

Heldere lenzen

RELATIES TUSSEN REGENWATERLENZEN EN
PERCEELEIGENSCHAPPEN

H.F. de Bie in opdracht van Acacia Water

Heldere lenzen

RELATIES TUSSEN REGENWATERLENZEN EN PERCEELEIGENSCHAPPEN

AUTEUR

H.F. DE BIE

OPDRACHTGEVER

ACACIA WATER

EXTERNE BEGELEIDERS

J. VELSTRA EN S. BURGER

INTERNE BEGELEIDER

A. BERENDSEN-SLOOT

ONDERWIJSINSTANTIE

HOGESCHOOL VHL

OPLEIDING

VOLTIJD LAND EN WATERMANAGEMENT

MAJOR

HYDROLOGIE

DATUM OPLEVERING

28 MEI 2015

PLAATS

GOUDA

Voorwoord

Voor u ligt het rapport 'Heldere lenzen'. Een onderzoek naar de relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlenzen en de perceeleigenschappen van gedraineerde percelen. Het doel van dit onderzoek is de vorm en grootte van regenwaterlenzen in relatie tot perceeleigenschappen begrijpelijk of helder te maken: 'Heldere lenzen'. Dit rapport is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de opleiding Land en Watermanagement aan de hogeschool Van Hall Larenstein te Velp. Van februari tot en met mei 2015 ben ik met veel plezier bezig geweest met het onderzoek en het schrijven van dit rapport bij mijn opdrachtgever Acacia Water te Gouda. Bij Acacia Water heb ik een ontzettend fijne maar vooral leerzame tijd gehad. Het enthousiasme van mijn begeleiders, Jouke Velstra en Sieger Burger, en de rest van de medewerkers hebben mij aangestoken en het onderzoek en het schrijven van dit rapport een stuk leuker en makkelijker gemaakt. Ik wil deze mensen hiervoor en voor de begeleiding, Jouke en Sieger in het bijzonder, bedanken. Ook Anouk Berendsen-Sloot wil ik bedanken voor haar begeleiding vanuit Van Hall Larenstein. Hoe druk zij het ook had ik kon haar toch altijd wat vragen en feedback verwachten.

Lianne de Bie

Gouda, 28 mei 2015

Samenvatting

Verzilting, een te hoog zoutgehalte in het grondwater voor optimaal landgebruik, in gedraineerde percelen met zoute kwel vormt een steeds groter risico door klimaatverandering, bodemdaling en een stijgende zeespiegel. Mede doordat de regenwaterlenzen in deze percelen verdwijnen. Wat de relaties zijn tussen de vorm en grootte van de regenwaterlenzen en perceeleigenschappen is nog niet goed bekend. Wanneer deze relaties bekend zijn kunnen er gerichte maatregelen genomen worden om verzilting in kaart te brengen en tegen te gaan in de betreffende percelen. De hoofdvraag in dit onderzoek is daarom; **Wat zijn de relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlenzen en de perceeleigenschappen van gedraineerde percelen met zoute kwel?**

De relaties zijn onderzocht door middel van een modelstudie in een grondwatermodelleringsprogramma. Het grondwatersysteem van gedraineerde percelen met zoute kwel bestaat uit de opwaartse stroming van zout grondwater, kwel, en daar boven een onafhankelijk infiltratiesysteem welke de regenwaterlenzen vormt tussen de drainagemiddelen; de sloot en de drainage hebben naar verhouding een gelijkwaardige invloed op de regenwaterlenzen.

In een homogeen bodemprofiel is gevarieerd in drainageafstand, drainagediepte, bodemtype, grootte van de kwelflux en het chloridegehalte van de zoute kwel. Alle gevarieerde perceeleigenschappen hebben in meer of mindere mate een relatie met de dikte van de regenwaterlens. De drainageafstand en in mindere mate de grootte van de kwelflux hebben een grote invloed op de regenwaterlens. Een combinatie van een kleine drainageafstand en grote kwelflux kan de regenwaterlens zelfs helemaal doen verdwijnen. De overige drie perceeleigenschappen hebben gemiddeld een kleinere invloed op de regenwaterlens.

Het dieper aanleggen van de drainage verlaagd de overgangszone van het zoete naar zoute grondwater. Het verkleint echter de dikte van de regenwaterlens en daarmee de zoetwatervoorraad waar de gewassen op de percelen afhankelijk van zijn. Wanneer de concentratie chloride in de zoute kwel lager is, heeft dit een positief effect op de dikte van de regenwaterlens. Dit komt overeen met het Ghyben-Herzberg principe. Hoewel een lagere doorlatendheid gemiddeld resulteert in een dikkere regenwaterlens is dit waarschijnlijk niet het enige kenmerk van de bodemtypen wat invloed heeft op de regenwaterlens. Het vochtgehalte wat een bepaald bodemtype maximaal kan bevatten, in verzadigde toestand, heeft hier wellicht ook invloed op.

Voor een aantal, in Nederland veel voorkomende, gelaagde bodemprofielen zijn de relaties lastiger vast te leggen. Wel kan worden geconcludeerd dat gelaagdheid een bepalende invloed op de grootte en vorm van de regenwaterlens heeft. Voornamelijk wanneer de bovengrond in verhouding goed doorlatend is en er een slecht doorlatende laag of ondergrond vanaf en tot twee meter onder het drainageniveau ligt. De overgang tussen zoet en zout water ligt in deze bodemprofielen als het ware op de ondoorlatende laag of ondergrond. Hierdoor is de dikte van de regenwaterlens gelimiteerd aan de diepte van de ligging van de slecht doorlatende laag of ondergrond. Bij een omgekeerde situatie, slecht doorlatende bovengrond en een goed doorlatende ondergrond of laag onder het drainageniveau, heeft dit geen invloed op de dikte van de regenwaterlens maar wel op de vorm. Er ontstaat een bredere optrekkende 'kegel' van zout water naar de drain dan in een geheel homogeen bodemprofiel. Een naar verhouding hogere of lagere doorlatende laag boven het drainageniveau heeft geen invloed op de grootte en vorm van de regenwaterlens.

Om de resultaten van het model en de gevonden relaties te valideren zijn deze getoetst aan enkele veldmetingen van gedraineerde percelen in Nederland met zoute kwel. De veldmetingen komen overeen met de resultaten van de modelstudie en de gevonden relaties tussen de perceeleigenschappen en de dikte van de regenwaterlenzen. Een in verhouding slecht doorlatende laag onder het drainageniveau heeft in de veldmetingen dezelfde invloed op de regenwaterlens als de modelberekening. De veldmetingen tonen aan dat de modellen de vorm en dikte van regenwaterlens goed beschrijven.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
1. Inleiding.....	5
2. Methodebeschrijving	7
2.1 Fase 1 – Concept van de regenwaterlens en modelconceptualisatie	7
2.2 Fase 2 – Invloed van perceeleigenschappen in een homogeen bodemprofiel	7
2.3 Fase 3 – Invloed van een gelaagd bodemprofiel	8
2.4 Fase 4 – Toetsing modelresultaten aan veldmetingen.....	8
3. Modelbeschrijving	9
3.1 Software	9
3.2 Materiaal eigenschappen	9
4. Het concept van de regenwaterlens en modelconceptualisatie.....	12
4.1 Het principe van een regenwaterlens	12
4.1.1 Ghyben-Herzberg principe	12
4.1.2 Regenwaterlenzen in percelen met zoute kwel	12
4.2 Validatie conceptuele modelbeschrijving	14
4.2.1 Modelopbouw	14
4.2.2 Resultaat validatie conceptuele model	15
4.3 Dirichlet vs. Neumann onderrandvoorwaarde voor de kwel	17
4.4 Basis model.....	18
4.4.1 Geometrie en randvoorwaarden.....	18
5. Invloed van perceeleigenschappen in een homogeen bodemprofiel.....	20
5.1 Gesimuleerde varianten met een homogeen bodemprofiel.....	20
5.2 Resultaten invloed drainageafstand, kwelflux en bodemtype	21
5.2.1 Invloed drainageafstand en bodemtype	21
5.2.1 Invloed bodemtype	23
5.3 Resultaten invloed drainagediepte en chloridegehalte kwel	24
5.4 Relatieve invloed perceeleigenschappen	25
6. Invloed van een gelaagd bodemprofiel.....	26
6.1 Gesimuleerde gelaagde bodemprofielen	26
6.2 Resultaten gelaagde bodemprofielen	27
7. Toetsing modelresultaten aan veldwaarnemingen	29
7.1 Toetsing resultaten homogeen bodemprofiel aan veldmetingen.....	30
7.2 Toetsing resultaten gelaagde bodemprofielen aan veldmetingen	32
8. Conclusies en aanbevelingen	33
8.1 Conclusies	33
8.1.1 Invloed perceeleigenschappen in een homogeen bodemprofiel.....	33
8.1.2 Invloed van een gelaagd bodemprofiel.....	33
8.1.3 Toetsing modelresultaten aan veldmetingen	33
8.1.4 Relevantie van het resultaat.....	34
8.2 Aanbevelingen	34
Bijlagen.....	35
Bijlage 1 - Dikte regenwaterlens modellen fase 1, partij 1	36
Bijlage 2 - Dikte regenwaterlens modellen fase 1, partij 2	37
Bijlage 3 - Dikte regenwaterlens modellen fase 2.....	38
Bronvermelding.....	39

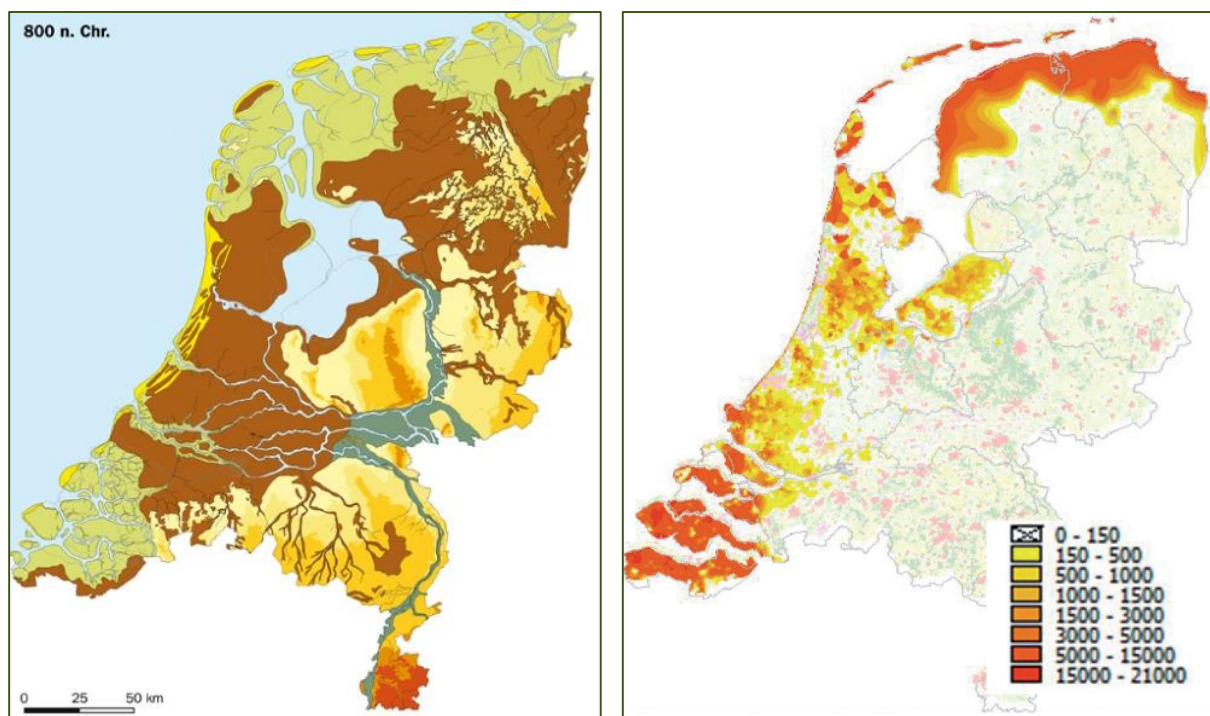
1. Inleiding

AANLEIDING

In laaggelegen gedraineerde landbouwpercelen met zoute kwel in Nederland vormt verzilting een steeds groter risico door bodemdaling, klimaatverandering en een stijgende zeespiegel. Er is sprake van verzilting als het grondwater te zout is voor optimaal gebruik. Verzilting in deze gebieden wordt deels veroorzaakt door het verdwijnen van het op het zoute grondwater drijvende zoete grondwater, ook wel regenwaterlenzen genoemd. Om inzicht te krijgen in de bestaande en toekomstige risico's op verzilting door het verdwijnen van de regenwaterlenzen, is inzicht in het voorkomen van deze regenwaterlenzen essentieel.

ACHTERGROND

Delen van Nederland kampen met verzilting door opwaartse stroming, ook wel kwel genoemd, van zout grondwater. Dit zoute grondwater is van origine oud zeewater wat ingesloten is in de grond toen delen van Nederland nog getijden gebieden waren (Figuur 1). Na het droogleggen van deze gebieden spoelde geïnfiltreerd regenwater het zoute water uit de bovengrond weg en konden er ondiepe zoetwaterlenzen, ook wel regenwaterlenzen, ontstaan die op het zoute grondwater drijven. Regenwaterlenzen in percelen met drainage laten een seizoensgebonden patroon zien van krimp in droge periodes en groei in natte periodes [1]. Door klimaatverandering nemen de droge perioden toe en door bodemdaling en zeespiegelstijging neemt de opwaartse stroming van zout grondwater toe. Het gevolg is dat de kans op het verdwijnen van de regenwaterlenzen toe neemt en daarmee de kans op verzilting van deze gebieden.



Figuur 1 - Links Nederland in het jaar 800, de licht groene gebieden zijn getijdengebieden (RACM&TNO), en rechts het zoutgehalte tot circa 20m diepte (TNO). De zoet-zout verdeling in Nederland komt overeen met de in het verleden getijdengebieden en gebieden die sinds 1300 zijn ingepolderd zoals bijvoorbeeld de Wieringermeer, Koegraspolder en Flevoland

PROBLEMATIEK

Veldmetingen in gedraineerde percelen in Nederland bevestigde het beeld van ondiepe regenwaterlenzen die zich, onafhankelijk van het watersysteem op perceelschaal, tussen de drainagemiddelen vormen. Wat de relaties zijn tussen de perceeleigenschappen en de vorm en grootte van deze regenwaterlenzen, is nog

niet goed bekend. Wanneer de invloed van verschillende perceeleigenschappen op de vorm en grootte van een regenwaterlens bekend is kunnen de percelen of gebieden met het risico op verzilting in kaart worden gebracht. Waarna er gerichte maatregelen op perceelniveau kunnen worden genomen om verzilting tegen te gaan door de regenwaterlens te vergroten.

CENTRALE VRAAG

De vraag die in dit onderzoek centraal staat:

Wat zijn relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlenzen en de perceeleigenschappen van gedraineerde percelen met zoute kwel?

De onderzoeksvraag is opgedeeld in de volgende deelvragen:

1. Wat zijn regenwaterlenzen en waarom is onderzoek naar regenwaterlenzen van belang?
2. Wat is de conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem waarin regenwaterlenzen zich vormen en kan dit model worden aangenomen?
3. Hoe wordt het model opgebouwd en wat zijn de invoergegevens?
4. Wat zijn de relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlenzen en de perceeldrainage, bodemtype, fluxgrootte en chloridegehalte van de zoute kwel in een homogeen bodemprofiel?
5. Wat is de invloed van een gelaagd bodemprofiel op de grootte en vorm van regenwaterlenzen?
6. Welke perceeleigenschappen hebben de grootste invloed op de vorm en grootte van regenwaterlenzen?
7. Zijn de gevonden relaties vergelijkbaar met in gedraineerde percelen gemeten regenwaterlenzen?

DOEL EN DOELGROEP

Het doel van dit onderzoek is om te onderzoeken wat de invloed van verschillende perceeleigenschappen op de vorm en omvang van regenwaterlenzen is. En om meer inzicht in de vorming van regenwaterlenzen te ontwikkelen.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Acacia Water en heeft tot doel een bijdrage te leveren aan het promotieonderzoek van J. Velstra. De kennis over regenwaterlenzen is voor waterschappen, agrariërs en draineurs van belang om op de juiste wijze beheersmaatregelen te kunnen nemen om verzilting te voorkomen en om het effect van de zoutbelasting op de landbouw te kunnen voorspellen.

GLOBALE WERKWIJZE

Om de invloed van de eigenschappen van een perceel op de vorm en grootte van de regenwaterlenzen te bepalen zijn er in een grondwatermodelleringsprogramma gedraineerde percelen met zoute kwel gesimuleerd. Door in deze modellen te variëren in perceeleigenschappen als bodemprofiel, drainageconfiguraties, chloridegehalte van het zoute kwelwater en grootte van de kwelflux kan de invloed van deze eigenschappen op de regenwaterlenzen onderzocht worden. Met de resultaten van het model zijn vervolgens relaties gelegd tussen de perceeleigenschappen en de grootte van de regenwaterlens. Een uitgebreide werkwijze is in hoofdstuk twee te vinden.

LEESWIJZER

Als eerste is in hoofdstuk twee de onderzoeksmethode per fase beschreven. Vervolgens wordt in het derde hoofdstuk de modelbeschrijving van het modelleringsprogramma beschreven. Het concept van een regenwaterlens en de modelconceptualisatie wordt beschreven in hoofdstuk 4. De resultaten van de modellen worden met een homogeen bodemprofiel zijn beschreven in hoofdstuk vijf en voor de modellen met een gelaagd bodemprofiel in hoofdstuk zes. De koppeling met veldmetingen wordt gemaakt in hoofdstuk zeven. In hoofdstuk acht worden de conclusies op basis van de resultaten beschreven en aanbevelingen gegeven.

AFBAKENING

In dit onderzoek wordt uitsluitend onderzoek gedaan naar relaties van regenwaterlenzen in met buisdrainage gedraineerde percelen met zoute kwel onder stationaire omstandigheden.

2. Methodebeschrijving

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

2.1 Fase 1 – Concept van de regenwaterlens en modelconceptualisatie

In de eerste fase is het grondwatersysteem van de gedraineerde percelen met regenwaterlenzen 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 uiteen lopen. Uit veldmetingen van Acacia Water in 2010 bleek dat regenwaterlenzen 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 basis model opgesteld, het basis model dient als basis voor alle modellen in deze modelstudie.

2.2 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 regenwaterlens bepaald. Gelaagdheden in het bodemprofiel worden in deze fase buiten beschouwing gelaten omdat de vorm en grootte van de regenwaterlens 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 regenwaterlens 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 regenwaterlens.
- Stap 6** Wanneer de invloed van het bodemtype, de drainageafstand en de kwelflux op de regenwaterlens 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 regenwaterlens per variant inzichtelijk gemaakt en de invloed van de draindiepte en chloridegehalte van de zoute kwel op de grootte en vorm van de regenwaterlens 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 regenwaterlenzen bepaald.

2.3 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 regenwaterlens per variant inzichtelijk gemaakt met behulp van het data-analyse programma Tableau.

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

2.4 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.

Na het uitvoeren van de verschillende fasen en de bijbehorende stappen wordt er een conclusie getrokken waarmee er antwoord wordt gegeven op de hoofdvraag;

Wat zijn relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlenzen en de perceeleigenschappen van gedraineerde percelen met zoute kwel?

Als laatste worden eventuele vervolgstappen en aanbevelingen beschreven.

3. Modelbeschrijving

In dit hoofdstuk wordt de modelsoftware en het gebruik van SV Office toegelicht. De invoer van de materiaaleigenschappen in SV Office wordt apart beschreven omdat deze voor de onverzadigde zone van de ondergrond erg gecompliceerd is.

3.1 Software

In dit onderzoek is gebruik 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 SVFlux, 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 regenwaterlens parallel aan de drainagebuizen gelijk is.

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

3.2 Materiaal eigenschappen

In de programma's SVFlux 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.

SVFLUX

Voor de materiaaleigenschappen van de bodem in SVFlux 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 [2]. 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 [3]:

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

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 [4].

De doorlatendheidskarakteristiek wordt beschreven met de volgende vergelijking [3]:

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

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 [2]:

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 $d\theta/dh$ maximaal is
$\theta(h)$	cm ³ /cm ³	-	Vochtgehalte als functie van de drukhoogte
θ_r	cm ³ /cm ³	-	Residuaire waarde van het vochtgehalte
θ_s	cm ³ /cm ³	-	Vochtgehalte bij verzadiging

Tabel 1 - Betekenis en eenheden van de vergelijkingen voor de doorlatendheidskarakteristiek en de waterretentiekarakteristiek [2]

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 [5]:

Nr.	Grondsoort	Ks (m/d)	l (-)	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	zware 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 2 - Geselecteerde bodemtypen en hun kenmerken volgens de Staringreeks [2]

Voor de materiaaleigenschappen van de verzadigde zone zijn de verzadigde Staringreeks waarden gebruikt. Deze zijn aangepast op basis van persoonlijke communicatie met J. van der Gaast (2015) omdat er in de Staringreeks een onderschatting wordt gedaan van de verzadigde doorlatendheid tijdens het meten van de doorlatendheid door middel van de verdampingsmethode. Doorlatendheidstesten uit de studie 'Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord Nederland' [12] bevestigen dit. 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 [6]. 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 er voor 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 [7]. 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 [7]. De diffusie voor alle ondergronden is op basis eerdere ervaringen met modellen van J. Velstra (2015) vastgelegd op 10^{-5} m²/d.

4. Het concept van de regenwaterlens en modelconceptualisatie

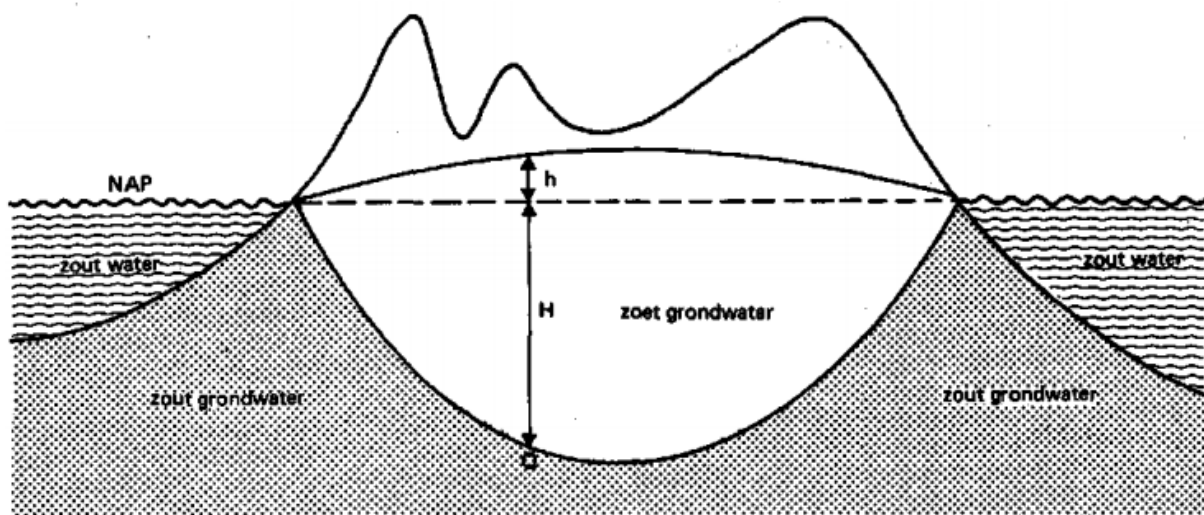
In het verleden zijn er verschillende studies gedaan naar het grondwatersysteem van gedraineerde percelen met zoute kwel; percelen waar regenwaterlenzen voorkomen. Uit deze studies kwam niet een eenduidig beeld van het grondwatersysteem in deze percelen. De conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem welke in dit onderzoek is aangenomen wordt in dit hoofdstuk beschreven. Op basis van de aangenomen conceptuele modelbeschrijving wordt het basismodel gedefinieerd.

4.1 Het principe van een regenwaterlens

4.1.1 Ghyben-Herzberg principe

Het principe van een regenwaterlens, drijvend op zout water, die wordt aangevuld door regenwater, dateert uit de eerste beschrijvingen van zoetwaterlenzen in eiland en duinsystemen. Dit waren onafhankelijk van elkaar Badon-Ghyben (1889) en Herzberg (1901). De formule van Ghyben-Herzberg is afhankelijk van het dichtheidsverschil tussen het zoete water en het zoute water [8]:

$$H = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h$$

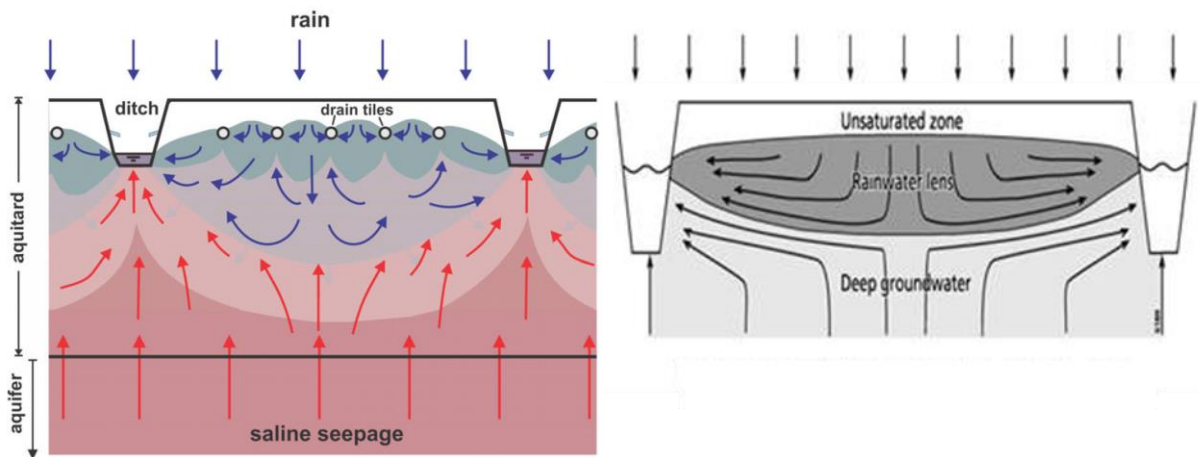


Figuur 2 - Eenheden in de Ghyben-Herzberg relatie [8]

Voor zeewater met een dichtheid van 1025 kg/m^3 en zoet water met een dichtheid van 1000 kg/m^3 betekent dit: $H = 40h$. Bij kleinere dichtheidsverschillen is de diepte van de zoetwaterlens dus kleiner. Dit principe verwaarloost echter de verticale stroming van zout grondwater, welke in gedraineerde percelen met zoute kwel van groot belang is.

4.1.2 Regenwaterlenzen in percelen met zoute kwel

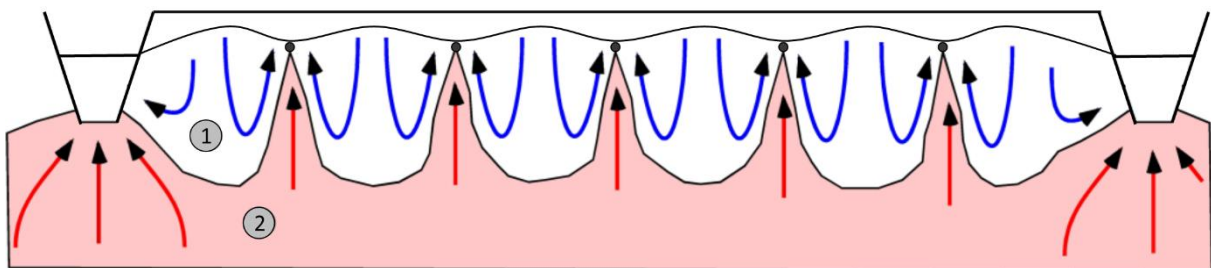
Veel kleinere regenwaterlenzen in moeraslanden en landbouwpercelen zijn bestudeert door onder andere Poot en Schot (2000) [9], Van der Wal (2001) [10], P. de Louw (2013) [11] en Schot et al. (2004) [12]. De conceptuele modelbeschrijvingen volgens P. de Louw en Poot en Schot staan in Figuur 3 afgebeeld.



Figuur 3 - Conceptuele modelbeschrijving van de regenwaterlens volgens P. de Louw (links) [11] en Poot en Schot (rechts) [9].

In de afgebeelde conceptuele modelbeschrijvingen wordt de regenwaterlens gezien als een grondwatersysteem tussen de aan het perceel grenzende sloten. De invloed van de perceeldrainage is in deze beschrijving geheel afwezig of gering.

Uit veldmetingen in 18 percelen in noord Nederland (J. Velstra et al., 2011) [1] bleek echter dat de perceeldrainage een grote invloed heeft op de vorm en dynamiek van regenwaterlenzen. In dit onderzoek werd op basis van de veldmetingen afgeleid dat bovenop het regionale grondwatersysteem en het grondwatersysteem op perceelschaal een ondiep grondwatersysteem bestaat tussen de drains; elke regenwaterlens functioneert als een op zichzelf staand lokaal watersysteem (Figuur 4).



Figuur 4 – Grondwatersysteem in perceel: 1) drainage systeem met regenwaterlenzen en 2) regionaal systeem van zoute kwel

Dit lokale watersysteem wordt in de winter aangevuld met regenwater waardoor de regenwaterlens groeit en in de zomer krimpt door verdamping en plant transpiratie. Deze conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem geeft dat de sloot in verhouding dezelfde invloed heeft op de vorming van regenwaterlenzen als een drain.

Er wordt in ditzelfde onderzoek echter nog wel aanbevolen om dit conceptuele model te valideren door middel van een wiskundig grondwatermodel.

4.2 Validatie conceptuele modelbeschrijving

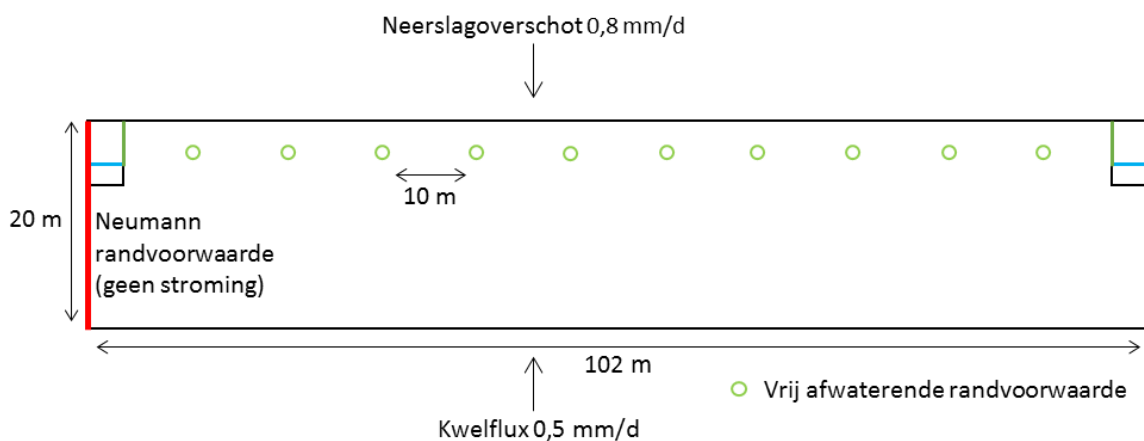
Om het hiervoor beschreven concept te valideren is een grondwatermodel opgezet.

4.2.1 Modelopbouw

Er is in de programma's van SVOOffice 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 5 en Figuur 6 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 2 - Geselecteerde bodemtypen en hun kenmerken volgens de Staringreeks

Binnen SVflux 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 5 en Figuur 6.

SVFLUX

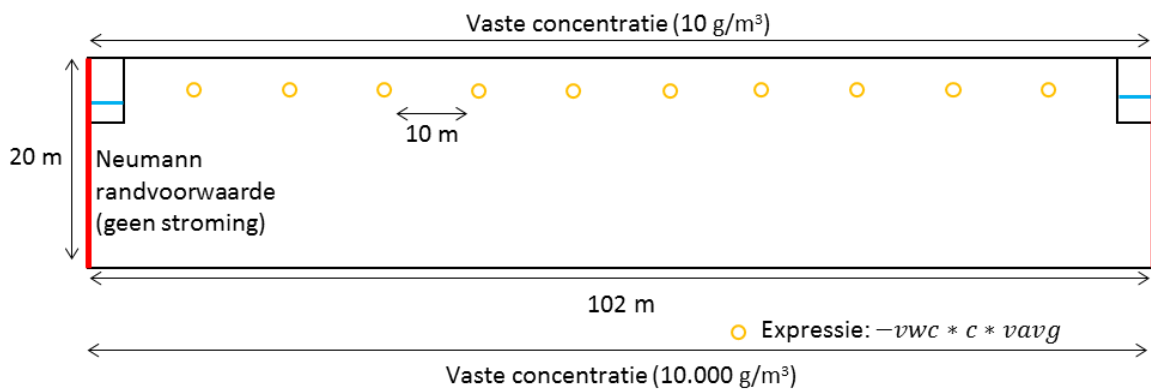


Figuur 5 – Schematisatie van de afmetingen en randvoorwaarden van het model in SVFlux

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. De keuze om de kwel als flux te modelleren is beschreven in paragraaf 4.3. Er is gekozen voor een stationaire waarde omdat op deze manier de relaties worden gelegd voor de gemiddelde grootte en vorm van een regenwaterlens 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 SVFlux programma is ingesteld op een constante drukhoogte op het drainageniveau. Wanneer er in de drainagediepte wordt gevarieerd, verandert de drukhoogte mee.



Figuur 6 – 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 basis model 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 [13].

De drain heeft als randvoorwaarde een wiskundige expressie. De expressie is gedefinieerd als volgt:

$$-vwc * c * vavg$$

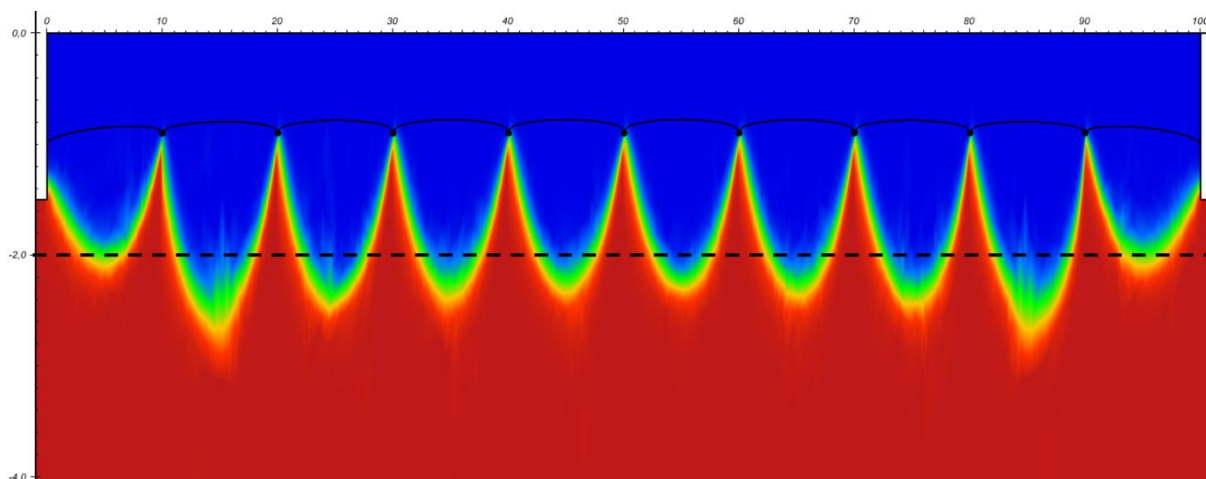
Waarin:

- 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.

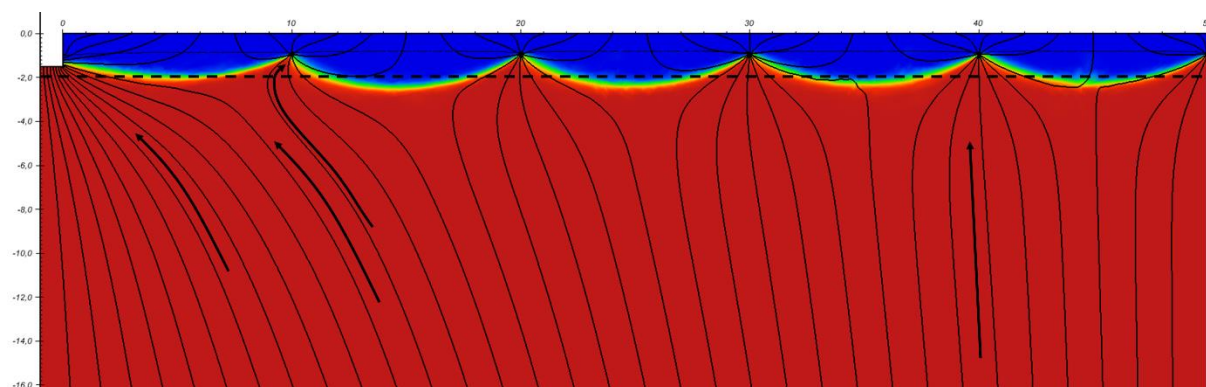
4.2.2 Resultaat validatie conceptuele model

De schematisering en resultaten van deze berekening zijn te zien in Figuur 7. In de resultaten zijn duidelijk de individuele regenwaterlenzen te zien tussen de drains. De sloot heeft geen invloed op de lenzen die niet aan de eerste drainagebuis naast de sloot grenzen.



Figuur 7 – 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.

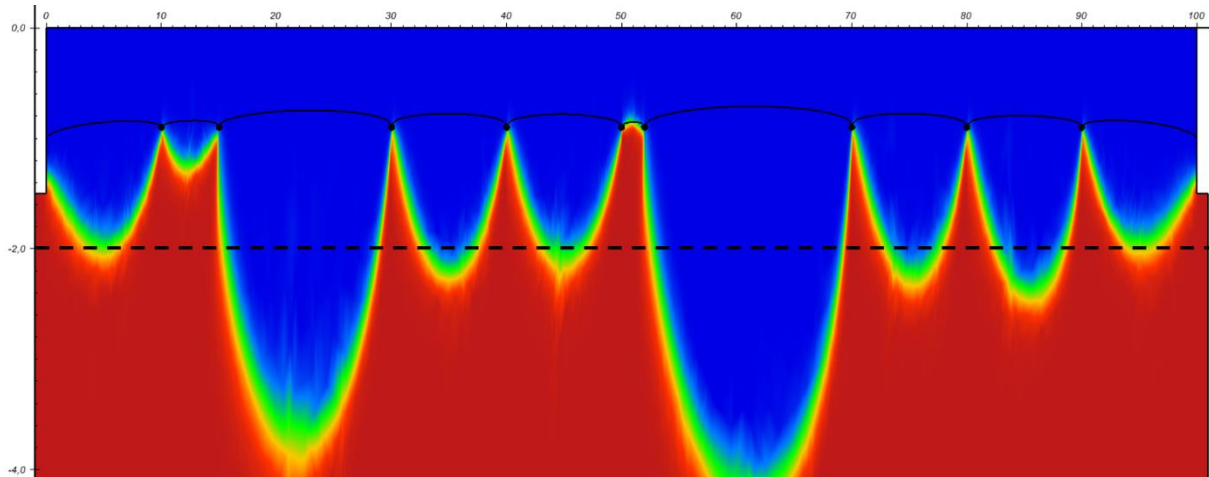
De sloot heeft een groter afvoerend oppervlak als de drains wat resulteert in een dunnere lens gelegen naast de sloot in Figuur 7. De dikkere lens in hetzelfde figuur, tussen het eerste paar drainagebuizen vanaf de sloot, wordt veroorzaakt doordat de sloot een gedeelte van de zoute kwel als het ware afvangt. Dit heeft tot gevolg dat de kwelflux onder deze regenwaterlensen kleiner is waardoor de regenwaterlens dikker kan worden. Dit effect is in Figuur 8 weergegeven door middel van stroombanen. Vanaf 30 meter afstand van de sloot is dit effect nagenoeg verdwenen.



Figuur 8 – Figuur 3 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 9 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 9 ongeveer even groot zijn als de lenzen in Figuur 7. De grootte van een regenwaterlens heeft geen effect op de daarnaast liggende regenwaterlens; het zijn aparte lokale grondwatersystemen.



Figuur 9 – 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.

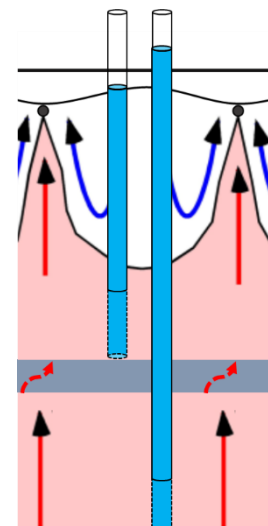
Deze conceptuele modelbeschrijving van het grondwatersysteem in gedraineerde percelen met zoute kwel maakt het mogelijk het systeem te vereenvoudigen. Het afwaterende gebied van één drain is met deze conceptuele modelbeschrijving namelijk representatief voor het gehele perceel.

4.3 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 regenwaterlenzen 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 (Figuur 10). 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.

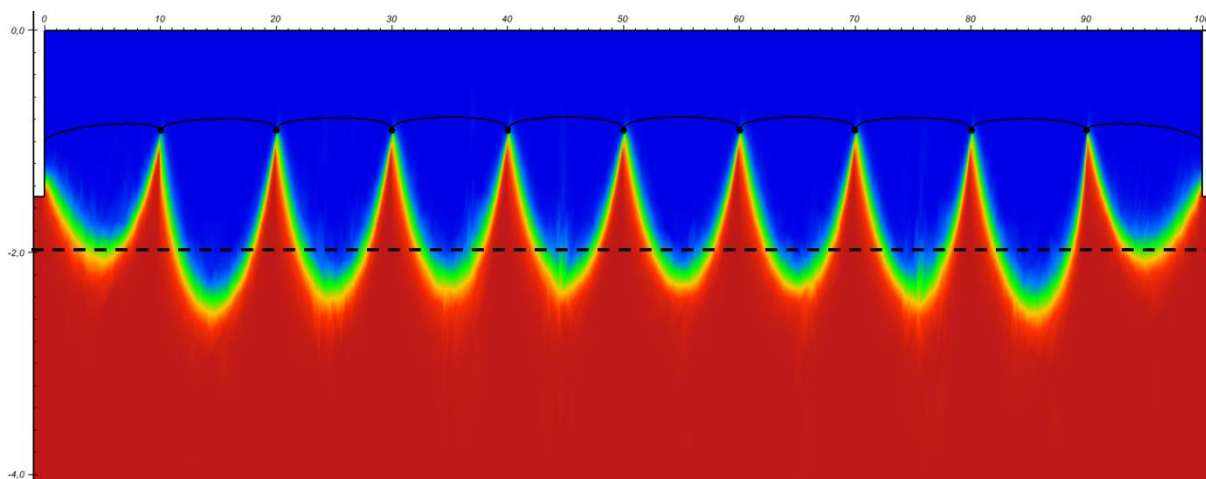
De kwelflux kan in het hydrologische model op twee methoden gemodelleerd worden:

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. Zie Figuur 10.



Figuur 10 - 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 regenwaterlenzen onder stationaire omstandigheden.



Figuur 11 – 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 11 toont het resultaat van de berekening met de slecht doorlatende laag in de ondergrond op -19 meter onder maaiveld, Figuur 7 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 regenwaterlenzen. De Neumann methode is daarom gebruikt voor het modelleren van de regenwaterlenzen in dit onderzoek omdat deze de kortste rekentijd heeft.

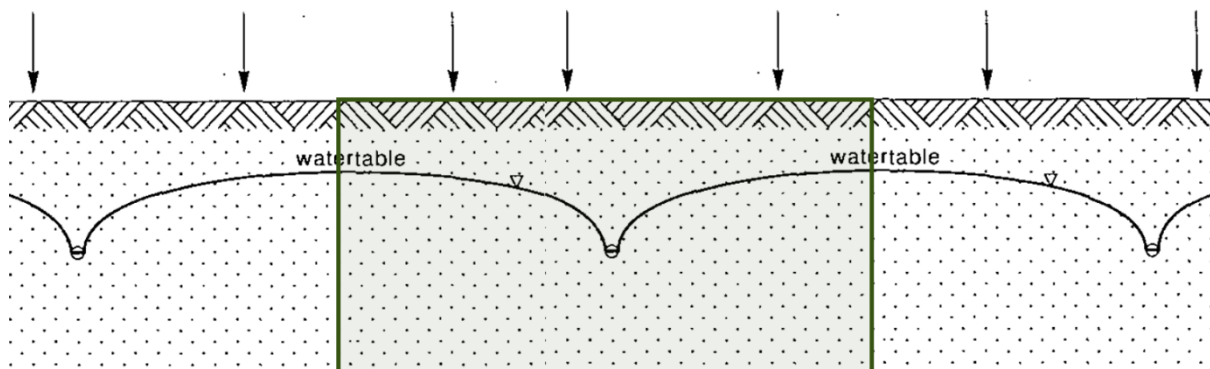
In een tijdsafhankelijke situatie waarbij de grondwaterstanden onder de drainage zakt zal de Dirichlet methode beter zijn. Voor het doel van dit onderzoek, stationaire situaties, volstaat de Neumann methode omdat er altijd een vaste grondwateraanvulling is.

4.4 Basis model

Alle modellen waar in wordt gevarieerd in de perceeleigenschappen zijn allemaal gebaseerd op hetzelfde basis model. 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 regenwaterlenzen slechts het afwaterende gebied van een enkele drain volstaat.

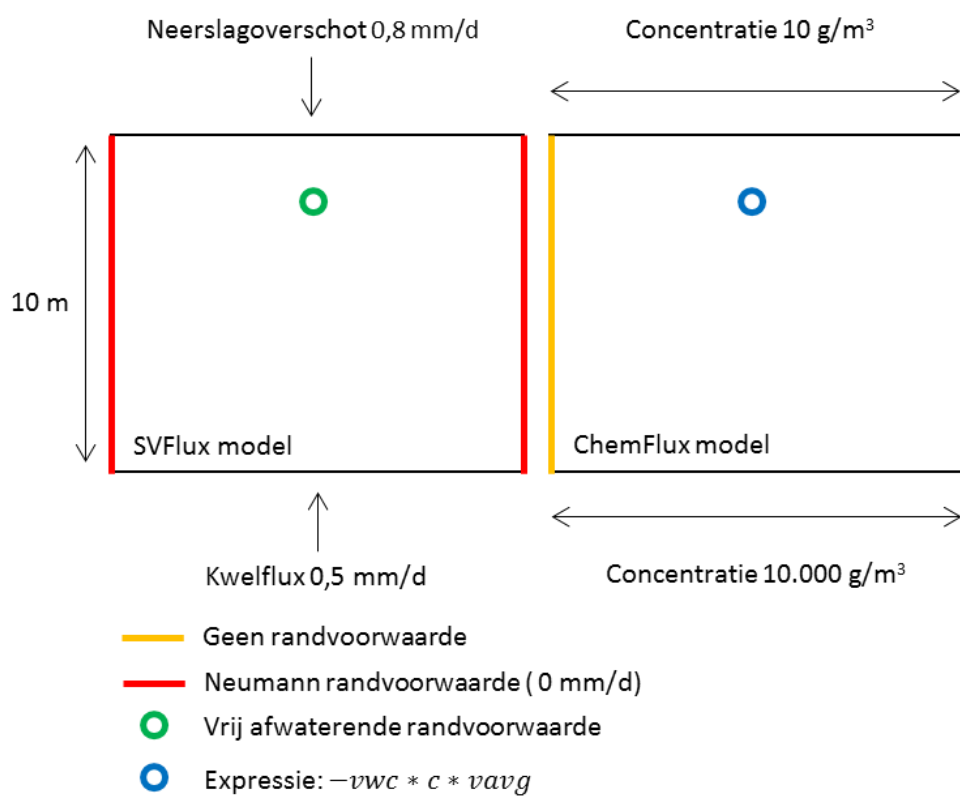
4.4.1 Geometrie en randvoorwaarden

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 12 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 regenwaterlenzen 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 12 - Dwarsdoorsnede van perceel met drainage [14]. Het groene vlak representeert de dimensies van het model.

De randvoorwaarden en geometrie van het model zijn in Figuur 13 geschematiseerd. De randvoorwaarden komen overeen met de randvoorwaarden van het model wat gebruikt is voor de validatie van de conceptuele modelbeschrijving.



Figuur 13 - Schematisatie model

5. Invloed van perceeleigenschappen in een homogeen bodemprofiel

Om de invloed van verschillende perceeleigenschappen op de grootte en vorm van de regenwaterlens te bepalen worden er twee partijen aan modellen gedraaid met een homogeen bodemprofiel. Door deze modellen met een homogeen bodemprofiel te draaien wordt de vorm en grootte van de regenwaterlens niet beïnvloed door gelaagdheid in de bodem en zijn de relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlensen en de perceeleigenschappen alleen van de overige perceeleigenschappen afhankelijk. In dit hoofdstuk worden de gesimuleerde varianten beschreven en vervolgens de resultaten van de berekeningen.

5.1 Gesimuleerde varianten met een homogeen bodemprofiel

De perceeleigenschappen waarin gevarieerd wordt zijn ingedeeld in twee series berekeningen waarbij in elke serie in twee of drie perceeleigenschappen wordt gevarieerd. De overige perceeleigenschappen worden vastgezet op één waarde die het meest representatief is voor de laaggelegen gedraineerde percelen in Nederland. Er is gekozen voor twee series berekeningen omdat het aantal modellen bij een enkele partij te groot is. De variaties zijn geselecteerd op basis van voorkomende variaties in gebieden met gedraineerde percelen met zoute kwel.

SERIE BEREKENINGEN WAARIN GEVARIEERD WORDT IN DRAINAFSTAND, KWELFLUX EN BODEMTYPE

Het chloridegehalte van het zoute kwelwater ligt vast op 10.000 g/m³, de drainage ligt op 1 meter onder maaiveld. De variaties die worden gemaakt in deze partij zijn:

Bodemtype (-)	O1	O2	O3	O5	O9	O10	O13	O17
Drainafstand (m)	2	4	8	10	12	15	25	-
Kwelflux (mm/d)	0,000	0,001	0,005	0,050	1,000	2,000	-	-

Dit zijn in totaal 336 modellen. In deze drie perceeleigenschappen is als eerste gevarieerd omdat verwacht wordt dat deze perceeleigenschappen de grootste invloed hebben op de vorm en grootte van de regenwaterlens.

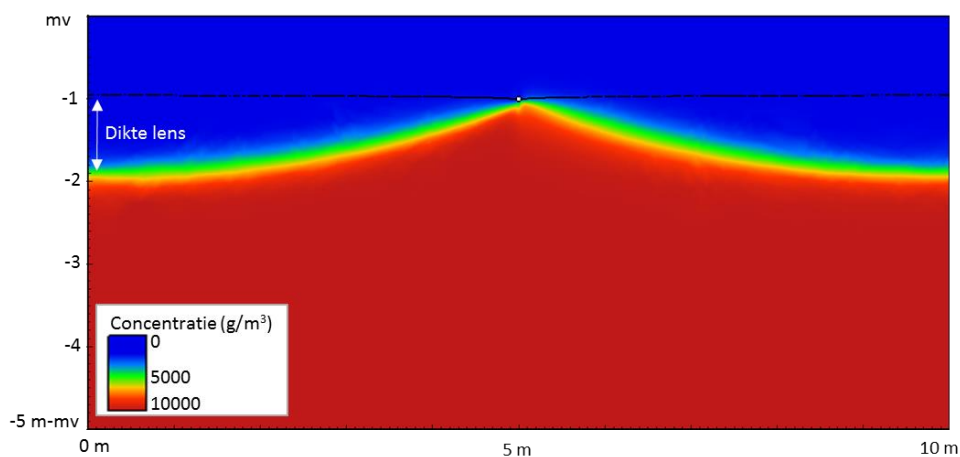
SERIE BEREKENINGEN WAARIN GEVARIEERD WORDT IN DRAINDIEPTE EN HET CHLORIDEGEHALTE VAN HET ZOUTE KWELWATER

De drainage ligt op een afstand van 10 meter, de ondergrond bestaat uit matig lichte zavel (O9) en de grootte van de kwelflux ligt vast op 0,05 mm per dag. De variaties die worden gemaakt in deze partij zijn:

Chloridegehalte (g/m ³)	5000	10000	18000
Draindiepte (m-mv)	0,5	1	2,0

Dit zijn in totaal 9 modellen.

De dikte van de regenwaterlens aan de linker grens, op de waterscheiding van twee drains, wordt gebruikt in het verwerken van de resultaten. De dikte van de regenwaterlens is gedefinieerd als de afstand tussen het niveau van de drain en de 1000 g/m³ concentratie lijn van het grondwater (ffiguur 14).



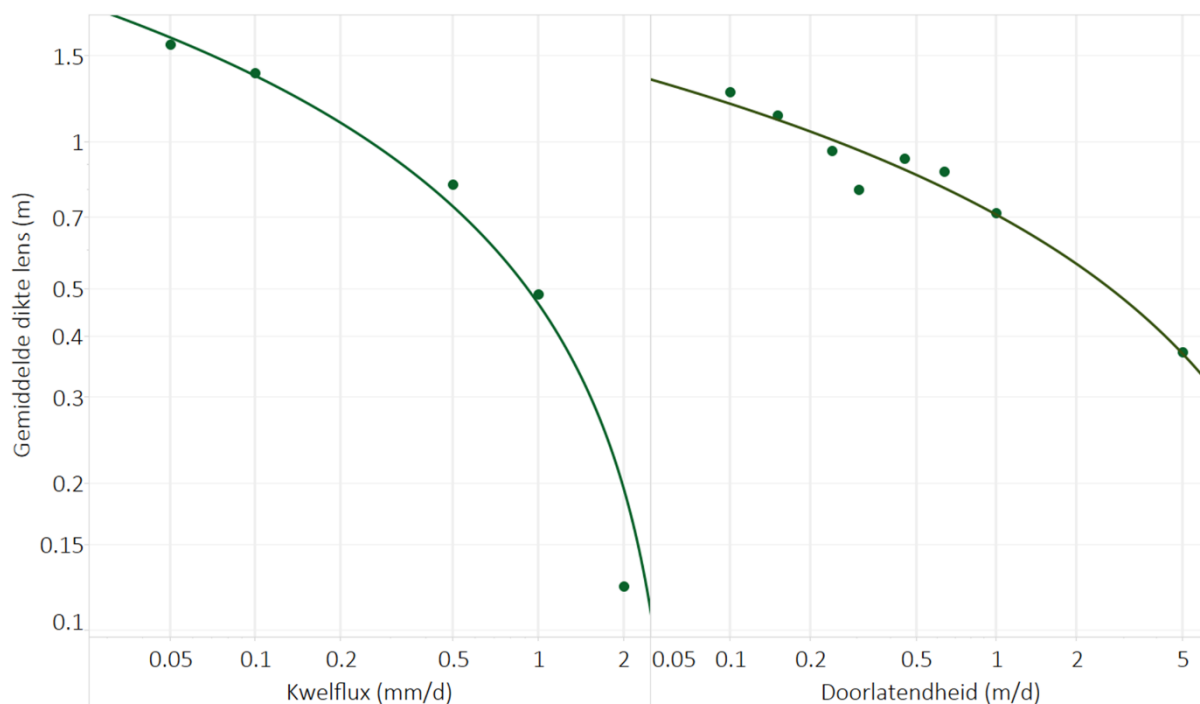
Figuur 14 – Berekende zoet- zout verdeling van het grondwater in een homogeen bodemprofiel in het grondwatermodelleringsprogramma SV Office. De dikte van de regenwaterlens is de afstand tussen het drainageniveau en de 1000 g/m³ concentratielijn van het grondwater.

5.2 Resultaten invloed drainageafstand, kwelflux en bodemtype

In de eerste serie berekeningen is de invloed van de drainageafstand, de grootte van de kwelflux en het bodemtype op de grootte van de regenwaterlens onderzocht. In Bijlage 1 zijn alle berekende diktes van de regenwaterlens in tabelvorm weergegeven.

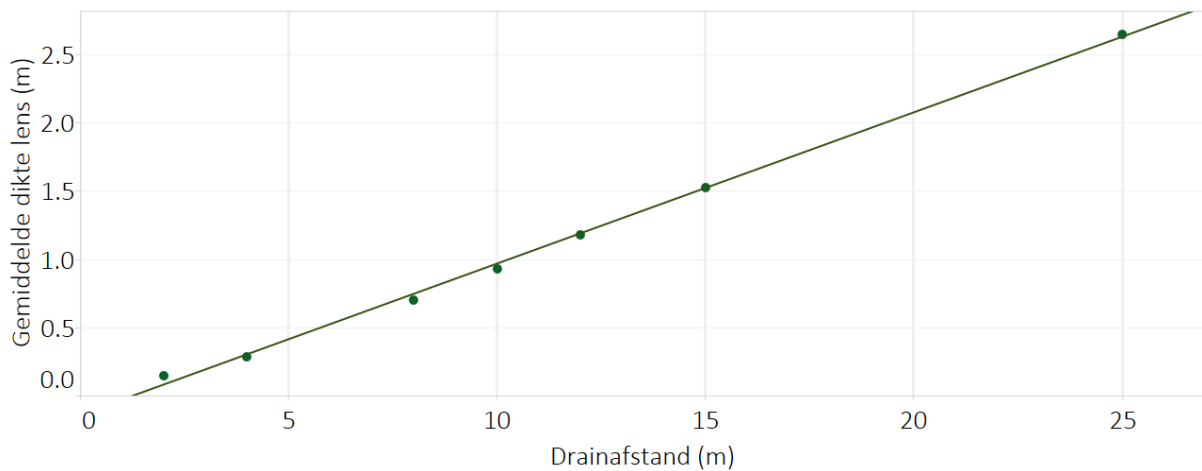
5.2.1 Invloed drainageafstand en bodemtype

Figuur 15 toont het verband tussen de gemiddelde dikte van de regenwaterlens en de in de eerste partij gevarieerde perceeleigenschappen. Elk punt representeert de gemiddelde dikte van de regenwaterlens van alle varianten onder een bepaalde kwelflux of doorlatendheid. Bij een kwelflux van 1 mm/d bijvoorbeeld is het gemiddelde berekend van de dikte van de regenwaterlens in alle varianten met een kwelflux van 1 mm/d ongeacht het verschil in drainageafstand of bodemtype.



Figuur 15 - Gemiddelde dikte van de regenwaterlens (m) uitgezet tegen de grootte van de kwelflux (mm/d) en de doorlatendheid van de ondergrond (m/d).

Uit de figuur zijn logaritmische verbanden af te leiden tussen de dikte van de regenwaterlens en de grootte van de kwelflux en de doorlatendheid van de ondergrond. Bij beiden neemt de dikte van de regenwaterlens logaritmisch af bij een grotere waarde.



Figuur 16 - Gemiddelde dikte van de regenwaterlens (m) uitgezet tegen de drainafstand (m).

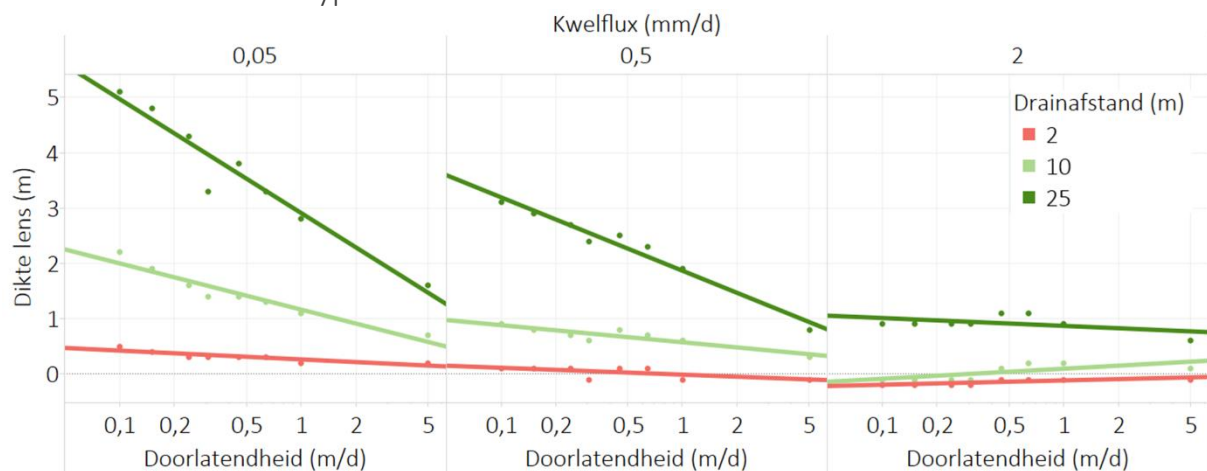
De drainageafstand heeft een grote invloed op de dikte van de regenwaterlens. De drainageafstand kan de regenwaterlens doen verdwijnen maar ook het sterkst vergroten. De lineaire relatie tussen de dikte van de regenwaterlens en de drainageafstand is af te leiden uit Figuur 16.

Drainafstand (m)	Kwelflux (mm/d)						Gem. dikte lens (m)
	0	0,05	0,1	0,5	1	2	
2	0,563	0,313	0,225	0,025	-0,100	-0,150	4,0 0,4 0
4	0,888	0,575	0,438	0,150	-0,050	-0,263	
8	1,550	1,125	0,963	0,475	0,213	-0,125	
10	1,838	1,450	1,238	0,675	0,375	0,025	
12	2,200	1,763	1,538	0,875	0,550	0,138	
15	2,650	2,225	1,950	1,213	0,788	0,325	
25	4,050	3,625	3,350	2,325	1,638	0,913	

Tabel 3 – Gemiddelde dikte van de regenwaterlens (m) bij verschillende drainageafstanden (m) en kwelfluxen (mm/d). De legenda gaat tot nul omdat bij negatieve waarde er geen sprake is van een regenwaterlens.

Uit de resultaten in Tabel 3 blijkt dat in een homogeen bodemprofiel en een drainageafstand van 25 meter er altijd een regenwaterlens ontwikkeld. Een combinatie van een kleine drainageafstand en een grote kwelflux geeft gemiddeld een zeer kleine of geen regenwaterlens. Bij een kwelflux van 2 mm/d is het ontwikkelen van een regenwaterlens bij een drainageafstand lager dan 25 meter nagenoeg niet mogelijk, bij erg kleine drainageafstand is er zelfs sprake van een negatieve waarde; het zoute grondwater is boven het drainageniveau.

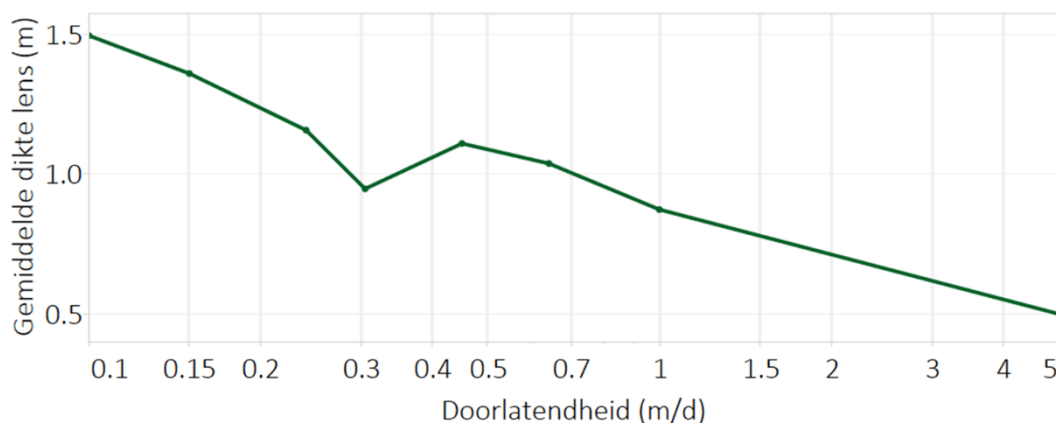
5.2.1 Invloed bodemtype



Figuur 17 - Dikte van de regenwaterlens (m) uitgezet tegen de doorlatendheid van de ondergrond (m/d) bij kwelfluxen van 0,05, 0,5 en 2 mm/d bij drie verschillende drainageafstanden. Logaritmische x-as.

De doorlatendheid van de bodemtypes heeft bij een lage kwelflux en grootte drainageafstand een invloed op de grootte van de regenwaterlens. Deze invloed neemt, net als de sterkte van de verbanden, af bij een hogere kwelflux en een kleinere drainageafstand.

Opvallend is dat dikte van de lens altijd afneemt bij een grotere doorlatendheid, behalve bij een kwelflux 2 mm/d en een drainafstand 10 en 2 meter. Onder deze perceeleigenschappen heeft een hogere doorlatendheid juist een positief effect op de dikte van de lens. Een hoge doorlatendheid zorgt er voor dat het zoute grondwater sneller wordt afgevoerd en niet de kans heeft om tot boven het drainniveau te stromen.



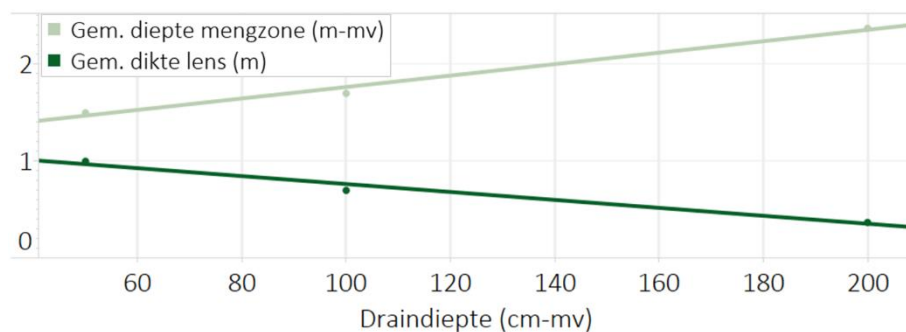
Figuur 18 - Gemiddelde dikte van de regenwaterlens (m) uitgezet tegen de doorlatendheid van de bodem (m/d). Logaritmische assen.

Hoewel er relaties zijn tussen de doorlatendheid en de dikte van de regenwaterlens is dit niet het enige bodemtypekenmerk wat invloed heeft op de dikte van de regenwaterlens. In Figuur 18 is de doorlatendheid van de bodemtypes geplot tegen de gemiddelde dikte van de regenwaterlens op basis van alle variaties in drainafstand en kwelflux. In de plot is een duidelijke knik te zien. Deze knik wordt veroorzaakt door het bodemtype mesotroof en eutroof veen. Dit bodemtype heeft in vergelijking met de overige bodemtypes een hoog verzadigd vochtgehalte; de verhouding tussen het volume water en het totale volume van de grond in verzadigde toestand. Wellicht is dit de oorzaak van deze afwijking, hier is verder geen onderzoek naar gedaan. Hoewel de bodemtypes naast doorlatendheid ook variëren in andere bodemeigenschappen geeft het toch inzicht in de invloed van de doorlatendheid.

5.3 Resultaten invloed drainagediepte en chloridegehalte kwel

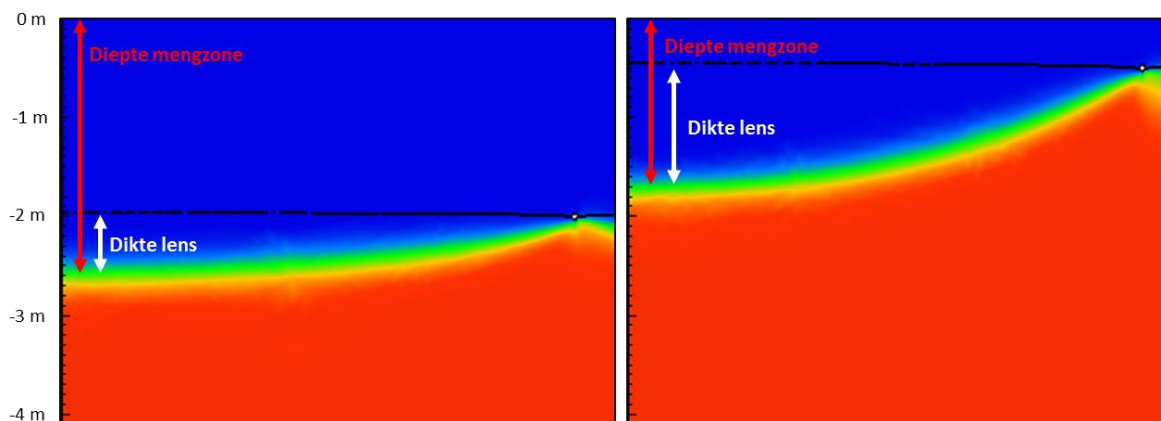
Resultaten invloed drainagediepte en chloridegehalte In de tweede serie berekeningen is er gevarieerd in draindiepte en het chloridegehalte van de zoute kwel.

Figuur 19 toont het verband tussen de diepte van de 1000 g/m³ chlorideconcentratielijn ten opzichte van het maaiveld, diepte mengzone, en de draindiepte. En het verband tussen de gemiddelde dikte van de regenwaterlens en de draindiepte. Een toenemende draindiepte zorgt voor een afnemende dikte van de regenwaterlens en een diepere ligging van de mengzone ten opzichte van het maaiveld. In Figuur 20 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 regenwaterlens afneemt en daarbij dus de zoetwatervoorraad in het perceel.



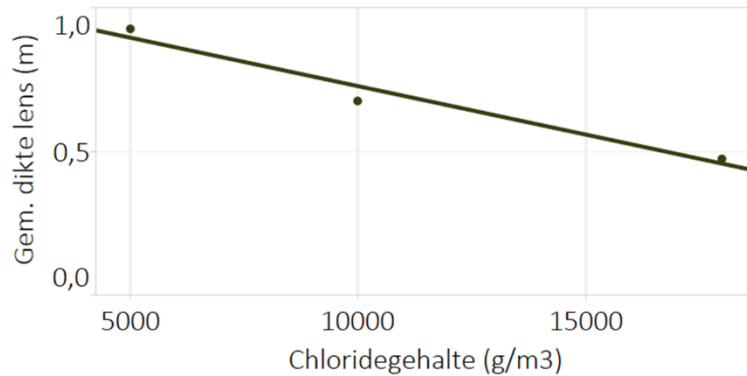
Figuur 19 - Gemiddelde dikte van de regenwaterlens (m) en de gemiddelde diepte van de 1000 g/m³ concentratie lijn (m-mv) uitgezet tegen de draindiepte (cm-mv).

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 regenwaterlens afneemt en daarbij dus de zoetwatervoorraad in het perceel.



Figuur 20 - De dikte van de lens en diepte van de mengzone bij een drainagediepte van 2 m-mv (links) en 0,5 m-mv (rechts)

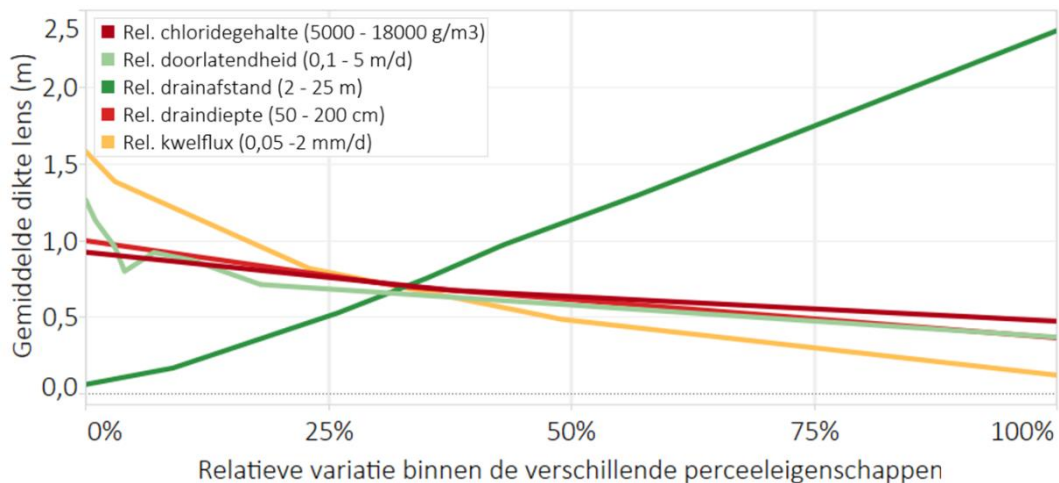
Een hoger chloridegehalte van de zoute kwel heeft een verkleinend effect op de dikte van de regenwaterlens (Figuur 21). Dit verband volgt het Ghyben-Herzberg principe (zie paragraaf 4.1.1); bij een kleiner dichtheidsverschil, lager chloridegehalte van het zoute grondwater, tussen het zoete en het zoute grondwater, wordt de regenwaterlens groter.



Figuur 21 - Gemiddelde dikte van de regenwaterlens (m) uitgezet tegen het chloridegehalte van de zoute kwel (g/m3).

5.4 Relatieve invloed perceeigenschappen

In de vorige paragrafen zijn de gevonden relaties gegeven tussen de dikte van de regenwaterlensen en de verschillende perceeigenschappen. De dikte van de regenwaterlensen en het risico op het verdwijnen van de regenwaterlensen is van bepaalde perceeigenschappen meer afhankelijk dan van andere. De invloed van een perceeigenschap op de dikte van de regenwaterlens in vergelijking met andere perceeigenschappen is daarom uitgezocht.



Figuur 22 - De relatieve variatie van de verschillende perceeigenschappen uitgezet tegen de gemiddelde dikte van de regenwaterlens (m)

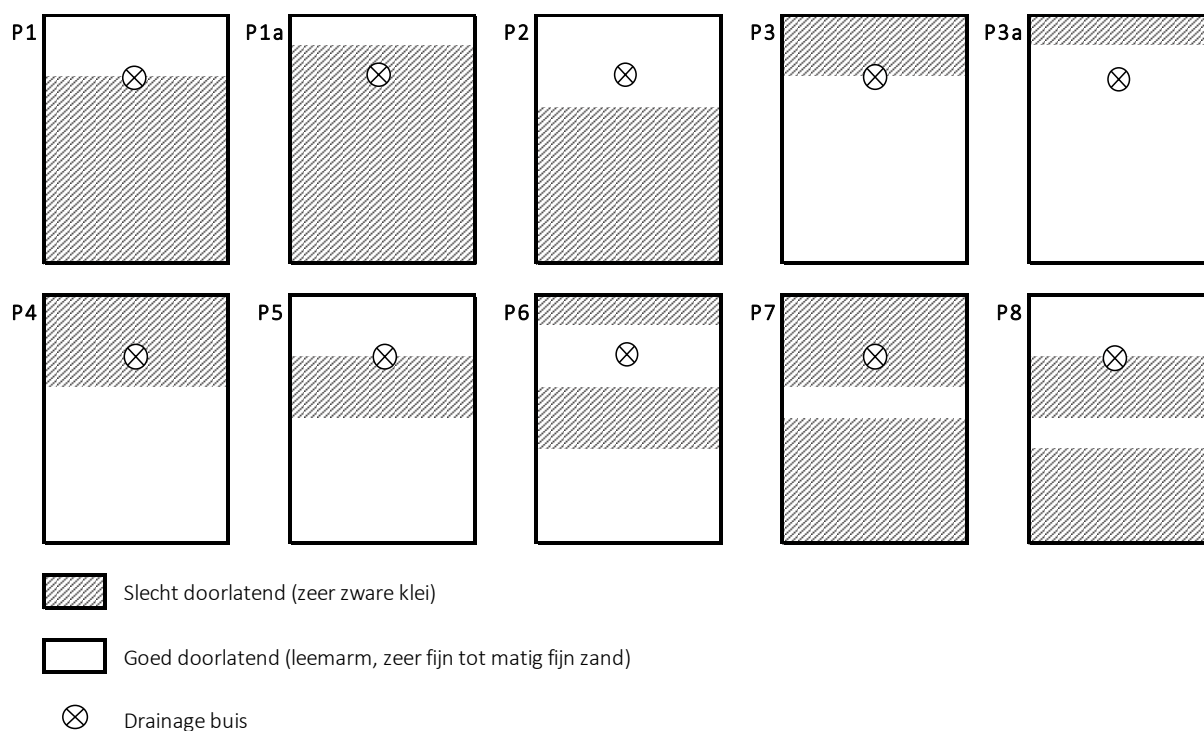
In Figuur 22 is de variatie in de perceeigenschappen in procenten geplot tegen de gemiddelde dikte van de regenwaterlens. In de modellen is bijvoorbeeld gevarieerd in de drainageafstand van 2 tot 25 meter, bij 2 meter is de relatieve variatie 0% bij 25 meter is dit 100%, dit is geplot tegen de gemiddelde dikte van regenwaterlens. De relatieve variatie is voor elke perceeigenschap berekend en geplot tegen de gemiddelde dikte van de regenwaterlens. De figuur toont dat de drainageafstand de grootste invloed op de regenwaterlens heeft, gevolgd door de kwelflux. Het chloridegehalte van de zoute kwel, de draindiepte en de doorlatendheid van de bodem hebben ongeveer dezelfde invloed op de dikte van de regenwaterlens.

6. Invloed van een gelaagd bodemprofiel

In homogene bodemprofielen is het mogelijk de invloed van perceeleigenschappen in beeld te brengen maar slechts weinig ondergronden in Nederland zijn geheel homogeen. Lagen in bodemprofielen kunnen een overheersende invloed op de vorm en grootte van de regenwaterlenzen hebben. Om die reden is in dit onderzoek de invloed van gelaagdheid in de bodem in beeld gebracht. In dit hoofdstuk worden de gesimuleerde bodemprofielen weergegeven en daarop volgende resultaten van deze simulaties.

6.1 Gesimuleerde gelaagde bodemprofielen

In gelaagde bodemprofielen is voornamelijk de verhouding van de doorlatendheden in de verschillende lagen van belang en niet per definitie het bodemtype. Volgens drs. Ernst hoeft deze verhouding slechts 1:3 te zijn [15]. Om de invloed van gelaagdheid van heterogene bodemprofielen in beeld te brengen zijn er op basis van de door drs. Ernst in 1958 opstelde bodemprofielen [15] en de Nederlandse hydrotypen [16] tien modellen opgezet [16].



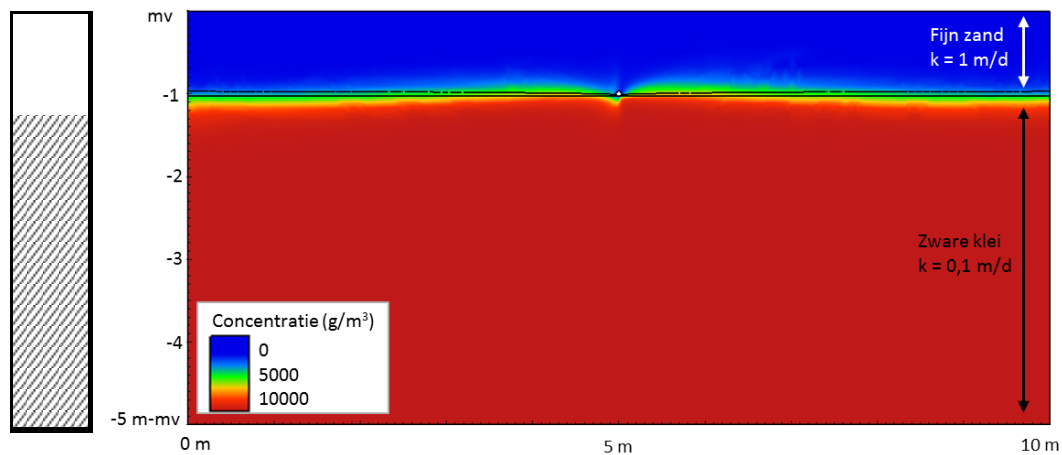
Figuur 23 – De gemodelleerde gelaagde bodemprofielen.

De zeer zware klei (O13) heeft een doorlatendheid van 0,1 m/d en de goed doorlatende grondsoort (O1) heeft een doorlatendheid van 1 m/d. De verhouding tussen de twee bodemtypes is daarmee 1:10. De kwelflux is vastgezet op 0,05 mm/d, de drainageafstand op 10 meter, de draindiepte op 1 meter onder het maaiveld en het chloridegehalte van de zoute kwel is 10.000 g/m³.

Op basis van bodemprofiel 2 zijn nog vier varianten gemaakt met verschillende dieptes van de overgang van goed doorlatend materiaal naar slecht doorlatend materiaal. De diepten variëren van 0,5 tot 6 meter beneden het drainageniveau. In totaal zijn er veertien bodemprofielen gesimuleerd.

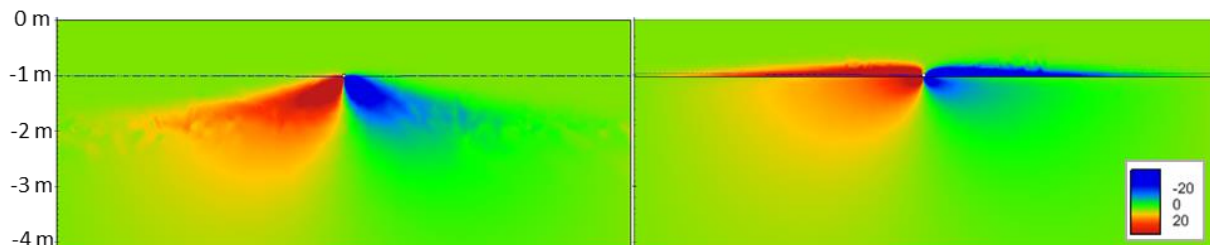
6.2 Resultaten gelaagde bodemprofielen

De invloed van lagen in het bodemprofiel wordt in deze paragraaf beschreven. In bijlage 3 is de dikte van de regenwaterlenzen voor alle bodemprofielen gegeven.



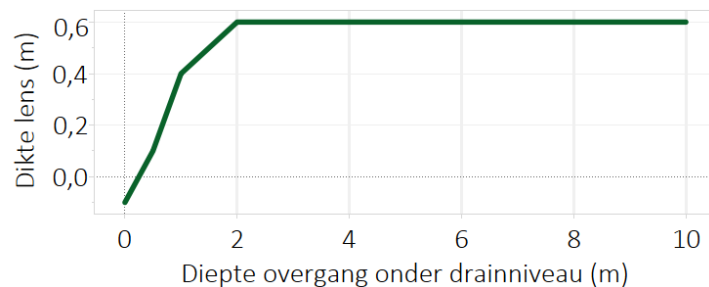
Figuur 24 –Berekende zoet- zout verdeling van het grondwater in een heterogeen bodemprofiel (P1) in het grondwatermodelleringsprogramma SV Office.

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 regenwaterlenzen. Dit zijn de bodemprofielen 1, 2, 5, 6 en 8. De zoet-zout verdeling van bodemprofiel 1 is in Figuur 24 afgebeeld. Onder deze omstandigheden rust de overgangszone tussen het zoete en zoute grondwater als het ware op de slecht doorlatende ondergrond. 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 25.



Figuur 25 - Chloridetransport (g/d/m²) onder homogene condities (links) en een situatie met vanaf 1 m-mv een slecht doorlatende ondergrond (bodemprofiel 1) onder een goed doorlatende ondergrond.

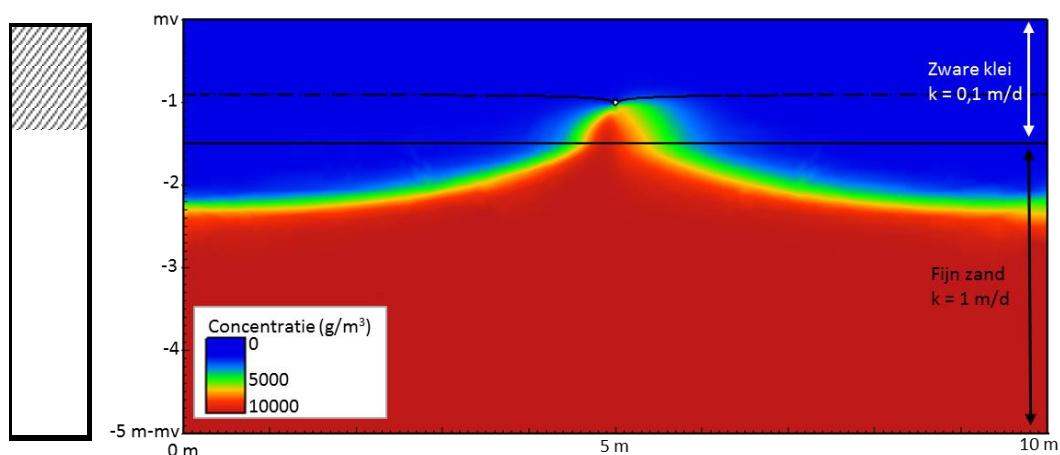
Een afwijkende, in verhouding tot de bovengrond slechter doorlatende ondergrond of laag onder het drainageniveau heeft tot ongeveer twee meter onder het drainageniveau invloed op de dikte van de regenwaterlens. In Figuur 26 is te zien dat bij een grotere diepte van de overgang naar een slecht doorlatende laag of ondergrond de dikte van de lens constant blijft.



Figuur 26 - Dikte van de regenwaterlens (m) uitgezet tegen de diepte van de, in verhouding tot de bovengrond, slecht doorlatende laag of ondergrond onder drainniveau.

Een afwijkende laag boven het drainageniveau, zoals in de bodemprofielen 1a, 3 en 3a, heeft geen tot weinig invloed op de lensvorming.

Bij bodemprofielen 4 en 7 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 14), een opvallend brede optrekkende 'kegel' van zout water onder drain te zien. De grootte van de regenwaterlens 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 27 is de zoet-zout verdeling van het grondwater van het heterogeen bodemprofiel P4 te zien.

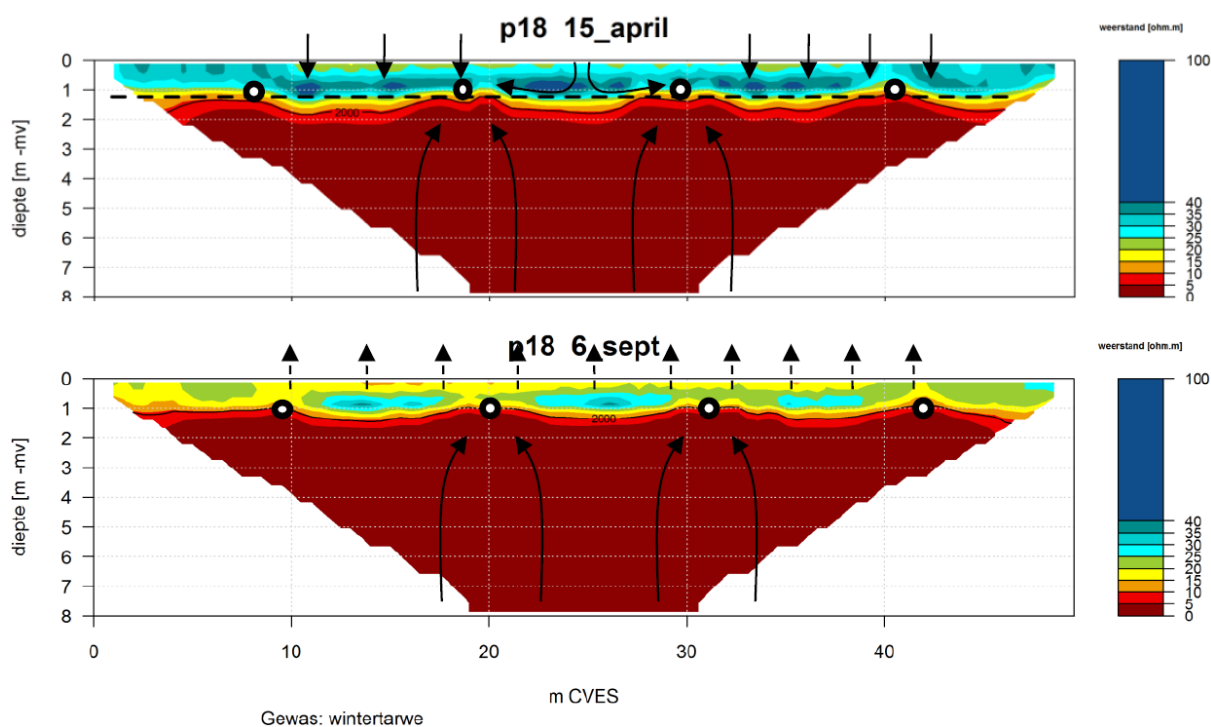


Figuur 27 - Berekende zoet- zout verdeling van het grondwater in een heterogeen bodemprofiel (P4) in het grondwatermodelleringsprogramma SV Office.

7. Toetsing modelresultaten aan veldwaarnemingen

De resultaten van het model en gevonden relaties worden in dit hoofdstuk vergeleken met verschillende veldmetingen van Acacia Water in de kustgebieden van Friesland en Groningen, de Koegraspolder en de polder de Schermer [13] [17] [18] in Noord-Holland. In deze metingen is er gebruik gemaakt van een CVES-meting. Uit het weerstandbeeld van een CVES-meting is afleidbaar waar er zich zoet water en waar er zich zout water in de ondergrond bevindt.

Bij de “continuous vertical electrical sounding”-meting of CVES-meting wordt op meerdere puntende schijnbare weerstand van de bodem gemeten en op deze manier een tweedimensionaal beeld van ondergrond verkregen. Figuur 28 toont een weerstandmeting met CVES, in verschillende kleuren wordt hierin de gemeten weerstand van de ondergrond afgebeeld. Op de verticale as staat in meters de diepte ten opzichte van maaiveld. De horizontale as toont de lengte van de uitgezette CVES-meting. De schaal waarin in de weerstand is weergegeven is in Ohm meter (Ohmm). Een algemene regel is dat bij weerstanden onder de 10 Ohmm het waarschijnlijk is dat er sprake is van brak grondwater (>1000mg/l) [13].



Figuur 28 – CVES-meting in Voorrijp, Friesland. [13]

7.1 Toetsing resultaten homogeen bodemprofiel aan veldmetingen

De invloed van perceeleigenschappen op de grootte en vorm van de gemodelleerde regenwaterlenzen is in hoofdstuk 0 beschreven. Ter controle zijn enkele gemeten percelen vergeleken met de resultaten van de modellen. In deze vergelijking is de invloed van de draindiepte en het chloridegehalte van de zoute kwel niet verwerkt omdat er van deze perceleigenschappen geen exacte of betrouwbare waarden bekend zijn. De volgende percelen zijn voor deze vergelijking gebruikt:

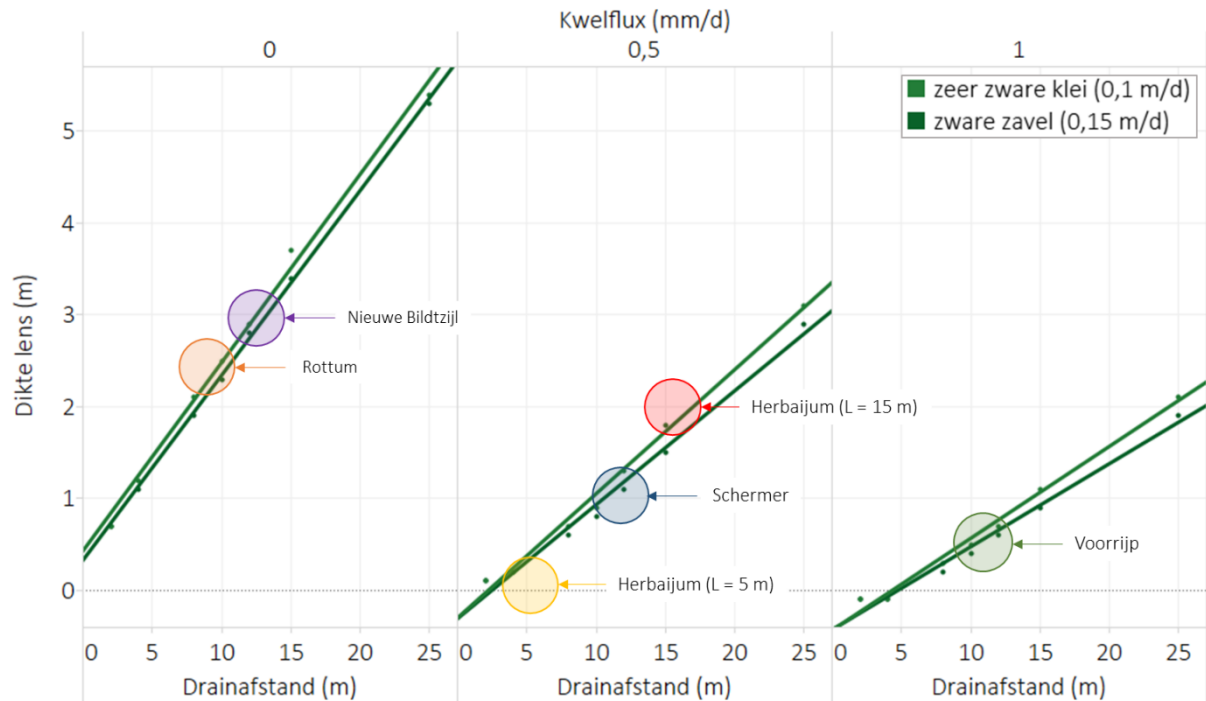
Perceel	Drainafstand (m)	Kwelflux (mm/d)	Bodemsoort	Dikte lens (m-draindiepte)
Herbaijum	5,5	0,3	zavel	0
	15	0,3	zavel	2
Nieuwe Bildtzijl	12	0,1	zavel	3
Rottum	9	0,0	zavel	2,5
Schermer	12	0,3	zware zavel	1
Voorrijp	11	0,8	zavel	0,3

Tabel 4 - Percelen en bijbehorende eigenschappen

In de vergelijking is een onzekerheidsmarge gebruikt om de volgende redenen:

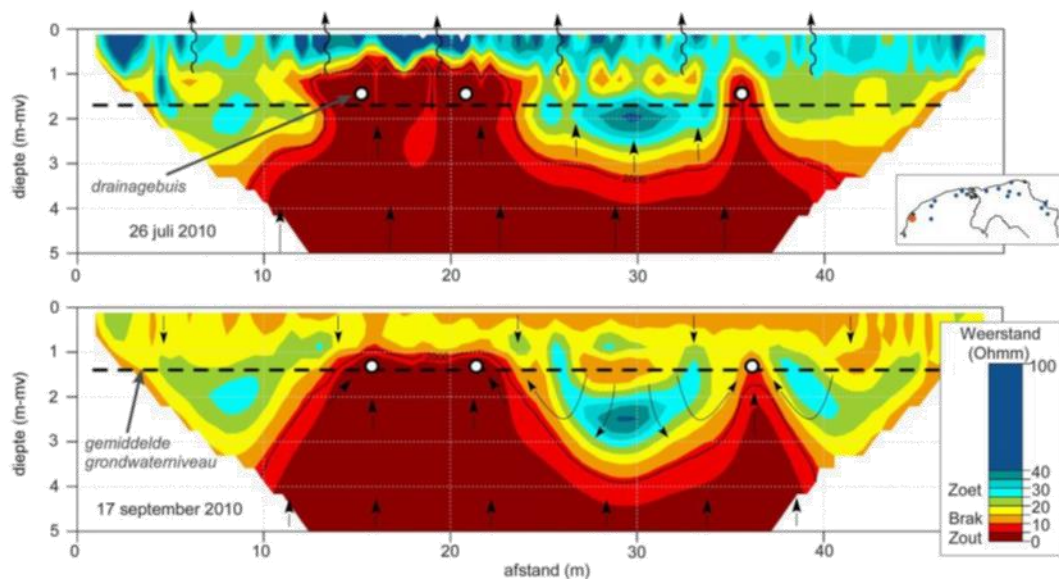
1. Uit de CVES-metingen kan de zoet-zout verdeling van de ondergrond in beeld worden gebracht, maar de CVES 'smeert' als het ware de overgangszone tussen het zoete en zoute grondwater uit. De dikte van de regenwaterlens is hierdoor niet exact af te leiden uit de metingen. De gemeten dikte van de regenwaterlens heeft met deze meetmethode een betrouwbaarheidsresolutie van vijftig centimeter. (J. Velstra, 2014).
2. De grootte van de kwelflux is gebaseerd op het MIPWA-model, een door Deltares ontwikkeld grondwatermodel van Noord- Nederland met een resolutie van 25 bij 25 meter. Het MIPWA-model is niet geijkt op fluxen, waardoor de betrouwbaarheid van de kwelresultaat beperkt is [13].

De dikte van de gemeten regenwaterlenzen variëren door het jaar. In de studie is gebruik gemaakt van een stationair model waarin de dikte niet varieert in de tijd. De gemiddelde dikte van de regenwaterlens in twee metingen, voorjaar en najaar, zijn gebruikt om de dikte van de regenwaterlens te bepalen. Deze diktes zijn in Figuur 29 geplot met een onzekerheidsmarge van 30 centimeter voor de dikte van de lens en 4 meter voor de drainafstand. De doorlatendheid van de ondergrond in de percelen komt het meest overeen met de doorlatendheid van de Staringondergronden 'zeer zware klei' en 'zware zavel' die in de figuur zijn geplot.



Figuur 29 - Dikte van de regenwaterlens op verschillende locaties geplott in grafieken met relaties tussen drainageafstanden en dikte van de regenwaterlensen onder verschillende kwelfluxen.

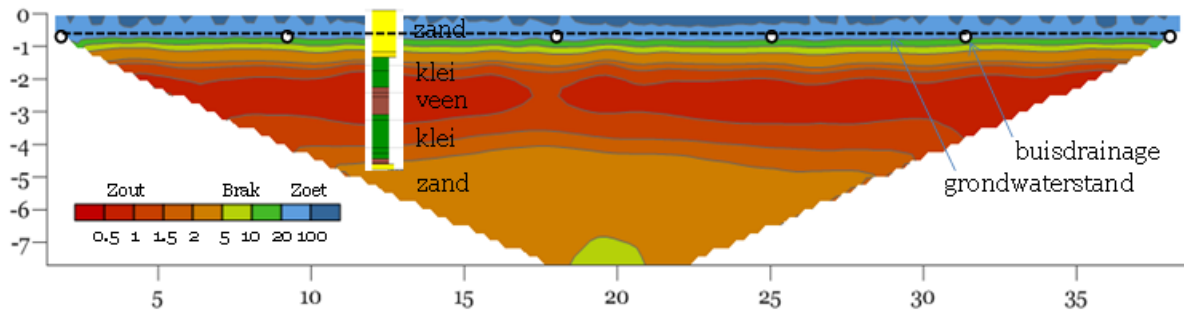
Figuur 29 toont dat de resultaten van de modellen en de veldmetingen overeenkomen. In Figuur 30 is de CVES-meting van Herbaijum afgebeeld, in deze meting is de invloed van de drainageafstand goed te zien. Tussen de 16 en 21 meter ligt een gedempte sloot waarin de drainage dicht op elkaar aangelegd is. Door de kleine drainageafstand van vijf meter wordt de vorming van een regenwaterlens belemmert. Er is tussen de drains op 21 en 36 meter wel een grote regenwaterlens te vinden door de grote drainageafstand. Dit beeld komt overeen met de resultaten uit hoofdstuk vijf, zoals te zien in Figuur 29.



Figuur 30 – CVES-meting van perceel in Herbaijum, Friesland [13]

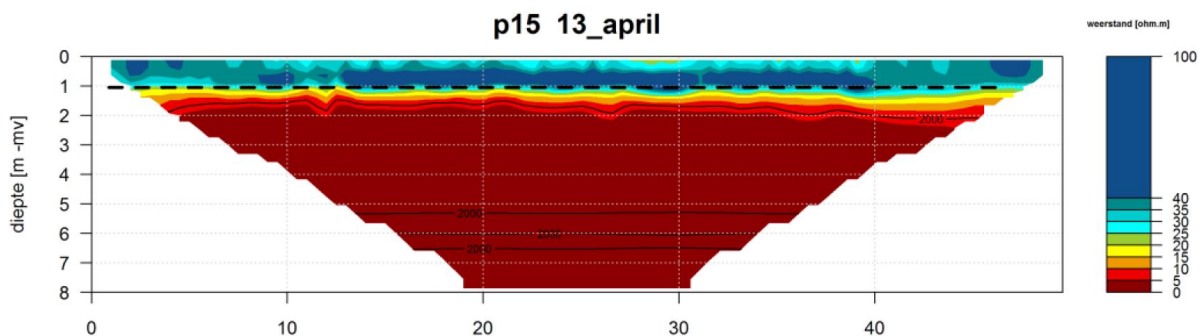
7.2 Toetsing resultaten gelaagde bodemprofielen aan veldmetingen

Uit de resultaten van de ondergronden met lagen kwam naar voren dat lagen in de ondergrond de vorming van regenwaterlenzen belemmeren. Verschillende CVES-metingen in Groningen en de Koegraspolder bevestigen dit beeld.



Figuur 31 – CVES-meting van perceel in de Koegraspolder, Noord Holland [17]

In Figuur 31 is de CVES-meting van de Koegraspolder [17] te zien. Bij een drainageafstand van 7,5 meter en een geringe kweldruk in dit perceel is een regenwaterlens te verwachten (Figuur 29). Dit perceel heeft echter een bodemopbouw van zand op klei waardoor het regenwater direct wordt afgevoerd naar de drains via de zandlaag en er geen regenwaterlens gevormd kan worden. De zoet-zout verdeling in dit perceel is vergelijkbaar met het berekende zoet-zoutverdeling afgebeeld in Figuur 24.



Figuur 32 – CVES-meting in perceel in de Johanneskerkhovepolder, Groningen [13]

Een perceel in de Johanneskerkhovepolder in Groningen heeft een licht zavelige bovengrond en een kleiige ondergrond (Figuur 32). Op drainageniveau is ongerijpte klei te vinden wat zeer slecht doorlatend is. In dit perceel gebeurt in principe hetzelfde als in de Koegraspolder; het regenwater wordt via de bovengrond direct afgevoerd naar de drains en kan door de slechte doorlatendheid van de ondergrond niet infiltreren en een regenwaterlens vormen tussen de drains [13]. De twee percelen bevestigen dat gelaagdheden in de ondergrond een grote invloed op de vorm en grootte van de regenwaterlens kunnen hebben.

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Deze rapportage beschrijft het onderzoek naar de relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlenzen en de perceeleigenschappen van gedraineerde percelen met zoute kwel. In de volgende alinea's wordt antwoord gegeven op de in de inleiding gestelde hoofdvraag; ***Wat zijn de relaties tussen de vorm en grootte van regenwaterlenzen en de perceeleigenschappen van gedraineerde percelen met zoute kwel?***

Het conceptuele model van het grondwatersysteem in gedraineerde percelen met zoute kwel waarbij regenwaterlenzen tussen drainagemiddelen functioneren als onafhankelijke lokale grondwatersystemen is gevalideerd en op basis van de modelresultaten aangenomen.

8.1.1 Invloed perceeleigenschappen in een homogeen bodemprofiel

In een homogeen bodemprofiel zijn alle gevarieerde perceeleigenschappen; drainageafstand, - diepte, bodemtype, kwelflux en chloridegehalte van de zoute kwel, in meer of mindere mate van invloed op de dikte van de regenwaterlens. De drainageafstand en in mindere mate de grootte van de kwelflux hebben een grote invloed op de regenwaterlens. Een combinatie van een kleine drainageafstand en grote kwelflux kan de regenwaterlens zelfs helemaal doen verdwijnen. De overige drie perceeleigenschappen hebben gemiddeld een kleinere invloed op de regenwaterlens. Het verlagen van de draindiepte verlaagd de overgangszone van het zoete naar zoute grondwater. Het verkleint echter de dikte van de regenwaterlens en daarmee de zoetwatervoorraad waar de gewassen op de percelen afhankelijk van zijn. Wanneer de concentratie chloride in de zoute kwel lager is, heeft dit een positief effect op de dikte van de regenwaterlens. Dit komt overeen met het Ghyben-Herzberg principe welke beschrijft dat het zoutgehalte van het kwelwater, en daarmee het dichtheidsverschil met het zoete water, van invloed is op de dikte van de regenwaterlens. Hoewel een lagere doorlatendheid gemiddeld resulteert in een dikkere regenwaterlens is dit waarschijnlijk niet het enige kenmerk van de bodemtypen wat invloed heeft op de regenwaterlens. Het vochtgehalte wat een bepaald bodemtype maximaal kan bevatten, in verzadigde toestand, heeft hier wellicht ook invloed op.

8.1.2 Invloed van een gelaagd bodemprofiel

Bij heterogene bodemprofielen zijn de relaties lastiger vast te leggen. Wel kan worden geconcludeerd dat de gelaagdheid bij bepaalde bodemprofielen een grote invloed op de grootte en vorm van de regenwaterlens. Voornamelijk wanneer de bovengrond in verhouding goed doorlatend is en er een slecht doorlatende laag of ondergrond vanaf en tot twee meter onder het drainageniveau ligt. Bij een tegengestelde situatie, slecht doorlatende bovengrond en goed doorlatende ondergrond of laag, heeft dit geen invloed op de grootte van de regenwaterlens maar wel op de vorm. Er ontstaat een bredere optrekkende 'kegel' van zout water naar de drain dan in een geheel homogeen bodemprofiel. Een naar verhouding afwijkende laag boven het drainageniveau heeft geen invloed op de grootte en vorm van de regenwaterlens.

8.1.3 Toetsing modelresultaten aan veldmetingen

Om de resultaten van het model en de gevonden relaties te valideren zijn deze getoetst aan enkele metingen in percelen in Friesland, Groningen en Noord-Holland. Deze metingen komen overeen met de resultaten van de modelstudie en de gevonden relaties tussen de perceeleigenschappen en de dikte van de regenwaterlenzen. Een in verhouding slecht doorlatende laag onder het drainageniveau heeft dezelfde invloed op de regenwaterlens als de modelberekening. De veldmetingen tonen aan dat de modellen de vorm en dikte van regenwaterlens goed beschrijven.

8.1.4 Relevantie van het resultaat

Het onderzoek naar de relaties tussen perceeleigenschappen en de grootte en vorm van regenwaterlenzen is vooral van belang voor de huidige drainagetechnieken en klimaatverandering in verziltende gebieden. Bij vervanging van bestaande drainage is het de trend om 'tussen te draineren'. Dit houdt in dat de nieuwe drainagebuizen tussen de oude drainagebuizen worden aangelegd, terwijl de oude drainagebuizen nog wel een drainerende werking hebben. Ook nieuwe drainage wordt op een steeds kleinere afstand van elkaar worden aangelegd om zo de drooglegging te vergroten. In sommige percelen ligt de drainage zelfs op een afstand van 2 meter. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt echter dat dit niet verstandig is omdat de vorming van regenwaterlenzen onder deze omstandigheden onmogelijk is en verzilting een groter risico vormt. Naast het beeld dat de drainage op kleinere afstanden worden gelegd is het dieper leggen van de drains, om zo het zoute kwelwater 'tegen' te houden, een trend. Het zoute water blijft bij deze maatregel inderdaad dieper maar de zoetwatervoorraad is kleiner.

8.2 Aanbevelingen

Door bodemdaling en zeespiegelstijging neemt de kweldruk toe. Door deze verhoogde kweldruk neemt op basis van de resultaten van dit onderzoek de vorming en grootte van regenwaterlenzen in percelen af. Om het risico op het verdwijnen van de regenwaterlens in de toekomst te voorspellen is het aanbevolen om de toenemende kweldruk in kaart te brengen.

Met dit onderzoek is de kennis over de vorming van regenwaterlenzen in gedraineerde percelen met zoute kwel gegroeid. Op basis van deze kennis en vervolgonderzoek kunnen er in de toekomst oplossingen worden gevonden om de regenwaterlenzen in Nederland maar ook wereldwijd te behouden en te vergroten.

In de modelstudie is er stationair gerekend maar wellicht hebben bepaalde perceeleigenschappen, zoals een afwijkende laag boven het drainageniveau, een andere invloed op de regenwaterlens onder tijdsafhankelijke omstandigheden. Het wordt aanbevolen om deze invloed in een vervolgonderzoek mee te nemen.

In dit onderzoek lag het ontwateringsniveau van het perceel altijd op het drainageniveau. Peil gestuurde drainage kan echter een positief effect op de dikte van de regenwaterlens hebben. Dit concept wordt nu beproeft in Zeeland onder de projectnaam Go-Fresh [19] en in Groningen en Friesland onder de naam Spaarwater [20]. De modellen van deze studie vormen een goede basis om de invloed van peil gestuurde drainage onder verschillende perceeleigenschappen te bepalen.

De invloed van doorlatendheid van de bodem op de dikte van de regenwaterlens is in dit rapport onderzocht maar overige kenmerken van de bodem niet. Wellicht hebben kenmerken als verdichting, vochtgehalte et cetera ook invloed op de grootte en vorm van de regenwaterlens. Het is aanbevolen om deze invloed in vervolgonderzoek mee te nemen.

Bijlagen

Bijlage 1 - Dikte regenwaterlens modellen fase 1, partij 1	36
Bijlage 2 - Dikte regenwaterlens modellen fase 1, partij 2	37
Bijlage 3 - Dikte regenwaterlens modellen fase 2.....	38

Bijlage 1 - Dikte regenwaterlens modellen fase 1, partij 1

Drainafstand (m)	Bodemtype	Kwelflux (mm/d)					
		0	0,005	0,01	0,05	1	2
2	grof zand (O5)	0,4	0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,1
	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1)	0,5	0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,1
	matig lichte zavel (O9)	0,6	0,3	0,3	0,1	-0,1	-0,2
	mesotroof en eutroof veen (O17)	0,5	0,3	0,2	-0,1	-0,1	-0,2
	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O3)	0,6	0,3	0,2	0,1	-0,1	-0,1
	zeer zware klei (O13)	0,7	0,5	0,4	0,1	-0,1	-0,2
	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2)	0,5	0,3	0,2	0,1	-0,1	-0,1
	zware zavel (O10)	0,7	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,2
4	grof zand (O5)	0,6	0,3	0,2	0,1	-0,1	-0,1
	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1)	0,8	0,4	0,3	0,1	0,1	-0,1
	matig lichte zavel (O9)	0,9	0,6	0,5	0,1	-0,1	-0,4
	mesotroof en eutroof veen (O17)	0,7	0,6	0,4	0,1	-0,1	-0,4
	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O3)	0,9	0,6	0,4	0,2	-0,1	-0,2
	zeer zware klei (O13)	1,2	0,9	0,7	0,2	-0,1	-0,4
	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2)	0,9	0,5	0,4	0,2	0,1	-0,1
	zware zavel (O10)	1,1	0,7	0,6	0,2	-0,1	-0,4
8	grof zand (O5)	0,9	0,5	0,4	0,2	0,1	-0,1
	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1)	1,4	0,9	0,7	0,4	0,3	0,1
	matig lichte zavel (O9)	1,7	1,3	1,1	0,5	0,1	-0,3
	mesotroof en eutroof veen (O17)	1,3	1,1	0,9	0,4	0,1	-0,3
	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O3)	1,6	1,1	0,9	0,5	0,3	-0,1
	zeer zware klei (O13)	2,1	1,7	1,5	0,7	0,3	-0,2
	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2)	1,5	0,9	0,9	0,5	0,3	0,1
	zware zavel (O10)	1,9	1,5	1,3	0,6	0,2	-0,2
10	grof zand (O5)	1,1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1
	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1)	1,6	1,1	0,9	0,6	0,4	0,2
	matig lichte zavel (O9)	1,9	1,6	1,4	0,7	0,3	-0,1
	mesotroof en eutroof veen (O17)	1,6	1,4	1,2	0,6	0,2	-0,1
	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O3)	1,9	1,4	1,2	0,8	0,5	0,1
	zeer zware klei (O13)	2,5	2,2	1,9	0,9	0,5	-0,1
	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2)	1,8	1,3	1,1	0,7	0,5	0,2
	zware zavel (O10)	2,3	1,9	1,7	0,8	0,4	-0,1
12	grof zand (O5)	1,3	0,8	0,6	0,3	0,5	0,2
	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1)	1,9	1,3	1,1	0,7	0,5	0,3
	matig lichte zavel (O9)	2,4	1,9	1,7	0,9	0,5	-0,1
	mesotroof en eutroof veen (O17)	1,9	1,7	1,5	0,9	0,4	-0,1
	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O3)	2,3	1,7	1,5	0,9	0,6	0,3
	zeer zware klei (O13)	2,9	2,7	2,4	1,3	0,7	0,1
	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2)	2,1	1,6	1,4	0,9	0,6	0,3
	zware zavel (O10)	2,8	2,4	2,1	1,1	0,6	0,1
15	grof zand (O5)	1,5	0,9	0,6	0,4	0,3	0,2
	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1)	2,2	1,6	1,4	0,9	0,7	0,5
	matig lichte zavel (O9)	2,9	2,6	2,2	1,4	0,8	0,2
	mesotroof en eutroof veen (O17)	2,3	2,1	1,9	1,2	0,7	0,2
	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O3)	2,7	2,2	1,9	1,3	0,9	0,4
	zeer zware klei (O13)	3,7	3,4	3,1	1,8	1,1	0,3
	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2)	2,5	1,9	1,7	1,2	0,9	0,5
	zware zavel (O10)	3,4	3,1	2,8	1,5	0,9	0,3
25	grof zand (O5)	2,2	1,6	1,1	0,8	0,8	0,6
	leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand (O1)	3,3	2,8	2,5	1,9	1,5	0,9
	matig lichte zavel (O9)	4,6	4,3	4,1	2,7	1,8	0,9
	mesotroof en eutroof veen (O17)	3,5	3,3	3,1	2,4	1,6	0,9
	sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O3)	4,3	3,8	3,5	2,5	1,7	1,1
	zeer zware klei (O13)	5,4	5,1	4,8	3,1	2,1	0,9
	zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand (O2)	3,8	3,3	3,1	2,3	1,7	1,1
	zware zavel (O10)	5,3	4,8	4,6	2,9	1,9	0,9

Bijlage 2 - Dikte regenwaterlens modellen fase 1, partij 2

Chloridegehalte (g/m3)	Draindiepte (cm)	
5000	50	1,300
	100	0,900
	200	0,600
10000	50	1,000
	100	0,700
	200	0,300
18000	50	0,700
	100	0,500
	200	0,200

Bijlage 3 - Dikte regenwaterlens modellen fase 2

Profiel	
P1	-0,100
P1a	0,600
P2	0,100
P2a	0,400
P2b	0,600
P2c	0,600
P2d	0,600
P3	0,700
P3a	0,600
P4	1,100
P5	0,200
P6	0,300
P7	0,900
P8	-0,100

Bronvermelding

- [1] J. Velstra, J. Groen, K. De Jong, „Observations of salinity patterns in shallow groundwater and drainage water from agricultural land in the northern part of the Netherlands,” *Irrigation and Drainage*, pp. 51-58, 2011.
- [2] J.H.M. Wösten, G.J. Veerman, W.J.M de Groot, J. Stolte, „Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks,” Alterra Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen , 2001.
- [3] M. T. v. Genuchten, „A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils,” *Journal of the Soil Science Society of America*, vol. 44, nr. 5, pp. 892-898, 1980.
- [4] W. Scott Sillers, D.G. Fredlund, „Statistical assesement of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering,” *Can. Geotech. Journal* 38, pp. 1297-1313, 2001.
- [5] J.H.M. Wösten, F. de Vries, J. Denneboom, A.F. van Holst, „Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1 : 250000, ten behoeve van de PAWN-studie,” Stichting voor bodemkartering, Wageningen, 1988.
- [6] J. v. d. Akker, „Een inventarisatie van bodemfysische materiaalmodellen zoals toegepast in het landbouwkundig onderzoek,” Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2001.
- [7] R. Thode, M. Fredlund, *ChemFlux Theory Manual*, Saskatoon, Saskatchewan, Canada: SoilVision Systems Ltd., 2011.
- [8] W. v. d. Molen, „Nederlandse kustduinen. Geohydrologie,” Centrum voor landbouwpublicaties en landbouwdocumentatie, Wageningen, 1981.
- [9] A. Poot, P.P. Schot, „Neerslaglenzen: vorm en dynamiek,” *Stromingen* 6 (4), pp. 13-26, 2000.
- [10] B. v. d. Wal, „Neerslaglenzen: sterke ruimtelijke variatie,” *Stromingen* 7, pp. 17-24, 2001.
- [11] P. d. Louw, „Saline seepage in deltaic areas,” Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, 2013.
- [12] P.P. Schot, S.C. Dekker, A. Poot, „The dynamic form of rainwater lenses in drained fens,” *Journal of Hydrology* 293, pp. 74-84, 2004.
- [13] G. van Staveren, J. Velstra, „Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord Nederland,” Acacia Water, Gouda, 2011.
- [14] H. Ritzema, „Subsurface flows to drains,” in *Drainage Principles and Applications*, Wageningen, ILRI , 1994, pp. 263-294.
- [15] L. Ernst, *Bepaling van zoute kwel uit diepte en vorm van het zoutwaterfront*, Werkgroep Deltagebied, 1957.
- [16] H. Th. L. Massop, L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel, J.M.M. Bouwmans, H. Brak, „Invloed van de oppervlaktewaterstand op de grondwaterstand,” DLO-Staring centrum, Wageningen, 1997.
- [17] J. Velstra, R. Visser, M. Groen, „Veldonderzoek zoet en zout grondwater Koegraspolder,” Acacia Water, Gouda, 2014.

- [18] J. Velstra, „H3 Systeemanalyse op perceelniveau,” Acacia Water, Gouda, 2011.
- [19] „kennisvoorklimaat.nl,” Kennis voor klimaat, [Online]. Available: <http://kennisvoorklimaat.nl/go-fresh>. [Geopend 27 mei 2015].
- [20] „spaarwater.com,” Acacia Water, [Online]. Available: http://www.spaarwater.com/pg-27227-7-72161/pagina/spaarwater_rendabel_en_duurzaam_watergebruik.html. [Geopend 27 mei 2015].