

SPAARWATER

Versterken zoetwaterlens: anti verziltingsdrainage

Technische rapportage 2016-2018

Achtergrondinformatie behorende bij hoofdrapport



JAN
2019

Financiers: Waddenfonds, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Wetterskip Fryslân, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Hunze en Aa's, Provincie Noord-Holland, Provincie Fryslân, Provincie Groningen, STOWA, LTO Noord fondsen, Achmea Agro, Rabobank.

Uitvoerende partijen: Penvoerder Acacia Institute i.s.m. Acacia Water, Delphy, Wageningen Universiteit (Wageningen Economic Research), Vrije Universiteit Amsterdam, Technische Universiteit Delft, SEO Economisch Onderzoek, Broere Berekening, Combi Drain, YARA, Netafim, Han de Kreuk, CaTeC, METER Group, Vermaire Breezand.

Betrokken landbouwbedrijven: Langeveld VOF - locatie Breezand, Teeuwen en Zonen B.V. - Locatie Breezand, Maatschap Noordam ten Have - locatie Borgsweer, Maatschap J.W. Oosterhuis - locatie Hornhuizen, Maatschap A. Hofstra - locatie Herbaijum.

Overige betrokken partijen: LTO Noord, KAVB (Koninklijke Algemene Vereniging voor Bloembollencultuur), Nederlandse Voedsel en Warenautoriteit (NVWA) en Pootgoedacademie.

Colofon

Documenttitel	. Spaarwater 2 - Versterken zoetwaterlens
Status	. Technische rapportage
Datum	. 17 januari 2019
Projectnummer	. 675
Projectteam	. S. Burger, A. Oord, B. de la Loma Gonzalez, M. Waterloo, A. van der Heijden, J. Velstra, J. Landheer

Disclaimer

Rapport: Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via info@acaciainstitute.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Context	1
1.3	Doelen.....	2
1.4	Pilots en werking systeem.....	2
1.4.1	Herbaijum.....	3
1.4.2	Hornhuizen.....	4
2	Achtergrond zoetwaterlenzen en antiverziltingsdrainage oplossingen	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Zoutgehalte ondiep grondwater in relatie tot zoetwaterlenzen	5
2.3	Zoutgehalte van bodemvocht	8
2.4	Zoutgehalte van afvoer van drains en greppels	8
2.5	Zoetwaterlenzen staan onder druk.....	9
2.6	Principe van antiverziltingsdrainage	10
2.7	Typen antiverziltingsdrainage.....	11
3	Begrip van de huidige situatie van zoetwaterlenzen	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Aanpak.....	13
3.3	Resultaten.....	16
3.3.1	Invloed watergangen, drainage en -afstanden op grootte van zoetwaterlenzen	16
3.3.2	Invloed perceel eigenschappen op dikte van zoetwaterlens in homogene profielen..	18
3.3.3	Zoetwaterlenzen bij drainage in niet homogene bodems.....	21
3.3.4	Verdiepte aanleg met verlaagd ontwateringsniveau (type D)	23
3.3.5	Inzichten vertalen naar risico-indicatie voor verzilting op perceelschaal in waddenregio	24
3.4	Conclusie	26
4	Hoe verandert het verziltingsrisico in de toekomst?.....	28
4.1	Inleiding	28
4.2	Aanpak.....	28
4.3	Resultaten.....	29
4.3.1	Zeespiegelstijging en bodemdaling	29
4.3.2	Klimaatverandering	31
4.3.3	Invloed van droge zomers op zoetwaterlenzen	32
4.4	Conclusies.....	34

5	Pilot vergroten zoetwaterlens	35
5.1	Inleiding	35
5.2	Aanpak.....	35
5.2.1	Pilotpercelen.....	35
5.2.2	Gebiedsdekkende kaarten.....	37
5.3	Analyseresultaten.....	39
5.3.1	Herbaijum.....	39
5.3.2	Hornhuizen.....	46
5.3.3	Vlakdekkend beeld van effecten antiverziltingsdrainage op zoetwaterlens	49
5.4	Conclusies.....	50
6	Nutriënten.....	52
6.1	Inleiding	52
6.2	Aanpak.....	52
6.3	Resultaten.....	53
6.3.1	Herbaijum.....	53
6.3.2	Hornhuizen.....	57
6.4	Conclusies en vergelijking	60
7	Ontwerp systeem en optimalisatie	62
7.1	Inleiding	62
7.2	Aanpak.....	62
7.3	Resultaten.....	62
7.3.1	Inleiding beslisdiagram antiverziltingsdrainage	62
7.3.2	Kansenkaart antiverziltingsdrainage	63
7.3.3	Beslisdiagram antiverziltingsdrainage	64
7.3.4	Implementatie	66
7.3.5	Aanlegkosten en onderhoud	67
7.3.6	Operationeel beheer: ingesteld niveau en duur van verhoging	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
7.4	Conclusies.....	69
8	Samenvatting	70
9	Literatuur.....	72

Bijlagen

1. CVES uitleg
2. CVES-metingen Herbaijum
3. CVES-metingen Hornhuizen
4. Gebruik verziltingsrisico kaart
5. Verziltingsrisicokaart huidig
6. Verziltingsrisicokaart toekomst
7. Modelberekeningen SV-Flux

1 Inleiding

1.1 Algemeen

In 2013 startte het project Spaarwater, dat zich richtte op het ontwikkelen en beproeven van maatregelen (Spaarwatermaatregelen) voor het bestrijden van verzilting en het zekerstellen van voldoende zoet water. Onderzoek naar de economische haalbaarheid en regionale opschaling van de maatregelen maakten integraal deel uit van het project.

Op een viertal locaties zijn de maatregelen ontwikkeld en getest. Daarnaast is voor de gehele Waddenregio in beeld gebracht waar de maatregelen kansrijk zijn. Ook zijn de waterhuishoudkundige en economische effecten bij toepassing op regionale schaal onderzocht en gekwantificeerd voor drie poldergebieden; in elk van de noordelijke provincies één. De Spaarwatermaatregelen omvatten anti-verziltingsdrainage, eigen watervoorziening en zuinig met zoet water.

- *Anti-verziltingsdrainage* beoogt verzilting te bestrijden, terwijl de ontwatering van het perceel gehandhaafd blijft en de zoutbelasting van het perceel naar de sloot niet toeneemt.
- *Eigen watervoorziening* heeft als doel de zoetwaterbeschikbaarheid voor de agrariër te vergroten door zoet drainagewater uit het perceel op te vangen, op te slaan in de diepe ondergrond en beschikbaar te maken voor gebruik gedurende het groeiseizoen.
- *Zuinig met zoet water* richt zich op het beperken van het waterverbruik door gebruik van twee typen zuinige irrigatietechnieken: sub-irrigatie (het toedienen van water via bestaande drainage) en twee typen druppelirrigatie (druppelleidingen – jaarlijks aangelegd aan het oppervlak óf aangelegd onder de bouwvoor en daarmee semipermanent).

De gezamenlijke resultaten van het gehele project zijn samengevat in het hoofdrapport Spaarwater. Daarnaast is van de resultaten van het onderzoek naar elk van de individuele Spaarwatermaatregelen een technische rapportage opgesteld. Voorliggend rapport geeft een overzicht van de resultaten van het onderzoek naar de toepassing van anti-verziltingsdrainage.

1.2 Context

Landbouw is de economische motor van het Waddenzeegebied. De bodem in het gebied is zeer geschikt voor de vollegrondsteelt en de telers staan, nationaal en internationaal, bekend om de hoge kwaliteit van de producten die zij leveren. Om deze kwaliteit te handhaven -en zelfs verder te verbeteren - is een combinatie van goede ontwatering en beschikbaarheid van zoet water essentieel.

In het gebied langs de Waddenzee is de zoet-zout overgang in het grondwater ondiep aanwezig. Landbouw is mogelijk dankzij dunne zoete regenwaterlenzen die 'drijven' op zout grondwater (hierna te noemen zoetwaterlens). Uit verschillende studies (e.g. Van Staveren, G. en Velstra, J. 2011) blijkt dat er een risico bestaat dat deze zoete zoetwaterlens in een aanzienlijk deel van het landbouwgebied verdwijnt. Hierdoor komt brak water door capillaire opstijging in de wortelzone, met gewasschade tot gevolg. Tevens neemt de zoutbelasting vanuit de ondergrond naar de sloot toe.

Om te verzekeren dat water voldoende zoet blijft voor irrigatie van gewassen en veedrenking, zal extra doorspoeling van het oppervlaktewatersysteem of aanvoer van water elders moeten plaatsvinden. Dit terwijl verwacht wordt dat de afvoer van rivieren naar het IJsselmeer afneemt. Voor het klimaatbestendig maken en versterken van de economisch belangrijke landbouwsector in de regio is zekerstelling van de zoetwaterbeschikbaarheid van groot belang. Dit kan door peilfluctuaties in het IJsselmeer toe te staan (Deltaprogramma IJsselmeergebied, 2014), maar nadrukkelijk ook zoeken naar oplossingen en innovaties in de regio te zoeken. In Spaarwater zijn maatregelen ontwikkeld die bij uitstek geschikt zijn als uitwerking van het Deltaprogramma Zoetwater. Met de maatregelen wordt de landbouwsector meer zelfvoorzienend en onafhankelijker van de zoetwaterbeschikbaarheid uit het IJsselmeer.

Vanuit de Kaderrichtlijn Water (KRW) is het streven te komen tot een 'goede status' van het oppervlaktewater. Dit betekent dat de KRW onder andere als doel heeft af- en uitspoeling van nutriënten, voornamelijk nitraat, fosfaat en bestrijdingsmiddelen van perceel naar het oppervlaktewater te verminderen. Voor brakke milieus betekent dit onder andere een beperking van de fluctuaties van zoutgehaltes. De in Spaarwater ontwikkelde maatregelen beogen bij te dragen aan de KRW-doelen door reductie en vastlegging van nutriënten in de bodem en het verminderen van de nutriëntenuitstroom uit percelen. Daarnaast wordt de vraag naar permanente externe watertoevoer verkleint waardoor een natuurlijker waterbeheer mogelijk is en de fluctuaties van zoutgehaltes wordt beperkt: minder zoet- en zoutschokken.

1.3 Doelen

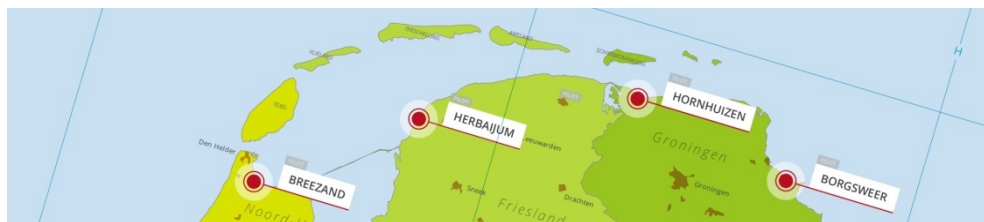
Het doel van Spaarwater is het klimaatbestendig maken en versterken van de economisch belangrijke landbouwsector door zekerstelling van de zoetwaterbeschikbaarheid en bestrijden van verzilting, waarbij rekening wordt gehouden met extremen zoals wateroverlast. Daarnaast zijn de volgende subdoelen gedefinieerd:

- versterken bedrijfsbasis voor landbouw: minder afhankelijk, meer zelfvoorzienend en daarmee verminderde aanvoer van extern water.
- bijdragen aan de KRW doelen, waaronder het verlagen van de emissie van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen (GBM), en het beperken van fluctuaties in het zoutgehalte in het oppervlaktewater.

Het doel van het deelproject 'versterken zoetwaterlens' is door anti-verziltingsdrainage toe te passen verzilting te bestrijden, de ontwikkeling van de zoetwaterlenzen te bevorderen, bestaande lenzen te versterken of nieuwe lenzen te vormen. Daarnaast wordt beoogd de zout- en nutriëntenbelasting naar het oppervlaktewater te reduceren.

1.4 Pilots en werking systeem

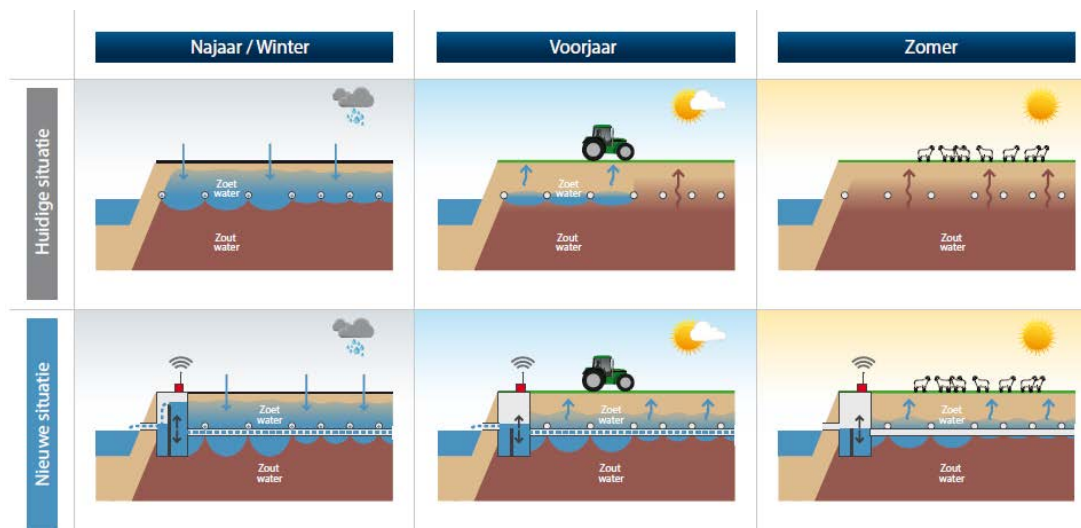
Op twee percelen is anti-verziltingsdrainage toegepast: in Herbaijum (Friesland) en Hornhuizen (Groningen).



Figuur 1. Ligging van de proeflocaties voor het onderzoek naar anti-verziltingsdrainage.

Op beide percelen zijn de drains aangesloten op een verzamelleiding die uitkomt in een regelput waarmee het uitstroomniveau en daarmee het peil (het ontwateringsniveau) kan worden geregeld.

Zo kan het grondwaterpeil in het perceel (indien er neerslag valt) hoog worden gehouden dan wel worden verlaagd. Indien gewenst kan de agrariër op afstand het niveau aanpassen. Beide percelen zijn ingericht met een referentievak, waar geen maatregel is toegepast en een proefvak, waar periodieke verhoging van het ontwateringsniveau is gehanteerd (Figuur 2).



Figuur 2. Schematische weergave van de originele situatie (boven) en de situatie met anti-verziltingsdrainage (onder) in Herbaijum. In de figuur is zichtbaar dat in Herbaijum in principe twee proeven worden uitgevoerd: bij drainagebuizen met een korte drainafstand en een kleine zoetwaterlens (rechtterkant van het getekende perceel) en met een grotere drainaafstand en een grotere zoetwaterlens (linkerkant van het getekende perceel). De proef met korte drainafstand is uiteindelijk aangepast.

Op de pilotlocaties is anti-verziltingsdrainage toegepast, waarbij in het pilotperceel Herbaijum een instelbaar ontwateringsniveau is gerealiseerd in bestaande drainage en in het pilotperceel Hornhuizen nieuwe drainage verdiept is aangelegd ten opzichte van het reguliere aanlegniveau. Het ontwateringsniveau is ook op deze locatie instelbaar.

1.4.1 Herbaijum

Het perceel te Herbaijum betreft een grasperceel op klei. Het perceel is opgedeeld in 4 delen, een proef en referentie met een grote drainafstand (11 m) en op het smalle deel van het perceel een proef en referentie met een kleine drainafstand (8 m), zie Figuur 3. Op het deel met de grote drainafstand (aangeduid als vak 1 en 3 in Figuur 3) zijn de bestaande drains aangesloten op een verzamelleiding die uitkomt in de regelput. De drainage is aangelegd op een diepte van circa 1,2 m onder maaiveld.

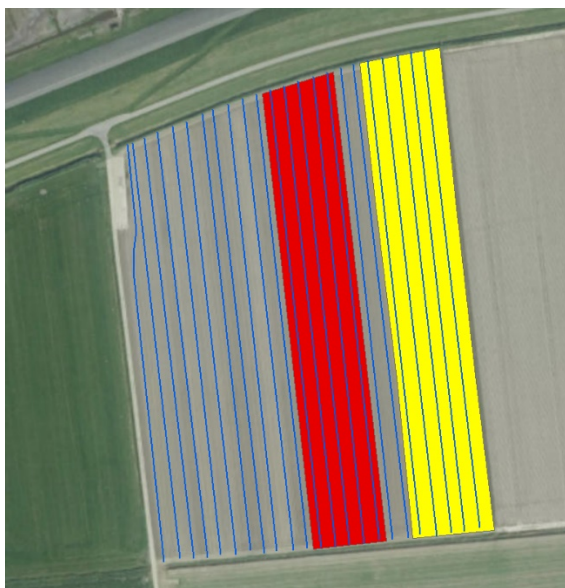
Het ontwateringsniveau ter plaatse van Herbaijum kan gevarieerd worden van 0 m tot 0,6 m hoger dan het referentieniveau. In het smalle deel van perceel (aangeduid als vak 2 en 4 in Figuur 3) is nieuwe drainage aangelegd naast de oude drainage, omdat de hier aanwezige drainage nagenoeg niet meer functioneerde. De drainaafstand van de oude en de nieuwe drainage leidingen is gelijk gebleven. Op dit deel van het perceel is geen verhoogd ontwateringsniveau gehanteerd, omdat onderzocht is wat voor invloed de nieuwe goed functionerende en opgeschoven drainage heeft op de zoetwaterhuishouding en op de verzilting.



Figuur 3. Ligging van de verschillende onderdelen op het perceel in Herbaijum: 1/rood: Referentie breed; 3/geel proef breed; 2/oranje: proef smal; 4/groen: referentie smal

1.4.2 Hornhuizen

Het akkerbouwperceel te Hornhuizen heeft een bodem van zand op klei, waarbij de bodem van maaiveld tot aan het aanlegniveau van de drainage zandig is. Daaronder betreft het een afwisseling van zand en klei. Een belangrijk verschil met het perceel te Herbaijum is dat op dit perceel voor een deel (5 strengen) nieuwe drainage verdiept is aangelegd; de drainage is verlaagd van circa 1,2 m onder maaiveld naar ca. 1,6 m onder maaiveld, met een uitstroomniveau van de drainage wat gelijk of hoger is ten opzichte van het referentievak. Hiermee wordt beoogd dat de zoetwaterlens dikker kan worden dan bij ondieper gelegen oude drainage, doordat de nieuwe drainage *onder* de zoetwaterlens ligt. De verdiepte drainage is vergeleken met de normale situatie (eveneens 5 strengen). Het ontwateringsniveau in het proefvak kan gevarieerd worden van 0 m tot 0,4 m hoger dan het referentieniveau.



Figuur 4. Ligging van het proefvak (geel) en referentievak (rood) op het perceel in Hornhuizen

2

Achtergrond zoetwaterlenzen en antiverziltingsdrainage oplossingen

2.1 Inleiding

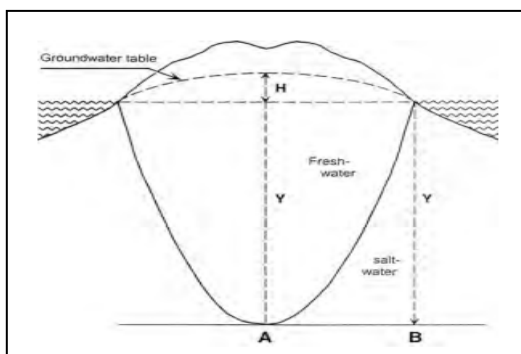
Dat ondanks de zoute kwel in de Waddenregio landbouw mogelijk is, is het gevolg van het neerslagoverschot dat het zout, dat zich in de droge perioden in de bodem ophoopt, in de natte perioden weer uitspoelt. Hierdoor neemt het zoutgehalte in de sloten in de loop van de zomer toe. Dit zout wordt uiteindelijk met het overtollige regenwater en eventuele doorspoeling naar de boezem en naar zee afgevoerd.

Het klassieke beeld is dat het bodemvocht gedurende de zomer in toenemende mate zouter wordt en in de winter door verdunning weer verzoet. Meer recent is ontdekt (o.a. Staveren, G. en Velstra, J. 2011) dat in plaats van een min of meer homogeen systeem van een met de seizoenen wisselende zoutconcentratie, er een situatie heerst waarbij het geïnfiltreerde regenwater als een zoetwaterlens op het zoutere water drijft. Deze lens vertoont een aan de seizoenen gerelateerd gedrag van uitdijning en krimp. De vorm en de dynamiek van een neerslaglens wordt bepaald door de drainerende werking van greppels en drainage en in veel mindere mate door watergangen.

2.2 Zoutgehalte ondiep grondwater in relatie tot zoetwaterlenzen

De zoetwaterlens in een perceel is, afhankelijk van de lokale situatie, meestal 0 tot 4 m dik (Staveren, G. en Velstra, J. 2011). Echter direct onder de drainagemiddelen is die meestal dunner of afwezig als gevolg van opkegeling van zout water onder de drains. Als de grondwaterstanden hoog genoeg zijn en ondiep grondwater zijdelings gaat afstromen naar de buisdrains en greppels, komt ook brak grondwater vanuit de diepere lagen omhoog onder de drainagemiddelen.

Midden tussen de drainagemiddelen is de dikte van de lens dus het grootst, hoewel die kleiner is dan verwacht zou worden volgens het Badon Ghyben-Herzberg principe (Herzberg, A. (1901) en Drabbe J, Badon Ghijben W. (1889), Figuur 5) van licht zoet water drijvend op zwaarder brak water (De Vries, 1982).



Figuur 5. Principe van een zoetwaterlens volgens Badon Ghyben-Herzberg. Wanneer de grondwaterstand (H) 10cm ligt boven het drainageniveau dan zou de dikte van de zoetwaterbel (Y) ongeveer 4m dik moeten zijn.

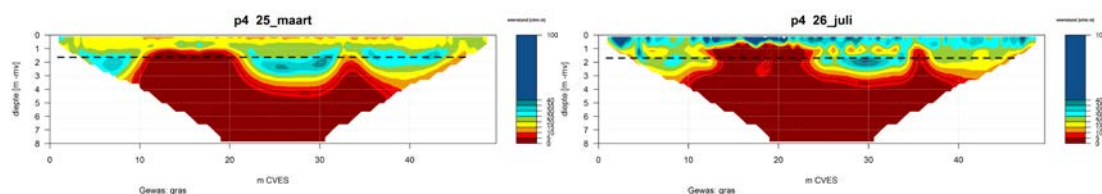
De relatief kleine systemen van zoetwaterlenzen in deltagebieden en landbouw percelen zijn bestudeerd door Van Immerzeel (1996), Poot en Schot (2000), Schot et al. (2004), De Louw et al. (2013), Eeman et al. (2012), Eeman et al., (2011), Pauw, (2015), Delsman (2015), Eeman, (2017), Stofberg (2017). Deze studies richten zich vooral op de theoretische simulaties en sommigen nemen de rol van drainagesystemen niet mee. Numerieke modelruns van Eeman et al. (2011, 2012) lieten zien dat de analytische oplossing van e.g. Maas (2007) de gemiddelde dikte van de mengzone redelijk beschrijft in gebieden waar de kwelintensiteit hoog is.

De veldkarakteristieken zoals kwelintensiteit, afstand en diepteligging tussen drainagemiddelen en bodemopbouw blijken van grote invloed op de dikte van de zoetwaterlens (zie ook hoofdstuk 3 van dit rapport). Door o.a. de opwaartse beweging van de zoute kwel wordt de indringing van het zoete regenwater in de percelen beperkt, en is de dikte van de lens minder dan bij de Badon Ghyben-Herzberg lens (De Louw et al., 2011). Hoe groter de opwaartse kwel, hoe dunner de zoetwaterlens (Pauw, 2015). De drainageafstand is een andere factor die de dikte van de zoetwaterlens sterk beïnvloed (De Louw et al., 2011; Velstra et al., 2011). Tevens speelt gelaagdheid in de ondergrond een grote rol in de opbouw van de zoetwaterlens. In het algemeen zal een slecht doorlatende laag verhinderen dat regenwater dieper infiltreert, zelfs als dat te verwachten is op basis van de neerslag-kwel ratio en de dichtheidsverschillen (Staveren, G. en Velstra, J. 2011, Eeman, 2017).

De vorm en dikte van de zoetwaterlens is dynamisch over het jaar (Schot et al., 2004, Staveren, G. en Velstra, J. 2011). Deze dynamiek maakt dat het systeem in een perceel nooit de evenwichtssituatie bereikt. In de winterperiode met neerslagoverschot wordt de stroming in de lenzen geactiveerd en het brakke grondwater uitgespoeld. Tijdens het voorjaar en de zomer dalen de grondwaterstanden tot onder de drainagebasis. In die periode stagneert de grondwaterstroming en zorgt capillaire opstijging voor daling van het grondwater. De lenzen krimpen verder door capillaire opstijging van zoetwater naar de wortelzone en gewasverdamping. De brakke kegels onder de drainagemiddelen kunnen een grotere invloed krijgen, naarmate de grondwaterstand verder uitzakt onder de drains. De mate van groei en krimp van de zoetwaterlenzen verschilt van jaar tot jaar. Hoe droger en warmer de zomer is, hoe sterker de lens krimpt. Een droge winter of een lange periode met vorst, zoals in 2010, leidt tot minder aanvulling en kleinere zoetwaterlenzen.

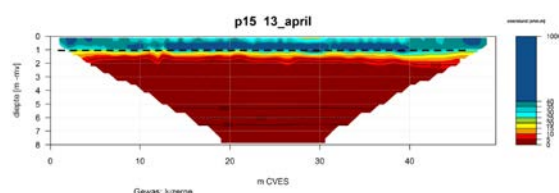
Kleine drainageafstanden en relatief hoge doorlatenheden leiden tot kleinere opbolling tussen de drains en zeer dunne lenzen van enkele decimeters rond het niveau van de buisdrains. In percelen met een slechtere doorlatendheid (meer klei) kunnen zich lenzen ontwikkelen tot circa 4 m dikte (Staveren, G. en Velstra, J. 2011). Op basis van bodemopbouw en kweldruk onderscheiden we drie typen zoetwaterlenzen (zie ook Figuur 9).

Type 1 - bolle lens: De bolle lens heeft in de periode met een structureel neerslagoverschot, aan de boven- en onderkant een bolle vorm. Deze vorm ontstaat bij een homogene bodemopbouw tussen de drains. De dikte van de lens neemt toe bij grotere drainageafstanden, lagere doorlatendheid en een lagere kweldruk.



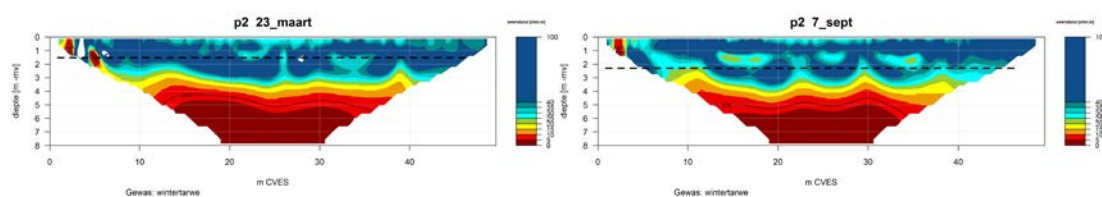
Figuur 6. Voorbeeld van gemeten neerslaglens type 1 gemeten in Herbajum

Type 2 - platte lens: De werking van de platte lens is te vergelijken met de bolle lens. Door de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag onder het drainageniveau, krijgt de lens echter geen bolle vorm aan de onderkant. De slecht doorlatende laag zorgt voor de platte(re) onderkant. Een platte lens komt vooral voor bij zand op klei of bij gerijpte op ongerijpte klei. Daarnaast kan een plattere lens ook voorkomen bij een hoge kweldruk, die de vorm van de lens platter maakt. Bij de platte lens is er in praktijk slechts een dun laagje zoet water aanwezig.



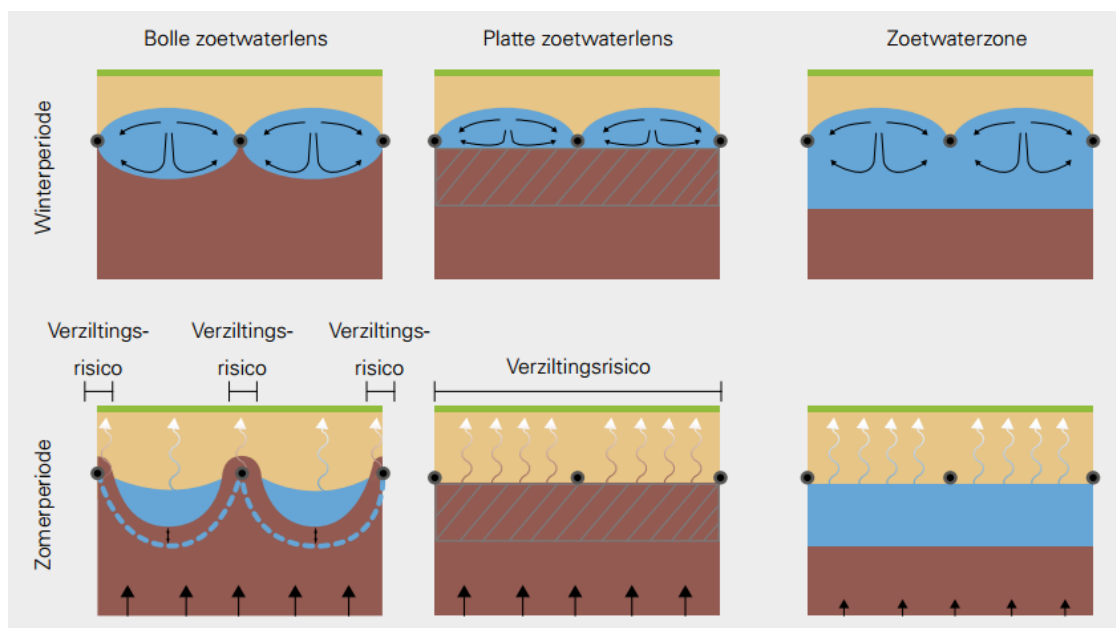
Figuur 7. Voorbeeld van gemeten neerslaglens type 2 gemeten in Woldendorp

Type 3 – zoetwaterzone: Waar de kweldruk beperkt of afwezig is, kan het zoete water tot onder de drainage doordringen. Als de zoet-zoutgrens in het grondwater diep genoeg ligt, wordt het zoute water niet tot de drains aangetrokken. Zo is het mogelijk dat er een brede zoetwaterlaag blijft bestaan die we de 'zoetwaterzone' noemen.



Figuur 8. Voorbeeld van gemeten neerslaglens type 3 gemeten in Den Andel

Onderzoek van Acacia Water heeft aangetoond dat ook een hogere kweldruk leidt tot een aanzienlijk afname van de zoete lenzen (Tolk, L. en Velstra, J. 2016).



Figuur 9. Type neerslaglenzen zoals deze worden aangetroffen in Nederland.

2.3 Zoutgehalte van bodemvocht

Tijdens perioden van neerslagtekort en sterke gewasverdamping in voorjaar en zomer kan water door de capillaire werking vanaf de grondwaterspiegel tot in de wortelzone optrekken. Tussen de drainagemiddelen stijgt dan vanaf de lenzen zoet water op. Echter ter plaatste van de drains en greppels bevindt zich mogelijk water met hoge zoutgehaltes dichtbij de grondwaterspiegel. Dit zout zal dan ook tot in de wortelzone kunnen optrekken. Percelen met zeer dunne lenzen zijn bijzonder gevoelig voor deze doorslag van zout naar de wortelzone, omdat daar de lenzen in hun geheel kunnen verdwijnen tijdens droge perioden.

Opstijgen van zout in de onverzadigde zone kan effect hebben op de gewasgroei en leiden tot zoutschade.

2.4 Zoutgehalte van afvoer van drains en greppels

In het verloop van het zoutgehalte van afvoer uit greppels en buisdrainage is de werking van de hierboven beschreven zoetwaterlenzen te herkennen. Hoe groter en hoe zouter de kwelflux is (wat resulteert in een kleinere lens), hoe hoger het zoutgehalte in het afgevoerde water is; omdat de kwelflux gedurende het jaar echter kan fluctueren (zie hoofdstuk 2.6), fluctueert daardoor ook het zoutgehalte van de drainage.

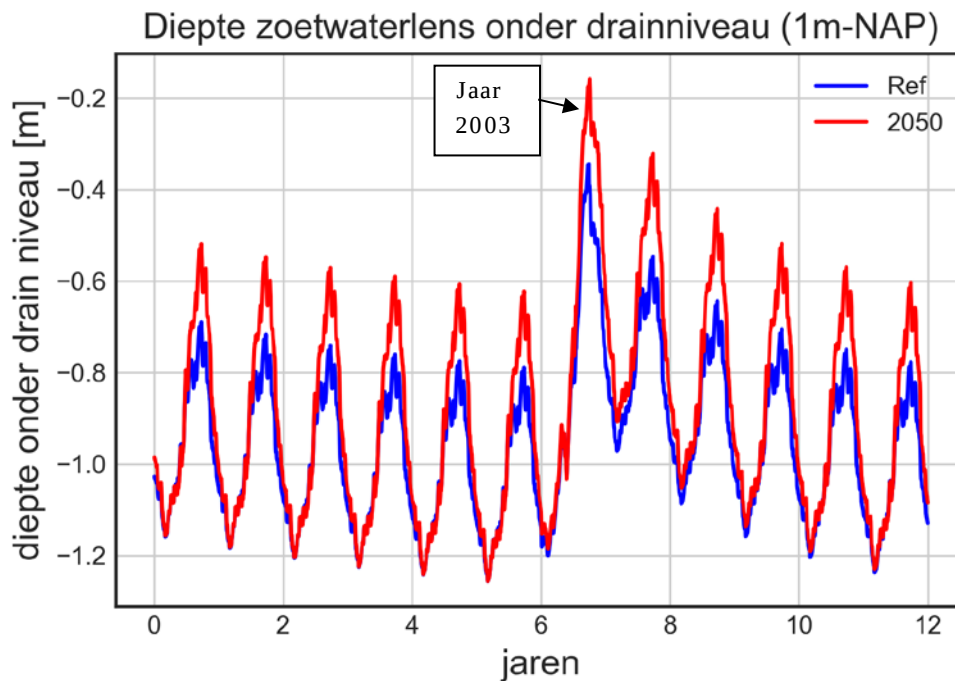
Hoe lager de doorlatendheid van de bodem, hoe trager en afgevlakter een zoete neerslagpiek tot afvoer komt. Als de lens klein is, de sterke opkegeling van brak grondwater tot de drainagemiddelen reikt, en de kwel ter hoogte van de drainage niet wordt weggedrukt, draagt deze zoute kwel continu bij aan de drainageafvoer. Wanneer nu de neerslagpiek traag en afgevlakt tot afvoer komt, wordt dit zoete water steeds bijgemengd met zout kwelwater, waardoor het drainagewater minder sterk verzoet en het drainagewater verhoogde zoutgehaltes houdt.

Daarnaast is het zo dat gedurende een zomer, als de grondwaterstanden dalen, zich zout in de bodem kan ophopen: planten nemen het bodemvocht op, waarbij resterende zouten in de bodem kunnen achterblijven. In beter doorlatende bodems met weinig kwel, worden deze zouten na de zomer afgevoerd, waardoor de afvoer uit drainage nog enige tijd zout of brak kan blijven, voordat gedurende de winter de zoete regen de dominantere factor in de drainage afvoer wordt (zie de EGV-metingen van het drainagewater in Breezand in de rapportage van ondergrondse opslag).

2.5 Zoetwaterlenzen staan onder druk

De verziltingsstudie Noord-Nederland (Van Staveren, G. en Velstra, J. (2011)) heeft al laten zien dat door verschillende oorzaken de zoetwaterlenzen onder druk staan: zeespiegelstijging, veranderende neerslag en verdampingspatronen en bodemdaling resulteren erin dat de grootte van zoetwaterlenzen afneemt. Verwacht wordt dat droge zomers, zoals bijvoorbeeld is voorgekomen in 2018, vaker zullen voorkomen. Deze droge zomers hebben grote invloed op de grootte van zoetwaterlenzen, omdat deze snel kunnen krimpen vanwege verdamping, maar langzaam groeien in de winter, omdat het zout de bodem uit moet stromen naar de drainage.

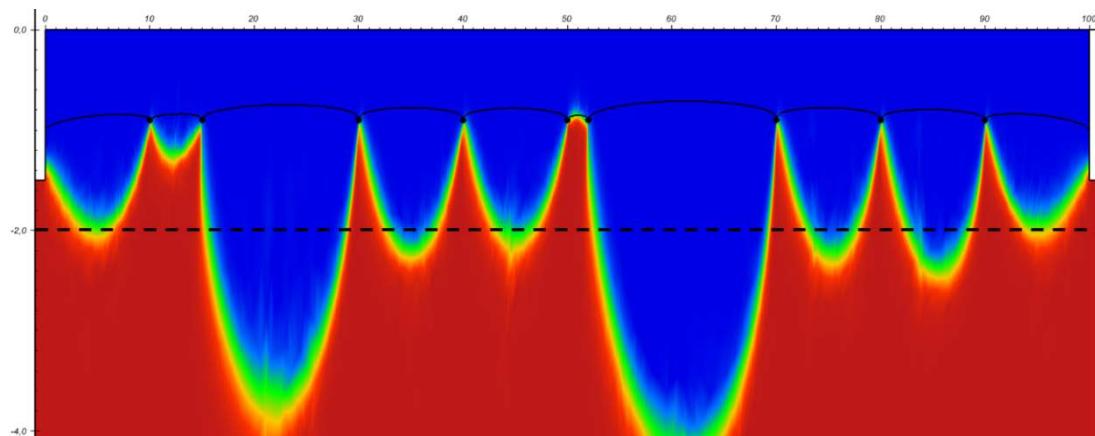
In Figuur 10 is het resultaat te zien van een modelberekening waarbij na een reeks normale jaren, een zeer droog jaar voorkomt gevolgd door een reeks normale jaren (zie voor een uitgebreide uitleg paragraaf 4.3.3). De blauwe lijn is de normale situatie en de rode lijn is de extremere situatie als gevolg van klimaatverandering. Te zien is dat in een jaar met extremere droogte de lenzen nog sterker gaan krimpen (rode piek versus blauwe piek). Waar bij huidige extreme jaren het herstel al meerdere jaren duurt, wordt deze herstelperiode bij extremere droge jaren nog langer. Als de drogere jaren vaker voorkomen, en deze droge jaren nog extremer worden, resulteert dit dus in dunnere lenzen, die zelfs kunnen verdwijnen.



Figuur 10. Ontwikkeling zoetwaterlens bij bodemprofiel O1 en een kwelflux van 0.1 mm/dag bij het huidige (blauwe lijn) en het toekomstige klimaat (rode lijn). De jaren 1 t/m 5 en 7 t/m 12 hebben een gemiddeld neerslagpatroon, jaar 6 betreft het droge jaar 2003 vergelijkbaar met 2018.

Een totaal ander aspect dat grote invloed heeft op de grootte van zoetwaterlenzen is tussendraineren. In de huidige agrarische praktijk is het standaard om nieuwe drainage tussen de oude drainage te leggen. Dit heeft echter een verkleining van de drainage afstand tot gevolg, omdat de oude drainage nog steeds een drainerende functie heeft.

De verkleining van de drainafstand heeft een zeer sterke reductie van de maximum grootte van de zoetwaterlens tot gevolg. In Figuur 11 zijn de resultaten van een modelberekening te zien. Hierbij is de zoet-zout verdeling uitgerekend bij tussendraineren met verschillende afstanden. Te zien is dat het tussendraineren de dikte van de lens meer dan halveert.



Figuur 11. Modelresultaten wat de invloed laat zien van tussendraineren op de grootte van zoetwaterlenzen

Al deze aspecten tezamen maken dat maatregelen nodig zijn om de zoetwater beschikbaar te houden, vandaar dat anti-verziltingsdrainage binnen Spaarwater is uitgetest.

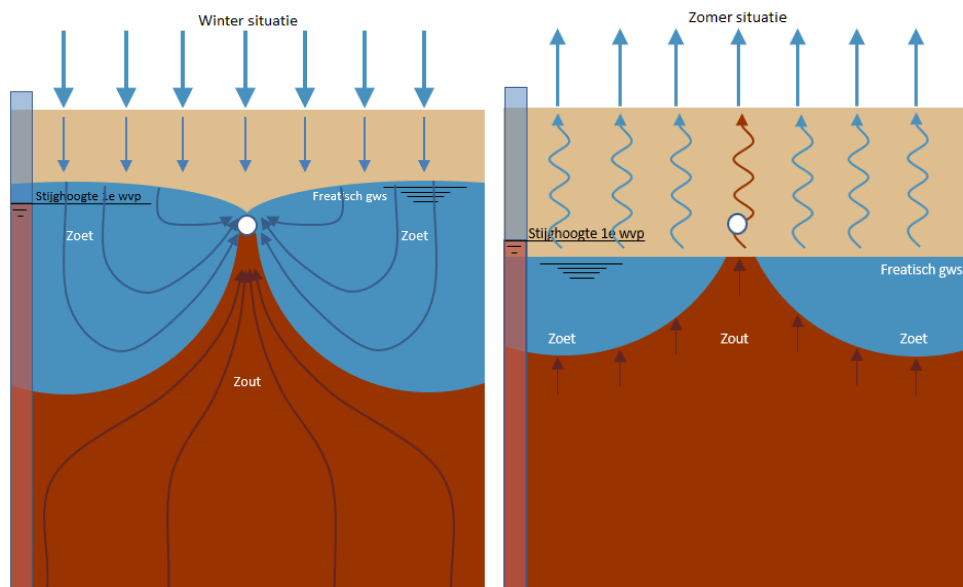
2.6 Principe van antiverziltingsdrainage

Het zoet – zout grensvlak van de zoetwaterlenzen tussen de drains varieert met de tijd, afhankelijk van de hoeveelheid neerslag en verdamping. Naarmate er meer verdamping is, krimpt de lens, en hoe meer neerslag infiltreert, hoe groter de lens kan worden (zie Figuur 13). Dit wordt voornamelijk bepaald door verschil in drukken tussen het freatische grondwater en het grondwater in het eerste watervoerend pakket (zie Figuur 12). In de zomer zakt het freatisch grondwater uit, en neemt de kweldruk toe, terwijl in de winter, tijdens een neerslagoverschot, de freatische grondwaterstand toeneemt, en hoger kan zijn dan de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. Hierdoor krimpt de lens in de zomer, en groeit deze in de winter (zie Figuur 12).



Figuur 12. Schematische fluctuatie van de freatische grondwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket gedurende 3 jaren. Gedurende tijden van neerslagoverschot (blauw hoger dan rood) is er overdruk die resulteert in een neerwaartse druk (blauwe pijl). In droge tijden is er een overdruk vanuit het 1ste watervoerend pakket (rood hoger dan blauw) en is er daarom sprake van opwaartse druk (rode pijl).

Het kunstmatig verhogen van de freatische grondwaterstanden middels anti-verziltingsdrainage versterkt het effect van het verlagen van de kweldruk.



Figuur 13. Fluctuatie van de grootte van de kweldruk resulterend in variatie in de grootte van zoetwaterlenzen in de winter (links) en in de zomer (rechts) als gevolg van variatie in drukverschil tussen freatisch grondwater (bovenkant blauwe vlak = freatisch gws) en stijghoogte in eerste watervoerend pakket (stijghoogte 1e wvp in peilbuis).

2.7 Typen antiverziltingsdrainage

Waar nu of in de toekomst sprake is van een risico op verzilting kan (aangepaste) drainage effectief worden ingezet als maatregel om de zoetwatervoorraad in het perceel in stand te houden of te vergroten. Hoe de maatregel wordt toegepast hangt samen met perceel eigenschappen en geohydrologische omstandigheden; het gedrag van de zoetwaterlenzen hangt immers af van factoren als bodemopbouw, kweldruk, drainageafstand en draindiepte, zoals ook in dit rapport wordt aangetoond (hoofdstuk 3). Voor het kiezen van een type maatregel is het van belang om inzicht te hebben in het watersysteem op perceelschaal. Daarom is gekozen voor de naamgeving *anti-verziltingsdrainage*. Rekening houdend met deze eigenschappen zijn er vier typen anti-verziltingsdrainage te onderscheiden:

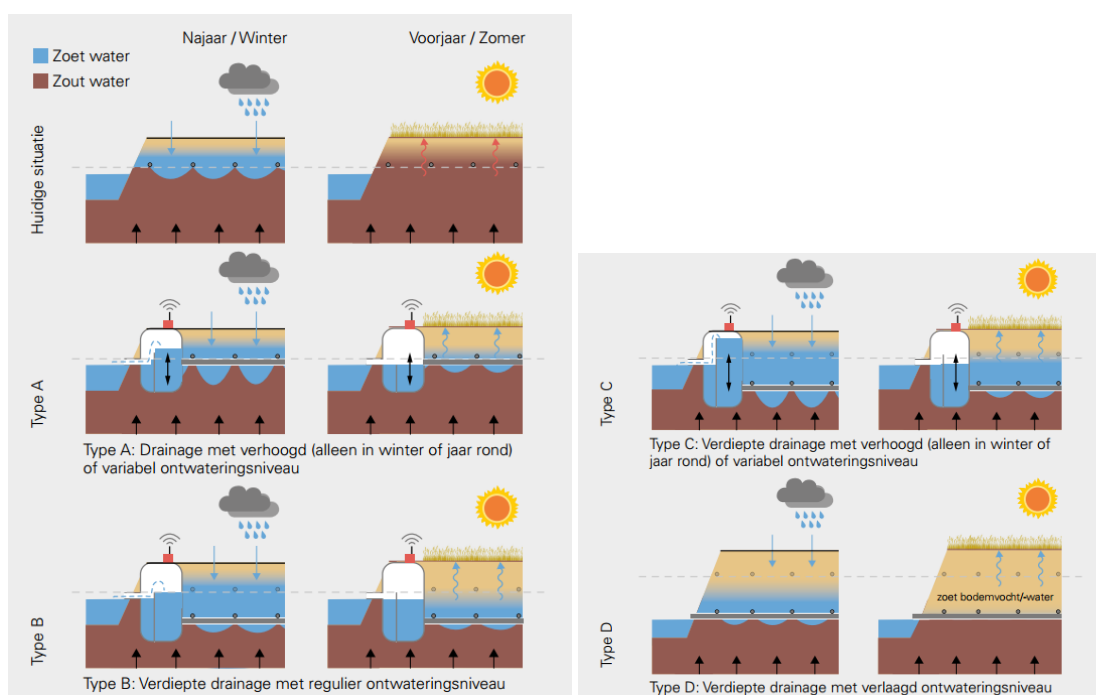
- **Type A, Verhoogd ontwateringsniveau bij bestaande drainage**, richt zich op het verlagen van de zoute kweldruk uit de ondergrond door in het drainagesysteem een (instelbaar) verhoogd ontwateringsniveau te hanteren. De zoetwatervoorraad wordt vergroot en door de hogere grondwaterstanden neemt de (zoute) kweldruk af, wat een gunstig effect heeft op de dikte van de zoetwaterlens.
- **Type B, verdiept aangelegde drainage met een regulier ontwateringsniveau**, richt zich op het dieper afvangen van de zoute kwel door een drainage verdiept aan te leggen met mogelijk een kortere drainafstand. Het ontwateringsniveau wijzigt niet ten opzichte van reguliere drainage. Door de diepere ligging van de drains kan zoet water doordringen tot grotere diepte, óók direct boven de drain zelf. De afstand tussen de grondwaterspiegel en de drains wordt vergroot (toegepast in het project Drains2Buffer in Zeeland¹).

¹ De proef met verdiepte drainage bij Drains2Buffer lijkt te zijn mislukt, omdat de verdiepte drainage in ongerijpte klei is aangelegd, en daardoor geen goede afvoercapaciteit had.

Bij de aanleg van de nieuwe drainage moet de oude drainage in ieder geval worden afgedopt, voorkeur gaat er echter naar uit dat de oude drainage in ieder geval de laatste 5 m vanaf de sloot wordt verwijderd om onbedoelde drainerende werking van oude drainage te voorkomen.

- **Type C, verdiepte aanleg met verhoogd ontwateringsniveau (combinatie van A en B),** richt zich op het vergroten van het waterbergend vermogen van het perceel. De drainage wordt dieper aangelegd dan bij traditionele drainage, maar het ontwateringsniveau wordt (periodiek) juist verhoogd ten opzichte van traditionele drainage. Hierdoor wordt de afstand tussen de grondwaterspiegel en de drain verder vergroot én neemt de (zoute) kweldruk uit de ondergrond af. Bij de aanleg van de nieuwe drainage moet de oude drainage in ieder geval worden afgedopt, voorkeur gaat er echter naar uit dat de oude drainage in ieder geval de laatste 5 m wordt verwijderd.
- **Type D, verdiepte aanleg met verlaagd ontwateringsniveau.** Hierbij wordt de drainage ingezet om zoutwater in de ondergrond af te vangen, analoog aan interceptieputten in de drinkwaterwinning. Het ontwateringsniveau ligt lager dan bij traditionele drainage. Zoetwateropslag in het perceel is hierbij niet mogelijk, alleen bodemvocht blijft achter in de bodem. In het Oldambt, in noordoost Groningen, wordt deze methode van draineren veel toegepast. Deze variant kan voor een verhoging van de zoutbelasting naar de sloot zorgen en is om die reden niet meegenomen in Spaarwater. In paragraaf 3.3.4 wordt kort op de effecten van type D ingegaan.

In Figuur 14 is schematisch weergegeven wat de impact is van drainage aanpassingen typen A, B, C en D op de zoetwater voorraad in het perceel.



Figuur 14. Overzicht van impact van typen maatregelen A, B, C en D op de grootte van de zoetwaterlenzen in doorsnede.

3

Begrip van de huidige situatie van zoetwaterlenzen

3.1 Inleiding

De aanwezigheid van zoetwaterlenzen in het perceel speelt een cruciale rol in de landbouw. Waar de dikte van zoetwaterlenzen beperkt is of deze afwezig zijn, kan (in droge perioden) verzilting optreden, waarbij zout grondwater optrekt naar de wortelzone, met gewasschade tot gevolg. De dikte van de zoetwaterlenzen hangt nauw samen met de verticale grondwaterstroming (kwel), bodemeigenschappen en perceel kenmerken, zoals drainage en landgebruik. Om een goed begrip te krijgen van het functioneren van zoetwaterlenzen is een uitgebreide modelstudie uitgevoerd. Deze resultaten zijn vervolgens vertaald naar de Waddenregio, om hiermee een regionaal inzicht te verkrijgen in het risico op verzilting in het Waddengebied. Het verziltingsrisico is hierbij gekoppeld aan de dikte van zoetwaterlenzen.

De dikte van zoetwaterlenzen is modelmatig onderzocht, waarbij de volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

- Wat is de invloed van perceeleigenschappen, drainafstand, kwelflux en doorlatendheid van de bodem op de dikte van de zoetwaterlenzen in gedraineerde percelen met zoute kwel?
- Hoe vertalen deze inzichten zich naar een risico indicatie voor verzilting op perceelschaal in de waddenregio?

3.2 Aanpak

De invloed van perceeleigenschappen op de dikte van de zoetwaterlens

De invloed van de perceeleigenschappen op de dikte van de zoetwaterlens zijn onderzocht met een numeriek grondwatermodel (zie bijlage 7), waarbij de verzadigde en onverzadigde zoneprocessen en de invloed van variabele dichtheid gekoppeld zijn (SV-Office). Voor de modelopzet is de aanname gedaan dat de percelen gedraineerd zijn en dat de kwelflux zout is.

Allereerst is bepaald hoe ver de invloed van watergangen en drainage reikt. Aan de hand hiervan is vervolgens het modelconcept beperkt tot het berekenen van de grondwatersituatie voor één drain, van maaiveld tot een diepte van 10 m onder maaiveld. Er is een drainafstand van 10 m aangehouden, aangezien er geen inventarisatie van de drainageafstanden beschikbaar is en 10 m volgens draineurs vaak wordt toegepast. Hierbij is een serie van modellen doorgerekend, waarbij relevante eigenschappen telkens zijn gevarieerd en gekoppeld aan de resulterende dikte van de zoetwaterlens. Deze eigenschappen zijn de drainageafstand, de grondsoort (doorlatendheid) en de grootte van de kwelflux. De resultaten van deze modelberekeningen laten de theoretische relatie tussen zoetwaterlenzen in homogene bodemprofielen en de verschillende parameters zien.

Omdat in Nederland slechts weinig ondergronden geheel homogeen zijn, en voor gelaagde bodemprofielen de relaties lastiger zijn vast te leggen, is gekozen om een regionale database met informatie over de ondergrond te vertalen naar veel voorkomende (gelaagde) bodemtypen in de waddenregio.

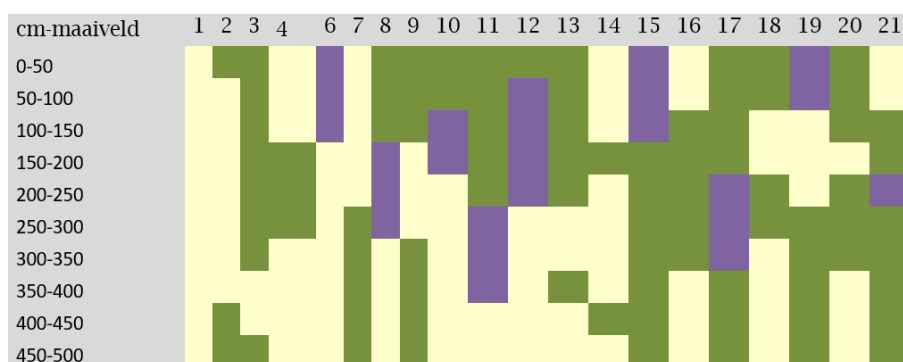
Hoe gekomen is tot de gelaagde profielen is beschreven bij onderzoeksvraag B. Het gedrag van de zoetwaterlens in deze profielen is in het SV-Office model gesimuleerd met een vaste hoeveelheid neerslagoverschot, drainage diepte en chloridegehalte van de zoute kwel. Op deze manier wordt er een jaargemiddelde dikte van de zoetwaterlens gesimuleerd. In deze simulaties is gevarieerd in drainageafstand, grondsoort (doorlatendheid) en de grootte van de kwelflux, om zo de relaties van deze parameters op de dikte van de zoetwaterlens te bepalen voor verschillende veelvoorkomende perceels-eigenschappen. Tevens is er modelmatig gekeken naar de invloed van verdiept draineren (Type D).

De inzichten vertalen naar een risico indicatie voor verzilting op perceelschaal

Op basis van de berekende dikte van de zoetwaterlens voor verschillende perceel eigenschappen kan er een inschatting worden gemaakt van het huidige verziltingsrisico. Er is een risico op verzilting als de zoetwaterlens verdwijnt, of als brak kwelwater de wortelzone van een gewas bereikt.

Om het verziltingsrisico op kaart weer te kunnen geven, is een uitgebreide analyse gedaan, waarbij de volgende stappen zijn doorlopen:

1. **Bodemtypen.** Om de modelresultaten van zoetwaterlens grootte te kunnen doorvertalen naar Noord-Nederland is de ondergrond van Noord-Nederland onderverdeeld in verschillende bodemtypen. Hiervoor is gebruik gemaakt van een bestaande database met informatie over de ondergrond (GeoTOP v1.3). GeoTOP geeft een gedetailleerd driedimensionaal beeld van de ondergrond van Nederland tot een diepte van maximaal 50 meter onder NAP. Het model is opgebouwd uit cellen van 100 bij 100 meter in de horizontale richting en 50 centimeter in de verticale richting. Aan elke cel zijn eigenschappen gekoppeld, zoals lithostratigrafische eenheid en grondsoort (lithoklasse).
2. De informatie van de bovenste 5 m uit GeoTOP is onderverdeeld in verschillende profielen met een opbouw van klei, veen en zand. Deze aanname is valide, aangezien stroming naar drainage vooral plaatsvindt in de bovenste meters van het bodemprofiel (Van der Gaast et al. 2014). Deze bewerking resulteerde in 21 vaak voorkomende bodemprofielen (GeoTOP typen) die zorgen voor een kaart met een grote ruimtelijke variabiliteit in bodemsoorten. De kaart is opgenomen in bijlage 4.



Kleurenlegenda

Kleur	Staringreeks	θ_r	θ_s	α	α	l	n	K_s
		(cm ³ /cm ³)	(cm ³ /cm ³)	(1/cm)	(1/kPa)	(-)	(-)	(m/d)
Klei	O13	0.01	0.57	0.0194	0.19776332	-5.955	1.089	0.1
Veen	O17	0.01	0.86	0.0123	0.12538602	-1.592	1.276	0.3
Zand	O1	0.01	0.36	0.0224	0.22834528	0	2.286	1

3. **Kwelflux.** Uit eerdere studies bleek dat de bestaande kwelkaart ontoereikend was voor deze werkzaamheden. Daarom is een nieuwe kwelkaart ontwikkeld (zie bijlage 4). Voor het beheergebied van HHNK in Noord-Holland is gebruik gemaakt van de kwelkaart uit het HHNK-grondwatermodel (Acacia Water, 2016). Voor Texel en de provincies Friesland en Groningen is een nieuwe kwelkaart gemaakt. Voor deze kaart is de kwelflux berekend gebruikt makend van 1) de voorjaarsstijghoogte van het eerste watervoerend pakket, 2) een gemiddeld voorjaars grondwaterstand m.b.v. het AHN, en 3) een deklaagweerstand gebaseerd op GeoTOP.
4. **Modelresultaten.** Voor elke combinatie van bodemtypen en kwelflux is middels een modelsimulatie de dikte van zoetwaterlens vastgesteld, zoals reeds uitgelegd onder onderzoeksvraag A. In de modelsimulaties is het drainage niveau voor elk profiel -1 m-mv en de afstand tussen de drains 10 meter.
5. **Risicogebied.** Er is alleen risico op verzilting, als er een kwelflux is die ook zout is. Om te bepalen waar dit risico aanwezig is, is een kaart gemaakt dat het gebied aangeeft waar op 5 m beneden maaiveld of minder het zoet-zout grensvlak aanwezig is. De grens tussen zoet en brak water is genomen op 1000 mg/l. Het toegepaste zoet-zout grensvlak is gebaseerd op geofysica metingen van Dinoloket. Daarnaast zijn aanvullende metingen van Acacia Water en het TNO-grensvlak gebruikt om voor de gehele waddenregio een gebied aan te geven met een ondiep grensvlak. Voor een aantal gebieden is het lastig te bepalen of het zoet-zout grensvlak binnen 5 m-mv ligt. Deze gebieden zijn toegevoegd aan het gebied 'onzeker grensvlak', welke gearceerd weergegeven wordt op de kaart. Tot dit gebied behoren onder andere de Anna Paulowna polder, het kassengebied in de Wieringermeer polder, het buitendijks gebied de nieuwe Rijd. De kaart is opgenomen in bijlage 4.
6. **Risicoclassificatie.** Om de mate van het verziltingsrisico op kaart weer te geven is er een risicoclassificatie ontwikkeld gebaseerd die de modelsimulaties.

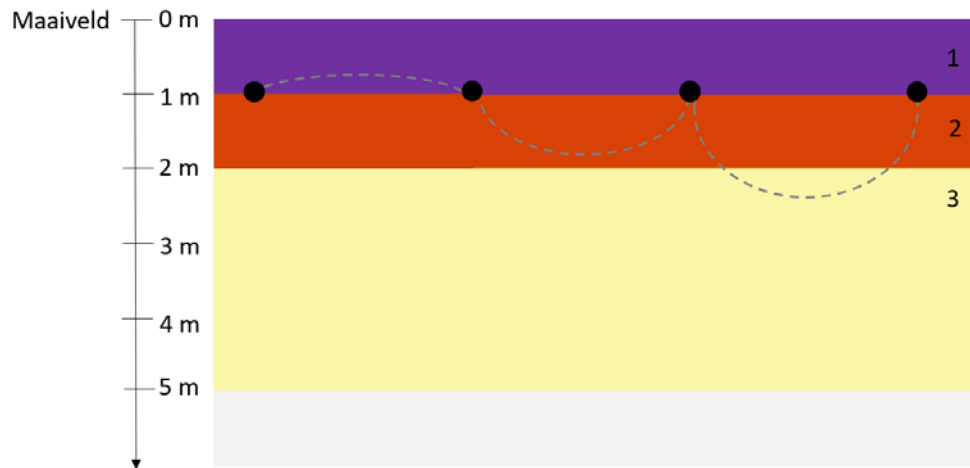


De resultaten van de hierboven benoemde analyses zijn doorvertaald naar een risicocode.

Op basis van de bodemprofielen, de kwelintensiteit en de gebieden met zoute kwel is aan de hand van de numerieke modelresultaten de jaargemiddelde dikte van de lens, en hiermee de diepte van het zoet-zout grensvlak bepaald. Dit zoet-zout grensvlak is vervolgens doorvertaald.

De hoogste risicocategorie (1) is toebedeeld aan de percelen waar het grensvlak zich boven het drainage niveau bevindt (

Figuur 15, gelegen tussen de 0- 1 m-mv). Een hoger categorienummer geeft aan dat het grensvlak dieper in het perceel ligt en daarmee een lager risico op verzilting heeft.



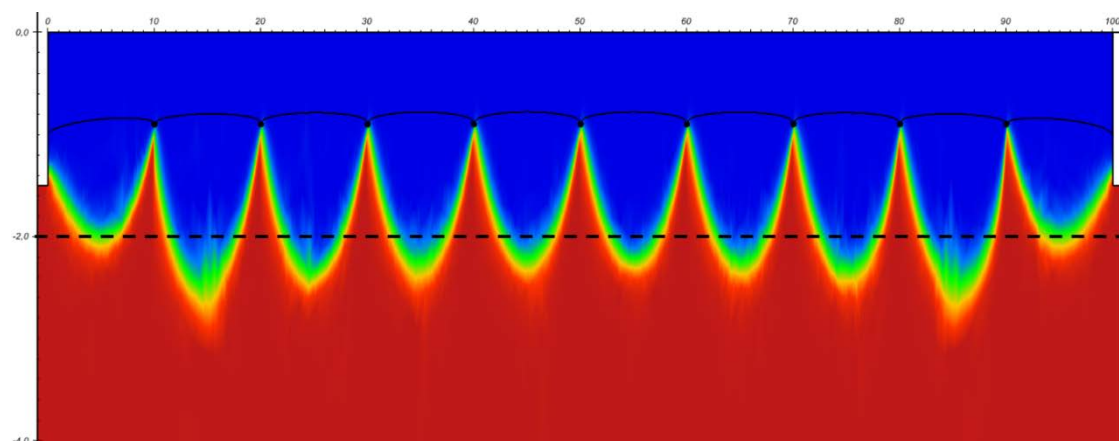
Figuur 15. Verschillende risico categorieën gebaseerd op de jaargemiddelde dikte van de zoetwaterlens. Als de gesimuleerde dikte (stippellijn) boven het drainage niveau (van 1 m-mv) uitkomt, is risicoklasse 1 toegekend. Tussen 1 en 2 m-mv, risicoklasse 2. Risicoklasse 3 wordt toegekend aan de overige gebieden waar volgens de zoet-zout grensvlak kaart van Acacia Water het grensvlak binnen 5 m -mv voorkomt.

3.3 Resultaten

3.3.1 Invloed watergangen, drainage en -afstanden op grootte van zoetwaterlenzen

Om te bepalen wat de invloed is van watergangen op drainage, en hoever de invloed rijkt, is allereerst een model gemaakt van een perceel van 100 m breed, met 2 watergangen aan beide zeiden en een drainbuis om elke 10 m (zie bijlage 7).

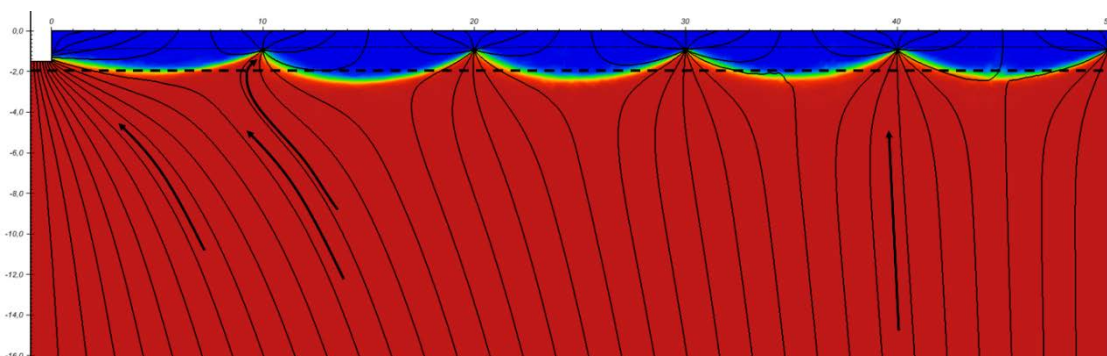
De schematisering en resultaten van deze berekening zijn te zien in Figuur 16. In de resultaten zijn duidelijk de individuele zoetwaterlenzen te zien tussen de drains. De sloot heeft geen invloed op de lenzen welke niet aan de eerste drainagebuis naast de sloot grenzen.



Figuur 16. Perceel met opwaartse stroming van zout grondwater. De blauwe gebieden representeren zoet grondwater, de rode gebieden representeren zout grondwater. De X:Y-verhouding is 1: 10 en de gestreepte zwarte lijn ligt op 2 m-mv.

De sloot heeft een groter afvoerend oppervlak dan de drains, wat resulteert in een dunnere lens gelegen naast de sloot in Figuur 16. De dikkere lens in dezelfde figuur, tussen het eerste paar drainagebuizen vanaf de sloot, wordt veroorzaakt doordat de sloot een gedeelte van de zoute kwel als het ware afvangt.

Dit heeft tot gevolg dat de kwelflux onder deze zoetwaterlenzen kleiner is waardoor de zoetwaterlens dikker kan worden. Dit effect is in Figuur 17 weergegeven door middel van stroombanen. Vanaf 30 meter afstand van de sloot is dit effect nagenoeg verdwenen.

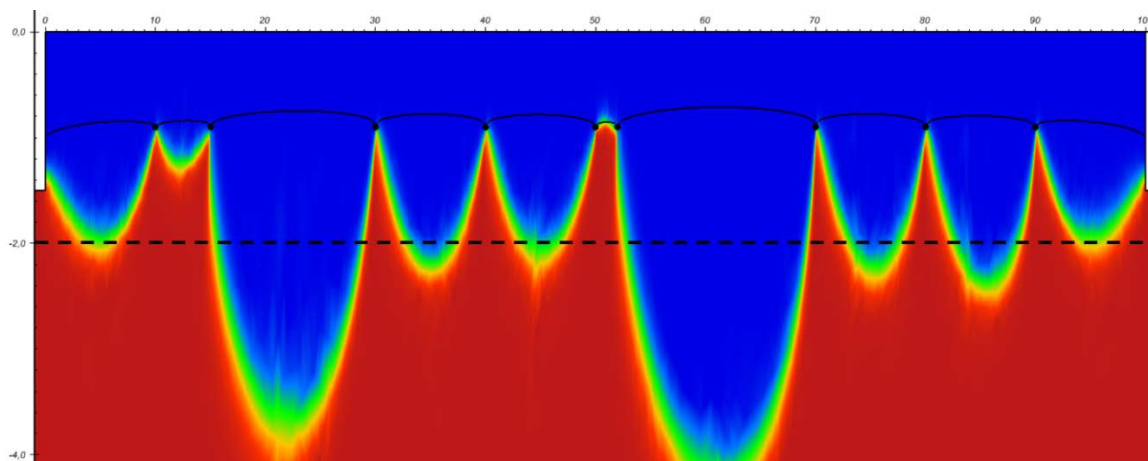


Figuur 17. Figuur 16 inclusief stroombanen en een X:Y-verhouding van 1:1.

Deze resultaten bevestigen de conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem in percelen in verziltende gebieden met perceeldrainage als dominante factor.

Ter ondersteuning hiervan is tevens gekeken naar een situatie waarin verschillende drainafstanden voorkomen: 2, 5, 10, 15 en 18 meter. Deze situatie komt in de praktijk vaak voor, in situaties dat er sprake is van tussendraineren.

In Figuur 18 zijn de resultaten van de berekening te zien. De figuur laat zien dat de verschillende drainageafstanden zorgen voor grotere en kleinere lenzen, maar wat vooral op valt is dat de lenzen tussen drains met een afstand van 10 meter in Figuur 18 ongeveer even groot zijn als de lenzen in Figuur 16. De grootte van een zoetwaterlens heeft geen effect op de daarnaast liggende zoetwaterlens; het zijn dus aparte lokale grondwatersystemen.

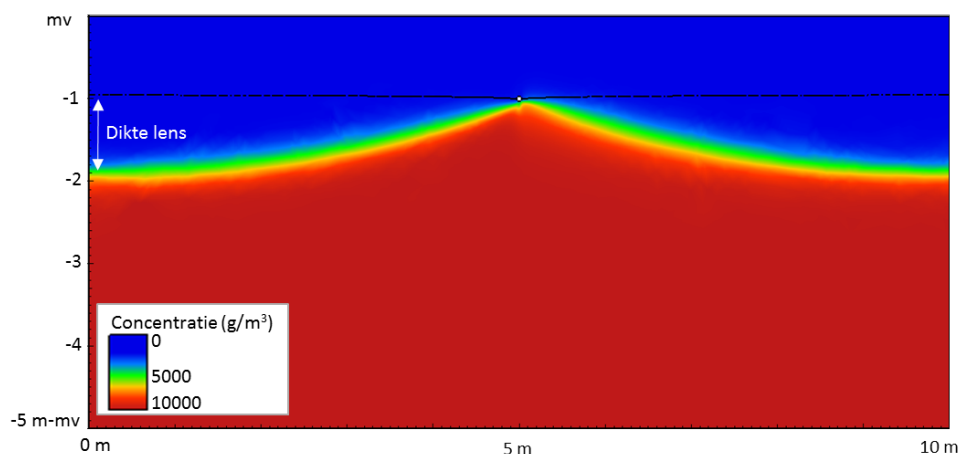


Figuur 18. Perceel met opwaartse stroming van zout grondwater. De blauwe gebieden representeren zoet grondwater, de rode gebieden representeren zout grondwater. De X:Y-verhouding is 1: 10 en de gestreepte zwarte lijn ligt op 2 m-mv.

Deze conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem in gedraineerde percelen met zoute kwel maakt het mogelijk het systeem te vereenvoudigen. Het afwaterende gebied van één drain is met deze conceptuele modelbeschrijving namelijk representatief voor het gehele perceel.

3.3.2 Invloed perceel eigenschappen op dikte van zoetwaterlens in homogene profielen

In de serie berekeningen is de invloed van de drainageafstand, de grootte van de kwelflux en het bodemtype op de grootte van de zoetwaterlens onderzocht. De dikte is gedefinieerd als de diepte van het vlak onder de drainage midden tussen de drains waar de chloride concentratie 1000 mg/l is. In Figuur 19 is een resultaat van één van de berekeningen te zien.



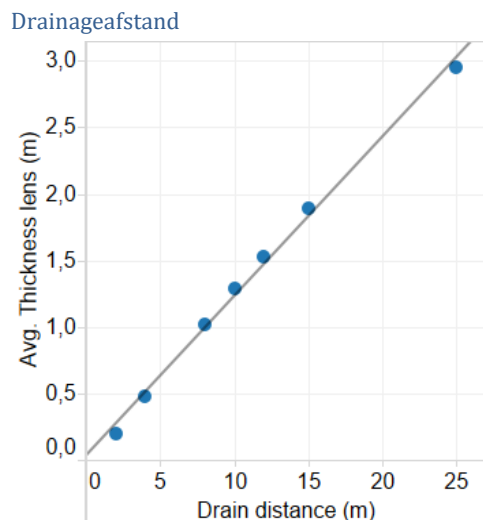
Figuur 19. Berekende zoet- zout verdeling van het grondwater in een homogeen bodemprofiel in het grondwatermodelleringsprogramma SV-Office. De dikte van de zoetwaterlens is de afstand tussen het drainageniveau en de 1000 g/m³ concentratielijn van het grondwater.

In Figuur 20 is een overzicht gegeven van de gemiddelde dikte van de zoetwaterlenzen van alle grondsoorten samen, waarbij de kwel en de drainage afstand is gevarieerd.

Drain distance (m)	Seepage (mm/d)					
	0	0,05	0,1	0,5	1	2
2	0,6	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,1
4	1,1	0,8	0,6	0,3	0,1	-0,1
8	1,9	1,5	1,3	0,8	0,5	0,2
10	2,3	1,8	1,7	1,0	0,7	0,3
12	2,6	2,1	1,9	1,3	0,8	0,4
15	3,1	2,6	2,4	1,6	1,1	0,6
25	4,5	4,0	3,7	2,6	1,9	1,1

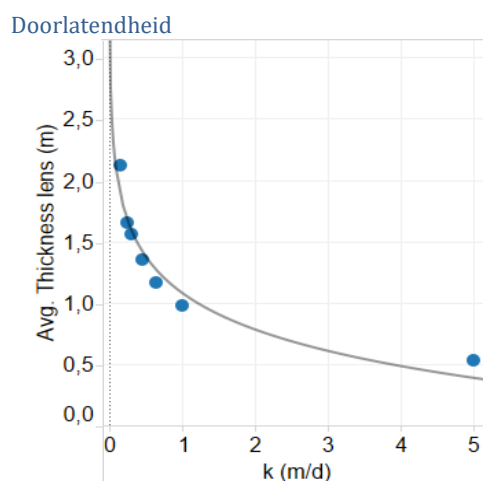
Figuur 20. Gemiddelde dikte (m) van de zoetwaterlens, gemiddeld over de verschillende grondsoorten bij verschillende kwelfluxen (seepage) en drainageafstanden (drain distance).

Uit de berekeningen blijkt dat de gevarieerde eigenschappen (drainageafstand, doorlatendheid en kwelflux) van invloed zijn op de dikte van de zoetwaterlens. Dit sluit aan bij eerder uitgevoerde onderzoeken van De Louw et al (2011), Pauw (2015) en Eeman (2017). Uit Figuur 21 kan worden geconcludeerd dat de drainageafstand en de grootte van de kwelflux een grote invloed op de zoetwaterlens hebben. Een combinatie van een kleine drainageafstand en grote kwelflux kan de zoetwaterlens zelfs helemaal doen verdwijnen, terwijl bij een kleine kwelflux gecombineerd met een grote drainafstand een grote zoetwaterlens aanwezig is.



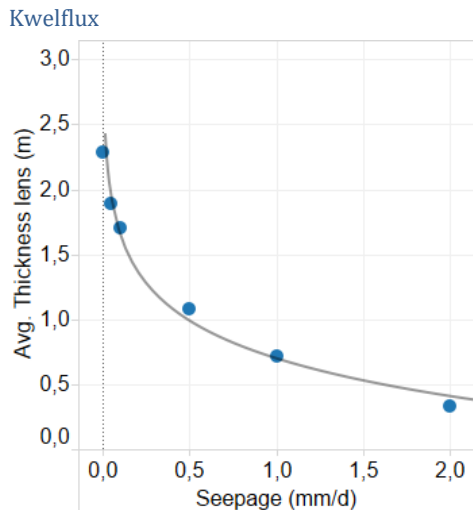
Figuur 21. De gemiddelde dikte van de zoetwaterlens (m) uitgezet tegen de drainageafstand (m). Elk punt representeert de gemiddelde dikte van de zoetwaterlens van alle model varianten behorende bij die specifieke drainafstand, ongeacht een bepaalde kwelflux of doorlatendheid.

Figuur 21 laat het verband zien tussen drainage afstand en de dikte van de zoetwaterlens. Te zien is dat er een lineair verband is tussen de gemiddelde dikte van de zoetwaterlens en de drainageafstand. Hoe kleiner de drainafstand dus is, hoe kleiner de zoetwaterlens is.



Figuur 22. De gemiddelde dikte van de zoetwaterlens (m) uitgezet tegen de doorlatendheid van verschillende grondsoorten (k uitgedrukt in m/d). Elk punt representeert de gemiddelde dikte van de zoetwaterlens van alle model varianten behorende bij die specifieke doorlatendheid, ongeacht een bepaalde drainafstand of kwelflux.

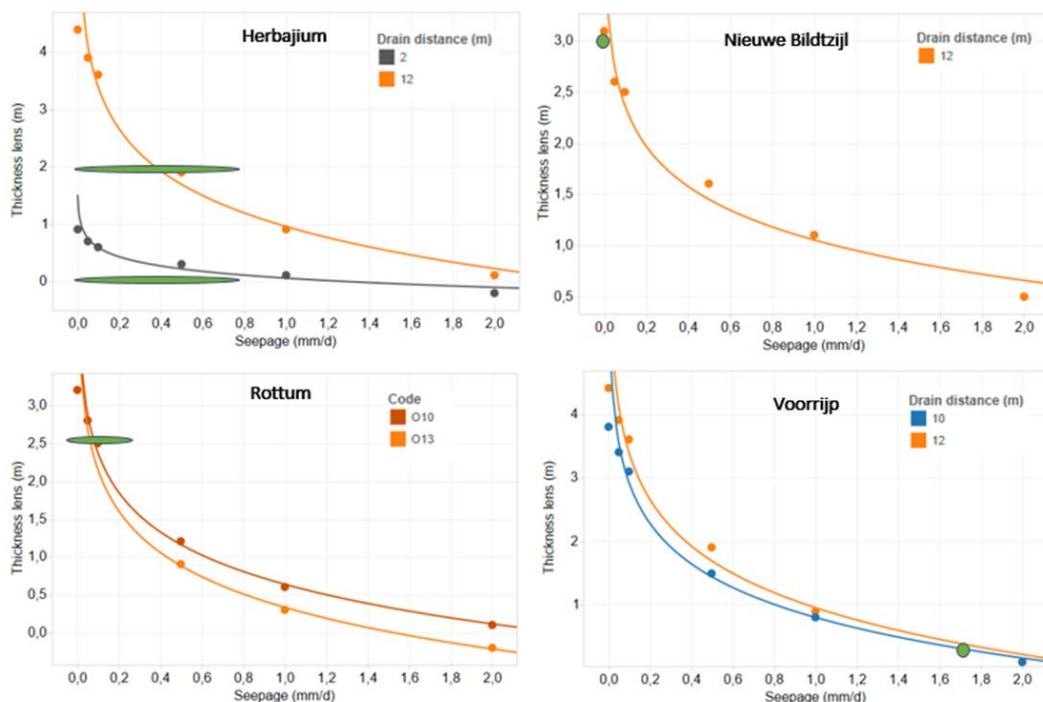
Figuur 22 laat het verband zien tussen de doorlatendheid en de lensdikte. Te zien is dat er een logaritmisch verband is tussen de doorlatendheid van de verschillende grondsoorten (m/d) en de berekende gemiddelde dikte van de zoetwaterlens. De zoetwaterlensen in bodems met een hogere doorlatendheid (bv. grof zand) zijn dus kleiner dan zoetwaterlensen in bodems met een lagere doorlatendheid (bv. klei). In bodems met een hoge doorlatendheid wordt het neerslagoverschot makkelijker afgevoerd via de drains waardoor er een kleinere lens wordt opgebouwd. Vanwege het logaritmische verband kan in grondsoorten met een lage doorlatendheid een relatief klein verschil in doorlatendheid dus al een groot effect hebben op de dikte van de zoetwaterlens.



Figuur 23. De gemiddelde dikte van de zoetwaterlens (m) uitgezet tegen verschillende kwelfluxen (mm/d). Elk punt representeert de gemiddelde dikte van de zoetwaterlens van alle model varianten behorende bij die specifieke kwelflux, ongeacht een bepaalde drainafstand of doorlatendheid.

Figuur 23 laat het verband zien tussen de kwelflux en de lensdikte. Te zien is dat er een logaritmisch verband is tussen de intensiteit van de kwelflux (mm/d) en de berekende gemiddelde dikte van de zoetwaterlens. In percelen met een hogere kwelflux is de zoetwaterlens dus kleiner dan de zoetwaterlens in bodems met een lagere kwelflux. In bodems met een hoge kwelflux vindt een aanvullende opwaartse stroming van zout water plaats, waardoor de zoetwaterlens dunner is dan onder vergelijkbare condities met een kleine kwelflux.

Vanwege het logaritmische verband kan in de percelen met een kleine kwelflux een relatief kleine kweltoename al in een relatief grote afname van de dikte van de zoetwaterlens resulteren.



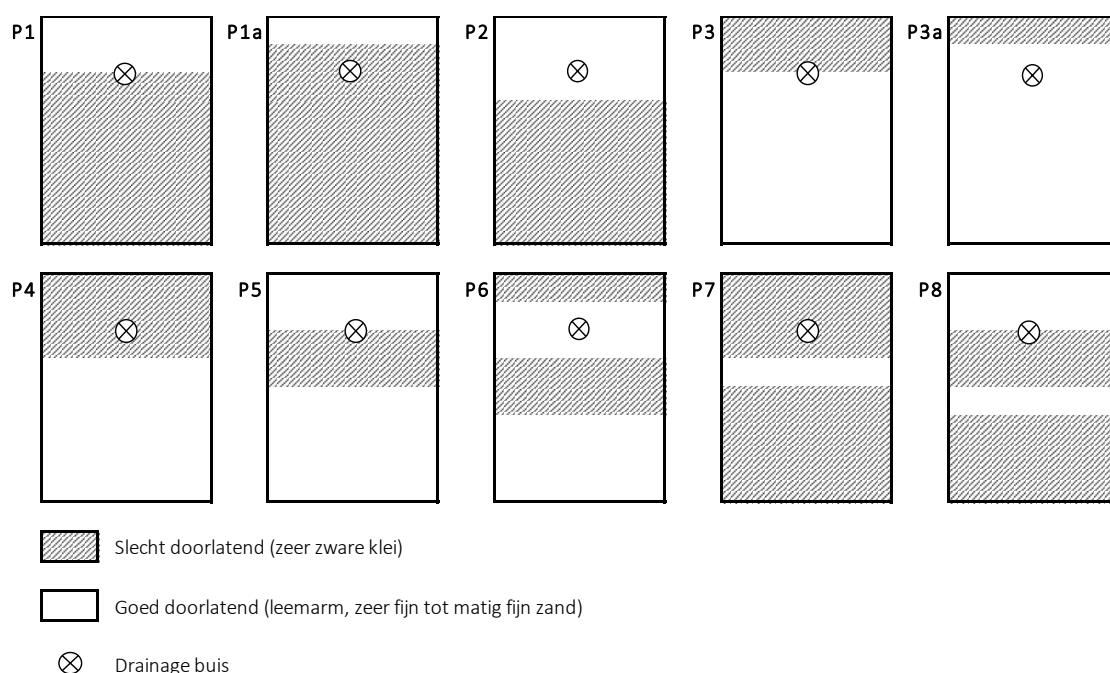
Figuur 24. Vier grafieken van de dikte van de zoetwaterlens bij verschillende bodemtypen en kwelfluxen. Deze zijn vergeleken met de dikten van de zoetwaterlens die zijn gemeten met geofysica (groene stippen in de grafieken).

De modelresultaten zijn vergeleken met een aantal geofysica metingen van homogene profielen in het veld (zie Figuur 24), waaruit bleek dat de gemeten diepte van het zoet-zout grensvlak goed overeenkomt met de gesimuleerde metingen.

Uit veldmetingen (Van Staveren en Velstra, 2011) en onderzoek van Schot et al., (2004), Eeman (2017), Stofberg (2017), blijkt ook dat het zoet-zout grensvlak in doorlatende profielen een seizoensfluctuatie heeft. In de winter ligt het grensvlak dieper en in de zomer ondieper waardoor de zoetwaterbuffer kleiner is. De mate van fluctuatie verschilt met het klimaat. Deze variatie is ook gemeten binnen het project Spaarwater in Herbaijum (zie Figuur 47 en Figuur 48).

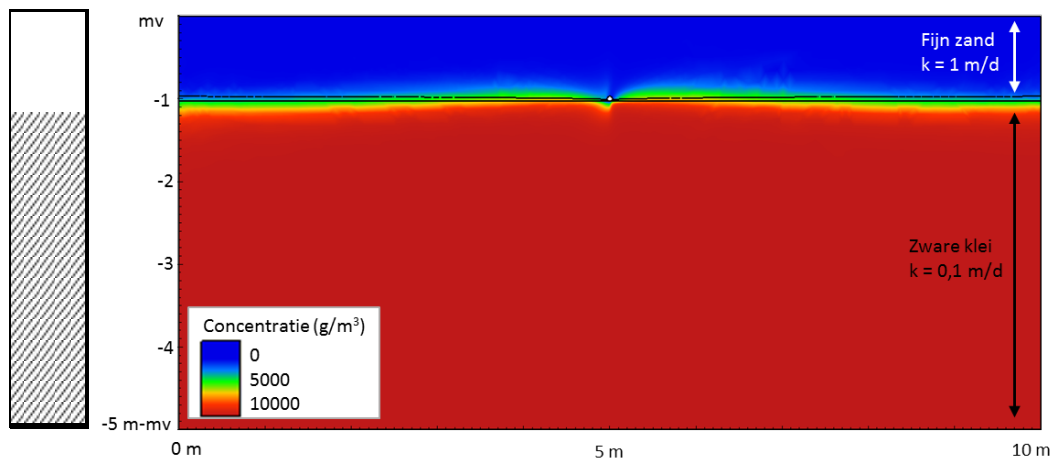
3.3.3 Zoetwaterlenzen bij drainage in niet homogene bodems

Om de invloed van gelaagdheid in de ondergrond op lensvorming in beeld te brengen zijn berekeningen met het programma SV-Flux berekeningen uitgevoerd (zie bijlage 7) uitgevoerd uitgaande van heterogene bodemprofielen (zie Figuur 25).



Figuur 25. De gemodelleerde gelaagde bodemprofielen. Doorlatendheid slecht doorlatend $k = 0,1 \text{ m/d}$; goed doorlatend $k = 1 \text{ m/d}$ bij een vaste kwelflux van $0,05 \text{ mm/d}$ (chloridegehalte 10.000 g/m^3) en drainageafstand 10 meter, draindiepte 1 m – mv.

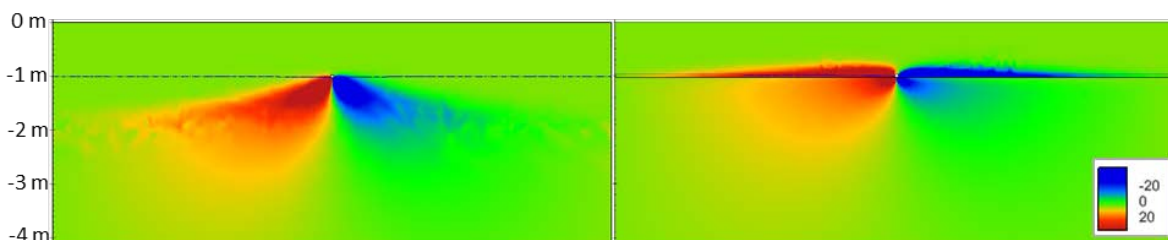
De bodemprofielen met een, in verhouding tot de bovengrond, slecht doorlatende ondergrond waarvan de overgangszone net onder het drainageniveau ligt, hebben de grootste invloed op de vorm en grootte van zoetwaterlenzen. Dit zijn de bodemprofielen P1, P2, P5, P6 en P8. De zoet-zout verdeling is in Figuur 26 afgebeeld. Onder deze omstandigheden rust de overgangszone tussen het zoete en zoute grondwater als het ware op de slecht doorlatende ondergrond.



Figuur 26. Berekende zoet- zout verdeling van het grondwater in een heterogeen bodemprofiel (P1) in het grondwatermodelleringsprogramma SV-Office.

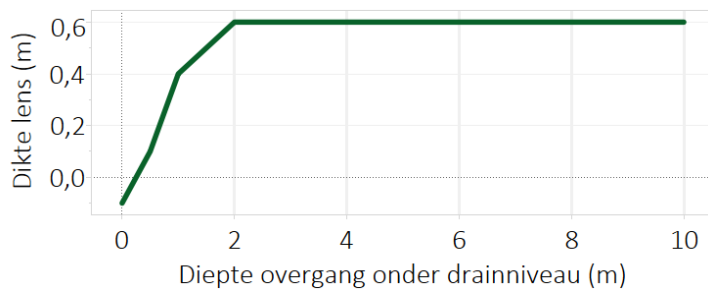
Het grootste zouttransport gaat in deze bodemprofielen in verticale richting over de grens van de goed naar slecht doorlatende laag of ondergrond en niet zoals bij homogene bodemprofielen vanaf onderen convergent naar de drain. Het verschil in stroming is goed te zien in Figuur 27.

Deze figuur laat zien dat de meeste stroming (in blauw of rood) bij een slecht doorlatende laag (rechter figuur) optreedt boven de slecht doorlatende laag. Bij een homogeen profiel vindt stroming door het hele pakket plaats richting de drain.



Figuur 27. Chloridetransport (g/d/m²) onder homogene condities (links) en een situatie met een slecht doorlatende ondergrond vanaf 1 m-mv met daarboven een goed doorlatende ondergrond (bodemprofiel P1).

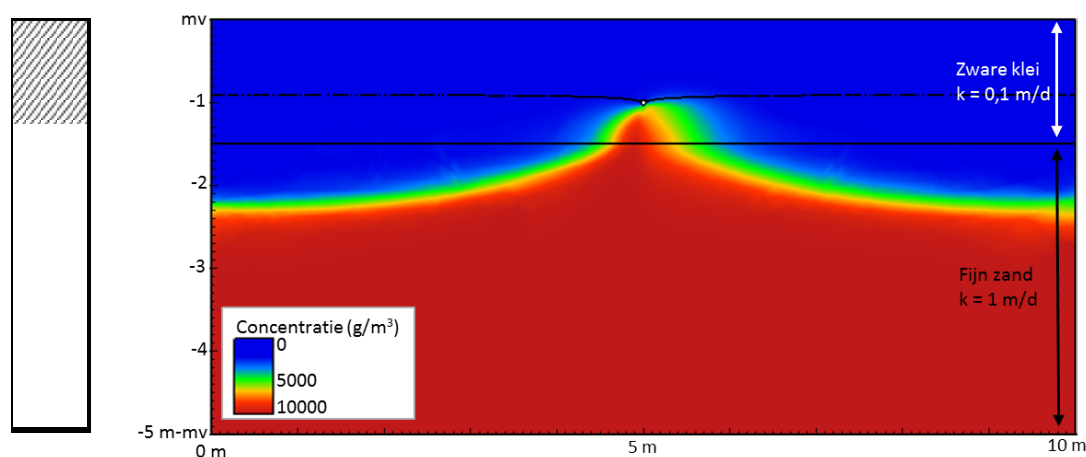
Een afwijkende, in verhouding tot de bovengrond slechter doorlatende ondergrond of laag onder het drainageniveau heeft tot ongeveer twee meter onder het drainageniveau invloed op de dikte van de zoetwaterlens. In Figuur 28 is te zien dat bij een grotere diepte van de overgang naar een slecht doorlatende laag of ondergrond de dikte van de lens constant blijft.



Figuur 28. Dikte van de zoetwaterlens (m) uitgezet tegen de diepte van de, in verhouding tot de bovengrond, slecht doorlatende laag of ondergrond onder drainageniveau.

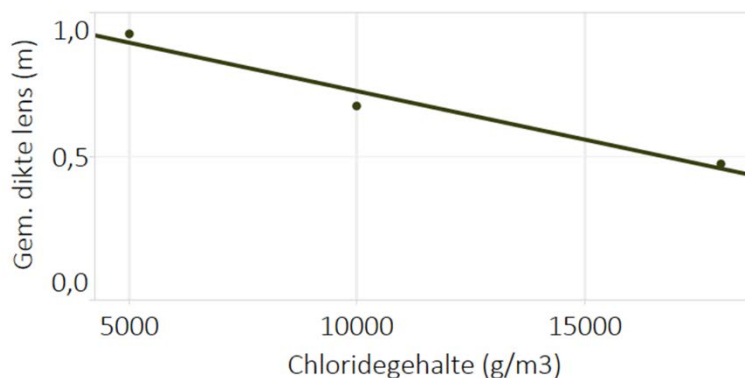
Een afwijkende laag boven het drainageniveau, zoals in de bodemprofielen P1a, P3 en P3a, heeft geen tot weinig invloed op de lensvorming.

Bij bodemprofielen P4 en P7 ligt er vanaf het maaiveld tot een halve meter onder het drainageniveau een slecht doorlatend bodemtype. Hieronder ligt een goed doorlatende laag of ondergrond. In deze bodemprofielen is, in vergelijking met een homogeen bodemprofiel (Figuur 19), een opvallend brede optrekkende 'kegel' van zout water onder drain te zien. De grootte van de zoetwaterlens heeft een vergelijkbare dikte met een geheel homogeen pakket. Waarschijnlijk wordt deze brede 'kegel' veroorzaakt doordat de stroomsnelheid in de slecht doorlatende laag verlaagd wordt. In Figuur 29 is de zoet-zout verdeling van het grondwater van het heterogeen bodemprofiel P4 te zien.



Figuur 29. Berekende zoet- zout verdeling van het grondwater in een heterogeen bodemprofiel (P4) in het grondwatermodelleringsprogramma SV-Office.

Een hoger chloridegehalte van de zoute kwel heeft een verkleinend effect op de dikte van de zoetwaterlens (Figuur 30). Dit verband volgt het Ghyben-Herzberg principe (zie paragraaf 2.2); bij een kleiner dichtheidsverschil (bij een lager chloridegehalte van het zoute grondwater) tussen het zoete en het zoute grondwater, wordt de zoetwaterlens groter.



Figuur 30. Gemiddelde dikte van de zoetwaterlens (m) uitgezet tegen het chloridegehalte van de zoute kwel (g/m³).

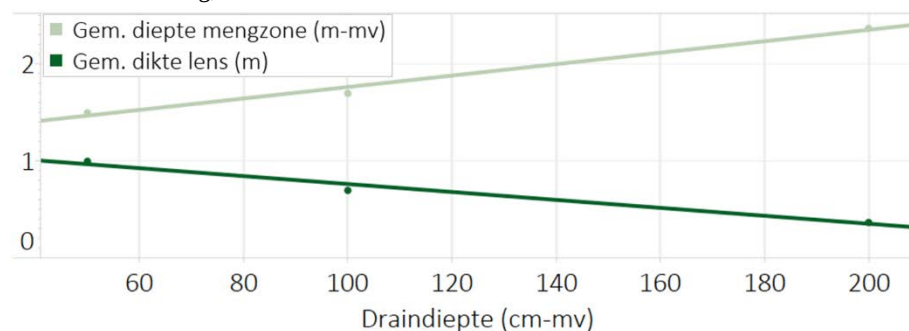
3.3.4 Verdiepte aanleg met verlaagd ontwateringsniveau (type D)

Om de effecten in beeld te brengen van drainage met verdiepte aanleg en verlaagd ontwateringsniveau (type D) zijn berekeningen met het programma SV-Flux uitgevoerd (zie bijlage 7). Daarbij is gevarieerd met de draandiepte en het chloridegehalte van de zoute kwel in een homogeen profiel.

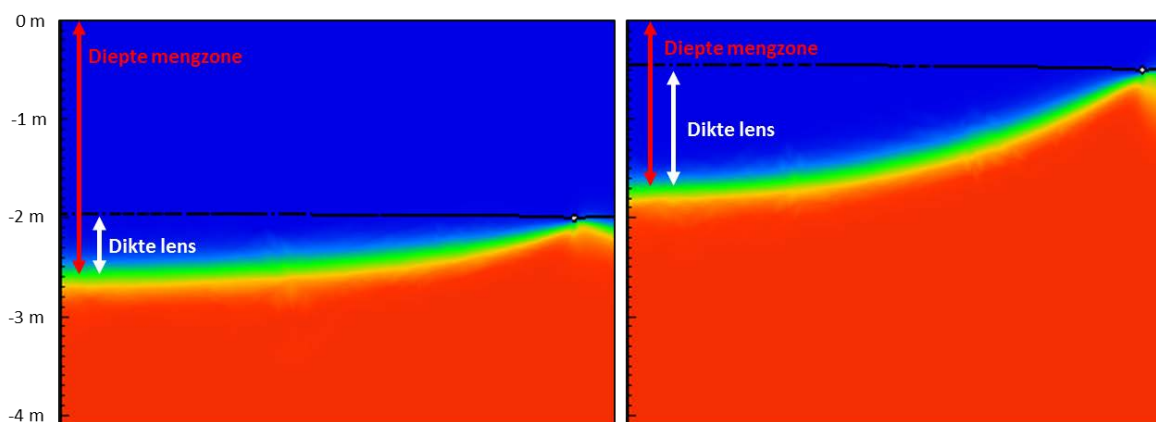
Figuur 31 toont het verband tussen de draindiepte (cm – m) en de gemiddelde dikte van de zoetwaterlens (m). Daarnaast is het verband weergegeven tussen de diepte van de 1000 g/m³ chlorideconcentratielijn (m – mv) en de draindiepte.

Een toenemende draindiepte zorgt voor een afnemende dikte van de zoetwaterlens en een diepere ligging van de mengzone ten opzichte van het maaiveld. In Figuur 32 is dit beeld weergegeven. Dat de twee lijnen in de plot niet evenwijdig aan elkaar lopen, maar divergeren valt op. Dit betekent dat de overgang van het zoete grondwater naar het zoute grondwater bij een grotere draindiepte wel dieper ligt maar dat de bijbehorende dikte van de zoetwaterlens afneemt en daarbij dus de zoetwatervoorraad in het perceel.

Een verlaging van het drainageniveau zorgt ervoor dat het hele systeem omlaaggaat; de kwelflux gaat echter wel omhoog, waardoor de lensdikte afneemt.



Figuur 31. Gemiddelde dikte van de zoetwaterlens (m) en de gemiddelde diepte van de 1000 g/m³ concentratie lijn (m-mv) uitgezet tegen de draindiepte (cm-mv).



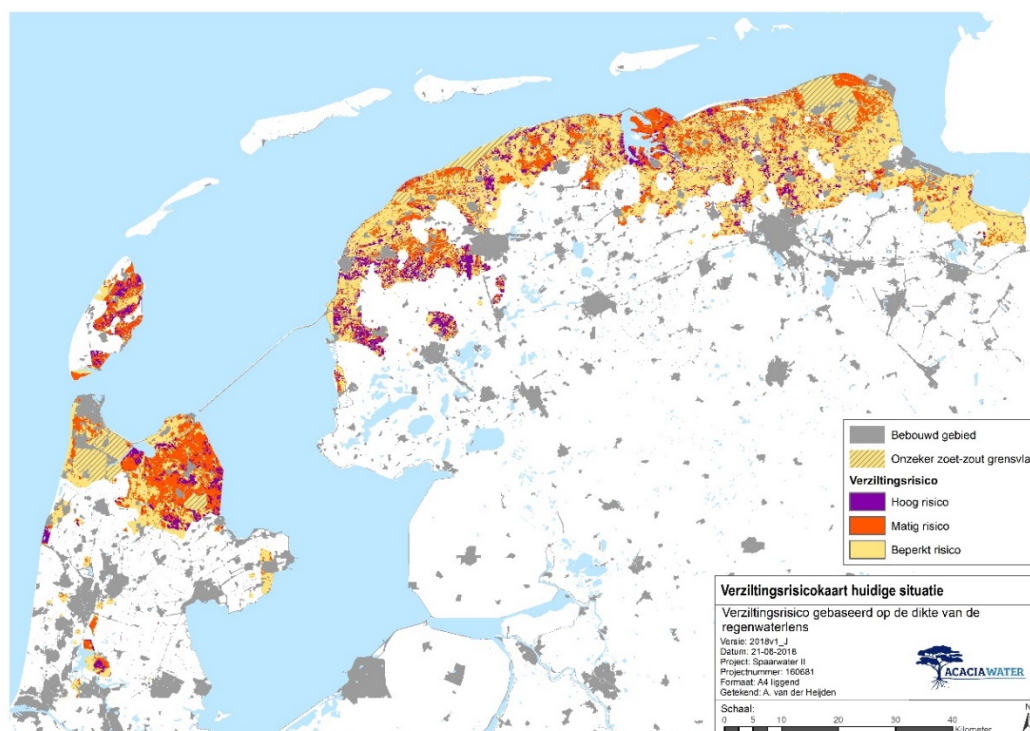
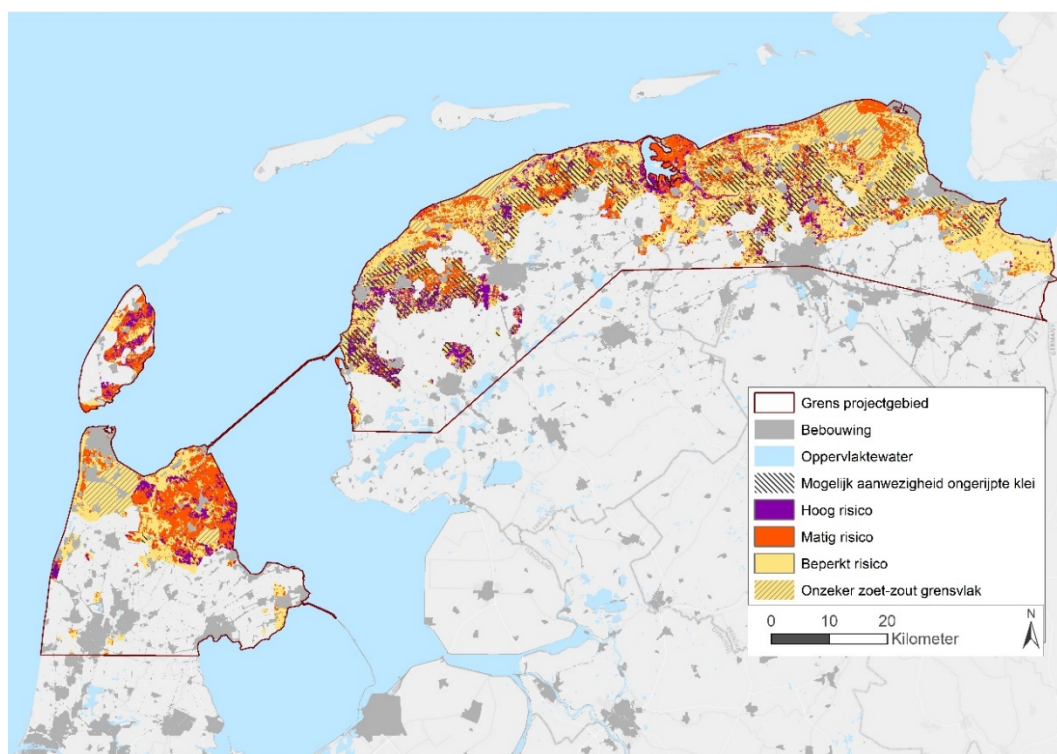
Figuur 32. De dikte van de lens en diepte van de mengzone bij een drainagediepte van 2 m-mv (links) en 0,5 m-mv (rechts)

3.3.5 Inzichten vertalen naar risico-indicatie voor verzilting op perceelschaal in waddenregio

Voor het bepalen van het verziltingsrisico zijn 4 stappen ondernomen (zie paragraaf 3.2 voor de aanpak), die hebben geresulteerd in een 3-tal kaarten, deze zijn opgenomen in bijlage 4. De laatste stap is het bepalen van de lensdikte en dit vervolgens door te vertalen naar de het verziltingsrisico hoog, matig en beperkt (zie Figuur 33 en bijlage 5). De kaart die op basis hiervan is gemaakt, geeft dus het verziltingsrisico weer op basis van de gemiddelde dikte van de zoetwaterlens op perceelschaal.

Voor een aantal gebieden blijft het verziltingsrisico onzeker gezien het gebrek aan data; deze gebieden zijn aangegeven met een arcering op de kaart. Stedelijk gebied is aangegeven met een grijze kleur, aangezien het verziltingsrisico niet voor stedelijke gebieden is berekend.

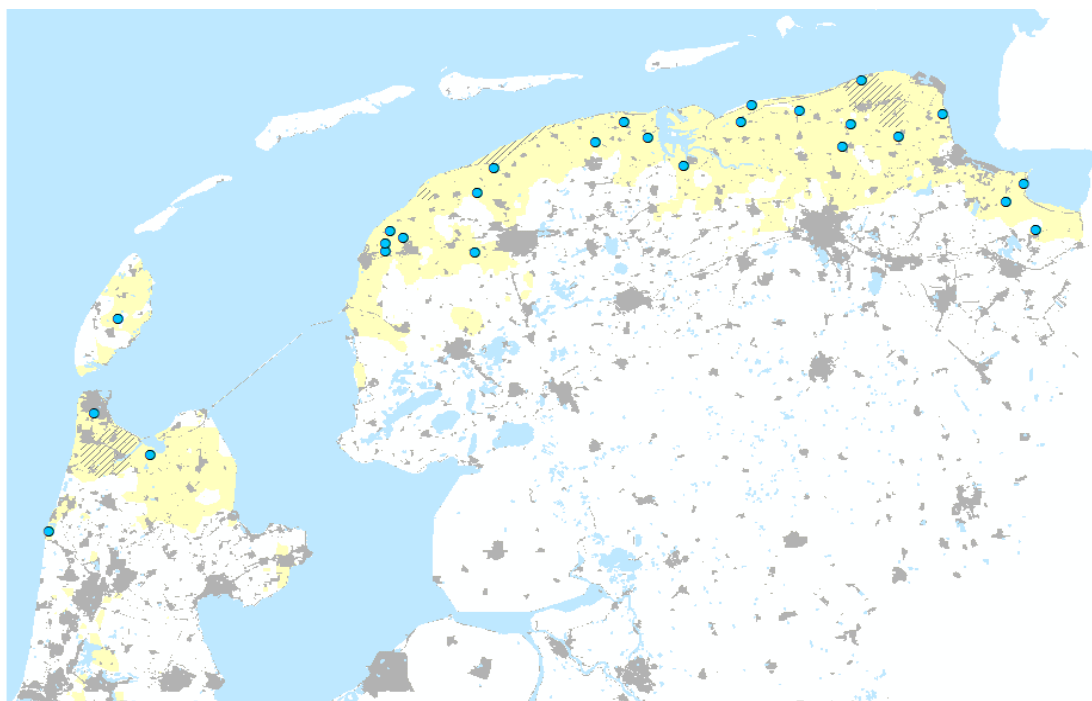
De pixels op de kaart hebben een afmeting van 25 x 25 meter. De onderliggende datasets zijn ontwikkeld voor de regionale schaal; hierdoor kan het risico in werkelijkheid lokaal afwijken, en kan de kaart niet op pixel niveau worden gebruikt.



Figuur 33a en b. Verzilttingsrisico voor de huidige situatie gebaseerd op de dikte van de zoetwaterlens met arcering gebieden met ongerijpte klei aangegeven (a) en kaart zonder deze arcering (b). Het risico is weergegeven voor het vaste land van Friesland & Groningen, Texel en de kop van Noord-Holland. De kaart is geschikt voor gebruik op regionaal niveau, daar het risico in werkelijkheid lokaal kan afwijken.

Controle aan veldmetingen

De verziltingsrisicokaart is vergeleken met 26 geofysica metingen in het veld, verspreid over noord Nederland (zie Figuur 34). De veldmetingen komen goed overeen met de gemiddelde dikte van de zoetwaterlens van de modelstudie, behalve voor profielen met ongerijpte klei (4 locaties). In deze veld metingen is een platte overgang tussen het zoet-zout grensvlak zichtbaar die op de overgang ligt van de gerijpte op ongerijpte klei. In de modelsimulaties is geen rekening gehouden met ongerijpte klei, en in deze berekeningen wordt daarom een dikkere lens gevonden. Het verziltingsrisico wordt in deze profielen dus mogelijk onderschat. Daarnaast zijn er 3 locaties waar het risico wordt overschat (Den Anel, Oosternijkerk en Vrouwenparochie).



Figuur 34. Locaties waar de verziltingsrisicokaart is vergeleken met veldmetingen.

3.4 Conclusie

Aan de hand van modelberekeningen is bepaald dat binnen percelen sloten en drainage aparte systemen zijn. Tot een afstand van ongeveer 30 m heeft een watergang invloed op de grootte van de lenzen, maar op een grotere afstand van watergangen zijn drainagesystemen op zichzelf staande systemen. Dit maakt het mogelijk om drainageberekeningen te doen met 1 drainagebuis.

De drainageberekeningen hebben laten zien wat de invloed van perceeleigenschappen is op de grootte van de zoetwaterlens in homogene profielen. Uitgaande van een brakke of zoute ondergrond zijn de volgende conclusies te trekken:

1. **Drainageafstand:** deze heeft een lineair verband met de dikte van de zoetwaterlens, hoe kleiner de afstand, hoe kleiner de lens.
2. **Doorlatendheid:** deze heeft een logaritmisches verband met de dikte van de zoetwaterlens; hoe hoger de doorlatendheid hoe kleiner de lens.
3. **Kwelflux:** deze heeft een logaritmisches verband met de dikte van de zoetwaterlens; hoe hoger de kwelflux, hoe kleiner de lens.

Bij de aanleg van diepe drainage (type D) wordt de zoute kwel eerder afgevangen. Stroombanen van het infiltrerende zoete regenwater reiken iets dieper (ze buigen pas af richting de drainage onder de grondwaterstand), waardoor de lens ook iets dieper reikt. De grondwaterstand is echter lager en de mengzone groter, waardoor er zich niet meer zoet grondwater in het perceel bevindt.

De inzichten van de grootte van de zoetwaterlens in verschillende bodemprofielen zijn vertaald naar een verziltingsrisicokaart voor de Waddenregio (Zie Figuur 33 en bijlage 5). De kaart laat het risico op verzilting zien voor gedraineerde percelen met een drainafstand van ~10 meter.

Een aantal gebieden met een groot risico vallen op, zoals de Riedpolder (Fr), de Negenboerenpolder (Gr) en de Oostpolder (NH). Het huidige verziltingsrisico is het grootst in gebieden met een grote kwelflux, en bodemprofielen met op een slecht doorlatende laag rondom drain niveau op een doorlatende laag. Een grote kwelflux is terug te vinden in laag gelegen polders of percelen.

De huidige verziltingsrisicokaart laat andere risicogebieden zien dan de Acacia Water verziltingsrisicokaart uit 2011 (Acacia Water, 2011). Dit komt voornamelijk door het gebruik van een verbeterde kwelkaart (de huidige kwelkaart heeft bijvoorbeeld een hogere resolutie) en de beschikbaarheid van nieuwe regionale datasets.

4

Hoe verandert het verziltingsrisico in de toekomst?

4.1 Inleiding

Door klimaatverandering wordt het weer extremer: de winters worden natter en zachter en de zomers warmer en droger. Dit kan ertoe leiden dat 's zomers minder zoet water beschikbaar is wat kan leiden tot een watertekort. Verder stijgt de zeespiegel en daalt de bodem waardoor meer zout water West- en Noord-Nederland binnendringt, de zoute kwelflux en daarmee de verzilting toeneemt (Oude Essink, 2010). In dit hoofdstuk worden de effecten van klimaatverandering, bodemdaling en zeespiegelstijging voor het jaar 2050 op het verziltingsrisico inzichtelijk gemaakt. Ook heeft het droge klimaat van het jaar 2018 veel teweeggebracht voor de landbouw in de Waddenregio. Daarom wordt hier extra aandacht besteed aan het effect van een droog jaar zoals 2018 op het verziltingsrisico. De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

- Wat is de invloed van zeespiegelstijging en bodemdaling op het verziltingsrisico in de waddenregio?
- Wat is de invloed van klimaatverandering op het verziltingsrisico in de waddenregio?
- Wat is de invloed van een extreem droge zomer, zoals in 2018, op het verziltingsrisico in de waddenregio?

4.2 Aanpak

De invloed van zeespiegelstijging en bodemdaling op het toekomstige verziltingsrisico

De zoetwaterlenzen zijn kwetsbaar voor veranderende omstandigheden (klimaatverandering, bodemdaling en zeespiegelstijging) die van invloed zijn op de kweldruk en de hoeveelheid neerslagoverschot. Door de verlaging van het maaiveld (door gas en zoutwinning) en de stijging van de zeespiegel neemt de kweldruk toe. De invloed van zeespiegelstijging en bodemdaling op het verziltingsrisico zijn onderzocht door de toename van kwel als gevolg van deze veranderingen te kwantificeren. Daarmee is een aangepaste kwelkaart gemaakt die aan de hand van de in hoofdstuk 3.2 gehanteerde risicoklassen is gebruikt om een aangepaste verziltingsrisicokaart te maken voor de situatie in 2050.

De invloed van klimaatverandering op het verziltingsrisico

Om de effecten van klimaatverandering te kunnen modelleren is een numeriek grondwatermodel toegepast, waarmee niet-stationaire berekeningen zijn uitgevoerd. Het had de voorkeur om het modelleringsprogramma SV-Office hiervoor te gebruiken. De rekentijden van SV-Office waren echter ondoenlijk lang. Om deze reden is voor deze berekeningen teruggespreng naar het programma SEAWAT omdat hiermee stroming in de verzadigde zone en de effecten van variabele dichtheidsstroming kunnen worden berekend. De niet-stationaire berekeningen zijn uitgevoerd voor 5 bodemtypen, 6 verschillende kwelfluxen, voor het huidige en het toekomstige klimaat.

Gezien het eenvoudiger modelconcept van SEAWAT ten opzichte van de eerder gebruikte modellen in SV-Office kunnen de modelresultaten van SEAWAT alleen globaal gebruikt worden om de effecten van het toekomstige klimaat te kwantificeren. De gemiddelde en minimale diktes van de zoetwaterlenzen van de SEAWAT-resultaten zijn uitgelezen voor de huidige en de toekomstige situatie. Na analyse is besloten om de verandering in lensdikte tussen de simulatie van een *huidig gemiddeld jaar* en de *minimale lensdikte voor een toekomstig droog klimaat* (Wh 2003 scenario) te gebruiken. Deze afname in lensdikte is doorvertaald naar de lensdiktes die m.b.v. het programma SV-Office voor het huidige klimaat zijn berekend. Op deze manier wordt er een toekomstige verziltingsrisicokaart gemaakt met die het effect weergeeft van een toekomstig droog jaar zoals 2003 en 2018.

De invloed van een extreem droge zomer op het verziltingsrisico

Het jaar 2018 is een zeer droog jaar gebleken waarbij in de zomer een vergelijkbaar neerslagtekort is opgetreden als in 1976. Klimaatverandering, waarbij warme droge zomers optreden, lijkt volgens recente wetenschappelijke studies door te zetten^{2, 3}. Deze warmere, droge zomers hebben invloed op de zoetwatervoorraad in de ondergrond.

Met behulp van SEAWAT zijn voor een homogeen bodemprofiel O1 (zand profiel) meerdere jaren doorgerekend met een gemiddeld neerslagtekort met aansluitend een droog jaar (2003). Dezelfde berekeningen zijn uitgevoerd, waarbij neerslag en verdamping zijn aangepast aan de hand van de KNMI - klimaatscenario's voor 2050. Daarbij is het effect van een droge zomer in beide scenario's (huidig en toekomstig) op de zoetwatervoorraad vergeleken. De resultaten zijn ter validatie vergeleken met de CVES-metingen die zijn uitgevoerd in Herbaijum (zie hoofdstuk 5.3.1).

4.3 Resultaten

4.3.1 Zeespiegelstijging en bodemdaling

De toename van de kwel als gevolg van zeespiegelstijging en bodemdaling zijn hieronder gekwantificeerd.

Zeespiegelstijging

Voor de verziltingsrisicokaart van de situatie in 2050 is het effect van de zeespiegelstijging op de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket (en daarmee de kweldruk op het perceel) berekend met de analytische formule van Mazure (1936). Deze formule hangt af van de toename van het waterpeil buitendijks, de afstand tot de dijk, de weerstand van de deklaag, doorlatendheid en dikte van het 1^e watervoerend pakket (kD). Voor de kD waarden zijn gegevens van het NHI en GeoTOP gebruikt.

De toename in kwel is hierna berekend door middel van de volgende formule:

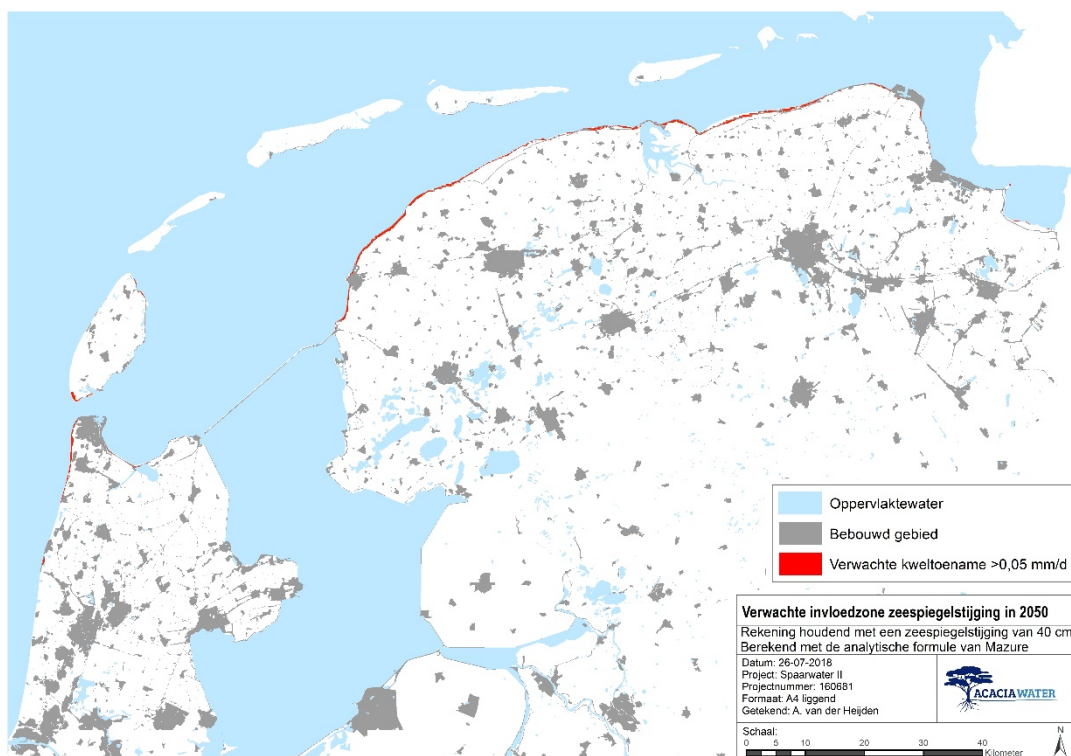
$$\Delta \text{ kwel (m/d)} = \frac{\Delta \text{ stijghoogte (m)}}{\text{verticale weerstand (d)}}$$

Voor het opstellen van de aangepaste kwelkaart is er gewerkt met een zeespiegelstijging van 40 cm (KNMI'14 Wh-W1 scenario).

Figuur 35 laat de invloed zone zien waar in Noord-Nederland de kwel toe gaan nemen op basis van 40 cm zeespiegelstijging in 2050. Het effect van zeespiegelstijging op het verziltingsrisico in beperkt en beïnvloedt ongeveer de eerste 300m vanaf de kustlijn; op de meeste locaties is het effect echter beperkt tot 100 m vanaf de kustlijn. De percelen in die zone kunnen een kweltoename verwachten evenals als een toename van de kwelflux in sloten langs de zeedijk.

² Nature, 14 Augustus 2018, A novel probabilistic forecast system predicting anomalously warm 2018-2022 reinforcing the long-term global warming trend

³ Nature, 20 Augustus 2018, The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation



Figuur 35. De verwachte gebieden in Noord-Nederland waar een toename van de kwel wordt verwacht als gevolg van de zeespiegelstijging in 2050.

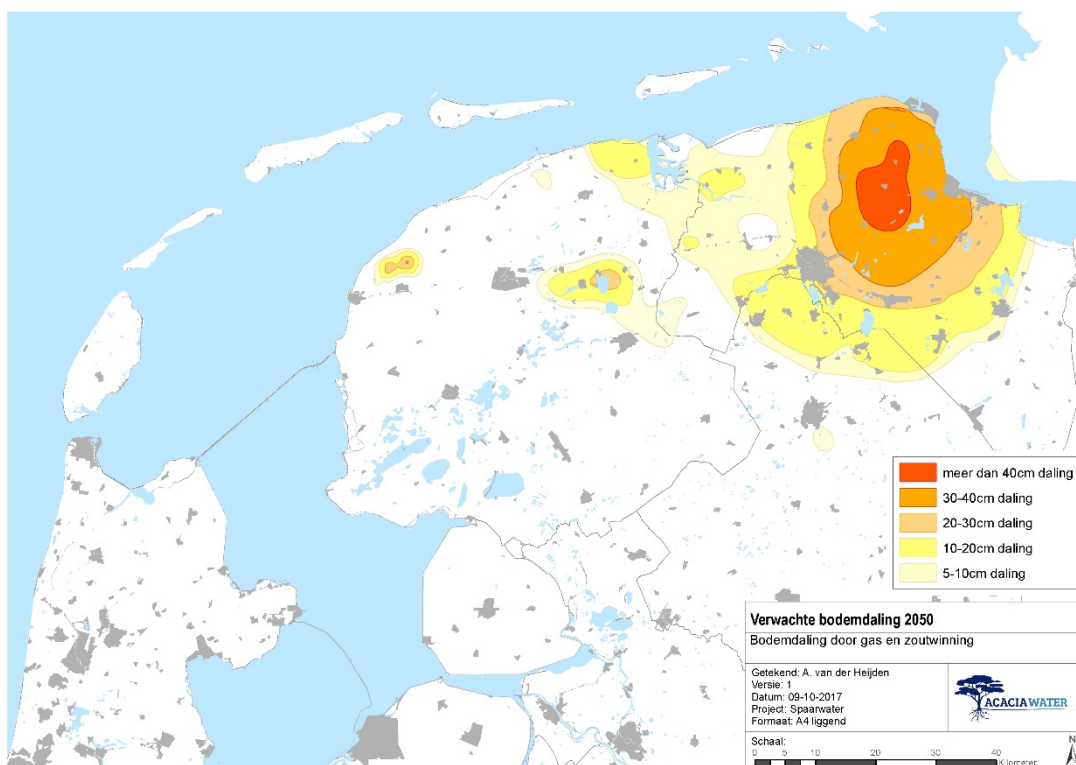
Bodemdaling

Naast zeespiegelstijging heeft de bodemdaling in noord Nederland een grote invloed op de kweldruk. In Friesland draagt voornamelijk de zoutwinning ten noorden van Franeker bij aan de bodemdaling. In Groningen is een groot gasveld aanwezig nabij Slochteren. Figuur 36 toont de verwachte bodemdaling voor het jaar 2050 zoals deze is meegenomen in de toekomstige verziltingsrisico kaart.

De verandering in bodemdaling is eveneens berekend met de formule:

$$\Delta \text{ kwel (m/d)} = \frac{\Delta \text{ stijghoogte (m)}}{\text{verticale weerstand (d)}}$$

De aanname is gedaan dat wanneer bodemdaling plaatsvindt het maaiveld verlaagt en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket onveranderd blijft. In de formule is daarom aangenomen dat de toename van de stijghoogte gelijk is aan de bodemdaling in meters. De toename in kwel is hierna opgeteld bij de kwelflux in de huidige situatie.



Figuur 36. De verwachte bodemdaling voor het jaar 2050 rekening houdend met de gas en zoutwinning in noord Nederland.

Het verziltingsrisico in de situatie 2050, waarbij rekening is gehouden met de invloed van zeespiegelstijging en bodemdaling is weergegeven in Figuur 37. Hierin is ook het effect van de klimaatverandering meegenomen. Vergeleken met het verziltingsrisico in de huidige situatie is het risico toegenomen in de gebieden met bodemdaling. Het effect van zeespiegelstijging op de risico indicatie is beperkt en beïnvloedt ongeveer de eerste 300 m vanaf de kustlijn. Op de meeste locaties is het effect beperkt tot 100m vanaf de kustlijn.

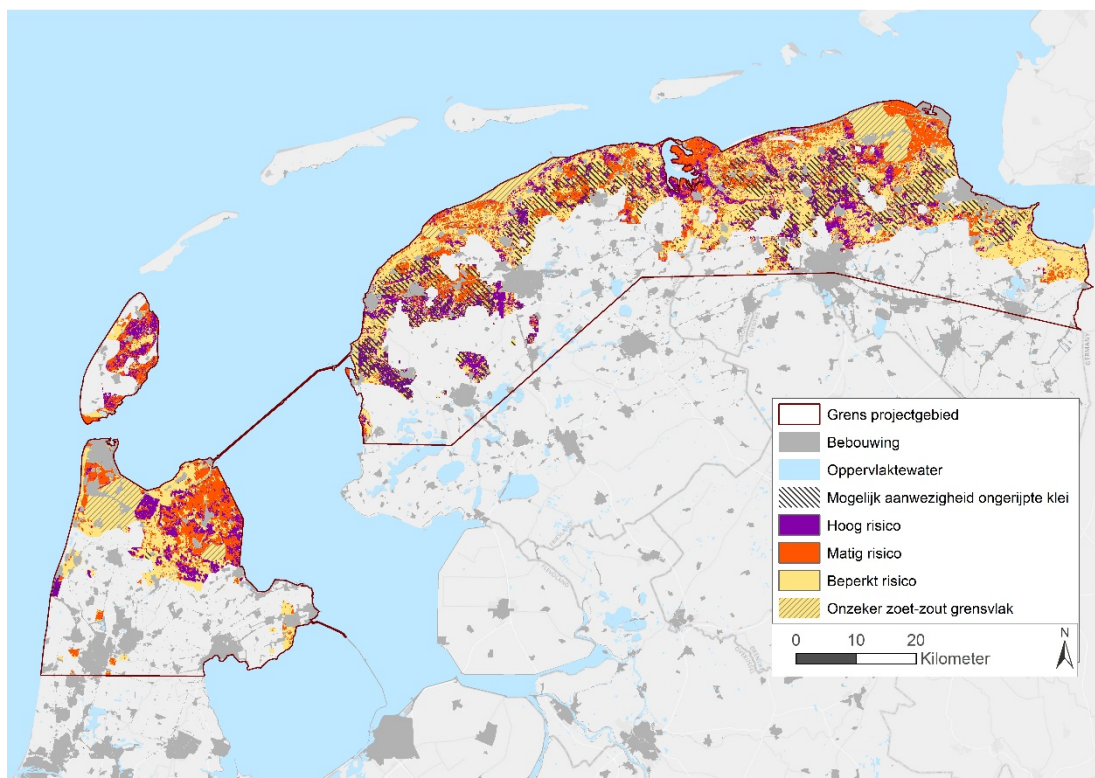
4.3.2 Klimaatverandering

Volgens de 2014 KNMI-klimaatsscenario's⁴ veranderen het neerslagpatroon en de gemiddelde temperaturen in de toekomst. Warme en drogere perioden komen daardoor vaker voor en ook zullen hevige buien vaker optreden. Hierdoor zal de netto grondwateraanvulling geringer zijn. Om inzicht te krijgen in de effecten hiervan zijn modelberekeningen uitgevoerd met een aangepaste neerslagreeks op basis van het KNMI-scenario (Wh 2050).

Klimaatverandering voor het jaar 2050

De nieuwe kwelkaart voor 2050, waarin bodemdaling, zeespiegelstijging en klimaatverandering zijn meegenomen, is gebruikt om een verziltingsrisico kaart voor 2050 te maken. De kaart is weergegeven in Figuur 37 en bijlage 6.

⁴ http://www.klimaatscenario's.nl/toekomstig_weer/transformatie/index.html



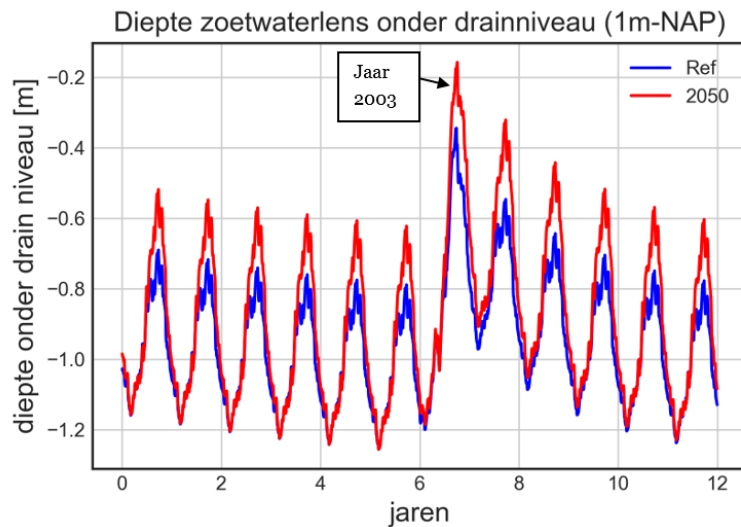
Figuur 37. Verziltingsrisico voor de toekomstige situatie gebaseerd op de dikte van de zoetwaterlens. De kaart is geschikt voor gebruik op regionaal niveau, daar het risico in werkelijkheid lokaal kan afwijken.

Voor de bepaling van de invloed van klimaatverandering is uiteindelijk het programma SEAWAT gebruikt. Dit programma geeft echter veel dynamiek in de resultaten. Het effect van klimaatverandering uit de simulaties bleek een afname van de zoetwaterlens van 30 cm. Bovenstaande kaart is tot stand gekomen door de modelresultaten van SV-Office te corrigeren met 30 cm afname. Hierdoor kan deze kaart alleen gebruikt worden als een globale indicatie.

4.3.3 Invloed van droge zomers op zoetwaterlenzen

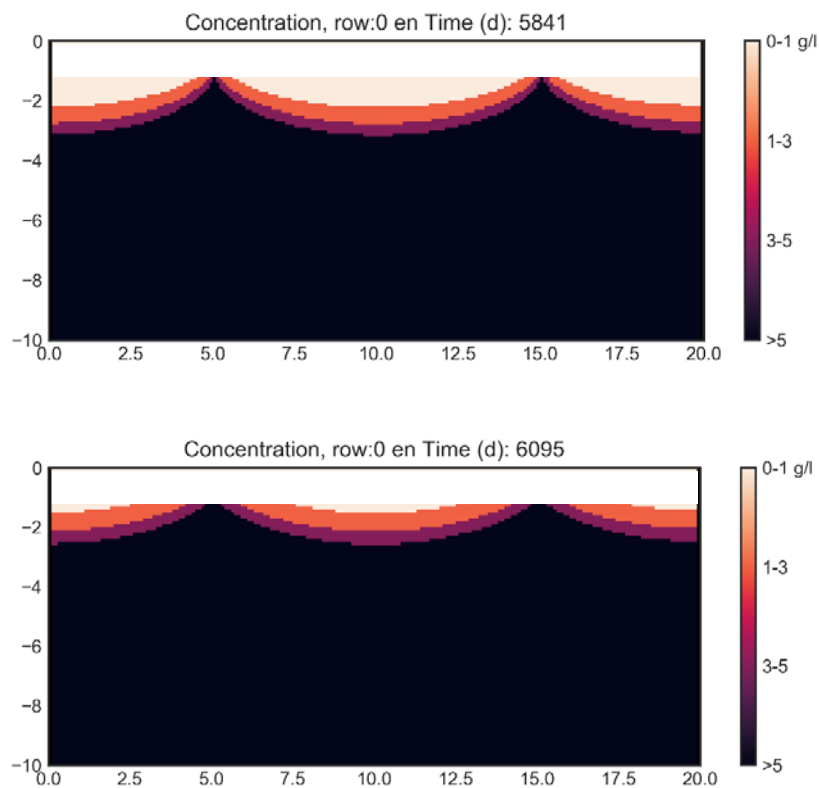
Met behulp van een SEAWAT-modellering is de verandering van de zoetwaterlenzen berekend over 12 jaren, bestaande uit gemiddelde en droge jaren. Deze berekening is uitgevoerd voor de huidige situatie, en voor de toekomstige situatie. Uit deze modelresultaten is vervolgens de diepte van het zoet/brak grensvlak bepaald ten opzichte van het aanlegniveau van de drainage door de tijd. Dit is weergegeven in Figuur 38 voor zowel de huidige als de toekomstige situatie. In de huidige gemiddelde situatie varieert de diepte tussen zomer en winter met circa 0,4 m.

Dit is vergelijkbaar met de fluctuatie in Herbaijum, waar fluctuaties van 0,25 tot 0,30 m zijn gemeten (zie Figuur 47). Door de grotere verdamping ten gevolge van klimaatverandering neemt de jaarlijkse fluctuatie van de dikte van de zoetwaterlens toe in een gemiddelde situatie, de lenzen worden dus in normale zomers dunner.



Figuur 38. Ontwikkeling zoetwaterlens bij bodemprofiel O1 en een kwelflux van 0.1 mm/dag bij het huidige (blauwe lijn) en het toekomstige klimaat (rode lijn). De jaren 1 t/m 5 en 7 t/m 12 hebben een gemiddeld neerslagpatroon, jaar 6 betreft het droge jaar 2003.

In de huidige situatie neemt de dikte van de zoetwaterlens in een droge zomer enkele decimeters extra af ten opzichte van de gemiddelde situatie. Deze afname is in de toekomstige situatie sterker. Uit de berekeningen blijkt verder dat het in beide scenario's een aantal jaar duurt voordat de lens weer hersteld is. Het effect van een droog jaar is vergelijkbaar bij verschillende eigenschappen van de ondergrond. Daaruit volgt dat in bodems met een dunne zoetwaterlens een droog jaar gemakkelijk leidt tot verzilting.



Figuur 39. Dwarsdoorsnede van de chlorideconcentratie [g/l] bij bodemprofiel O1 en een kwelflux van 0.1 mm/dag bij het huidige klimaat, berekend met het SEAWAT-model. Boven: zoetwaterlens bij aanvang van droge jaar. Onder: zoetwaterlens in augustus tijdens het droge jaar.

Daarnaast is modelmatig het effect gereproduceerd dat in Herbaijum is waargenomen in 2018 (zie hoofdstuk 5.3.1); rondom de drains ontstaat een brede zone met zout water wanneer de grondwaterstanden dalen tot onder het drainageniveau (zie Figuur 49).

De verwachting is dat door klimaatverandering, droge zomers zoals in 2018, vaker zullen voorkomen^{2,3}. Een risico voor de toekomst is daardoor dat, als deze droge zomers elkaar vaker opvolgen, het herstel van de zoetwaterlens na in één of enkele winters nog niet voldoende is opgetreden, waardoor de lens in een volgende droge zomer volledig verdwijnt.

4.4 Conclusies

Zeespiegelstijging en bodemdaling leiden tot een toename van kwel, met een verhoogd verziltingsrisico tot gevolg. De verandering als gevolg van zeespiegelstijging beperken zicht tot een zone van maximaal circa 300 m vanaf de kust.

Klimaatverandering heeft tot gevolg dat de grondwateraanvulling afneemt en daarmee de zoetwatervoorraad verkleind wordt. Dit verhoogt op zijn buurt ook weer het verziltingsrisico. Het effect van klimaatverandering uit de simulaties bleek een afname van de zoetwaterlens van 30 cm. In de verziltingsrisicokaart is te zien dat de gebieden waar het verziltingsrisico al aanwezig is, door de klimaatverandering groter worden in omvang. Dit effect is het sterkst in gebieden waar de kwelintensiteit het hoogst is.

Uit modelberekeningen blijkt dat een droge zomer tot gevolg heeft dat de dikte van de zoetwaterlens met enkele decimeters extra afneemt ten opzichte van een normaal jaar. Vooral in gebieden waar reeds sprake is van een dunne zoetwaterlens kan deze lens in een droge zomer geheel verdwijnen. Het duurt meerdere jaren voordat de oorspronkelijke dikte weer wordt bereikt. In 2050 is de afname van de dikte nog groter als gevolg van een nog groter neerslagtekort tijdens droge zomers. Daarnaast neemt de frequentie waarmee droge zomers optreden toe, waardoor gezien de lange hersteltijd van de zoetwaterlens een cumulatief effect ontstaat dat ertoe kan leiden dat de zoetwaterlenzen in de Waddenregio gedeeltelijk verdwijnen.

5 Pilot vergroten zoetwaterlens

5.1 Inleiding

Op de twee pilotlocaties in Herbaijum en Hornhuizen zijn in de periode van 2013 tot en met 2018 metingen uitgevoerd om aan te tonen dat de aanleg van anti-verziltingsdrainage de ontwikkeling van zoetwaterlenzen versterkt en verzilting bestrijdt. Op de pilotlocaties zijn maatregel type A (verhoogd ontwateringsniveau bij bestaande drainage) en type C (verdiepte aanleg met een verhoogd ontwateringsniveau) toegepast op respectievelijk een kleiondergrond (Herbaijum, Friesland) en een zandondergrond met een kleilaag op ongeveer 1,80 m diepte (Hornhuizen, Groningen).

In dit onderzoek zijn de volgende onderzoeksvragen geformuleerd:

- Kan met anti-verziltingsdrainage de zoetwatervoorraad worden behouden of vergroot?
- Hoe kan operationeel beheer het best worden ingericht om regenwater effectief in het perceel vast te houden zonder dat de ontwateringssituatie ongunstig wordt beïnvloed?

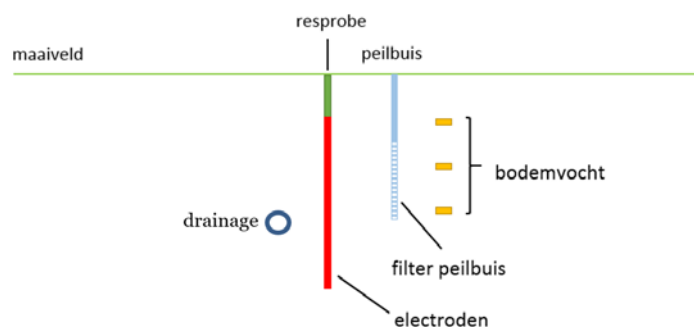
Een randvoorwaarde voor het toepassen van anti-verziltingsdrainage in dit project was dat de zoutbelasting van de drainageafvoer naar het oppervlaktewater niet toeneemt en de ontwatering van het perceel niet verslechtert. In dit hoofdstuk wordt eveneens getoetst of aan deze voorwaarden is voldaan.

5.2 Aanpak

5.2.1 Pilotpercelen

Zoetwatervoorraad en operationeel beheer

Voor het bepalen van de invloed van de drainage op de zoetwaterlens en de benodigde duur van de verhoogde uitstroomniveau resulterend in verhoogde grondwaterstanden en de verandering van het waterbergend vermogen in de bodem, zijn op de pilotpercelen meerdere meetapparaten geïnstalleerd. Daarbij zijn de grondwaterstanden, het waterniveau in de drainput, de weerstandsverandering (met resprobes) in de ondergrond op één punt (groei en afname zoetwaterlens), het bodemvochtgehalte, de drainage debieten en de geleidbaarheid van het drainwater gemeten. Een schematische weergave van de meetopstelling ten opzichte van de drainage is weergegeven in Figuur 40.



Figuur 40. Meetopstelling op de pilotpercelen, met resprobes, peilbuizen en bodemvochtsensoren.



Figuur 41. Inspectie en peilsturingsput.



Figuur 42. Foto van een van de meetopstellingen in Herbaijum met resprobe, peilbuizen en bodemvochtsensoren (links) en het uitvoeren van een CVES in Herbaijum (rechts).

Naast metingen middels permanent aanwezige meetapparatuur, zijn op de percelen over twee trajecten herhalingsmetingen met behulp van de CVES-methode (*continuous vertical electrical sounding*) uitgevoerd (zie Figuur 42 rechts), wat een 2D profiel van het elektrische weerstandsverloop oplevert (zie bijlage 1 voor de uitleg en Bijlage 2 en 3 voor de metingen). Het weerstandsverloop is een maat voor het zoutgehalte: zoet water geleid bijna niet, en zout water geleid goed. Zoet water heeft dus een hogere weerstand en zout water een lagere weerstand.

Deze herhalingsmetingen zijn na elke zomer uitgevoerd - na afloop van een periode met een neerslagtekort - en na de winter - als gedurende een aaneengesloten periode van enkele maanden een verhoogd ontwateringsniveau is gehanteerd.

Doordat de bodem niet verandert, zijn verschillen die tussen de meetmomenten waarneembaar zijn, toe te schrijven aan de verandering in de waterkwaliteit of van het bodemvochtgehalte.

Met deze meetgegevens is na meerdere jaren van toepassing van een verhoogd ontwateringsniveau inzicht verkregen in de fluctuatie van de zoetwaterlens en de groei. Deze data wordt vervolgens gebruikt om met modellen de situatie na te rekenen. Met behulp van de modellen zijn resultaten geëxtrapoleerd met het oog opschaling van de pilot (hoofdstuk 3 en 4).

Het effect van operationeel beheer van het ontwateringsniveau wordt inzichtelijk gemaakt door het zoutgehalte en afvoer uit de drains te meten. De effecten bij een verschillende duur van verhoging van het uitstroomniveau en het effect op het grondwater in het perceel van het verlagen van het uitstroomniveau zijn aan de hand van de metingen inzichtelijk gemaakt.

Zoutbelasting naar het oppervlaktewater

Met de geïnstalleerde meetapparatuur is inzichtelijk wanneer water wordt afgevoerd (debietmeting) en hoe zout het water is (geleidbaarheidsmeting). Deze data, gecombineerd met de wateranalyse data over de samenstelling van het water, is vervolgens gebruikt om de zoutbelasting uit het proefvak te vergelijken met het referentievak waar geen maatregel is toegepast.

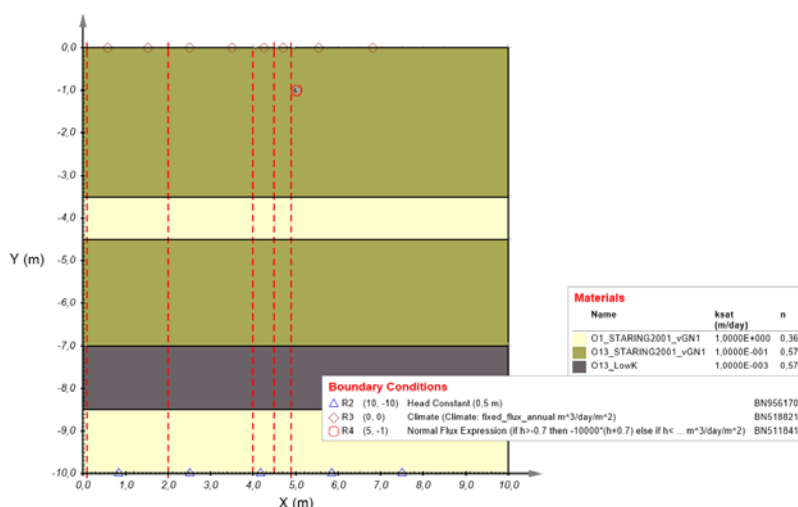
5.2.2 Gebiedsdekkende kaarten

Het effect van anti-verziltingsdrainage type A op de zoetwatervoorraad voor verschillende bodemtypes is berekend met SVOOffice. Dit 2D-model koppelt een hydrologisch model met een chemisch model voor zouttransport, en berekent de stationaire fluxen van water en zout. De simulaties gaan uit van een perceel met buisdrainage en een zoute kwelflux, eerst zonder en vervolgens mét anti-verziltingsdrainage toegepast. De modelresultaten zijn vervolgens vertaald naar een vlakdekkende kaart voor het projectgebied.

Model ontwerp

Het model simuleert een doorsnede van een perceel rondom een drainagebuis (zie *Figuur 43*). Onder de huidige situatie wordt een draindiepte van 1 m aangenomen. Het peilniveau van de anti-verziltingsdrainage in de berekeningen ligt 30 cm hoger. Aangezien dit een relatief groot verschil in peilniveau is geven de berekeningen het effect weer wanneer het peilniveau aanzienlijk wordt verhoogd.

De dimensies van het model zijn gebaseerd op een aantal aannames. Uitgegaan is van een modelbreedte van 10 m, met de drainagebuis in het midden. Dit ontwerp komt overeen met een drainafstand van 10 m. De diepte van het model is ook 10 m, met de deklaagweerstand vanaf 7 m diepte.



Figuur 43. Voorbeeld van de modelopzet voor een gelaagd profiel met klei rond het drainageniveau inclusief de drainagebuis (midden) en weerstandslaag (donkerbruin). Informatie over de bodemtypes en randvoorwaarden staan rechts.

Randvoorwaarden

De zijkanen van het model liggen op de waterscheiding midden tussen drainagebuizen, waardoor gekozen is voor een 'no flux' randvoorwaarde, zowel voor water als voor zout. Aan de bovenrand van het model is een neerslag van 0,8 mm/d met een zoutgehalte van 10 mg/L opgelegd. Onderin het model is de randvoorwaarde een vaste stijghoogte. Water dat via de onderkant van het model het perceel instroomt heeft een concentratie van 10.000 mg/L.

De drainagebuis heeft een 'review' randvoorwaarde voor de simulaties onder de huidige situatie. In de anti-verziltingsdrainage scenario heeft de drainagebuis een vergelijking als randvoorwaarde. Door deze vergelijking stroomt water uit het perceel als de stijghoogte, h , groter is dan het verhoogd peil (0,7 m onder maaiveld). Als h in het perceel lager is dan het verhoogd peil stroomt water het perceel binnen.

In de werkelijkheid zal deze aanvulling alleen mogelijk zijn als er voldoende oppervlaktewater beschikbaar is om het peilverschil in stand te houden.

Initiële waarden

Voor het hydrologisch model is voor de initiële waarden aangenomen dat het grondwater gelijk staat aan het peilniveau. Dit is 1 m onder maaiveld voor de huidige situatie, en 0,7 m onder maaiveld voor de simulaties met anti-verziltingsdrainage.

Voor het chemisch model is een vergelijking gebruikt om een geleidelijke overgang tussen zoet en zout water op 1 m diepte. Waarbij het diepe zoute water een concentratie heeft van 10.000 mg/l en het zoete water een concentratie heeft van 10mg/l met een overgangszone van 20cm intitueel.

Invoergegevens

De bodemtypen zijn gebaseerd op de GeoTOP database. GeoTOP verdeelt de ondergrond in lagen van 50 cm, onderverdeeld in klei, veen of zand. De bodemeigenschappen zijn gebaseerd op Staring bodemtypes, waarbij de doorlatendheid van de weerstandslaag is aangepast (zie Tabel 1).

Tabel 1. Overzicht van Staring bodemtypes en doorlatendheden

Bodemtype	Doorlatendheid (m/d)	Staring bodemtype
Klei	0,1	O13
Veen	0,3	O17
Zand	1,0	O1
Weerstandslaag	0,001	O13

Vijf representatieve bodemtypen in het verziltingsrisicogebied zijn gemodelleerd (Tabel 2). De selectie aan bodems is gemaakt op basis van mate van voorkomen in het projectgebied in combinatie met het te verwachten verschil in effect tussen bodemtypen onderling. De bodemtypen komen veel voor in het projectgebied, waarvan bodemtype T3 het meest.

Tabel 2. Overzicht van opbouw van vijf gesimuleerde bodemtypes

Bodemtype	T1	T3	T5	T13	T15
0-50 cm	Zand	Klei	Klei	Klei	Veen
50-100	Zand	Klei	Klei	Klei	Veen
100-150	Zand	Klei	Zand	Klei	Veen
150-200	Zand	Klei	Zand	Klei	Klei
200-250	Zand	Klei	Zand	Klei	Klei
250-300	Zand	Klei	Zand	Zand	Klei
300-350	Zand	Klei	Zand	Zand	Klei
350-400	Zand	Zand	Zand	Klei	Klei
400-450	Zand	Zand	Zand	Zand	Klei
450-500	Zand	Klei	Klei	Zand	Klei

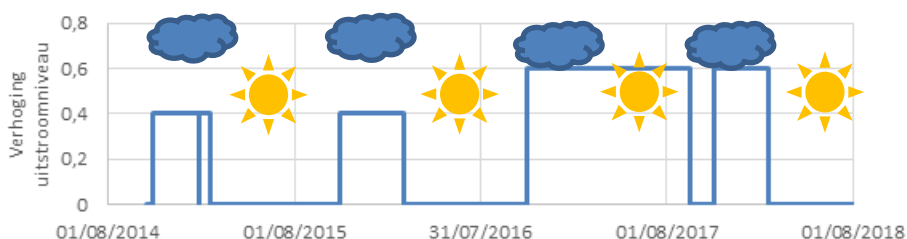
De kwelflux is aan het model toegevoegd op basis van een opgegeven stijghoogte onderin het model en een weerstandslaag in de bodem. Drie combinaties van stijghoogte en deklaagweerstand zijn gebruikt om verschillende kwelfluxen te simuleren. In alle simulaties is een stijghoogte van -0,5 m boven maaiveld gebruikt. Deze stijghoogte komt veel voor in het projectgebied volgens de voorjaarsstijghoogtekaart afkomstig van de Grondwatertools van de Geologische Dienst Nederland. Deklaagweerstand van 500, 1000 en 1500 dagen zijn toegepast door de dikte van de weerstandslaag aan te passen. De doorlatendheid van de weerstandslaag is in alle simulaties gelijk gehouden. De combinaties van stijghoogte en weerstand komen overeen met kwelfluxen tussen 0,3 en 1 mm/d met een drainageniveau van 1 m onder maaiveld.

5.3 Analyseresultaten

5.3.1 Herbaijum

Drainafstand (11 m)

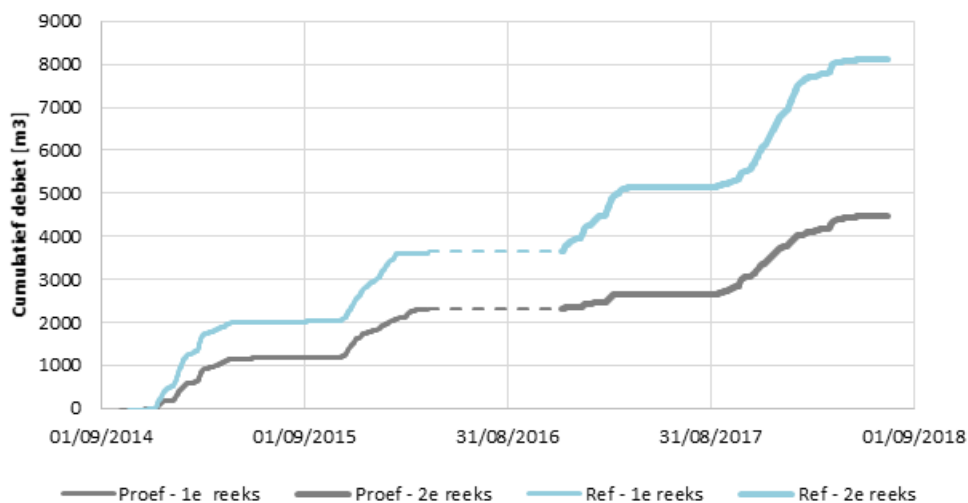
Gedurende de proef is het ontwateringsniveau van de drainage in het proefvak periodiek opgezet. Na elke winterperiode is het niveau weer verlaagd tot het referentieniveau, vanwege het feit dat dit een kleiperceel is wat over een langere periode moet uitdrogen, dan een zandperceel. Sinds najaar van 2016 is ook na de winter langdurig een verhoogd uitstroomniveau gehanteerd. Het verhoogde uitstroomniveau is het hele jaar gehandhaafd om al het water vast te houden. Figuur 44 laat het verloop van het verhoogde uitstroomniveau zien.



Figuur 44. Verhoogd drainage uitstroomniveau van de proef in het kleiperceel te Herbaijum. In de figuur is het dynamisch beheer van het ontwateringsniveau te zien. Het verhoogde drainageniveau is alleen in de winter toegepast. In 2017 is als proef het drainage niveau het hele jaar verhoogd geweest.

Door het verhoogde uitstroomniveau wordt in het proefvak minder water afgevoerd door de drainage dan in het referentievak. Figuur 45 laat de cumulatieve gemeten debieten zien in het proef- en referentievak. Door de zoute omstandigheden hebben de litertellers van april 2016 tot en met oktober 2016 niet gewerkt.

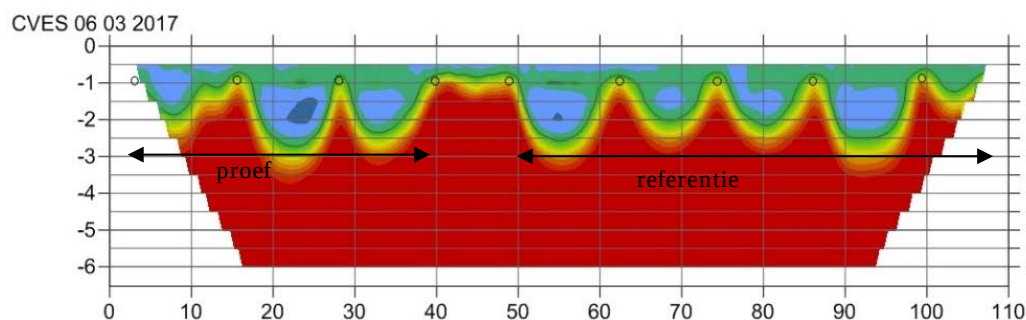
Uit de lagere afvoer kan worden opgemaakt dat het hanteren van een verhoogd ontwateringsniveau ertoe leidt dat er meer water wordt vastgehouden en minder kwel wordt afgevoerd in het proefvak ten opzichte van het referentievak: verrekend naar het oppervlak van het deelgebied is er van september 2014 tot april 2016 116 mm meer water is vastgehouden in het proefvak, wat overeenkomt met 41% minder afgevoerd water. Na deze periode is 189 mm meer water vastgehouden, wat overeenkomt met 55% minder afgevoerd water.



Figuur 45. Gemeten debieten uit de proef en referentiepercelen tussen september 2014 en april 2016 en tussen december 2016 en augustus 2018

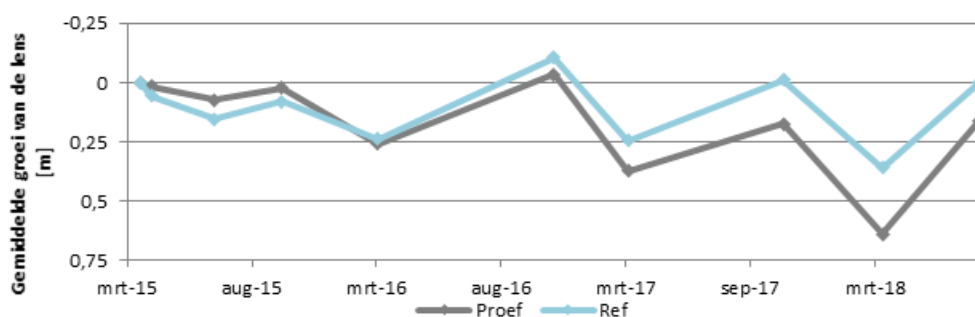
De dikte van de zoetwaterlenzen is op verschillende momenten bepaald aan de hand van de bodemweerstand, die is vastgesteld aan de hand van CVES-metingen (alle metingen uitgevoerd in Herbaijum, zijn opgenomen in bijlage 2).

Eén van de resultaten van deze metingen is te zien in Figuur 46. Van de in totaal 10 zoetwaterlenzen (5 in proef en 5 in referentie) zijn er 8 zichtbaar op deze meting: 3 in het gemeten proefvak en 5 in het gemeten referentievak.



Figuur 46. CVES (Continuous Vertical Electrical Sounding) metingen (maart 2017) van het referentievak (rechterkant figuur) en proefvak (linkerkant figuur). Op beide perceelsdelen zijn duidelijke zoetwaterlenzen aanwezig tot ver onder de drainage. De watergangen bevinden zich op -20 en +110 m.

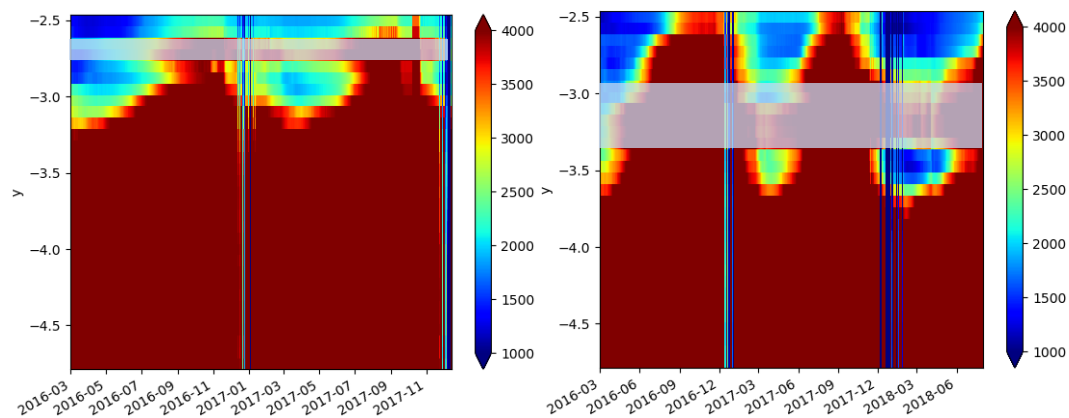
Op basis van de reeks CVES-metingen die is uitgevoerd over de duur van het project, is voor zowel de proef als voor de referentie de gemiddelde verandering van de grootte van de lenzen uitgerekend. Het resultaat is weergegeven in Figuur 47. De figuur laat duidelijk zien dat gedurende de duur van de proef de gemiddelde dikte van de lenzen in het proefvak groter is geworden dan in het referentievak.



Figuur 47. Gemiddelde verandering van de diepte van het zoet-zout grensvlak (150 Ohm m) bij toepassing van anti-verziltingsdrainage (grijs) en zonder anti-verziltingsdrainage (blauw) ten opzichte van de eerste CVES-meting van 20 maart 2015.

In Figuur 47 is te zien dat de toename van de dikte in de periode 2014-2015 en 2015-2016 beperkt was, terwijl de toename vanaf het najaar van 2016 groter was. Dit valt samen met het hanteren van een ononderbroken periode van een verhoogd ontwateringsniveau, terwijl in voorgaande jaren het niveau aan het eind van de winter telkens werd verlaagd. Ook is in de laatste twee winters een grotere verhoging gehanteerd (0,6 m) dan in voorgaande jaren (0,4 m). Deze waarneming is een sterke aanwijzing dat het operationeel beheer van het ontwateringsniveau een belangrijke invloed heeft op de (snelheid van de) ontwikkeling van de zoetwaterlens.

De grafiek laat duidelijk zien dat de zoetwaterlens fluctueert, gedurende het jaar, maar dat deze in het proefdeel gegroeid is ten opzichte van het referentiedeel. In totaal is de zoetwaterlens gedurende de proef ongeveer 30 cm gegroeid, gemiddeld 10 cm per jaar.



Figuur 48. Gemeten weerstandsverloop met de Resprobe in Herbaijum in de lenzen in het referentiedeel op 92 m (links) en in het proefdeel op 22 m (rechts). De meting links loopt van maart 2016 tot en met december 2017. De meting rechts loopt van maart 2016 tot juli 2018.

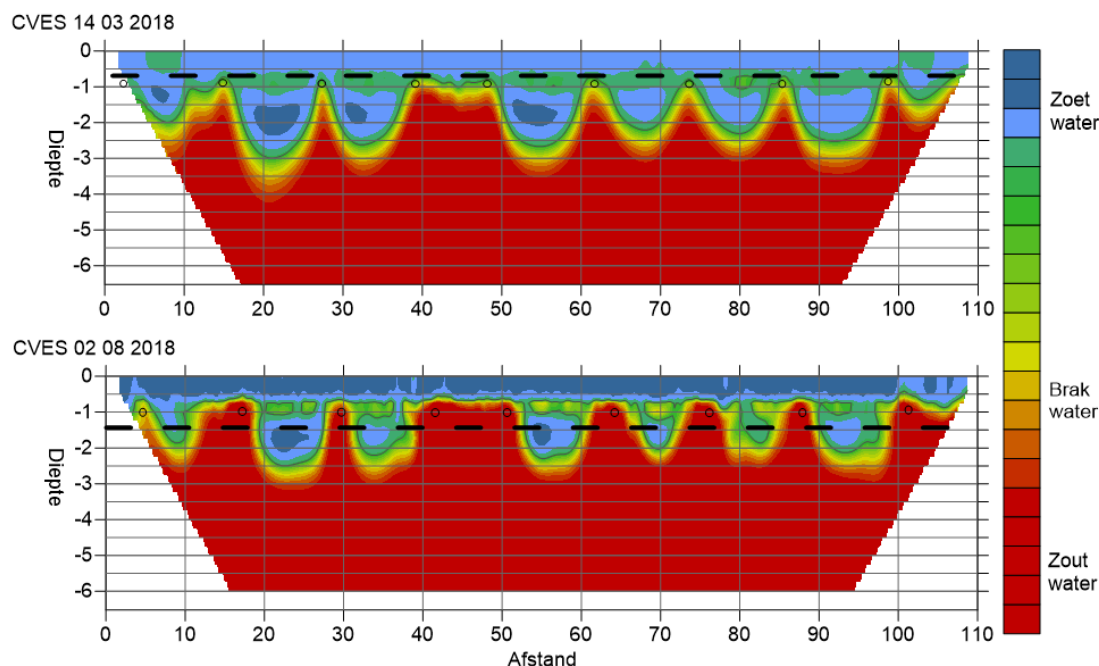
Figuur 48 laat de gemeten verandering van de bodemweerstand zien gemeten met de Resprobe op een diepte van 2,5 tot 4,5 m. De verandering in de weerstand van de bodem is het gevolg van de verandering van de waterkwaliteit (zoet is blauw en rood is zout).

Allereerst wordt opgemerkt dat bij de start van het project de diepte van de lenzen verschillend was, de referentielens (op 94 m in de CVES-meting van Figuur 46) reikte ongeveer 3,1 m diep, terwijl de proef lens tot ongeveer 3,4 m diep reikte (op 22 m in de CVES-meting van Figuur 46).

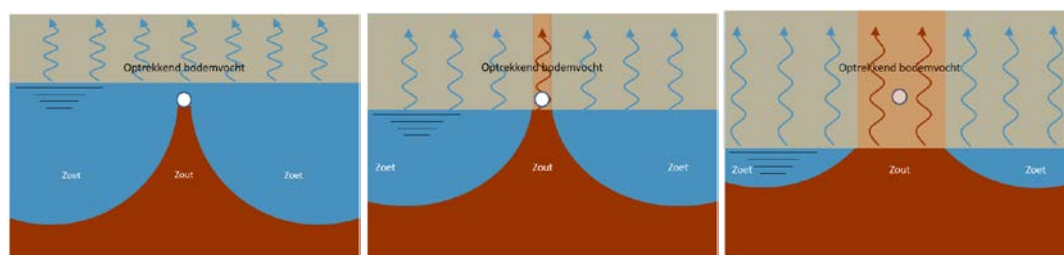
Als gevolg van de proef is echter te zien dat de maximale diepte van de zoete zone in het referentiedeel over de meet periode ongeveer gelijk is gebleven. In het proefdeel is deze in 2017 iets dieper komen te liggen en is duidelijk dat in de winter van 2018 heel veel zoet water aanwezig is (zeer blauw). De toename is ongeveer 0,1 m per jaar wat overeenkomt met de groei die in de CVES is gemeten. Wat verder opvalt aan de Resprobe metingen is dat de zoetwaterlens in het referentieperceel met 0,5 m en in het proefperceel met ongeveer 1 m varieert.

In de zomer is een belangrijk effect van opkegeling van zout water ter plaatse van drainagebuizen in combinatie met zeer droge omstandigheden waargenomen. In winterperioden is er bij dit type systeem sprake van opkegeling direct onder de drain. In de CVES-meting in de zomer van 2018 (Figuur 49) is te zien dat in zowel het proef- als het referentievak rondom de drains een bredere zone is ontstaan waar zout water voorkomt dan in de wintersituatie. De opkegeling kan in droge tijden voor optrekkend zout boven de drains zorgen: naarmate het grondwater verder uitzakt (vanwege gewasverdamping aan de oppervlakte), komt de grondwaterstand verder onder de drains. Vanaf het freatische grondwaterniveau wordt het bodemvocht geleverd, dat middels de capillaire werking omhooggaat. Hoe meer het grondwater gebruikt wordt, en het grondwaterniveau dus uitzakt, hoe breder de zone wordt van waaruit zoute grondwater capillair kan opstijgen. Dit proces is schematisch weergegeven in Figuur 50.

Dit proces kan zeer snel optreden in de zomer als gevolg van gewasverdamping, terwijl het ongedaan maken van dit proces veel langzamer gaat (zie ook de berekeningen in paragraaf 4.3.3). Dit effect treedt vermoedelijk minder sterk op bij verdiepte aanleg van een drainagesysteem met een verhoogd ontwateringsniveau (type C); de zoetwaterzone wordt bij dat type systeem gelijkmatiger verdeeld, waarbij ook ter plaatse van de drains een zoetwaterzone wordt opgebouwd. In zeer droge jaren, als het grondwater zelfs uitzakt tot onder het nieuwe verdiepte niveau van de drainage, kan het capillair optrekken van zout grondwater echter alsnog optreden.



Figuur 49. Impact van droogte op de breedte van de zone van optrekkend zout. De zwarte lijn is het freatisch grondwaterniveau, de cirkels zijn de locaties van de drains. Te zien is dat de lenzen in augustus 2018 kleiner zijn ten opzichte van maart 2018. In de omgeving van de drains is in augustus 2018 een veel bredere zone met zout capillair water aanwezig dan in maart 2018.

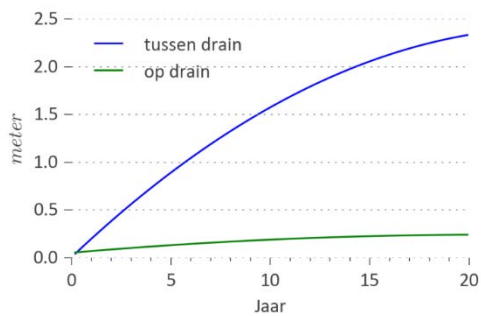


Figuur 50. Als gevolg van uitzakkende grondwaterstanden, stijgt de onderkant van de zoetwaterlens omhoog en zakt het grondwater onder het niveau van de drainage; de zoute opkegeling onder de drains resulteert in een steeds bredere zone van zoute bodemvocht in de onverzadigde zone (rode pijlen). Hoe verder het grondwater uitzakt, hoe breder deze zoute zone wordt.

Gemeten versus gemodelleerde groei van de zoetwaterlens

In Spaarwater I is met een modelberekening uitgerekend hoe snel de van de lens tussen de drain kan groeien. De modellen gaven bij een gemiddeld neerslagoverschot een groei aan van 0,2 m per jaar (zie Figuur 51). In Figuur 47 is te zien dat over een periode van 3 jaar (tussen maart 2015 en maart 2018) de lens met ongeveer 30 cm extra is gegroeid ten opzichte van de referentie. Dit is dus een groei van 10 cm per jaar.

De werkelijke groei is kleiner dan gemodelleerd, wat mogelijk te wijten is aan aangenomen doorlatendheid van de bodem of de gemodelleerde grondwateraanvulling en of kwel. Zowel de modelresultaten als de metingen laten echter zien dat er binnen de 3 jaar daadwerkelijk een groei van de zoetwaterlenzen is opgetreden.

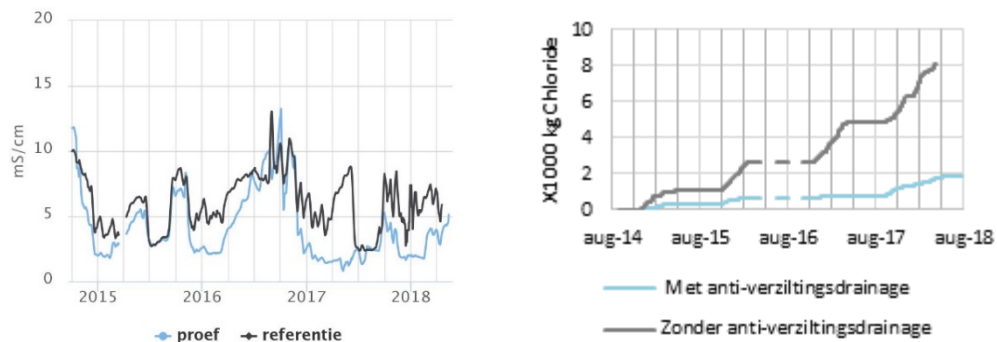


Figuur 51. Toename van de berekende dikte van de zoetwaterlens in de tijd in Herbaijum (1000 mg chloride/l)

Zoutbelasting

Het toepassen van de maatregel heeft ook een effect op het zoutgehalte van het afgevoerde water. Uit de geleidbaarheidsmetingen van de afvoer uit het perceel blijkt dat de EGV-waarde (een maat voor het zoutgehalte) van de drainageafvoer sinds de start van de proef lager is geworden dan op het referentievak. In Figuur 52 (links) is zichtbaar dat het zoutgehalte in het proefvak structureel lager is dan op het referentievak, wat ook een belangrijke aanwijzing is voor het toenemen van de zoetwatervoorraad in het perceel. Gemiddeld is het afgevoerde drainagewater in het proefvak 30% zoeter.

Opvallend is dat in de EGV van het afgevoerde drainagewater over de hele meetperiode (2014 tot en met 2018) niet onder de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (grens voor zoet water) is gekomen. Dit is duidelijk anders dan op andere percelen is gemeten (zie de Spaarwater rapportage van eigen watervoorziening). Dit hangt er mogelijk mee samen dat het perceel in Herbaijum een kleiperceel is, waar piekafvoeren sterk worden afgevlakt en opmenging met zoute kwel rond de drains daardoor meer plaatsvindt.



Figuur 52. Het lopend gemiddelde (100 dagen) van de EGV-waarden van het drainagewater (links) en de totale cumulatieve zoutbelasting naar de sloot (rechts) per perceeldeel in Herbaijum (drainageafstand 11 m).

De zoutbelasting vanuit de drainage naar het oppervlaktewater is berekend aan de hand van de geleidbaarheidsmetingen en afvoerdebieten, zie Figuur 52 (rechts). De zoutbelasting (in kg chloride) naar de sloot is vanaf oktober 2016 in het proefvak 81% lager dan in het referentievak. Daarmee wordt in dit perceel voldaan aan de randvoorwaarde dat anti-verziltingsdrainage niet leidt tot een vergroting van de zoutbelasting.

Ontwatering perceel

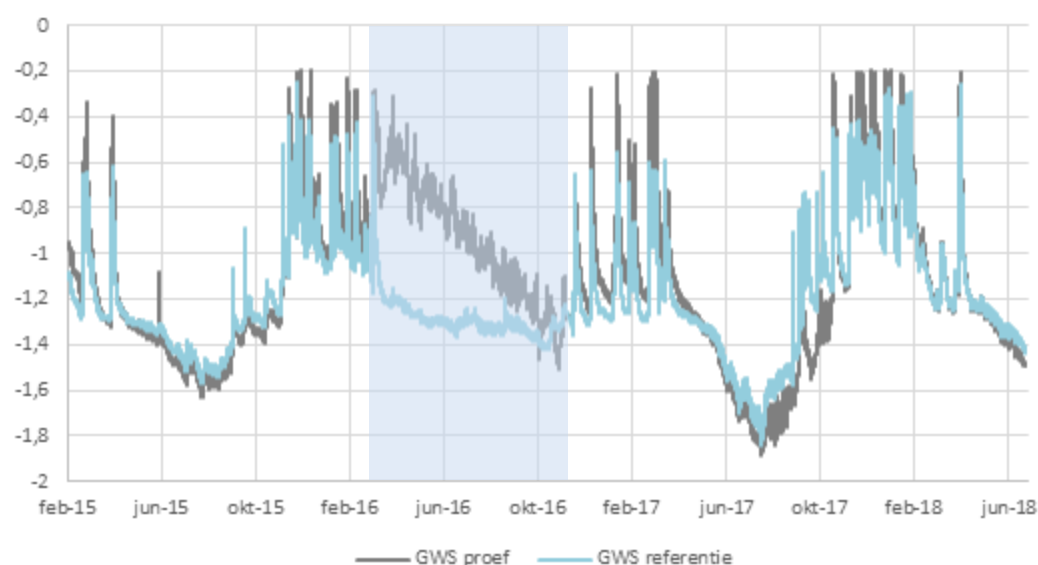
Toepassing van anti-verziltingsdrainage op het kleiperceel in Herbaijum heeft erin geresulteerd dat de gemiddelde grondwaterstanden tussen een perceel met en zonder anti-verziltingsdrainage redelijk vergelijkbaar zijn (zie Figuur 53).

In de winter hangt het optreden van verhoogde grondwaterstanden in het perceel vooral samen met de beperkte doorlatendheid van de kleibodem: in de winter is de klei verminderd doorlatend, doordat de scheuren (secundaire porositeit) zijn dichtgezwollen. In 2017 is het ingestelde drainage niveau het hele jaar verhoogd geweest, terwijl de daling van het grondwater in het voorjaar redelijk gelijk opgaat in zowel proef als referentie. Mogelijk dat dit komt doordat het dalen van de grondwaterstand in het klei perceel vooral gebeurt, door het op gang komen van de grasverdamping. Het gehanteerde ontwateringsniveau lijkt daardoor in dit kleiperceel weinig invloed te hebben op de optredende grondwaterstanden.

Opgemerkt wordt dat in de periode van 1 maart 2016 tot en met 1 december 2016 de peilbuis in het proefplot onverklaarbare grondwaterstanden vertoonde. In deze periode was er geen verhoogd drainageniveau ingesteld. Deze periode is daarom niet meegenomen in het berekenen van de statistiek (zie Tabel 3). Omdat de meetperiode van het project niet lang genoeg was voor het bepalen van een GHG volgens de standaard methodiek, is gebruik gemaakt van percentielwaarden voor het bepalen van de statistiek. De tabel laat zien dat de gemiddelde grondwaterstand bijna niet veranderd is. De GHG is met 14 cm toegekomen.

Tabel 3. GHG, GG en GLG bij proef en referentie in Herbaijum over de periode 1 maart 2015 tot en met 1 maart 2016 en 1 december 2016 tot en met 1 juni 2018.

Meter min maaiveld proefvak	GHG (15%)	GG	GLG (85%)
Proefvak	-0,75	-1,20	-1,51
Referentievak	-0,89	-1,23	-1,44



Figuur 53. Grondwaterstandsverloop van de peilbuizen in het proefvak (grijs) en in het referentievak (blauw) van het perceel in Herbaijum van 2015 tot en met 2018.

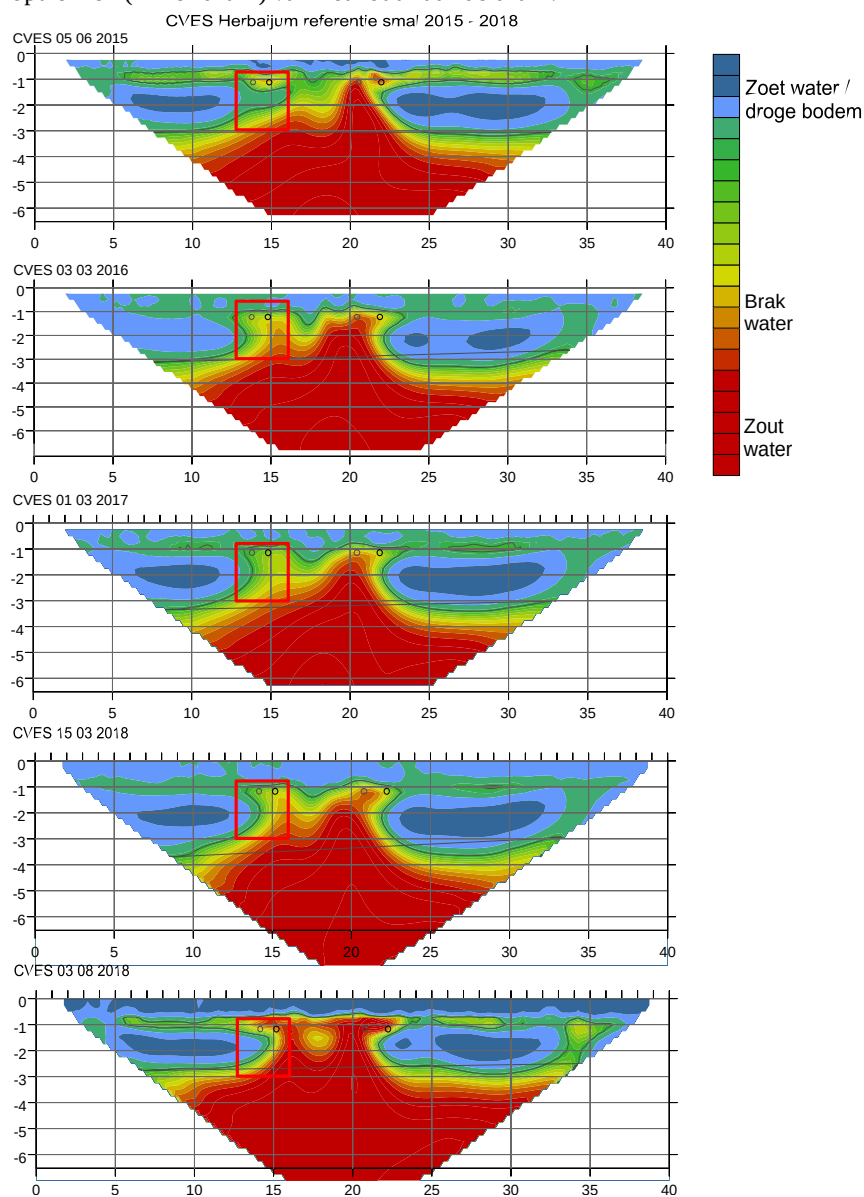
Drainafstand (8 m)

Op dit deel van het perceel is de drainage aangepast door naast de oude drainage, die maar beperkt werkte, nieuwe drainage aan te leggen. Op dit deel van het perceel is geen verhoging van het drainageniveau gehanteerd. Het effect van de veranderde ligging van de drainage en een beter functionerende drainage is dat er meer grondwater uit de ondergrond wordt afgevoerd en daardoor minder zoet water in het perceel wordt opgeslagen.

In Figuur 54 zijn de resultaten van de CVES-metingen weergegeven met daarin de oude drains (grijze cirkels) en de nieuwe drains (zwarte cirkels); in bijlage 2 zijn alle CVES-metingen die hier zijn uitgevoerd weergegeven.

In de figuur is in het rood omlijnde deel (nieuwe drainage naast drainage die zeer slecht functionerende) te zien dat verzilting optreedt ter plaatse van de nieuwe drains. Verzilting is een proces wat in de zomer als gevolg van capillaire opstijging van bodemvocht, zeer snel kan optreden. De aanleg van de nieuwe drainage maakt dus dat zout water steeds ondieper voorkomt. In de zomer treedt er capillaire opstijging plaats. In de winter voert de drainage meer water af, waardoor de opkegeling onder de drain niet wordt weggespoeld. Daarnaast is uitspoeling een veel trager proces dan verzilting, omdat verzilting directe verticale opstijging is, terwijl uitspoeling lange stroombanen volgt vanaf maaiveld via de zoetwaterlens naar de drain. Dit stromingsproces in de winter gaat veel langzamer dan het proces van capillaire opstijging in de zomer (zie ook de resultaten van de modelberekening in paragraaf 4.3.3).

Dit kan worden verklaard doordat de nieuwe drainage meer water afvoert, wat leidt tot een vermindering van de zoetwatervoorraad indien geen drainage uitstroomniveau verhoging wordt gehanteerd. Ook is te zien dat aanleg van drainage binnen ongeveer 3 jaar leidt tot het verschuiven (rechter drain) dan wel optrekken (linker drain) van het zout naar de drain.

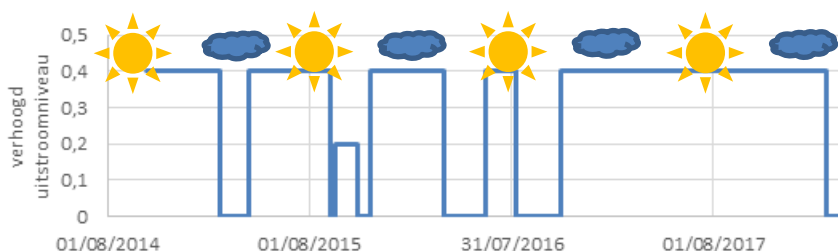


Figuur 54. CVES-metingen van juni 2015, maart 2016, maart 2017 en maart en augustus 2018 van het oostelijke smalle deel van het perceel (nummer 4 in Figuur 3). In het rood omlijnde deel is te zien dat de invloed van de nieuwe drainage (rechts van de oude) steeds duidelijker wordt; vanaf 2017 wordt het zout tot vlak onder de drains aangetroffen, terwijl het grondwater hier in 2015 nog zoet was.

5.3.2 Hornhuizen

Zandpercelen hebben als gevolg van de goede doorlatendheid een kleinere opbolling tussen de drains en als gevolg daarvan ook een kleinere zoetwaterlens dan een kleiperceel onder vergelijkbare omstandigheden. Om toch een effectieve groei van de zoetwaterlens te realiseren op een zandperceel is in Hornhuizen een ontwerp gerealiseerd waarbij drainage verdiept is aangelegd ten opzichte van de oude situatie met normaal dan wel verhoogd uitstroomniveau (Type C). Gedurende de proef is het uitstroomniveau vrijwel continu verhoogd geweest, met uitzondering van het voorjaar in verband met landbewerkingen en een enkele natte perioden, waarbij het ontwateringsniveau preventief verlaagd is om een goede ontwatering van het perceel te realiseren.

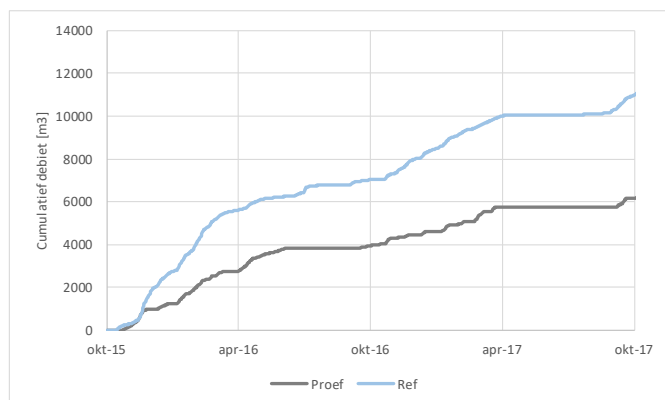
In het referentievak is het ontwateringsniveau gelijk aan het aanlegniveau (1,20 m onder maaiveld). In het proefvak is de drainage op een diepte van 1,60 m onder maaiveld aangelegd en kan een ontwateringsniveau worden ingesteld dat gelijk is aan het referentieniveau tot 0,4 m boven het referentieniveau. Dit type drainage, gecombineerd met het maximaal vasthouden van neerslag (zie Figuur 55) in het perceel, heeft geleid tot een effectieve groei van de zoetwaterlens op een zandperceel.



Figuur 55. Verhoogd drainage uitstroomniveau van de proef in Hornhuizen. In de figuur is het dynamisch beheer van het ontwateringsniveau te zien. In het zandperceel bleek dat het verhoogde niveau gedurende het voorjaar en de zomer kon worden gehandhaafd om water maximaal vast te houden, zonder negatieve effecten voor de ontwatering.

In het proefvak wordt door het verhoogde uitstroomniveau minder water afgevoerd door de drainage dan in het referentievak. Figuur 56 laat de cumulatieve gemeten debieten zien in het proef- en referentievak in de periode van 1 oktober 2015 tot en met 1 oktober 2017.

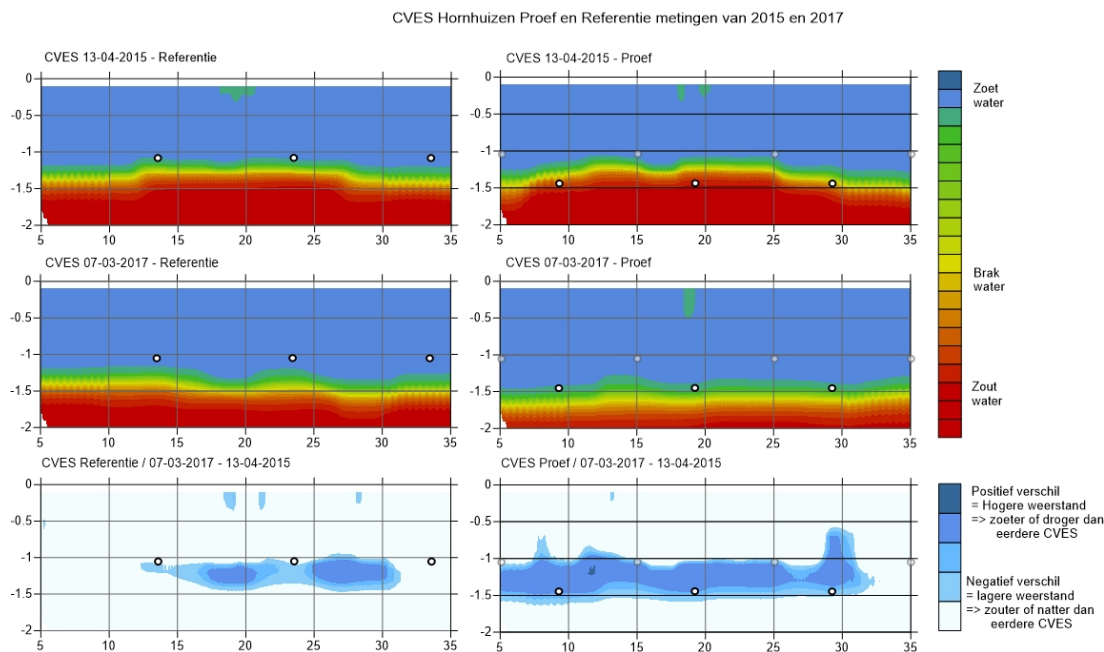
Verrekkend naar het oppervlak is in het proefvak van 1 oktober 2015 tot 1 oktober 2016 en van 1 oktober 2016 tot en met 1 oktober 2017 respectievelijk 216 en 121 mm water afgevoerd. In het referentievak is over deze 2 periode respectievelijk 428 en 240 mm water afgevoerd. In beide periode is er dus 50% minder water afgevoerd in het proefvak ten opzichte van het referentievak.



Figuur 56. Gemeten debieten uit de proef en referentiepercelen tussen 1 oktober 2015 en 1 oktober 2017. Debietregistratie heeft plaatsgevonden tot oktober 2017.

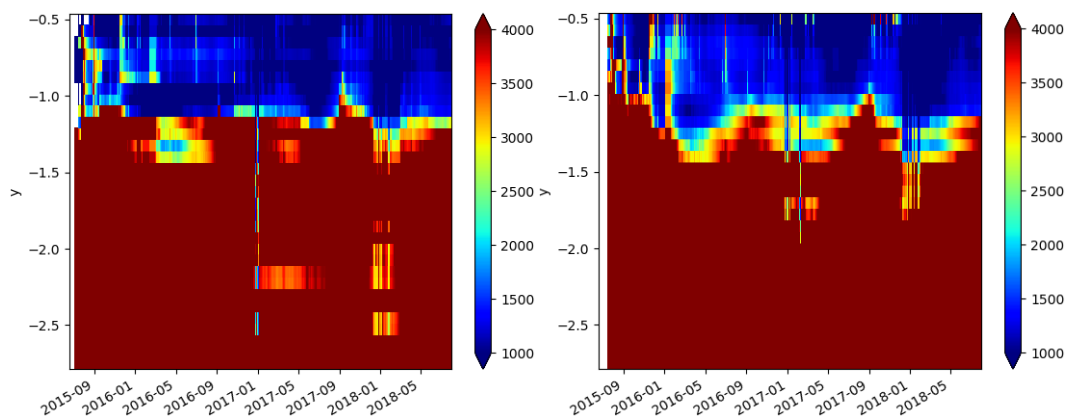
Om de dikte van de zoetwaterlenzen vast te stellen zijn ook hier periodiek CVES-metingen uitgevoerd aan het eind van elke zomer en winter (zie bijlage 3). In Figuur 57 (bovenste 2 rijen) zijn de resultaten van de CVES-metingen op het referentievak (links) en proefvak (rechts) van april 2015 en maart 2017 te zien (ingezoomd op de bovenste 2 m). Te zien is dat hier een duidelijke verzoeting heeft plaatsgevonden.

In de onderste rij zijn de verschillen tussen de CVES-metingen in het referentievak (links) en in het proefvak (rechts) tussen de 2 verschillende jaren weergegeven in een vergelijkbare periode (start voorjaar). Te zien is dat er duidelijk meer zoet water in het proefvak aanwezig is (onderste afbeelding) ten opzichte van het referentievak (bovenste afbeelding).



Figuur 57. Ingezoomde resultaten van 2 CVES-metingen in het proefvak aan het begin van de proef in voorjaar 2015 (boven) en in het voorjaar van 2017 (onder). Te zien is dat waar de drains in de bovenste nog voornamelijk in het rood liggen (zout grondwater), deze in het voorjaar 2017 in het licht groen en bijna blauw liggen (zoet grondwater).

In Figuur 58 is de gemeten bodemweerstand met de Resprobes in Hornhuizen te zien, de linker figuur laat de referentie zien en de rechter de proef. Te zien is dat er in het proefplot duidelijk meer zoet water (blauw) in de bodem aanwezig is dan in het referentieplot, wat overeenkomt met de CVES-metingen en de metingen van de EGV van het drainagewater.



Figuur 58. Resprobe metingen van referentieplot (rechts) en het proefplot (links) in Hornhuizen

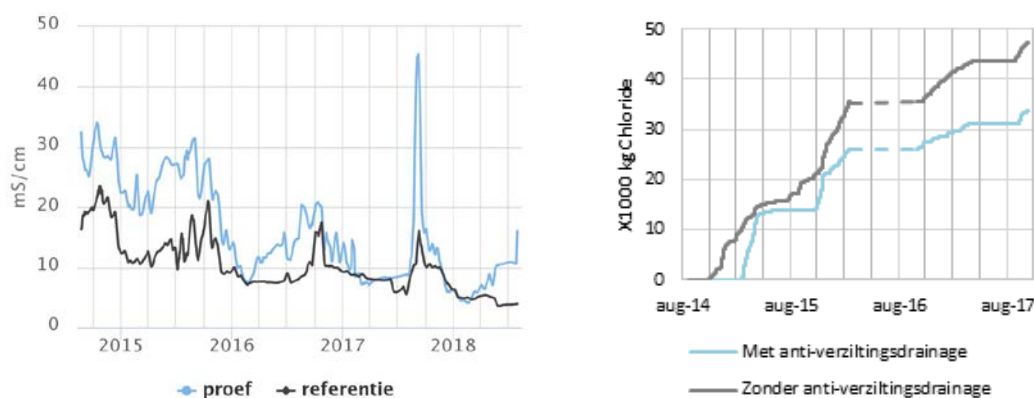
Gemeten versus gemodelleerde groei van de zoetwaterlens

In Spaarwater I is met een perceelsmodel uitgerekend hoe snel de zoetwatervoorraad in het perceel kan groeien. De modellen lieten zien dat na een jaar een toename van 0,2 m kan worden gerealiseerd. Na 5 jaar zal de zoetwaterlens in het perceel niet meer verder toenemen. Figuur 57 laat zien dat in 2 jaar tijd de zone tussen de oude en de nieuwe drains (40 cm) is verzoet. Verzoeting onder de nieuwe drains is nog niet waargenomen. De gemeten waarden komen dus goed overeen met de gemodelleerde waarden.

Zoutbelasting

In Figuur 59 (links) is zichtbaar dat het zoutgehalte in het proefvak vrij snel is afgenomen vanaf de start van de proef. Aan het begin van de proef lag de dieper gelegen drainage in het proefvak in het zoute grondwater en werd er dus meer zout water afgevoerd. Naarmate de proef vorderde, drong het zoete water steeds verder de bodem in, waardoor ook de afvoer uit de drainage verzoette. Bij gelijke EGV-waarden van de afvoer (voorjaar 2017) is daarmee de zoetwatervoorraad in het proefvak 120 mm of 1.200 m³ per hectare (0,4 m bij een porositeit van 30%) groter dan het referentievak. Door de zeer zoute kwel vanuit de ondergrond, is het drainagewater dat uit dit perceel stroomt nooit echt zoet (minder dan 1200 µS/cm).

In Figuur 59 (rechts) is zichtbaar dat de zoutbelasting (in kg Chloride) naar de sloot in het proefvak lager is (40%) dan in het referentievak. Hieruit blijkt dat anti-verziltingsdrainage op het zandperceel de ondergrond significant verzoet en dat de zoutbelasting naar de sloot afneemt, waarmee aan de gestelde randvoorwaarde wordt voldaan, ondanks de verdiepte aanleg van de drainage.



Figuur 59. Het lopend gemiddelde (10 dagen) van de EGV-waarden van het drainagewater (links) en de totale cumulatieve zoutbelasting naar de sloot (rechts) per perceeldeel.

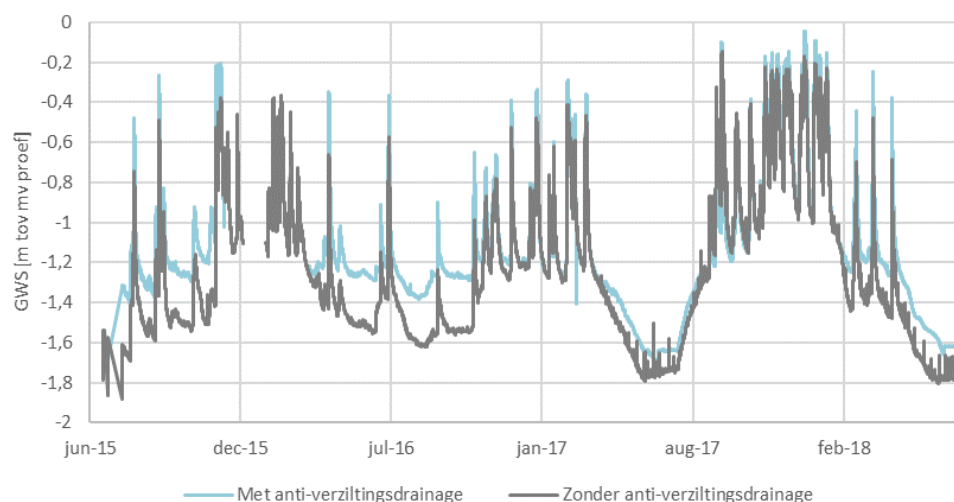
Ontwatering perceel

Bij toepassing van anti-verziltingsdrainage op een zandperceel zijn volgens de perceel eigenaar geen merkbare verschillen in de begaanbaarheid van het land of ongunstige vochtomstandigheden voor het gewas geconstateerd tussen het perceel met en het perceel zonder anti-verziltingsdrainage. In de pilot Hornhuizen is gezocht naar de extremen; in 2016 is alleen bij hevige neerslag het uitstroomniveau tijdelijk verlaagd, in 2017 is gedurende het hele jaar het maximale ontwateringsniveau (0,4 m hoger dan op het referentievak) gehanteerd (zie Figuur 60). Gedurende beide jaren bleven de omstandigheden op het perceel goed. Onderstaande tabel laat de statistiek zien voor de periode dat de data van beide peilbuizen beschikbaar was. Omdat de meetperiode van het project niet lang genoeg was voor het bepalen van een GHG volgens de standaard methodiek, is gebruik gemaakt van percentielwaarden voor het bepalen van de statistiek.

Te zien is dat de gemiddelde grondwaterstand 16 cm hoger lag, terwijl de GHG maar 3 cm hoger lag. De GLG was 18 cm hoger. In Figuur 60 is het verloop van de grondwaterstand door van juli 2015 tot augustus 2018 te zien. De verhoging van het drainageniveau heeft een beperkt effect op de pieken in de grondwaterstanden na een bui. In droge perioden daalt het grondwater echter nog steeds tot onder het ontwateringsniveau.

Tabel 4. GHG, GG en GLG bij proef en referentie in Hornhuizen over de periode 17 juli 2015 tot en met 25 november 2015 en 17 maart 2016 tot en met 30 juli 2018.

Meter min maaiveld proefvak	GHG (15%)	GG	GLG (85%)
Proefvak	-0.86	-1,21	-1,43
Referentievak	-0.89	-1,37	-1,61



Figuur 60. Grondwaterstanden op een zandperceel (Hornhuizen) bij toepassing van anti-verziltingsdrainage (grijs) en zonder anti-verziltingsdrainage (blauw). De grondwaterstand is gemiddeld 0,15 m hoger bij toepassing van anti-verziltingsdrainage. Dit heeft niet geleid tot ongunstige omstandigheden op het perceel.

5.3.3 Vlakdekkend beeld van effecten antiverziltingsdrainage op zoetwaterlens

Algemeen

Het effect van anti-verziltingsdrainage type A op de dikte van de zoetwaterlens voor verschillende bodemtypes is berekend met SVOOffice. Dit 2D-model koppelt een hydrologisch model met een chemisch model voor zouttransport, en berekent de stationaire fluxen van water en zout. De simulaties gaan uit van een perceel met buisdrainage en een zoute kwelflux, eerst zonder en vervolgens mét anti-verziltingsdrainage toegepast. De modelresultaten zijn vervolgens vertaald naar een vlakdekkende kaart voor het projectgebied.

Resultaten modelberekeningen

Het effect van anti-verziltingsdrainage op de dikte van de zoetwaterlens en op de zoetwatervoorraad is bepaald door de resultaten van de berekeningen mét en zonder anti-verziltingsdrainage te vergelijken. De zoetwatervoorraad in het perceel is gedefinieerd als de afstand tussen het gehanteerde drainagepeil en de diepte van het zoet-zout grensvlak. Het gehanteerde peil is 1 meter onder maaiveld zonder anti-verziltingsdrainage en 0,7 meter onder maaiveld mét anti-verziltingsdrainage. Het zoet-zout grensvlak is gebaseerd op een zoutgehalte van 1000 mg/l. De diepte wordt midden tussen de drainagebuizen bepaald, dus aan de rand van het model waar de diepte van het zoet-zout grensvlak het diepst ligt.

Volgens de huidige definitie van zoetwatervoorraad wordt het effect bepaald voor een locatie midden tussen de drains. Dit effect is naar verwachting groter dan het effect gemiddeld over het hele perceel.

Vlakdekkende kaart effecten

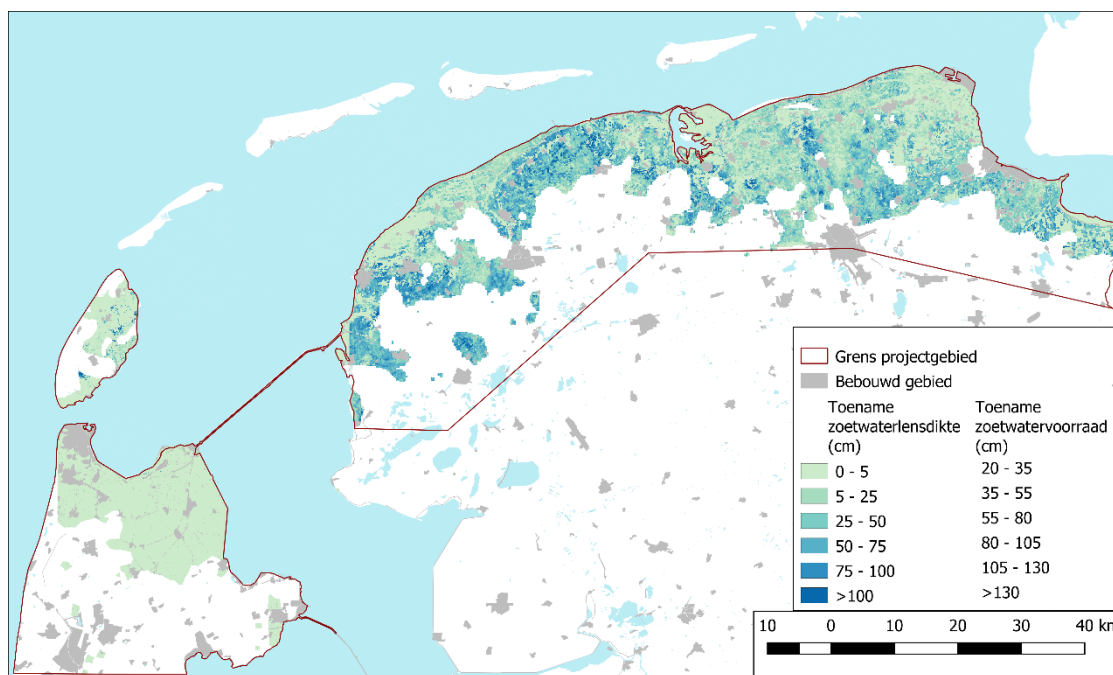
Uit de modelresultaten blijkt dat de verandering in zoetwatervoorraad bij toepassing van anti-verziltingsdrainage voornamelijk bepaald wordt door het bodemtype en in mindere mate door de kwelflux.

De relatie tussen kwelflux en effect van anti-verziltingsdrainage is complex en verschilt onderling tussen bodemtypes.

Als gevolg van deze inzichten is eerst voor iedere gesimuleerde bodemtype de gemiddelde verandering in zoetwatervoorraad berekend. Om een vlakdekkend beeld te generen is vervolgens iedere gesimuleerde bodemtype gekoppeld aan de meest vergelijkbare GeoTOP bodemtype. Daarbij is vooral gelet op het bodemtype net boven en net onder de draindiepte.

Als laatste stap zijn de uitkomsten van het model gekoppeld aan de GeoTOP bodemkaart om een vlakdekkend beeld te geven van het effect van anti-verziltingsdrainage in het projectgebied.

Figuur 61 toont aan dat de dikte van de zoetwaterlens in het perceel tot 100 cm groter is als anti-verziltingsdrainage met een peil van 30 cm toegepast wordt. De zoetwatervoorraad neemt echter met ongeveer 30 cm extra toe met anti-verziltingsdrainage doordat additionele zoetwaterberging onstaat tussen de diepte van de drainagebuizen (1 m onder maaiveld) en het verhoogd peilniveau (0,7 m onder maaiveld). Deze additionele zoetwaterberging onstaat ook waar anti-verziltingsdrainage weinig effect heeft op de dikte van de zoetwaterlens. Anti-verziltingsdrainage is over het algemeen effectiever op kleibodems dan op zandbodems.



Figuur 61. De toename in zoetwaterlensdikte en zoetwatervoorraad (cm) bij toepassing van anti-verziltingsdrainage met een peilopzet van 30cm ten opzichte van de situatie zonder anti-verziltingsdrainage. De toename in zoetwatervoorraad houdt rekening met de zoetwaterlaag dat bij anti-verziltingsdrainage onstaat tussen de diepte van de drainagebuizen en het verhoogd peilniveau. De kaart is geschikt voor gebruik op regionaal niveau; het resultaat kan in werkelijkheid lokaal afwijken.

5.4 Conclusies

Op de pilotlocaties Herbaijum en Hornhuizen is anti-verziltingsdrainage onderzocht door het toepassen van bestaande drainage met een verhoogd ontwateringsniveau in Herbaijum (Type A) en verdiept aangelegde drainage met verhoogd ontwateringsniveau in Hornhuizen (Type C).

Op beide percelen is sprake van een aantoonbare vergroting van de zoetwatervoorraad in de ondergrond. Een bijkomend effect is dat de verhoogde grondwaterstanden de kwelflux verkleinen, waardoor minder zout water wordt aangevoerd uit de diepere ondergrond. Binnen enkele jaren leidt het tot een meetbare toename van de dikte van de zoetwaterlenzen, zowel op een klei- als zandperceel.

Het verschil tussen een conventionele aanlegdiepte (Type A zoals in Herbaijum) en verdiepte aanleg van drainage (Type B of C, Hornhuizen) is ook goed zichtbaar.

Bij een conventionele aanlegdiepte neemt de dikte van de zoetwaterlens in de tijd alleen toe tussen de drains, terwijl bij de verdiepte aanleg een gelijkmatige toename ter plaatse van én tussen de drains plaats vindt en de totale dikte van de zoete buffer toeneemt (zie Figuur 57).

De gemeten groei van de zoetwaterlenzen in Hornhuizen komt goed overeen met de gemodelleerde groei van de zoetwaterlens. In Herbaijum is de gemeten groei van de zoetwaterlens kleiner dan de gemodelleerde groei. Dit komt waarschijnlijk doordat de duur van het verhoogde afvoerniveau minder lang heeft geduurd ten opzichte van de gemodelleerde duur. De meerjarige EGV-metingen van het drainagewater in zowel Herbaijum (Figuur 52 links) als in Hornhuizen (Figuur 59 links) laten zien dat deze nooit zoet worden (EGV kleiner dan 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Mogelijk komt dit door een vertraagde afvoer uit het kleiperceel in Herbaijum, waardoor menging met brakke/zoute kwel optreedt en zeer zoute kwel uit de ondergrond uit het perceel in Hornhuizen. Op andere percelen is wel zoet drainagewater in de winter gemeten (zie de Spaarwater rapportage van eigen watervoorziening). Op beide pilotlocaties is de zoutbelasting naar het oppervlaktewater verkleind bij het toepassen van anti-verziltingsdrainage.

Op het kleiperceel heeft het toepassen van anti-verziltingsdrainage geen negatief effect gehad op de ontwateringssituatie en de begaanbaarheid van het perceel aan het begin van het voorjaar. Op het zandperceel was de ontwateringsdiepte voldoende groot dat de begaanbaarheid niet aan de orde was.

Uit de modelsimulaties met SVOoffice, gebruikt om een vlakdekkend beeld te krijgen van de effecten van type A drainage, blijkt dat de zoetwatervoorraad, de diepte tussen het gehanteerde peil en het zoet-zout grensvlak, toeneemt als anti-verziltingsdrainage wordt toegepast. De grootte van het effect wordt vooral bepaald door het bodemtype en in mindere mate de kwelflux. De relatie tussen kwelflux en effect van anti-verziltingsdrainage is complex en verschilt onderling tussen bodemtypes.

Het vlakdekkende beeld (Figuur 61) toont aan dat de dikte van de zoetwaterlens in het perceel tot 100 cm groter is als anti-verziltingsdrainage met een peil van 30 cm toegepast wordt. De toename in de totale zoetwatervoorraad in het perceel is ongeveer 30 cm groter doordat er een zoetwaterlaag ontstaat tussen de diepte van de drainagebuizen en het verhoogd peilniveau. Deze additionele zoetwaterberging ontstaat ook waar anti-verziltingsdrainage weinig effect heeft op de dikte van de zoetwaterlens. Anti-verziltingsdrainage is over het algemeen effectiever op kleibodems dan op zandbodems.

6 Nutriënten

6.1 Inleiding

Naast de impact op de grootte van de zoetwatervoorraad in het perceel, zoals besproken in Hoofdstuk 3, is het streven erop gericht om met anti-verziltingsdrainage bij te dragen aan het verbeteren van de kwaliteit van het oppervlaktewater, vooral door vermindering van af- en uitspoeling van nutriënten vanuit het perceel naar het oppervlaktewater.

Binnen het deelonderzoek 'versterken zoetwaterlens' wordt daarom gezocht naar antwoorden op de volgende vragen wat betreft nutriënten:

- In hoeverre **worden de nutriënten gereduceerd of vastgelegd** (ook op basis van de resultaten in de andere pilot locaties)?
- Wordt **uitspoeling** van nutriënten verminderd door anti-verziltingsdrainage? Wordt er een verlaging van de nutriëntengehalten bereikt door de langere reistijd van het water tot het drainagemiddel?
- In hoeverre treedt **oppervlakkige afstroming** op, waarmee nutriënten tot afspoeling kunnen komen?

6.2 Aanpak

Het perceel in Herbaijum is een agrarisch grasperceel, waarop in het groeiseizoen zowel dierlijke mest als kunstmest wordt uitgereden. Om een beeld te krijgen van de **verspreiding, het gedrag, de reductie en vastlegging van nutriënten** in de bodem, en de **uitspoeling van nutriënten** uit de bodem, zijn er in Herbaijum in het brede deel (vak 1/referentie en 3/proef in Figuur 3) wekelijks watermonsters genomen van de drainafvoer in beide putten in 2016, 2017 en het begin van 2018. In de onverzadigde zone in de bodem zijn in 2017 en 2018 bodemvocht monsters genomen middels rhizons.

De debietmeters van de drains in Herbaijum functioneerden niet goed in de periode april– december 2016. Het is dus ook niet bekend in welke perioden er wel of geen drainafvoer was. Daarmee is het dus ook niet duidelijk of er stromend drainwater, dan wel stilstaand water is bemonsterd. Voor 2017 is een goede datareeks van afvoeren beschikbaar. Dit jaar is gebruikt voor het bepalen van de invloed van de anti-verziltingsdrainage op de nutriënten. Omdat monsters van stilstaand water niet representatief zijn voor de kwaliteit van het drainwater, zijn bij de analyse watermonsters genomen in perioden zonder drainafvoer niet meegenomen.

Omdat de focus, binnen het nutriënten deel van het onderzoek naar zoetwaterlenzen, sterk lag op het perceel in Herbaijum, is het perceel in Hornhuizen gebruikt ter verificatie, en voor opschaling naar percelen met een zandbodem. In Hornhuizen zijn daarom in 2016 en 2017 alleen wekelijkse watermonsters genomen bij de beide drain afvoeren. Ook voor Hornhuizen geldt dat de watermonsters zijn geanalyseerd van weken waarbij er afvoer uit het perceel is geweest. Omdat ook in Hornhuizen er problemen met de litertellers zijn geweest, is er een goede gegevensreeks beschikbaar van 1 januari 2016 tot en met 1 oktober 2017. Om hier zoveel mogelijk gegevens op jaarbasis uit te halen zijn twee analyses gedaan, één van 1 januari 2016 tot 1 januari 2017 en één van 1 oktober 2016 tot 1 oktober 2017.

De watermonsters van beide locaties zijn geanalyseerd op Elektrisch Geleidingsvermogen (EGV-waarde) wat een maat voor het zoutgehalte is, pH, alkaliniteit, en macro-elementen, waaronder chloride, nitriet, nitraat, ammonium en fosfaat (respectievelijk Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ en PO_4^{3-}).

Om te bepalen in hoeverre nutriënten ook in het oppervlaktewater terecht komen via **oppervlakkige afstroming**, is op het kleiperceel in Herbaijum aanvullend onderzoek uitgevoerd.

6.3 Resultaten

6.3.1 Herbaijum

Concentraties van nutriënten en chloride, en afgevoerde vrachten

De gemiddelde concentraties van nutriënten en chloride in de drain afvoer voor de periode januari 2017 – januari 2018 zijn weergegeven in Tabel 5 (dit zijn de gemiddelde concentraties ten tijde van afvoeren, niet de afvoer gewogen gemiddelde concentraties ten tijde van afvoeren). Over het algemeen zijn de concentraties van de nutriënten in de drainafvoer redelijk laag ten opzichte van de opgebrachte hoeveelheid nutriënten. Het verschil in nutriënten uitstroom tussen proef en referentie is echter wel duidelijk. Alle concentratie van de nutriënten zijn significant lager in het proefvak.

Chloride en sulfaat komen wel voor in hoge concentraties in het drainagewater. In het proefvak zijn deze echter aanzienlijk lager dan in het referentievak. Het zoutgehalte op basis van de EGV is in 2017 ongeveer de helft in het proefvak ten opzichte van het referentievak. Vergelijkbare getallen zijn aangegeven in het vorige hoofdstuk (zie Figuur 52).

Tabel 5. Gemiddelde concentraties van nutriënten en chloride op het proef- en referentievak in Herbaijum.

	NO_3 [mg/l]	NH_4 [mg/l]	PO_4 [mg/l]	SO_4 [mg/l]	Cl [mg/l]	EGV
Proefvak 2017	0,91	0,063	0,06	101	442	2399
Referentievak 2017	2,09	0,720	0,34	184	1181	4892

De concentraties van nitraat en ammonium in de drainafvoer (Tabel 5) zijn lager dan die in het bodemvocht (Tabel 6), waaruit afgeleid kan worden dat er omzetting, opname dan wel vastlegging plaatsvindt voordat het bodemwater de drains bereikt. De chloride concentraties zijn lager in het bodemvocht dan in de drains. Dit komt overeen met wat verwacht was, omdat de rhizons boven een zoetwaterlens in de onverzadigde zone van de bodem staan. Door de onverzadigde zone stroomt vooral geïnfiltreerd regenwater, wat een lage chloride concentratie heeft, rond of iets boven de achtergrondconcentratie van chloride in grondwater (14 mg/l, Reijnders et al., 2004), wel is het opvallend dat het chloride gehalte in het proefvak hoger is dan in het referentievak.

Doordat kwel de grootste bijdrage levert aan de drainafvoer is de chloride concentratie in de drainage, die de kwel afvangt, hoger dan in het bodemvocht. Sulfaat is om dezelfde reden ook aanzienlijk lager in het bodemvocht dan in de drainafvoer. De fosfaatconcentraties in het bodemvocht en in de drainafvoer zijn vergelijkbaar. Er is geen duidelijk patroon te zien met diepte in het bodemprofiel. Waarschijnlijk komt dit omdat de nutriëntenconcentraties erg afhankelijk van het infiltratieverloop na de bemesting. Hoe langer na een bemesting gemonsterd is, hoe meer de infiltratie is voortgeschreden, en hoe dieper de stoffen te vinden zijn, zelfs als er afbraak, opname en reductie is geweest. Daarnaast zijn de concentraties in de bodem afhankelijk van de oorspronkelijke concentratie in het infiltratiewater en van de opname door de plant via de wortels. Deze processen hebben een grote ruimtelijke variatie en daarom worden de resultaten van de vier bodemvocht locaties gebruikt om een gemiddelde waarde te geven voor de veranderingen met de diepte (zie Tabel 7).

Tabel 6. Gemiddelde concentraties van nutriënten, sulfaat en chloride in bodemvochtmonsters genomen op vier verschillende diepten in de proef- en referentievakken in het perceel Herbaijum.

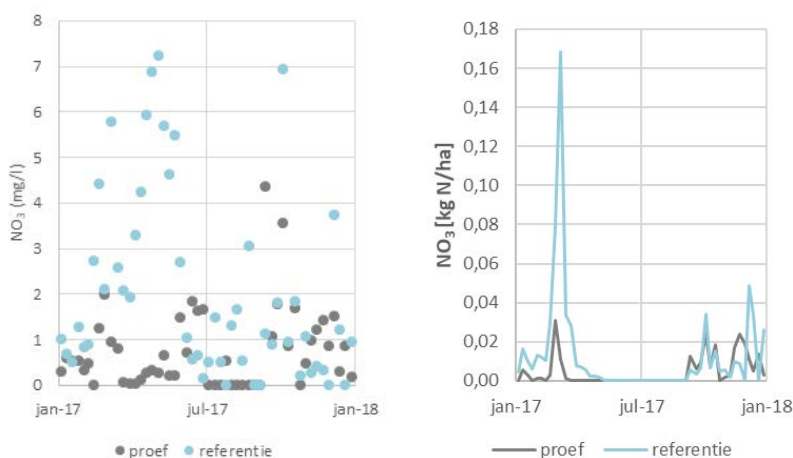
Perceel	Diepte	NO ₃ [mg/l]	NH ₄ [mg/l]	PO ₄ [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Cl [mg/l]
Proefvak	15 cm	8,79	1,18	0,13	5,83	44,65
Proefvak	30 cm	21,77	6,19	0,29	5,46	52,08
Proefvak	60 cm	3,14	1,31	1,66	2,94	24,41
Proefvak	80 cm	12,34	3,99	0,27	20,53	34,72
Referentievak	15 cm	7,55	1,22	0,65	12,11	25,26
Referentievak	30 cm	5,54	0,68	0,09	5,26	15,15
Referentievak	60 cm	7,29	0,45	-	3,19	16,30
Referentievak	80 cm	2,28	1,12	0,40	3,62	14,91

Tabel 7. Gemiddelde concentraties van nutriënten, sulfaat en chloride in het bodemvocht tot 80 cm diepte van de proef- en referentievakken in het perceel Herbaijum.

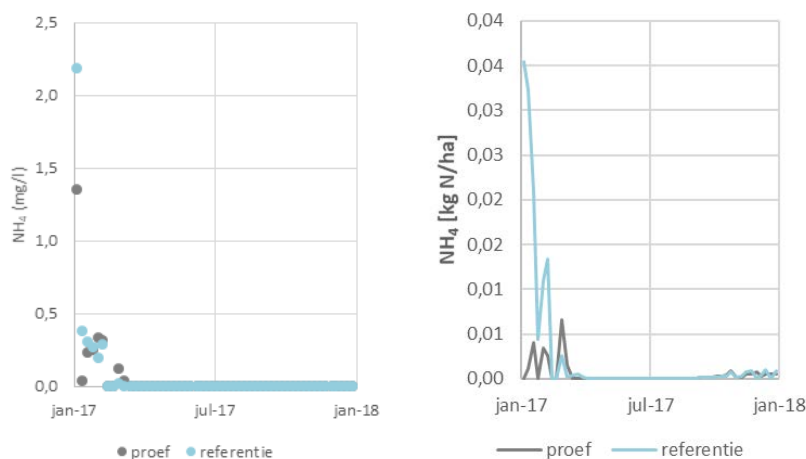
	NO ₃ [mg/l]	NH ₄ [mg/l]	PO ₄ [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Cl [mg/l]
Proefvak	11,51	3,17	0,59	8,69	38,96
Referentievak	5,67	0,87	0,38	6,04	17,90

Tijdseries van de concentraties en de vrachten van nitraat, ammonium en fosfaat in draineffluent zijn gegeven in respectievelijk Figuur 62, Figuur 63 en Figuur 64. De vrachten over 2017 zijn weergegeven in Tabel 8. Nitraatconcentraties zijn over het algemeen iets hoger in het drainwater uit het referentievak, vooral in het voorjaar en in de zomer, dan die uit het proefvak. Momenten van drainafvoer zijn redelijk vergelijkbaar, waardoor de perioden waarop de vrachten optreden ook overeenkomen. De totale vracht van nitraat uit het perceel is daardoor ook vrijwel gelijk. De geobserveerde concentraties van nutriënten in het bodemvocht is aanmerkelijk hoger dan in de drains dat erop wijst dat nutriënten efficiënt worden opgenomen in de wortel zone.

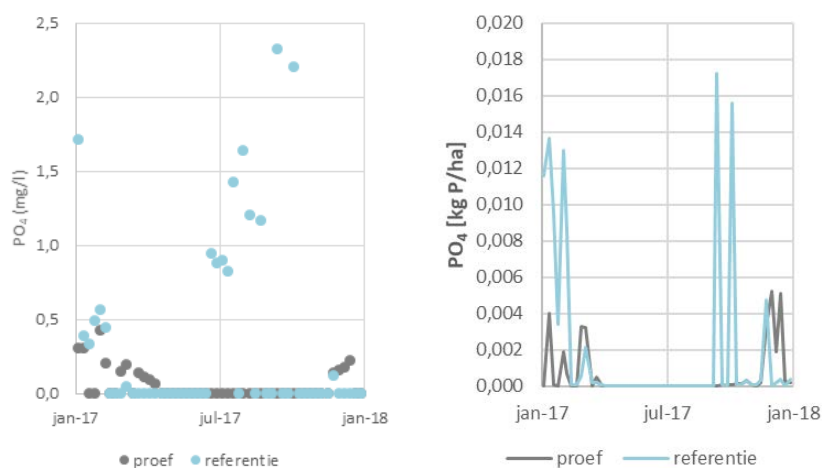
Ammoniumconcentraties komen alleen voor in de late winter en in het voorjaar, met vergelijkbare concentraties in drainwater voor proef- en referentievakken. Doordat er een verhoogd uitstroomepeil wordt gehanteerd, wat leidt tot verminderde afvoer uit de drains in het proefvak, zijn de vrachten uit het proefvak veel lager dan die uit het referentievak.



Figuur 62. Verloop van de afgevoerde nitraat concentraties en dagelijks vrachten uit het proefvak en referentievak in Herbaijum.



Figuur 63. Verloop van de afgevoerde ammoniumconcentraties (links) en corresponderende dagelijks vrachten (rechts) uit proef- en referentievakken in Herbaijum.



Figuur 64. Verloop van de afgevoerde fosfaatconcentraties (links) en dagelijks vrachten (rechts) uit het proefvak en referentievak in Herbaijum.

Fosfaat stroomt voornamelijk uit in de herfst en in de winter. Als er afvoeren in de zomer voorkomen tijdens nattere perioden, kan fosfaat ook uitstromen. Echter, de debieten in de zomer zijn dermate laag dat de resulterende vrachten van fosfaat ook laag zijn.

De totale jaarlijkse drainafvoeren vanuit het proefvak en referentievak bedragen respectievelijk 96 mm en 213 mm, gemeten van januari 2017 tot januari 2018. Een overzicht van de afvoeren van nutriënten en chloride in 2017 is gegeven in Tabel 8.

Ten gevolge van de lage concentraties van NH_4 , NO_2 , NO_3 en PO_4 in de drainafvoer zijn de totale jaarlijkse afvoeren van anorganisch N (NH_4 , NO_2 , NO_3) en P(PO_4) vanuit beide percelen laag. Deze bedragen respectievelijk 0,26 en 0,03 kg/ha voor het proefvak en respectievelijk 0,65 en 0,10 kg/ha voor het referentievak.

Chloride en sulfaat vrachten naar de sloot (kg/ha) zijn hoger in het referentievak dan in het proefvak. Dit komt door zowel de hogere drainafvoer (m^3) en de hogere concentraties in het draineffluent vanuit het referentievak.

Tabel 8. Jaarlijkse afvoer van nutriënten en chloride vanuit het proef- en referentievak in Herbaijum in 2017

	NO ₃ [kg N/ha]	NH ₄ [kg N/ha]	N totaal opgebracht [kg N/ha]	PO ₄ [kg P/ha]	SO ₄ [kg S/ha]	Cl [kg/ha]
Proefvak	0,23	0,03	633	0,03	121	475
Referentievak	0,65	0,13	633	0,10	328	1999

Van de totale anorganische N-afvoer uit de drains van de twee proefvakken komt 75% vanuit het referentievak en 25% vanuit het proefvak. De totale anorganische N-afvoer van 0,26 kg N/ha uit het proefvak en 0,80 kg N/ha op het referentievak is zeer laag in vergelijking met wat opgebracht werd in het veld in 2017: 633 kg N/ha (opgebracht tussen 15 maart en 29 augustus). De uitspoeling van anorganische stikstof uit het referentieperceel is ongeveer 0,12% van de opgebrachte stikstof. Met anti-verziltingsdrainage wordt de uitspoeling van anorganische stikstof verminderd met 70% tot 0,04% van de opgebrachte stikstof. De vracht van PO₄-P in het referentievak is hoger dan in het proefvak: uit het referentievak stroomt 3,3 keer zoveel PO₄-P uit ten opzichte van het proefvak. De vracht van fosfor is 70% minder. Dit laat zien dat anti-verziltingsdrainage een positief effect heeft in de nutriënten uitspoeling.

Oppervlakkige afstroming

Tijdens perioden van hoge en intensieve neerslag is het mogelijk dat een deel van het water het perceel als oppervlakkige afvoer verlaat in plaats van te percoleren naar het grondwater. Dit zou vooral voor kunnen komen in gebieden waar de infiltratiecapaciteit laag is, zoals in kleigebieden.

Acacia Water heeft een onderzoek uitgevoerd naar de potentie van oppervlakkige afstroming naar het oppervlaktewater op het perceel van Herbaijum door het meten van de infiltratiecapaciteit met een ringinfiltrometer, en via neerslagsimulaties met een regensimulator. Hieruit bleek dat de gemeten infiltratiesnelheden relatief laag waren, met eindwaarden van de metingen variërend tussen 0,6 en 3,9 mm uur⁻¹ op verzadigde bodem. Echter, uit de neerslagsimulaties bleek dat de microtopografie in het veld leidde tot een hoge bergingscapaciteit van 14 en 30 mm. Aangezien oppervlakkige afvoer pas kan optreden als de berging gevuld is, is voor dit perceel een initiële neerslag van minimaal 14-30 mm nodig, gevolgd door neerslag met een intensiteit hoger dan de infiltratiesnelheid (0,6-3,9 mm uur⁻¹).

Neerslagintensiteiten van 9 mm of hoger, die minimaal nodig zijn om de berging aan het bodemoppervlak te vullen, komen slechts zelden voor. De hoogst gemeten uurlijkse neerslagintensiteit was 17 mm op 16 september 2015, en uit de bodemvochtmetingen bleek dat deze hoeveelheid volledig in de berging in de bodem werd opgenomen, eventueel na eerdere tijdelijke berging in de micro-topografie. Er waren slechts drie neerslaggebeurtenissen waarbij de uurlijkse neerslagintensiteit hoger was dan 8 mm tussen juli 2015 en juli 2018, en slechts één gebeurtenis die de minimale berging in bodem en microtopografie oversteeg.



Figuur 65. Regensimulator voor het meten van oppervlakkige afvoer (links) en dubbele ring infiltrometer voor het meten van de infiltratiecapaciteit (rechts).

De bodem in Herbaijum lijkt in de driejarige meetperiode niet voor langere tijd verzadigd te zijn geweest, noch in de winterperioden, nog gedurende perioden met hoge neerslag, zoals blijkt uit de bodemvochtmetingen. Hoewel de infiltratiesnelheid van de bodem in Herbaijum relatief laag is (0,6-4 mm uur⁻¹), is de initiële berging in onverzadigde bodem en in de microtopografie groot in vergelijking tot de gemeten intensiteit van de neerslag. Deze werd in de periode slechts één keer mogelijk overschreden, en het is waarschijnlijk dat dit niet tot significante oppervlakkige afvoer heeft geleid door de grote variatie in berging en infiltratiesnelheden in het perceel, en het feit dat het perceel vlak is. Hierbij moet worden opgemerkt dat de oppervlakkige afvoer ook niet is waargenomen door de agrariër en door de mensen die wekelijks de watermonsters namen. Het is derhalve onwaarschijnlijk dat oppervlakkige afvoer, anders dan onder zeer extreme neerslagcondities, een rol speelt in de afvoer van nutriënten uit het perceel in Herbaijum naar het oppervlaktewatersysteem.

Tijdens de studie zijn de nutriënten concentraties gemeten van water na menging met de 1 cm toplaag van de bodem op maaiveld. Metingen waren gedaan enkele dagen na het uitrijden van mest zonder dat er neerslag gevallen was. Deze metingen geven een indicatie van de nutriëntenconcentraties in oppervlakkige afvoer naar de sloot. Gemeten NO₃⁻ en PO₄³⁻ concentraties varieerden tussen 0,6 en 194 mg NO₃⁻ l⁻¹ en 1,0 en 43 mg PO₄³⁻ l⁻¹. De bijbehorende NH₄⁺ concentraties varieerden tussen 0,62 en 31,8 mg l⁻¹.

Deze concentraties van de nutriënten zijn veel hoger dan die waargenomen dieper in het bodemprofiel en in het draineffluent. Indien oppervlakkige afvoer in extreme omstandigheden met deze concentraties zou plaatsvinden, zal het geringe volume afstromend water zodanig echter verdund worden bij menging in de sloot, dat de concentraties in het oppervlaktewater niet veel verhoogd zullen worden door de oppervlakkige afvoer.

Deze observaties gelden voor een onverzadigde, niet bevroren bodem. Indien de bodem bevroren is, en er sprake is van sneeuwmelt kan er mogelijk eerder oppervlakkige afvoer ontstaan. Onder deze omstandigheden zal er echter voor langere tijd geen mest op het veld zijn uitgereden en zullen de concentraties van nutriënten in het afstromend water relatief laag zijn.

Om deze reden wordt er verwacht dat oppervlakkige afvoer een verwaarloosbare rol speelt in de afvoer van nutriënten uit het perceel in Herbaijum naar het oppervlaktewatersysteem.

6.3.2 Hornhuizen

Concentraties van nutriënten en chloride en afgevoerde vrachten

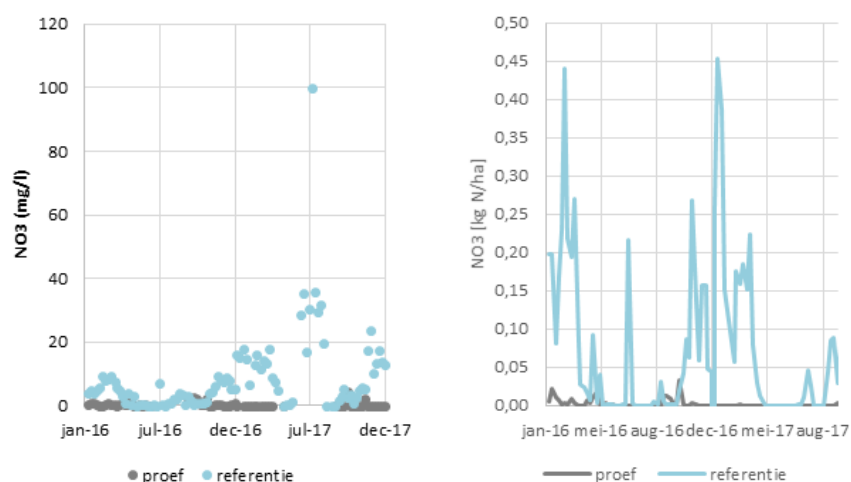
Een overzicht van de gemiddelde concentraties van nutriënten en chloride in het drain- effluent in 2016 en 2017 is gegeven in Tabel 9.

Tabel 9. Gemiddelde concentraties van nutriënten en chloride in het draineffluent van 1 januari 2016 tot en met 31 december 2016 en van 1 oktober 2016 tot en met 1 oktober 2017.

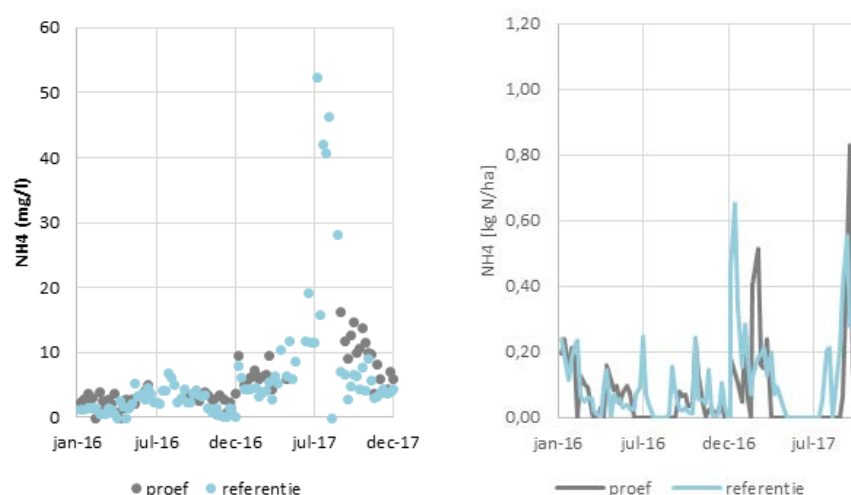
	NO ₃ [mg/l]	NH ₄ [mg/l]	PO ₄ [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	Cl [mg/l]
Proefvak 2016	0,53	2,77	2,07	640	3612
Referentievak 2016	3,57	2,33	2,07	486	3102
Proefvak 2016/2017	0,28	5,96	1,09	553	3212
Referentievak 2016/2017	13,09	9,21	1,31	437	2873

Concentraties van NO₃ zijn significant lager in het proefvak (zie ook Figuur 66 links) vergeleken met het referentievak. Dit kan verklaard worden door de langere route die het percolerende water gedeeltelijk in de verzadigde bodem af moet leggen, waarbij reductie van NO₃ op kan treden wat resulteert in lagere concentraties. Wat verder bijdraagt is dat het ontwateringsniveau ook in het groeiseizoen hoog heeft gestaan, waardoor in het proefvak grondwater met nutriënten werd vastgehouden, terwijl het in het referentievak uitstroomde naar het oppervlaktewater.

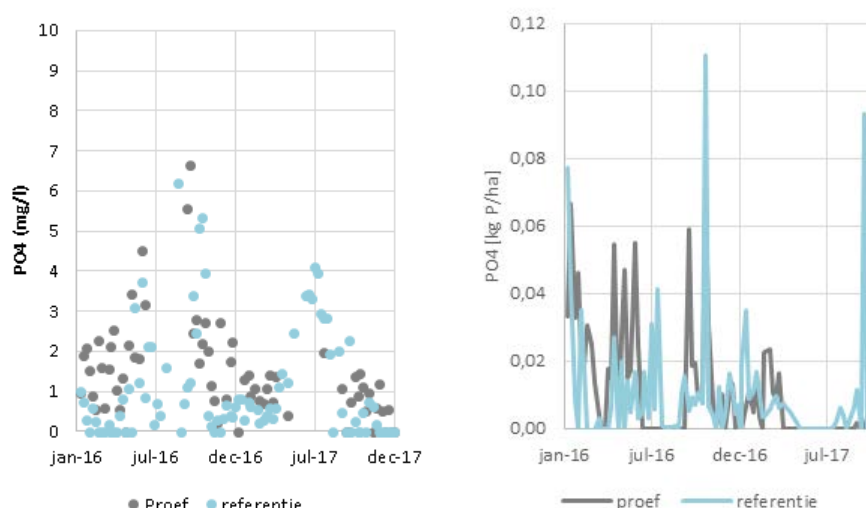
Hoewel de gemiddelde jaarlijkse concentraties van PO_4 en NH_4 niet significant verschillen tussen proefvak en referentievak, was er wel degelijk een effect van anti-verziltingsdrainage waar te nemen in de tijd. In de winter liggen de concentraties van PO_4 en NH_4 (zie hiervoor Figuur 67 en Figuur 68 links) hoger in het effluent van het proefvak dan het referentievak. Dit kan komen doordat stabiele nattere (anoxische) condities in de winter zorgen voor desorptie (uitspoeling) van PO_4 uit de onverzadigde zone en niet uit het ondiepe grondwater aangezien fosfaat in een ondiep grondwatermonster onder de detectielimiet lag. Dit kan ook te maken hebben met de relatief hoge achtergrondwaarde voor deze stof in het diepere brakke grondwater, zoals gemeten bij de nulmeting bij diepere monsters in Herbaijum en in literatuur is te vinden (Bots et al., 1978). In de zomer stijgen de concentraties sterk in de afvoer van het referentievak. Door het verhoogde uitstroomniveau in de zomer, is er in de zomers geen afvoer geweest uit het proefvak.



Figuur 66. Verloop van de concentraties (links, van 1 januari 2016 tot 131 december 2017) en de vrachten (rechts, van 1 januari 2016 tot 1 oktober 2017) van nitraat in de drains van het proefvak en referentievak in Hornhuizen.



Figuur 67. Verloop van de concentraties (links, van 1 januari 2016 tot 131 december 2017) en de vrachten (rechts, van 1 januari 2016 tot 1 oktober 2017) van ammonium in de drains van het proefvak en referentievak in Hornhuizen.



Figuur 68. Verloop van de concentraties (links, van 1 januari 2016 tot 31 december 2017) en de vrachten (rechts, van 1 januari 2016 tot 1 oktober 2017) van fosfaat in de anti-verziltingsdrainage (proefvak) en referentievak in Hornhuizen.

De drains van het referentie perceel hebben nagenoeg het hele jaar 2016 gelopen met uitzondering van een maand in augustus (23 juli-23 aug). Dit geldt ook voor het jaar 2017, met uitzondering van mei tot eind juni 2017. Op het proefvak daarentegen bleef door het ingestelde verhoogde uitstroompeil de afvoer uit over langere perioden in juni – mid september 2016 en maart-september 2017.

De totale afvoeren vanuit het proefvak en het referentievak vanaf 1 oktober 2015 tot en met 1 oktober 2017 6151 m³ (336 mm) in het proefvak en 10962 m³ (668 mm) in het referentievak.

In de periode 1 januari 2016 tot 31 december 2016 is de totale afvoer in het proefvak 3358 m³ (183 mm) afgevoerd ten opzichte van 5744 m³ (350 mm) in het referentievak. In de periode 1 oktober 2016 tot 1 oktober 2017 is er in totaal 2206 m³ (121 mm) afgevoerd uit het proefvak en 3937 m³ (240 mm) uit het referentievak.

In beide periode is dus ongeveer 50% meer water in het proefvak vastgehouden.

Door de combinatie van relatief lage concentraties in het effluent in de winter, en de afwezigheid van effluent in de zomer in het proefvak door verhoogd uitstroomniveau zijn de vrachten vanuit de drains naar de sloot grotendeels beduidend lager dan die vanuit het referentievak. Een samenvatting van de vrachten voor nutriënten en chloride is gegeven in Tabel 10.

Tabel 10. Overzicht van de vrachten van nutriënten en chloride in het effluent van de drains in het referentievak en proefvak (anti-verziltingsdrainage) in Hornhuizen in 2016 en van 1 oktober 2016 tot 1 oktober 2017.

	NO ₃ [kg N/ha]	NH ₄ [kg N/ha]	N totaal opgebracht [kg N/ha]	PO ₄ [kg P/ha]	SO ₄ [kg S/ha]	Cl [kg/ha]
Proefvak 2016	0,18	2,91	90 (groeiperiode 2016)	0,82	308	5393
Referentievak 2016	3,65	3,58	90 (groeiperiode 2016)	0,62	372	7503
Proefvak 2016/2017	0,04	4,26	240 (groeiperiode 2017)	0,28	173	3117
Referentievak 2016/2017	3,84	6,12	240 (groeiperiode 2017)	0,46	253	4968

De nutriëntvrachten uit het perceel zijn relatief laag. Opvallend is dat de fosfaat vracht in 2016 iets hoger is geweest in het proefvak ten opzichte van het referentievak. Een grote deel van uitstroom van fosfaat in 2016 heeft plaatsgevonden tijdens de uitdroging in het voorjaar van 2016. De totale vrachten in 2016 van anorganische N bedraagt 7,33 kg ha⁻¹ voor het referentievak en 3,09 kg ha⁻¹ voor het proefvak. Van 1 oktober 2016 tot 1 oktober 2017 bedragen de totale anorganische N-vracht voor het referentievak 9,88 kg/ha en voor het proefvak 4,3 kg/ha. De uitspoeling van anorganische stikstof is dus zonder anti-verziltingsdrainage ongeveer 4 (2017) tot 8 % (2016) van de opgebrachte stikstof. Met verziltingsdrainage is deze anorganische stikstof gereduceerd tot ongeveer 2 (2017) tot 3,5% (2016). De totale N-vracht is dus zeer sterk verminderd door het toepassen van anti-verziltingsdrainage.

6.4 Conclusies en vergelijking

Herbaijum

Concentraties van nutriënten in het drain-effluent van zowel het proefvak als het referentievak zijn relatief laag. Dit leidde, in combinatie met relatief lage drain-afvoeren, tot zeer lage vrachten van nutriënten naar de sloot. De lage drainafvoeren in combinatie met het ontbreken van oppervlakkige afvoer, laten zien dat op dit kleiperceel de nutriënten worden gereduceerd, afgebroken, opgenomen, of vastgelegd tijdens de passage naar de drains: te zien ook in de hogere concentraties gemeten in de eerste centimeters van bodem, die echter sterk zijn afgenomen in de drainafvoeren. Dit gedrag komt overeen met het feit dat in kleibodems de omstandigheden snel reducerend kunnen worden door beperkte beluchting.

De afvoer van nitraat is zeer klein in zowel het proefvak als het referentievak ten opzichte van de hoeveelheid opgebrachte nutriënten. Systeem gerichte drainage zorgt desondanks voor een vermindering van 67% van de anorganische N die naar de sloot gaat, en het leidt naar een vermindering in de totaal P van 70%. Ook de Cl en SO₄ concentraties worden met respectievelijk ongeveer 75% en 66% verminderd met de anti-verziltingsdrainage door beperkte afvoer en minder kwel naar de drains.

Oppervlakkige afstroming treedt niet op in deze velden en daarom heeft geen invloed op de nutriënten uitspoeling.

Hornhuizen

De uitspoeling van nutriënten wordt verminderd door de anti-verziltingsdrainage. Anti-verziltingsdrainage levert lagere nitraatconcentraties in het drain-effluent dan de concentraties in het effluent vanuit het referentievak in 2016 (met uitzondering van een korte periode in het najaar toen de drains weer begonnen te lopen). De nitraat vrachten naar de sloot worden zelfs verminderd met meer dan 90%. De totale anorganische N-vracht naar de sloot halveert ongeveer dankzij anti-verziltingsdrainage.

De gelijke of iets hogere fosfaatconcentraties in het effluent van het perceel met anti-verziltingsdrainage in de winterperiode ten opzichte van die in het referentievak kunnen te maken hebben met verhoogde grondwaterstanden waarmee meer reducerende omstandigheden zorgen voor desorptie van fosfaat en ammonium. Ook ligt de drainage dieper, waardoor een relatief hoge achtergrondwaarde voor deze stoffen in het diepere brakke grondwater terug te vinden is in de kwel, zoals ook aangegeven door hogere chloride en sulfaat concentraties.

Vergelijking

Binnen de pilot versterking zoetwaterlenzen zijn 2 pilots uitgevoerd op 2 locaties, op een kleiperceel in Herbaijum wat gebruikt wordt voor grasproductie en op een zandperceel in Hornhuizen waar akkerbouw wordt gepleegd.

De uitstroom van anorganische stikstof vanuit het kleiperceel was zowel in het referentieperceel als in het proefperceel heel laag: respectievelijk 0,12 en 0,04% van de opgebrachte stikstof spoelde uit in 2017.

In het kleiperceel is in 2017 het hele jaar een verhoogd uitstroompeil gehanteerd, wat heeft geresulteerd in een vermindering van de uitstroom van anorganische N (75%), en een vermindering van de uitstroom van P (70%).

In het zandperceel is in 2016 een gedeelte van het jaar een verhoogd uitstroompeil gehanteerd, en in 2017 gedurende het hele jaar. Dit resulteerde in een beperking van de nutriëntenuitstoot in beide perioden. De totale anorganische N in Hornhuizen nam in zowel in 2016 als in 2016/2017 af met ongeveer 50 %. De invloed van anti-verziltingsdrainage op fosfaat was in Hornhuizen niet eenduidig.

Dit laat zien dat de impact van de anti-verziltingsdrainage in Herbaijum weliswaar groter was dan in Hornhuizen (75% versus 50% reductie van stikstof), maar dat de impact in Hornhuizen groter was (vermindering van 4 a 5 versus 0,54 kg N/ha). De beperking van de uitstroom van anorganische N in Hornhuizen was daarmee een orde groter dan in Herbaijum. De impact van de anti-verziltingsdrainage was in Hornhuizen dus veel groter dan in Herbaijum.

Tabel 11. Vergelijking van de nutriënten vrachten in Herbaijum en Hornhuizen.

		NO ₃ [kg N/ha]	NH ₄ [kg N/ha]	N _{tot} [kg N/ha]	N totaal opgebracht [kg N/ha]	PO ₄ [kg P/ha]	SO ₄ [kg S/ha]	Cl [kg/ha]
Herbaijum 2017	Proefvak	0,23	0,03	0,26	633	0,03	121	475
Herbaijum 2017	Referentie	0,65	0,13	0,80	633	0,10	328	1999
Hornhuizen 2016	Proefvak	0,18	2,91	3,09	90 (groeiperiode 2016)	0,82	308	5393
Hornhuizen 2016	Referentie	3,65	3,58	7,33	90 (groeiperiode 2016)	0,62	372	7503
Hornhuizen 2016/17	Proefvak	0,04	4,26	4,3	240 (groeiperiode 2017)	0,28	173	3117
Hornhuizen 2016/17	Referentie	3,84	6,12	9,88	240 (groeiperiode 2017)	0,46	253	4968

Dit laat zien dat in zandpercelen de grootste impact kan worden gehaald met nutriënten reductie middels toepassing van anti-verziltingsdrainage. Dit zijn ook de percelen waar nutriënten het minste goed worden gebonden aan de bodem.

7

Ontwerp systeem en optimalisatie

7.1 Inleiding

Het toepassen van anti-verziltingsdrainage hangt voor de agrariër nauw samen met bedrijfsinvesteringen en de levenscyclus van bestaande drainagesystemen. Een logisch moment om anti-verziltingsdrainage toe te passen is op het moment dat de bestaande drainage aan vervanging toe is. Simpele aanpassingen ten opzichte van traditionele drainage leiden tot positieve effecten voor het gewas en watersysteem. Aan de hand van inzicht in de perceel eigenschappen kan een agrariër bepalen of en zo ja, welk type systeem toegepast kan worden om verzilting te bestrijden. In dit hoofdstuk wordt het ontwerp van een systeem beschouwd in relatie tot de fysische criteria in het perceel. Daarnaast wordt aandacht besteed aan het operationeel beheer van anti-verziltingsdrainage. De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd:

1. Aan welke **fysische criteria** moet voldaan worden om anti-verziltingsdrainage toe te kunnen passen?
2. Waar is anti-verziltingsdrainage kansrijk?
3. Hoe ziet het optimale ontwerp van anti-verziltingsdrainage eruit? Hierbij is gekeken of het systeem eenvoudiger en goedkoper ontworpen kan worden.
4. Hoe ziet het beheer van het uitstroomniveau eruit (operationeel beheer)?

7.2 Aanpak

Op basis van de pilot-resultaten wordt de relatie tussen het succesvol toepassen van anti-verziltingsdrainage en perceel kenmerken, zoals bodemtype en drainagekenmerken in beeld gebracht. Daarbij gaat aandacht uit naar verschillen in het systeemontwerp tussen zand- en kleipercelen. Uiteindelijk worden de *lessons learned* uit de pilots gebruikt om het ontwerp eventueel aan te passen voor toepassing en opschaling van anti-verziltingsdrainage. Op basis van fysische criteria die een perceel beschrijven is een beslisboom opgesteld, waarbij een combinatie van eigenschappen past bij een bepaald type oplossing.

Voor het operationeel beheer is aandacht besteed aan de systemen waar het ontwateringsniveau verhoogd kan worden. De in dit project opgedane inzichten en de praktijkervaring van Delphy zijn gebruikt om handvatten te bieden voor zinvol beheer van het ontwateringsniveau, waarbij rekening wordt gehouden met de balans tussen optimale effectiviteit voor verziltingsbestrijding en een goede ontwatering van het perceel.

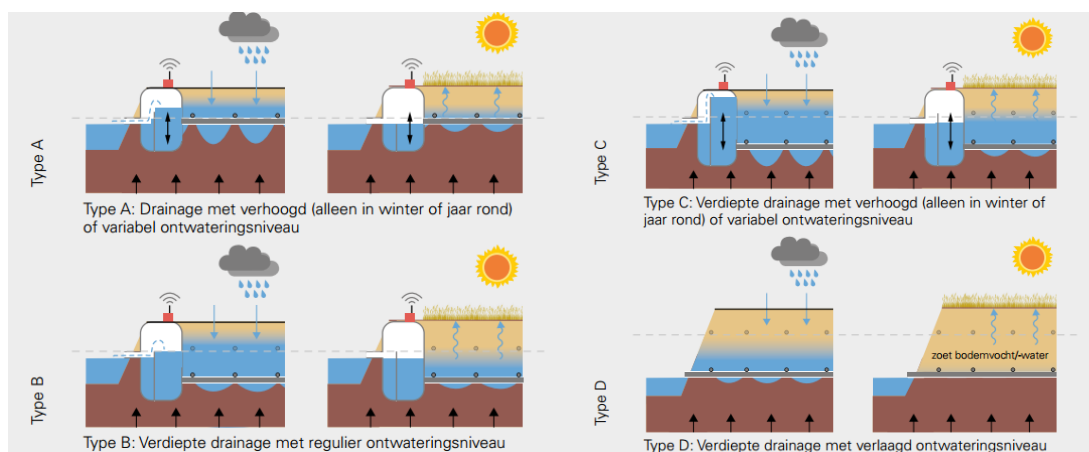
7.3 Resultaten

7.3.1 Inleiding beslisdiagram antiverziltingsdrainage

In hoofdstuk 2 zijn vier typen van anti-verziltingsdrainage beschreven. Voor een uitgebreide beschrijving van de systemen wordt verwezen naar hoofdstuk 2.

De volgende maatregelen zijn gedefinieerd:

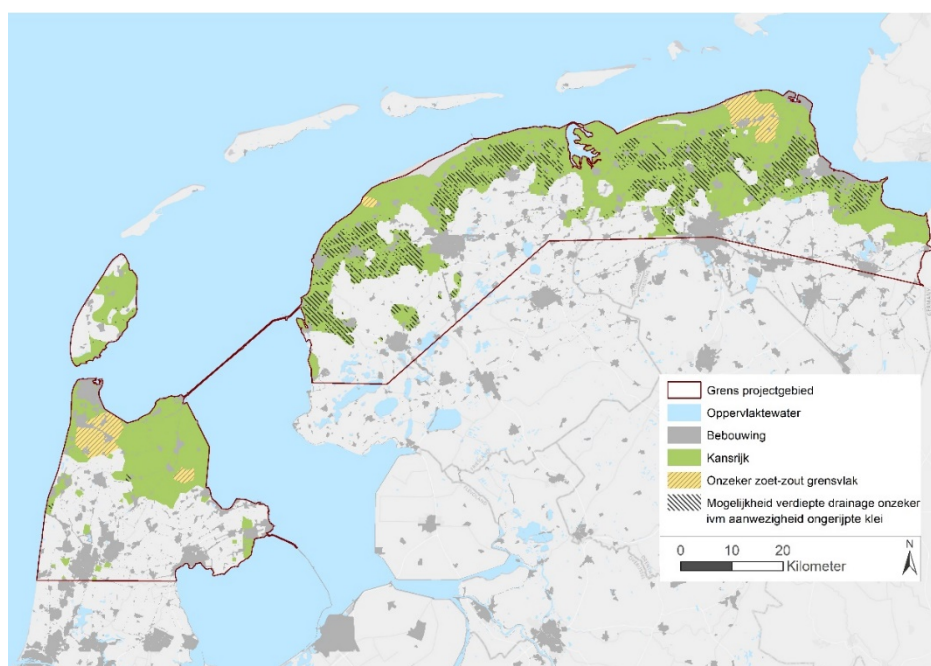
- Type A, Verhoogd uitstroom niveau ontwateringsniveau bij bestaande drainage
- Type B, verdiept aangelegde drainage met een regulier ontwateringsniveau
- Type C, verdiepte aanleg met verhoogd ontwateringsniveau
- Type D, verdiepte aanleg met verlaagd ontwateringsniveau



Omdat met type D de zoetwatervoorraad niet wordt vergroot valt deze oplossing buiten de context van Spaarwater en is deze niet opgenomen in een beslidsdiagram (zie paragraaf 7.3.3). In een kanskaart is in beeld gebracht waar de anti-verziltingsdrainage kansrijk is (zie paragraaf 7.3.2).

7.3.2 Kanskaart antiverziltingsdrainage

Toepassing van anti-verziltingsdrainage is kansrijk in grote delen van de Waddenregio, zie Figuur 69. Hierbij ligt de focus op gebieden met een zoet-zout grensvlak binnen vijf meter beneden maaiveld (ondiep). In enkele gebieden is verdiepte aanleg van drainage mogelijk, maar is het effect onzeker door de aanwezigheid van ongerijpte klei. Hierdoor vormt zich een platte zoetwaterlens. Om te bepalen welk type anti-verziltingsdrainage het meest geschikt is worden de beslidsdiagrammen gebruikt (zie paragraaf 7.3.3).



Figuur 69. Kanskaart anti-verziltingsdrainage. Bij aanwezigheid van ongerijpte klei moet nader onderzocht worden of het verdiept toepassen van anti-verziltingsdrainage mogelijk is.

7.3.3 Beslisdiagram antiverziltingsdrainage

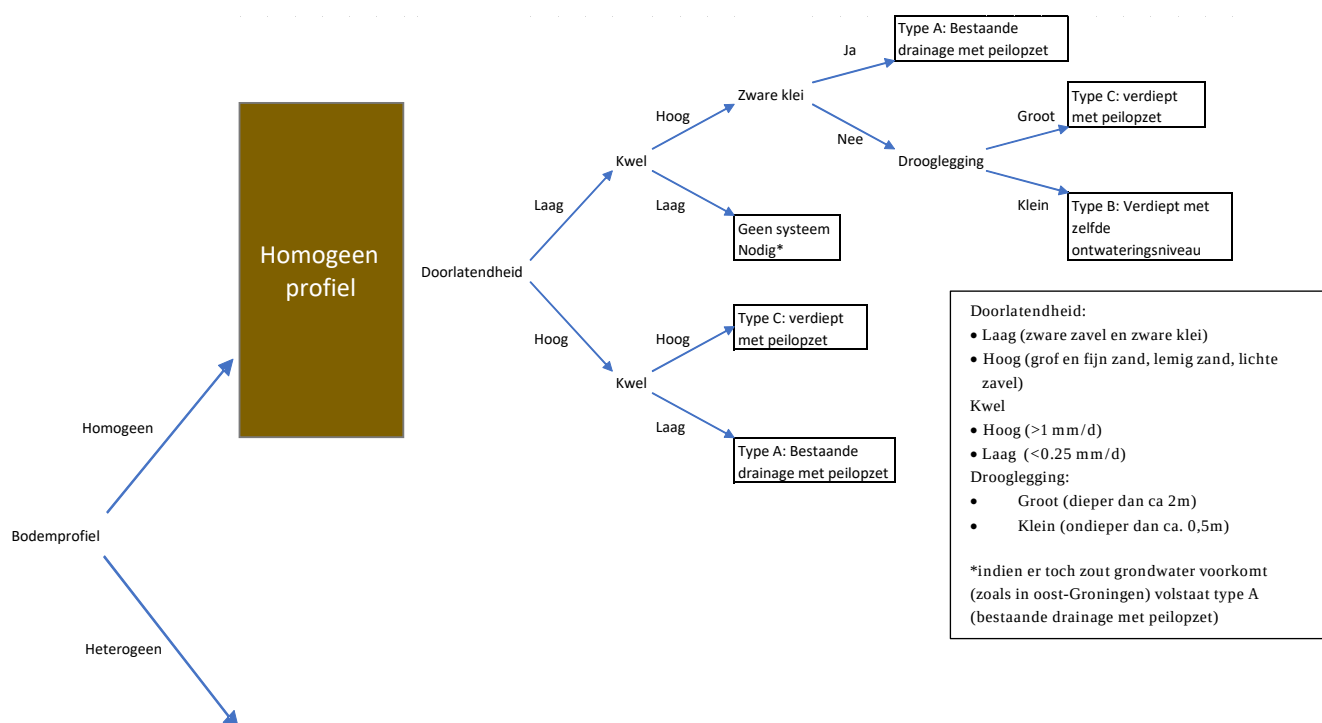
De toepasbaarheid van anti-verziltingsdrainage hangt vooral samen met de bodemopbouw van de bovenste circa 5 m, de kweldruk en de ontwateringssituatie in het perceel. Er is voor drie hoofdcategorieën van bodemopbouw een beslisdiagram opgesteld. De categorieën betreffen:

- homogene bodemopbouw tot 5 m diepte.
- gerijpte op ongerijpte klei.
- zand op klei.

Deze 3 beslisdiagrammen omvatten niet alle bodemtypen. Zo zijn bijvoorbeeld een klei op zand profiel en een sterk gelaagd profiel niet meegenomen, omdat een advies voor deze profielen maatwerk is. In het algemeen geldt wel dat in een zandige bodem, die sterk gelaagd is, het vergroten van een zoetwaterlens effectiever is dan in een homogene zandbodem.

De beslisdiagrammen zijn gebaseerd op met modellen gesimuleerde jaargemiddelde diktes van de zoetwaterlens, zoals beschreven in hoofdstuk 5. In het beslisdiagram worden een aantal vragen gesteld over de *doorlatendheid* van de bodem, de intensiteit van de *kwelflux* en de mate van *drooglegging*.

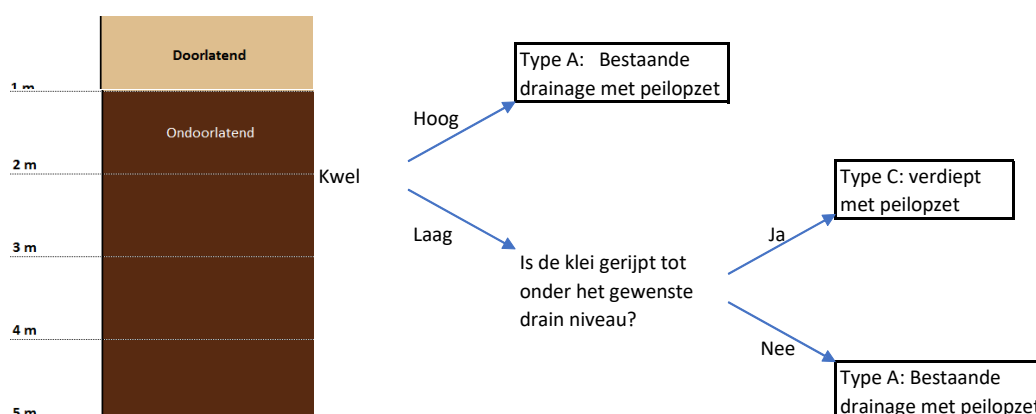
Voor een lage doorlatendheid kan men denken aan klei en zware zavel, voor een hoge doorlatendheid aan grof zand, fijn zand en lemig zand. Een hoge kwelflux kan men bijvoorbeeld zien in een perceel, als de drains ook in drogere zomers blijven lopen. Hoe korter de drains blijven lopen in tijden zonder regen, hoe lager de kwelflux. Voor sommige situaties heeft een droge of natte situatie op het perceel ook invloed op het aanbevolen systeem, daarom wordt ook de drooglegging (het hoogteverschil tussen het oppervlaktewaterpeil en het maaiveld) meegenomen in het beslisdiagram.



Figuur 70. Beslisdiagram voor bepaling van het juiste type anti-verziltingsdrainage bij een homogeen profiel.

Het toepassen van het juiste drainagesysteem op een perceel vraagt om een goed begrip van de bodem. Toepassing van het verkeerde type systeem gerichte drainage kan resulteren in een niet werkend systeem (omdat de verdiepte drainage bijvoorbeeld in ongerijpte of in te zware klei ligt). Ook kan verdiepte drainage leiden tot een verhoogde zoutflux in het voorjaar. Toepassing van systeem gerichte drainage is daarom in veel gevallen maatwerk.

De aanbeveling *geen systeem nodig* (voor profielen met een lage doorlatendheid en een lage kwelflux), betekent dat een aangepast drainagesysteem op dit moment niet nodig is om te wapenen tegen verzilting. Echter, anti-verziltingsdrainage biedt mogelijkheden om de uitstroom van nutriënten richting het oppervlaktewater te verminderen. Daarnaast is het goed om toekomstige veranderingen van de kwelflux mee te nemen in de overweging. In bodemdalingsgebieden en langs de zeedijk is er in de toekomst een mogelijke toename van de kwelintensiteit. Dan kan systeem gerichte drainage toch een uitkomst bieden.



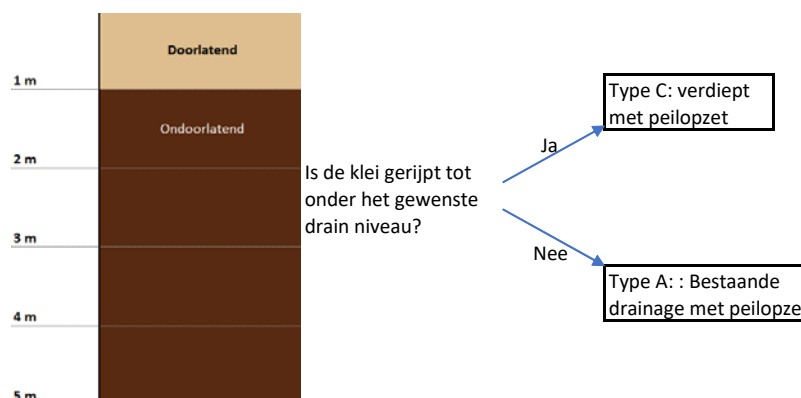
Figuur 71. Beslisdiagram voor bepaling van het juiste type anti-verziltingsdrainage bij een bodemprofiel van gerijpte op ongerijpte klei.

Anti-verziltingsdrainage door middel van verhoging van het uitstroomniveau biedt een oplossing voor gerijpte op ongerijpte klei profielen. Door de toegenomen druk tegen de kwelflux zal de zoetwaterzone toenemen.

Door de lokale ontwatering kan het zijn dat de grond onder drainageniveau toch gerijpte is, en dan biedt verdiepte drainage met verhoogd uitstroomniveau een kans om de zoetwaterbuffer te vergroten. In het perceel moet goed gekeken worden naar de diepte van de overgang tussen gerijpte klei op ongerijpte klei, het perceel moet tot onder het verdiepte drainageniveau goed gerijpte zijn. Een draineur kan onderzoeken waar deze overgang zit; drainage in ongerijpte klei heeft geen effect en kan zelfs tot natschade leiden.

Het verdiept aanleggen van de drainage in klei moet een zeer weloverwogen beslissing zijn. De drainage zorgt ervoor dat meer zoet water wordt vastgehouden, opdrogen gaat echter langzamer: een dikkere zone moet namelijk uitdrogen na een natter periode, voordat de secundaire porositeit weer gaat functioneren. Hiermee is er een vergroting van de kans op natschade. De afweging tussen natschade en zoutschade zal per locatie verschillen. Ook hier geldt dus dat de aanleg van de drainage maatwerk is.

Het effect van dieper draineren in (zware) klei profielen is in het Spaarwater project niet getoetst. Gezien de risico's moet het systeem nog verder worden onderzocht.



Figuur 72. Beslisdiagram voor bepaling van het juiste type anti-verziltingsdrainage bij een bodemprofiel van zand op klei.

Ook bij zand op klei profielen biedt anti-verziltingsdrainage een oplossing. Ligt de overgang van het zand naar klei dieper dan het gewenste verdiepte drainageniveau? Of is de klei onder het drainage niveau gerijpt? Dan kan het zijn dat de grond onder drainageniveau doorlatend is, en dan biedt verdiepte drainage met verhoging van het uitstroomniveau een kans om de zoetwaterbuffer te vergroten.

7.3.4 Implementatie

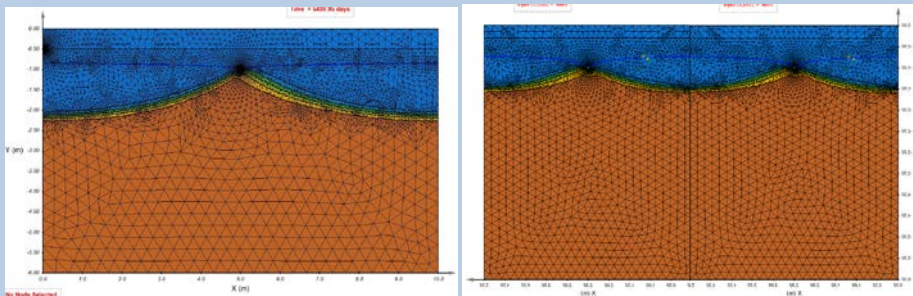
Het toepassen van anti-verziltingsdrainage hangt voor de agrariër nauw samen met bedrijfsinvesteringen en de levenscyclus van bestaande drainagesystemen. Vaak wordt de nieuwe drainage tussen de oude gelegd (tussen draineren). Dit heeft echter tot gevolg dat de afstand tussen de drains wordt gehalveerd, met mogelijk negatieve gevolgen (zie onderstaande tekst box).

Een logisch moment om anti-verziltingsdrainage toe te passen is dan ook het moment dat de bestaande drainage aan vervanging toe is. Simpele aanpassingen ten opzichte van traditionele drainage leiden tot positieve effecten voor het gewas en watersysteem. Door de hierboven beschreven beslisboom te doorlopen kan een perceel eigenaar verkennen of de diepteligging gewijzigd moet worden en of het toepassen van anti-verziltingsdrainage nodig en mogelijk is. Dit moet voorafgaand goed worden uitgedacht en doorgesproken worden met de draineur. Er zijn 3 mogelijkheden om het drainageniveau in te stellen:

- Individuele niveau instelling per drain
De kosten van dit systeem zijn relatief laag, maar instelling van het uitstroomniveau is arbeidsintensief.
- Gecombineerde instelling van het uitstroomniveau van het drainagesysteem middels verzamelleiding en peilput.
Hierbij kan het uitstroomniveau voor het gehele perceel op één locatie worden ingesteld (eventueel telemetrisch), en kan daar ook worden gecontroleerd wat het waterniveau in het systeem is.
- Niveau instelling in de watergang middels een stuw
Dit systeem kost het minste, omdat alleen een stuwje in de watergang nodig is om het uitstroomniveau in het hele drainagesysteem in te stellen. Waterberging in de watergang gaat echter verloren. Indien de watergang waar de drains in uit komen een doorgaande watergang is, is deze optie niet mogelijk.

Wel/niet tussen draineren?

Bij het aanleggen van (mogelijk verdiepte) nieuwe drainage, is het de vraag waar deze nieuwe drainage aangelegd moet worden: tussen de bestaande drains of naast/onder de bestaande drains? Door tussen de bestaande drains nieuwe drainbuizen aan te leggen wordt de drainageafstand verkleind. Door het verkleinen van de drainafstand wordt er water sneller afgevoerd waardoor minder verzoeting en minder groei van de zoetwaterlens plaatsvindt. Gevolg is een kleinere zoetwaterlens.



Tussen draineren kan wel een goede idee zijn bij een hoge kwelflux waar het zoet-zout grensvlak boven het drainageniveau uitkomt. Door hier intensiever te gaan draineren worden de stroombanen naar de drains toe aangepast en komt het zoet-zout grensvlak niet meer boven het drainageniveau uit.

De tweede mogelijkheid (verzamelleiding met peilput) is ook goed mogelijk indien de drainage (nog) niet vervangen hoeft te worden.

Door het aanleggen en aankoppelen van een verzamelleiding en het installeren van een verzamelput kan met een eenvoudige ingreep bestaande drainage omgebouwd worden tot anti-verziltingsdrainage. Dit is de aanpak die ook in het pilotperceel te Herbaijum met succes is gevolgd.

7.3.5 Aanlegkosten en onderhoud

Het toepassen van anti-verziltingsdrainage kost circa 2,5 maal zoveel als conventionele drainage, dus ongeveer 2500,- per hectare. Als de drainage zelf sleufloos kan worden aangelegd, moeten verbindingen tussen deze drainage en de verzamelleiding worden gemaakt en moet de verzamelput nog worden aangelegd. Dit resulteert in het maken van extra kosten. De aanleg van een doorspoelvoorziening voor de drainageleidingen vergemakkelijkt het onderhoud gedurende de levensloop van het systeem (Figuur 73). Oplossingen per drainbuis zijn ook mogelijk, maar hierbij is veel meer arbeid nodig, om het uitstroombniveau voor elke drain in te stellen.

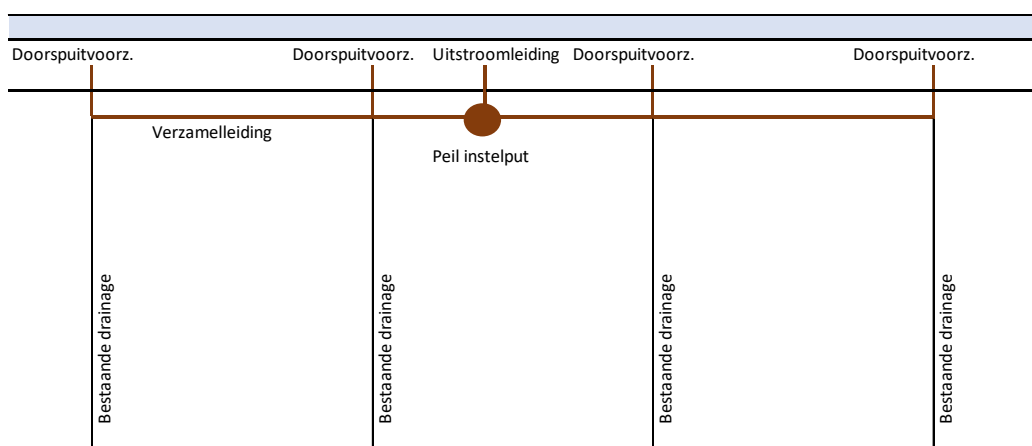
Het langer vasthouden van water kan ook plaatsvinden via maatregelen in de sloot (indien het slootwater zoet is). Indien de infrastructuur toereikend is, is deze methode goedkoper in vergelijking met de overige drainagesysteemttypen, aangezien er alleen maar een stuwte bij een duiker hoeft te worden aangelegd. Dit wordt bijvoorbeeld al veel toegepast in gebieden met bollenteelt.

7.3.6 Operationeel beheer: ingesteld niveau en duur van verhoging

Bij het toepassen van anti-verziltingsdrainage en dan met name in de varianten met een verhoogd ontwateringsniveau (Type A en C) is het van belang het operationeel beheer (regeling van het ontwateringsniveau) af te stemmen op de grondwatersituatie in het perceel. Het verhogen van het ontwateringsniveau kan als ongewenste bijwerking hebben dat het perceel natter wordt. Om natschade te voorkomen wordt sturing van het ontwateringsniveau zo ingezet dat in de bodem voldoende ruimte overblijft om (grote) buien te kunnen bufferen, dan wel zodanig zijn uitgedroogd dat het kan worden afgevoerd door de drainage. Dit wordt bereikt door seizoensgebonden drainage niveau beheer, waarbij uitgegaan wordt van 'sparen als het kan en ontwateren als het moet'.



Figuur 73. Aanleg van anti-verziltingsdrainage met doorspoelleiding (links) en peilput (rechts).



Figuur 74. Aanpassing van bestaande drainage middels aanleg van doorspuit voorzieningen, verzamelleiding, peil instelput en uitstroomleiding.

In het algemeen geldt dat, zo lang als de ontwateringssituatie toestaat, het hanteren van een verhoogd ontwateringsniveau een positieve invloed heeft op het vergroten van de zoetwatervoorraad. Op zandpercelen met een goede ontwatering geldt dat het handhaven van een hoog uitstroomniveau zeer effectief en relevant is. Voor minder goed ontwaterde percelen, zoals het kleiperceel te Herbaijum geldt dat aan het eind van de winter het uitstroomniveau verlaagd kan worden tot het reguliere niveau, zodat het perceel voldoende tijd heeft om te ontwateren. Gedurende de winterperiode kan ook in een kleiperceel voldoende water opgeslagen worden door een verhoogd niveau te hanteren. Door het beheer af te stemmen op de landbewerking en het gewas wordt een juiste balans gevonden tussen sparen en ontwateren.

In zandpercelen kan ook in de zomerperiode het uitstroomniveau langdurig worden verhoogd, hiermee wordt al het regenwater vastgehouden, wat de gewassen ten goede komt. Hierdoor wordt ook de uitspoeling van nutriënten verminderd, zodat deze beschikbaar blijven voor de gewassen en het oppervlaktewater niet belasten.

Bij toepassing van anti-verziltingsdrainage in een perceel blijft de bergingscapaciteit van het oppervlaktewatersysteem behouden. De agrariër kan zelf de waterhuishouding van het perceel reguleren en is daarbij onafhankelijk van het regionale waterbeheer. Daarnaast zorgt de individuele perceelsaanpak voor een effectieve bestrijding van verzilting en vergroting van de zoetwatervoorraad.

Indien gekozen wordt voor water vasthouden in het perceel en in een sloot middels een stuwte in de sloot, moet goed worden gekeken naar het functioneren van het watersysteem. Bij verhoogde stuwte in de sloot, waar water langere tijd wordt vastgehouden, neemt namelijk niet alleen de berging in het perceel, maar ook de berging in het oppervlaktewatersysteem af.

De ervaringen van de pilot laten zien dat het operationeel beheer van anti-verziltingsdrainage maatwerk is: het is sterk afhankelijk van het gewas, en van het type bodem (zand, zandig, kleiig of klei) en de benodigde omstandigheden gedurende het jaar. Vanuit de landbouw technische praktijk is aangegeven dat uitdroging nodig is voor optimale poot/zaai en teeltomstandigheden. De bouwvoor moet daarom in het voorjaar tijdig uitdrogen zodat er geen kluiten bij het zaaien/poten ontstaan die oogstomstandigheden verslechteren. Verder moet de kleigrond in de zomer voldoende uitdrogen zodat water goed afgevoerd kan worden via ontstane krimpscheuren.

Kanttekening bij de droogtijd van klei is, dat de proef in Herbaijum heeft laten zien dat uitdroging van het kleiperceel met of zonder verhoogde drainage uitstroomniveau vrijwel gelijke tred volgde (zie Figuur 53): dit duidt erop dat uitdroging van klei voornamelijk van bovenaf plaatsvindt.

Daarnaast kan gelden dat een verhoogd uitstroomniveau in beter doorlatende gronden problemen kan geven met aaltjes, deze bewegen vaak mee met de grondwaterstand, en een verhoogde grondwaterstand maakt dus dat deze aaltjes zich ook hoger in de bodem en dichterbij de wortelzone bevinden. Ook dit is echter afhankelijk van het gewas en of deze hier gevoelig voor is.

Tenslotte geldt dat door het verhoogde grondwaterniveau als gevolg van verhoogd uitstroomniveau reducerende omstandigheden, waardoor nitraat wordt afgebroken en wordt omgezet in ammonium. Onduidelijk is echter hoe deze zuurstofarme omstandigheden de groeiomstandigheden in het perceel veranderen.

Voor de duur van het verhoogde drainage uitstroomniveau geldt: hoe langer door het verhoogde drainage uitstroomniveau zoet water wordt vastgehouden, hoe groter de impact op de diepere zoetwatervoorraad in het perceel.

Kortom: verhoging en verlaging van het drainagepeil is maatwerk, het hangt af van verschillende factoren die tegen elkaar moeten worden afgewogen, waarbij afhankelijk van het gewas mogelijk van jaar tot jaar een ander drainageniveau wordt ingesteld.

7.4 Conclusies

Aan de hand van de fysische kenmerken in een perceel kan met behulp van het opgestelde beslisdiagrammen vastgesteld worden hoe anti-verziltingsdrainage eruit kan zien om verzilting te bestrijden. In deze diagrammen komt ook naar voren wanneer een maatregel niet noodzakelijk is. Aan de hand van inzicht in de bodemopbouw van de bovenste 5 m, een inschatting van de kwelflux en de drooglegging in een perceel wordt op deze wijze een keuze gemaakt voor de methode van het aanpakken van verzilting.

Water vasthouden in watergangen is een aanvullende manier om verzilting van sloten te verminderen. De afname in zoutflux als gevolg van deze maatregel is weergegeven in kaarten.

Over het algemeen is het verhogen van het slootpeil effectiever bij: 1) hogere doorlatendheden, 2) lagere deklaagweerstand, en 3) stijghoogten rond of net boven maaiveld.

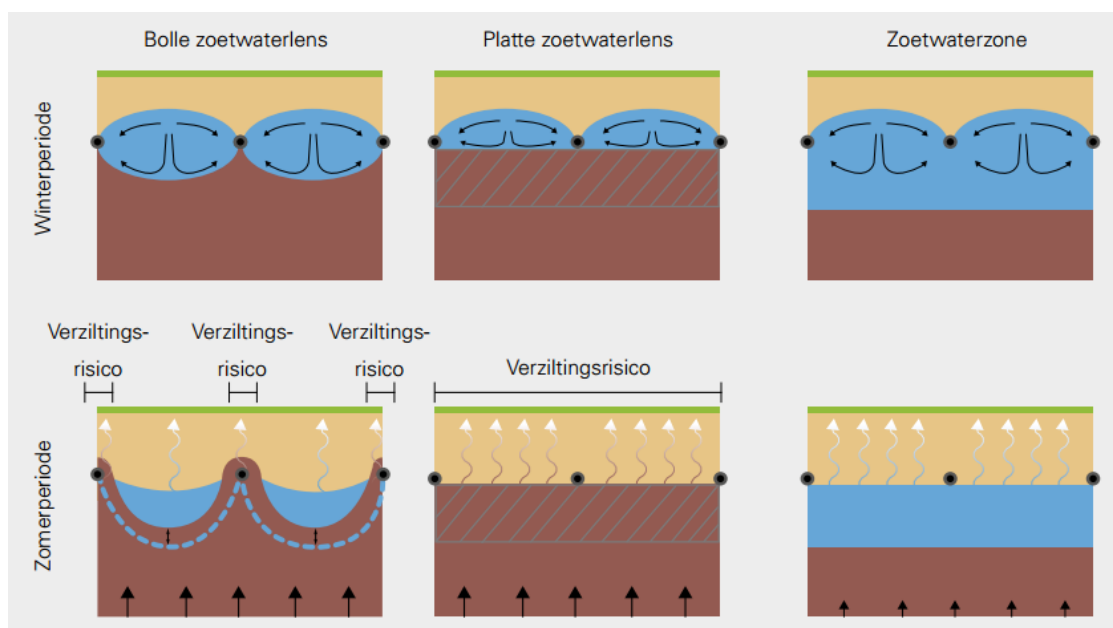
Aanleg van anti-verziltingsdrainage kost ongeveer 2,5 maal reguliere drainage, voornamelijk vanwege het feit dat de drainage moet worden voorzien van doorspoelvoorzieningen, een verzamelleiding en een regelput.

Voor het operationeel beheer van systemen met de mogelijkheid om het ontwateringsniveau in te stellen geldt: *sparen als het kan en ontwateren als het moet*. Voor een effectieve opslag van zoet water loont het om het uitstroomniveau zo lang mogelijk hoog te houden. Bij bepaalde bodemprofielen is het echter van belang om het peilbeheer af te stemmen op het landgebruik en een bepaalde droogtijd te hanteren. Hiertoe zijn handvatten gegeven.

8

Samenvatting

Zoetwaterlenzen zijn van groot belang voor de Waddenregio. Dit is namelijk de zoetwatervoorraad die gewassen in de zomer gebruiken om op te groeien. Er worden 3 typen lenzen onderscheiden:



De grootte van zoetwaterlenzen wordt bepaald door 3 factoren:

1. *De drainageafstand*: hoe groter de drainageafstand hoe groter de zoetwaterlens; dit verband is lineair
2. *De doorlatendheid*: hoe kleiner de doorlatendheid hoe groter de lens, dit verband is logaritmisch
3. *De kwelflux*: hoe kleiner de kwelflux, hoe groter de lens; dit verband is ook logaritmisch

Met behulp van deze inzichten is de verziltingsrisicokaart gemaakt voor de waddenregio voor de huidige situatie (zie bijlage 5). Als gevolg van klimaatverandering, bodemdaling en zeespiegelstijging staan zoetwaterlenzen onder druk. De impact hiervan op zoetwaterlenzen is bepaald en vertaald naar een verziltingsrisicokaart voor 2050 (zie bijlage 6).

Deze inzichten laten zien dat maatregelen genomen moeten worden om de zoetwater beschikbaar te houden. De zoetwaterlenzen kunnen worden versterkt middels toepassing van anti-verziltingsdrainage.

Er bestaan 4 typen antiverziltingsdrainage (zie Figuur 14). Binnen het project spaarwater zijn 2 typen anti-verziltingsdrainage toegepast. Op de pilotlocatie in Herbaijum is anti-verziltingsdrainage onderzocht door het toepassen van verhoogd uitstroom niveau bij bestaande drainage (Type A op een kleiperceel). Op de locatie in Hornhuizen is anti-verziltingsdrainage onderzocht door verdiepte drainage met verhoogd uitstroomniveau (Type C op een zandperceel).

Het toepassen van anti-verziltingsdrainage voor het vergroten van de zoetwaterlens kan zeer effectief op een zand- en kleiperceel worden toegepast. Op zandpercelen, waar in een normale situatie maar een beperkte ontwikkeling van de zoetwaterlens bestaat, leidt het verdiept aanleggen van drainage met verhoging van het drainage uitstroomniveau tot een toename van de zoetwaterlens. Zo is in Hornhuizen de zoetwatervoorraad is met ongeveer 120 mm toegenomen.

Op zowel zand- als kleipercelen leidt het toepassen van anti-verziltingsdrainage tot een afname van de zoutbelasting naar de sloot; 81% afname in Herbaijum en 40% in Hornhuizen ten opzichte van een situatie zonder anti-verziltingsdrainage. Daarmee is anti-verziltingsdrainage een effectief middel om zoutbelasting naar de sloot te verminderen.

Ook de uitspoeling van nutriënten wordt verminderd door de anti-verziltingsdrainage; de vrachten van totaal-N nemen met 67% af in Herbaijum en halveren ongeveer in Hornhuizen. Tevens nemen in Herbaijum de vrachten aan PO₄ en Cl af met 70% respectievelijk 76%.

In Herbaijum zijn de concentraties van nutriënten in het drain-effluent van zowel het proefvak als het referentievak laag. Op het perceel is een onderzoek gedaan naar oppervlakkige afstroming. De conclusie van dit onderzoek is dat het niet is opgetreden.

Qua vrachten is de impact van anti-verziltingsdrainage op de beperking van nutriëntenuitstoot het grootst in zandpercelen. Hoewel de nutriëntenuitstoot in Hornhuizen maar halveerde, is de absolute afname hier veel groter: een reductie van ongeveer 4 tot 5,5 kg N/ha ten opzichte van 0,54 kg N reductie in Herbaijum.

Het vlakdekkende beeld (Figuur 61), verkregen aan de hand van SVOOffice simulaties met type A drainage, laat zien dat de zoetwatervoorraad in het perceel 10 tot 30 cm groter is als anti-verziltingsdrainage met een peil van 30 cm toegepast wordt. Anti-verziltingsdrainage is over het algemeen effectiever op kleibodems dan op zandbodems.

Binnen het project zijn een 3-tal beslisdiagrammen ontwikkeld waarmee agrariërs kunnen bepalen welk type anti-verziltingsdrainage kan worden toegepast op hun perceel. Hierbij gaat het om beslisdiagrammen voor homogene profielen, gerijpte op ongerijpte klei profielen en zand op klei profielen. Andere profielen, zoals een klei op zand profiel en een sterk gelaagd profiel kunnen niet meegenomen in het beslisdiagram, omdat de situatie hier vraagt om advies op maat.

Indien systeem gerichte drainage wordt aangelegd, kan worden gekozen uit 3 mogelijkheden van drainageniveau instelling:

- Niveau instelling in de watergang middels een stuw
- Individuele niveau instelling per drain
- Gecombineerde peilinstelling van het drainagesysteem middels verzamelleiding en peilput.

De wensen van de perceel eigenaar bepalen welke mogelijkheid de voorkeur heeft. Elke optie heeft een ander kostenplaatje, de 3^e mogelijkheid is het duurste en komt uit op ongeveer 2,5 maal de kosten van reguliere drainage.

Duur en niveau van het ingestelde drainage niveau hangt sterk af van de agrarische situatie van het perceel; hierbij geldt: *'sparen als het kan en ontwateren als het moet'*.

Natte perioden in de winter, wanneer toegang tot het perceel niet nodig is, kunnen goed worden gebruikt om het grondwatervoorraad hoog te houden, om zoet water in het perceel vast te houden en zoute kwel weg te drukken. De noodzaak tot uitdroging in het voorjaar hangt sterk samen met welk gewas op het perceel staat/ komt te staan.

9 Literatuur

- Berg, E. van den, 2018. Assessing overland flow and the relationship between drainage intensity and soil moisture in Herbaijum, the Netherlands. BSc thesis International Land and Water Management. Wageningen University and Research. 50 p.
- Bots, W.C.P.M., P.C. Jansen en G.J. Noordewier (1978) Fysisch-chemische samenstelling oppervlakte- en grondwater Noorden des Lands. Regionale studies 13. ICW
- Delsman, J.R. (2015) Saline groundwater – surface water interaction in coastal lowlands. PhD thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, ISBN 978-1-61499-518-0.
- Drabbe J, Badon Ghijben W. (1889) Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift Koninklijk Instituut van Ingenieurs, Verhandelingen 1888/1889: 8–22.
- Eeman S, Leijnse A, Raats PAC, Van Der Zee SEATM (2011) Analysis of the thickness of a fresh water lens and of the transition zone between this lens and upwelling saline water. Adv Water Resour 34:291–302. doi: 10.1016/j.advwatres.2010.12.001
- Eeman S, Van Der Zee SEATM, Leijnse A et al (2012) Response to recharge variation of thin rainwater lenses and their mixing zone with underlying saline groundwater. Hydrol Earth Syst Sci 16:3535–3549. doi: 10.5194/hess-16-3535-2012
- Eeman, S. (2017) Dynamics of rainwater lenses on upward seeping saline groundwater, PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL. ISBN: 978-94-6257-933-0.
- Van der Gaast, J.W.J., H.R.J. Vroon, H.Th.L. Massop en J.G. Wesseling, 2014. Landsdekkende schematisering en parameterisatie van het topsysteem ten behoeve van hydrologische modellering. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2686.
- van der Heijden, A. (2016). Assessing salinization risk for rainwater lenses in tile drained fields, stage rapport voor Wageningen University en Acacia Water
- Herzberg, A. (1901) Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder, J. J. Gasbeleuchtuhg und Hasserversorgung, Jahrg, 44, 134.
- Van Immerzeel, C. H., Vegter, U. en Schot, P.P. (1996). Toepassing van een neerslaglenzenmodel bij hydro-ecologische herstelprojecten. H2O, 10, p. 293-295.
- De Louw, P.G.B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B.R., Gunnink, J., van Baaren, E.S., and Oude Essink, G.H.P. (2011), Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage, Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 3659-3678.

- De Louw PGB, Eeman S, Oude Essink GHP et al (2013) Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. *J Hydrol* 501:133–145. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.07.026
- de Louw, P. (2013) Saline seepage in deltaic areas. Preferential groundwater discharge through boils and interactions between thin rainwater lenses and upward saline seepage. PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, ISBN/EAN 9789461085429.
- Maas, K. (2007) Influence of climate change on a Ghijben–Herzberg lens. *J Hydrol* 347(1):223-228. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.09.020
- Oude Essink, G. H. P., E. S. van Baaren, and P. G. B. de Louw (2010), Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 46,
- Pauw, P. (2015) Field and Model Investigations of Freshwater Lenses in Coastal Aquifers. PhD thesis, Wageningen Universiteit, Wageningen. ISBN 978-94-6257-292-8.
- Poot, A. & Schot, P.P. (2000) Neerslaglenzen: vorm en dynamiek, *Stromingen* 6 (4), pp. 13-26.
- Schot, P.P., Dekker, S.C., & Poot, A. (2004). The dynamic form of rainwater lenses in drained fens. *Journal of Hydrology*, 293(1), 74-84.
- Reijnders, H., van Drecht, G., Prins, H., Bronswijk, J., Boumans, L., 2004, De kwaliteit van ondiep en middeldiep grondwater in Nederland in het jaar 2000 en verandering daarvan in de periode 1984-2000. Rapport 714801030, RIVM, Bilthoven, 185 p.
- Schot, P.P., Dekker, S.C., & Poot, A. (2004). The dynamic form of rainwater lenses in drained fens. *Journal of Hydrology*, 293(1), 74-84.
- Van Staveren, G. en Velstra, J. (2011) Eindrapport Verziltingsspoor. Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland, Acacia Water, Projectnummer N20090333.
- Stofberg, S. F., Essink, G. H. O., Pauw, P. S., De Louw, P. G., Leijnse, A., & van der Zee, S. E. (2017). Fresh Water Lens Persistence and Root Zone Salinization Hazard Under Temperate Climate. *Water resources management*, 31(2), 689-702.
- Stofberg, S. (2017) PhD thesis. Hydrological controls on salinity exposure and the effect on plants in lowland polders. Wageningen University, Wageningen, NL. ISBN: 9789463431873
- Stuyfzand, P.J. (1993) Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands. PhD Thesis. Free University Amsterdam.
- Tolk, L. en Velstra, J. 2016. Spaarwater, pilots rendabel en duurzaam agrarisch watergebruik in een verziltende omgeving van de waddenregio. Hoofdrapport, Acacia Institute
- Velstra, J., Groen, J., De Jong, K. (2011) Observations of salinity patterns in shallow groundwater and drainage water from agricultural land in the northern part of the Netherlands, *Journal of Irrigation and Drainage*, pp. 51-58.
- De Vries J.J., 1982. Anderhalve eeuw hydrologisch onderzoek.

Bijlagen

Bijlage 1

CVES ERT

Geofysische metingen

Relaties elektrische weerstand, lithologie en zoutgehaltes

Voor dit onderzoek zijn drie typen geofysische metingen uitgevoerd, die een beeld geven van de elektrische weerstand ρ van de ondergrond, uitgedrukt in Ohmm. Sommige meetsystemen geven de elektrische geleidbaarheid σ , welke de omgekeerde is van de weerstand. De geleidbaarheid wordt uitgedrukt in mS/m of $\mu\text{S/cm}$. Daarbij geldt dat:

$$10\text{hmm} = \frac{1}{S/m} = \frac{1000}{\text{mS/m}} = \frac{10000}{\mu\text{S/cm}}$$

De elektrische weerstand van de ondergrond of formatieweerstand ρ_f wordt bepaald door de weerstand van het grondwater ρ_w , de lithologie, de mate van waterverzadiging en de temperatuur.

Voor de correctie van een gemeten weerstand bij een temperatuur T in °C naar de weerstand bij een T van 20 °C geldt de volgende relatie:

$$\rho_{f20} = \rho_f \cdot \frac{75}{1.8T + 39}$$

Voor de weerstand van verzadigde grond en de weerstand van het grondwater geldt de relatie van Archie (1942):

$$\rho_w = \frac{\rho_f}{F}$$

Waarbij F de formatiefactor is. De formatie van waterverzadigde klei ligt die in de orde van 1 a 2, terwijl voor verzadigd zand deze varieert van 2.5 voor fijn zand tot 5 voor grof zand en grind.

Tabel B1. Formatiefactor voor diverse bodemsoorten

Lithologische beschrijving	Formatiefactor
grind met zand	7
grof zand met grind	6
grof zand	5
matig grof zand	4
zwak slibhoudend zand	3
matig slibhoudend zand	2.5 *
sterk slibhoudend zand	2 *
klei	1 - 3 *
veen	~ 1

In de onverzadigde zone, met name van zandbodems, is de formatiefactor hoger.

Voor een goede interpretatie van de geofysische metingen moet men dus op de hoogte zijn van de lithologie en de grondwaterstand ter plaatse van de meting. Voor de relatieve veranderingen is de tijd (monitoring) zijn geofysische metingen in ieder geval geschikt.

De elektrische weerstand of de elektrische geleidbaarheid (EGV) van water is gerelateerd aan het aantal opgeloste ionen oftewel het zoutgehalte. Uit de metingen is door DLO (Mulder en Spoelstra, 1995) een relatie opgesteld tussen de elektrische geleidbaarheid σ_{w20} de (EGV bij 20 °C) en het zoutgehalte van het water uitgedrukt in chlorideconcentratie in mg/l (Cl) op basis van alle analyses in dit gebied. Deze geldt alleen voor EGV- waarden hoger dan 1000 $\mu\text{S/cm}$.

$$\text{Cl} = 3.9831 * \sigma_{w20} - 256.4$$

Een andere relatie is die van Post (2008), gebaseerd op een groot aantal analyses van grondwater in Laag Nederland, waarin ook het bicarbonaatgehalte HCO_3 in mg/l wordt meegenomen. Deze gaat op voor EGV-waarden hoger dan 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$:

$$\sigma_{w20} = 2.91 * 10^2 + 2.71 * Cl - 2.49 * 10^{-5} * Cl^2 + 9.34 * 10^{-1} * \text{HCO}_3$$

In de praktijk is de geleidbaarheid van water toch de meest praktische en direct meetbare parameter (EGV-meting). We definiëren de verschillende zoutklassen als volgt: de bovengrenzen van zoet, lichtbrak, brak en zout zijn respectievelijk 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 150 \text{ mg/l}$), 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 1500 \text{ mg/l}$), 15000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 6000 \text{ mg/l}$) en 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 20000 \text{ mg/l}$).

Met bovengenoemde relaties kunnen de uitkomsten van de geofysische metingen met het zoutgehalte van het grondwater in verband worden gebracht. Uitgaande van een gemiddelde formatiefactor van 3 voor de zandlagen in dit gebied en een temperatuurcorrectie voor grondwater met een gemiddelde temperatuur van 11 °C, kunnen wij bij benadering de volgende relaties opstellen:

$$\sigma_{w20} \approx \frac{10000}{0.26\rho_f} \text{ voor CVES metingen}$$

$$\sigma_{w20} \approx 38\sigma_{FD} \text{ voor FDEM (DUALEM)}$$

$$\sigma_{w20} \approx 3\sigma_{FP} \text{ voor prikstokmetingen}$$

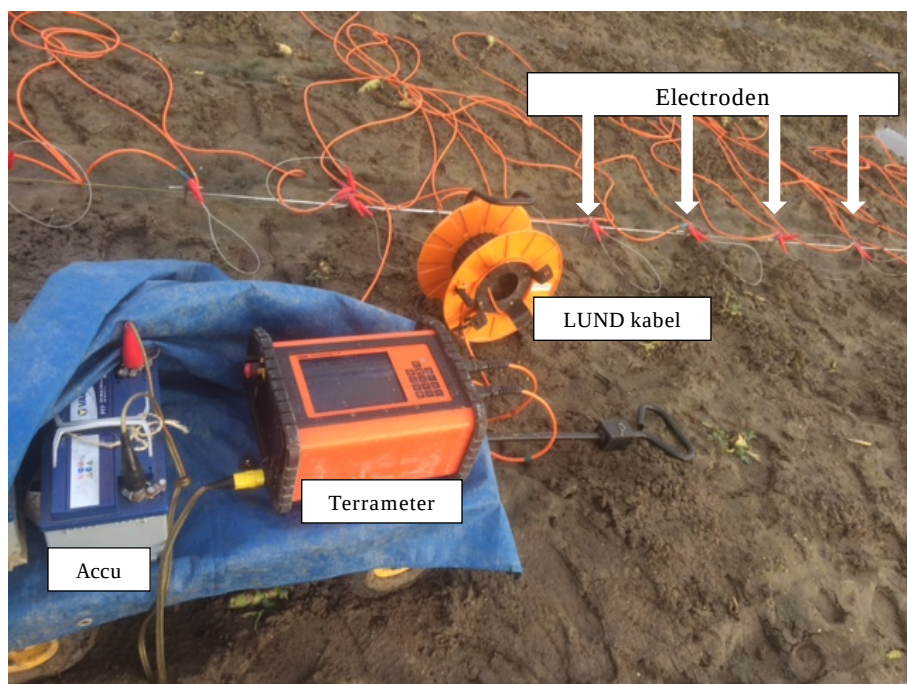
Waarbij σ_{w20} en σ_{FP} zijn uitgedrukt in $\mu\text{S}/\text{cm}$, ρ_f in Ohmm en σ_{FD} en in mS/m.

Voor dit onderzoek definiëren we verder zoet, lichtbrak, brak en zout als water met een EGV bovengrens van respectievelijk 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 150 \text{ mg/l}$), 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 1500 \text{ mg/l}$), 15000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 6000 \text{ mg/l}$) en 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($Cl = 20000 \text{ mg/l}$).

CVES -methode

De CVES-methode (ook wel ERT) is een zogenaamde Direct Current methode. Hierbij wordt via twee stroomelectroden een elektrische stroom opgewekt in de ondergrond.

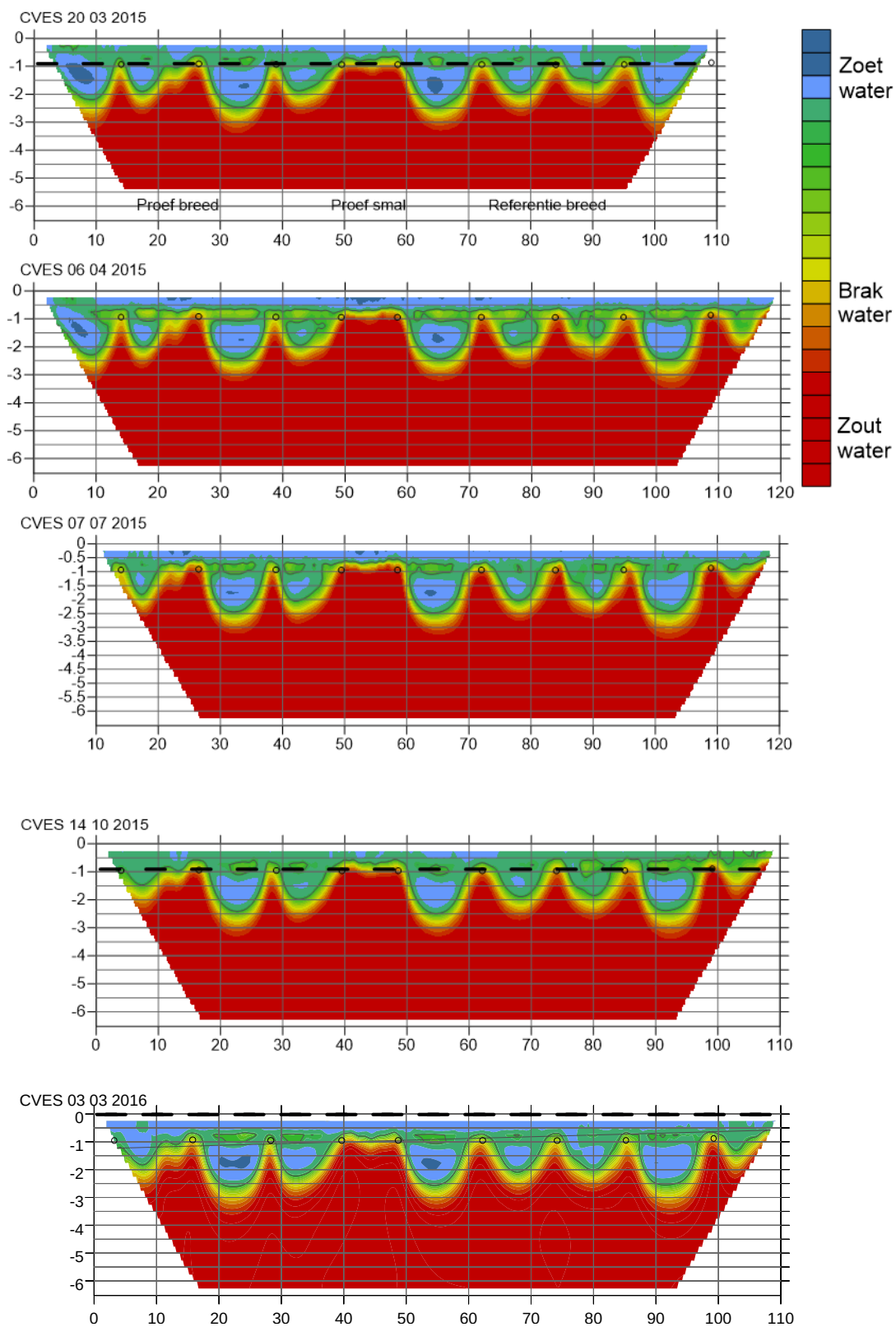
Uit die stroom en het geïnduceerde potentiaalverschil in twee andere elektroden kan dan de schijnbare weerstand worden berekend. De schijnbare weerstand is een soort gemiddelde waarde van de ondergrond tot een bepaalde diepte, welke afhankelijk is van de afstand van de stroom elektroden. Bij de CVES-methode worden langs een profiel een groot aantal elektroden geplaatst en worden de schijnbare weerstanden bij tal van combinaties van elektroden bepaald. Door inversie van deze waarden te bepalen door een rekenmodel kunnen de werkelijke of formatieweerstanden van de ondergrond worden bepaald en getoond in een 2D beeld. De metingen zijn uitgevoerd met de SAS4000 Terrameter en de LUND-kabel van ABEM, Sweden. In totaal kunnen met dit systeem voor elke meting 64 elektroden geplaatst worden op afstanden variërend van 0.5 tot 10 m. De totale lengtes kunnen variëren van 40 tot 400 m. Het diepte bereik is ongeveer een 1/6 van de lengte van de CVES. Voor de interpretatie en inversie is het softwarepakket RES2Dinv van GEOTOMO Software gebruikt.

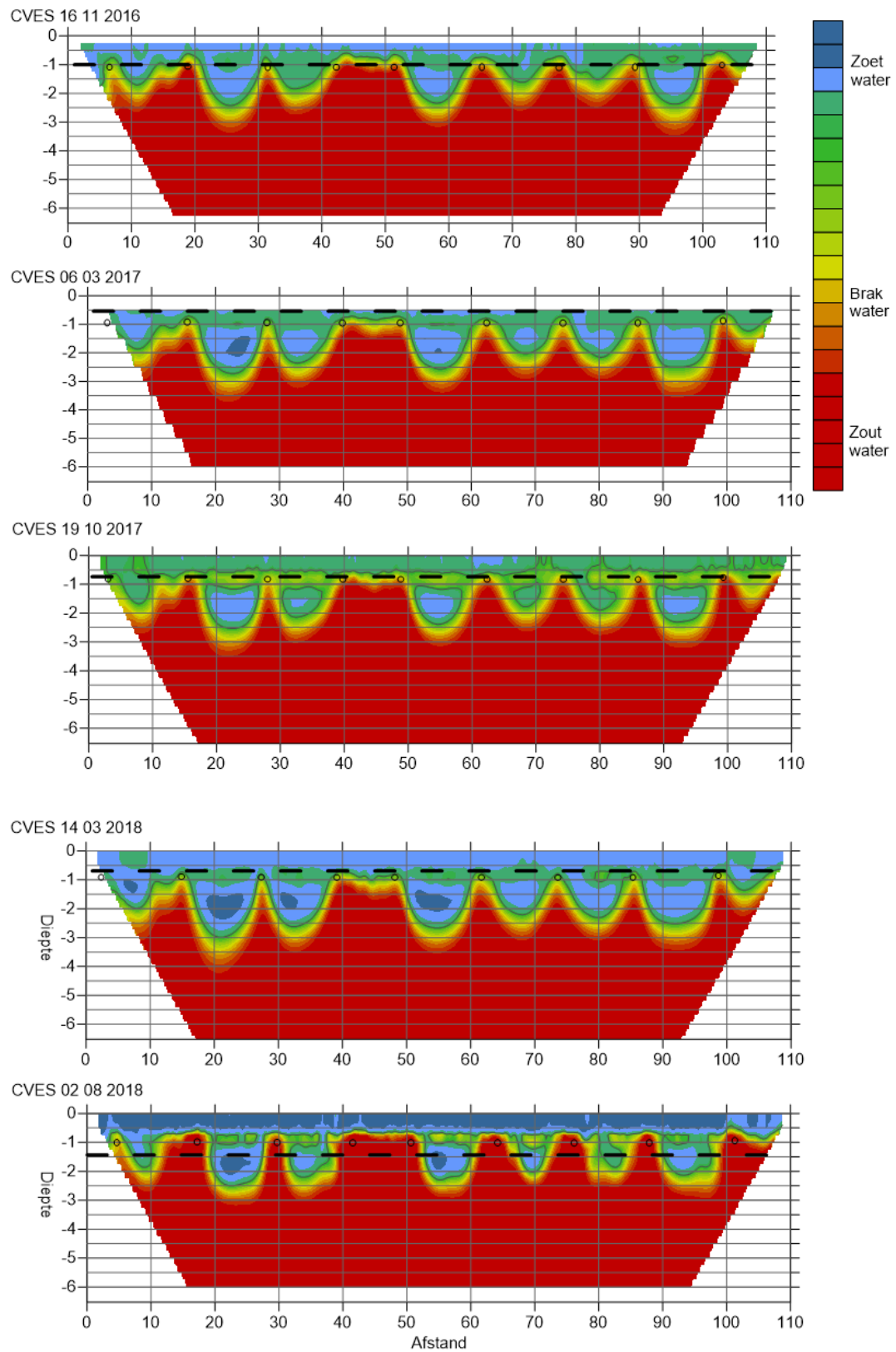


Figuur 75: CVES-meting opzet met terrameter, accu, kabel en elektroden

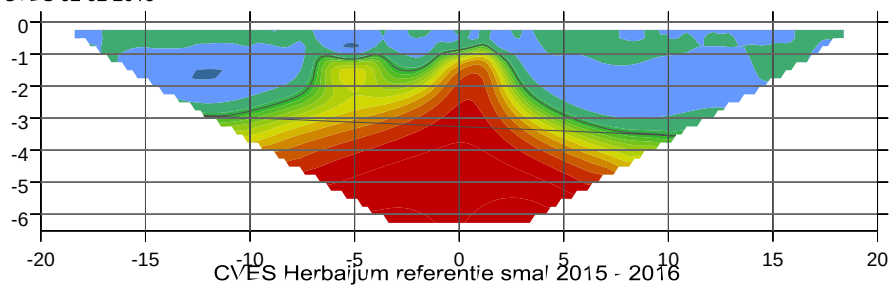
Bijlage 2

CVES/ERT metingen Herbaijum



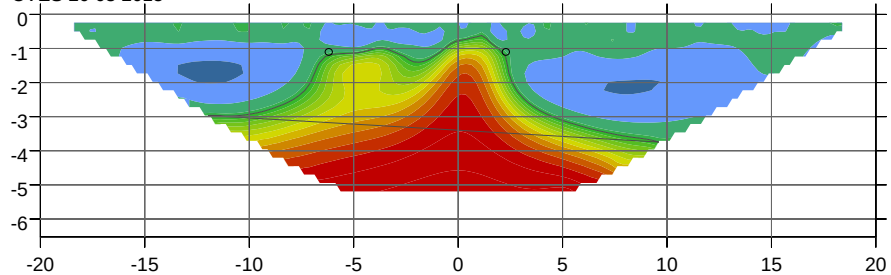


CVES 02 02 2015

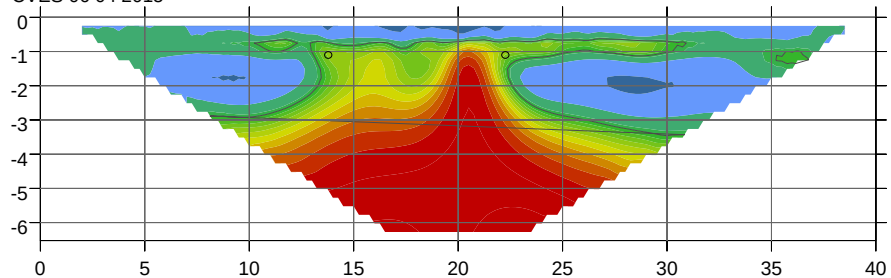


CVES Herbaaijum referentie smal 2015 - 2016

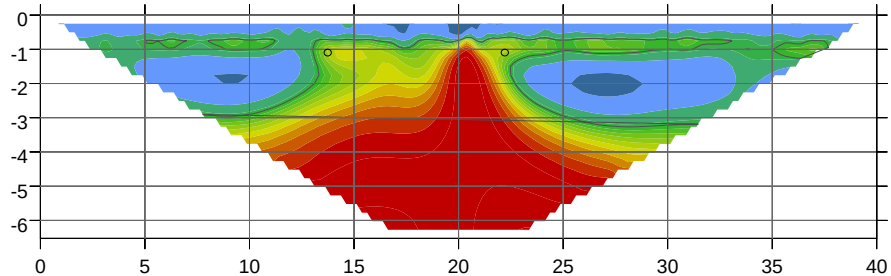
CVES 20 03 2015



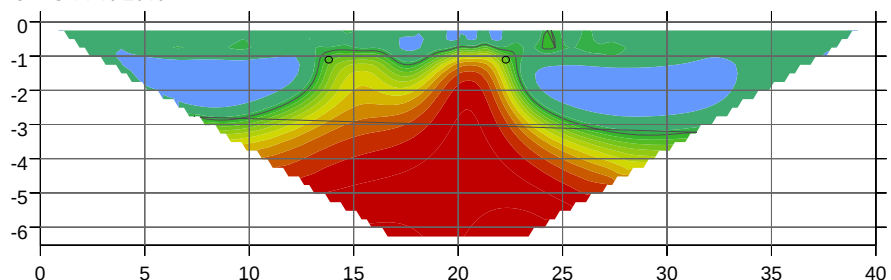
CVES 06 04 2015



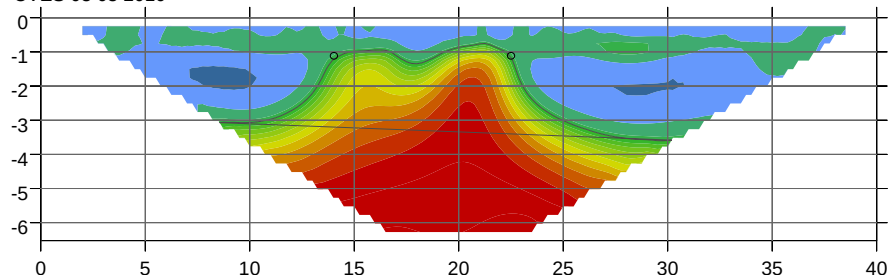
CVES 07 07 2015



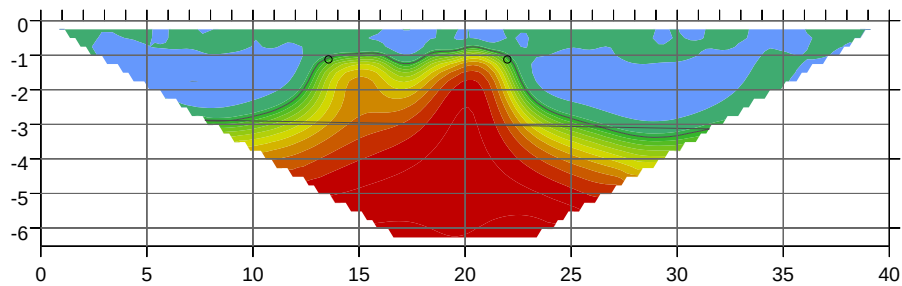
CVES 14 10 2015



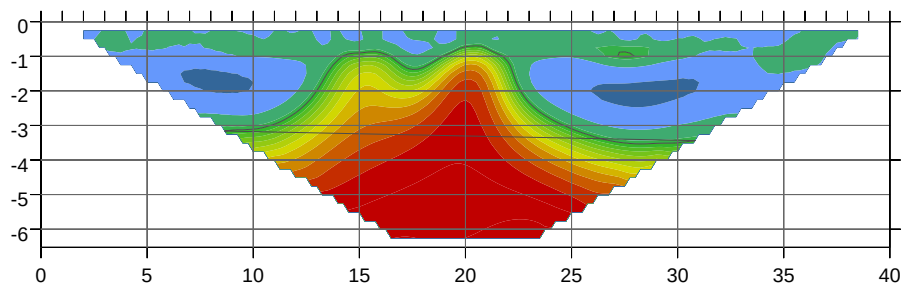
CVES 03 03 2016



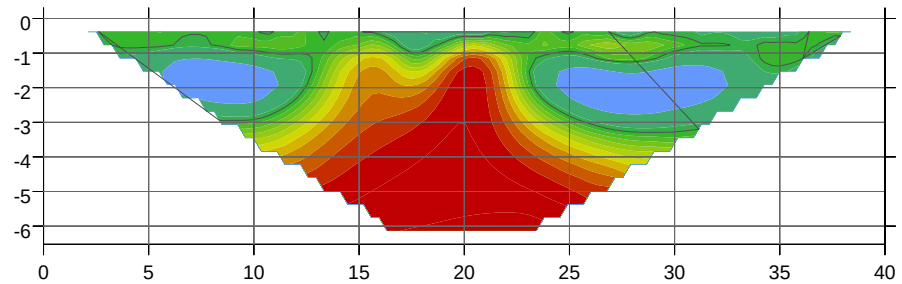
CVES 17 11 2016



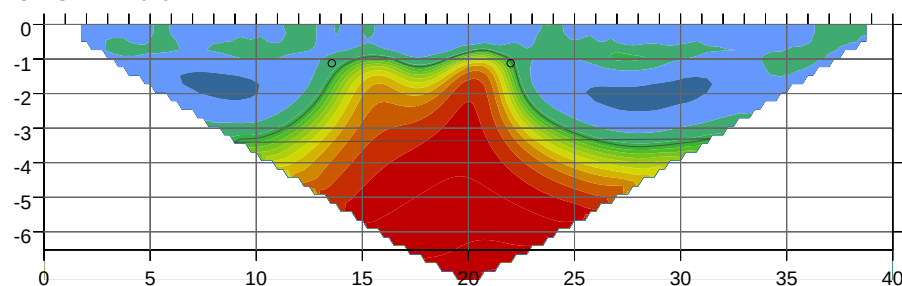
CVES 01 03 2017



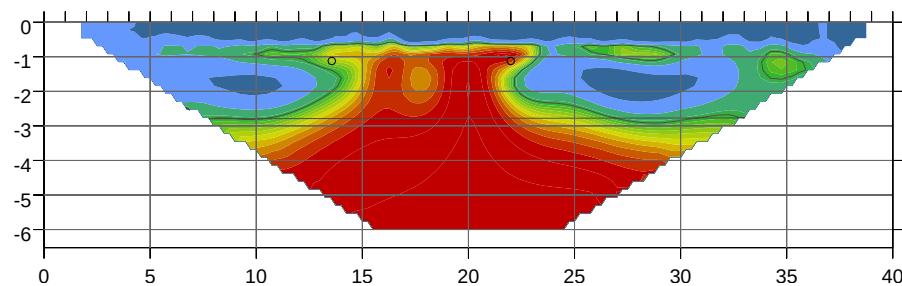
CVES 27 10 2017



CVES 17 11 2016



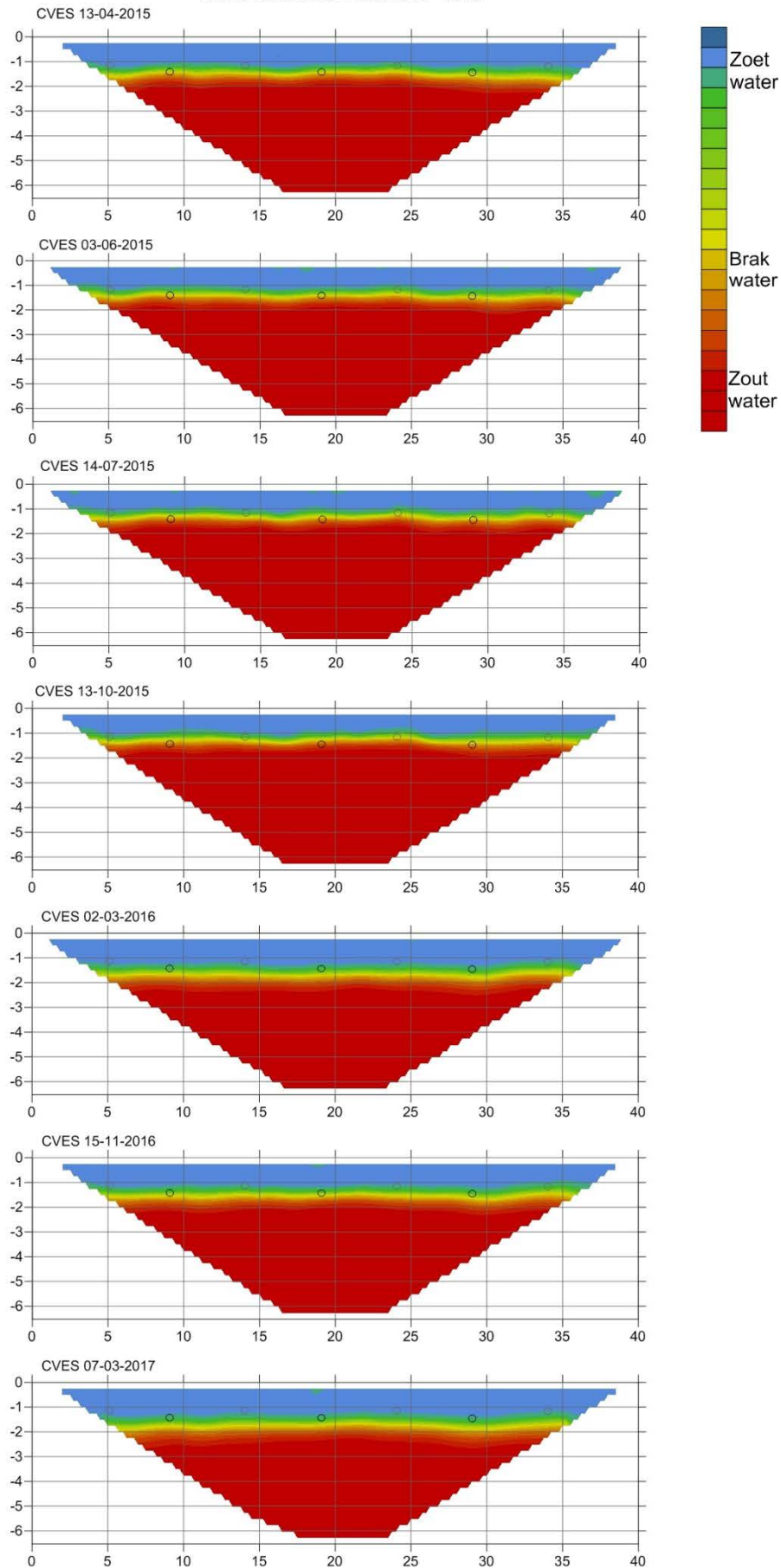
CVES 17 11 2016

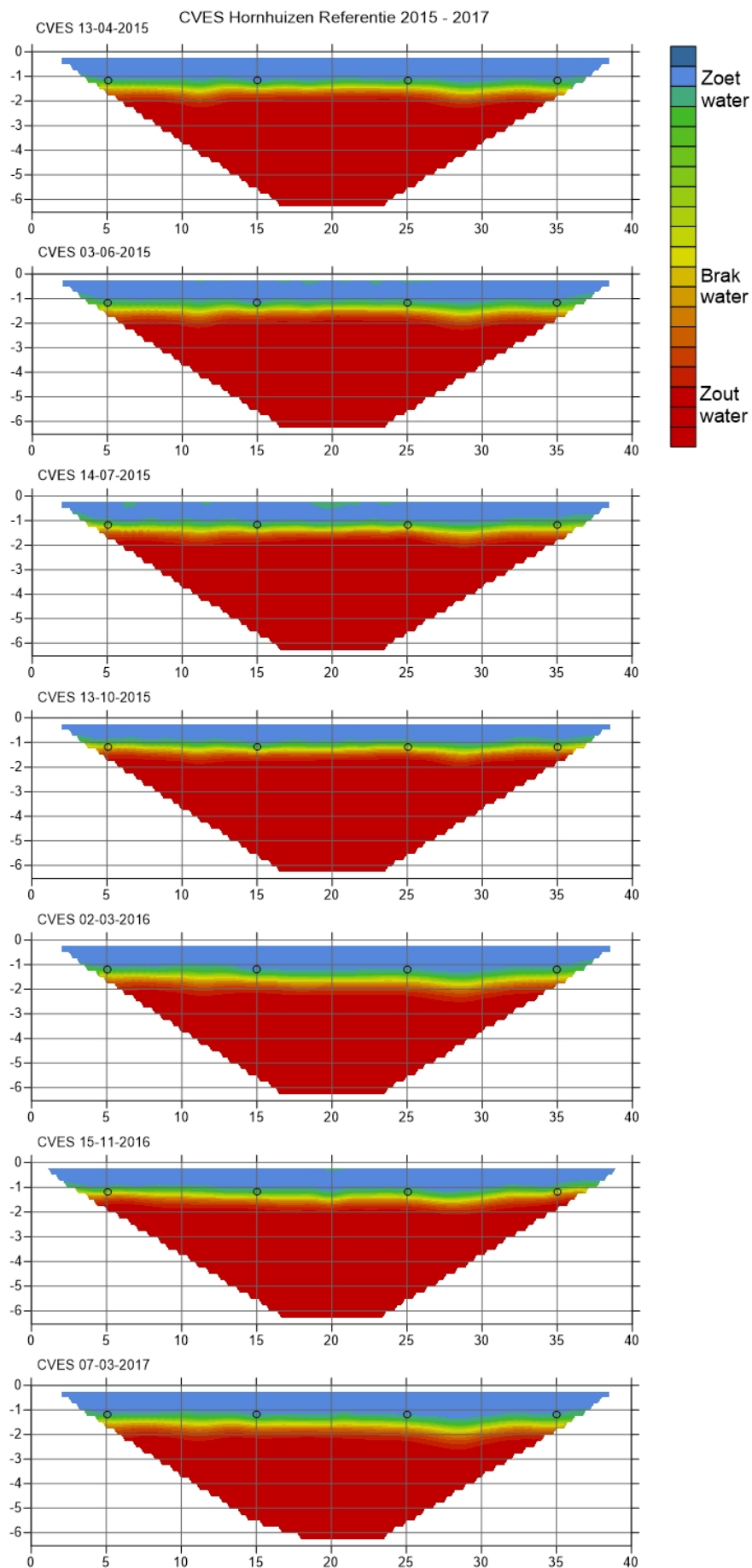


Bijlage 3

CVES/ERT metingen Hornhuizen

CVES Hornhuizen Proef 2015 - 2016





Bijlage 4

Verziltingrisicokaart

Gebruikt model en kaarten voor verziltingsrisicokaart

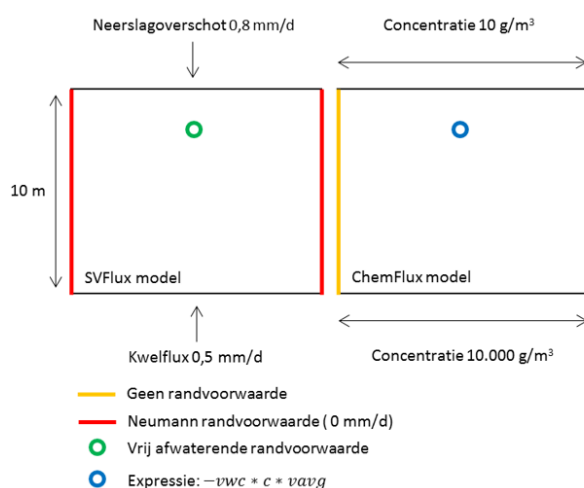
Modelstudie naar zoetwaterlens op perceelschaal

De vraag blijft nu, hoe kunnen deze datasets worden gecombineerd tot één kaart die een verziltingsrisico aangeeft voor de waddenregio? Omdat er een complexe samenhang is tussen de verschillende factoren (kwelflux, doorlatendheid, drainafstand, neerslagoverschot) en de dikte van de zoetwaterlens, is het niet simpelweg mogelijk om de kaarten en factoren over elkaar heen te leggen. Daarom is er voor elke combinatie van factoren een modelsimulatie opgezet.

Er zijn verschillende manieren om een zoetwaterlens te modelleren. In dit geval is ervoor gekozen om de zoetwaterlensen in de geotechnische modelsoftware SV-Office te modelleren. Dit is een gebruikersinterface voor het programma FlexPDE. Het voordeel van deze software is dat het geïntegreerd en dichtheidsafhankelijk kan rekenen en het de verzadigde en onverzadigde grondwaterstroming kan koppelen. Hiermee kunnen de kwetsbare zoetwaterlensen tot in detail worden gesimuleerd. In dit onderzoek zijn de volgende programma's die onder SV-Office vallen gebruikt; het stromingsmodel SV-Flux, een model voor het berekenen van grondwaterstroming in het verzadigde en onverzadigde deel van de bodem, en het geochemische model ChemFlux, welke in staat is het transport van opgeloste stoffen door de onverzadigde en verzadigde zone te modelleren. Door deze modellen aan elkaar te koppelen wordt de chlorideconcentratie van het grondwater volledig geïntegreerd en dichtheidsafhankelijk berekend.

In SV-Office is het mogelijk om 1D, 2D en 3D te modelleren. Er is gekozen voor tweedimensionaal omdat, in tegenstelling tot eendimensionaal, de stroming naar de drain hiermee berekend kan worden. Er is niet driedimensionaal gerekend omdat de grootte en vorm van de zoetwaterlens parallel aan de drainagebuizen gelijk is.

Daarnaast is er voor een drainageafstand van 10 meter gekozen. Volgens de resultaten van een enquête van Acacia Water in Friesland en Groningen blijkt dat drainageafstanden tussen de 8 en 12 meter het vaakst voorkomen.



Het model beschrijft een bodemprofiel met een verzadigde en onverzadigde zone in een kwelgebied met een drain. De onderkant in het model heeft een opwaartse zoute flux. De volgende aanname wordt hierbij gemaakt: Het kwelwater komt van oneindig diep en stroomt hierdoor loodrecht omhoog. Het maaiveld vormt steeds de bovenkant van het model. Aangenomen wordt dat de toplaag van het model een homogeen doorlatende laag is. Aan het maaiveld vindt er grondwateraanvulling plaats door middel van een neerwaartse flux.

De bodemopbouw verschilt per verschild per GeoTOP profiel, maar zijn allen opgebouwd uit lagen zand, klei en veen. Voor de bodemparameters zijn gegevens uit de Staringreeks gebruikt. Voor profielen met zand is de ondergrond O1 aangehouden, voor klei (O13) en veen (O17) lagen zijn de ondergronden afgedekt met een bijbehorende Staring bovengrond. Voor de bovengrond is een dikte van 30 cm aangehouden.

De zoetwaterlenzen worden doorgerekend voor verschillende bodemprofielen (appendix 1) en kwelfluxen. Deze bodemprofielen bestaan uit gelaagde profielen met veen, zand en klei profielen. De drain wordt gemodelleerd met een vrij afwaterende randvoorwaarde. In de model simulaties is het drainage niveau voor elk profiel -1 m-mv.

Tabel 12. Kwelfluxen toegepast voor de simulaties

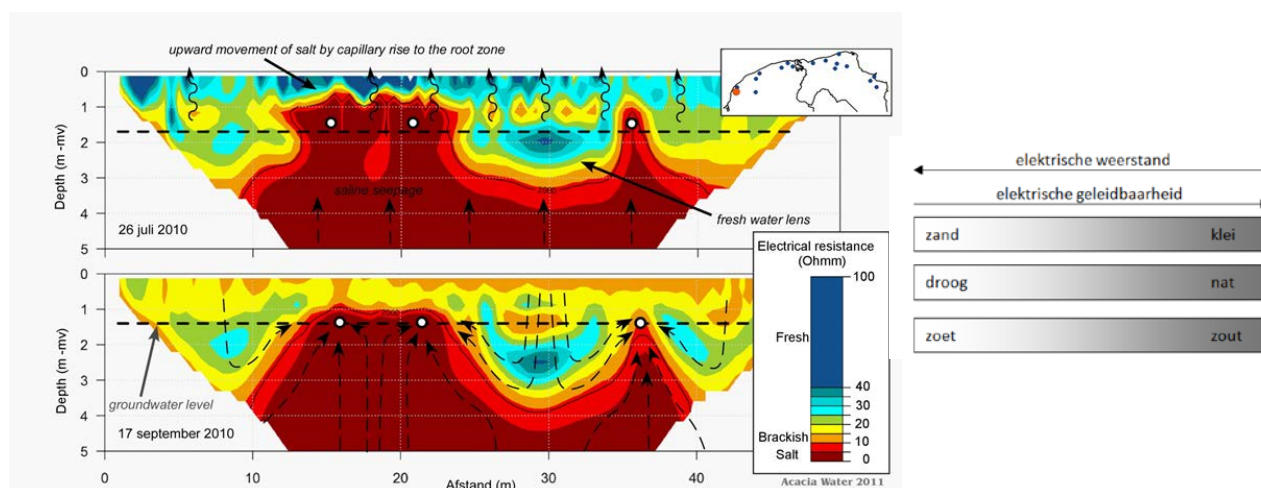
Kwelflux in (mm/d)						
0	0,05	0,1	0,5	1	2	

Met het model worden simulaties opgezet om eerst een stabiele, jaargemiddelde situatie op te zetten. Een jaarlijks neerslagoverschot van 0.8 mm/d is gebruikt als bovengrens

Validatie huidig verziltingsrisico

De vorm en dikte van de zoetwaterlenzen kan 2-dimensionaal in beeld worden gebracht door middel van geofysicametingen in het veld. Met behulp van zogenaamde CVES-metingen kan er een gedetailleerde doorsnede van de ondergrond en zoutgehaltes worden gemeten. Het CVES-apparaat meet de elektrische geleidbaarheid en daarmee de weerstand van het profiel. Op basis van de gemeten elektrische weerstanden kan een schatting worden gemaakt van het chloridegehalte van het grondwater.

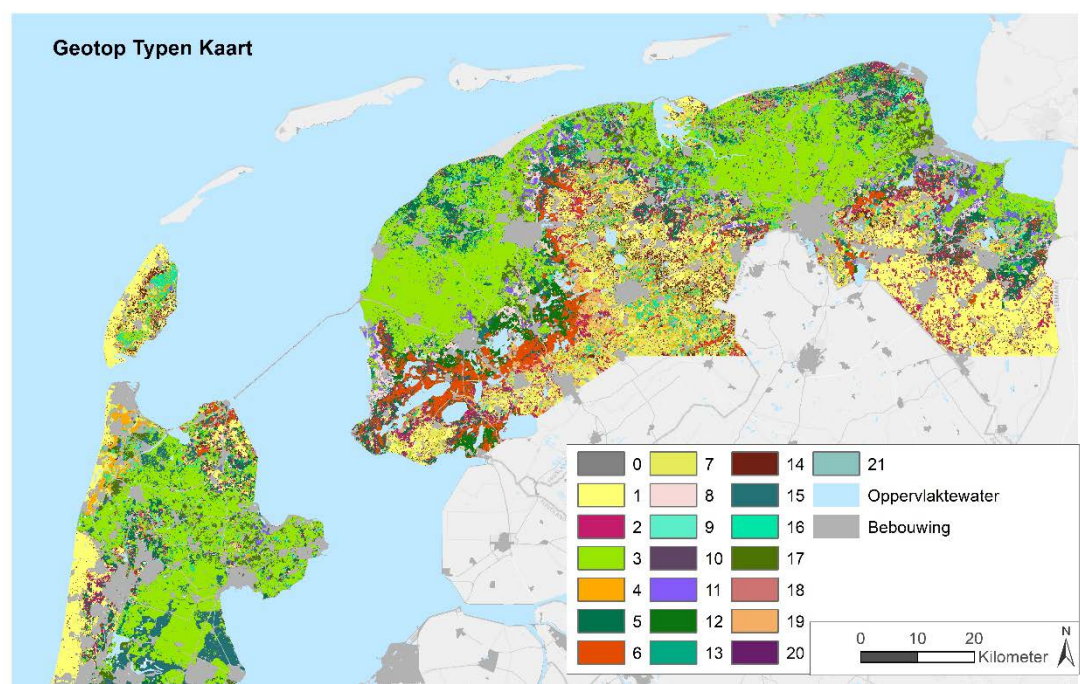
Hogere weerstanden boven de grondwaterstand worden veroorzaakt doordat hier sprake is van een onverzadigde zone. De lucht in de poriën geleiden de stroom slechter waardoor een hogere weerstand wordt gemeten. Hierdoor is geen betrouwbare uitspraak te doen of er sprake is van zoet dan wel zout bodemvocht. In de verzadigde zone heeft het chloride gehalte en de grondsoort invloed op de gemeten weerstand.



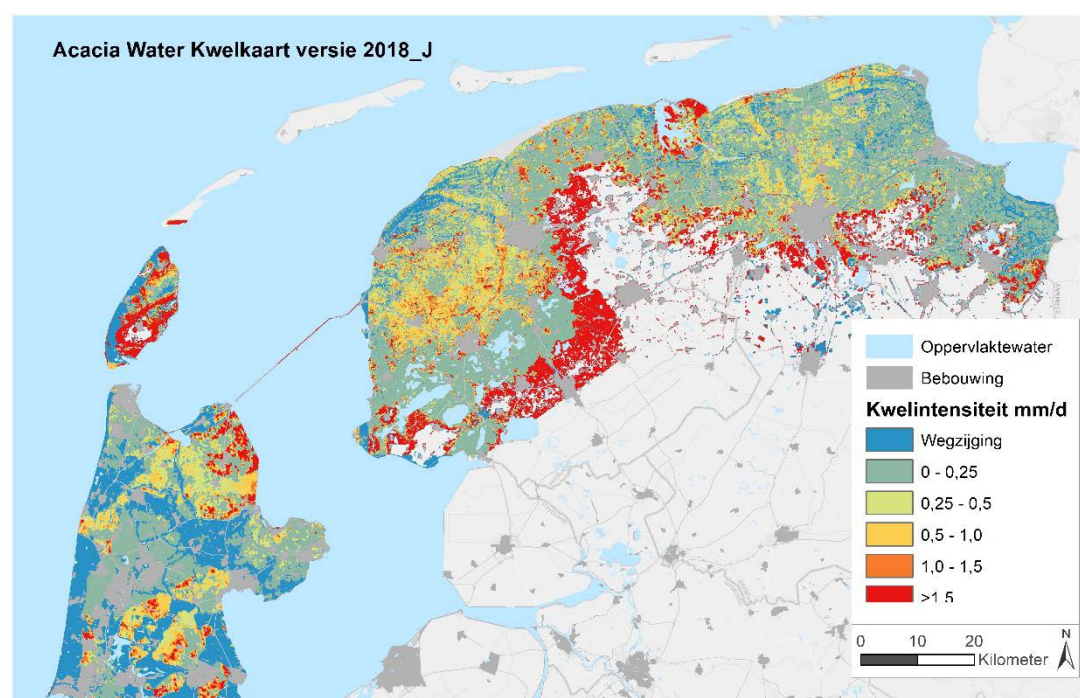
Figuur 76: Links: de CVES-meting van een perceel in Herbaijum, Friesland, in juli en september. Het perceel bevat 4 drainage buizen en laat het effect van drainage op de ontwikkeling van regenwaterlenzen zien. Rechts: de parameters die de elektrische geleidbaarheid beïnvloeden. (Van Staveren en Velstra, 2011)

In verschillende studies van Acacia Water zijn geofysica metingen uitgevoerd. Deze metingen zijn gebruikt voor validatie van de verziltingsrisico kaart.

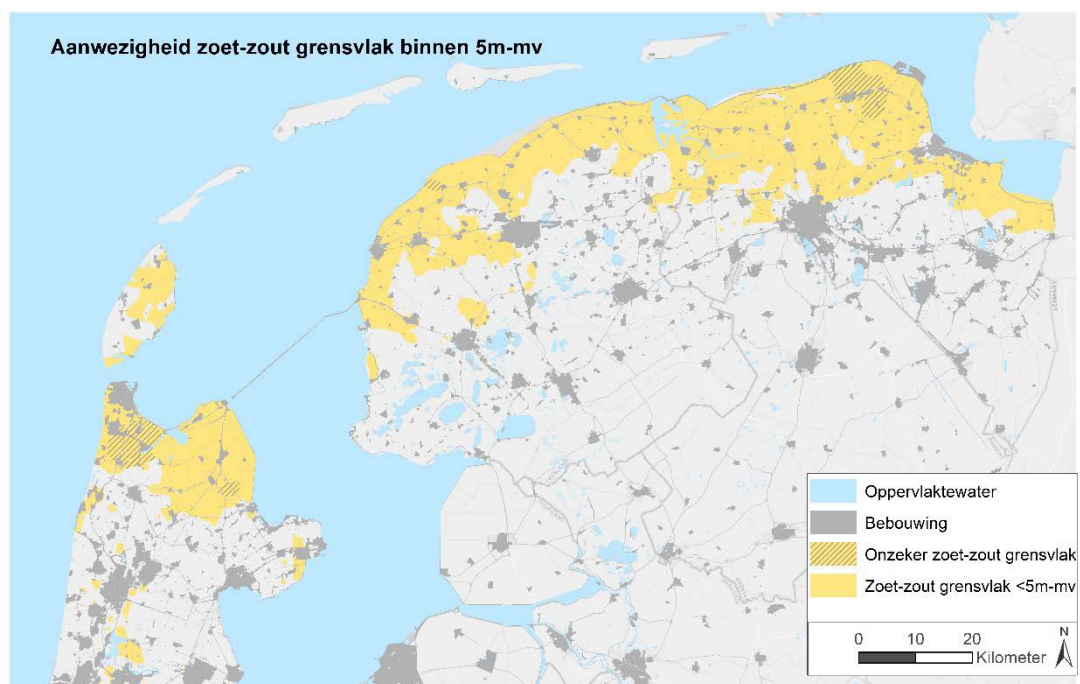
Kaart 1: Geotop typen



Kaart 2: Kwelkaart



Kaart 3: risicogebied verzilting



Bijlage 5

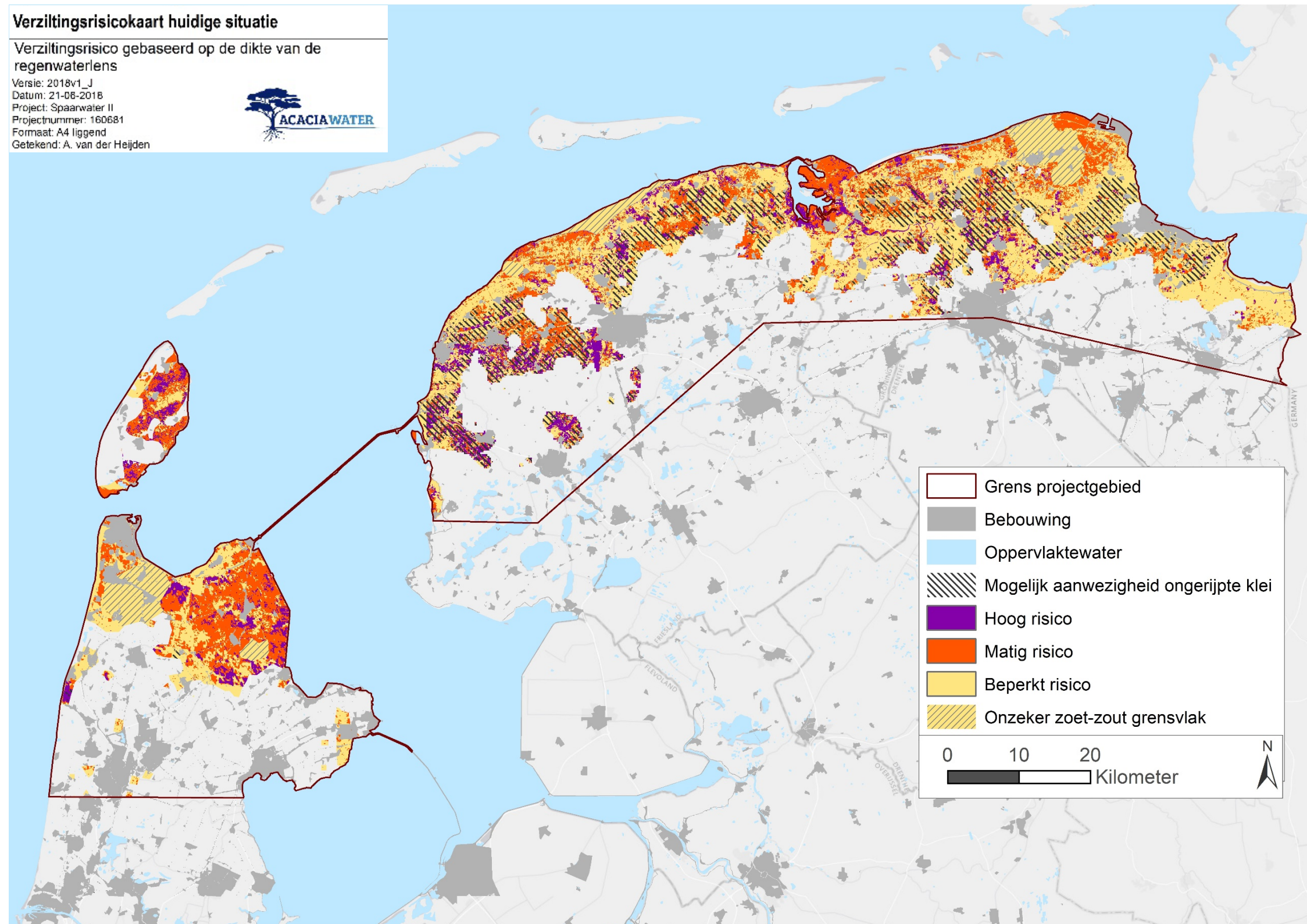
Verziltingsrisicokaart huidig

Verziltingsrisicokaart huidige situatie

Verziltingsrisico gebaseerd op de dikte van de regenwaterlens

Versie: 2018v1_J
 Datum: 21-08-2018
 Project: Spaarwater II
 Projectnummer: 160681
 Formaat: A4 liggend
 Getekend: A. van der Heijden





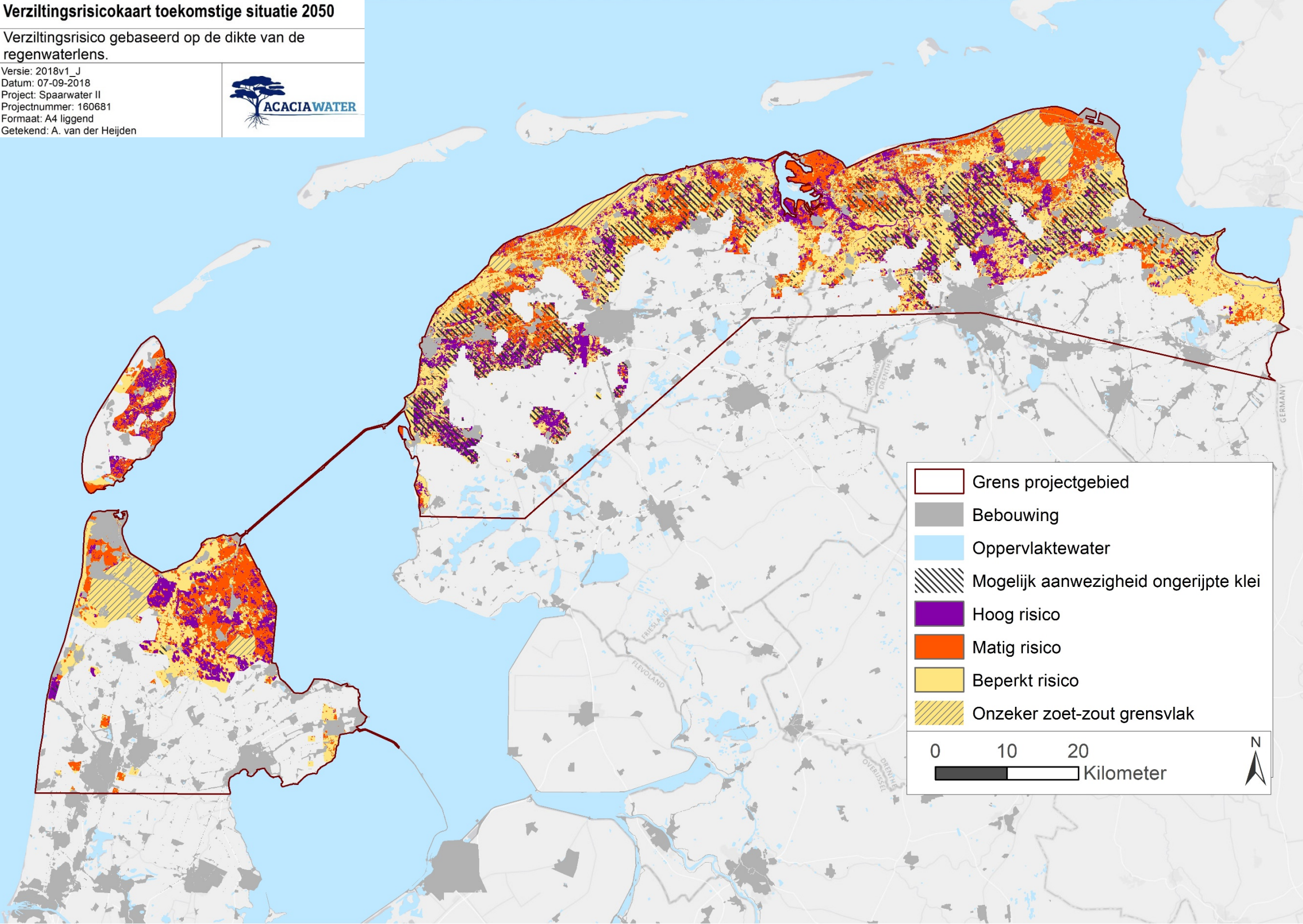
Bijlage 6

Verziltingsrisicokaart toekomst

Verziltingsrisicokaart toekomstige situatie 2050

Verziltingsrisico gebaseerd op de dikte van de regenwaterlens.

Versie: 2018v1_J
Datum: 07-09-2018
Project: Spaarwater II
Projectnummer: 160681
Formaat: A4 liggend
Getekend: A. van der Heijden



Bijlage 7

Modelberekeningen SV-Office

Methodebeschrijving

De invloed van perceeleigenschappen op de vorm en grootte van de zoetwaterlenzen is onderzocht met behulp van een grondwatermodel in vier fasen welke zijn uitgevoerd in meerdere stappen.

Fase 1 – Concept van de zoetwaterlens en modelconceptualisatie

In de eerste fase is het grondwatersysteem van de gedraineerde percelen met zoetwaterlenzen en de wijze van modelleren van dit grondwatersysteem in SV-Office onderzocht. Het resultaat van deze fase is de basis voor de modellen uit fase 2 en 3.

- Stap 1** Over de modelbeschrijving van het grondwatersysteem in gedraineerde percelen met zoute kwel is nog enige onzekerheid. Uit verschillende studies is gebleken dat de modelbeschrijvingen van dit grondwatersysteem nogal uiteenlopen. Uit veldmetingen van Acacia Water in 2010 bleek dat zoetwaterlenzen functioneren als op zichzelf staande zeer lokale grondwatersystemen. De eerste stap is deze conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem in gedraineerde percelen met zoute kwel te valideren met behulp van het grondwatermodelleringsprogramma van SV-Office.
- Stap 2** De wijze van het modelleren van de kwelflux kan op meerdere methoden. De gevoeligheid van het model voor de verschillende methoden en de bij de doelstelling best passende methode worden in deze stap onderzocht
- Stap 3** Wanneer de wijze waarop de kwelflux wordt gemodelleerd en de conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem op basis van de validatie bepaald is kunnen de randvoorwaarden, geometrie en andere parameters van het model bepaald worden. Met deze parameters wordt het basismodel opgesteld, het basismodel dient als basis voor alle modellen in deze modelstudie.

Fase 2 – Invloed van perceeleigenschappen in een homogeen bodemprofiel

In de tweede fase wordt de invloed van de perceeleigenschappen in een homogeen bodemprofiel op een zoetwaterlens bepaald. Gelaagdheden in het bodemprofiel worden in deze fase buiten beschouwing gelaten omdat de vorm en grootte van de zoetwaterlens op deze manier geheel afhankelijk is van de overige perceeleigenschappen en niet van eventuele gelaagdheden in het bodemprofiel.

- Stap 4** De eerste stap in deze fase is een homogeen bodemprofiel simuleren met een vaste hoeveelheid neerslagoverschot, drainagediepte en chloridegehalte van de zoute kwel. In dit bodemprofiel wordt gevarieerd in:
1. Bodemtype
 2. Drainageafstand
 3. Grootte van kwelflux
- Stap 5** Met de uitkomst van deze modellen wordt de grootte van de zoetwaterlens per variant inzichtelijk gemaakt door middel van het data-analyse programma Tableau en de relaties gelegd tussen de bodemtypen, drainageafstanden en kwelflux en de grootte en vorm van de zoetwaterlens.
- Stap 6** Wanneer de invloed van het bodemtype, de drainageafstand en de kwelflux op de zoetwaterlens bekend is, worden deze perceeleigenschappen vastgezet op een, voor gebieden met zoute kwel, representatieve waarde.

Vervolgens wordt een homogeen bodemprofiel gesimuleerd waarin gevarieerd wordt in:

1. Drainagediepte
2. Chloridegehalte van de zoute kwel

Stap 7 Met de uitkomst van deze modellen wordt de grootte van de zoetwaterlens per variant inzichtelijk gemaakt en de invloed van de draindiepte en chloridegehalte van de zoute kwel op de grootte en vorm van de zoetwaterlens bepaald.

Stap 8 De meest invloedrijke perceeleigenschappen bepalen.

Resultaat fase 2: Invloed van de perceel-drainage, bodemtypen, chloridegehalte van de zoute kwel en kwelflux in een homogeen bodemprofiel op de grootte en vorm van zoetwaterlenzen bepaald.

Fase 3 – Invloed van een gelaagd bodemprofiel

In de homogene bodemprofielen was het mogelijk de invloed van de perceeleigenschappen in beeld te brengen maar slechts weinig ondergronden in Nederland zijn geheel homogeen. Om die reden zijn er in het grondwatermodel varianten gesimuleerd waarin het bodemprofiel in doorlatendheid contrasterende lagen bevat.

Stap 9 Allereerst worden de te onderzoeken gelaagde bodemprofielen bepaald op basis van literatuuronderzoek.

Stap 10 De bodemprofielen worden gesimuleerd met een vaste hoeveelheid neerslag, drainageconfiguraties, chloridegehalten en kwelflux.

Stap 11 Met de uitkomst van deze modellen wordt de invloed van lagen in de ondergrond op de grootte van de zoetwaterlens per variant inzichtelijk gemaakt met behulp van het data-analyse programma Tableau.

Resultaat fase 3: Invloed van gelaagdheden op de vorm en grootte van zoetwaterlenzen inzichtelijk.

Fase 4 – Toetsing modelresultaten aan veldmetingen

In de laatste fase van dit onderzoek worden de modelresultaten getoetst aan de veldmetingen.

Stap 12 De gevonden relaties in een homogeen bodemprofiel aan veldmetingen.

Stap 13 Toetsen modelresultaten van gelaagde bodemprofielen aan veldmetingen.

Modelbeschrijving

Software

Gebruik is gemaakt van de geotechnische modelsoftware SV-Office. Dit is een geotechnische en hydrologische simulatiecode voor ondergrondse processen. Het voordeel van deze software is dat het geïntegreerd en dichtheidsafhankelijk kan rekenen en het de verzadigde en onverzadigde grondwaterstroming kan koppelen. In dit onderzoek zijn de volgende programma's die onder SV-Office vallen gebruikt; het stromingsmodel SV-Flux, model voor het berekenen van grondwaterstroming in het verzadigde en onverzadigde deel van de bodem, en het geochemische model ChemFlux, welke in staat is het transport van opgeloste stoffen door de onverzadigde en verzadigde zone te modelleren. Door deze modellen aan elkaar te koppelen wordt de chlorideconcentratie van het grondwater volledig geïntegreerd en dichtheidsafhankelijk berekend.

In SV-Office is het mogelijk om 1D, 2D en 3D te modelleren. Er is gekozen voor tweedimensionaal omdat, in tegenstelling tot eendimensionaal, de stroming naar de drain hiermee berekend wordt. Er is niet driedimensionaal gerekend omdat de grootte en vorm van de zoetwaterlens parallel aan de drainagebuizen gelijk is.

De totale tijd dat het model doorrekenet is 14400 dagen wat neer komt op ongeveer 40 jaar. De dikte en de vorm van de zoetwaterlens in het model is na deze periode in een evenwichtssituatie.

Materiaaleigenschappen

In de programma's SV-Flux en ChemFlux worden er verschillende materiaaleigenschappen van de gebruiker verwacht in te voeren per bodemtype. De verschillende materiaaleigenschappen zijn in deze paragraaf per programma beschreven.

Voor de materiaaleigenschappen van de bodem in SV-Flux is gebruik gemaakt van de 'Staringreeks'. Dit is een standaardreeks van bodem fysische karakteristieken van Nederlandse gronden en bestaat uit achttien bouwstenen voor bovengronden en achttien voor ondergronden. Hiermee komen de bovengronden overeen met de diepte tot waar de meeste planten zich kunnen wortelen (J.H.M. Wösten, G.J. Veerman, W.J.M de Groot, J. Stolte, 2001). In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de meest recente Staringreeks uit 2001 waarin de waterretentiekarakteristiek beschreven wordt met de volgende door Van Genuchten opgestelde empirische vergelijking (Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha h)^{1-1/n}}$$

De waterretentiekarakteristiek geeft de relatie tussen de hoeveelheid vocht in de bodem en de zuigspanning. Differentiatie van de waterretentiekarakteristiekcurve levert de waterbergingsfunctie voor de onverzadigde zone op. De waterbergingsfunctie is gewenst in combinatie met de doorlatendheidskarakteristiek bij het uitvoeren van een tijdsafhankelijke stroomanalyse van een onverzadigde bodem (W. Scott Sillers, D.G. Fredlund, 2001).

De doorlatendheidskarakteristiek wordt beschreven met de volgende vergelijking (Genuchten, 1980):

$$K(h) = K_s \frac{((1 + \alpha h^n)^{1-1/n} - \alpha h^{n-1})^2}{(1 + \alpha h^n)^{(1-1/n)(l+2)}}$$

De doorlatendheidskarakteristiek geeft de onverzadigde doorlatendheid van de bodem als functie van de zuigspanning weer.

Betekenis en eenheden van de parameters in de bovenstaande vergelijkingen (J.H.M. Wösten, G.J. Veerman, W.J.M de Groot, J. Stolte, 2001):

Grootheid	Staringseenheid	SVFlux eenheid	Betekenis
h	cm	kPa	Drukhoogte
K(h)	cm/d	m/d	Doorlatendheid als functie van de drukhoogte
Ks	cm/d	m/d	Doorlatendheid bij verzadiging
l	-	-	Bepaalt het verloop van de K-h relatie bij meer negatieve waarde van h
n	-	-	Maat voor de steilheid van de waterretentiekarakteristiek
α	1/cm	1/kPa	Inverse van de drukhoogte h bij het inflectiepunt waar dθ/dh maximaal is
θ(h)	cm ³ /cm ³	-	Vochtgehalte als functie van de drukhoogte
θr	cm ³ /cm ³	-	Residuaire waarde van het vochtgehalte
θs	cm ³ /cm ³	-	Vochtgehalte bij verzadiging

Tabel 13: Betekenis en eenheden van de vergelijkingen voor de doorlatendheidskarakteristiek en de waterretentiekarakteristiek (J.H.M. Wösten, G.J. Veerman, W.J.M de Groot, J. Stolte, 2001)

Er is gekozen om voor de homogene bodemprofielen alleen de ondergrondrelaties te gebruiken. Er zijn in 2001 achttien verschillende ondergronden gedefinieerd. Door middel van een GIS-analyse is onderzocht welke ondergronden voorkomen in laaggelegen delen van Nederland. In het interessegebied komen de volgende acht bodemsoorten voor volgens de in 1988 opgestelde generalisatie en bodem fysische vertaling van de bodemkaart van Nederland (J.H.M. Wösten, F. de Vries, J. Denneboom, A.F. van Holst, 1988):

Nr.	Grondsoort	Ks (m/d)	I (-)	n (-)	α (1/kPa)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)
O1	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	0,9967	0	2,286	0,228345281	0,36	0,01
O2	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	0,6388	0,168	1,951	0,217131896	0,38	0,02
O3	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	0,45	0	1,717	0,173297758	0,34	0,01
O5	grof zand	5	0	2,374	0,531106657	0,32	0,01
O9	matig lichte zavel	0,2401	-1,382	1,4	0,095823466	0,46	0
O10	zwarte zavel	0,15	-1,879	1,257	0,098881662	0,48	0,01
O13	zeer zware klei	0,1	-5,955	1,089	0,197763323	0,57	0,01
O17	mesotroof en eutroof veen	0,3045	-1,592	1,276	0,125386025	0,86	0,01

Tabel 14: Geselecteerde bodemtypen en hun kenmerken volgens de Staringreeks (J.H.M. Wösten, G.J. Veerman, W.J.M de Groot, J. Stolte, 2001)

Voor de materiaaleigenschappen van de verzadigde zone zijn de verzadigde Staringreeks waarden gebruikt en zo nodig aangepast, mede op basis van doorlatendheidstesten uit de studie 'Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland'. Bij de verdampingsmethode worden de monsters eerst verzadigd en daarna op een weegbalans gezet. Door verdamping aan het oppervlak neemt het vochtgehalte af en de vochtspanning toe. Uit de gewichtsafname en de vochtspanningen kunnen de waterretentiekarakteristieken en doorlatendheidskarakteristieken worden bepaald. Tijdens de verplaatsing van de plaats waar het monster verzadigd wordt naar de weegbalans verliest het monster een groot deel van zijn water uit de macro poriën. De macro poriën worden op deze manier niet meegenomen in de berekening van de verzadigde doorlatendheid terwijl de macro poriën hier wel een grote verhogende invloed op hebben.

CHEMFLUX

Voor het modelleren van de verspreiding van het zoute kwelwater in de ondergrond in ChemFlux moet de longitudinale en transversale dispersie en diffusie voor de ondergronden gegeven worden. Dispersie is de menging van opgeloste stoffen in een vloeistof op drie verschillende manieren:

1. Als een vloeistof door poriën stroomt, gaat dit sneller in het midden van de poriën dan aan de randen van het doorstromend oppervlak.
2. Sommige vloeistofdeeltjes bewegen zich over langere stroombanen in een poreus media dan andere deeltjes over dezelfde lineaire afstand.
3. Sommige poriën zijn groter dan andere wat ervoor zorgt dat de stroming door de grotere poriën sneller gaat.

Dispersie is een functie van de gemiddelde stroomsnelheid. Menging die optreedt evenwijdig aan de stroomrichting heet longitudinale dispersie en menging die optreedt loodrecht op de stroomrichting heet de transversale dispersie. Na een gevoeligheidsanalyse bleek dat een variatie in dispersielengte de overgangszone tussen het zoete grondwater en het zoute grondwater smaller of breder maakt maar dat de 1000 g/m³ lijn niet verschuift. De dispersie is voor alle ondergronden om deze reden en op basis van eerdere ervaringen met modellen van J. Velstra (2015) vastgelegd op 0,1 m voor longitudinale dispersie en 0,01 m voor transversale dispersie.

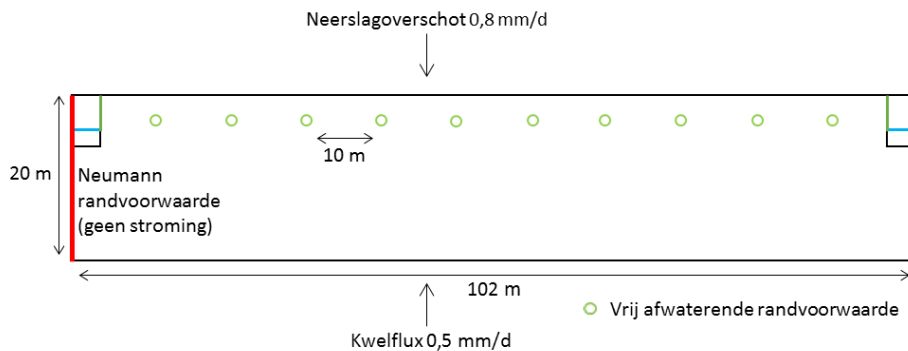
Diffusie is menging van opgeloste stoffen door concentratie verschillen. Dit betekent dat een in water opgeloste stof zich zal verplaatsen van een gebied met een lage concentratie opgeloste stof naar een gebied met een hoge concentratie opgeloste stof. Diffusie is over het algemeen te verwaarlozen in vergelijking met het effect van mechanische dispersie en alleen belangrijk als de stroomsnelheid van het grondwater erg laag is. De diffusie voor alle ondergronden is op basis eerdere ervaringen met modellen van J. Velstra (2015) vastgelegd op 1^E-5 m²/d.

Modelconcept

Modelopbouw

Er is in de programma's van SV-Office een model van een representatief perceel met een breedte van 102 meter opgezet met om de tien meter een drainagebuis. Dit is de gemiddelde drainafstand in Nederland. Aan beide zijden van het model is een halve sloot. Een schets van het model is in Figuur 81 en Figuur 82 weergegeven. De sloot heeft een diepte van 1,5 meter, is 1 meter breed en heeft een vast waterpeil van 1 meter onder maaiveld. Boven de het vaste waterpeil is de sloot, net als de drainagebuizen, vrij afwaterend. De drainagebuizen hebben typische Nederlandse waarden en liggen op een diepte van 0,9 meter en hebben een straal van 0,03 meter. Het bodemtype wat voor deze simulatie is gebruikt is zware klei (O13, Tabel 15: Geselecteerde bodemtypen en hun kenmerken volgens de Staringreeks (J.H.M. Wösten, G.J. Veerman, W.J.M de Groot, J. Stolte, 2001)

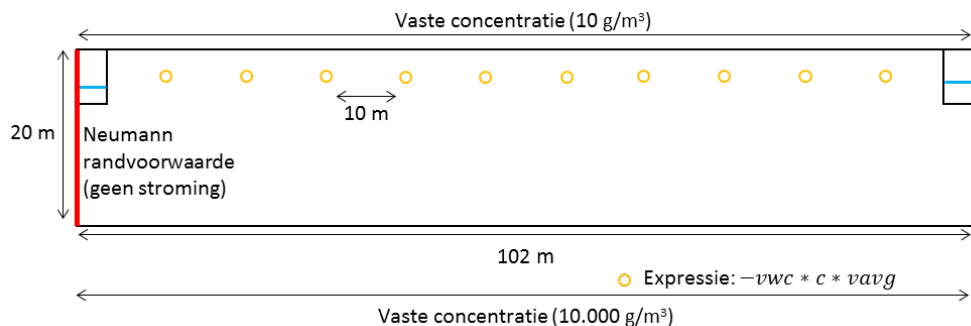
Binnen SV-flux worden de hydrologische randvoorwaarden gegeven en de geochemische randvoorwaarden binnen ChemFlux. De randvoorwaarden van de programma's worden daarom apart beschreven en zijn afgebeeld in Figuur 81 en Figuur 82.



Figuur 77: Schematisatie van de afmetingen en randvoorwaarden van het model in SV-Flux

De linker- en rechtergrens hebben als randvoorwaarde dat er over de grenzen geen stroming plaatsvindt. De bovengrens heeft als randvoorwaarde een constante neerwaartse flux van 0,8 mm/d, dit is het gemiddelde neerslagoverschot per dag in Nederland. De ondergrens heeft als randvoorwaarde een constante flux; de kwelflux. Er is gekozen voor een stationaire waarde omdat op deze manier de relaties worden gelegd voor de gemiddelde grootte en vorm van een zoetwaterlens over een jaar. De drainage heeft als randvoorwaarde de zogenaamde 'Review by Pressure boundary condition'. Deze randvoorwaarde is gelijk aan geen stroming wanneer de waterspanning negatief is; wanneer de grondwaterspiegel onder de drain ligt. Bij een positieve waterspanning, wanneer de grondwaterspiegel boven de drain ligt, probeert deze randvoorwaarde de waterspanning weer naar basis te brengen door water af te voeren over de natte omtrek.

De initiële conditie voor het model in het SV-Flux programma is ingesteld op een constante drukhoogte op het drainageniveau. Wanneer er in de drainagediepte wordt gevarieerd, verandert de drukhoogte mee.



Figuur 78: Schematisatie van de afmetingen en randvoorwaarden van het model in ChemFlux

De bovengrens heeft als randvoorwaarde een constante concentratie van 10 g/m³ dit is de gemiddelde concentratie chloride in regenwater. De ondergrens heeft als randvoorwaarde ook een constante concentratie, maar varieert in de modellen waarin is gevarieerd in chloridegehalte van de zoute kwel, en is in het basismodel vastgesteld op 10.000 g/m³. Dit is de concentratie chloride die gelijk staat aan half-zeewater. In veldmetingen in gedraineerde percelen met zoute kwel is deze concentratie chloride in het diepe grondwater gevonden (G. van Staveren, J. Velstra, 2011). De drain heeft als randvoorwaarde een wiskundige expressie. De expressie is gedefinieerd als volgt:

$$-vwc * c * vavg$$

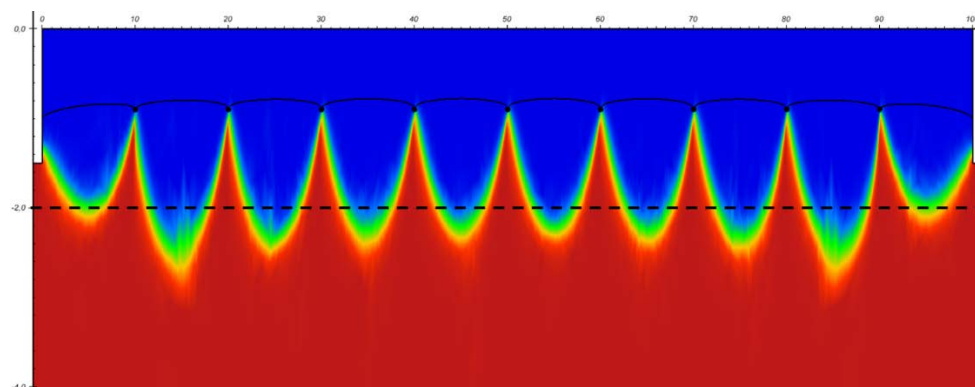
Waarin:

- vwc : vochtgehalte van de bodem
- c : chlorideconcentratie in het grondwater
- $vavg$: stroomsnelheid van het grondwater

De initiële conditie voor het model in het ChemFlux programma is ingesteld met een zoute beginconditie. Al het grondwater op tijdstip 0 is zout grondwater met een concentratie chloride van 10.000 g/m³.

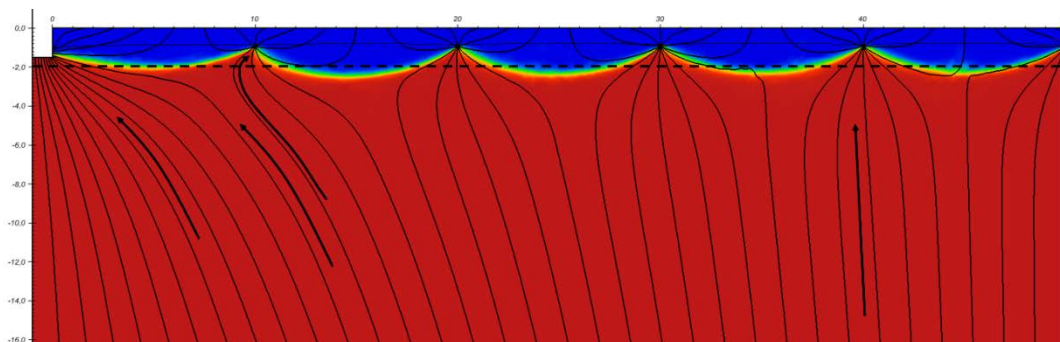
Resultaat validatie conceptuele model

De schematisering en resultaten van deze berekening zijn te zien in. In de resultaten zijn duidelijk de individuele zoetwaterlenzen te zien tussen de drains. De sloot heeft geen invloed op de lenzen die niet aan de eerste drainagebuis naast de sloot grenzen.



Figuur 79: Perceel met opwaartse stroming van zout grondwater. De blauwe gebieden representeren zoet grondwater, de rode gebieden representeren zout grondwater. De X:Y-verhouding is 1: 10 en de gestreepte zwarte lijn ligt op 2 m-mv.

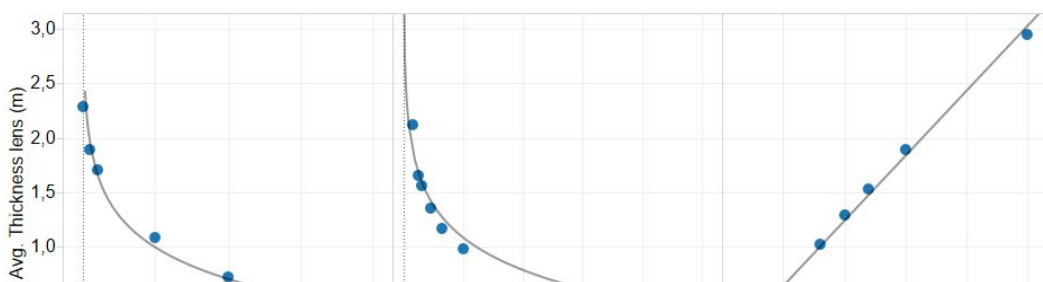
De sloot heeft een groter afvoerend oppervlak als de drains wat resulteert in een dunnere lens gelegen naast de sloot in. De dikkere lens in hetzelfde figuur, tussen het eerste paar drainagebuizen vanaf de sloot, wordt veroorzaakt doordat de sloot een gedeelte van de zoute kwel als het ware afvangt. Dit heeft tot gevolg dat de kwelflux onder deze zoetwaterlenzen kleiner is waardoor de zoetwaterlens dikker kan worden. Dit effect is in weergegeven door middel van stroombanen. Vanaf 30 meter afstand van de sloot is dit effect nagenoeg verdwenen.



Figuur 80: inclusief stroombanen en een X:Y-verhouding van 1:1.

Op basis van deze resultaten kan aangenomen worden dat de conceptuele model beschrijving van het grondwatersysteem in percelen in verziltende gebieden met perceeldrainage bevestigd wordt door het berekende modelresultaat.

Om deze aanname extra kracht bij te zetten is er een berekening gemaakt met in het perceel verschillende drainageafstanden van 2, 5, 10, 15 en 18 meter. In Figuur 84 is te zien dat de verschillende drainageafstanden zorgen voor grotere en kleinere lenzen, maar wat vooral op valt is dat de lenzen tussen drains met een afstand van 10 meter in Figuur 84 ongeveer even groot zijn als de lenzen in. De grootte van een zoetwaterlens heeft geen effect op de daarnaast liggende zoetwaterlens; het zijn aparte lokale grondwatersystemen.



Figuur 81: Perceel met opwaartse stroming van zout grondwater. De blauwe gebieden representeren zoet grondwater, de rode gebieden representeren zout grondwater. De X:Y-verhouding is 1: 10 en de gestreepte zwarte lijn ligt op 2 m-mv.

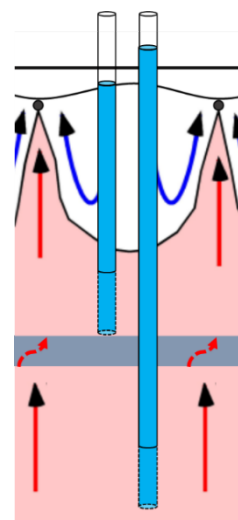
Deze conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem in gedraineerde percelen met zoute kwel maakt het mogelijk het systeem te vereenvoudigen. Het afwaterende gebied van één drain is met deze conceptuele modelbeschrijving namelijk representatief voor het gehele perceel.

Dirichlet vs. Neumann onderrandvoorwaarde voor de kwel

De opwaartse stroming van zout grondwater in de percelen, de zoute kwel welke onderdeel is van het regionale grondwatersysteem, geeft de zoetwaterlenzen zijn specifieke vorm. Deze opwaartse stroming wordt veroorzaakt door een drukverschil tussen de stijghoogte in de ondergrond en de grondwaterspiegel in het freatisch pakket. Door dat de stijghoogte van het grondwater in de ondergrond hoger is dan de freatische stijghoogte vindt er een opwaartse stroming plaats van het zoute grondwater. De grondwaterstanden in het perceel tussen de sloten dan wel de drains verschillen met de waterstand in de drains of de sloten waardoor het drukverschil met het diepere grondwater varieert over het perceel. De grootte van de opwaartse stroming, de kwelflux, is daarom niet over de gehele breedte van het perceel exact even groot.

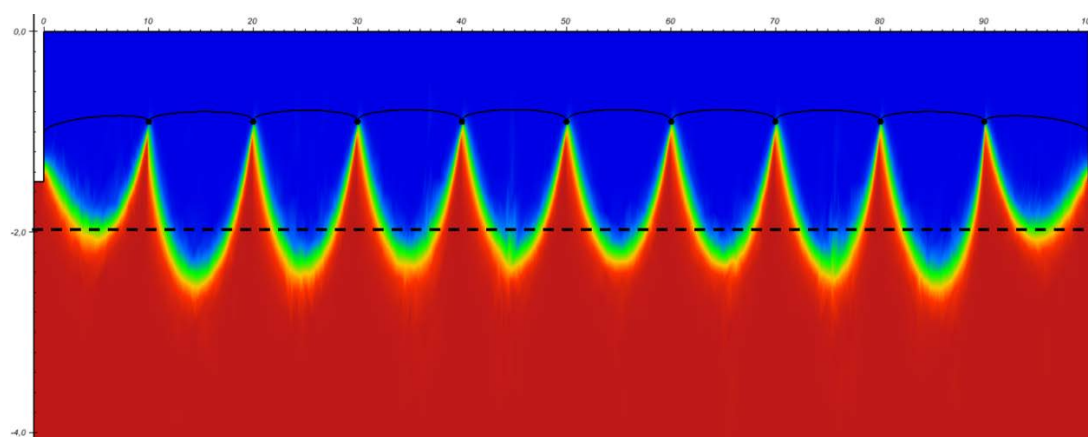
De kwelflux kan in het hydrologische model op twee methoden gemodelleerd worden:

1. Neumann: Constante flux als randvoorwaarde op de ondergrens van het model.
2. Dirichlet: Een vaste stijghoogte als randvoorwaarde. De flux wordt nagebootst door een zeer slecht doorlatende laag in de ondergrond te leggen waardoor er twee watervoerende pakketten ontstaan. Op het onderste pakket wordt een vaste stijghoogte gelegd en door het stijghoogteverschil tussen de pakketten ontstaat er een opwaartse stroming door de slecht doorlatende laag wat resulteert in een flux. Door de slecht doorlatende laag een bepaalde weerstand te geven kan de gewenste flux gegenereerd worden.



Figuur 82: Peilverschil

Met de Neumann methode wordt er geen rekening gehouden met het stijghoogteverschil en de daarmee variërende grootte van de kwelflux. Met de Dirichlet methode wordt met dit verschil wel rekening gehouden maar wordt de berekening geavanceerder en daarmee de rekentijd langer. In dit onderzoek worden veel modellen berekend en een korte rekentijd is gewenst. Om deze reden zijn de twee methoden gesimuleerd om te onderzoeken of er een fundamenteel verschil zit tussen de berekende vorm en grootte van de zoetwaterlenzen onder stationaire omstandigheden.



Figuur 83: Perceel met opwaartse stroming van zout grondwater. In dit model ligt in de ondergrond een slecht doorlatende laag (Dirichlet methode). De blauwe gebieden representeren zoet grondwater, de rode gebieden representeren zout grondwater. De X:Y-verhouding is 1: 10 en de gestreepte zwarte lijn ligt op 2 m-mv.

Figuur 87 toont het resultaat van de berekening met de slecht doorlatende laag in de ondergrond op -19 meter onder maaiveld, toont het resultaat van de berekening met een constante flux aan de ondergrens van het model. Tussen deze modellen is weinig verschil in de grootte van de zoetwaterlenzen. De Neumann methode is daarom gebruikt voor het modelleren van de zoetwaterlenzen in dit onderzoek omdat deze de kortste rekentijd heeft.

In een tijdsafhankelijke situatie waarbij de grondwaterstanden onder de drainage zakt zal de Dirichlet methode beter zijn. Voor het doel van dit onderzoek, stationaire situaties, volstaat de Neumann methode omdat er altijd een vaste grondwateraanvulling is.

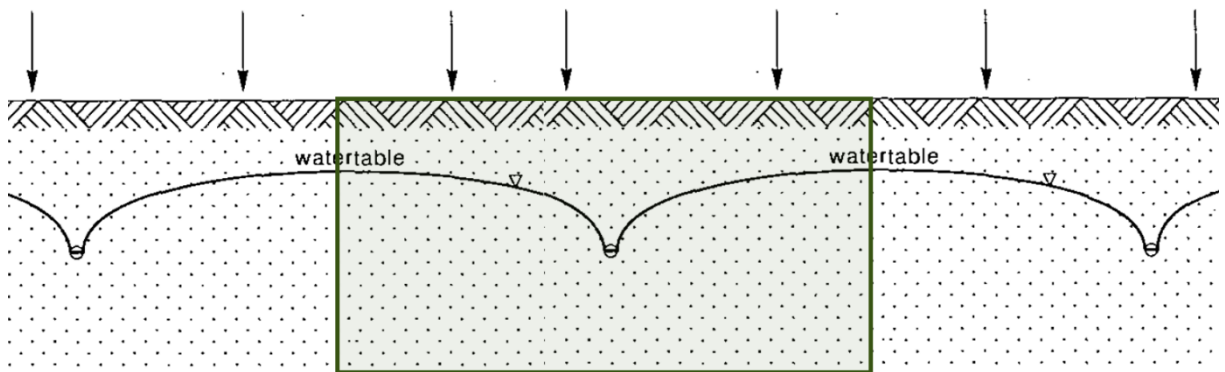
Basismodel

Alle modellen waarin wordt gevarieerd in de perceeleigenschappen zijn allemaal gebaseerd op hetzelfde basismodel. De geometrie en randvoorwaarden van dit model worden in deze paragraaf beschreven. Op basis van de validatie van de conceptuele modelbeschrijving in paragraaf 0 kan worden aangenomen dat voor het simuleren van de zoetwaterlenzen slechts het afwaterende gebied van een enkele drain volstaat.

Geometrie en randvoorwaarden

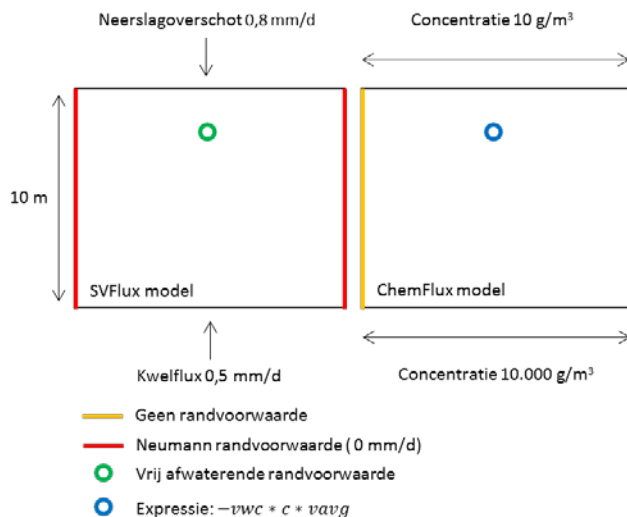
De breedte van het model komt overeen met de drainageafstand; de drain is geplaatst op de helft van de totale breedte. De linker- en rechtergrens liggen om deze reden op de waterscheiding tussen twee drains in een perceel. In

Figuur 88 is een dwarsdoorsnede van een perceel met drainage te zien waarop het groene vlak de 'ligging' van het model weergeeft. De bovengrens representeert het maaiveld en de ondergrens ligt op 10 meter onder maaiveld. Enkele uitgevoerde modelsimulaties wezen uit dat de zoetwaterlenzen onder de meest gunstige perceeleigenschappen niet tot dit niveau reiken. Hiermee is aangetoond dat een diepte van 10 meter voldoende is. De drain heeft een straal van 0,03 meter, dit is een standaardmaat voor perceeldrainage.



Figuur 84: Dwarsdoorsnede van perceel met drainage (Ritzema, 1994). Het groene vlak representeert de dimensies van het model.

De randvoorwaarden en geometrie van het model zijn in Figuur 89 geschematiseerd. De randvoorwaarden komen overeen met de randvoorwaarden van het model wat gebruikt is voor de validatie van de conceptuele modelbeschrijving.



Figuur 85: Schematisatie model



Acacia Institute
Van Hogendorpplein 4
2805 BM Gouda

Telefoon: 0182 – 686424
Internet: www.spaarwater.com