

# Samenvatting

Kustregio's behoren tot de meest dichtstbevolkte en economisch belangrijkste regio's ter wereld. De beschikbaarheid van zoet water staat in kustregio's daarom vaak onder druk. Door een combinatie van toenemende bevolkingsdichtheid, economische groei, zeespiegelstijging, sterkere verdamping, overexploitatie en verzilting van aquifers, afnemende rivierafvoeren en een versnelde bodemdaling zal de beschikbaarheid van zoet water verder afnemen. In laaggelegen kustgebieden kan zout grondwater naar de oppervlakte stromen en het oppervlaktewater verzilten. Het oppervlaktewater wordt hierdoor ongeschikt voor agrarisch en industrieel gebruik en drinkwaterproductie, en zoet-water-afhankelijke ecosystemen worden bedreigd.

Verzilting van oppervlaktewater door zout grondwater komt veel voor in de Nederlandse kustregio. Het nemen van effectieve maatregelen wordt echter bemoeilijkt, doordat de hydrologische processen en fysisch-geografische factoren die de uitstroom van zout grondwater bepalen nog niet volledig bekend zijn. Dit proefschrift richt zich daarom op het identificeren van de processen en factoren die sturend zijn voor de dynamiek in ruimte en tijd van het uitspoelen van zout grondwater, en daarmee voor de dynamiek van het zoutgehalte van het oppervlaktewater.

Door de lange reistijden van water in de ondergrond wordt de zoet-zoutverdeling in het grondwater in de Nederlandse kustregio nog in belangrijke mate bepaald door de Holocene ontwikkeling van dit gebied. Een beter begrip van de invloed van de landschapontwikkeling gedurende de afgelopen millennia op de ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling is daarom belangrijk voor het beter begrijpen van de huidige zoet-zoutverdeling, en voor het beter simuleren van toekomstige veranderingen van de zoet-zoutverdeling in het grondwater. *Hoofdstuk 2* toont resultaten van simulaties van de Holocene ontwikkeling van de zoet-zoutverdeling in het grondwater met behulp van een paleo-hydrogeologisch model. Het model bereikte op geen moment in de 8500-jarige rekenperiode een evenwichtssituatie, en onderstreept daarmee het lange geheugen van kustnabije grondwatersystemen. Uit de resultaten bleek verder een grotere rol voor pre-Holoceen zout in de huidige zoet-zoutverdeling dan eerder was gedacht.

Het zoutgehalte in poldersloten is het resultaat van het mengen van via drainage en rechtstreeks naar de sloten uittredend grondwater met tijdens het groeiseizoen ingelaten rivierwater. *Hoofdstuk 3* beschrijft metingen tijdens het groeiseizoen van de verschillende afzonderlijke routes van water en zout in een veldopstelling, ingericht in een perceel in de Schermerpolder. Resultaten laten een sterke, niet-lineaire respons van drainafvoer op neerslag zien. Terwijl de zoutconcentraties van drainagewater beduidend lager zijn dan die van grondwater dat direct in de sloot uittreedt, wordt het merendeel van het zout getransporteerd via de drains. Slootwater tijdens drogere periodes bestond voornamelijk uit grondwaterstroming naar de sloot. De stroming van grondwater direct naar de sloot reageerde lineair op gevallen neerslag. De dynamiek in het zoutgehalte van via drains en sloot uittredend grondwater kon worden verklaard door enerzijds een snelle respons van het grondwaterstromingspatroon door drukvoortplanting, terwijl de zoet-zoutverdeling in de ondergrond juist vertraagd reageert op variaties in neerslag. De watervraag die nodig was om het zoutgehalte via doorspoeling in de hand te houden en het waterpeil op peil te houden, zodat beregening mogelijk was, bleek een veelvoud van de beregeningsvraag zelf.

Het uitsplitsen van de waterafvoer naar haar verschillende bronnen met behulp van de karakteristieke chemische samenstelling van elke bron, is moeilijk in landbouwgebieden die aan allerlei ingrepen onderhevig zijn. Dit is helemaal het geval wanneer een groot aantal verschillende bronnen bijdragen aan de afvoer van een gebied. *Hoofdstuk 4* beschrijft G-EMMA, een methode die, door onzekerheid beter in de berekening mee te nemen, uitsplitsing van afvoer in dergelijke gebieden mogelijk maakt. Met behulp van G-EMMA, toegepast in een peilvak in de Haarlemmermeerpolder, werd een geïntegreerd beeld verkregen van de – in de tijd variërende – verschillende hydrologische processen in het gebied. Zoet, ondiep grondwater bepaalde de afvoer tijdens afvoerpieken, terwijl zoute kwel zorgde voor een constante instroom van zout. In het groeiseizoen bestond de afvoer voor zo'n 50% uit ingelaten doorspoelwater.

Het gebruik van verschillende soorten meetgegevens wordt algemeen gezien als een goede methode om modelparameters te kalibreren. De waarde van additionele gegevens bij de kalibratie kan echter afnemen door fouten in de modelstructuur, en fouten in de meetgegevens. In *hoofdstuk 5* wordt de waarde onderzocht van verschillende typen metingen bij de kalibratie van een gedetailleerd, dichtheidsafhankelijk, grondwaterstromings- en transportmodel van het meetperceel van hoofdstuk 3. Resultaten gaven aan dat de meerwaarde van verschillende meetgegevens in een werkelijke situatie lager was dan in geïdealiseerde modelexperimenten. Een combinatie van verschillende meetgegevens was echter onontbeerlijk om de onzekerheid in zowel grondwaterstanden, afvoeren als gemodelleerde zoutconcentraties te beperken. Het gekalibreerde model toonde aan dat dynamiek in zoutconcentraties van afvoer naar drainage en sloot wordt veroorzaakt door de interactie tussen het snel reagerende grondwaterstromingspatroon en de maar langzaam variërende zoet-zoutverdeling in het grondwater. Daarnaast bleek het zoutgehalte van uitstromend grondwater naar de sloot langere tijd laag na afloop van een droge periode, omdat eerder geïnfiltreerd oppervlaktewater als eerste weer naar de sloot stroomde.

In *hoofdstuk 6* wordt een snel en eenvoudig model gepresenteerd om de dynamiek in zoutgehalte van uittredend grondwater te simuleren en zo operationeel zoetwaterbeheer te ondersteunen. Het Rapid Saline Groundwater Exfiltration Model (RSGEM) simuleert deze dynamiek als een resultante van een zich langzaam aanpassend scherp zoet-zoutgrensvlak en het snel op veranderingen van de grondwaterstand reagerende grondwaterstromingspatroon. Het model is toegepast op het Schermer meetperceel (hoofdstuk 3), en liet een goede overeenkomst zien met gemeten grondwaterstanden, afvoeren en zoutconcentraties. De resultaten waren bovendien erg vergelijkbaar met resultaten van het gedetailleerde model van hoofdstuk 5.

Dit proefschrift toont aan dat zoutconcentratie van grondwater dat uittreedt in Nederlandse polders, en daarmee de zoutconcentratie van het oppervlaktewater, grote variatie laat zien op verschillende tijd- en ruimteschalen. De zoutconcentratie van uittredend grondwater vertoont een sterke dynamiek, met name bepaald door de interactie tussen een zich snel aanpassend grondwaterstromingspatroon, en een langzamer variërende zoet-zoutverdeling in het grondwater. Sterke verschillen in het zoutgehalte van uittredend grondwater en de begrenzing van zoet inlaatwater tot specifieke sloten geeft een grote ruimtelijke variatie in optredende zoutconcentraties in het oppervlaktewater binnen een peilvak. Ruimtelijke variatie op grotere ruimtelijke schaal wordt in belangrijke mate bepaald door landschapontwikkelingen gedurende het Holoceen. Dit proefschrift toont verder aan dat doorspoelen niet overal even effectief is om verzilting tegen te gaan (*hoofdstuk 8*).