



ALTERRA

WAGENINGEN UR



## Effecten van berekening op het verloop van het freatisch vlak in veenkades

Alterra Speciaal rapport

K. Oostindie, J.G. Wesseling, J. van Kleef en C.J. Ritsema



---

## Effecten van beregening op het verloop van het freatisch vlak in veenkades

---



K. Oostindie<sup>1</sup>, J.G. Wesseling<sup>1</sup>, J. van Kleef<sup>1</sup> en C.J. Ritsema<sup>2</sup>

- 1 ALTERRA, Wageningen
- 2 Wageningen Universiteit

Alterra, onderdeel van Wageningen UR  
Wageningen, 2013

---

## Referaat

Snelle stijgingen in het verloop van het freatisch vlak onder relatief steile veenkades als gevolg van perioden met veel neerslag kunnen gevolgen hebben voor de mate van stabiliteit van dijklichamen. Door middel van irrigatieproeven zijn op een tweetal kades onderzocht hoe het freatisch vlak reageert op neerslaghoeveelheden die eens in de 100 jaar voorkomen, en die over een periode van 1 tot 9 dagen lengte vallen. Met behulp van het 2 dimensionale model HYDRUS-2D is geprobeerd deze situaties na te bootsen. Hiermee komt dan een instrumentarium beschikbaar waarmee alternatieve scenario's kunnen worden doorgerekend. Tevens wordt inzichtelijk gemaakt hoe de waterstroming door het dijklichaam plaatsvindt.

K.Oostindie, J.G. Wesseling, J. van Kleef en C.J. Ritsema 2013. Effecten van beregening op het verloop van het freatisch vlak in veenkades]. Wageningen, Alterra, Alterra-Document1. 37 blz.; 26 fig.; 5 tab.; 9 ref.

Trefwoorden: Veenkade, grondwaterstand, freatisch vlak, modellering,

ISSN 1566-7197

© 2011 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)  
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

### **Alterra-speciaal rapport**

Wageningen, Februari 2013  
Projectnummer 5239991

# Inhoud

1	Inleiding	9
2	Methode van onderzoek	10
2.1	Proeflocaties	10
2.2	Berekening	10
2.3	Grondwaterstanden	11
2.4	Bodemvocht	11
2.5	Oppervlakkige afvoer	11
2.6	Veiligheid	12
3	Resultaten	13
3.1	Oudelandsdijkje	13
3.1.1	Berekening, Oppervlakkige afvoer en Neerslag	13
3.1.2	Grondwaterstanden	15
3.1.3	Vochtgehalten	17
3.2	Zuiderringdijk	19
3.2.1	Berekening, Oppervlakkige afvoer en Neerslag	19
3.2.2	Grondwaterstanden	21
3.2.3	Vochtgehalten	23
4	Modellsimulaties	25
4.1	Uitgangspunten	25
4.2	Opzet berekeningen	25
4.2.1	De simulatieperiode	25
4.2.2	Schematisatie van het proefveld	25
4.2.3	De bodemfysische eigenschappen	26
4.2.4	Eindige elementen opbouw	28
4.2.5	De toegepaste randvoorwaarden	28
4.2.6	Initiële toestand	30
4.3	Resultaten	30
4.3.1	Drukhoogteprofielen	31
4.3.2	Stromingsvectoren	31
4.4	Gemeten en berekende grondwaterstanden.	33
5	Conclusies	36
5.1	Algemeen	36
5.2	Modelleren	36
6	Referenties	37





# 1 Inleiding

Het weren van water is in West Nederland een belangrijk aandachtspunt voor ondermeer regionale en lokale overheden. Met name waterschappen besteden veel zorg en aandacht aan de veiligheid in hun leefomgeving. Aan dijken wordt veel aandacht en onderzoek besteed, omdat deze van zeer groot belang zijn om het water tegen te houden. Veel van deze dijken zijn opgebouwd uit venig materiaal en voorzien van een kleidek. In droge tijden kunnen zowel het veen als de klei krimpen waardoor de dijken in gewicht afnemen en er scheuren ontstaan. Na de dijkdoorbraken in 2003 bij Wilnis en Terbregge kregen de dijken extra aandacht met betrekking tot inspectie, onderhoud en onderzoek. Verschillende onderzoeken hebben plaatsgevonden naar uitdrogende veendijken en de bevochtiging ervan (Dekker e.a., 2003, Oostindie e.a., 2004). Ook is er aandacht geweest voor beheersmaatregelen op veenkaden tijdens droogte (Oostindie, 2012) en zijn er tools ontwikkeld die het inzichtelijk maken waar en wanneer er droogte dan wel natheid aanwezig is (Oostindie e.a., 2011).

Niet alleen droogte verdient aandacht. Ook is het belangrijk hoe kaden reageren op grote neerslaghoeveelheden. Snelle stijgingen in het verloop van het freatisch vlak onder relatief steile veenkades als gevolg van een korte periode met veel neerslag kunnen gevolgen hebben voor de mate van stabiliteit van het dijklichaam. Om meer inzicht te krijgen in de responsnelheid en de mate van stijging van het freatisch vlak onder veenkades in het hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier zijn een tweetal irrigatie proeven uitgevoerd.

De onderzoekslocaties zijn gelegen aan beide zijden van de Ringvaart van de Wijde Wormer. De eerste locatie is het Oudelandsdijkje nabij de woning op het Wormerpad 4, in de richting van Enkhuizen met Purmerland als achterliggende polder. De tweede locatie is de dijk aan de andere kant van dezelfde boezemvaart en op dezelfde hoogte. Op de kruin van deze dijk ligt een fietspad (de Zuiderringdijk genoemd) dat grenst aan de polder de Wijde Wormer. In Figuur 1 (bron: Google Maps) staan beide locaties weergegeven.



*Figuur 1. Locatie van de infiltratieproeven.*

## 2 Methode van onderzoek

### 2.1 Proeflocaties

Om de effecten van grote hoeveelheden neerslag op het verloop van het freatisch vlak onder een veendijk te bepalen is op beide in de inleiding genoemde locaties een strook van 15 meter breed ingericht die kunstmatig beregend wordt. Buiten deze stroken werd ook een referentie gedeelte ingericht waarop niet werd beregend. Op beide gedeeltes werden grondwaterstandsbuizen en mantelbuizen voor het meten van vochtgehalten geplaatst. Op het te beregenen deel is ook een afvoergoot geïnstalleerd waarmee oppervlakkige afvoer metingen kunnen worden uitgevoerd.

### 2.2 Berekening

De berekening vond plaats door met behulp van een elektrische pomp water uit de ringvaart op te pompen. De benodigde elektriciteit hiervoor werd geleverd door de dichtstbijzijnde woonhuis. Het opgepompte water werd met behulp van sproeiers over het gewenste oppervlak verdeeld. Direct achter de pomp was een flowmeter geïnstalleerd waarop af te lezen was hoeveel water er werd opgepompt en met welke snelheid het water voorbij kwam. Deze gegevens werden met behulp van een logger opgeslagen. Door het vaststellen van het besproeide oppervlak kon de hoeveelheid toegediend irrigatiewater per oppervlak nauwkeurig worden vastgesteld. Op het Oudelandsdijkje werd een strook van 15 meter breed en 14.5 meter lang met behulp van 2 sproeiers beregend. Op de Zuiderringdijk was deze strook ruim 15 meter breed en 32 meter lang en werd met behulp van 6 sproeiers beregend. Voordat de echte berekening plaatsvond is er al water toegediend om de initiële toestand van de dijk wat natter te maken. Tevens kon in de aanloopperiode de benodigde apparatuur worden uitgetest en zo nodig worden aangepast. Ook werd eerst de benodigde beregeningsintensiteit vastgesteld. De toegediende hoeveelheid beregeningswater moest, indien mogelijk, zoveel mogelijk door het profiel worden opgenomen. Bij voorkeur moest er geen oppervlakkige afstroming plaatsvinden. Hiertoe werd gestart met een intensiteit van 7.5 mm/uur gedurende 4 uur. Indien er oppervlakkige afvoer optrad werd de intensiteit verlaagd. Vervolgens werd de hele procedure opnieuw uitgevoerd. Deze procedure werd net zo lang herhaald totdat er geen oppervlakkige afvoer meer optrad of indien de minimale beregeningsintensiteit was bereikt.

Op de proeflocaties zijn regenbuien gesimuleerd die eens in de 100 jaar voorkomen. Hierbij is ook gelet op de periode waarin deze hoeveelheden vallen. Er kan worden gedacht aan hoeveelheden neerslag die op 1, 2, 3 of meer dagen vallen. De maximale periode lengte bedroeg 9 dagen. In tabel 1 staan de hoeveelheden neerslag die eens in de 100 jaar voorkomen bij bepaalde periode lengte. Deze cijfers zijn ontleend aan het STOWA rapport over de statistiek van extreme neerslag in Nederland (Smits e.a., 2004). De neerslag hoefde niet gelijkmatig over de gehele periode verdeeld te zijn, maar kon per dag verschillen. Hierdoor was het mogelijk om de berekening per dag stapsgewijs omhoog te brengen naar de gewenste hoeveelheid voor die betreffende dag. Nadat er op de eerste dag 79 mm was toegediend, kon er op de tweede dag 13 mm worden gegeven om op een totaal van 92 mm uit te komen. Om een indruk te krijgen van de homogeniteit van de berekening zijn er een aantal regenmeters geplaatst in het beregende deel van de

proeflocatie. Om deze homogeniteit te behouden moesten de sproeiers vaak opnieuw worden opgesteld en afgeregeld. Een van de redenen hiervoor was de wind die met regelmaat van richting en kracht veranderde.

*Tabel 1. Neerslagtotalen van buien die 1 keer in de 100 jaar plaats vinden over verschillende perioden. Tevens geeft deze tabel de opbouw van de beregeningsgiften weer die nodig zijn om deze neerslagtotalen na te bootsen.*

Dagen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hoeveelheid (mm)	79	92	102	109	116	123	129	135	141
Beregeningsgift (mm)	79	13	10	7	7	7	6	6	6



*Figuur 2. Meten van bodemvochtgehaltes*

## 2.3 Grondwaterstanden

Om de effecten van de beregeningsgiften op de grondwaterstand te kunnen meten zijn op beide waterkeringen raaien met grondwaterstandsbuizen geplaatst. Bovendien werd er op beide dijksegmenten een tweede zogenaamde referentie raai geplaatst. Deze raaien dienden als referentie profiel en werden niet beregend. De grondwaterstandsbuizen waren uitgerust met druksensoren die werden geïnstalleerd en geleverd door een ingenieursbureau. Zij werden in het digitale meetnet van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier opgenomen en elk kwartier gemeten. Real time monitoring van grondwaterstand werd daardoor mogelijk. Op de eerste veenkade zijn 5 grondwaterstandsbuizen per raai geplaatst, op de tweede dijk werden 7 buizen in een raai gezet. De tweede dijk was aanmerkelijk groter qua afmetingen en verhang.

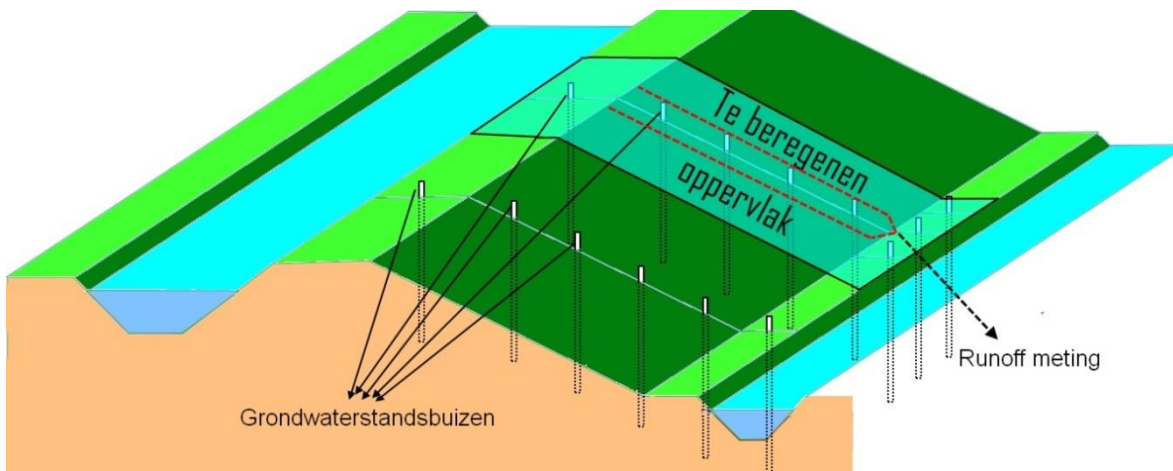
## 2.4 Bodemvocht

Naast de grondwaterstanden werden ook vochtgehalten gemeten met een draagbare “deviner” sensor. Met dit apparaat kon op een snelle en eenvoudige manier het vochtgehalte in de bodem op verschillende dieptes worden gemeten. Hiertoe werden vooraf mantelbuizen geplaatst in raaien, zowel in het beregende als in het referentie gedeelte. Op het Oudelansedijkje werden steeds 3 buizen in een raai geplaatst, op de Zuiderringdijk waren dit vier buizen per raai. Bij elk veldbezoek werd voor elke 10 cm diepte een vochtgehalte gemeten tot de maximale diepte van 160 cm-mv.

## 2.5 Oppervlakkige afvoer

Teneinde de oppervlakkige afvoer te kunnen meten die optrad tijdens de beregening werd een oppervlakkige afvoer meter geïnstalleerd aan de onderzijde van de helling. Hiertoe werd er een afvoergoot aan de teen van de helling geplaatst van bijna 2 meter lengte (1.98 m). Het afstromende water werd in deze afvoergoot opgevangen en naar een

oppervlakkige afvoer meter geleid om de hoeveelheid afgevoerd water te meten. Deze meter bestond uit een kantelbaksysteem met zowel een digitale als een mechanische teller. Het vanggebied boven de afvoergoot werd nauwkeurig afgebakend door schotjes te plaatsen. Hierdoor was het oppervlak bekend en kon de afgevoerde hoeveelheid water (liters) worden omgerekend naar hoeveelheden in mm. Figuur 3 geeft een schematisch overzicht van de opzet van de proef.



*Figuur 3. Schematisch overzicht irrigatieproef*

## 2.6 Veiligheid

Door het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier zijn stabiliteitsanalyses uitgevoerd en vastgelegd in een notitie (Bouwman, 2012). De conclusie in deze notitie is dat de stabiliteitsfactor van beide kaden met verkeersbelasting niet voldoet aan de eisen. Bij een maatgevend boezempeil neemt de stabiliteit met meer dan 10% af indien het peil in de binnenkruin hoger dan NAP -0.3 m is. Tijdens de uitvoering van de proef moest er derhalve op worden gelet wanneer het peil in de binnenkruin boven NAP -0.5 m uitkwam, dit in combinatie met een peil in de teen van de dijk boven NAP -1.8 m voor het Oudelandsdijkje en NAP -3.0 m aan de Zuiderringdijk. Naar aanleiding van de berekeningen die werden uitgevoerd (Bouwman, 2012) werd verwacht dat bij een neeslaghoeveelheid van 1000 mm/j het freatisch vlak in de binnenkruin zou stijgen tot NAP -0.3 m. Echter, dit hangt in sterke mate af van intensiteiten, hoeveelheden, boezem- en slootpeilen.

Gedurende de uitvoering van de proef is de boezemvaart op twee plaatsen met behulp van damwanden afgedamd geweest. Indien zich onverhoopt calamiteiten zouden voordoen, dan kon slechts het gedeelte van de boezemvaart tussen de damwanden leegstromen.

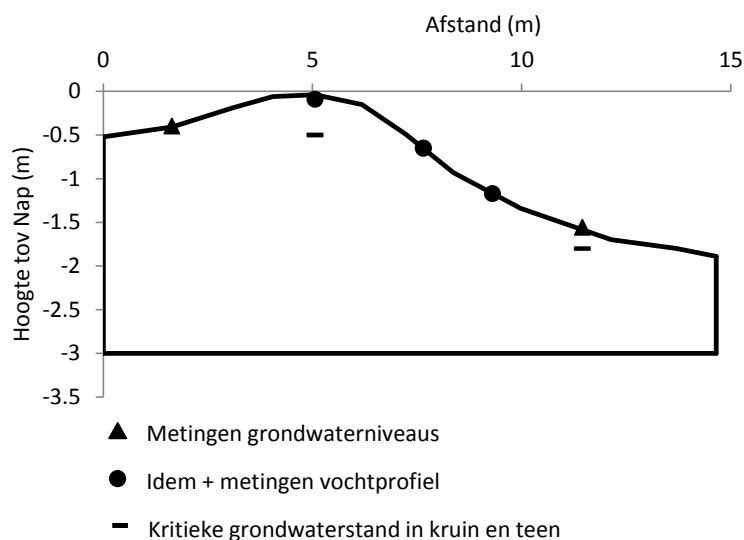
## 3 Resultaten

### 3.1 Oudelandsdijkje

#### 3.1.1 Berekening, Oppervlakkige afvoer en Neerslag

In Figuur 4 is een dwarsdoorsnede te zien van het Oudelandsdijkje met hierin de posities van de grondwater-standsbuizen en de mantelbuizen voor het meten van het vochtgehalte. Deze zijn in twee raaien geplaatst. De referentie raai werd op 15 meter afstand van de irrigatie raai geplaatst.

*Figuur 4. Dwarsdoorsnede Oudelandsdijkje*



De top van de kade ligt bijna op NAP niveau en het verhang naar de polderzijde is 1.85 m. Vanaf 25 september tot aan de start van de proef op 4 oktober is hier begonnen met het bevochtigen van de dijk door middel van beregening. Ook is in deze periode vastgesteld wat de maximale beregeningsintensiteit was om zo weinig mogelijk oppervlakkige afvoer te krijgen. Bij het gebruik van 2 sproeiers was de maximale intensiteit 7.25 mm/uur. Deze bleek te hoog te zijn. Daarom werd de intensiteit verlaagd door gedurende elk uur de beregening een bepaalde periode stop te zetten. Bij een intensiteit van 5.4 mm/uur trad gedurende 4 uur beregening een oppervlakkige afvoer op van 0.4 mm. Aangezien er grote hoeveelheden beregend moesten worden bij een lage intensiteit werd er een schakelklok ingebouwd die telkens de beregening kon onderbreken en later weer starten. In eerste instantie was er een klok beschikbaar die voor maximaal 24 uur programmeerbaar was. De minimale tijd die tussen een aan/uit schakeling zat bedroeg een half uur. Hierdoor werd de intensiteit nog verder teruggebracht. Door de effecten van de wind, en doordat de filters in de sproeiers vervuild konden raken door algen uit het boezemwater kon deze intensiteit variëren tussen de 3.7 en 4.1 mm/uur. Later was er een klok beschikbaar die per minuut programmeerbaar was en voor verschillende dagen kon worden ingesteld. Dit maakte de beregeningsintensiteit beter beheersbaar.

Vanaf 4 oktober is de berekening gestart voor neerslaghoeveelheden die 1 keer per 100 jaar optreden en die op 1,2, 3, ... dan wel 9 dagen valt (zie Tabel 1). Gedurende deze berekeningsgiften was het boezempeil NAP -0.51 m. Deze berekeningsgiften duurden tot 12 oktober. Vervolgens is op 17 oktober het boezempeil verhoogd naar NAP -0.20 cm. De gedachte hierachter was dat bij grote hoeveelheden neerslag het boezempeil ook verhoogd zal zijn. Vervolgens zijn vanaf 18 t/m 23 oktober de eerste zes dagen van deze berekeningscyclus herhaald. Op 24 en 25 oktober is nagegaan of een vergroot te beregenen oppervlak een groter effect zou hebben op de grondwaterstanden. Een groot gedeelte van de referentie plot werd toen ook beregend. Met behulp van een extra sproeier werd respectievelijk 60 en 9 mm water beregend. Verrassend was de heftige reactie in het referentie gedeelte. Daarom is op 27 oktober nogmaals een hoeveelheid van 79 mm gegeven, maar dan alleen op het referentie gedeelte. Echter, na 45 mm moest de proef worden gestopt, omdat het grondwaterniveau in de binnenkruin een te hoge waarde liet zien van NAP -0.49 m .

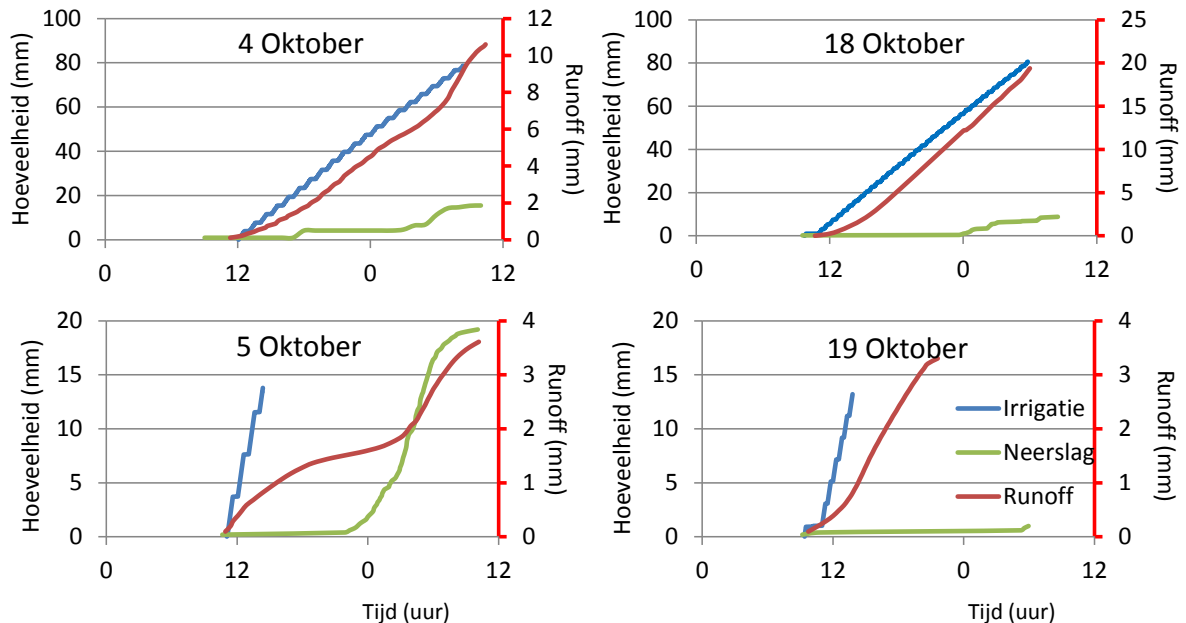
*Tabel 2. Hoeveelheden berekening, neerslag en oppervlakkige afvoer in mm gedurende de periode 4 oktober – 27 oktober.*

	Datum	Irrigatie (mm)	Neersla g (mm)	Totaal (mm)	Oppervlakkige afvoer (mm)
Periode van 9 dagen berekening	4-10-2012	78.7	15.5	94.2	8.4
	5-10-2012	13.8	9.0	22.8	3.6
	6-10-2012	10.3	21.0	31.3	0.0
	7-10-2012	7.8	0.0	7.8	0.0
	8-10-2012	7.8	0.0	7.8	0.0
	9-10-2012	7.8	0.0	7.8	0.0
	10-10-2012	7.1	0.0	7.1	0.0
	11-10-2012	7.7	0.0	7.7	0.0
Geen berekening	12-10-2012	6.1	16.8	6.1	0.0
	13-10-2012	0.0	6.7	6.7	0.0
	14-10-2012	0.0	11.4	11.4	0.0
	15-10-2012	0.0	6.4	6.4	0.0
	16-10-2012	0.0	1.0	1.0	0.0
6 dagen berekening bij verhoogd peil	17-10-2012	0.0	0.2	0.2	0.0
	18-10-2012	80.6	3.4	84.0	19.4
	19-10-2012	13.2	10.2	23.4	3.3
	20-10-2012	10.3	1.2	11.5	2.1
	21-10-2012	6.9	2.4	9.3	0.5
	22-10-2012	7.5	0.0	7.5	0.0
2 dagen berekening op groter opp	23-10-2012	7.5	0.0	7.5	0.0
	24-10-2012	60.0	0.5	60.5	5.6
Geen berekening	25-10-2012	9.0	0.0	9.0	1.0
	26-10-2012	0.0	0.0	0.0	0.0
Berekening ref plot	27-10-2012	45.0	0.0	45.0	0.0

Tijdens het uitvoeren van de experimenten werd ook de natuurlijke neerslag gemeten. In tabel 2 staan deze hoeveelheden weergegeven, tezamen met de beregende

hoeveelheden. Oppervlakkige afvoer kon niet geheel worden voorkomen. Deze hoeveelheden zijn ook in Tabel 2 opgenomen.

In figuur 5 staan de hoeveelheden irrigatie- en regenwater en de hoeveelheid oppervlakkige afvoer gemeten in de tijd op 4 verschillende dagen. Op de linker y-as staat de wateraanvoer geprojecteerd en op de rechter de oppervlakkige waterafvoer. Opvallend is dat de oppervlakkige afvoer vrij snel nadat de berekening is gestart op gang komt en ook bijna gelijktijdig stopt nadat de berekening is gestopt. Echter, op 5 oktober en 19 oktober blijft de oppervlakkige afvoer nog enige tijd doorlopen. Op 5 oktober komt de oppervlakkige afvoer opnieuw op gang ten gevolge van natuurlijke neerslag.

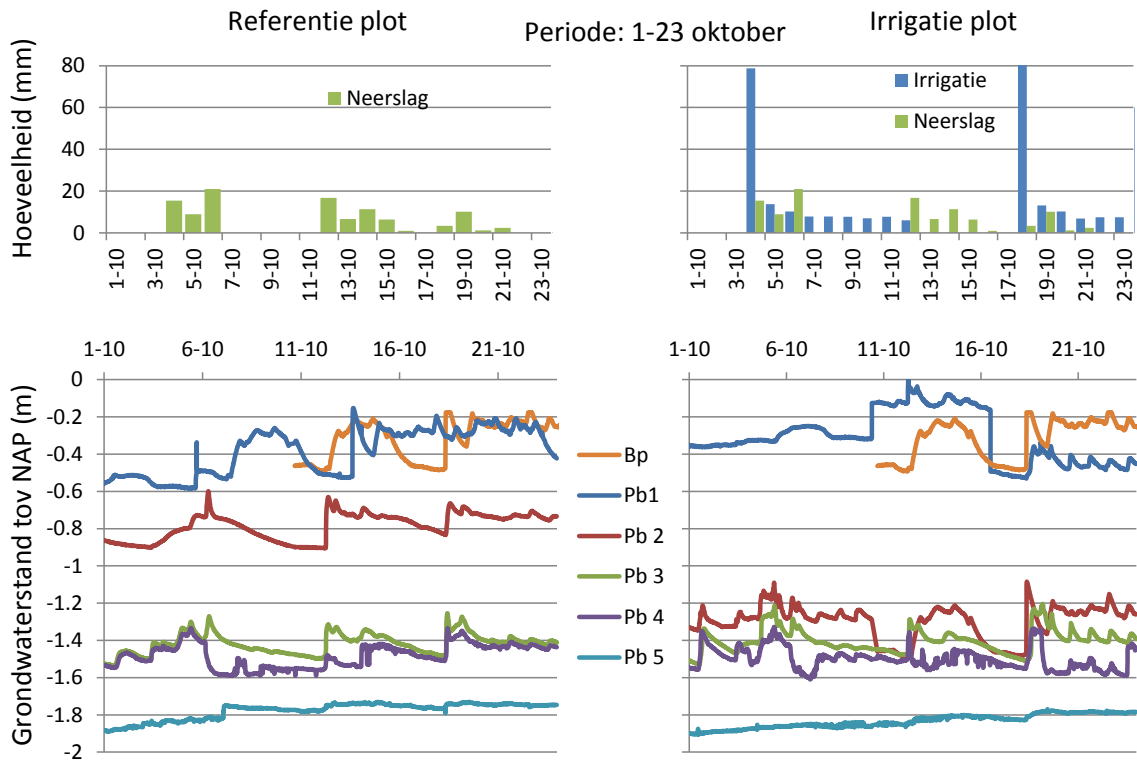


*Figuur 5. Hoeveelheden irrigatie- en regenwater (mm) en de hoeveelheid oppervlakkige afvoer (mm) gemeten in de tijd op 4 verschillende data.*

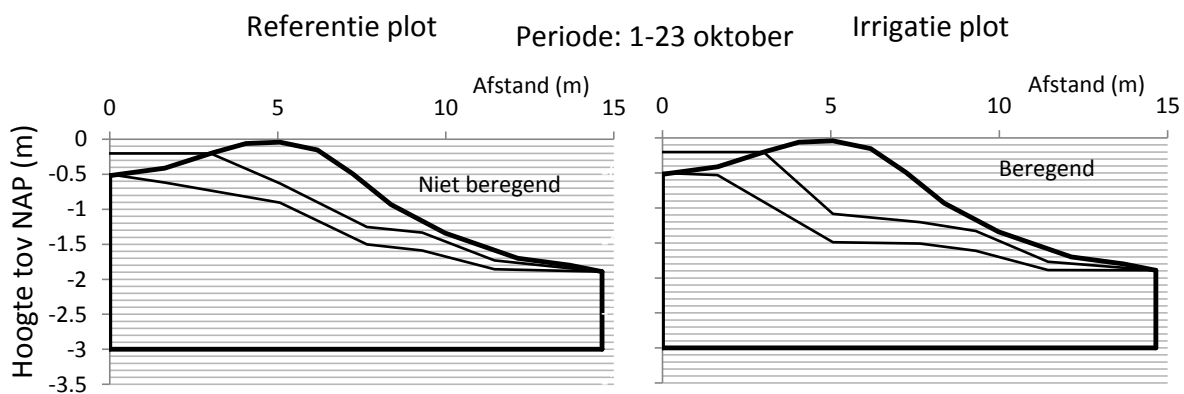
### 3.1.2 Grondwaterstanden

In Figuur 6 zijn de neerslag- en irrigatiehoeveelheden weergegeven samen met de grondwaterstanden voor zowel de referentie als de irrigatie plot. De eerste beregeningscyclus werd uitgevoerd van 4 oktober tot en met 12 oktober. Dit gebeurde bij het normale boezempeil. De tweede cyclus vond plaats bij een verhoogd boezempeil (18-24 oktober). Peilbuis 1 (Pb1) staat het dichtst bij de boezem daarna peilbuis 2 (Pb2) enz. peilbuis 5 staat dus het verst van de boezem af (zie ook Figuur 4). Opvallend is dat Pb2, welke boven op de dijk staat grote verschillen laat zien tussen de referentie en irrigatieplot. Waarschijnlijk heeft dit te maken met verschillen in opbouw van de dijk (wel of geen/minder puin) of met verschillen in doorlatendheden, doch dit kan, zonder verder onderzoek, niet met zekerheid worden gezegd. De peilbuizen laten allemaal een response zien op neerslag en irrigatie. Bij het verhoogde boezempeil, op 18 oktober, laat peilbuis 2 van de irrigatie plot een snelle stijging van het freatisch vlak zien (+40 cm). Het niveau komt dan uit op hetzelfde niveau als de gift op 4 oktober. Ook de overige buizen reageren duidelijk op deze irrigatiegift van 80 mm. De peilbuizen 3 en 4 in de irrigatieplot reageren hierna ook duidelijk op de kleinere irrigatiegiften. Echter, een kritiek peil van -0.5 m t.o.v.

NAP in peilbuis 2 werd niet gehaald. In Figuur 7 is het laagste en hoogste gemeten freatisch vlak in de kade gedurende de periode 1-23 oktober weergegeven. Opvallend is ook hier de aanmerkelijk lagere grondwaterstand onder de top van de kade in het beregende gedeelte. Het grondwatervniveau fluctueerde er in de beschouwde periode met 40 cm (-1.49 m - -1.09 m –NAP).



Figuur 6. Hoeveelheden irrigatie- en regenwater (mm) en de grondwaterstanden gedurende de periode 1 oktober – 23 oktober voor de referentie- en de irrigatieplot.

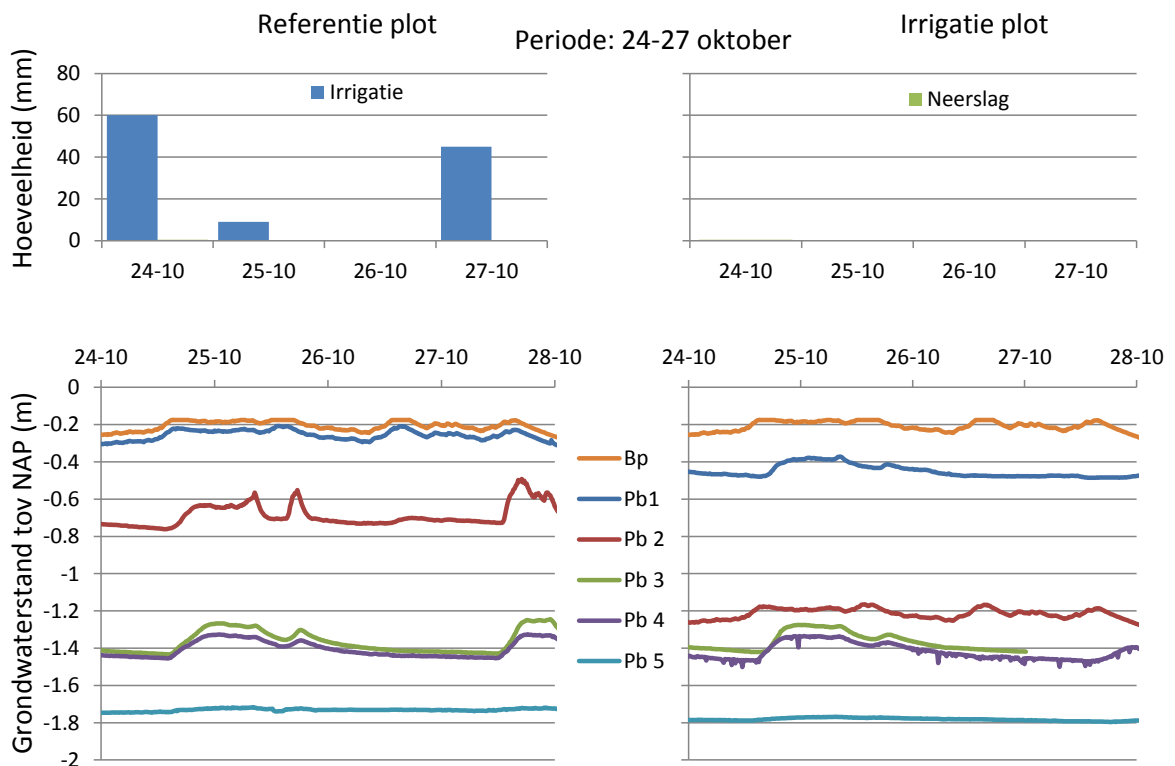


Figuur 7. Hoogste en laagste gemeten freatisch vlak in de kade van het Oudelandsdijkje.

Aansluitend aan deze proef is ook nog gekeken hoe het freatisch vlak zou reageren indien een groter oppervlak zou worden beregend. Hiertoe is er een extra sproeier geplaatst en zijn een tweetal irrigatiehoeveelheden toegediend verdeeld over twee dagen (24 en 25 oktober). De hoeveelheden die zijn toegediend bedroegen respectievelijk 60 en 9 mm. In



Figuur 8 zijn deze weergegeven, evenals de gemeten grondwaterstanden. Zowel het referentie als het irrigatie gedeelte zijn hier beregend. Opmerkelijk is dat de grondwaterstand onder de top van de dijk op het referentie gedeelte veel heftiger reageerde dan de overeenkomstige buis op het irrigatie gedeelte. In het referentie gedeelte steeg de grondwaterstand met 18 cm, terwijl op het irrigatie gedeelte een stijging van slechts 8 cm werd waargenomen. Dit was een goede reden om op het referentiegedeelte een beregeningsgift te doen die 1 keer in de 100 jaar gedurende twee dagen kan optreden. Twee giften dus van respectievelijk 79 en 13 mm, waarmee op 27 oktober werd begonnen. Echter, nadat 45 mm water was toegediend besloot het Hoogheemraadschap te stoppen met de proef omdat in peilbuis 2 het niveau van NAP -0.5 m werd overschreden (Figuur 8). Dit was een stijging van de grondwaterstand met 23 cm. Om 11:00 uur werd de beregening gestart en was de grondwaterstand -72 cm t.o.v. NAP. Deze steeg binnen 5 uur naar -49 cm t.o.v. NAP.

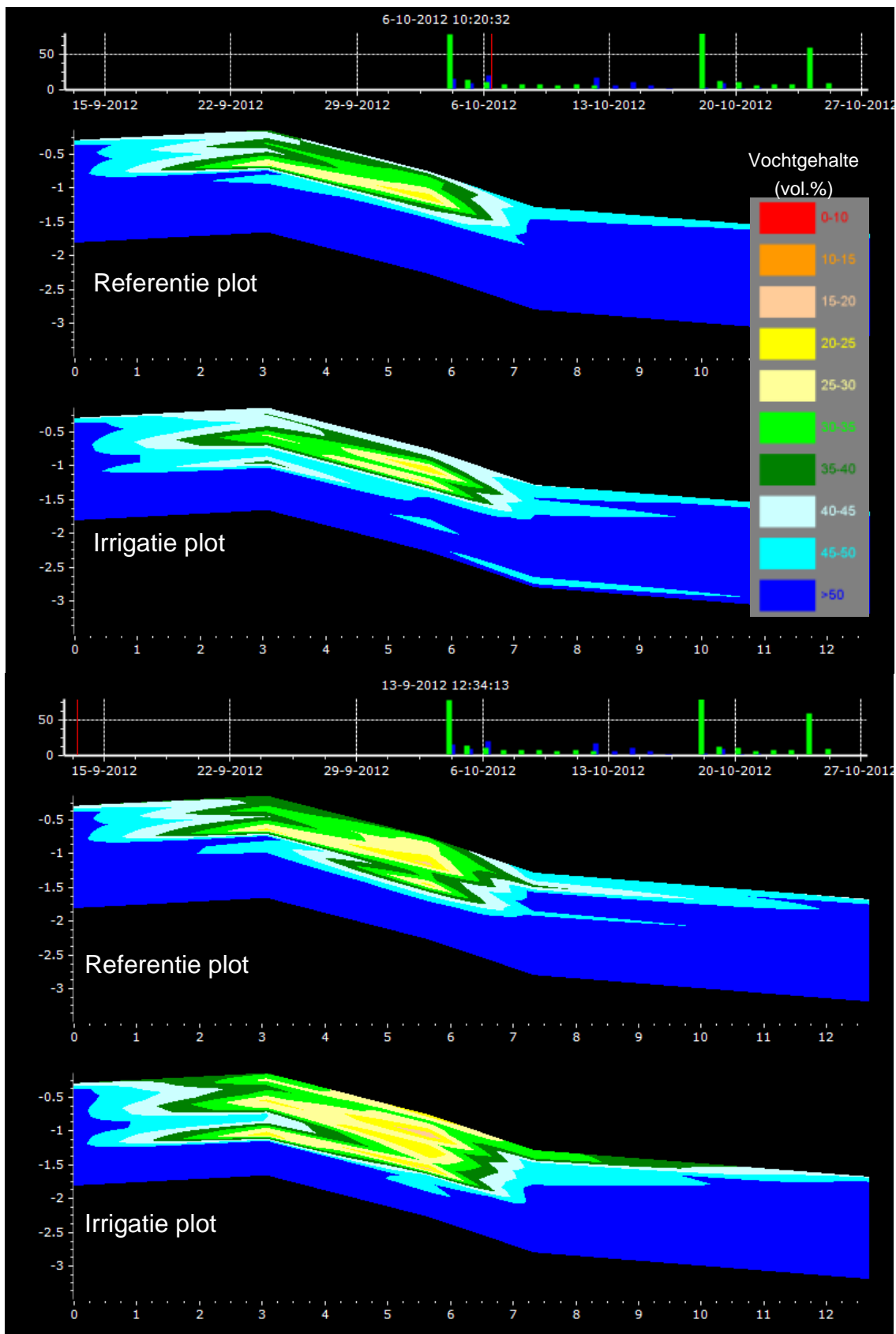


Figuur 8. Hoeveelheden irrigatie- en regenwater (mm) en de grondwaterstanden gedurende de periode 24 – 27 oktober voor de referentie- en de irrigatieplot.

Conclusie: waarschijnlijk door wezenlijk andere opbouw tussen de referentie en de beregende plot is het verschil in reactie snelheid en niveau van het grondwater te verklaren. Het is dus ten eerste aan te bevelen de opbouw van de referentie plot nader te beschouwen en te bezien waarom de grondwaterstanden op dit dijkvak zoveel sneller reageren op regenval en irrigatie toedieningen dan het geïrrigeerde deel van de dijk.

### 3.1.3 Vochtgehalten

Op regelmatige tijdstippen zijn de vochtgehalten in de kade gemeten. In zowel de referentie als de beregende plot waren drie mantelbuizen geplaatst. Met behulp van een sensor kon het vochtgehalte worden gemeten tot een diepte van 160 cm beneden



Figuur 9. Dwarsdoorsnedes van het vochtgehalte in de kade op 13 September en 6 Oktober 2012.

maaiveld. Met behulp van een visualisatie applicatie konden contour diagrammen worden gemaakt (Wesseling e.a., 2013). Om op een bepaald tijdstip het vochtgehalte in de gehele dijk te visualiseren waren gegevens nodig van de grenzen van de randen van het dwarsprofiel. Hiervoor zijn aannames gedaan en wel dat nabij de boezem en sloot het profiel nagenoeg verzadigd was, met uitzondering van de bovenste laag. Hierdoor werd het mogelijk een interpolatie uit te voeren voor het profiel tot 160 cm diepte. Twee van deze doorsnedes staan in Figuur 9. Hierin is te zien dat de referentie plot veelal natter is dan de irrigatie plot. De bovenlaag van de beregeningsplot is echter wel natter na berekening. Dit is het geval vanaf de start van het experiment. De grootste toenames in vochtgehalten worden gemeten na de grote giften van 4 oktober en 18 oktober. In Tabel 3 staan de gemiddelde vochtgehalten van het profiel tot 160 cm diepte weergegeven. Na berekening in de aanlooperperiode van 13 September tot 4 oktober zijn de kruin en het talud aanzienlijk natter geworden, resp. 4.1 en 6.5 vol.%. Bij de teen, die al vrij nat was, is in deze periode een toename te zien van 0.9 vol.%. Gemiddeld is de toename 5.3 vol.%. Een toename van 5 vol.% over een diepte van 160 cm komt overeen met 80 mm water. De grote irrigatiegiften op 4 en 18 oktober leidden tot gemiddelde toenames van in het profiel van respectievelijk 26.8 en 40 mm. De netto berekening (toediening-oppervlakkige afvoer, tabel 2) bedroeg hier 85.8 mm op 4 oktober en 64.6 mm op 18 oktober. De afvoer naar poldersloot en/of grondwater door het profiel bedroeg derhalve 59.0 en 24.6 mm

*Tabel 3. Gemiddelde vochtgehalten (vol.%) over 160 cm diepte op verschillende plaatsen en tijdstippen in de kade.*

Datum	Vochtgehalte (vol.%)				Toename (mm)	Netto gift (mm)	Afvoer (mm)
	Kruin	Talud	Teen	Gem.			
13 Sep	40.0	35.5	49.7	40.3			
4 Okt	44.1	42.0	50.6	45.6			
5 Okt	45.8	43.6	51.3	46.9	26.8	85.8	59.0
18 Okt	43.5	41.2	49.5	44.7			
19 Okt	46.5	43.5	51.6	47.2	40.0	64.6	24.6

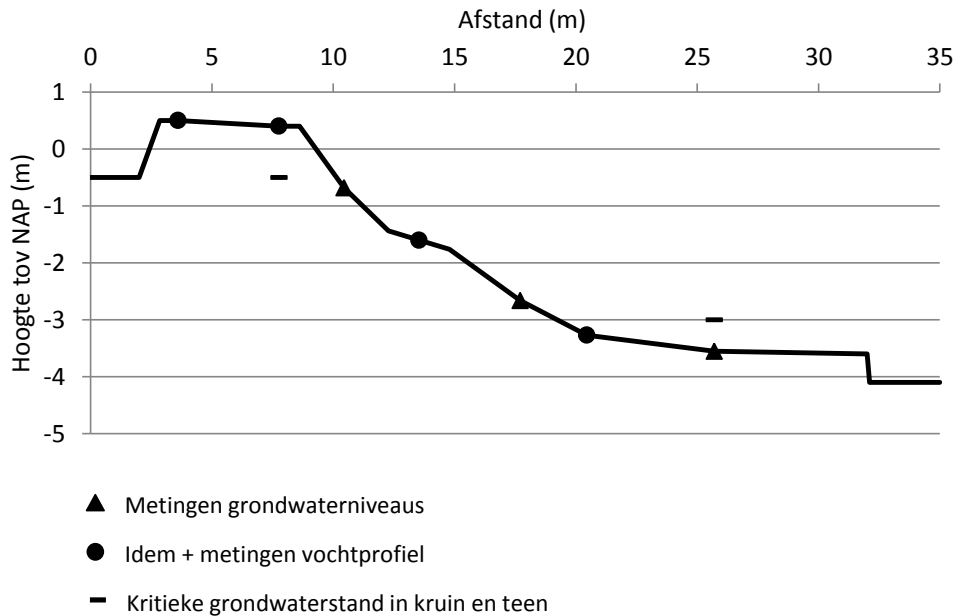
## 3.2 Zuiderringdijk

### 3.2.1 Berekening, Oppervlakkige afvoer en Neerslag

In Figuur 10 is een dwarsdoorsnede gegeven van de Zuiderringdijk met hierin aangegeven waar de grondwaterstandsbuizen en de mantelbuizen voor het meten van de vochtgehalten zich bevinden. Deze buizen waren in twee raaien geplaatst, 1 raai in het irrigatie gedeelte en 1 raai in een gedeelte dat niet werd beregend. De top van de kade ligt op 0.5 m+NAP. Het laagste punt van deze kade is -3.55 m t.o.v. NAP, zodat het verhang ruim 4 m is.

Op deze kade is gebruik gemaakt van 6 sproeiers om een oppervlak van 488 m<sup>2</sup> te beregenen. Hier is ook eerst begonnen met het zoeken naar de juiste intensiteit op de manier zoals beschreven bij het Oudelandsdijkje. Op de Zuiderringdijk is begonnen met een kwartier beregenen, vervolgens een kwartier niet beregenen, enz. Dit leidde tot een intensiteit die lag tussen de 3.9 en 4 mm/uur. Dit genereerde oppervlakkige afvoer waardoor werd besloten de intensiteit verder terug te brengen naar 3.6 tot 3.7 mm/uur. Dit werd bereikt door steeds 9 minuten te beregenen en vervolgens 11 minuten te stoppen. Bij 24 uur beregenen en een intensiteit van 3.6 mm/uur kon maximaal 86 mm op de kade worden gegeven. Indien de sproeiers zouden vervuilen kon deze capaciteit nog verder

teruglopen. Hierdoor werd het niet wenselijk geacht de intensiteit verder terug te brengen. Vanaf 5 november is begonnen met de beregeningsgift van 79 mm (werd uiteindelijk 81.5 mm) en vervolgens zijn op de navolgende dagen de hoeveelheden toegediend zoals die vermeld staan in Tabel 4.



Figuur 10. Dwarsdoorsnede zuiderringdijk met hierin aangegeven de plaatsen van de buizen voor het meten van grondwaterstanden en vochtgehalten.

Tabel 4. Hoeveelheden beregening, oppervlakkige afvoer en neerslag in mm gedurende de periode 1 november – 16 november.

	Datum	Irrigatie (mm)	Neerslag (mm)	Totaal (mm)	Oppervlakkige afvoer (mm)
Geen beregening	1-11-2012	0	3.9	3.9	-
	2-11-2012	0	0.6	0.6	-
	3-11-2012	0	6.9	6.9	-
	4-11-2012	0	16.4	16.4	-
	5-11-2012	0	1.7	1.7	-
	6-11-2012	0	7.6	7.6	-
Periode van 9 dagen beregening	7-11-2012	81.5	0.2	81.7	95.9
	8-11-2012	13.6	0	13.6	11.9
	9-11-2012	10.6	0	10.6	9.2
	10-11-2012	7.5	4	11.5	6.4
	11-11-2012	7.5	2.2	9.7	6.4
	12-11-2012	7.4	0.2	7.6	6.4
	13-11-2012	6.2	0.2	6.4	2.3
	14-11-2012	6.1	0	6.1	1.2
	15-11-2012	6.2	0	6.2	0.5
	16-11-2012	0.0	0	0.0	-

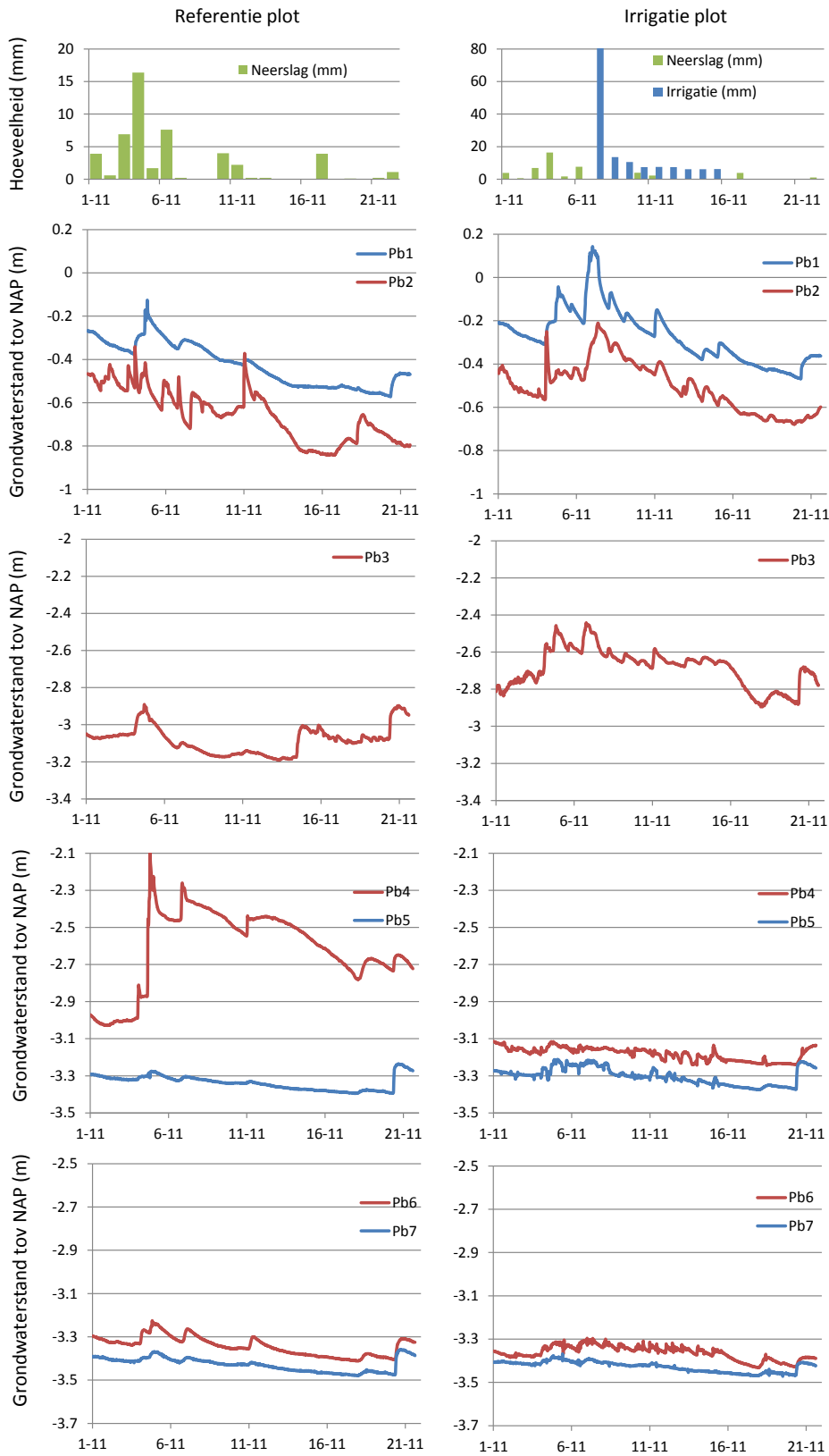
In de aanloopperiode naar de eerste grote irrigatiegift was er al bijna 30 mm aan natuurlijke neerslag gevallen. De kade was al vrij vochtig vanaf het moment dat de apparatuur werd geïnstalleerd waardoor de bovenlaag versmeerd raakte. De plek voor de oppervlakkige afvoer meting was echter niet verstoord. (Figuur 11). De eerste irrigatiegift werd op 6 november gestart om 10:30 uur en duurde tot 7 november 8:30 uur. De volgende irrigatiegiftten werden in de nacht gegeven en startten om 00:00 uur, zodat passanten op het fietspad er weinig tot geen hinder van zouden ondervinden. Opmerkelijk is dat de oppervlakkige afvoer hoger is dan de toegediende hoeveelheid water. Dit zou kunnen duiden op uittredend water en op afstroming door de bovenste centimeters van het profiel. Ook bij de latere irrigatiegiftten wordt een grote hoeveelheid als oppervlakkige afvoer gemeten. Vanaf de oppervlakkige afvoer meter is een afvoergreppel gegraven naar de poldersloot. Hierin werden kwelvliesjes gevonden hetgeen zou kunnen duiden op uittredend bodemwater.



*Figuur 11. Opname van de proeflocatie van de Zuiderringdijk met rechts het oppervlak waarvan de oppervlakkige afvoer wordt gemeten.*

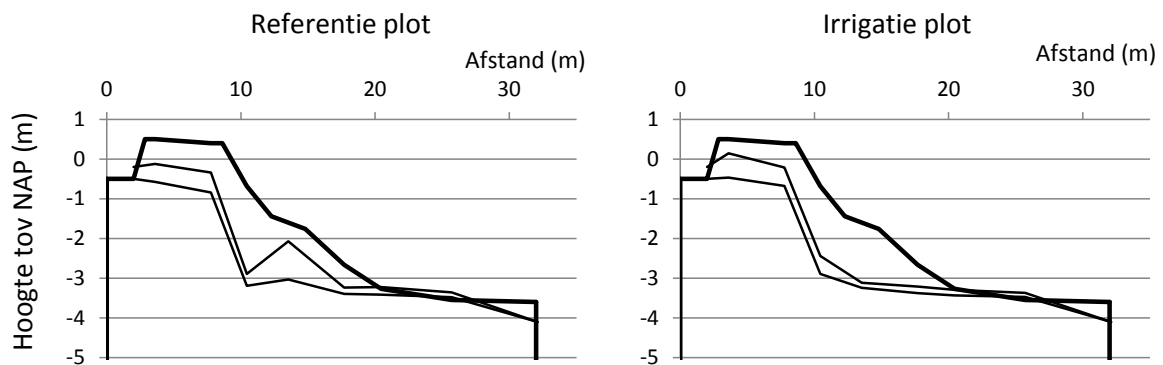
### **3.2.2 Grondwaterstanden**

In Figuur 12 zijn de grondwaterstanden in de kade weergegeven die zijn gemeten gedurende de periode 1 – 22 november. Bovenaan de figuur staan de gemeten neerslag en de toegediende irrigatiehoeveelheden. Voor zowel de referentie raai als de irrigatie raai zijn de gegevens van 7 grondwaterstandsbuizen beschikbaar. Peilbuis 1 (Pb1) staat het dichtst bij de boezemvaart en peilbuis 7 (Pb7) staat het dichtst bij de poldersloot. Zie Figuur 10 voor de exacte locaties van de peilbuizen. In Figuur 12 valt het op dat de



Figuur 12. Hoeveelheden irrigatie- en regenwater en de grondwaterstanden gedurende de periode 1 - 22 november voor de referentie- en de irrigatieplot.

peilbuizen 1 en 2 vrij vlot reageren op neerslag, evenals peilbuis 3 van de irrigatieplot en peilbuis 4 van de referentieplot. Bij peilbuis 4 van de irrigatieplot is de reactie zelfs vrij heftig. Waardoor deze heftige reactie wordt veroorzaakt is onbekend. Onderaan de kade (Pb6 en Pb7) staat het grondwater nagenoeg aan maaiveld, terwijl het niveau van het water in de poldersloot op ruim 0.5 m beneden maaiveld staat. Dit duidt erop dat er kweldruk vanuit de boezem aanwezig is. Volgens Bouwman (2012) moet in de gaten worden gehouden of zich een situatie zou voordoen waarbij het peil in de binnenkruin boven NAP -0.5 m zou voordoen en waarbij het peil in de teen van deze kade boven NAP -3m zou voordoen. Echter, de teen van deze kade ligt op NAP -3.55 waardoor deze situatie niet snel voor zou komen. Het peil in de binnenkruin (Pb2) is wel geruime tijd boven NAP -0.5 m geweest, echter het peil in de teen van de kade bleef beneden de NAP -3 m. Op 20 november is het peil in de boezem met 20-25 cm verhoogd. Het effect hiervan, een verhoogde grondwaterstand, laat zich zien in alle peilbuizen (Figuur 12). In Figuur 13 is het laagste en hoogste gemeten freatisch vlak weergegeven. Bij het beregende gedeelte was de maximale fluctuatie 60 cm, gemeten in de buitenkruinkruin (Pb1). In het referentie gedeelte was de maximale fluctuatie 96 cm, gemeten in Pb4.



Figuur 13. Laagste en hoogste gemeten freatisch vlak in de kade van de Zuiderringdijk.

### 3.2.3 Vochtgehalten

Op een 4-tal tijdstippen zijn er vochtgehalten in twee raaien in de kade gemeten. De mantelbuizen waarin werd gemeten waren geplaatst bij de binnen- en buiten kruin en bij de eerste teen en de tweede teen (Fig. 10). In Tabel 5 staan de gemiddelde vochtgehalten weergegeven per datum over dieptes tot 160 cm beneden maaiveld.

Tabel 5. Gemiddelde vochtgehalten (vol.%) in de kade van de Zuiderringdijk gemeten op 4 verschillende tijdstippen en op 4 verschillende plekken in de referentie en de irrigatieplot voor dieptes van 0-160 cm.

Datum	Vochtgehalte referentie plot (vol.%)				Vochtgehalte irrigatie plot (vol.%)			
	Buiten kruin	Binnen kruin	Teen 1	Teen 2	Buiten kruin	Binnen kruin	Teen 1	Teen 2
6-11-2012	43.3	42.2	50.0	50.6	43.7	43.1	51.2	51.9
7-11-2012	42.8	42.6	49.7	50.4	44.2	43.4	51.5	51.0
12-11-2012	41.2	41.8	49.5	49.6	43.5	43.3	50.5	51.8
15-11-2012	39.5	41.1	48.8	47.7	42.6	42.3	49.7	50.1

Van 6 tot 7 november is er een irrigatiegift toegediend van ruim 81 mm. De irrigatie plot laat dan een kleine toename zien in het vochtgehalte. Op de kruin zijn deze toenames 0.5 en 0.3 vol.% en er is een toename van 0.3 vol% bij teen1, terwijl teen2 een afname laat zien van 0.9 vol.%. Gemiddeld is de toename 0.06 vol.%. Over een diepte van 160 cm is komt dit overeen met bijna 1 mm water. Dit verklaart de grote hoeveelheid oppervlakkige afvoer die tijdens deze beregeningsgift is opgetreden. Het referentiegedeelte laat een totaal gemiddelde afname zien van 0.15 vol.%, hetgeen erop duidt dat ook hier water afstroomt richting poldersloot. Op 12 en 15 november neemt het vochtgehalte verder af ondanks de irrigatiegiften die worden toegediend.



# 4 Modelsimulaties

## 4.1 Uitgangspunten

Om het verloop van de grondwater tijdens de beregeningsperiodes na te bootsen is gebruik gemaakt van het twee-dimensionale grondwaterstromingsmodel Hydrus-2d (Šejna et al., 2011; Šimůnek et al., 2011) . Dit model kan de stromingsvergelijkingen van water, opgeloste stoffen en warmte in de bodem numeriek oplossen met behulp van de Eindige Elementen Methode. Het kan een groot aantal randvoorwaarden aan die bovendien in de tijd kunnen variëren. In dit hoofdstuk zal de gebruikte schematisatie van het systeem worden besproken, evenals de gebruikte bodemfysische parameters en de verkregen resultaten.

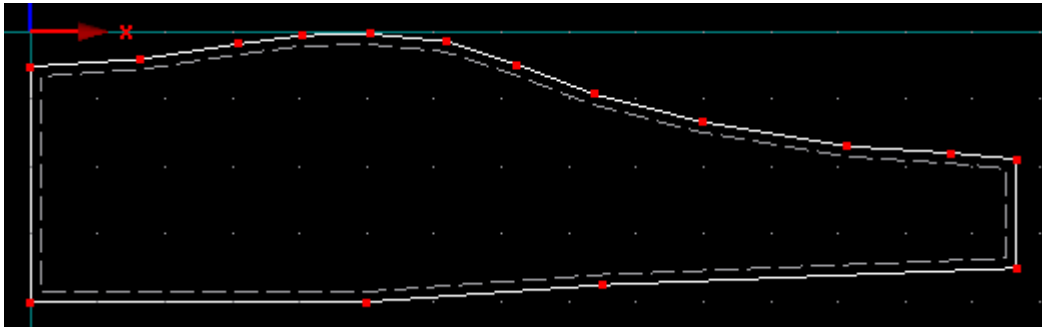
## 4.2 Opzet berekeningen

### 4.2.1 De simulatieperiode

Zoals in de voorgaande hoofdstukken is beschreven, begint de periode met berekening op 04-10-2012 en is de laatste beregeningsgift op 12-10-2012 gegeven. Daarom is ervoor gekozen om ook deze periode te simuleren. Hydrus-2D werkt met een relatieve tijd, d.w.z. er wordt gerekend met de tijd ten opzichte van het begin van de simulatieperiode. Voor dit project is ervan uitgegaan dat we met uren rekenen. Om een initieel vochtgehalte in de dijk te krijgen dat enigszins overeenkomt met de (natte) toestand van de dijk bij het begin van de berekening, is besloten om, voorgaand aan de werkelijke beregeningsperiode, een aantal dagen met een continue neerslag door te rekenen. Derhalve beginnen de berekeningen op 01-10-2012 00:00:00 (uur 0). Vanaf 04-10-2012 12:00:00 (uur 84) wordt dan de werkelijke berekening in het model ingevoerd en er wordt gerekend tot 13-10-2012 00:00:00 (uur 288).

### 4.2.2 Schematisatie van het proefveld

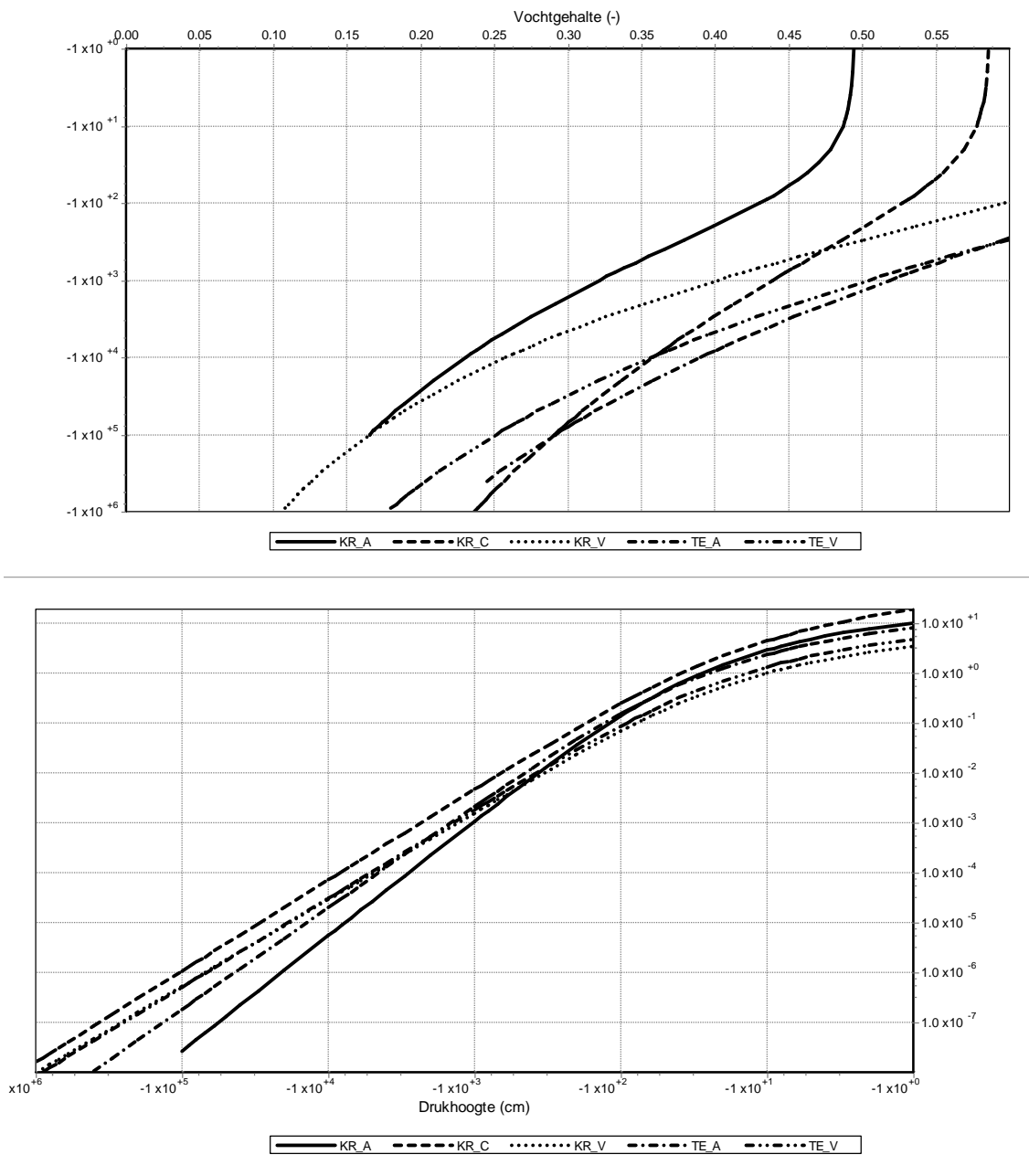
Hoewel grondwaterstroming in werkelijkheid een 3-dimensionaal proces is, is er toch voor gekozen om in dit geval met een 2-dimensionaal model te rekenen. De voornaamste reden hiervoor is het gebrek aan beschikbare gegevens in drie dimensies. Ook de benodigde rekencapaciteit en de interpretatiemogelijkheden van de uitvoer hebben bij deze besluitvorming een rol gespeeld, evenals de beschikbaarheid van het numerieke model. Bij de simulaties zijn we ervan uitgegaan dat we rekenen voor een dwarsdoorsnede van de dijk die precies in het midden van het beregende dijksegment ligt. De kruin van de dijk ligt op 5 cm beneden NAP. Aan de linkerzijde bevindt zich de boezem. Hier ligt de onderzijde van de dijk op een kleilaag die zich op 400 cm –NAP bevindt en ligt het maaiveld op 52 cm -NAP. Aan de rechterzijde van het door te rekenen dijksegment bevindt zich de poldersloot. Hier ligt de kleilaag op 350 cm –NAP, het maaiveld ligt op 189 cm – NAP. De breedte van het doorgerekende dijksegment is 1465 cm. Zie Figuur 14.



*Figuur 14. Een schematische weergave van het doorgeredende dijksegment. De breedte is 14.65m, de onderzijde ligt op 4 m – NAP.*

#### **4.2.3 De bodemfysische eigenschappen**

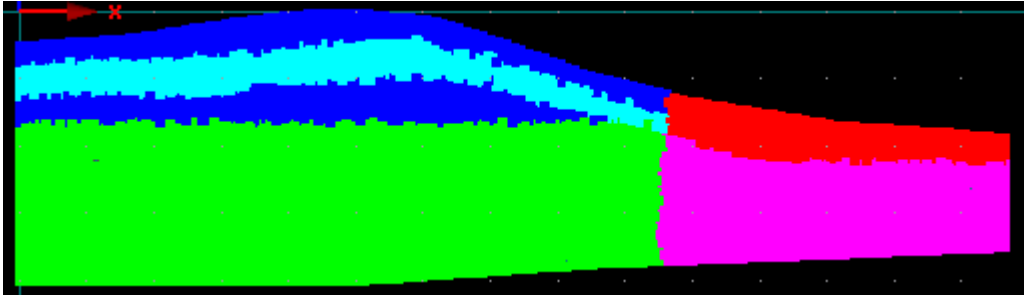
Om het verloop van het grondwater te kunnen berekenen moeten een aantal relaties bekend zijn. De voornaamste zijn die tussen het vochtgehalte en de matrixpotentiaal (de zogenaamde waterretentiekarakteristiek of pF-curve) en die tussen de matrixpotentiaal en de (onverzadigde) doorlatendheid. Deze relaties zijn nodig om het potentiaalverloop en dus de grondwaterstroming in de onverzadigde zone (boven het grondwater) te kunnen berekenen. De hier genoemde relaties variëren sterk van grondsoort tot grondsoort. Ook zullen zij variëren van plek tot plek omdat de bodem niet homogeen is. In eerste instantie is een ervaren bodemkarterder van Alterra naar de dijk geweest. Deze vond een tamelijk grote heterogeniteit (Willy de Groot, 2012, pers. com.). Er is op twee plaatsen een profielbeschrijving gemaakt: een in de kruin van de dijk en een in de teen. De kruin bovenste 120 cm van de kruin is opgebouwd uit klei. Vooral in de laag tussen 50 en 80 cm bevindt zich veel puin. De teen van de dijk heeft een toplaag van 70 cm klei, waarbij tussen 15 en 50 cm enig puin voorkomt. Het veen begint daar op 70 cm beneden maaiveld. Er zijn een aantal bodemmonsters genomen: 2 voor het bepalen van de verzadigde doorlatendheid en 5 bodemmonsters voor het bepalen van de retentiekarakteristieken en doorlatendheidscurves. Voor de bepaling van de verzadigde doorlatendheid van de bovengrond zijn een monster uit de kruin en een uit de teen van de dijk genomen. In het laboratorium bleek al dat er veel wormgangen voorkwamen in de monsters, hetgeen mede oorzaak is van hoge waarden van de verzadigde doorlatendheid, n.l. 1925 cm/d voor het monster uit de kruin en 568 cm/d voor het monster uit de teen. De 5 bodemmonsters voor het bepalen van de eerder genoemde bodemfysische eigenschappen zijn genomen op verschillende plaatsen en dieptes. Drie monsters kwamen uit de kruin, Zowel KR-A als KR-C zijn over een diepte van 3-11 cm gestoken in de kleilaag. Het veenmonster (KR-V) is gestoken op 170-178 cm beneden maaiveld. In de teen is monster TE-A op 3-11 cm gestoken terwijl het veenmonster (TE-V) op 50-58 cm beneden maaiveld is weggehaald. Van deze 5 bodemmonsters zijn in het Bodemfysisch Laboratorium van Alterra de eerder genoemde bodemfysische eigenschappen bepaald. Deze zijn weergegeven in Figuur 15. Uit de figuren komt duidelijk naar voren dat de grootste verschillen zitten in de waterretentiekarakteristieken. Bij de doorlatendheidscurves zit vrij weinig verschil tussen de verschillende monsters. Het is voornamelijk de hoogte van de curve (bepaald door de verzadigde doorlatendheid) die verschilt. De helling van de doorlatendheidscurves verschilt weinig.



*Figuur 15. De toegepaste waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken.*

Bij de schematisatie van de dijk is uitgegaan van een bodemopbouw zoals weergegeven in Figuur 16. Volgens de beschrijving van het waterschap ligt de onderzijde van het doorgerekende profiel aan de linkerzijde (boezem) op -4 m, aan de rechterzijde (poldersloot) op -3.5 m. De afstand tussen boezem en poldersloot is 14.65 m. Bij het opzetten van het door te rekenen dijksegment moet ook worden aangegeven uit welke materialen de dijk bestaat. In de hier beschreven simulaties is, wat betreft de bodemfysica, onderscheid gemaakt tussen de kruin van de dijk en de teen, Hierbij is gebruik gemaakt van de gemeten parameters die hierboven zijn beschreven. De kruin van de dijk bestaat uit drie lagen, waarvan 2 lagen klei zijn en de onderste laag uit veen bestaat. In de teen

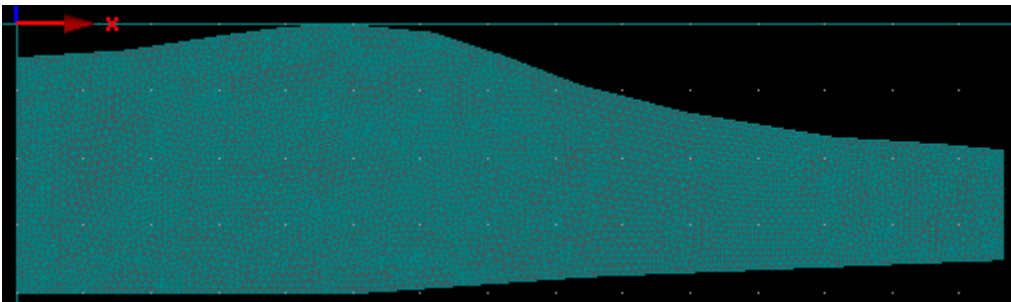
van de dijk bevindt zich slechts één laag klei op het veenpakket. Er is gerekend met een anisotropie-factor van 2, d.w.z. dat de horizontale doorlatendheid 2 x zo groot is als de verticale.



*Figuur 16. Een schematische weergave van de toegepaste bodemmaterialen. Hiervoor zijn de bodemfysische eigenschappen van de genomen monsters gebruikt: KR-A (donkerblauw), KR-C (lichtblauw), KR-V (groen), TE-A (rood) en TE-V (roze).*

#### **4.2.4 Eindige elementen opbouw**

Om de partiële differentiaalvergelijking op te lossen waarmee de grondwaterstroming wordt beschreven, wordt gebruik gemaakt van de Eindige Elementen methode. Hiertoe wordt het door te rekenen gebied door Hydrus-2D opgedeeld in een aantal elementen en knooppunten, in ons geval 8770 2-dimensionale en 278 1-dimensionale elementjes die worden gevormd door 4525 knooppunten. Zie Figuur 17.

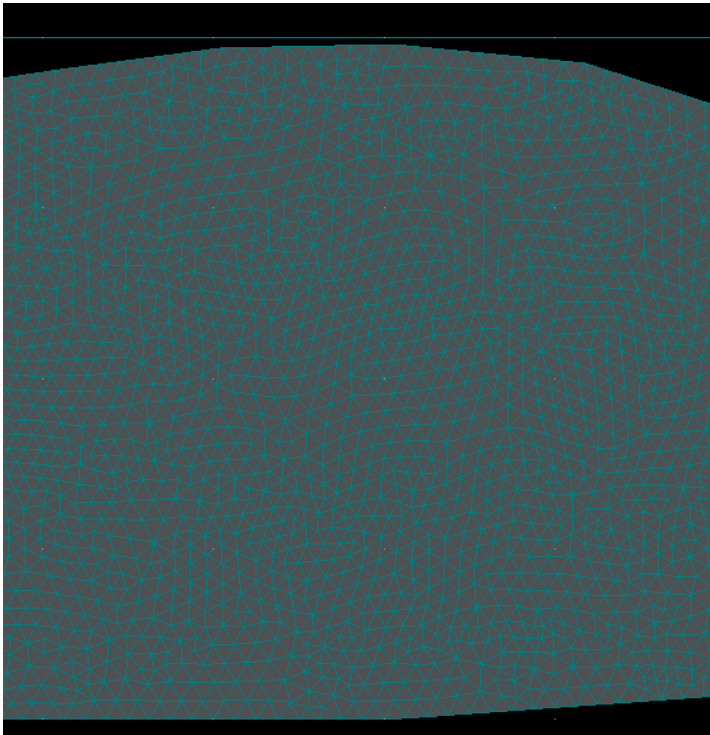


*Figuur 17. Het gegenereerde eindige elementen grid.*

Door de hoge dichtheid van elementen en knooppunten in de figuur zijn er weinig details zichtbaar. Daarom is ter illustratie in Figuur 18 een uitvergroting gegeven van het gedeelte van de dijk onder de top van de kruin.

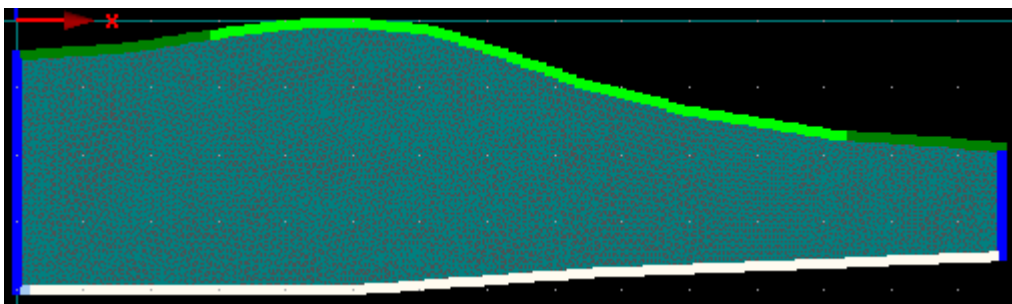
#### **4.2.5 De toegepaste randvoorwaarden**

Om het verloop van de grondwaterstand in de tijd te kunnen berekenen moet bekend zijn wat er aan de randen van het systeem gebeurt. Aan de linkerkant (boezem) is de drukhoogte gedurende de hele simulatie bekend, aangezien het waterpeil in de boezem op kwartier-basis is geregistreerd en deze als invoer kan worden gebruikt. Aan de rechterkant bevindt zich de sloot. Er is aangenomen dat het slootpeil gedurende de hele doorgerekende periode constant blijft op 20 cm – maaiveld. Aan de bovenkant van de dijk is de atmosferische randvoorwaarde aangenomen. Dat houdt in dat we een neerslag en/of verdamping kunnen opgeven die varieert in de tijd. Uit veldwaarnemingen is gebleken dat het grondwater aan de teen van de dijk tot boven het maaiveld kon komen.



*Figuur 18. De verdeling van de elementen onder de kruin van de dijk.*

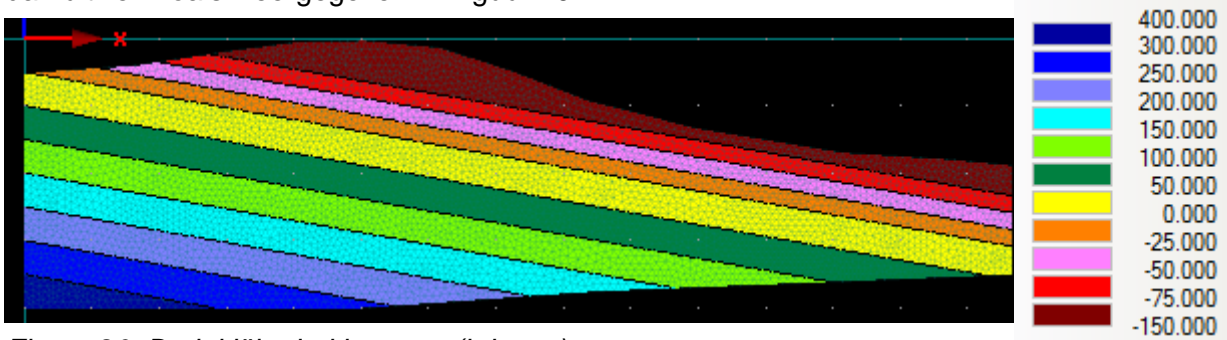
Daarom is voor het modelleren een zogenaamd kweloppervlak (seepage face) aangenomen, hetgeen inhoudt dat het programma zelf controleert of er verzadiging optreedt. Is dat niet het geval, dan zal de atmosferische randvoorwaarde worden toegepast, anders kan het water daar vrij naar buiten treden als de drukhoogte groot genoeg is. Aan de onderrand hebben we aangenomen dat er geen flux optreedt, aangezien hier een vrij dikke kleilaag ligt. Mogelijkerwijs treedt er in werkelijkheid enige kwel op, maar dat zal voor de huidige berekeningen niet van belang zijn. Aangezien de experimenten in Oktober zijn uitgevoerd, mag worden aangenomen dat de verdampingsflux te verwaarlozen is. De toegediende hoeveelheid berekening is nu ingevoerd als neerslag. Zie ook Figuur 19.



*Figuur 19. De toegepaste randvoorwaarden: blauw: drukhoogte gegeven; donkergroen: kweloppervlak, lichtgroen: atmosferische randvoorwaarde; wit: geen flux.*

#### 4.2.6 Initiële toestand

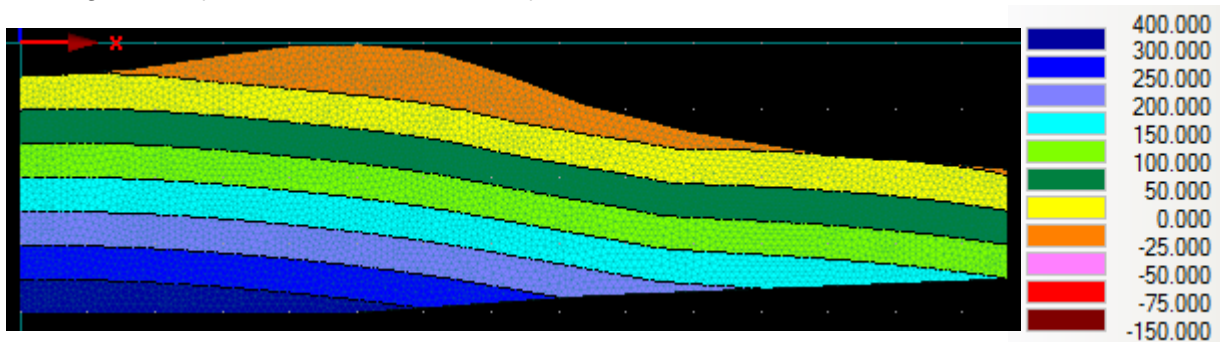
Het verloop van de drukhoogte in de tijd en voor elke locatie in de dijk kan alleen worden berekend als deze bekend is op het moment waarop de berekeningen beginnen (de initiële toestand). Voor de huidige berekeningen wordt uitgegaan van een evenwichtstoestand met het grondwater. Aangezien er mag worden verwacht dat de kant van de boezem, ook initieel, natter is dan de kant van de sloot, is ervoor gekozen om de initiële drukhoogte met een hoek van  $5^\circ$  te laten verlopen. De drukhoogteverdeling aan het begin van de run zal er dan uitzien zoals weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20. De initiële drukhoogtes ( $h$  in cm).

In dit contourplaatje is gekozen voor een kleurschakering die loopt van blauw (nat) naar rood (droog). De bij deze figuur horende legenda geldt voor alle volgende contourplaatjes. Het freatisch vlak ( $h=0$ ) bevindt zich op de grens tussen geel en oranje.

Om aan het begin van de berekening een realistische vochtverdeling in de dijk te krijgen wordt er eerst 84 uur doorgerekend met een constante neerslag van 0.2 mm/uur (=4.8 mm/dag). Na deze periode ziet het vochtprofiel er dan uit zoals weergegeven in Figuur 21. Op dit moment is het profiel aan de teen van de dijk al vrijwel verzadigd. Aangezien de potentiaal aan de linkerkant van het profiel hoger is dan aan de rechterkant, zal de stroming in de dijk van links naar rechts zijn.



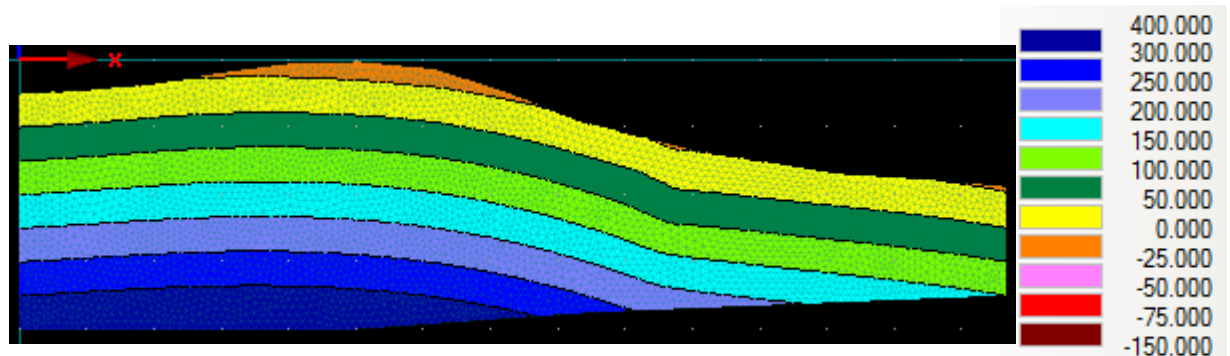
Figuur 21. De drukhoogteverdeling ( $h$  in cm) na 84 uur met een constante neerslag van 0.2 mm/uur.

### 4.3 Resultaten

De uitkomsten van berekeningen met Hydrus-2D bestaan uit drukhoogtes, vochtgehalten en stromingsvectoren voor ieder knooppunt. Het programma maakt hiervan contourdiagrammen en vectordiagrammen.

### 4.3.1 Drukhoogteprofielen

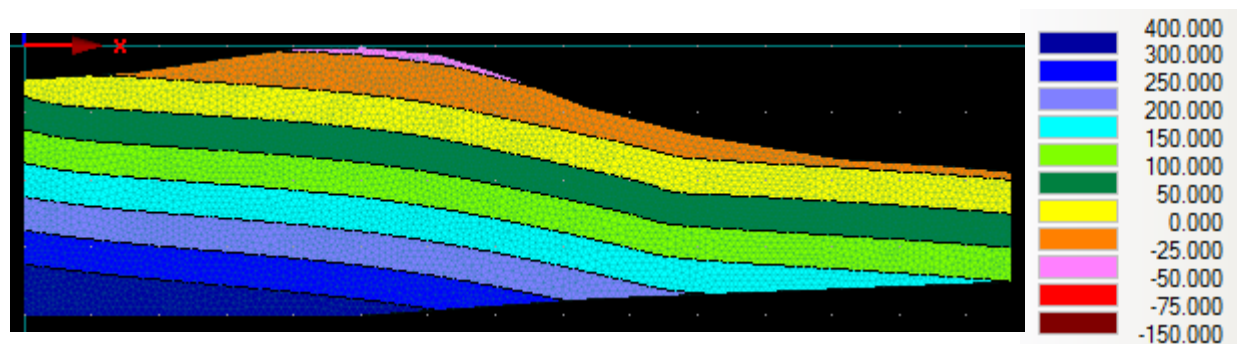
Door het direct achter elkaar laten zien van de drukhoogteprofielen wordt het verloop in de tijd goed zichtbaar. In dit rapport zullen ter illustratie slechts een paar verdelingen worden besproken. In Figuur 22 is de verdeling weergegeven na 10 uur intensief beregenen.



Figuur 22. Het drukhoogteprofiel ( $h$  in cm) na 10 uur intensief beregenen.

Vergelijken van de Figuren 21 en 22 toont aan dat er aan de teen van de dijk weinig verschil zit. Het profiel blijft vrijwel verzadigd. Onder de kruin is de grondwaterstand duidelijk gestegen, zelfs zoveel dat er een opbolling optreedt onder de kruin, waardoor het water zowel naar de boezem als naar de sloot zal stromen.

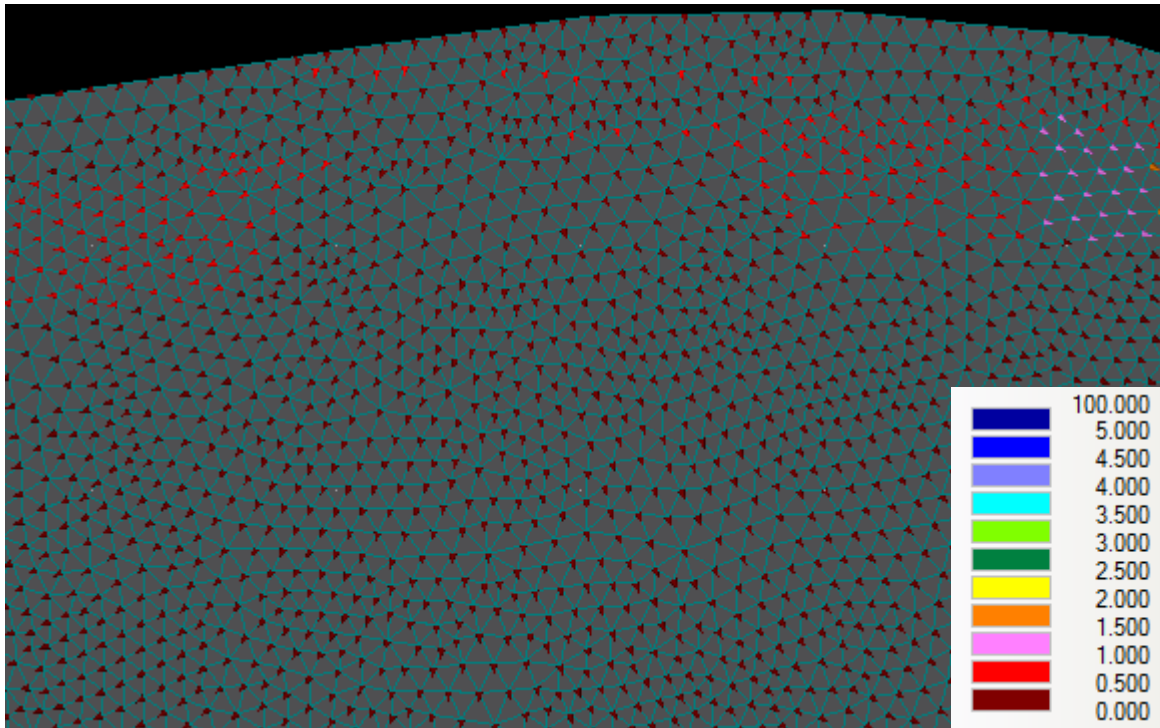
In Figuur 23 wordt het drukhoogteprofiel aan het einde van de simulatieperiode (uur 288, 13-10-2012 00:00:00) weergegeven. Aan de linkerzijde is het freatisch peil weer gezakt t.o.v. de vorige figuur. Omdat het peil in de boezem is opgezet, ligt het nu toch hoger dan initieel. In de teen staat er geen water meer aan maaiveld.



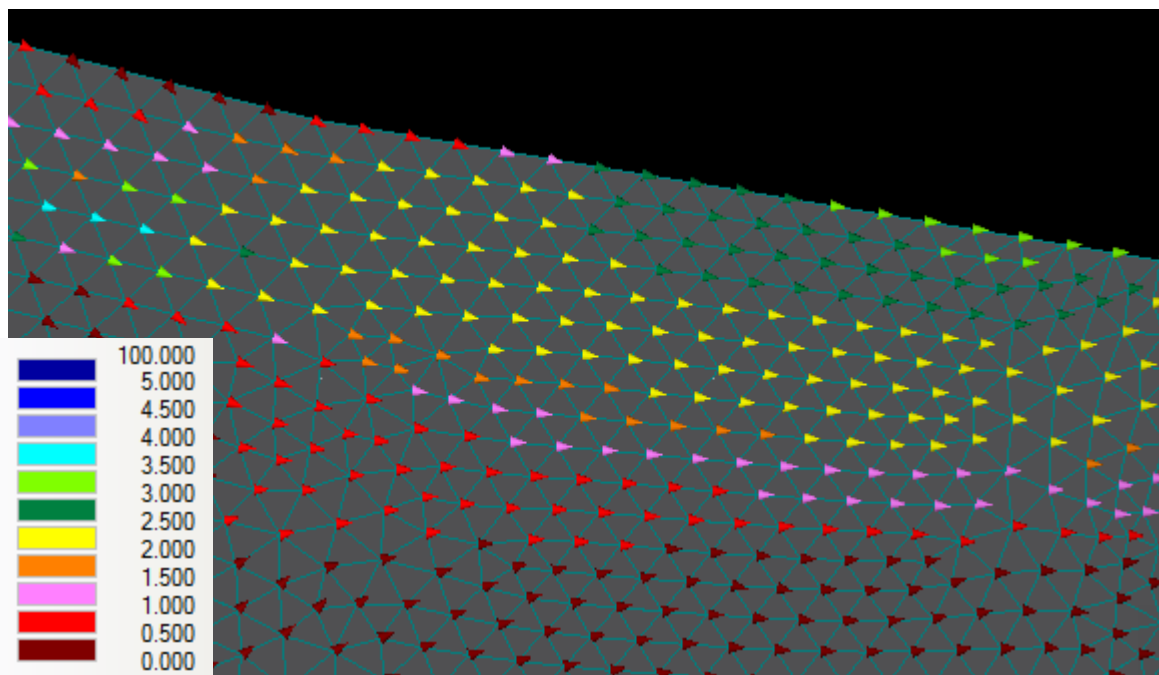
Figuur 23. Het drukhoogteprofiel ( $h$  in cm) aan het einde van de simulaties.

### 4.3.2 Stromingsvectoren

Om aan te geven hoe het grondwater stroomt in de bodem, geeft Hydrus-2D de stroming in elk knooppunt weer als een vector: de richting van de pijl geeft de stromingsrichting aan, de kleur van de pijl geeft de stromingsdichtheid aan. Na 10 uur intensief beregenen ziet de stroming onder de kruin eruit zoals weergegeven in Figuur 24. Hierop is duidelijk te zien dat de neerslag direct onder het oppervlak eerst verticaal naar beneden stroomt. Daarna verandert de stromingsrichting al snel naar horizontaal. Aan de linkerkant van de kruin stroomt het water naar de boezem, aan de rechterkant naar de poldersloot. Dit is in overeenstemming met de eerder besproken drukhoogteprofielen. In de figuur geeft de richting van de pijl de stromingsrichting aan, de kleur geeft de stromingsdichtheid (cm/uur) aan.



*Figuur 24 De stromingsrichting en -dichtheid (cm/uur) onder de kruin na 10 uur intensief beregenen.*



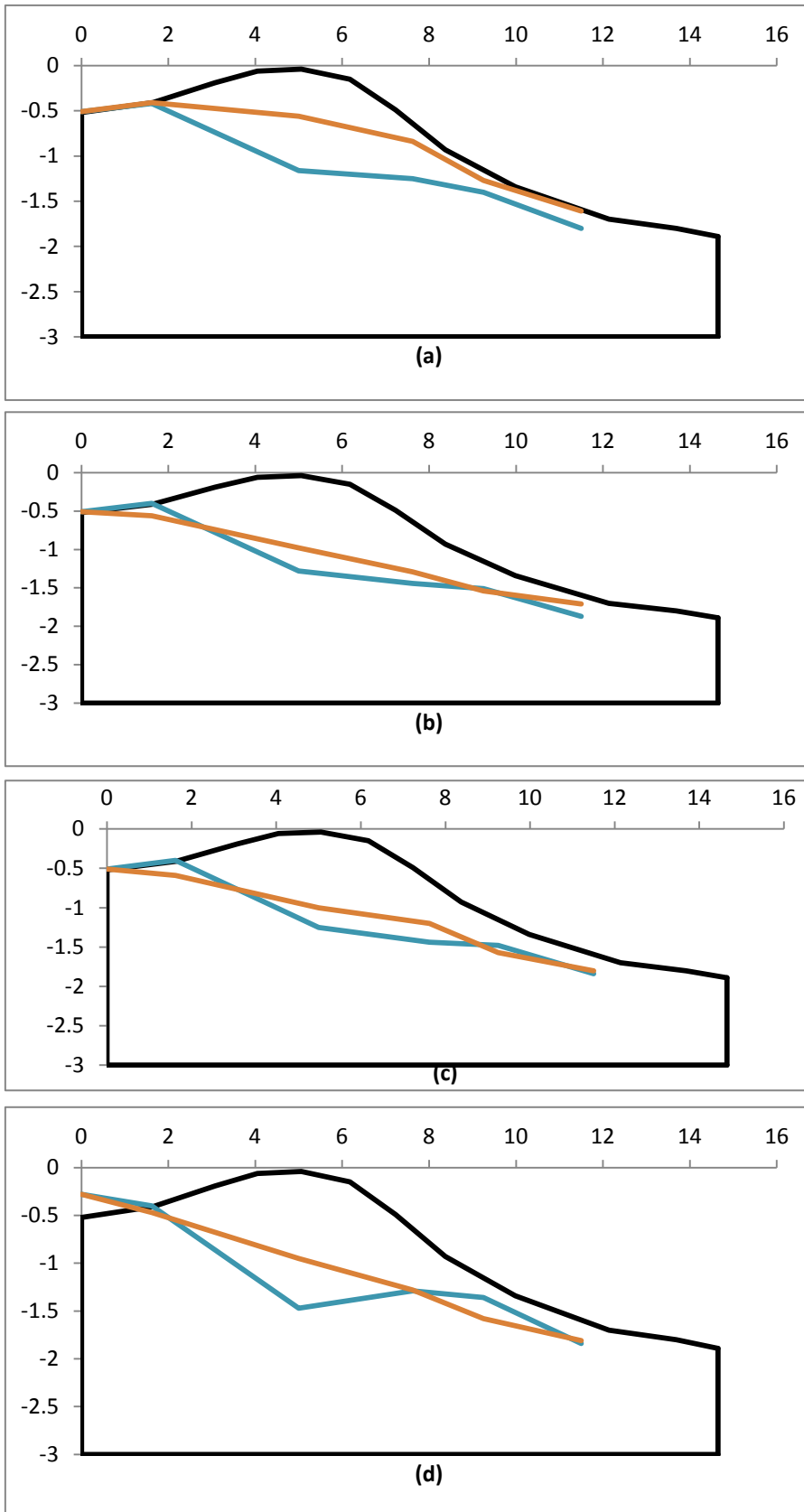
*Figuur 25. De stromingsrichting en -dichtheid (cm/uur) onder de teen van de dijk na 10 uur intensief beregenen.*



Kijken we nu naar de teen van de dijk, dan is duidelijk dat de stromingsdichtheid hier toeneemt. De hoogste waarden komen voor vlak onder het maaiveld. Hier is de stroming horizontaal, hetgeen inhoudt dat er water door het kweloppervlak naar buiten zal komen en er hier geen neerslag meer infiltreert.

#### **4.4 Gemeten en berekende grondwaterstanden.**

Om het verloop van de grondwaterstand in de tijd te kunnen volgen zijn er een aantal "observatiepunten" gedefinieerd. Dit zijn knooppunten waarvan de drukhoogte en het vochtgehalte apart kunnen worden beschouwd. Deze punten zijn op vrijwel dezelfde afstanden van de boezem genomen als de peilbuizen. Aangezien het model ervan uitgaat dat het water niet samendrukbaar is, is de positie van het freatisch vlak op deze x-positie gelijk aan de som van de potentiaal en de z-waarde van het knooppunt. Op deze wijze kan op eenvoudige wijze het verloop van de grondwaterstand worden gevolgd. In Figuur 26 zijn de gemeten en berekende grondwaterstanden weergegeven voor vier willekeurige tijdstippen. Op 05-10-2012 02:00:00 (Figuur 26a) ligt de berekende grondwaterstand hoger dan de gemeten. Het grootste verschil treedt op onder de kruin, terwijl het verschil steeds kleiner wordt in de richting van de teen. Op 08-10-2012 12:00:00 (Figuur 26b) is te zien dat bij de berekeningen het grondwater tussen kruin en boezem alweer is gedaald. Het gemeten grondwaterpeil ligt dan nog een aanzienlijk stuk boven het boezempeil. Onder de kruin staat het gemeten grondwater nog lager dan het berekende, in de richting van de teen wordt dit omgekeerd. Op 09-10-2012 22:00:00 (Figuur 26c) ligt het gemeten grondwaterpeil bij de boezem nog steeds hoger dan de berekende waarde. Onder de kruin is het verschil kleiner geworden. Naar de teen toe verloopt de berekende grondwaterstand vrijwel identiek aan de gemeten. Op 12-10-2012 08:00:00 (Figuur 26d) zijn de berekende en gemeten waarden bij de boezem vrijwel hetzelfde. Midden onder de kruin ligt het gemeten peil heel laag, zelfs lager dan het peil in de richting van de poldersloot. Op dit tijdstip vertoont de gemeten grondwaterstand een grillig verloop, terwijl de berekende grondwaterstand geleidelijker verloopt.



Figuur 26. De berekende en gemeten grondwaterstanden in de peilbuizen onder het Oudelandsdijkje op vier willekeurige tijdstippen: 05-10-2012 02:00:00 (a), 08-10-2012 12:00:00 (b), 09-10-2012 22:00:00 (c) en 12-10-2012 08:00:00 (d). De berekende waarde is rood-bruin weergegeven, de gemeten waarde is blauw.



# 5 Conclusies

## 5.1 Algemeen

Bij het vergelijken van de grondwaterstanden die in de kruin van het Oudelandsdijkje zijn gemeten, valt vooral het verschil op tussen de referentie en de irrigatieplot. In de irrigatieplot ligt het grondwaterniveau gemiddeld 40-50 cm lager dan in de referentieplot. Grote veranderingen in grondwaterstanden werden niet gemeten op het beregende deel van de dijk. Wel reageerde de grondwaterstand op een peilverhoging van de boezem. Verrassend was dat een irrigatiegift, van een hoeveelheid water die 1 keer per 100 jaar optreedt, op het irrigatiegedeelte niet tot complicaties leidde, maar toegediend op het referentiegedeelte wel de nodige alertheid van de onderzoekers en dijkbeheerders vroeg. Hier werd de beregening dan ook stopgezet. De kade reageerde dus van plek tot plek zeer verschillend. De oppervlakkige afvoer bedroeg niet meer dan 20% van de hoeveelheid beregning en neerslag.

De kade van de Zuiderringdijk kent een veel groter verhang. Hier leidde de grote irrigatiehoeveelheden tot een oppervlakkige afvoer van 80 tot 100%. De reactie van het grondwater was groter. In de binnenkruin werden er grondwaterstanden gemeten die gedurende langere tijd het vooraf genoemde criterium van -0.5 m +NAP te boven gingen. Echter, de grenswaarde van NAP -3.0 m in de teen van de dijk, welke ruim 50 cm boven maaiveld ligt, werd niet bereikt.

## 5.2 Modelleren

- Een model als Hydrus-2D kan worden toegepast voor het bepalen van de effecten grote hoeveelheden neerslag/beregning op dijken.
- Om betrouwbare modeluitkomsten te genereren is een grondige kennis van de opbouw van de dijk vereist, zowel wat horizontale en verticale gelaagdheid en bodemfysica betreft.
- Om een numeriek model goed te kunnen kalibreren zijn betrouwbare gemeten grondwaterstanden essentieel. Ook is bij het vergelijken van de gemeten en berekende grondwaterstanden is ervanuit gegaan dat het filter van de meetbuis niet onder een ondoorlatende laag zit.
- Er is bij het modelleren van de grondwaterstroming geen rekening gehouden met het 3-dimensionale karakter van de grondwaterstroming.

## 6 Referenties

- Bouwman B.**, 2012. Stabiliteits-analyse Oudelandsdijkje ten behoeve van risicobeheersing (calamiteitenplan) tijdens uitvoering van de infiltratieproef. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.
- Dekker L.W.**, K. Oostindie, C. J. Ritsema, 2003. Bodemfysische bepalingen aan monsters uit de veenkade bij Wilnis. Alterra rapport, project nummer 230729, Wageningen.
- Oostindie, K.**, C. J. Ritsema, L. W. Dekker, L. Lansink, M. Pleijter, T. van Steenbergen, 2004. Onderzoek naar de herbevochtiging van veendijken. Alterra rapport 977, Wageningen
- Oostindie, K.**, J. G. Wesseling, R.F.A. Hendriks, C.J. Ritsema en J.J.H. van den Akker. 2012. Effecten van beheersmaatregelen op vochtgehaltes bij uitdrogende veendijken, Alterra, Wageningen. Alterra rapport project nr:5239518.
- Oostindie, K.**, J.G. Wesseling, C.J. Ritsema. 2011. Normering van de belasting situatie droogte. Een gestandaardiseerde methode om periodes van droogte en natheid weer te geven. ORK 2011-w05. Stowa. 35 pp.
- Šejna, M.**, J. Šimůnek and M.Th. van Genuchten. 2011. The Hydrus Software Package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. User Manual, Version 2.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, 280 pp.
- Šimůnek, J.**, M.Th. van Genuchten and M. Šejna. 2011. The Hydrus Software Package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, Version 2.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, 258 pp.
- Smits, I., J.** Wijngaarden, R. Versteeg en M. Kok, 2004. Statistiek van extreme neerslag in Nederland. Stowa, Utrecht, 2004-26.
- Wesseling, J.G.**, K. Oostindie, C.J. Ritsema and L.W. Dekker, 2013. A software tool to visualize soil moisture dynamics of an irregular-shaped profile. Computers and geosciences (in prep.)