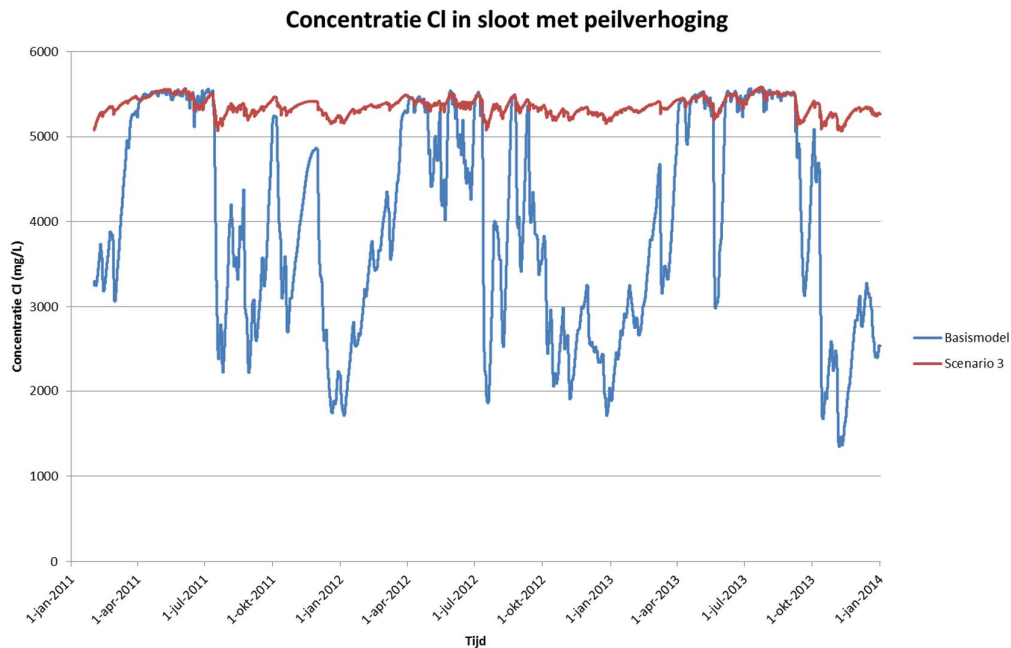
Door de peilverhoging van +1 meter in een sloot met drie diepe wellen, neemt de afvoer van water in deze sloot sterk af. Dit komt doordat er geen drainwater meer in de sloot infiltreert i.v.m. het verwijderen van de drains (omdat het waterpeil boven het niveau van de drains uitkomt), doordat de diffuse kwel negatief wordt in plaats van positief en doordat de kwelflux van de diepe wellen met 50% afneemt. Zie Figuur 5.14 voor de afvoer van de verschillende typen water (net voorbij de stuw die voor de peilverhoging in de sloot zorgt) in zowel de situatie zonder peilverhoging (basismodel) als de situatie met peilverhoging.

Omdat de afvoer van de sloot door het verhoogde peil vrijwel geheel uit water van diepe wellen bestaat, wordt de chlorideconcentratie in de sloot ook erg constant, terwijl er in het basismodel door de afvoer van drainwater veel meer fluctuaties in de chlorideconcentratie plaatsvindt in deze sloot (zie Figuur 5.15).



Figuur 5.14: De afvoer van typen water aan het eind van de sloot waar de peilverhoging plaatsvindt

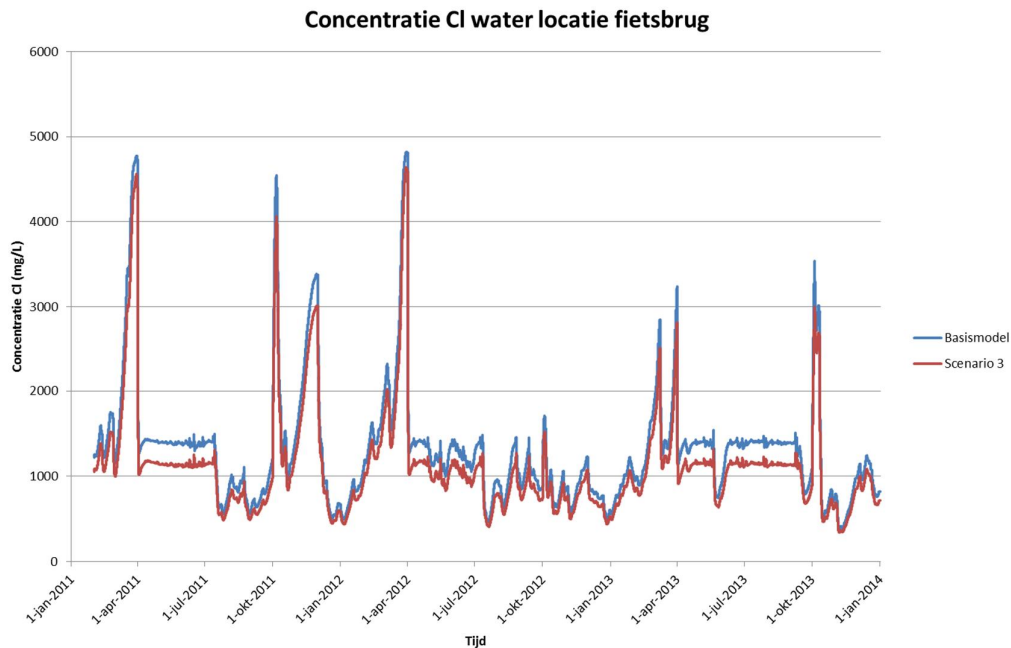




*Figuur 5.15: Chlorideconcentratie in de sloot van de peilverhoging, voor scenario 3 (met peilverhoging in de sloot) en het basismodel*

In de Kagertocht waar het water uit de sloot met peilverhoging instroomt, neemt de chlorideconcentratie af ten opzichte van het basismodel. Dit is ook zichtbaar verderop in de Kagertocht bij de fietsbrug (zie Figuur 5.16). De maatregel zorgt lokaal dat het water daar minder zout is en er meer zoetwater beschikbaar blijft. De chlorideconcentratie bij gemaal Heye is echter maar beperkt verlaagd en aan de beschikbaarheid van zoetwater in het hele peilvak verandert weinig. Dit komt doordat de flux van slechts 3 van de 20 diepe wellen in het peilvak verminderd (gehalveerd) is. Peilverhoging in meer sloten met diepe wellen zorgt voor een groter effect.

Omdat er een negatieve flux van de diffuse kwel in de sloten ontstaat, verdwijnt er ook zoutwater via de bodem van de sloten. Gemiddeld 30% van de totale afvoer van de sloot verdwijnt via infiltratie in de bodem. De aangrenzende percelen kunnen extra verzilted door deze infiltratie van zoutwater vanuit de sloot in het grondwater.

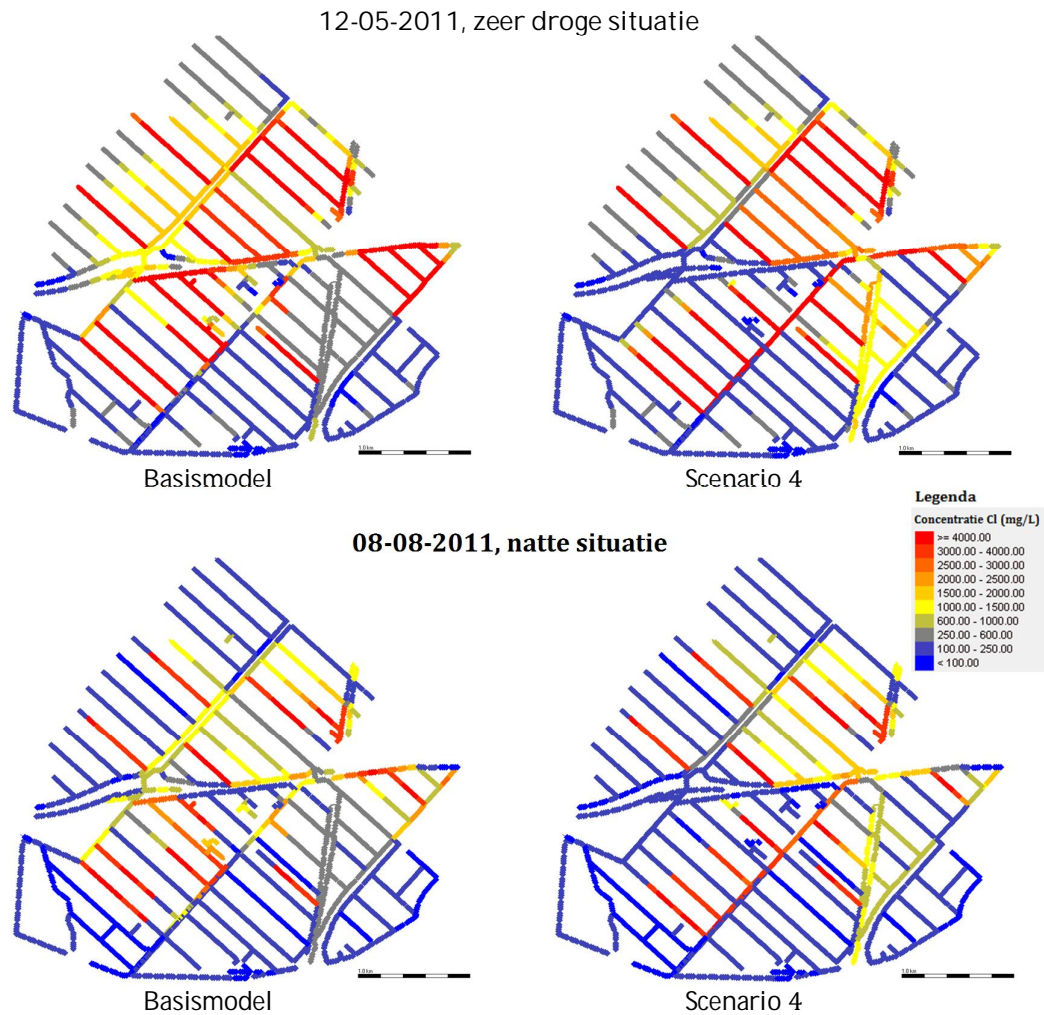


Figuur 5.16: Chlorideconcentratie bij de fietsbrug, voor scenario 3 (met peilverhoging in een sloot met wellen) en het basismodel

#### 5.2.4 Scenario 4 (scheiden van zoetwater en zoutwater)

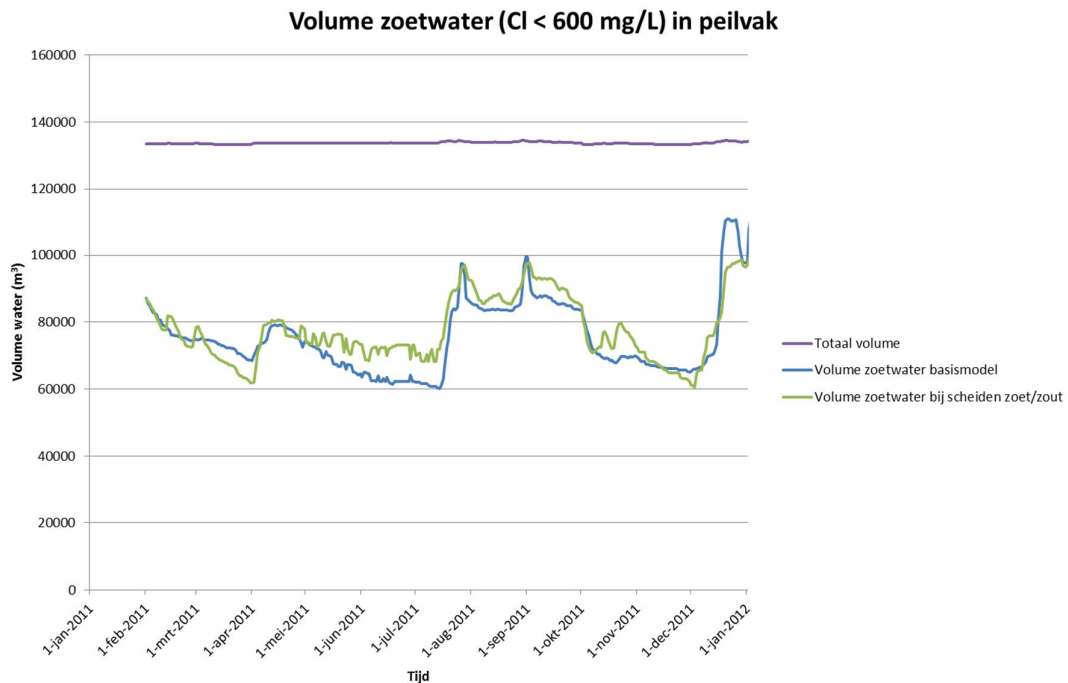
Het zo lang mogelijk gescheiden houden van het zoete inlaatwater (om dit zo min mogelijk te laten mengen met zout water van diepe wellen) zorgt voor een lichte stijging van het totale volume zoetwater dat beschikbaar is in het peilvak van 60000 m<sup>3</sup> in het basismodel naar 70000 m<sup>3</sup> in scenario 4 op het droogste moment in de periode met het minste zoetwater (zie Figuur 5.18). Dit effect is vooral aanwezig tijdens een droge situatie met inlaatwater. In periodes zonder inlaatwater heeft het concentreren van welwater via een bepaalde route juist een negatief effect op de totale hoeveelheid beschikbaar zoetwater in het peilvak, omdat normaal gesproken dit water van wellen voldoende verdund kon worden om niet overal boven de 600 mg/L uit te komen. Nu het water van wellen geconcentreerd via een specifieke route wegstroomt, is de chlorideconcentratie hier hoger geworden en voldoet het minder vaak aan de norm van 600 mg/L. Hierdoor is er gedurende natte periodes soms zelfs iets minder volume zoetwater in het peilvak aanwezig dan in het basismodel.

De verspreiding van het zoetwater door het gehele peilvak is echter wel veel sterker door de gewijzigde stroming. In het basismodel is alleen in het zuidelijke deel van het peilvak veel zoetwater beschikbaar. Richting het noorden mengt het zoete inlaatwater erg snel met zoutwater van diepe wellen. Doordat het zoute water in scenario 4 via een andere route wordt geleid, kan het zoete inlaatwater via de Kagertocht aan de westkant van het peilvak tot bijna aan de Lissertocht komen (waar het hoofdgemaal Heye aanwezig is) en vindt er maar beperkt menging van zoutwater plaats. Hierdoor kunnen ongeveer 12 extra percelen van zoetwater worden voorzien voor beregening. In de situatie van het basismodel is het water al ver voordat het langs de locatie fietsbrug (zie Figuur 3.5) stroomt te zout geworden. Door de hogere concentratie van zoutwater in het zuidoostelijke deel van het peilvak is hier echter voor 5 percelen geen zoetwater meer beschikbaar, maar deze verzilting is naar verwachting te verhelpen door het plaatsen van een extra schot voor deze sloten.



*Figuur 5.17: Vergelijking van de ruimtelijke verdeling van chlorideconcentraties tussen het basismodel en scenario 4 voor een zeer droge situatie (12-05-2011) en een natte situatie (08-08-2011)*

In Figuur G.5 (zie bijlage G) is de zoutconcentratie bij de fietsbrug weergegeven voor zowel het basismodel als scenario 4. In scenario 4 is het water vele malen zoeter geworden dan in het basismodel. Echter op de locatie van de Lissertocht bij de carpoolplaats (zie Figuur G.6 in bijlage G) is de chlorideconcentratie juist sterk toegenomen, doordat hier nu zoveel mogelijk water van de diepe wellen langs stroomt. Voor de precieze locaties zie Figuur 3.5.



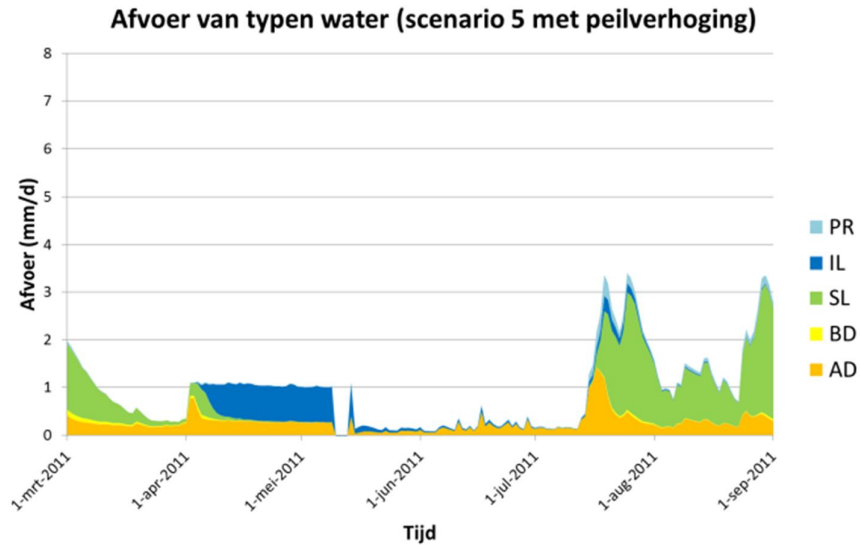
Figuur 5.18: Volume zoetwater (Cl < 600 mg/L) in het hele peilvak 9-19, voor scenario 1 (geen inlaat), scenario 2 (halveren inlaathoeveelheid) en het basismodel

#### 5.2.5 Scenario 5 (tijdens een droge periode inlaten stoppen)

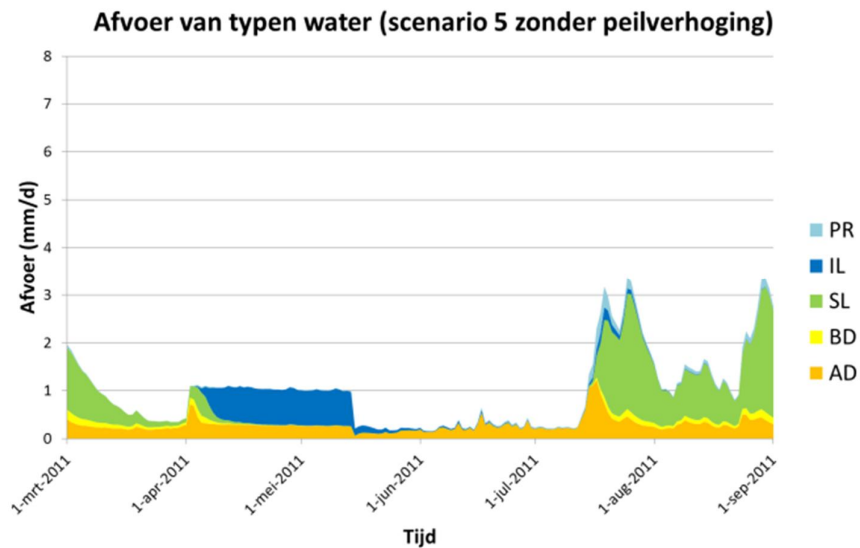
Wanneer het peil verhoogd wordt (met +20 cm) op 10 mei duurt het 80 uur (3.3 dagen) totdat het nieuwe peil bereikt wordt. Vervolgens wordt vanaf 14 mei het inlaten gestopt. In Figuur 5.19 is de periode die het kost om het peil te verhogen duidelijk herkenbaar, doordat er geen afvoer is op dat moment. Vanaf 14 mei neemt de flux van de diepe wellen af door de peilverhoging en komt er geen inlaatwater meer het model in. Vlak na het stoppen van de inlaten is er voor zowel de situatie met (Figuur 5.19) als zonder peilverhoging (Figuur 3.2) in het begin van de periode nog relatief veel zoetwater in het peilvak aanwezig. Hierdoor is de fractie van het water type van diepe wellen nog relatief laag, maar dit neemt steeds meer toe, totdat het uitgemalen water bijna volledig uit water van diepe wellen bestaat (zie ook bijlage E). In de drie weken na het stoppen met inlaten neemt de hoeveelheid beschikbaar zoetwater vrij snel af totdat het water dat uitgemalen wordt bijna alleen nog maar uit water van diepe wellen bestaat. Daarna neemt door verdamping de beschikbaarheid van zoetwater nog verder af, maar dit gaat met een vergelijkbare snelheid als wanneer er vanaf het begin van het seizoen al geen water meer ingelaten wordt (scenario 1, geen inlaat).

Op 10 mei is er ongeveer 70000 m<sup>3</sup> zoetwater beschikbaar wanneer er gestopt wordt met inlaten. Bij een peilverhoging van + 20 cm neemt in absolute hoeveelheden het volume zoetwater toe met ongeveer 15000 m<sup>3</sup> (zie Figuur 5.21). Relatief ten opzichte van het totaalvolume neemt echter de fractie zoutwater van wellen sneller toe dan het zoetwater van inlaatwater bij de peilverhoging (de totale toename van volume water in het peilvak door de peilverhoging is ongeveer 40000 m<sup>3</sup>). Dit betekent dat er hierdoor waarschijnlijk op minder locaties in het peilvak zoetwater beschikbaar is, waardoor de fractie zoetwater in het peilvak kleiner wordt (zie Figuur 5.22). Op de plaatsen waar zoetwater wel beschikbaar is, is deze hoeveelheid naar verwachting vergroot door de peilverhoging. Verder is door de

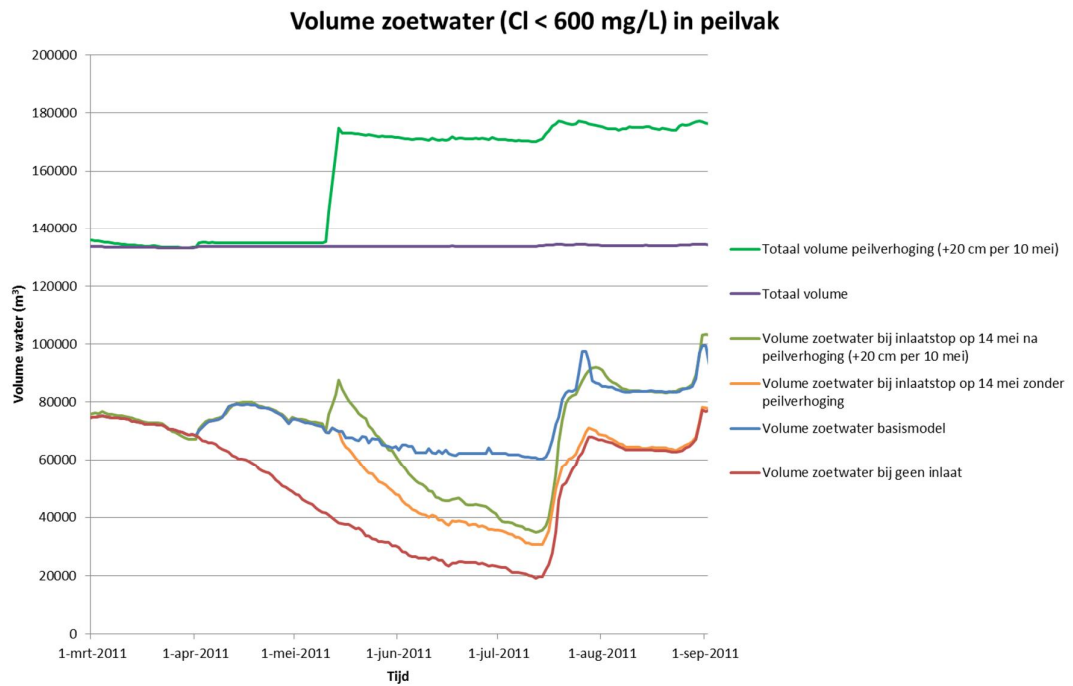
peilverhoging de flux van de diepe wellen afgenomen met 10% waardoor ook de zoutvracht met ongeveer 10% verminderd.



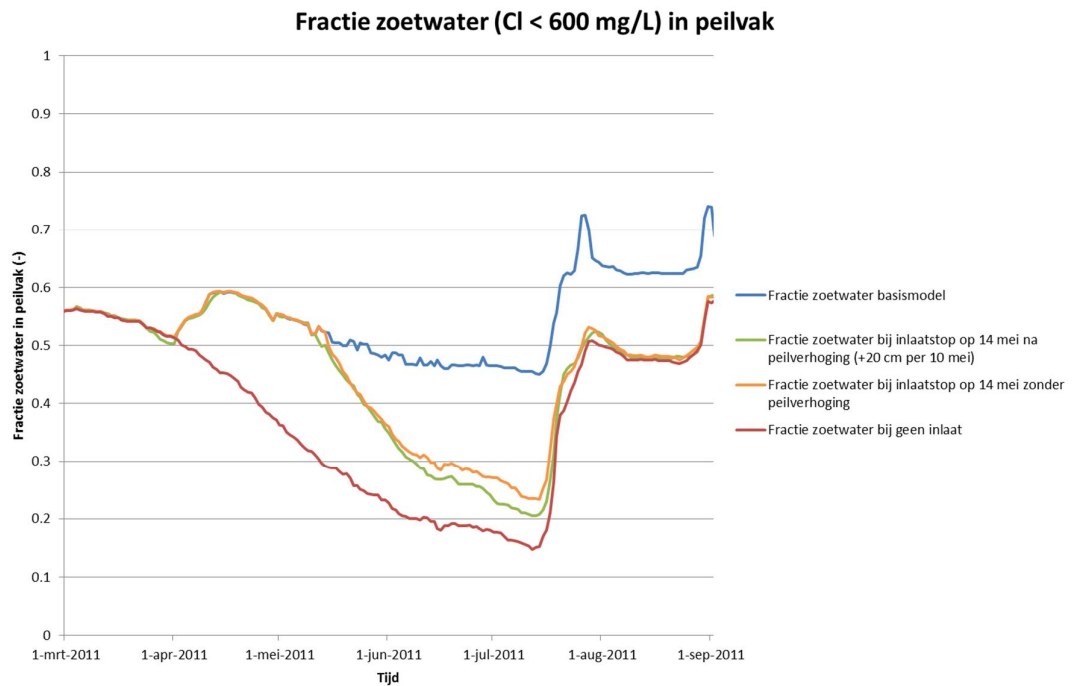
Figuur 5.19: Afvoer typen water van stoppen met inlaten na peilverhoging



Figuur 5.20: Afvoer typen water van stoppen met inlaten zonder peilverhoging



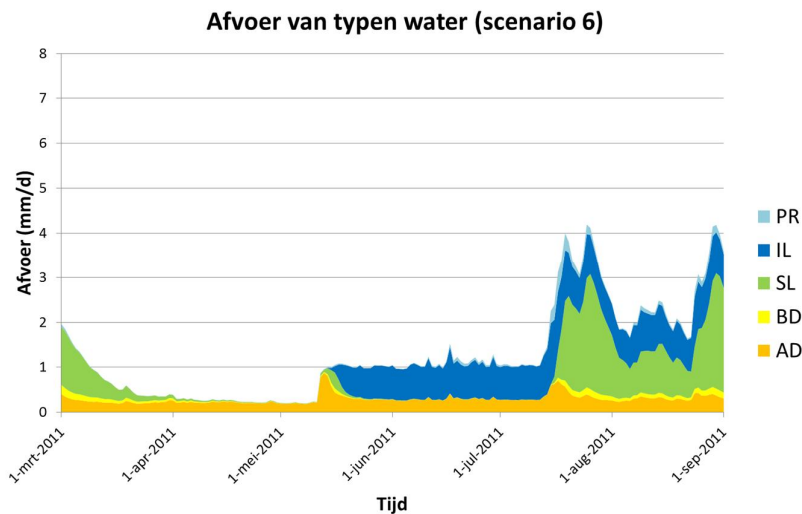
Figuur 5.21: Volume zoetwater bij stoppen met inlaten



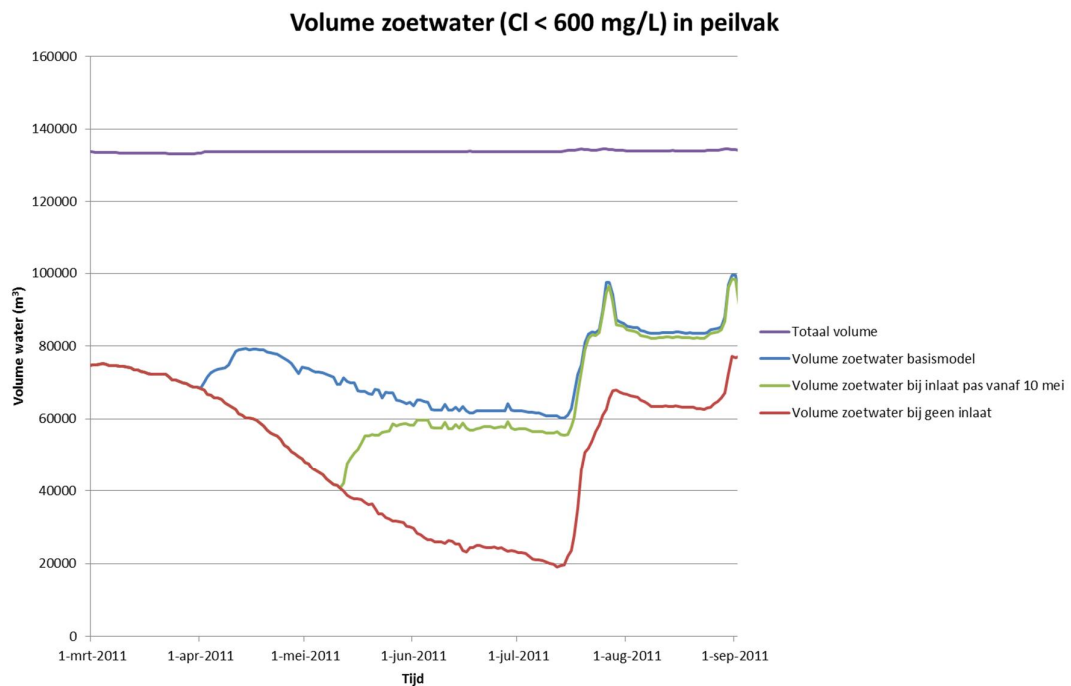
Figuur 5.22: Fractie zoetwater bij stoppen met inlaten

### 5.2.6 Scenario 6 (tijdens een droge periode inlaten hervatten)

Wanneer er gestart wordt met inlaten op 11 mei na een periode zonder inlaten, neemt de afvoer van het hoofdgemaal snel toe (zie Figuur 5.23). In eerste instantie wordt er vooral water uitgemalen dat afkomstig is van diepe wellen. Hierdoor neemt de zoutvracht de eerste vijf dagen sterk toe omdat er in korte tijd veel meer zoutwater uitgemalen wordt dan ervoor. Het volume zoetwater in het peilvak neemt tussen 11 mei en 18 mei snel toe (Figuur 5.24), waarna het redelijk constant wordt en vergelijkbaar is met het volume zoetwater als er het hele seizoen doorgespoeld wordt.



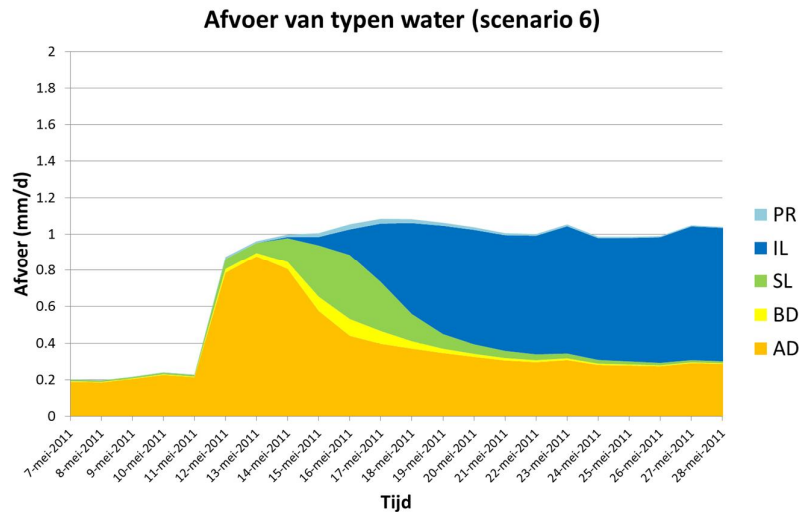
Figuur 5.23: Afvoer typen water bij hervatten inlaten



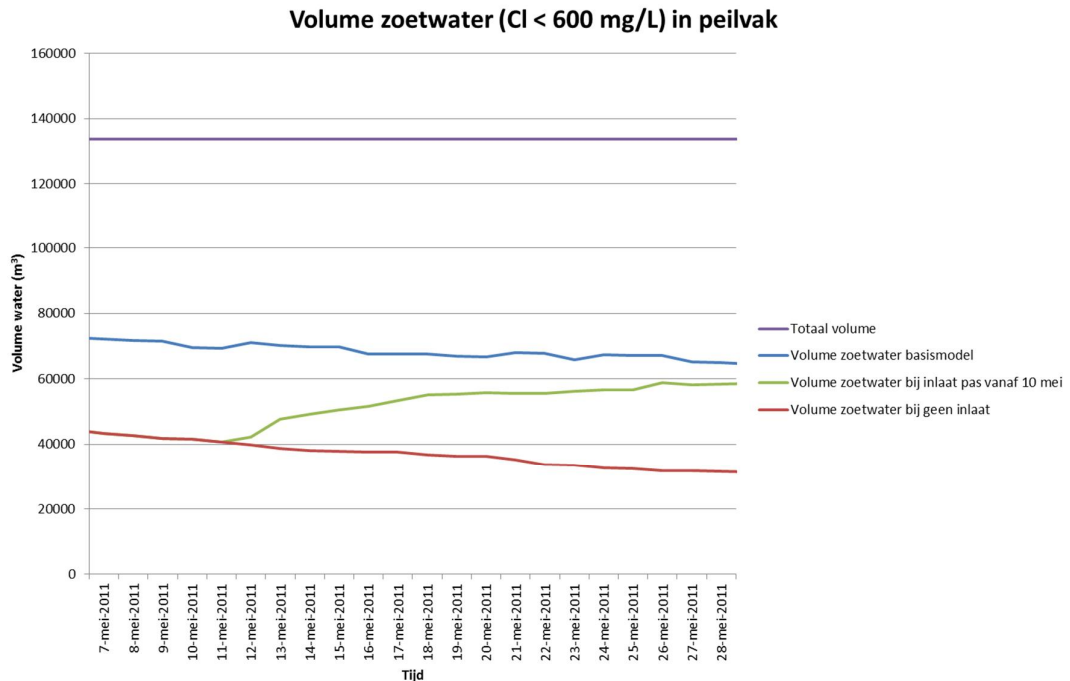
Figuur 5.24: Volume zoetwater bij hervatten inlaten



In Figuur 5.25 en Figuur 5.26 is in extra detail weergegeven hoe de afvoer van typen water en het volume zoetwater in het peilvak rond het hervatten van inlaten verloopt. Het is te zien dat na 3 dagen (op 14 mei) het eerste inlaatwater het gemaal bereikt. Vanaf 18 mei heeft de stroom inlaatwater het gemaal volledig bereikt, is de hoeveelheid water van diepe wellen weer ongeveer terug op de normale waarde en verandert de afvoer van de verschillende typen nog maar weinig. Vanaf dit moment neemt ook het volume zoetwater in het peilvak nauwelijks nog toe. Na 25 mei (twee weken vanaf het hervatten van de inlaat) stijgt het volume zoetwater in het peilvak helemaal niet meer en wordt vrij constant op een waarde die dicht in de buurt komt van het basismodel.



Figuur 5.25: Detail van afvoer typen water rond moment van hervatten inlaten



Figuur 5.26: Detail van volume zoetwater rond het moment van hervatten inlaten



## 6 Discussie

### 6.1 Basismodel

Het inlaatwater stroomt in het zuiden van het peilvak eerst relatief snel het gebied in en mengt daar met water van zoute kwel en drainafvoer. Vervolgens komt het water uit in diepere, bredere sloten en stroomt het trager naar het noorden waar het uiteindelijk door het gemaal uitgemalen wordt. De snelheid waarmee het inlaatwater zich in het model verspreid, is overeenkomend met eerdere metingen die in het gebied zijn gedaan met behulp van opeenvolgende momentopnames van EC-profielen door een sloot wanneer inlaatwater door een sloot gaat stromen (waar op dat moment nog zout water aanwezig was) (Van Grevenbroek, 2013).

Doordat het model eendimensionaal is, wordt de gelaagdheid van water met verschillende zoutconcentraties door dichtheidsverschillen niet meegenomen in de berekeningen. Metingen in het veld tijdens een velddag gedurende de stage, lieten echter zien dat er wel variatie in zoutconcentratie in de diepte aanwezig is. Dit was vooral het geval bij de diepere, relatief langzaam stromende sloten in het noorden van het peilvak nabij het gemaal. In de ondiepere, sneller stromende sloten in het zuiden van het peilvak was er weinig variatie van chlorideconcentratie met de diepte, ook niet op plekken waar zoet inlaatwater en zout kwelwater samenstromen. Omdat er bij het gemaal weer sterke menging plaatsvindt van het water dat wordt uitgemalen, zal de variatie van in chlorideconcentratie in de diepte waarschijnlijk geen grote invloed hebben op de resultaten van het model bij het gemaal, omdat het uitgemalen water weer goed gemengd is. Verder heeft het eendimensionaal modelleren in dit geval als voordeel dat er een zeer gedetailleerd model gemaakt kan worden van alle waterlopen, doordat de rekentijd van het model relatief kort is. Het toevoegen van een extra dimensie zou de rekentijd van het model naar verwachting zeer sterk doen toenemen.

Voor de verdamping is gebruik gemaakt van de verdampingsgegevens van het meteorologisch station Schiphol aan de noordkant van de Haarlemmermeerpolder. Verdamping kan echter variëren voor open water door allerlei lokale factoren zoals de watertemperatuur, windsnelheid en variatie in inkomende straling. Verdamping speelt vooral een rol voor de indamping van water waardoor concentraties van stoffen hoger worden. In doodlopende sloten is de concentratieverhoging door verdamping op sommige plekken meer dan factor 2. Het water dat bij het gemaal uitgemalen wordt is gemiddeld echter maximaal 5% ingedampt, gemiddeld over het hele peilvak genomen kan dit wel oplopen tot 20% doordat er veel ondiepe doodlopende sloten aanwezig zijn waar relatief veel indamping en weinig stroming van het water plaatsvindt. Onzekerheden in de mate van verdamping kunnen dus vooral lokaal in doodlopende sloten een vrij groot effect hebben op de berekende chlorideconcentraties

Doordat er nog weinig studies gedaan zijn naar de ruimtelijke variatie van watertypen en chlorideconcentraties op een dergelijk kleine schaal, is het niet goed mogelijk om de modeluitkomsten te vergelijken met eerdere studies. Onderzoek in gebieden waar vergelijkbare processen plaatsvinden, zal naar verwachting meer kennis kunnen opleveren over de betrouwbaarheid van dit model, zodat het model nog verder verbeterd kan worden.

Omdat peilvakken in de Haarlemmermeerpolder kunnen verschillen van eigenschappen in bijvoorbeeld maaiveldhoogte, landgebruik, ontwatering en hoeveelheid zoute kwel, is het niet

mogelijk om de resultaten direct over de hele Haarlemmermeerpolder te extrapoleren. Wel zijn er veel vergelijkbare gebieden, ook in andere polders, waar zoute kwel een belangrijke rol speelt (De Louw, Bakkum, Folkerts, & van Hardeveld, 2004) en waar de afvoer van typen water en de chlorideconcentraties naar verwachting een vergelijkbaar patroon hebben. De inzichten die uit dit model verkregen zijn, kunnen daar ook toegepast worden.

## 6.2 Scenario's

Veel mogelijke maatregelen waren in eerdere onderzoeken al voorgesteld, maar deze maatregelen zijn nooit eerder op lokaal niveau nagerekend wat de daadwerkelijke effecten ervan zijn. Veel uitkomsten liggen wel in de lijn der verwachtingen, maar het is nuttig dat deze nu verder gekwantificeerd zijn, zodat het waterbeheer in de toekomst hiermee verder verbeterd kan worden.

Doordat inlaatwater de kortste route kiest van de inlaten naar het gemaal is er relatief weinig inlaatwater nodig om na een periode zonder doorspoeling weer de situatie terug te krijgen die vergelijkbaar is met doorspoelen. Een deel van de sloten blijft altijd zout en hoeft daarom ook niet meegenomen te worden bij het berekenen van de hoeveelheid inlaatwater die nodig is om een 'zoete' beginsituatie te herstellen. Het is niet mogelijk om het inlaatwater zo te verdelen dat alle sloten zoet worden, maar dat is ook niet noodzakelijk zolang het inlaatwater maar goed verspreid kan worden om in alle delen van het peilvak zoet water beschikbaar te hebben. Door een deel van de sloten zout te houden is er hierdoor ook minder water nodig is om door te spoelen.

In het model is uitgegaan van een constante chlorideconcentratie van de drainagefluxen. In de output van het RSGEM model variëren deze concentraties echter in de tijd. Naar verwachting zal het niet meenemen van deze variatie van chlorideconcentraties in de drainagefluxen geen grote invloed hebben op de resultaten van het model. Zeker omdat het overgrote deel van de zoutvracht afkomstig is van diepe wellen en de mogelijke verschillen in chlorideconcentratie van de drainagefluxen weinig invloed heeft op de uiteindelijke chlorideconcentratie. Het is vooral de flux van de drainagefluxen (en daarmee de verdunning van het zoute water van de wellen) die invloed heeft op de uiteindelijke chlorideconcentraties in het peilvak en niet de chlorideconcentratie van het drainagewater.

Voor de diepe wellen is zowel de flux als de concentratie constant opgelegd gedurende de hele simulatieperiode van het model. Doordat er vrijwel geen gedetailleerde gegevens beschikbaar van eventuele veranderingen in flux en zoutconcentraties van diepe wellen, is het ook niet mogelijk om deze variatie na te bootsen en vervolgens te kunnen kalibreren. In de data van de gemeten typen water was echter een vrij constante flux zichtbaar. Er is wel variatie gemeten bij het gemaal, maar deze wordt naar verwachting veroorzaakt doordat het water van diepe wellen niet gedurende de hele periode even snel wordt afgevoerd naar het gemaal. Wanneer er veel drainwater wordt afgevoerd door een neerslagpiek, is het type water dat bij het gemaal uitgemalen wordt eerst vooral zout water van wellen dat nog in de sloten aanwezig was, het drainwater bereikt pas later het gemaal. De flux bij het gemaal neemt echter wel meteen toe zodra er veel drainwater wordt afgevoerd, waardoor er in het begin extra veel zoutwater wordt afgevoerd, totdat er een evenwichtssituatie bereikt wordt. Hetzelfde gebeurt bij het openen van de inlaten. Andersom neemt de hoeveelheid water van wellen bij het gemaal tijdelijk af zodra er gestopt wordt met inlaten, omdat dan de flux bij het gemaal omlaag gaat, terwijl de verhouding van verschillende typen van het water nog niet aangepast is op dat moment. Pas wanneer het water van de diepe wellen het gemaal bereikt heeft neemt de chlorideconcentratie weer toe. Dit patroon is ook duidelijk terug te zien in de meetgegevens van de verschillende typen water, waarbij vergelijkbare toenames en afnames

te zien zijn van het water van diepe wellen. Daarom wordt aangenomen dat flux van de wellen inderdaad constant is zoals in het model is gesimuleerd.

Ondanks onzekerheden in de afvoer van verschillende watertypen, geeft het model toch veel inzicht in mogelijke maatregelen die ook een ander gebied effectief zouden kunnen zijn, zonder dat er opnieuw een heel model gemaakt hoeft te worden. Zeker in combinatie met kennis over de locaties van zoute kwel, kunnen vergelijkbare maatregelen toegepast worden om zo de beschikbaarheid van zoetwater te vergroten en verzilting te beperken.

## 7 Conclusies

De hoofdvraag van het onderzoek luidt: Is het mogelijk om het doorspoelen van inlaatwater in peilvak 9-19 van de Haarlemmermeerpolder efficiënter te maken, zodat de verzilting van het oppervlaktewater door zoute kwel beperkt wordt? Het blijkt dat het op verschillende manieren mogelijk is om het doorspoelen van inlaatwater in peilvak 9-19 te verbeteren om verzilting te beperken. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste conclusies per deelvraag weergegeven. Geschikte maatregelen om de doorspoeling te verbeteren zijn: peilverhogingen in sloten met veel zoute kwel, het scheiden van zoet- en zoutwater en het alleen doorspoelen wanneer het water nodig is. Voor een succesvolle toepassing van deze eerste twee maatregelen op andere locaties in diepe polders met zoute kwel, is het echter noodzakelijk dat de locaties bekend zijn waar precies de sterke zoute kwel plaatsvindt. Deze locaties kunnen achterhaald worden met behulp van EC-routing van de waterlopen tijdens een droge periode.

### **Door welke processen wordt de zoutconcentratie in de sloten in de Haarlemmermeerpolder gestuurd?**

In de laaggelegen delen van de Haarlemmermeerpolder vindt sterke zoute kwel plaats via 'diepe wellen', dit zijn plekken in de bodem met weinig weerstand waar zout grondwater dat aanwezig is in het eerste watervoerend pakket met hoge snelheid het oppervlaktewater kan bereiken. Er vindt ook diffuse kwel van zout grondwater plaats via de bodem van sloten, maar de zoutconcentratie hiervan is een stuk lager. Neerslag komt voornamelijk via drains in de sloten terecht en zorgt voor verdunning van het zoute oppervlaktewater. Daarnaast wordt er tussen 1 april en 1 oktober water vanuit de omliggende Ringvaart ingelaten om de verzilting te beperken. Dit inlaatwater bereikt een beperkt aantal sloten in de polder.

### **Kunnen de drainagefluxen in peilvak 9-19 representatief gemodelleerd worden?**

De resultaten van het Rapid Saline Groundwater Exfiltration Model (RSGEM) zijn bruikbaar voor het modelleren van de drainagefluxen en hebben een vergelijkbare dynamiek als de meetgegevens. Wel wordt de diffuse kwel in de sloten op sommige momenten onderschat en zijn pieken van de drainafvoer soms te hoog gemodelleerd. Naar verwachting zal dit geen grote invloed hebben op de resultaten van het onderzoek omdat de verzilting vooral plaatsvindt tijdens periodes met geen of lage afvoer via drains en relatief weinig diffuse kwel/infiltratie in de sloten.

### **Kunnen de zoutconcentraties en watertypen in de sloten van peilvak 9-19 representatief gemodelleerd worden?**

De verspreiding van zoutwater in het model komt geeft een representatief beeld en is vergelijkbaar met het ruimtelijk beeld van de gemeten EC waarden in sloten. Daarnaast komen ook de tijdreeksen van chloride en EC op verschillende locaties in het peilvak goed overeen met de gesimuleerde chlorideconcentraties in het model. Aangezien de chlorideconcentratie bij het gemaal niet onder de 600 mg/L komt, heeft het sturen van inlaatwater aan de hand van deze concentratiegrens (alleen doorspoelen bij een hogere concentratie) geen invloed op de hoeveelheid inlaatwater die dan verbruikt zal worden (de inlaten zullen dan altijd open blijven staan).

**Wat zijn de effecten van het verminderen van de hoeveelheid inlaatwater op de zoutconcentratie in het oppervlaktewater?**

Wanneer er niet wordt doorgespoeld tijdens droge periodes, zijn de chlorideconcentraties sterk verhoogd ten opzichte van de situatie met doorspoeling. Meer dan 90% van het water dat tijdens een droge periode uitgemalen wordt is dan afkomstig van zoute kwel. Tijdens periodes met veel neerslag is er echter weinig verschil tussen de situatie met en zonder doorspoeling.

Bij halvering van de hoeveelheid inlaatwater is de chlorideconcentratie tijdens droge periodes ook verhoogd, maar deze verhoging is veel minder sterk dan in de situatie zonder doorspoeling.

**Kan er effectiever gebruik gemaakt worden van dezelfde hoeveelheid inlaatwater, waardoor er meer zoetwater beschikbaar is?**

Peilverhoging van een sloot met veel zoute kwel vermindert de zoutvracht op het water dat in de polder uitgemalen en zorgt voor een grotere beschikbaarheid van zoetwater in het peilvak. De sloot zelf krijgt een constante, hoge concentratie van chloride doordat er geen drainagewater meer in de sloot terecht komt. Wel kunnen de aangrenzende percelen extra verzilten door infiltratie van zoutwater vanuit de sloot.

Ook het scheiden van zoet- en zoutwater (door plaatsing van schotten in sloten waar veel zoute kwel plaatsvindt en dit water via een andere route laten stromen dan het inlaatwater) kan op een relatief eenvoudige manier het verzilten van inlaatwater tegengaan, waardoor er meer zoetwater beschikbaar blijft op grotere afstand van de inlaten.

**Hoe snel verandert de zoutconcentratie en beschikbaarheid van zoet water in het peilvak tijdens een droge periode bij het stoppen en hervatten van inlaten?**

Wanneer er gestopt wordt met inlaten tijdens een droge periode, neemt in ongeveer drie weken tijd de hoeveelheid beschikbaar zoetwater in het peilvak relatief snel af, daarna gaat de afname van de beschikbare hoeveelheid zoetwater weer in hetzelfde tempo verder als in de situatie zonder doorspoeling. Peilverhoging voor het stoppen met inlaten zorgt voor een toename in het volume beschikbaar zoetwater, maar ten opzichte van het totaal volume neemt de fractie zoetwater in het peilvak dan juist af en daalt deze fractie ook nog sneller dan zonder peilverhoging. Wel wordt de flux van de zoute kwel hiermee verlaagd.

Bij het hervatten van doorspoelen na een droge periode zonder doorspoeling herstelt de hoeveelheid zoetwater in het peilvak in ongeveer een week naar een situatie die vergelijkbaar is met wanneer er het hele seizoen wordt doorgespoeld.

## 8 Aanbevelingen

### 8.1 Toepassing van de maatregelen

Voor de toepasbaarheid in andere peilvakken van het scenario waarbij zout- en zoetwater zo veel mogelijk gescheiden afgevoerd wordt naar het gemaal, moet worden nagegaan of er op een relatief eenvoudige manier meerdere routes naar het gemaal te maken zijn. Daarnaast is het nodig om de locaties van sterke zoute kwel via de wellen te weten, om te bepalen welke sloten via de 'zoete route' en welke sloten via de 'zoute route' afgevoerd moeten worden. De locaties van sterke zoute kwel kunnen bepaald worden met behulp van EC-routing tijdens een droge periode. Het scheiden van zoet- en zoutwater heeft kwantitatief niet een heel groot effect in de beschikbare hoeveelheid zoetwater, de ruimtelijke verdeling van het zoetwater in het peilvak kan er echter sterk door verbeteren, waardoor er op meer percelen mogelijkheden zijn voor beregening.

Peilverhoging in specifieke sloten met veel zoute kwel, kan deze kwel doen verminderen, maar zorgt wel voor een constant hoge chlorideconcentratie in de sloot. Er kan worden nagegaan of het wenselijk is om dit lokaal toe te passen, om zo de zoutvracht afkomstig uit het peilvak te verminderen. Er vindt echter wel infiltratie van zout water in de slootbodem plaats waardoor het grondwater van de percelen direct grenzend aan de sloot verder kunnen verziltten. Mogelijk kan er naar nieuwe gebruiksfuncties gezocht worden om dit zoutwater hier op een nuttige manier te kunnen gebruiken. Op deze manier kan op andere locaties de hoeveelheid zoutwater juist beperkt worden, wat betere omstandigheden geeft in de zoetwaterbeschikbaarheid elders.

Het aanpassen van de inlaathoeveelheden aan de behoefte van de gebruikers (alleen doorspoelen wanneer het nodig is voor beregening) kan zonder veel kennis over de locatie van sterke zoute kwel het verbruik van inlaatwater verminderen. In de periodes zonder doorspoeling kunnen de chlorideconcentraties dan wel sterk oplopen. Wanneer er weer gestart wordt met doorspoelen, kan in het onderzochte peilvak in ongeveer een week tijd weer een situatie gecreëerd worden die vergelijkbaar is met wanneer er het hele seizoen zou worden doorgespoeld. In andere peilvakken kan deze tijdsduur korter of langer zijn, dit hangt af van hoe lang het inlaatwater erover doet om het gemaal te bereiken. Deze periode kan bepaald worden door vanaf het moment dat de inlaten geopend worden tijdens een droge periode, bij het gemaal te meten hoe lang het duurt totdat de EC is verlaagd en een relatief constante waarde heeft bereikt.

### 8.2 Verder onderzoek met het model

Om het model dat in dit onderzoek gemaakt is mogelijk nog verder te verbeteren, zijn de volgende opties mogelijk:

De modelschematisatie aanpassen waarbij de kwelflux van diepe wellen verdeeld wordt over zowel een groter als een kleiner aantal wellen en de invloed van deze veranderingen onderzoeken op de resultaten van het model. Daarnaast kan ook onderzocht worden hoeveel invloed variaties in de flux en chlorideconcentraties van de wellen hebben op de modeluitkomsten.

Verder kan de chlorideconcentratie van de drainagefluxen variabel in de tijd gemaakt worden met behulp van de output van het RSGEM model (in dit model wordt ook de zoutconcentratie van de drainagefluxen gemodelleerd), in plaats van een constante mediane waarde te

gebruiken zoals gedaan is in dit onderzoek. Mogelijk kan dit de resultaten van het model verbeteren.

Ook kan er gekeken worden of er nog een verbeterde kalibratie van het RSGEM model mogelijk is, zodat de drainagefluxen nog beter gemodelleerd kunnen worden.

### **8.3 Softwareverbeteringen**

Er waren twee beperkingen in de functionaliteit van SOBEK die verbeterd kunnen worden, zodat het in de toekomst gemakkelijker wordt om een vergelijkbaar model op te zetten van de stroming en zoutconcentraties in een peilvak.

In SOBEK is het op dit moment niet mogelijk om neerslag en verdamping uit de meteorologische gegevens die ingeladen kunnen worden in SOBEK rechtstreeks op open water op te leggen en ook een concentratie via SOBEK 1D WAQ toe te kennen aan deze fluxen. Hierdoor kan de neerslag makkelijker verdeeld worden over het hele peilvak en hoeft niet in elk segment van het model een punt laterale flux gedefinieerd te worden voor neerslag en verdamping.

Ook kan een fout verholpen worden in de functionaliteit van diffuse laterale fluxen waarbij fouten ontstaan in de waterbalans bij het toekennen van deze laterale fluxen op waterlopen. Als deze fout verholpen is, kunnen de drainagefluxen diffuus verdeeld worden over alle waterlopen waar drainage plaatsvindt, in plaats van dat er punt laterale fluxen in elk segment gedefinieerd moeten worden voor de drainagefluxen.

## 9 Referenties

- De Louw, P., Bakkum, R., Folkerts, H., & van Hardeveld, H. A. (2004). *Het effect van waterbeheer op de chloride- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas. Synthese rapport: definitieve water- en stoffenbalans en effecten van verschillende waterbeheersscenario's*. Nederlands Instituut voor Toegepast Onderzoek (TNO).
- De Louw, P., Oude Essink, G., & Maljaars, P. (2007). *Achtergrondstudie kwelreductietechnieken*. Nederlands Instituut voor Toegepast Onderzoek (TNO).
- De Louw, P., Oude Essink, G., Stuyfzand, P., & Van der Zee, S. (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 394 (3-4), 494-506.
- Delsman, J. (2015). *Saline Groundwater - Surface Water Interaction in Coastal Lowlands - Academisch proefschrift, Delta Select Series 15*. Amsterdam: IOS Press.
- Delsman, J. R., Oude Essink, G., Beven, K., & Stuyfzand, P. J. (2013). Uncertainty estimation of end-member mixing using generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE), applied in a lowland catchment. *Water Resources Research*, 49, 4792-4806.
- Delsman, J., De Louw, P., Oude Essink, G., & De Lange, W. (2014). Fast calculation of groundwater exfiltration salinity in a lowland catchment using a lumped celerity / velocity approach. *In preparation*.
- Delsman, J., Hu-A-Ng, K., Vos, P., De Louw, P., Oude Essink, G., Stuyfzand, P., et al. (2014). Paleo-modeling of coastal saltwater intrusion during the Holocene: An application to the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (10), 3891-3905.
- Deltares. (2015). *SOBEK User Manual*.
- Dik, P., Kroes, J., Smit, A., & Veldhuizen, A. (2005). *Onderbouwing wateropgave Haarlemmermeerpolder - Modelbouw, kalibratie en scenarioanalyse*. Wageningen: Alterra.
- KNMI. (2011-2013). *Klimatologie daggegevens*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Oude Essink, G., Van Baaren, E., & De Louw, P. (2010). Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resources Research*, 46 (10), W00F04.
- Rijnland. (2005). *Peilbesluit boezem Rijnland - Integrale afweging - Toelichting hoofdrapport*.
- Rijnland. (2008). *Verziltting en waterbehoefte nu en in de toekomst - Achtergronden, beleid en ontwikkelingen*.



Rijnland. (2009). *Waterbeheerplan 2010-2015*.

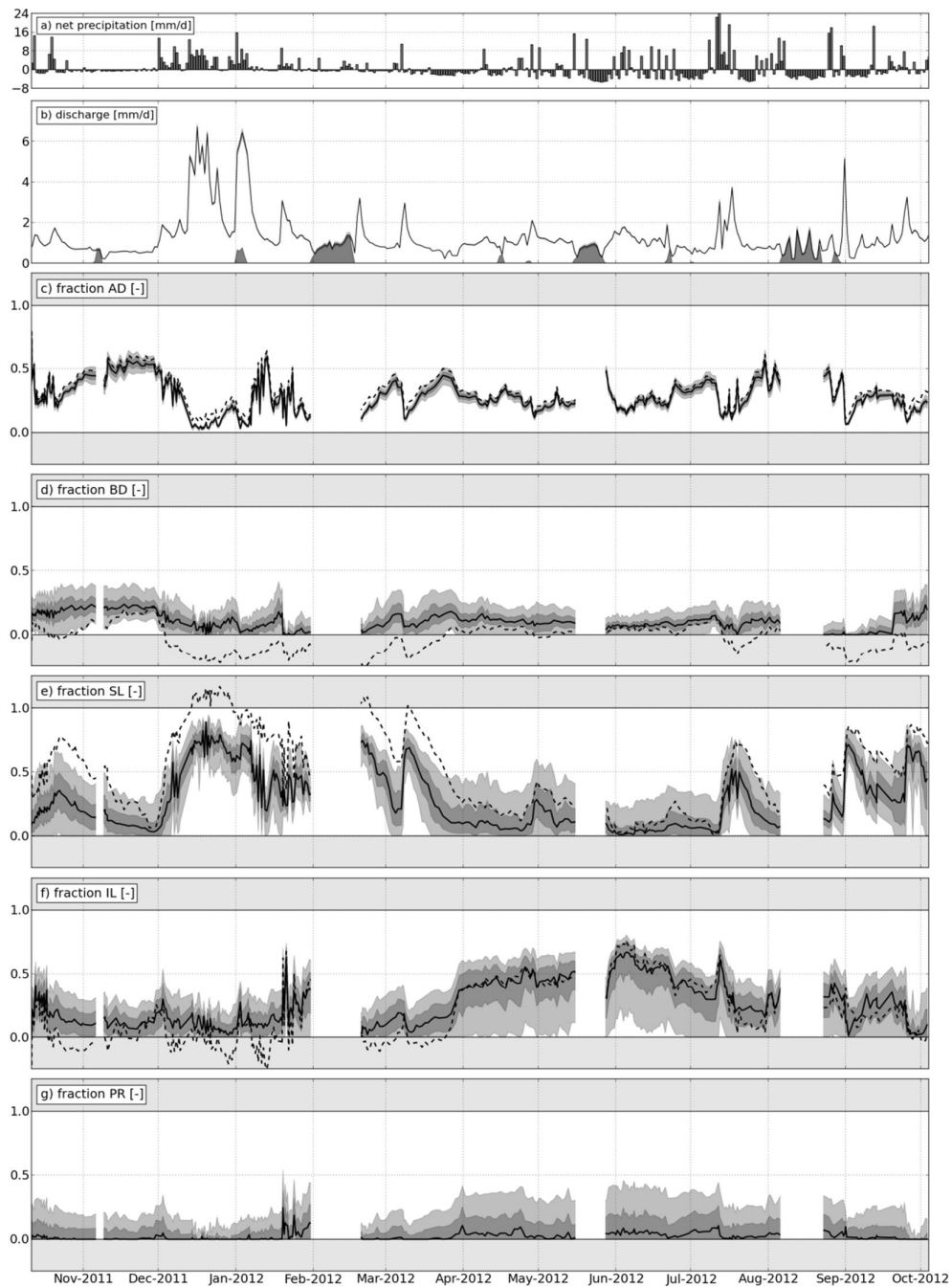
Rijnland. (2011). *Legger oppervlaktewateren Rijnland*.

Val Alonso, L. (2011). *Geochemical interpretation of the relation between ground and surface water systems at small subcatchment in the Haarlemmermeer polder (Thematic Research Report)*. Amsterdam: Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije Universiteit.

Van Grevenbroek, S. (2013). *Influence of Fresh Water Inlet on the Spatial and Temporal Variation of Electrical Conductivity of Haarlemmermeer Polder Drainage System (Bachelor Thesis)*. Amsterdam: Faculty of Earth and Life Sciences, Vrije Universiteit.

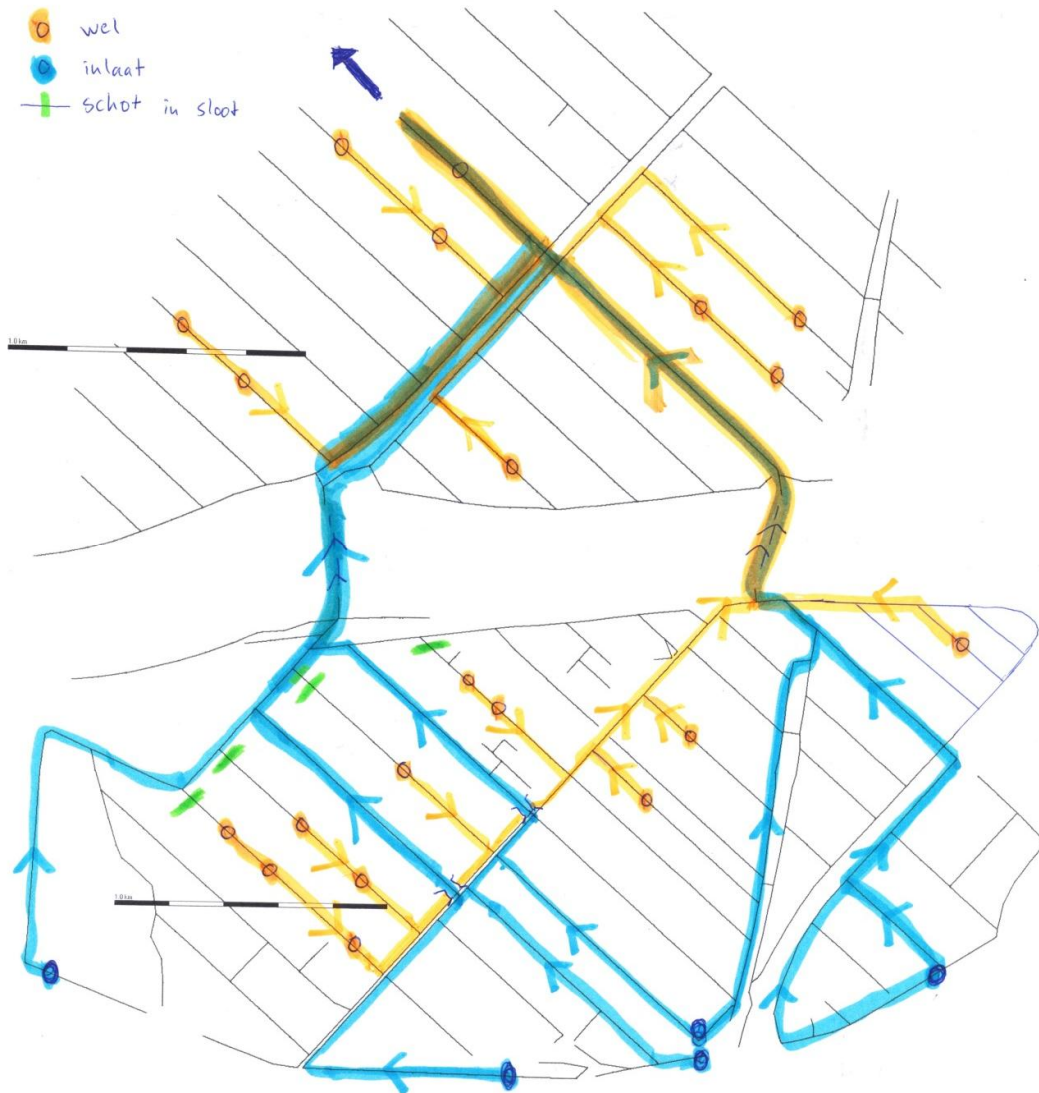
Vink, R. (2010). *Een analyse van doorspoelen in de Haarlemmermeerpolder, stageverslag*. Hoogheemraadschap Rijnland / Universiteit Utrecht.

## A Resultaat van G-EMMA analyse onderzoek Joost Delsman, gebruikt als kalibratiedata voor het model

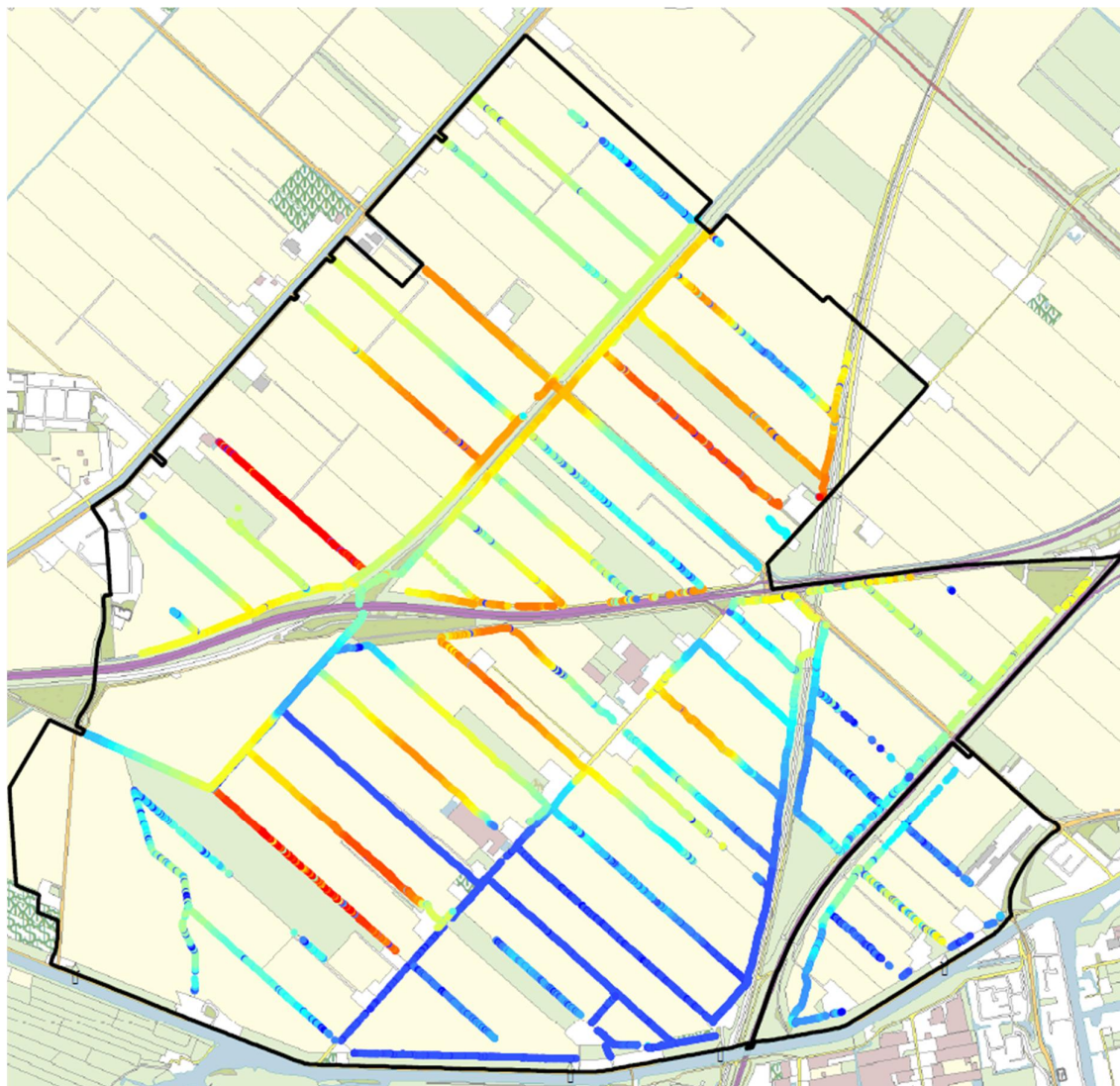


Figuur 1.1: Gebruikte kalibratiedata van typen water met bijbehorende onzekerheden (Delsman, Oude Essink, Beven, & Stuyfzand, 2013)

## B Situatieschets scenario 4



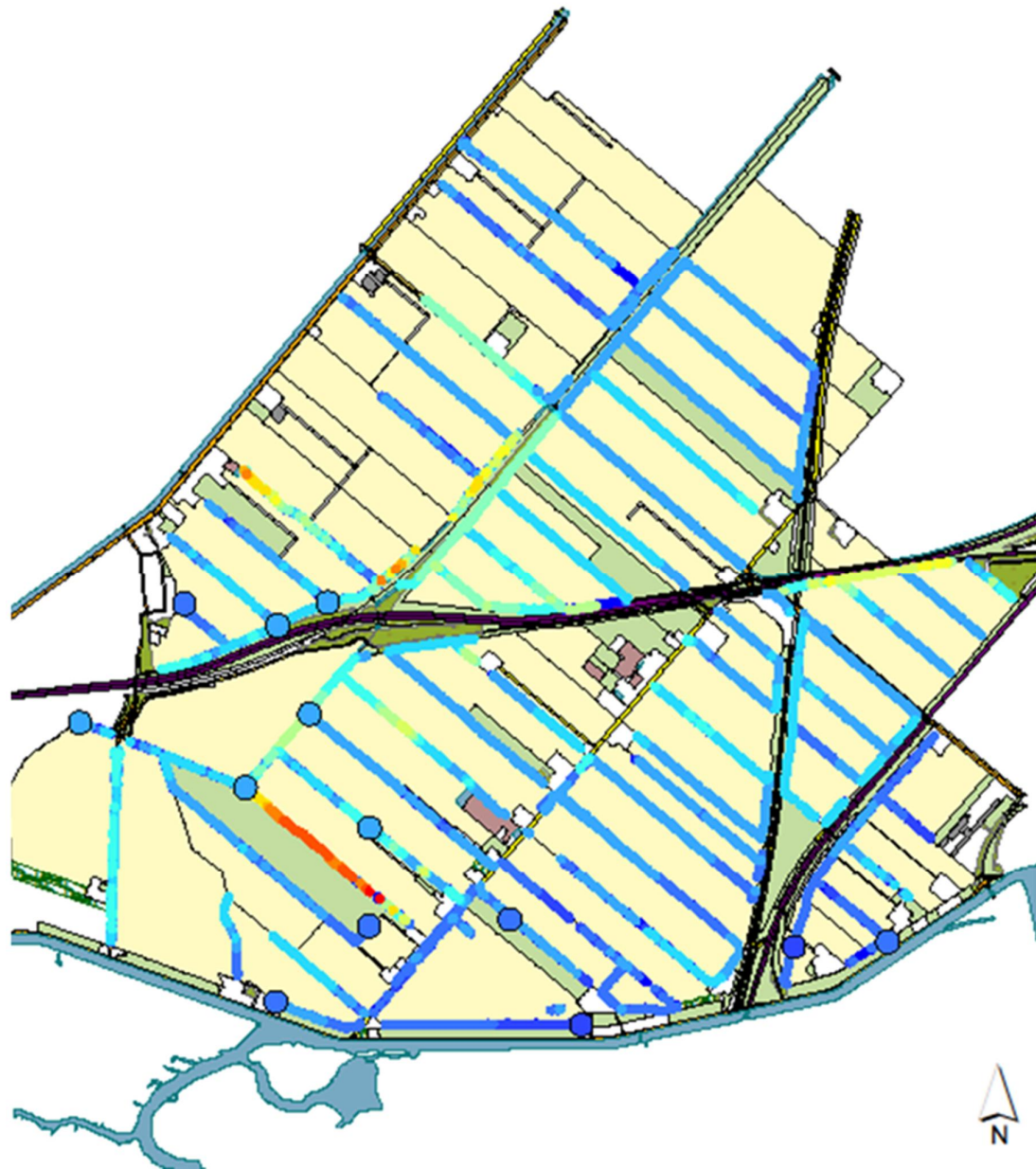
## C EC beelden



### Legenda

• 0.30 - 0.51	• 0.93 - 1.10	• 1.75 - 1.91	• 2.54 - 2.74	• 3.52 - 3.73	• 4.59 - 4.84	• 6.18 - 6.64
• 0.52 - 0.73	• 1.11 - 1.30	• 1.92 - 2.07	• 2.75 - 2.95	• 3.74 - 3.94	• 4.85 - 5.07	• 6.65 - 7.17
• 0.74 - 0.92	• 1.31 - 1.48	• 2.08 - 2.21	• 2.96 - 3.16	• 3.95 - 4.13	• 5.08 - 5.31	• 7.18 - 8.20
	• 1.49 - 1.60	• 2.22 - 2.36	• 3.17 - 3.34	• 4.14 - 4.34	• 5.32 - 5.69	• 8.21 - 16.00
	• 1.61 - 1.74	• 2.37 - 2.53	• 3.35 - 3.51	• 4.35 - 4.58	• 5.70 - 6.17	

Figuur C.1 EC beeld droge situatie met inlaat: mei 2011 (J. Delsman)



**Legenda**

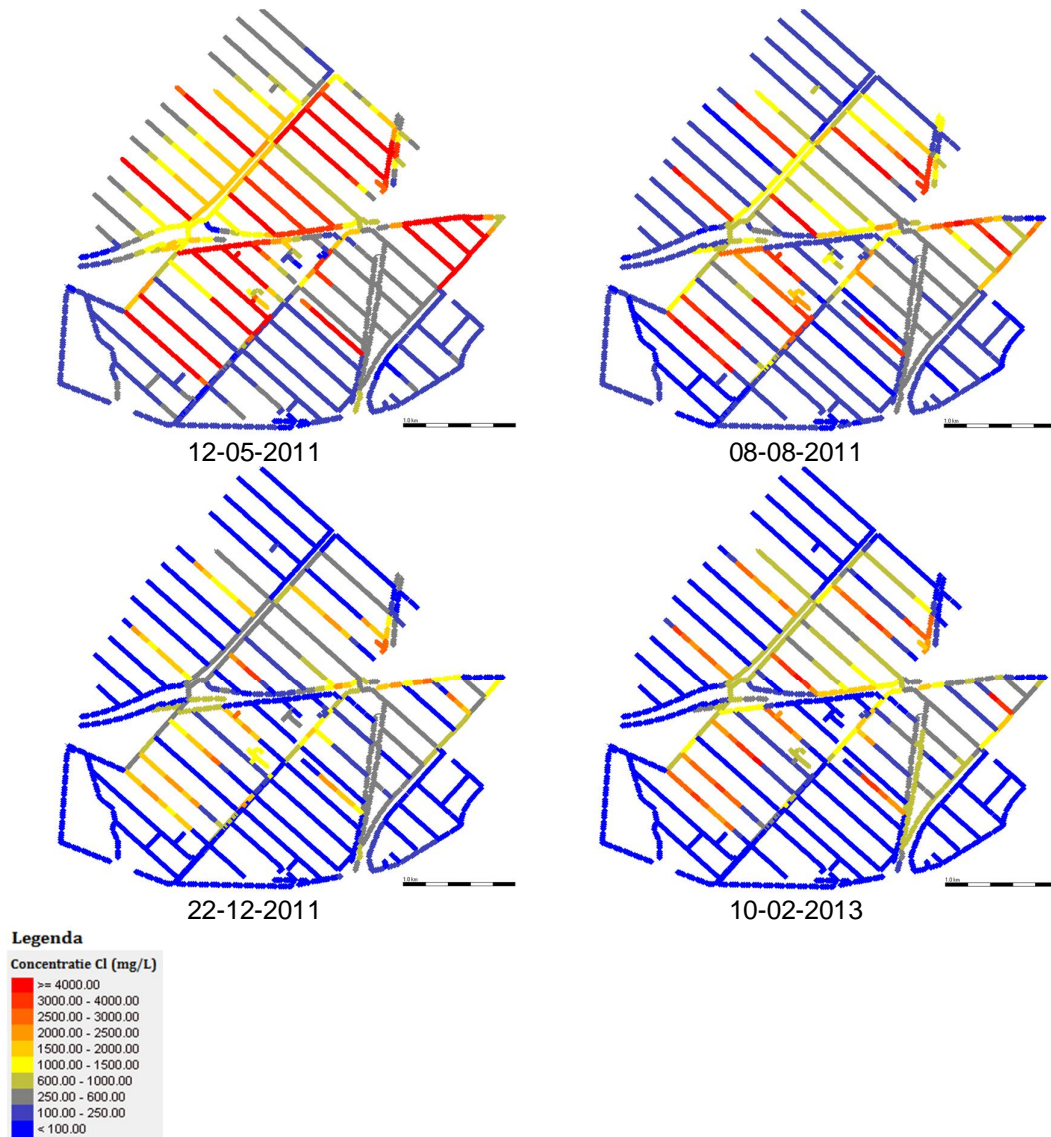
■ 0.0 - 0.5	■ 1.6 - 2.0	■ 3.1 - 3.5	■ 4.6 - 5.0	■ 6.1 - 7.0
■ 0.6 - 1.0	■ 2.1 - 2.5	■ 3.6 - 4.0	■ 5.1 - 5.5	■ 7.1 - 8.0
■ 1.1 - 1.5	■ 2.6 - 3.0	■ 4.1 - 4.5	■ 5.6 - 6.0	■ 8.1 - 16.0

Figuur C.2 EC beeld natte situatie, geen inlaat: februari 2013 (Akker en Van Naarden, 2013)

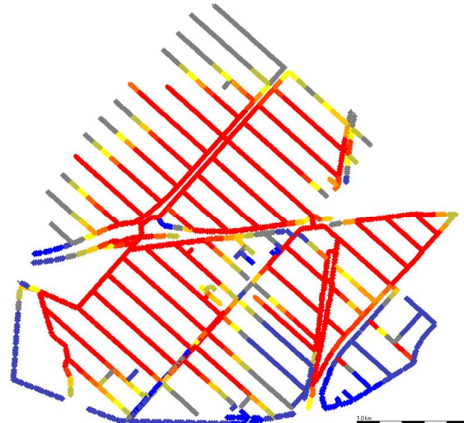


## D Chlorideconcentraties SOBEK basismodel en scenario's

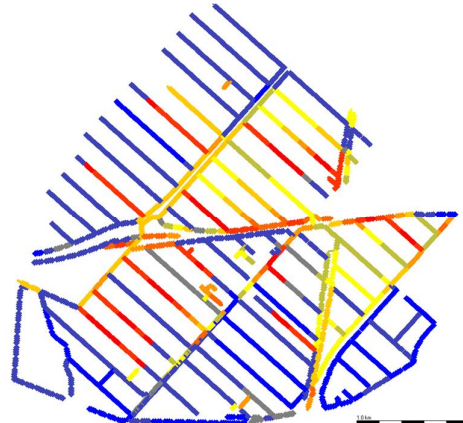
Basismodel



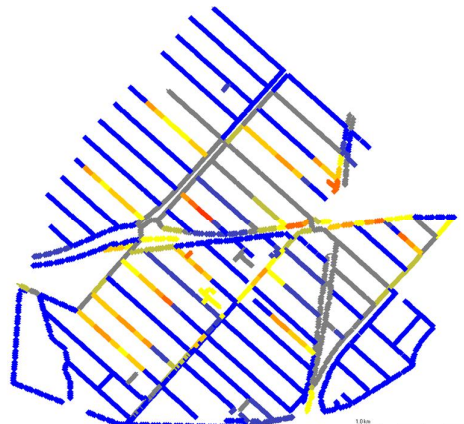
## Scenario 1



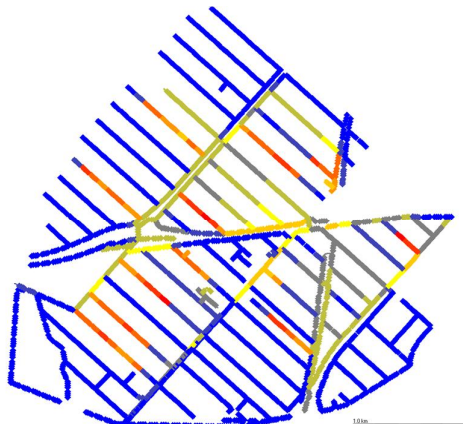
12-05-2011



08-08-2011



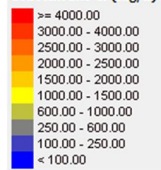
22-12-2011



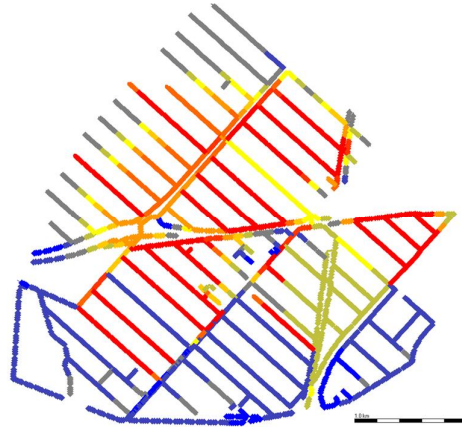
10-02-2013

### Legenda

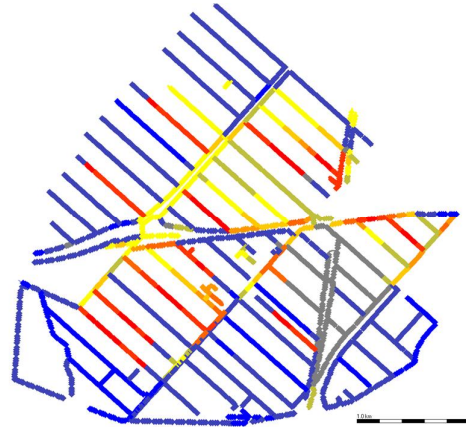
Concentratie Cl (mg/L)



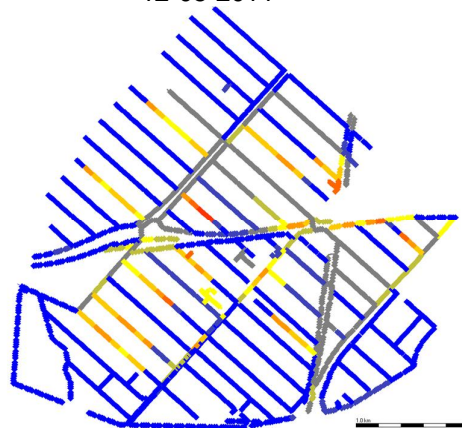
## Scenario 2



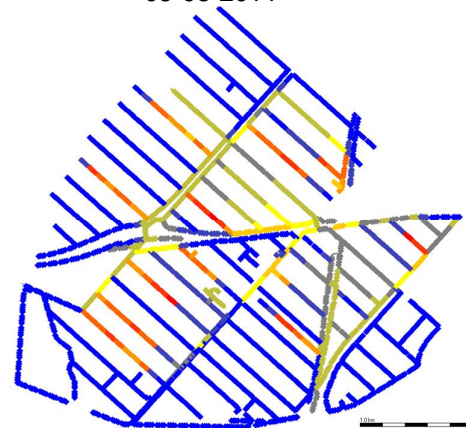
12-05-2011



08-08-2011



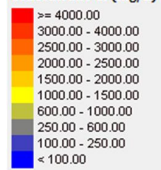
22-12-2011



10-02-2013

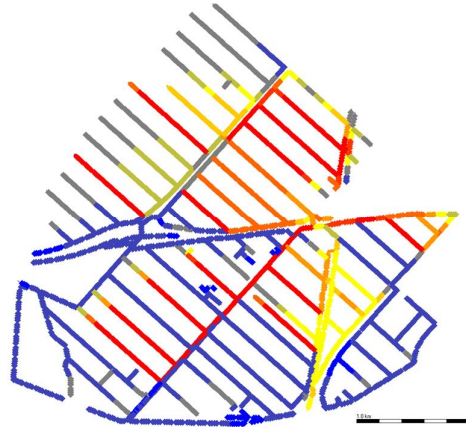
### Legenda

Concentratie Cl (mg/L)

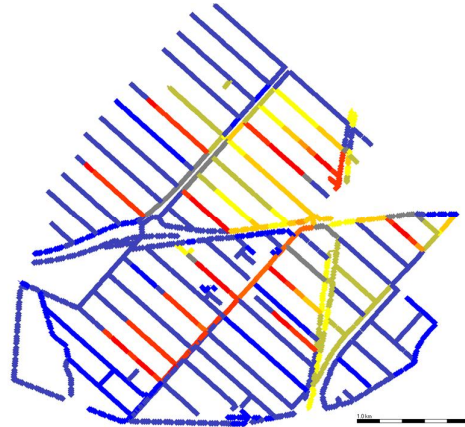




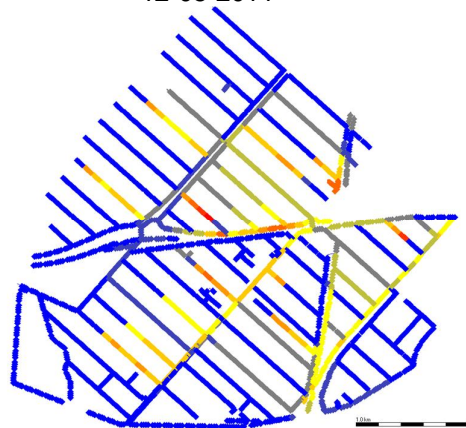
## Scenario 4



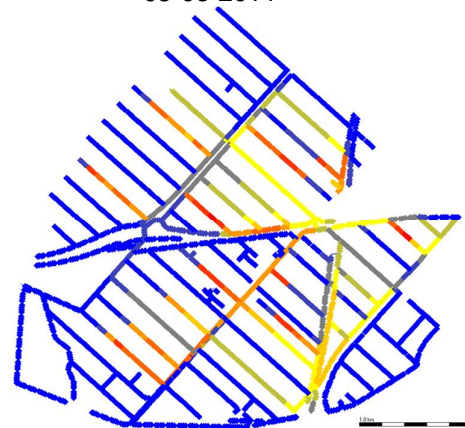
12-05-2011



08-08-2011



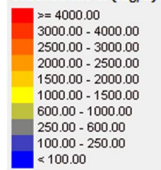
22-12-2011



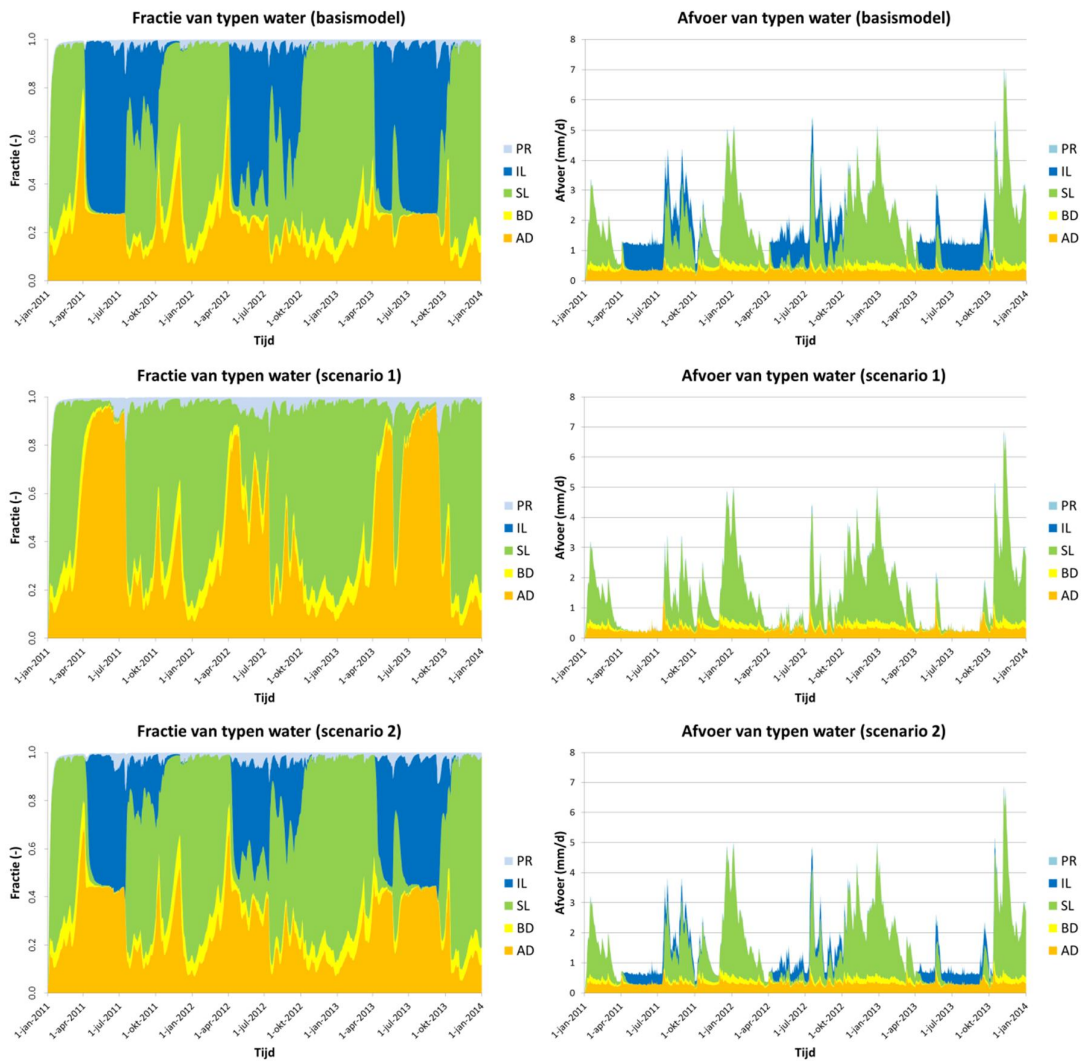
10-02-2013

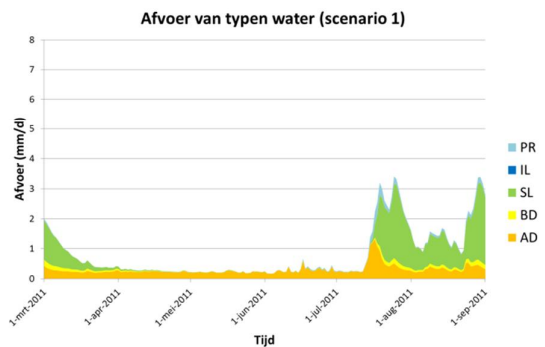
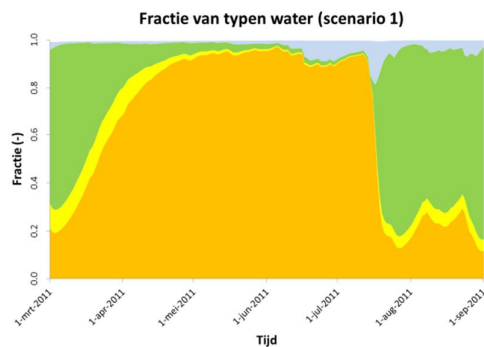
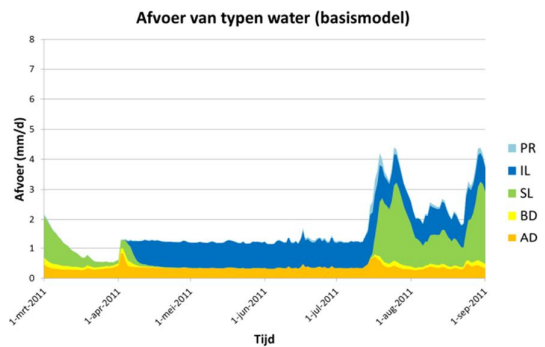
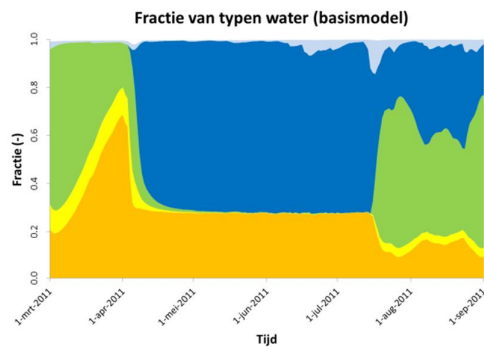
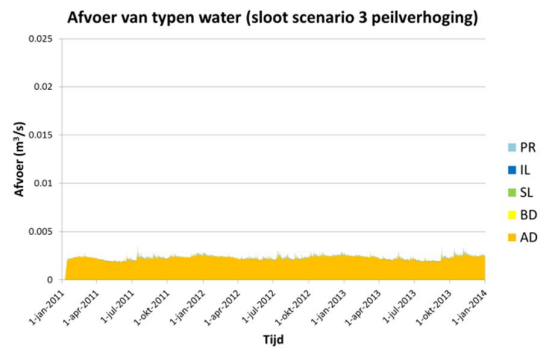
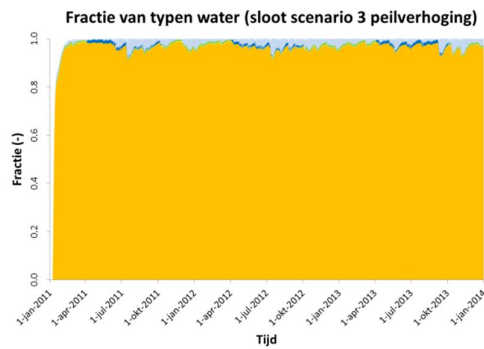
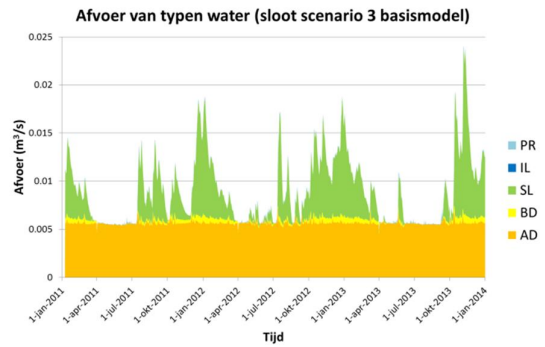
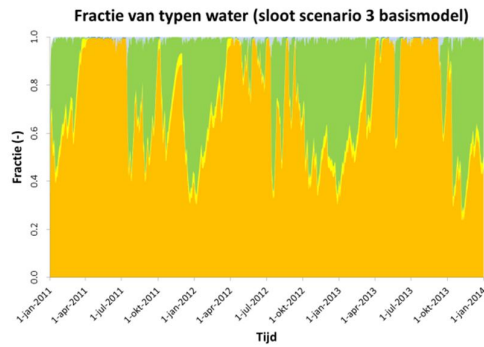
### Legenda

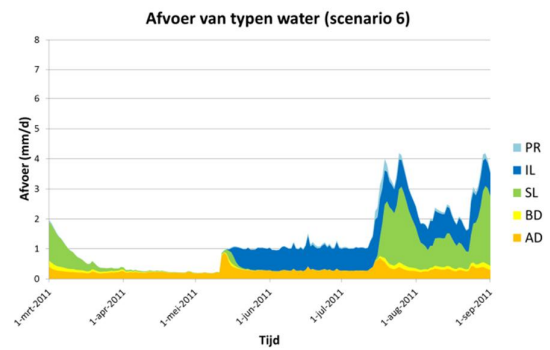
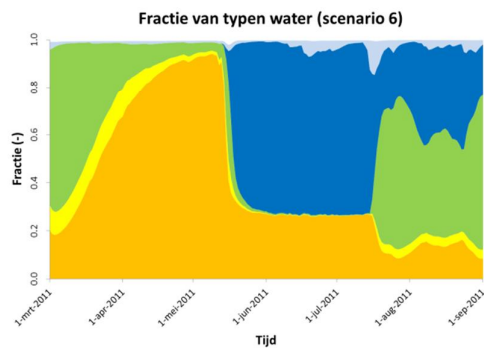
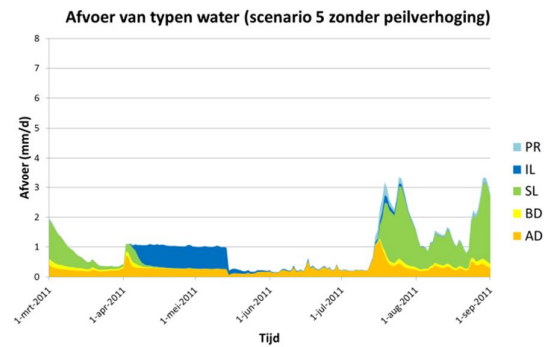
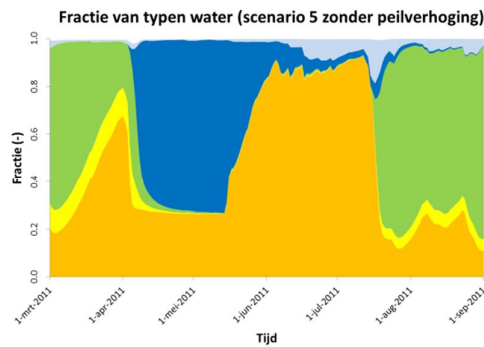
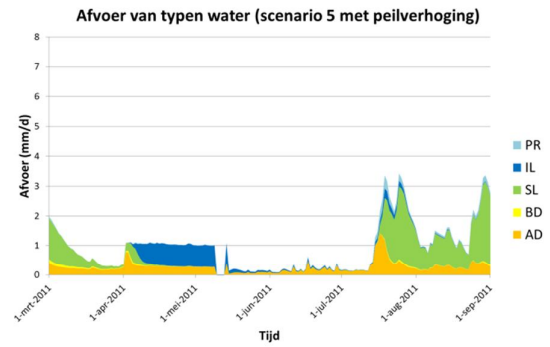
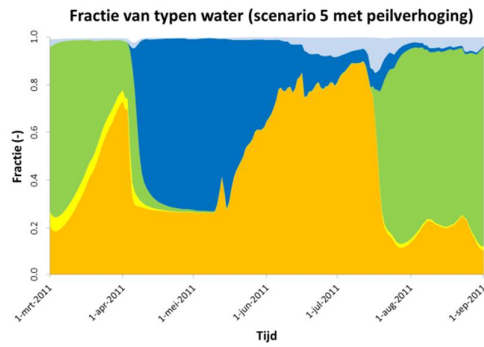
Concentratie Cl (mg/L)



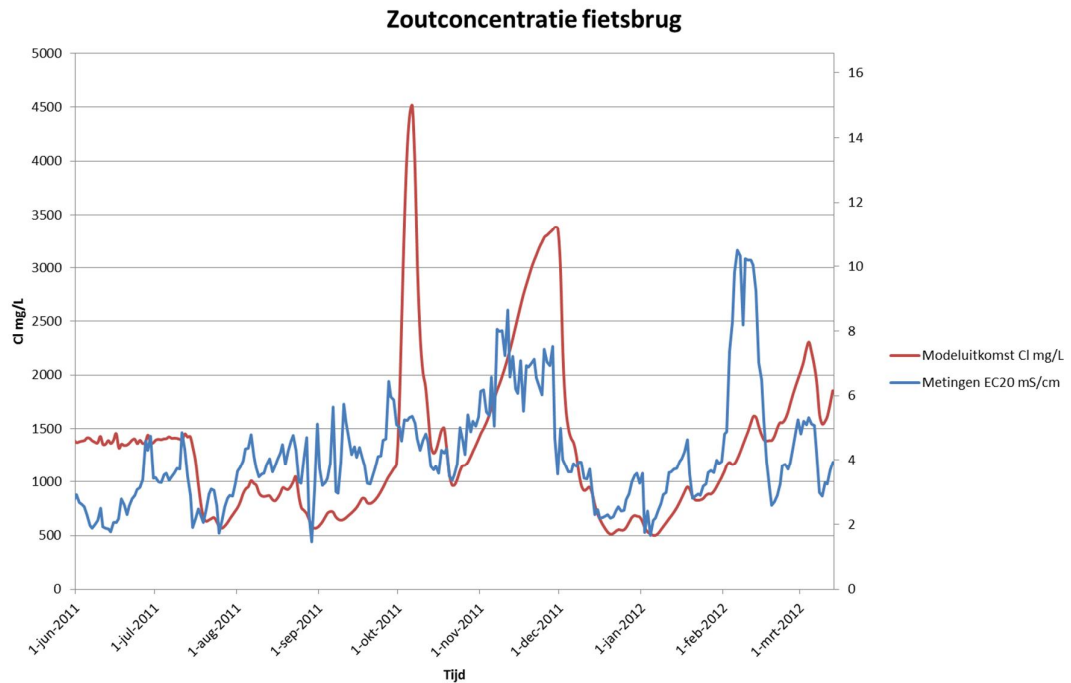
## E Fracties herkomst uitgemaal en water SOBEK basismodel en scenario's



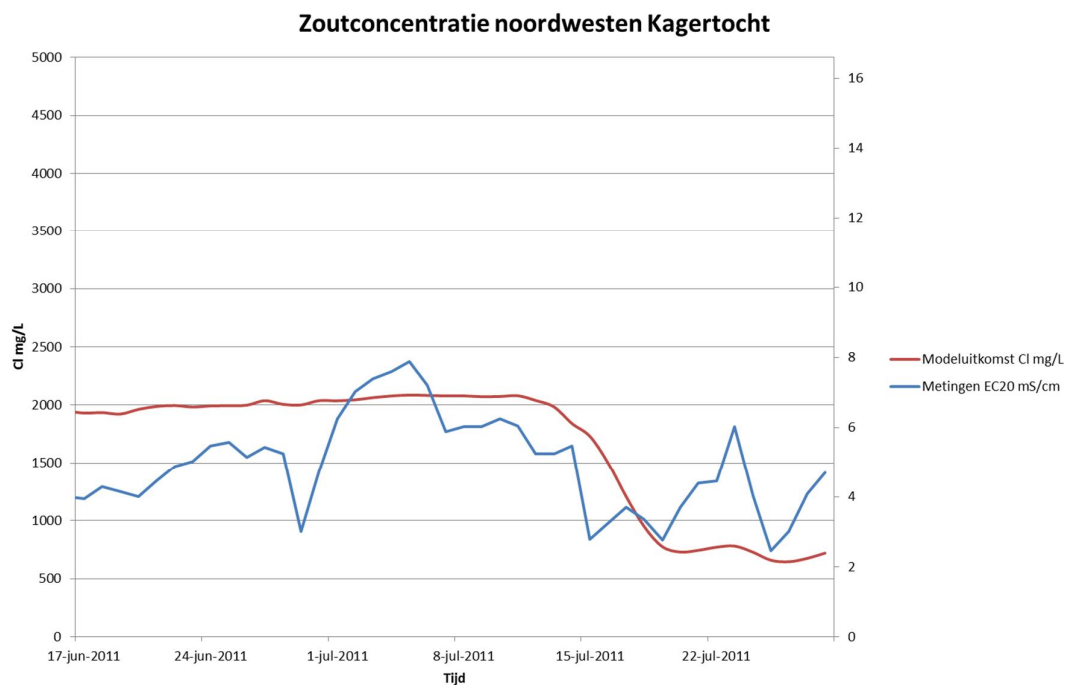




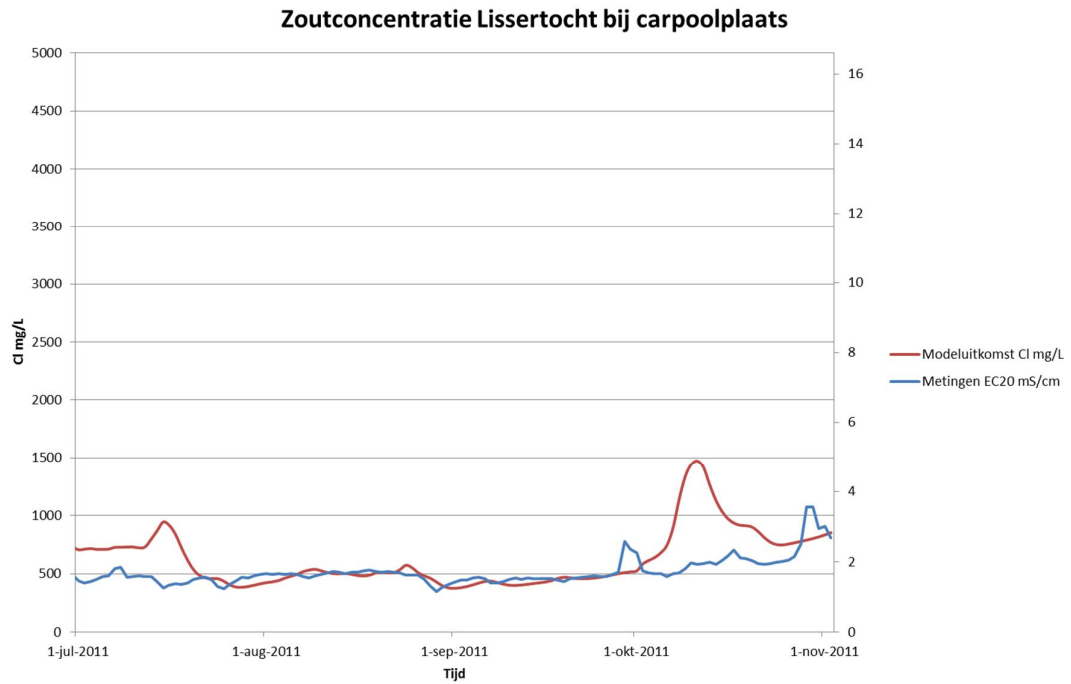
## F Zoutconcentratie SOBEK basismodel versus metingen



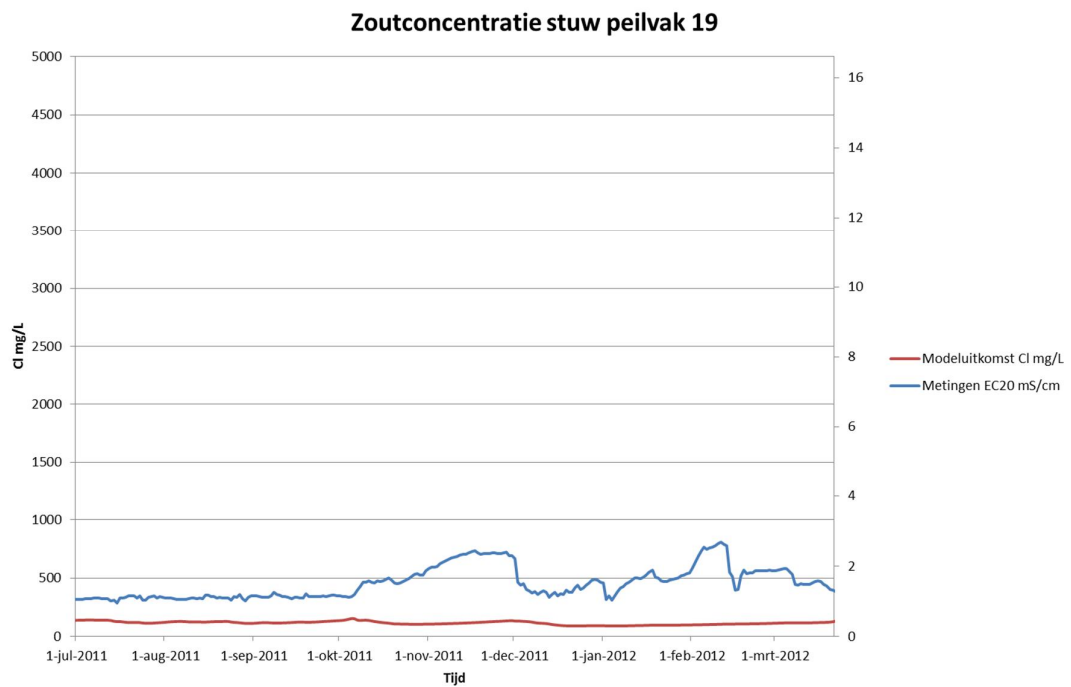
Figuur F.1: Tijdreeks met gemeten EC en gesimuleerde chlorideconcentratie bij fietsbrug



Figuur F.2: Tijdreeks met gemeten EC en gesimuleerde chlorideconcentratie bij noordwesten Kagertocht

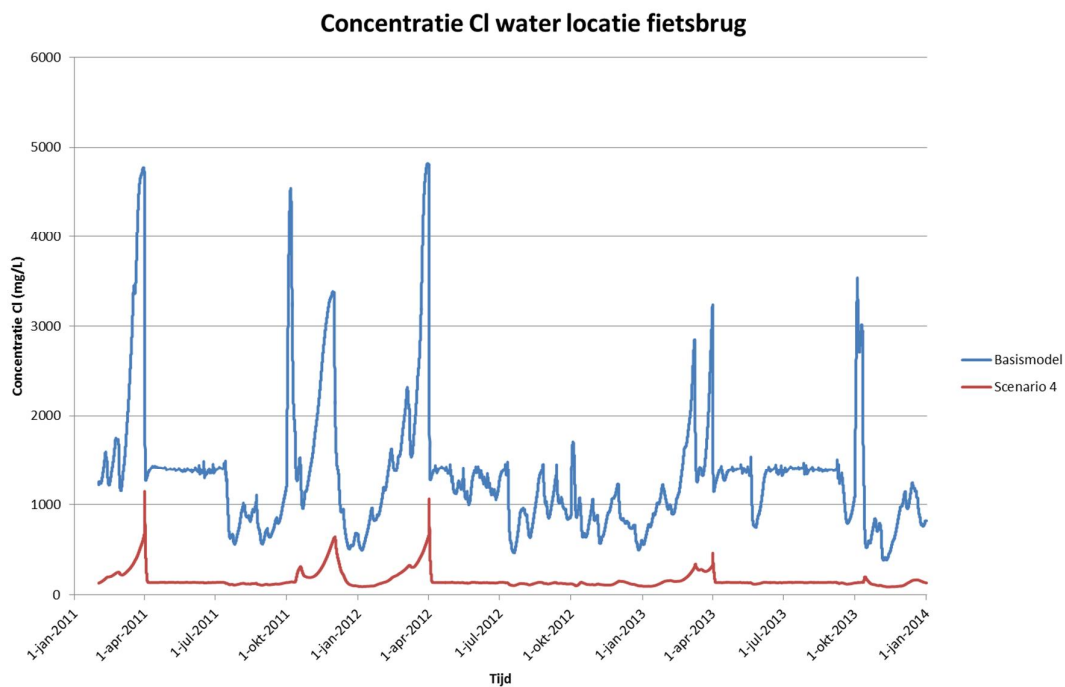


Figuur F.3: Tijdreeks met gemeten EC en gesimuleerde chlorideconcentratie bij Lissertocht carpoolplaats



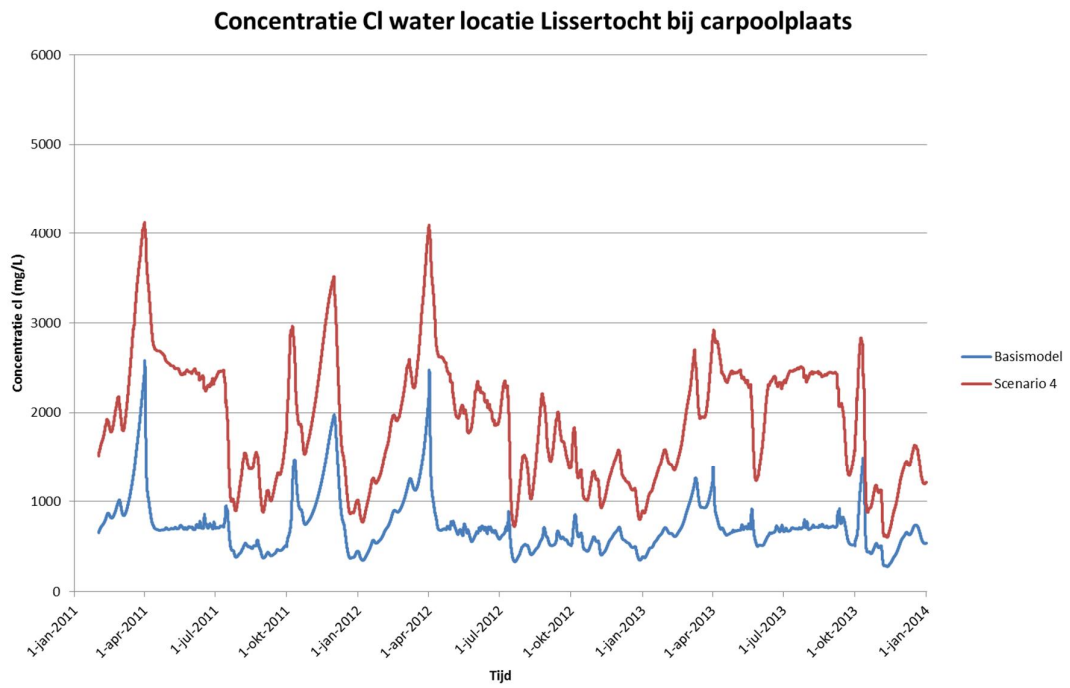
Figuur F.4: Tijdreeks met gemeten EC en gesimuleerde chlorideconcentratie bij stuw peilvak 19

## G Zoutconcentraties SOBEK basismodel en scenario 4



Figuur G.5: Chlorideconcentratie bij de fietsbrug, voor scenario 4 (met scheiding zoet- en zoutwater) en het basismodel





Figuur G.6: Chlorideconcentratie in de Lissertocht bij de carpoolplaats, voor scenario 4 (met scheiding zoet- en zoutwater) en het basismodel