

Natschade bij optimale afwatering

Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's



Natschade bij optimale afwatering

Opdrachtgever: Waterschap Hunze en Aa's
Uitvoerder: FutureWater

Begeleider: J. den Besten (Waterschap Hunze en Aa's)

Auteurs: P. Droogers (FutureWater)
R. Loeve (FutureWater)

FutureWater
Generaal Foulkesweg 28
6703 BS Wageningen
tel: 0317-460050
email: info@futurewater.nl
web: www.futurewater.nl

Voorwoord

Een belangrijke taak van Waterschap Hunze en Aa's is het voorkomen van natschade aan landbouwgewassen door water af te voeren volgens vastgelegde afspraken. Het valt echter te verwachten dat zelfs onder de meest optimale afgewaterde omstandigheden een zekere natschade zal optreden. Deze studie richt zich op een eerste analyse van deze zogenaamde onvermijdelijke natschade onder een aantal afwateringsscenario's.

Deze studie kon in een zeer korte doorlooptijd worden afgerond door de snelle reactie van Jan den Besten op de eerste resultaten en conceptversie van het rapport.

Inhoudsopgave

1	INTRODUCTIE	5
2	METHODE EN DATA	7
2.1	SWAP model	7
2.2	PEST optimalisatie	7
2.3	Invoergegevens	8
2.3.1	Bodem	8
2.3.2	Interactie met diepe grondwater	9
2.3.3	Slootdichtheid	9
2.3.4	Drainageweerstand	10
2.3.5	Interactie met oppervlaktewater	11
2.3.6	Gemiddelde drooglegging	12
2.3.7	Meteorologische gegevens	12
2.3.8	Landgebruik	13
2.3.9	Wateraanvoer	13
2.3.10	Grondwaterstanden	13
3	KALIBRATIE EN VALIDATIE	15
3.1	Algemeen	15
3.2	Humeus	16
3.3	Klei	19
4	RESULTATEN	23
4.1	Algemeen	23
4.2	Humeus	23
4.3	Klei	30
5	CONCLUSIES	37
6	REFERENTIES	39

Tabellen

Tabel 1. Definitie van bodemeigenschappen volgens de Staringreeks (Wösten et al., 2001).	9
Tabel 2. Slootafstanden voor de twee percelen uitgaande van een gebied van 100 ha.	10
Tabel 3. De vijf drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse.	11
Tabel 4. Gemiddelde drainageweerstand voor de twee percelen voor de drie drainagesystemen.	11
Tabel 5. Belangrijkste gegevens voor de afwateringscapaciteit van de twee percelen.	12
Tabel 6. Resultaat van de kalibratie voor Humeus.	16
Tabel 7. Resultaat van de kalibratie voor Klei.	20
Tabel 8. Kalibratie voor Klei.	20
Tabel 9. Kansen op inundatie weergegeven als overschrijdingskansen slootpeilen voor Humeus.	25
Tabel 10. Kansen op droog- en natschade over de periode 1906-2005 voor Humeus.	25
Tabel 11. Kansen op wateroverlast tijdens poten en oogsten voor Humeus.	26
Tabel 12. Kansen op inundatie weergegeven als overschrijdingskansen slootpeilen voor Klei.	31
Tabel 13. Kansen op droog- en natschade over de periode 1906-2005 voor Klei.	32
Tabel 14. Kansen op wateroverlast tijdens poten en oogsten voor Klei.	32
Tabel 15. Samenvatting belangrijkste resultaten.	38

Figuren

Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model (naar Van Dam et al., 1997).	8
Figuur 2. Neerslaggegevens over de periode 1906-2005.	13
Figuur 3. Locatie van de twee grondwaterstandbuizen gebruikt voor kalibratie.	14
Figuur 4. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het ongekalibreerde model (Hum_01).	17
Figuur 5. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden met aangepaste bodem (Hum_02).	17
Figuur 6. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden met gekalibreerde drainageweerstand (Hum_03).	18
Figuur 7. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden met gekalibreerde drainageweerstand en infiltratieweerstand (Hum_04).	18
Figuur 8. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het ongekalibreerde model (Klei_01).	20
Figuur 9. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor aanpassing (Klei_02).	21
Figuur 10. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het gekalibreerde model (Klei_03).	21
Figuur 11. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het gekalibreerde model (Klei_04).	22
Figuur 12. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het model dat representatief is voor het gehele gebied en niet voor het specifieke perceel (Klei_05).	22
Figuur 13. Droog en natschade voor Humeus voor de referentiesituatie.	26
Figuur 14. Droog en natschade voor Humeus voor de optimale afwatering.	27
Figuur 15. Droog en natschade voor Humeus voor de NBWnorm.	27
Figuur 16. Dagelijkse neerslag in 1930.	28
Figuur 17. Onoogstbare dagen voor Humeus voor de Referentie, uitgedrukt als dagen in oktober met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.	28
Figuur 18. Onoogstbare dagen voor Humeus voor de Optimale Afwatering, uitgedrukt als dagen in oktober met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.	29
Figuur 19. Onoogstbare dagen voor Humeus voor de NBW norm, uitgedrukt als dagen in oktober met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.	29
Figuur 20. Histogram van onoogstbare dagen voor Humeus voor NBW norm en optimale afwatering.	30
Figuur 21. Droog en natschade voor Klei voor de huidige situatie.	33
Figuur 22. Droog en natschade voor Klei voor de optimale afwatering.	33
Figuur 23. Droog en natschade voor Klei voor de NBW norm.	34
Figuur 24. Onoogstbare dagen voor Klei voor de Referentie, uitgedrukt als dagen in augustus met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.	34
Figuur 25. Onoogstbare dagen voor Klei voor de Optimale Afwatering, uitgedrukt als dagen in augustus met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.	35
Figuur 26. Onoogstbare dagen voor Klei voor de NBW norm, uitgedrukt als dagen in augustus met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.	35
Figuur 27. Histogram van onoogstbare dagen voor Klei voor NBW norm en optimale afwatering.	36
Figuur 28. Onoogstbare dagen (in 100 jaar voor augustus) voor Klei voor NBW norm als functie van de gekozen drukhoogte voor bewerkbaarheid.	36

1 Introductie

Een belangrijke taak van waterschappen is het voorkomen van landbouwkundige opbrengstderving als gevolg van natschade. Het waterschap handhaaft hiervoor openwaterpeilen zoals vastgelegd in peilbesluiten. Deze peilbesluiten zijn vaak opgesteld gebruik makend van droogleggingsnormen zoals uitgewerkt staan in het Cultuurtechnisch Vademecum (CV, 1988). In het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW, 2003) staan ook normen die vooral betrekking hebben op inundatie vanuit het oppervlakte water.

De huidige norm voor het Waterschap Hunze en Aa's ligt gemiddeld op een drooglegging van -1,40 m MV (winter) en -1,00 m MV (zomer) en een afvoer capaciteit van 11 mm d⁻¹ bij 3% openwater. Het is echter onduidelijk in hoeverre opbrengstderving optreedt indien volledig aan de normen wordt voldaan: de zogenaamde "onvermijdelijke natschade".

De droogleggingsnormen zoals die momenteel gebruikt worden door het waterschap zijn "droger" dan de NBW normen. Het zou daarom mogelijk zijn om in het kader van de trits vasthouden—bergen—afvoeren een gedeelte van de extra drooglegging te gebruiken voor vasthouden. Onbekend is echter in hoeverre hierdoor mogelijk extra opbrengstderving ontstaat ten opzichte van de eerder genoemde onvermijdelijke natschade. De doelstelling van deze studie is dan ook gedefinieerd als:

"analyseren hoe vaak en in welke mate natschade optreedt in optimaal afwaterende gebieden en wat de consequenties zijn indien de afwatering volgens de NBW normen zou worden ingericht".

Om een antwoord op bovenstaande vragen te geven zijn simulaties over een tijdreeks van 100 jaar gemaakt, waaruit de belangrijke hydrologische resultaten komen (openwaterpeilen, grondwaterstanden, droogte- en natschade). Deze analyses zijn uitgevoerd voor twee representatieve percelen (aardappels op humeuze grond en wintertarwe op klei) met behulp van het SWAP model. Een drietal afwateringsscenario's zijn vergeleken (huidig, optimaal en NBW), waarbij de resultaten gericht waren op nat- en droogteschade en oogstbaarheid.

2 Methode en data

2.1 SWAP model

Het SWAP model simuleert transport van water, opgeloste stoffen en warmte in de onverzadigde en verzadigde zone. SWAP is ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Alterra-Groene Ruimte. De eerste versie van het SWAP model werd al in 1978 ontwikkeld (Feddes et al., 1978) en sindsdien is het model veelvuldig toegepast en zijn diverse verbeteringen aangebracht. Figuur 1 laat schematisch de werking van het SWAP model zien voor wat betreft de processen in bodem—water—atmosfeer; een uitgebreidere beschrijving kan gevonden worden in Kroes en Van Dam (2003).

Het basis concept van ontwatering in het SWAP model berust, evenals bij de interactie van het diepe grondwater met het freatisch grondwater, op de verschillen in stijghoogten en een bepaalde weerstand:

$$q_{drain} = \frac{\phi_{gwl} - \phi_{drain}}{R_{drain}}$$

met q_{drain} : de flux vanuit de bodem naar de drain (cm d⁻¹)
 ϕ_{gwl} : de diepte van de grondwaterspiegel (cm)
 ϕ_{drain} : de stijghoogte in de drain (cm)
 R_{drain} : de drainageweerstand (d).

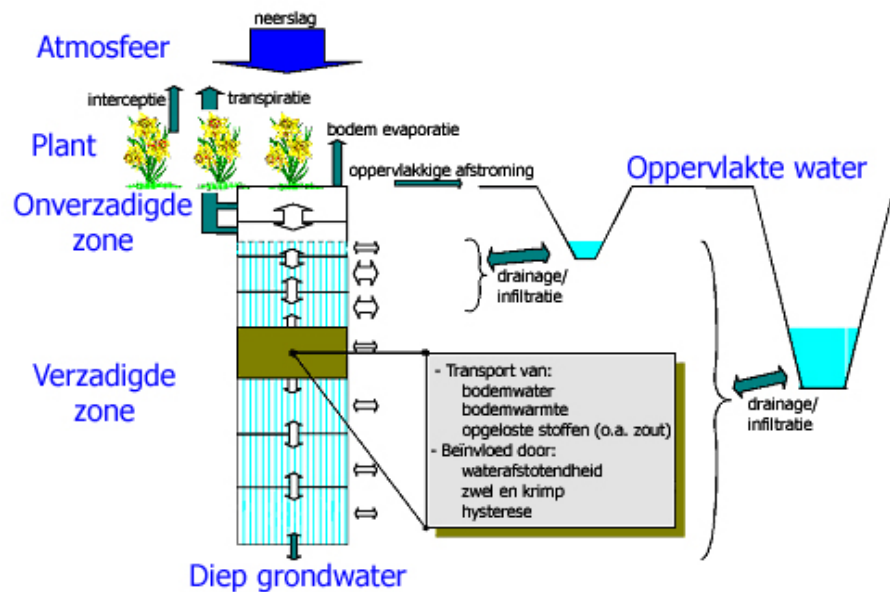
De modelaanpak voor de ontwatering en aftwatering is uitgebreider dan hier beschreven. Zo wordt de drainageweerstand gesplitst in een weerstand vanuit de bodem naar het drainagesysteem (buis, greppel of sloot) en de intree weerstand van het drainagesysteem zelf. Uiteraard is de afstand tussen de verschillende drains een andere belangrijke factor die de totale drainage dynamiek bepaalt. Voor een volledige beschrijving van de representatie van de drainage in het SWAP model wordt verwezen naar Kroes en Van Dam (2003).

Een verdere beschrijving van het SWAP model kan worden gevonden in diverse andere rapporten, publicaties en websites (<http://www.swap.alterra.nl>).

2.2 PEST optimalisatie

Bij elke modelstudie is het aantal benodigde invoergegevens groter dan het aantal beschikbare gegevens. Aan de hand van ervaringen van eerdere studies of aan de hand van gegevens van vergelijkbare situaties worden dan schattingen gemaakt van deze ontbrekende gegevens. Een standaard methode om toch een nauwkeurig model te verkrijgen is om modeluitvoer te vergelijken met metingen. Door vervolgens de onnauwkeurige invoergegevens aan te passen totdat gemeten en berekende waarden dicht bij elkaar liggen, wordt het model gekalibreerd. Deze kalibratie kan handmatig worden uitgevoerd, of met behulp van specifieke software.

In deze studie is de kalibratie uitgevoerd met het programma PEST (Parameter ESTimation; PEST, 2002). PEST is een model—onafhankelijk programma dat parameters kalibreert door gemodelleerde en waargenomen gegevens te vergelijken en stapsgewijs de model parameters aanpast om zodoende het verschil tussen waarneming en modelresultaat te verkleinen. Veel onderzoek is gedaan naar de hoeveelheid parameters dat nog redelijkerwijs kan worden gekalibreerd gegeven de hoeveelheid waarnemingen (bijvoorbeeld Van Dam et al., 1994; Ines and Droogers, 2002; Droogers, 1997). Duidelijk is dat hier niet een eenduidige uitspraak over is te doen en afhangt van een veelvoud van factoren. In deze studie zullen vooral de drainageweerstand gebruikt worden voor de kalibratie.



Figuur 1. Schematische weergave van het SWAP model (naar Van Dam et al., 1997).

2.3 Invoergegevens

De simulaties zijn uitgevoerd voor een tweetal fictieve percelen die verder aangeduid zullen worden als Humeus en Klei.

2.3.1 Bodem

SWAP maakt gebruik van bodemfysische eigenschappen voor het bereken van watertransport. Deze bodemfysische eigenschappen zijn de waterretentiecurve en de doorlatendheidscurve, die kunnen worden beschreven aan de hand van bepaalde parameters. Het Mualem-Van Genuchten parametermodel is het meest toegepast, waarbij voor een aantal karakteristieke Nederlandse bodem standaard waarden voor worden gebruikt: de Staringreeks (Wösten et al., 2001). In Tabel 1 staan de boven en ondergronden vermeld zoals deze in de Staringreeks zijn gedefinieerd.

Voor het humeus perceel is gekozen voor een bovengrond van 50 cm bestaande uit venig zand (B15) en een ondergrond van matig lichte zavel O9. Het klei perceel is gedefinieerd als een bovengrond van 50 cm matig zware klei (B11) en een ondergrond die ook uit matig zware klei bestaat (O12). In de Staringreeks moet gekozen worden tussen matig zware klei en zeer zware klei. Tijdens de kalibratie, zoals beschreven in het volgende hoofdstuk, zal bekeken worden of de matig zware of de zeer zware klei de beste beschrijving is van het bodemprofiel.

Tabel 1. Definitie van bodemeigenschappen volgens de Staringreeks (Wösten et al., 2001).

Bovengronden		Ondergronden	
<i>Zand</i>		<i>Zand</i>	
B1	Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand	O1	Leemarm, zeer fijn tot matig fijn zand
B2	Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	O2	Zwak lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
B3	Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	O3	Sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
B4	Zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand	O4	Zeer sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand
B5	Grof zand	O5	Grof zand
B6	Keileem	O6	Keileem
		O7	Beekleem
<i>Zavel</i>		<i>Zavel</i>	
B7	Zeer lichte zavel	O8	Zeer lichte zavel
B8	Matig lichte zavel	O9	Matig lichte zavel
B9	Zware zavel	O10	Zware zavel
<i>Klei</i>		<i>Klei</i>	
B10	Lichte klei	O11	Lichte klei
B11	Matig zware klei	O12	Matig zware klei
B12	Zeer zware klei	O13	Zeer zware klei
<i>Leem</i>		<i>Leem</i>	
B13	Zandige leem	O14	Zandige leem
B14	Siltige leem	O15	Siltige leem
<i>Moerig</i>		Veen	
B15	Venig zand	O16	Oligotroof veen
B16	Zandig veen en veen	O17	Mesotroof en eutroof veen
B17	Venige klei	O18	Moerige tussenlaag
B18	Kleiig veen		

2.3.2 Interactie met diepe grondwater

Kwel intensiteiten variëren sterk binnen het beheersgebied van Waterschap Hunze en Aa's. Het gaat hierbij om zowel variatie in ruimte als in tijd. Voor de twee percelen is ervan uitgegaan dat er interactie is met het diepere grondwater. In SWAP kan dan de stijghoogte in het diepere grondwater worden gedefinieerd en de weerstand van de afsluitende laag, waarna het model zelf eventuele kwel en wegzijging uitrekent.

2.3.3 Slootdichtheid

Lokale berging in het oppervlaktewater wordt in het SWAP model gedefinieerd met de slootdichtheid en de breedte van de sloten. In werkelijkheid is het oppervlak openwater een functie van het slootpeil aangezien sloten trapeziumvormig zijn. Het oppervlak openwater is dan:

$$\text{Openwater} = \text{SlootLengte} * \text{Slootdiepte} \left(\text{SlootBodem} + \frac{2 \cdot \text{SlootBodem}}{\text{Talud}} \right)$$

waarbij Talud is gedefinieerd als de hoek (hoogte/breedte) van het talud. Een grotere waarde van Talud is een steiler talud.

In de praktijk wordt de definitie openwater gebruikt voor de oppervlakte sloten indien deze tot aan het maaiveld staan. In de schematisatie is er daarom vanuit gegaan dat al het openwater rechthoekig is.

Om de slootdichtheid om te rekenen naar de gemiddelde slootafstand kan de volgende formule gebruikt worden:

$$\text{slootafstand} = \frac{\text{grid}}{\left[\frac{\text{slootdichtheid}}{\text{grid}} \right]}$$

Met een oppervlak van 100 ha (1000 x 1000 m) zoals hier gebruikt, kan deze formule dus geschreven worden als:

$$\text{slootdichtheid} = 1.000.000 / \text{slootafstand}$$

Voor Humeus geldt een oppervlakte openwater van 4%, wat uitgaande van 100 ha overeenkomt met 4 ha. Voor Klei geldt 2%. In Tabel 2 staan de slootafstanden die gebruikt zijn om deze oppervlakte openwater in SWAP toe te passen.

Tabel 2. Slootafstanden voor de twee percelen uitgaande van een gebied van 100 ha.

	Slootafstand (m)	Breedte (m)	Oppervlak (m ²)
Humeus			
Sloot niveau 1	1000	10,00	10.000
Sloot niveau 2	250	5,00	20.000
Sloot niveau 3	250	2,50	10.000
Totaal			40.000
Klei			
Sloot niveau 1	2000	10,00	5.000
Sloot niveau 2	500	5,00	10.000
Sloot niveau 3	500	2,50	5.000
Totaal			20.000

2.3.4 Drainageweerstanden

In SWAP worden drainageweerstanden gedefinieerd voor drie grotere drainagesystemen zoals weergegeven in Tabel 3. Voor de berekeningen in SWAP zijn naast deze drie grotere drainagesystemen twee andere systemen onderscheiden: buisdrainage en maaiveldsdrainage (zie Tabel 3). Voor elk

drainagesysteem zijn drainageweerstanden gedefinieerd zoals aangegeven in Tabel 4. Voor de buisdrainage is een weerstand van 200 dagen als standaard genomen.

Bij hoge grondwaterstanden gaat het maaiveld als drainagemiddel fungeren. Daarom wordt voor de berekeningen met SWAP een 5^e drainagemiddel onderscheiden: de maaiveldsdrainage. Bij een grondwaterstand van 20 cm onder maaiveld draagt al een redelijk deel van het maaiveld bij aan deze vorm van drainage. De weerstand bij deze diepte is relatief laag en naar schatting 30 dagen. Voor de ontwateringsbasis is een diepte van 20 cm onder maaiveld gekozen (Kroon et al., 2001).

Tabel 3. De vijf drainagesystemen zoals gebruikt in de modelanalyse.

Drainagesysteem	Betekenis
Primair	Waterlopen 3 - 6 meter en waterlopen breder dan 6 meter
Secundair	Waterlopen smaller dan 3 meter
Tertiair	Greppels en droogvallende waterlopen
Buisdrainage	Buisdrainagesysteem
Maaiveldsdrainage	Oppervlakte drainage

Tabel 4. Gemiddelde drainageweerstanden voor de twee percelen voor de drie drainagesystemen.

Perceel	Primair (d)	Secundair (d)	Tertiair (d)	Drains (d)
Humeus	2000	1000	500	200
Klei	50000	50000	10000	200

2.3.5 Interactie met oppervlaktewater

De interactie met het oppervlaktewater wordt in SWAP gerepresenteerd met behulp van drie verschillende ontwateringssystemen. SWAP simuleert niet de volledige hydro-dynamisch stroming in het oppervlaktewater zelf, maar gaat ervan uit dat in een deelgebied het openwaterpeil constant is. Afvoer uit een deelgebied wordt wel dynamisch doorgerekend, waarbij gebruik gemaakt wordt van de afvoer via een stuw, waarbij de stuw ook representatief kan zijn voor een gemaal of een ander afwateringskunstwerk.

Afvoeren over stuwen worden in de praktijk berekend met de volgende formule voor rechthoekige lange overlaten (CV, 2000):

$$Q = 1,7 \cdot m \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}}$$

waarin

- Q : debiet ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- m : stuw coëfficiënt, vaak als 1.1 genomen (-)
- b : stuwkruinbreedte (m)
- h : overstorthoogte (m)

In SWAP wordt gebruikt gemaakt van:

$$Q = \alpha \cdot h^\beta$$

waarin

- α : stuw coëfficiënt ($\text{m}^{3-\beta} \text{s}^{-1}$)
 β : stuw exponent (-)

De conversie van de standaard stuw formule naar de gebruikte formule in SWAP kan eenvoudig worden afgeleid:

$$\alpha = 1,7 \cdot m \cdot b$$

$$\beta = \frac{3}{2}$$

Indien exacte gegevens van een stuw ontbreken, of indien een ander kunstwerk voor afwatering wordt gebruikt, wordt vaak een representatieve stuw gebruikt (Droogers en Loeve, 2003). Hierbij is het van belang om de maximale overstorthoogte (h) bij een bepaalde maatgevende afvoer (Q) vast te stellen. Hierbij is van belang dat het voor de SWAP aanpak niet zozeer uitmaakt of deze afvoer door een stuw of door een gemaal plaatsvindt. De maatgevende afvoer is gesteld op 13 mm d^{-1} voor Humeus en 15 mm d^{-1} voor Klei (Tabel 5).

Tabel 5. Belangrijkste gegevens voor de afwateringscapaciteit van de twee percelen.

	Maatgevende Afvoer (mm d^{-1})	Maatgevende Afvoer ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Stuwconstante α (-)
Humeus	13	0,15	0,15
Klei	15	0,17	1,04

2.3.6 Gemiddelde drooglegging

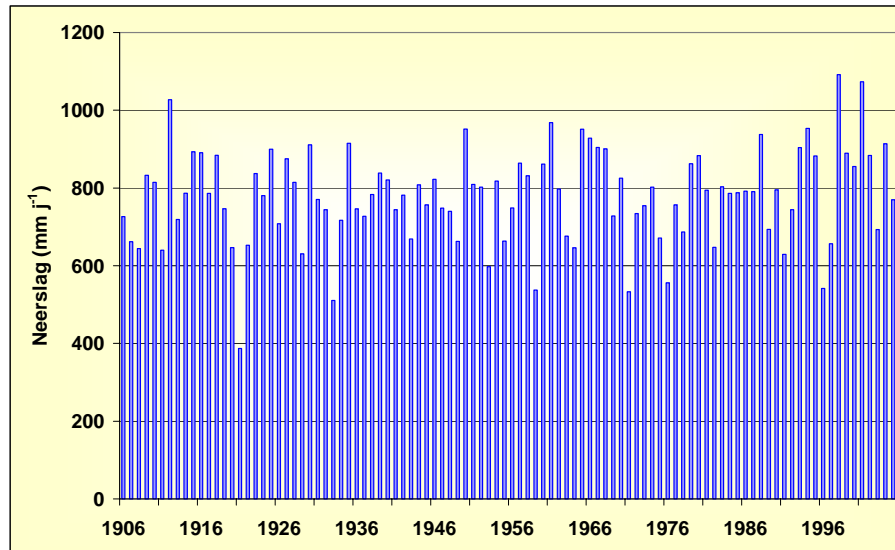
Voor de twee percelen is uitgegaan van zomer- en winterpeilen die worden gehandhaafd door de stuwkruinhoogte of gemaalinstellingen. Voor de twee percelen zijn dit:

- Humeus
 - zomerpeil: -1,00 m MV
 - winterpeil: -1,40 m MV
- Klei
 - zomerpeil: -1,60 m MV
 - winterpeil: -1,70 m MV

2.3.7 Meteorologische gegevens

Meteorologische gegevens van de afgelopen 100 jaar (1906-2005) van station Eelde zijn gebruikt. Een aantal gegevens zijn niet beschikbaar en deze zijn opgevuld met gegevens van het station De Bilt. Het gaat hierbij om:

- Neerslag 1960 tot en met 1956 is afkomstig van De Bilt
- Neerslag april 1945 is afkomstig van april 1944
- Temperatuur 1906 is afkomstig van De Bilt.



Figuur 2. Neerslaggegevens over de periode 1906-2005.

2.3.8 Landgebruik

Het landgebruik voor het humeus perceel is fabriksaardappelen en voor het klei perceel wintertarwe. De belangrijkste gegevens voor deze twee gewassen zijn (Projectgroep Waterlood, 1998):

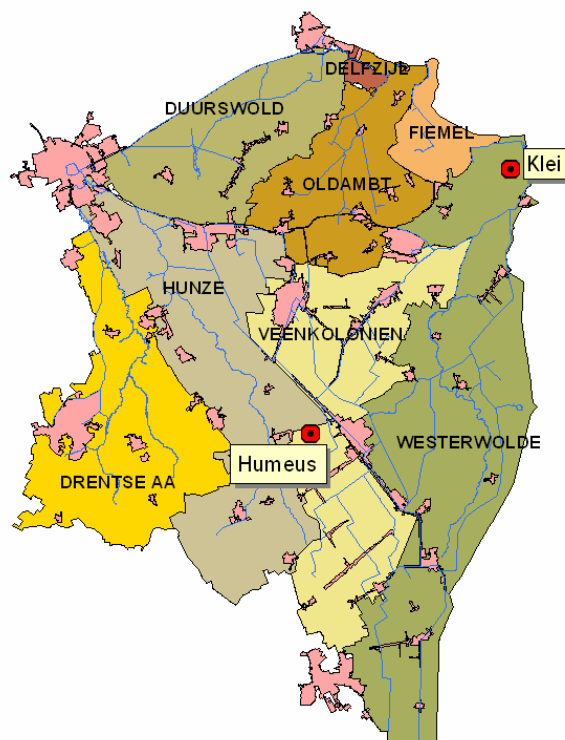
- fabriksaardappelen
 - lengte groeiseizoen: 174 dagen
 - poten: 10 april
 - rooien: 1 oktober
- wintertarwe
 - lengte groeiseizoen: 288 dagen
 - zaaien: 1 november
 - oogsten: 15 augustus

2.3.9 Wateraanvoer

Een gedeelte van het watertekort in de zomer wordt gecompenseerd door wateraanvoer. In het beheersgebied van Waterschap Hunze en Aa's, en dan met name voor het veenkoloniale gebied, wordt een groot gedeelte van de wateraanvoer benut door middel van infiltratie door drains. Deze wateraanvoer is meegenomen op dezelfde wijze als beschreven in een eerdere studie naar de Wateropgave droogte (Droogers et al., 2005).

2.3.10 Grondwaterstanden

Op twee locaties zijn grondwaterstandgegevens beschikbaar voor een globale kalibratie en validatie van de twee modellen (zie Figuur 3). Voor het Humeus gebied zijn dagelijkse waarnemingen beschikbaar en voor het Klei gebied tweewekelijkse. Het doel van deze studie is niet om deze twee specifieke percelen zo goed mogelijk te beschrijven, maar deze twee meetreeksen zijn gebruikt om modellen te bouwen voor twee representatieve percelen.



Figuur 3. Locatie van de twee grondwaterstandbuizen gebruikt voor kalibratie.

3 Kalibratie en validatie

3.1 Algemeen

Kalibratie en verificatie worden in veel modelstudies afzonderlijk uitgevoerd. Voor kalibratie wordt een meetreeks gekozen waarbij onzekere invoergegevens van het model worden aangepast zodat metingen en modelresultaten zo dicht mogelijk bij elkaar komen. Hierna wordt een validatie uitgevoerd om te kijken of de aangepaste modelinvoer ook voor een andere periode overeenkomt met metingen.

In de praktijk zijn echter vaak onvoldoende metingen beschikbaar om twee reeksen te maken; één voor kalibratie en één voor validatie. De kalibratie en validatie vinden dan in één stap plaats. Gezien de doelstelling van deze studie en de beperkte hoeveelheid metingen is ook hier voor deze aanpak gekozen. Bovendien is het doel van deze studie niet om één perceel zo goed mogelijk te modelleren, maar om een representatief perceel te modeleren.

Verder zijn er nog een aantal aspecten die van belang zijn voor de kalibratie en verificatie, waardoor een perfecte kalibratie niet mogelijk is en ook niet vereist is in het kader van deze studie:

- Er is uitgegaan van één gewas per perceel per jaar zonder vruchtwisseling. In werkelijkheid is dit niet het geval en zal er soms meer dan één gewas per jaar geteeld worden en vindt vruchtwisseling plaats. Bovendien is niet bekend wel gewas op het perceel stond gedurende de metingen.
- Neerslag gegevens zijn van het meteorologisch station Eelde. Lokale buien op de meetlocaties kunnen zorgen voor een verschil in gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden.
- De bodemgegevens komen uit de Staringreeks. Het is bekend dat de Staringreeks uitstekend geschikt is voor studies naar representatieve percelen, maar minder voor specifieke percelen.
- De locatie van de peilbuizen zal, vanwege logistieke overwegingen, niet volledig representatief zijn voor het gehele perceel.

Deze punten zullen moeten worden meegenomen bij de analyse van de kalibratie en validatie.

De vergelijking tussen gemeten en gesimuleerde resultaten zal door middel van figuren en de volgende statistische grootheden plaatsvinden.

- **Gemiddeld verschil.** Het verschil tussen de gemiddelde gemeten grondwaterstand en de gesimuleerde grondwaterstand over de gehele periode.
- **Gemiddelde absolute fout.** De som van het verschil van elke meting en elke simulatie gedeeld door het totale aantal waarnemingen.
- **Gemiddelde relatieve fout.** Hetzelfde als de gemiddelde absolute fout, waarbij alle simulatieresultaten zijn gecorrigeerd met het gemiddeld verschil.

Zowel voor Humeus als voor Klei is eerst een model gebouwd voor de periode 1996 tot en met 2005. Niet voor de volledige tien jaar zijn meetgegevens beschikbaar voor validatie en kalibratie, dus alleen voor die perioden waar meetgegevens beschikbaar zijn, zullen deze statische grootheden worden toegepast.

3.2 Humeus

Het model is gebouwd uitgaande van de gegevens zoals deze beschikbaar waren en beschreven in het voorgaande hoofdstuk. De met dit model gesimuleerde grondwaterstanden zijn vergeleken met de dagelijkse meetreeks vanaf 1 januari 2003. Uit Figuur 4 blijkt dat de gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden goed overeenkomen. De gesimuleerde grondwaterstanden laten wat minder dynamiek zien dan de gemeten waarden. De statische vergelijking laat zien dat gemiddelde relatieve fout 12 cm d⁻¹ bedraagt (Tabel 6).

Aan de hand van een drietal kalibratiestappen is vervolgens gekeken of een modelverfijning tot een betere vergelijking tussen gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden komt. Hierbij moet in ogenschouw genomen worden dat het ongekalibreerde model al goede resultaten laat zien. Bovendien moet rekening gehouden worden met de punten zoals genoemd in de voorgaande paragraaf. De volgende simulaties zijn uitgevoerd:

- Hum_01: zonder kalibratie
- Hum_02: een verandering in het bodemtype
- Hum_03: kalibratie met behulp van het PEST model op de vier drainageweerstanden
- Hum_04: kalibratie met behulp van het PEST model op de vier drainageweerstanden en de infiltratieweerstand.

De eerste kalibratie (Hum_02) is uitgevoerd waarbij gekeken is wat het effect van een ander bodemtype op de grondwaterstand heeft. In de oorspronkelijke simulatie was uitgegaan van *venig zand* op *matig lichte zavel* (B15 op O9). In de tweede simulatie is gekeken naar *zandig veen en veen* op *sterk lemig, zeer fijn tot matig fijn zand* (B16 op O3). Het blijkt dat de aanpassing naar een iets ander bodemtype niet veel wijzigt in de modelresultaten, en dat de dynamiek in gesimuleerde grondwaterstanden wat kleiner wordt (Tabel 6 en Figuur 5).

Als volgende stap is daarom gekeken naar de drainageweerstanden aangezien deze voor een groot gedeelte de dynamiek van het grondwaterverloop bepalen. De drainageweerstanden voor de drie niveaus (Tabel 6) en voor de buisdrainage zijn gekalibreerd gebruik makend van het programma PEST zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk. De drainageweerstanden zijn door deze kalibratie enigszins gewijzigd en de resultaten zijn iets verbeterd ten opzichte van het ongekalibreerde model (Tabel 6 en Figuur 6).

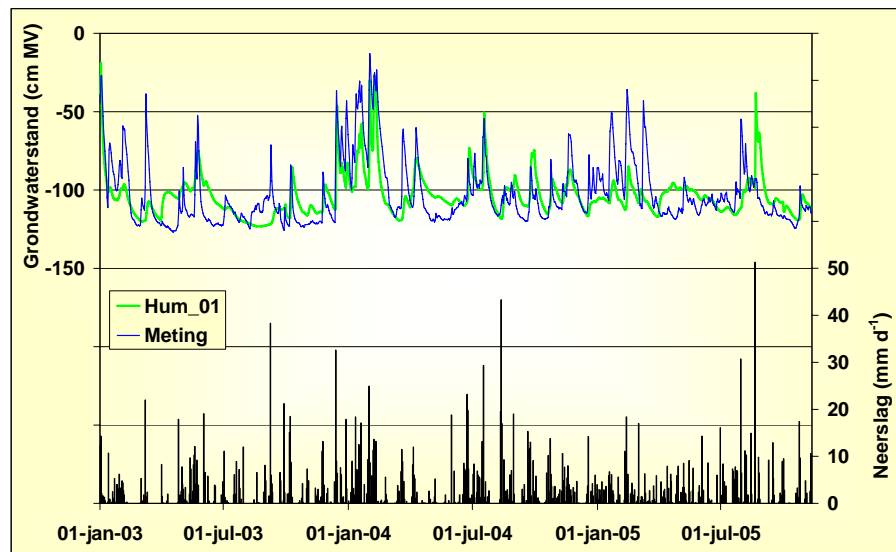
Tabel 6. Resultaat van de kalibratie voor Humeus.

		RMSE ¹	Gemiddeld verschil	Gemiddeld absolute fout	Gemiddeld relatieve fout
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Hum_01	Origineel	16.1	12	1	12
Hum_02	Aangepaste bodem	16.9	13	1	13
Hum_03	Kalibratie op 4 drainageweerstanden	14.9	12	-3	11
Hum_04	Hum_03 + infiltratieweerstanden	14.9	12	-2	11

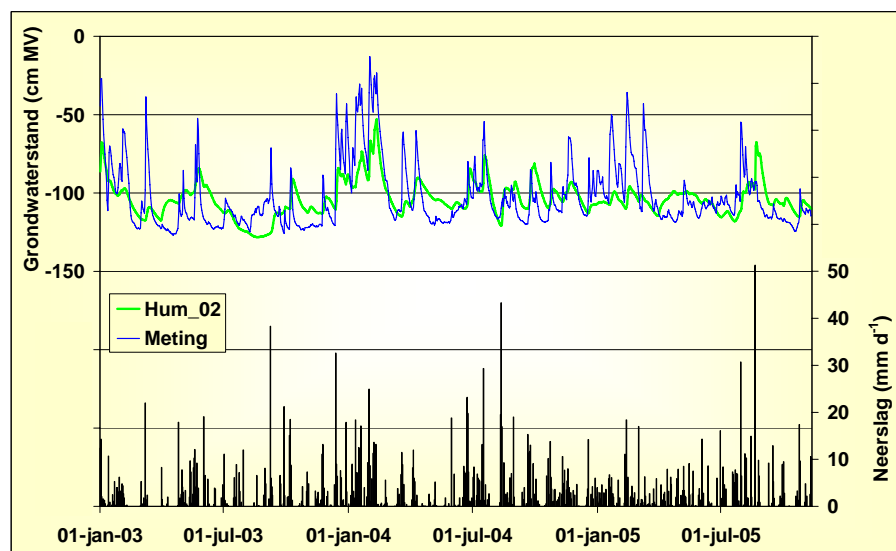
¹Root Mean Square Error, de gemiddelde kwadraatsom

Tenslotte is niet alleen gekeken naar de drainageweerstand maar ook naar de infiltratieweerstand (Hum_04). Ook deze kalibratie geeft een kleine verbetering ten opzicht van Hum_03, maar het verschil is relatief klein (Tabel 6 en Figuur 7).

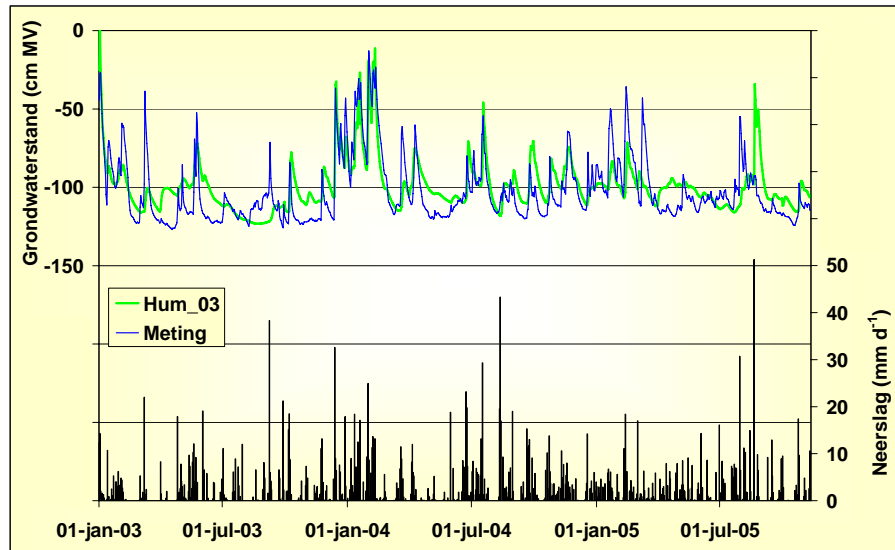
De eindconclusie van deze kalibratie is dat met de oorspronkelijke invoergegevens de gemeten grondwaterstanden goed kunnen worden gekalibreerd. De laatste kalibratie (Hum_04) waarbij zowel de drainageweerstanden als de infiltratieweerstanden automatisch zijn gekalibreerd, geeft nog iets betere resultaten en is uiteindelijk gebruikt voor de 100 jaar simulaties.



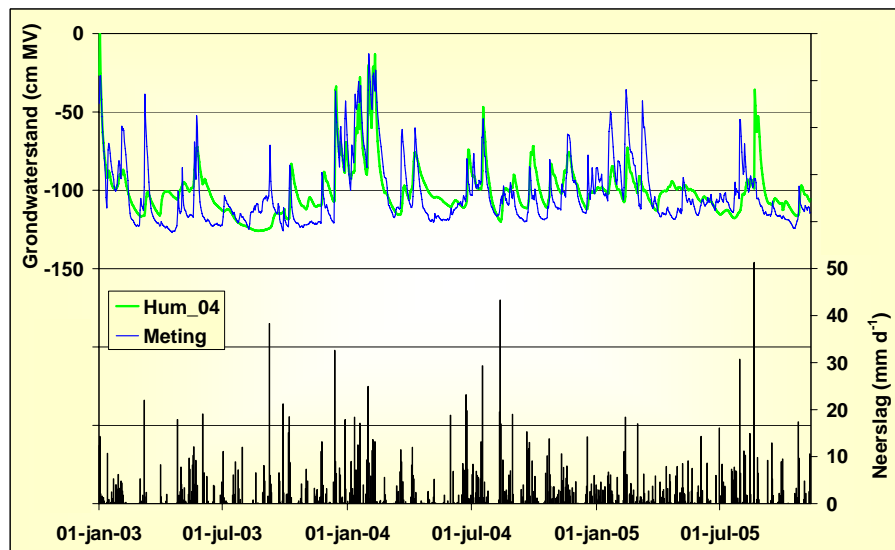
Figuur 4. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het ongekalibreerde model (Hum_01).



Figuur 5. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden met aangepaste bodem (Hum_02).



Figuur 6. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden met gekalibreerde drainageweerstanden (Hum_03).



Figuur 7. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden met gekalibreerde drainageweerstanden en infiltratieweerstand (Hum_04).

3.3 Klei

Het SWAP model voor Klei is gebouwd gebruik makend van de gegevens zoals beschreven in de voorgaande paragrafen. In totaal zijn 135 gemeten grondwaterstanden beschikbaar voor kalibratie en validatie (Figuur 9). Deze metingen bestrijken de periode 2000 tot en met 2005 met een gemiddeld interval van 14 dagen en voor sommige perioden lager.

Als eerste is gekeken in hoeverre de gemeten grondwaterstanden overeenkomen met de gesimuleerde. Uit Figuur 8 en Tabel 7 blijkt dat de simulatie op twee punten verbeterd moet worden om de gemeten grondwaterstanden beter te volgen. Als eerste is het duidelijk dat de grondwaterstanden in de zomer minder ver uitzakken dan wat er gesimuleerd wordt. Het tweede wat opvalt bij deze simulatie is dat de pieken met hoge grondwaterstanden frequenter voorkomen dan wat uit de metingen blijkt. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat de metingen niet continue zijn en er dus de mogelijkheid bestaat dat de extreme pieken gemist zijn in de waarnemingen. Aan de andere kant is in het model geen rekening gehouden met het voorkomen van scheuren in de zware klei waardoor water sneller uit de bovengrond kan verdwijnen.

Deze verschillen komen door de lokale conditie van dit specifieke meetpunt, waarbij de afstand van ongeveer 300 m tot de dichtstbijzijnde sloot een dominante rol speelt. Er is daarom een model gebouwd met twee aanpassingen (Klei_02). De zomer- en winterpeilen zijn veranderd in fictieve peilen die de grote afstand tot het openwater weergeven, waarbij de peilen met 30 cm zijn verhoogd. De tweede aanpassing is het simuleren van macroporiën. Hoewel SWAP een module heeft om macroporiën volledig te simuleren is hier niet voor gekozen, omdat de grote hoeveelheid gegevens die hiervoor nodig zijn niet beschikbaar zijn. Er is daarom gekozen voor een vereenvoudigde aanpak, waarbij de doorlatendheidscurve is aangepast door de n parameter te verhogen. Figuur 9 laat zien dat de simulaties beter overeenkomen met metingen. Uit Tabel 7 blijkt dit wat minder, maar dit heeft vooral te maken met de onregelmatige meetfrequentie van vooral de hogere grondwaterstanden.

Als derde stap (Klei_03) is weer het model PEST gebruikt voor automatische kalibratie van een aantal onzekere invoergegevens. Tabel 8 laat zien welke invoergegevens meegenomen zijn tijdens de kalibratie en wat de uiteindelijk optimale waarden voor de invoergegevens zijn. Figuur 10 laat het resultaat van deze kalibratie zien. De diepere grondwaterstanden worden beter gesimuleerd, maar met name de hogere slechter. Dit komt doordat er minder ondiepere grondwaterstandenmetingen zijn dan diepere, waardoor PEST de neiging heeft om de lagere frequentie van ondiepe waarnemingen te negeren.

Tenslotte is een laatste kalibratiestap uitgevoerd (Klei_04), waarbij de ondiepere grondwaterstandmetingen een zwaarder gewicht meekrijgen in de PEST kalibratie. De resultaten laten zien dat hierdoor de ondiepere grondwaterstanden inderdaad beter gesimuleerd worden, maar dat de diepere weer wat slechter gesimuleerd worden.

Aan de hand van de resultaten van deze vier modellen is tenslotte het definitieve model gebouwd, waarmee rekening is gehouden met deze vier modellen en tevens de doelstelling van deze studie om één representatief perceel te modelleren is meegenomen. De belangrijkste invoergegevens voor dit model zijn te zien in Tabel 8 onder Klei_05. Dit model beschrijft niet het beste de gemeten

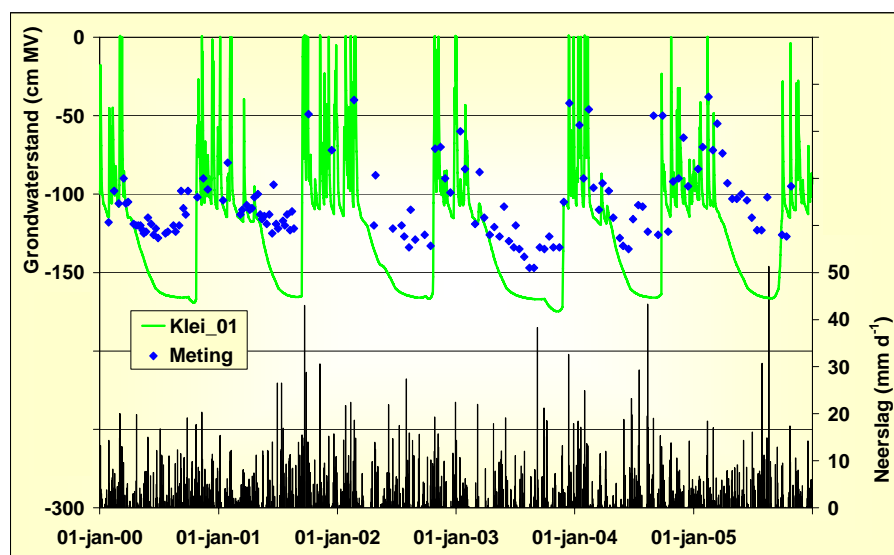
grondwaterstanden, maar is toch gekozen om de stap te maken van de specifieke lokale condities naar een representatief model voor het gehele gebied.

Tabel 7. Resultaat van de kalibratie voor Klei.

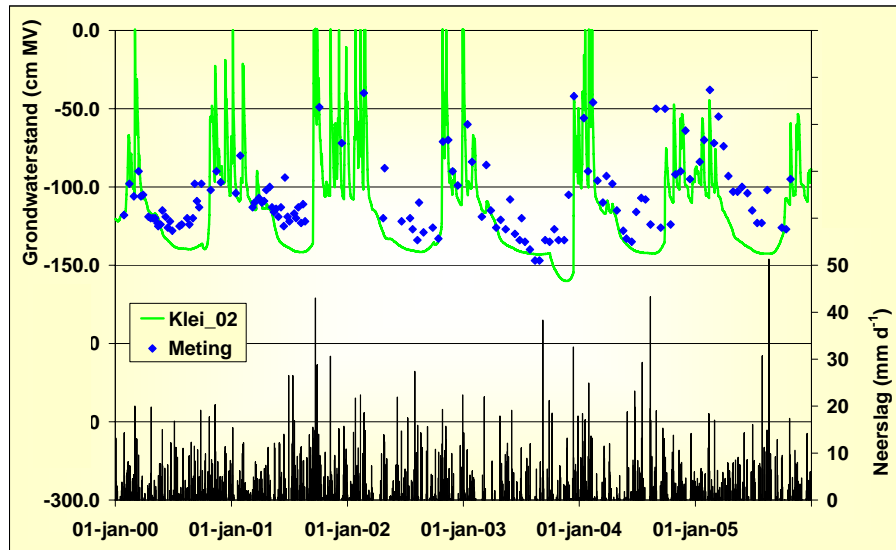
		RMSE	Gemiddeld verschil	Gemiddeld absolute fout	Gemiddeld relatieve fout
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Klei_01	Origineel	29	22	-7	22
Klei_02	Aangepaste bodem en peilen	35	30	17	21
Klei_03	PEST	26	19	4	19
Klei_04	PEST	29	21	-9	20
Klei_05	Representatief model	45	40	31	24

Tabel 8. Kalibratie voor Klei.

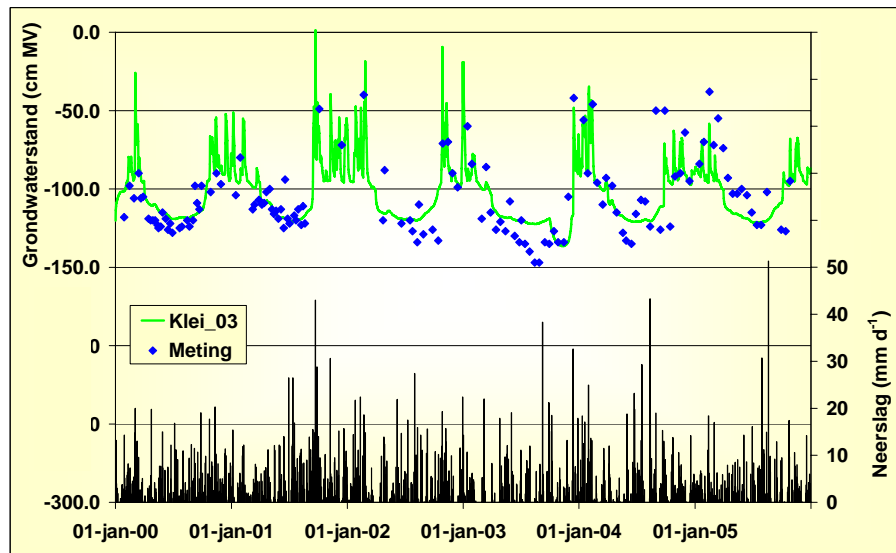
	Klei_01	Klei_02	Klei_03	Klei_04	Klei_05
rdrain3	10000	10000	1819,53	137,056	10000
rdrain4	200	200	80,6272	303,375	200
rinf4	100	50	98,2556	178,665	100
npar	1,094	1,200	1,300	1,300	1,250
zomerp	-160	-130	-114,295	-100	-160
winterp	-170	-140	-104,572	-100	-170



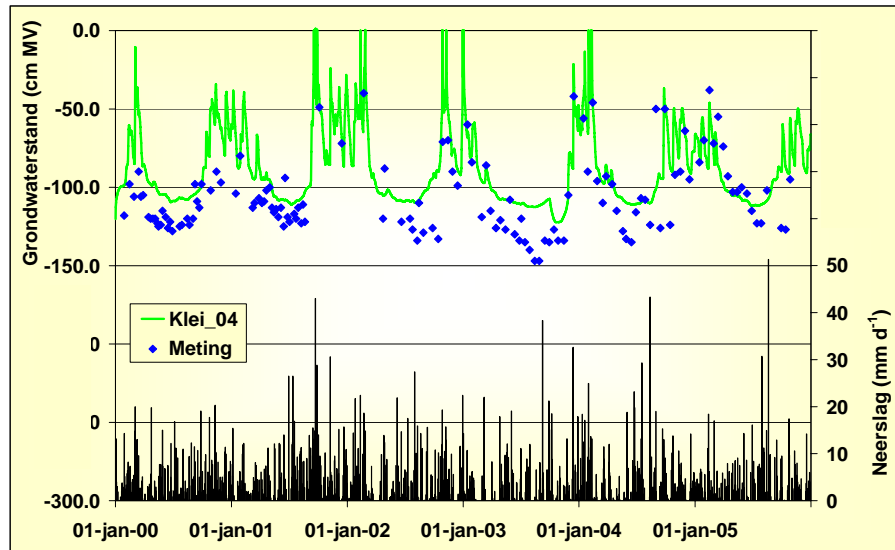
Figuur 8. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het ongekalibreerde model (Klei_01).



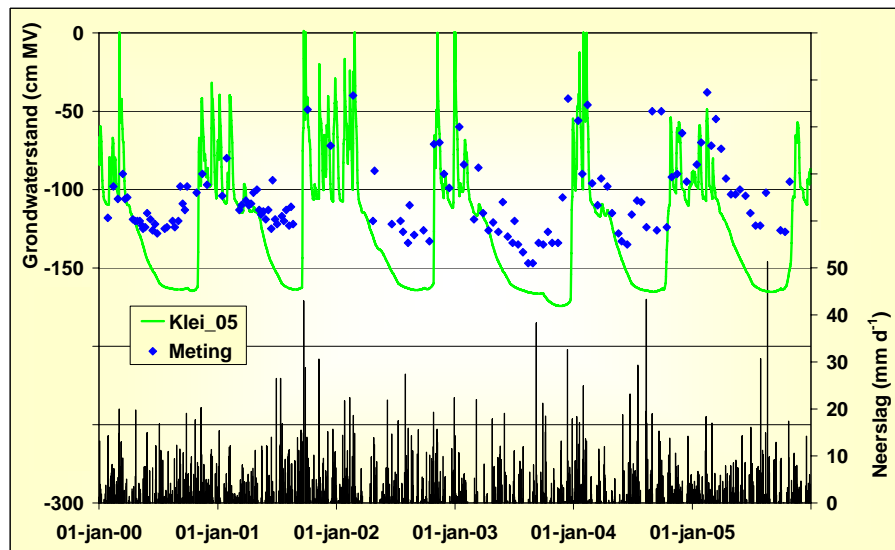
Figuur 9. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor aanpassing (Klei_02).



Figuur 10. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het gekalibreerde model (Klei_03).



Figuur 11. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het gekalibreerde model (Klei_04).



Figuur 12. Gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden voor het model dat representatief is voor het gehele gebied en niet voor het specifieke perceel (Klei_05).

4 Resultaten

4.1 Algemeen

In het voorgaande hoofdstuk was een periode van 10 jaar doorgerekend met het doel om de modellen te bouwen, kalibreren en valideren. De uiteindelijke modelinvoer zoals beschreven is vervolgens gebruikt om simulaties voor een periode van 100 jaar (1906-2005) uit te voeren om zodoende een beter inzicht te krijgen in langjarige gemiddelden en vooral overschrijdingskansen.

Het uiteindelijke doel van de modellen is om te kijken naar een drietal aspecten die gerelateerd zijn aan de afwatering van de representatieve percelen. Het gaat hierbij om:

- Gewasschade als gevolg van te natte en/of te droge bodem
- Berijdbaarheid en bewerkbaarheid tijdens zaaien/poten en oogsten
- Inundatierisico uit oppervlaktewater.

De modellen zijn voor een drietal scenario's gebruikt die afhankelijk zijn van de afwateringsituaties:

- Referentie zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk
- Optimale afwatering waarbij geen inundatie vanuit het oppervlaktewater voorkomt
- Inundatie eens in de 25 jaar (NBW norm).

Het eerste scenario is makkelijk te simuleren door gebruik te maken van de invoer zoals gekalibreerd en gevalideerd en deze voor een periode van 100 jaar door te rekenen. Het tweede scenario, optimale afwatering, is gegenereerd door een afwateringscriterium van 20 mm d⁻¹ aan te houden. Het derde scenario's complexer aangezien niet precies bekend is bij welk afwateringscriterium een inundatie van eens in de 25 jaar voorkomt. Hier is een iteratief proces voor nodig waarbij het afwateringscriterium steeds wordt aangepast totdat de gekozen inundatie voorkomt.

4.2 Humeus

Aan de hand van het gekalibreerde model zijn simulaties voor een periode van 100 jaar uitgevoerd voor de drie scenario's. Voor alle drie de scenario's zijn alle invoergegevens exact gelijk gehouden, met uitzondering van de afwateringscriterium. Deze zijn als volgt gekozen:

- Referentie 13 mm d⁻¹
- Optimaal 20 mm d⁻¹
- NBW norm 10 mm d⁻¹

Deze 10 mm d⁻¹ is bepaald door een aantal simulaties uit te voeren met verschillende afwateringscriteria en vervolgens het criterium dat het dichtst bij de NBW norm ligt te kiezen. Hierbij moet opgemerkt worden dat het gekozen criterium niet precies voor 4 maal inundatie in 100 jaar zorgt, maar dat ook gekeken is naar slootpeilen ondieper dan 20 cm en 50 cm MV (Tabel 9). Deze aanname is gedaan omdat het oppervlaktecriterium zoals gedefinieerd in het NBW tijdens deze studie niet is meegenomen. Dit zou alleen mogelijk zijn indien een ruimtelijke analyse, bijvoorbeeld aan de hand van het AHN, per representatief peilgebied zou worden uitgevoerd.

In Figuur 13 is te zien wat de droog- en natschade over de afgelopen 100 jaar zou zijn geweest indien de huidige situatie (gewas, drooglegging, bodem) 100 jaar constant zou zijn geweest. Het is duidelijk dat natschade een dominantere rol speelt dan droogschade. Ook is het duidelijk dat zowel nat- als droogschade in één jaar kan voorkomen. De extreme natschade in 1930 zoals te zien in Figuur 13 komt gedeeltelijk door de totale hoeveelheid neerslag van 911 mm, maar vooral doordat de periode juli tot en met oktober extreem nat waren met in totaal 510 mm (Figuur 16). Het tegenovergestelde kan zich ook voordoen zoals bijvoorbeeld in 1998. Dit was een extreem nat jaar, maar tijdens het groeiseizoen bleef de wateroverlast beperkt. De grootste problemen met wateroverlast traden op tijdens de oogst zoals in de volgende paragrafen wordt besproken.

In Figuur 14 en Figuur 15 is vervolgens te zien hoeveel droog- en natschade voorkomt voor het scenario optimale afwatering en NBW norm. Het is duidelijk dat de natschade toeneemt, maar de toename blijft beperkt. Dit komt vooral doordat de afwateringscriteria slechts bepalend zijn voor een aantal extreem natte dagen. Daarnaast zijn bijvoorbeeld drooglegging, gewastype, weer en bodem andere belangrijke zaken die voor droog en natschade verantwoordelijke zijn. De droogteschade voor Humeus wordt gedempt door de aanwezigheid van wateraanvoer, waardoor zelfs tijdens het droge jaar 2003 de droogteschade beperkt bleef.

In Tabel 10 zijn de resultaten voor deze droog- en natschade nogmaals te zien, maar nu uitgedrukt als overschrijdingskansen. In de tabel is te zien in hoeveel jaren van de 100 jaar een bepaalde droog- en natschade overschreden wordt. Zo is uit de tabel te zien dat het aantal jaren waarin meer dan 3% natschade optreedt onder optimale afwatering 14 maal in 100 jaar voorkomt en dat dit onder de NBW norm 18 keer zal voorkomen.

Naast de directe droog- en natschade is een belangrijke overweging voor een goede afwatering de bereikbaarheid en bewerkbaarheid van het land. Er is daarom uit de modelresultaten berekend hoe vaak hoge grondwaterstanden voorkomen (Tabel 11). Hierbij is gekeken naar het totaal aantal dagen in 100 jaar waarop grondwaterstanden hoger waren dan 0, -30, -50 en -70 cm MV. Bovendien is gekeken hoe vaak natte dagen voorkomen in april (poten) en oktober (rooien). Indien we bijvoorbeeld aannemen dat een grondwaterstand hoger dan 50 cm problemen geeft bij rooien dan blijkt dat dit voor de optimale ontwatering gedurende 167 dagen in 100 oktobers voorkomt. Omgerekend is dit een voorkomen van 5% van de oktober dagen ($31 \cdot 100 / 167$). Onder het NBW norm scenario neemt dit toe tot 267 dagen.

De grondwaterstand is een indirecte maat voor de natheid van een perceel die vaak gebruikt wordt als indicatie voor de berijd- en bewerkbaarheid. Fysisch gezien gaat het echter niet om de grondwaterstandsdiepte, maar om de drukhoogte in de bovengrond. Drempelwaarden voor de drukhoogte zijn verschillend per bodemsoort en bodemstructuur en kunnen in het veld worden afgeleid (Droogers et al., 1996). Voor deze studie zijn referentiewaarden gebruikt zoals vermeld in het Cultuurtechnisch Vademecum (2000). Voor aardappelen op humeuze gronden wordt een drempelwaarde aangegeven van $h = -50$ cm op een diepte van 5 cm.

In Figuur 17 tot en met Figuur 19 is het aantal onoogstbare dagen te zien voor de periode van 100 jaar voor de drie scenario's. Het aantal onoogstbare dagen is gedefinieerd als het aantal dagen in oktober waarop de bodem dus te nat is om te oogsten, gebruik makend van het criterium als gedefinieerd in de voorgaande paragraaf. Het gemiddeld aantal onoogstbare dagen over 100 jaar

bedraagt 6,5 (Huidig), 5,7 (Optimaal) en 7,0 (NBW) in de maand oktober. Uit de Figuur 17 tot en met Figuur 19 blijkt echter dat er grote verschillen zijn per jaar. Zo springt het jaar 1998 eruit met meer dan 25 dagen in oktober waarin niet geoogst kon worden. Figuur 20 laat tenslotte het histogram zien voor het scenario Optimaal en NBW. Het aantal jaren met meer dan 20 onoogstbare dagen in oktober neemt onder het NBW scenario toe tot 9 (uit 100 jaar) ten opzichte van 4 onder het scenario Optimaal.

Tabel 9. Kansen op inundatie weergegeven als overschrijdingskansen slootpeilen voor Humeus.

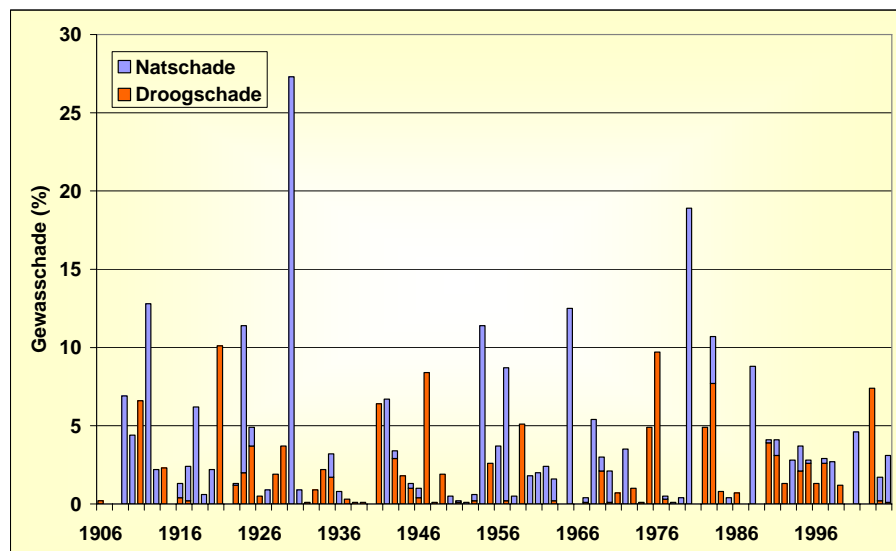
	slootpeil hoger dan (cm MV)		
	0	-20	-50
Huidig			
dagen in 100 jaar	2	4	55
Optimaal			
dagen in 100 jaar	0	2	14
NBW norm			
dagen in 100 jaar	2	10	83

Tabel 10. Kansen op droog- en natschade over de periode 1906-2005 voor Humeus.

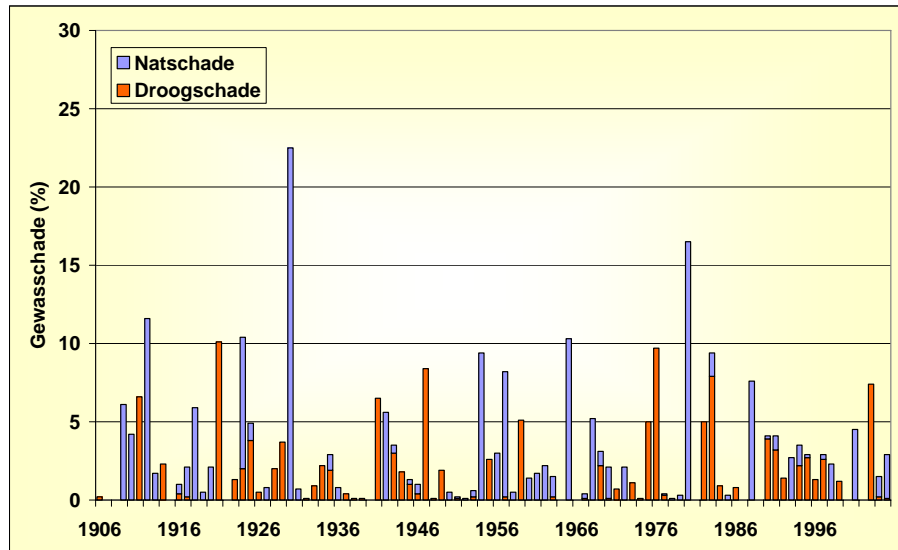
	droog- en natschade		
	> 3%	> 5%	> 10%
Huidig			
jaren met schade	35	20	8
jaren met droogteschade	14	8	1
jaren met natschade	16	12	5
Optimaal			
jaren met schade	31	20	6
jaren met droogteschade	14	8	1
jaren met natschade	14	12	4
NBW norm			
jaren met schade	34	20	8
jaren met droogteschade	13	8	1
jaren met natschade	18	12	5

Tabel 11. Kansen op wateroverlast tijdens poten en oogsten voor Humeus.

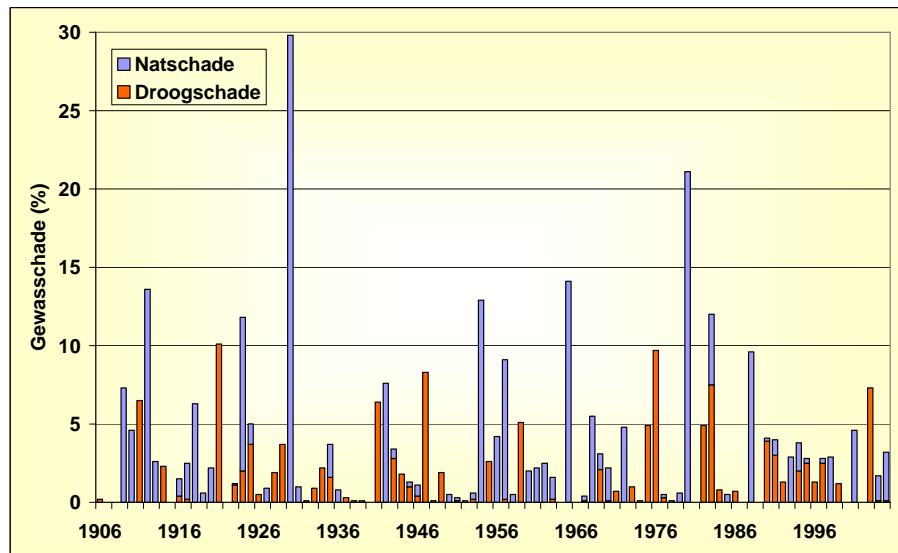
	grondwaterstand ondieper dan (cm MV)			
	0	-30	-50	-70
Huidig				
dagen in 100 jaar	277	843	2029	4970
dagen in april	0	12	66	349
dagen in oktober	46	111	222	501
Optimaal				
dagen in 100 jaar	204	613	1498	3782
dagen in april	0	7	42	290
dagen in oktober	33	88	167	373
NBW norm				
dagen in 100 jaar	348	1013	2423	5884
dagen in april	1	17	80	403
dagen in oktober	53	129	267	578



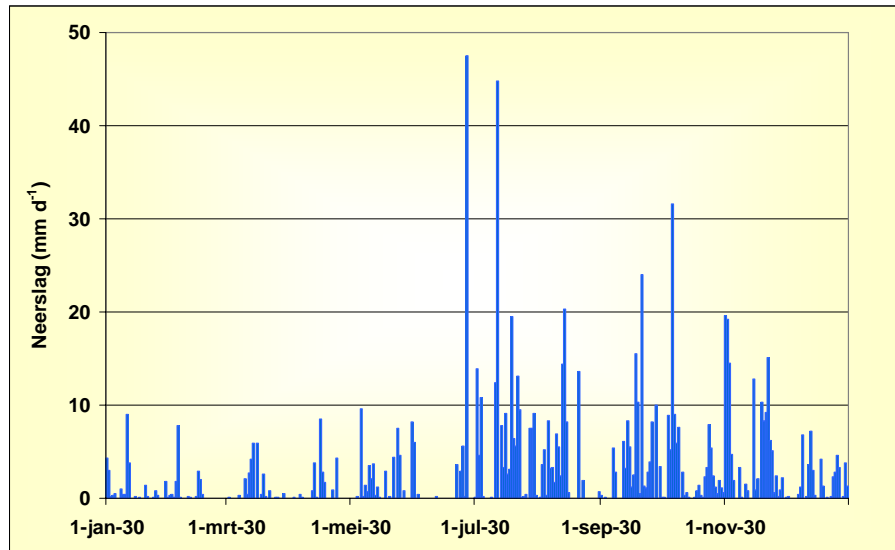
Figuur 13. Droog en natschade voor Humeus voor de referentiesituatie.



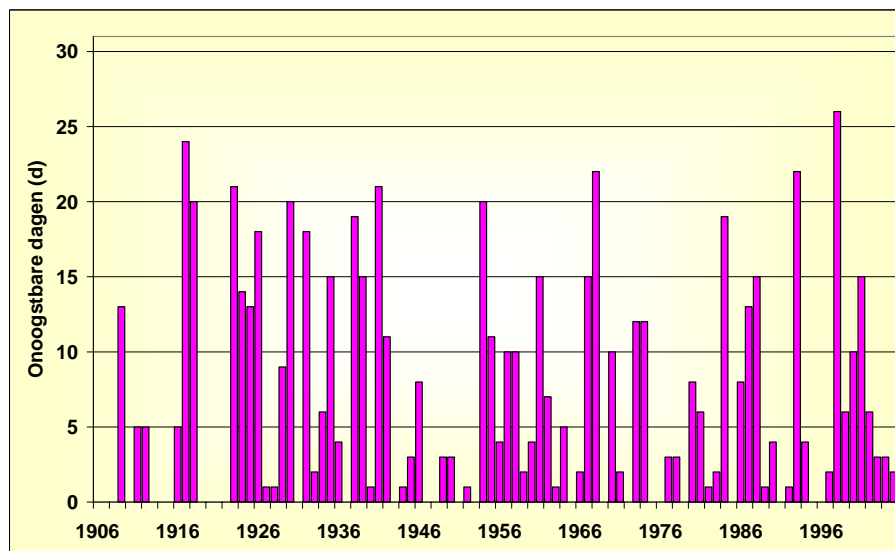
Figuur 14. Droog en natschade voor Humeus voor de optimale afwatering.



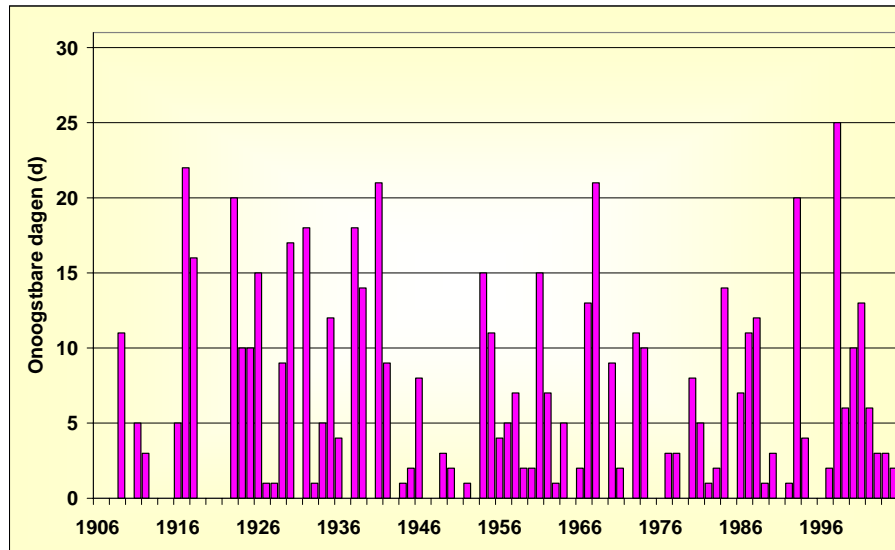
Figuur 15. Droog en natschade voor Humeus voor de NBWnorm.



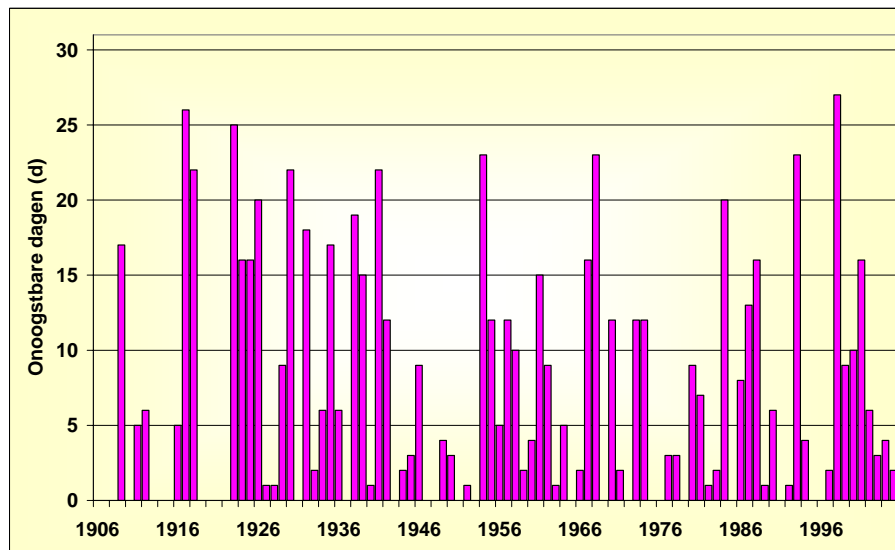
Figuur 16. Dagelijkse neerslag in 1930.



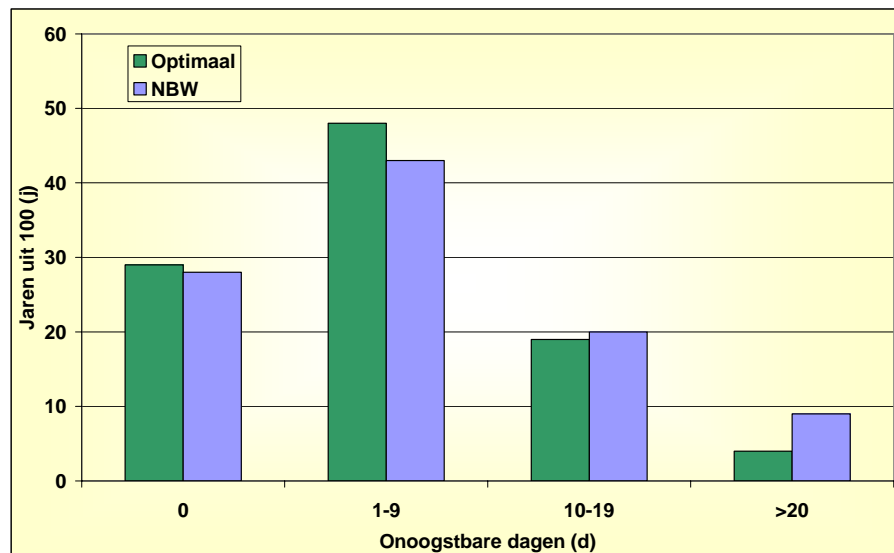
Figuur 17. Onoogstbare dagen voor Humeus voor de Referentie, uitgedrukt als dagen in oktober met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.



Figuur 18. Onoogstbare dagen voor Humeus voor de Optimale Afwatering, uitgedrukt als dagen in oktober met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.



Figuur 19. Onoogstbare dagen voor Humeus voor de NBW norm, uitgedrukt als dagen in oktober met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.



Figuur 20. Histogram van onoogstbare dagen voor Humeus voor NBW norm en optimale afwatering.

4.3 Klei

Voor Klei zijn exact dezelfde analyses uitgevoerd als voor Humeus. Ook zijn de tabellen en de figuren identiek en zal de discussie hier zich toespitsen op de meest in het oog springende resultaten en conclusies.

Het gekalibreerde model voor Klei is gebruikt voor simulaties over een periode van 100 jaar voor de drie scenario's. Voor alle drie de scenario's zijn alle invoergegevens exact gelijk gehouden, met uitzondering van de afwateringscriterium:

- Referentie 15 mm d⁻¹
- Optimaal 20 mm d⁻¹
- NBW norm 9 mm d⁻¹

Zoals bij Humeus aangegeven is als gevolg van het ontbreken van informatie gerelateerd aan het NBW oppervlakcriterium niet alleen gekeken naar de kans van 1/25 op inundatie, maar zijn ook de slootpeilen van -20 en -50 cm MV meegenomen (Tabel 12).

Droog- en natschade voor de drie scenario's zijn weergegeven in Tabel 13 en Figuur 21 tot en met Figuur 23. Resultaten van de simulaties komen goed overeen met het algemene patroon van droog- en natschade van landbouw op kleigronden. De natschade is beperkt voor Klei als gevolg van de diepe ontwatering en de aanwezigheid van macroporiën in de grond. Door het goede watervasthoudend vermogen van klei blijft voor de meeste jaren de droogschade beperkt. Voor een beperkt aantal jaren is er echter wel een forse droogteschade die veel groter is dan voor Humeus. De beperkte mogelijkheid van wateraanvoer door de zware grond en de grote ontwateringsdiepte spelen hierbij een cruciale rol. De verschillen in droog- en natschade tussen de drie scenario's is verwaarloosbaar.

De berijdbaarheid en bewerkbaarheid van het land zijn als eerste geanalyseerd aan de hand van het voorkomen van hoge grondwaterstanden (Tabel 14). Hierbij is weer gekeken naar het totaal aantal dagen in 100 jaar waarop grondwaterstanden hoger waren dan 0, -30, -50 en -70 cm MV. De zaaimaand oktober en de oogstmaand augustus zijn weer apart te zien in de tabel. Door de grote drooglegging komt overlast door slechte berijdbaarheid en bewerkbaarheid beperkt voor. Ook blijkt wederom dat de verschillen tussen de drie scenario's erg klein zijn.

Evenals bij Humeus is ook voor Klei gekeken naar het aantal onoogstbare dagen. Wederom is gekeken naar de drukhoogte in de bovengrond. Drempelwaarden voor de drukhoogte voor klei en granen zijn $h = -40$ cm (Cultuurtechnisch Vademecum, 2000). De wintertarwe wordt geoogst in augustus, waardoor onoogstbare dagen veel minder voorkomen dan bij de aardappelen. Figuur 24 tot en met Figuur 26 laten weer de onoogstbare dagen over de periode van 100 jaar zien voor de drie scenario's. Het is duidelijk dat er weinig verschil is tussen de drie scenario's. De belangrijkste reden is dat de wintertarwe in augustus worden geoogst, wanneer natte omstandigheden niet vaak voorkomen en het afwateringscriterium dus minder belangrijk is. Figuur 27 laat dit nog eens zien in de vorm van de histogram vergelijking tussen het scenario Optimaal en NBW.

De gekozen drukhoogte als criterium blijkt een erg gevoelige parameter te zijn, terwijl hier niet zoveel duidelijkheid over bestaat. Zo staat bijvoorbeeld in het Cultuurtechnisch Vademecum uit 1988 een waarde van -70 cm voor de aardappelen, terwijl in de uitgave van 2000 een waarde van -50 cm wordt genoemd. Uit Figuur 28 blijkt duidelijk dat de gekozen drukhoogte een belangrijke factor vormt. Aangezien voor de drie scenario's dezelfde drukhoogte is gekozen zijn de relatieve verschillen echter wel goed te vergelijken.

Tabel 12. Kansen op inundatie weergegeven als overschrijdingskansen slootpeilen voor Klei.

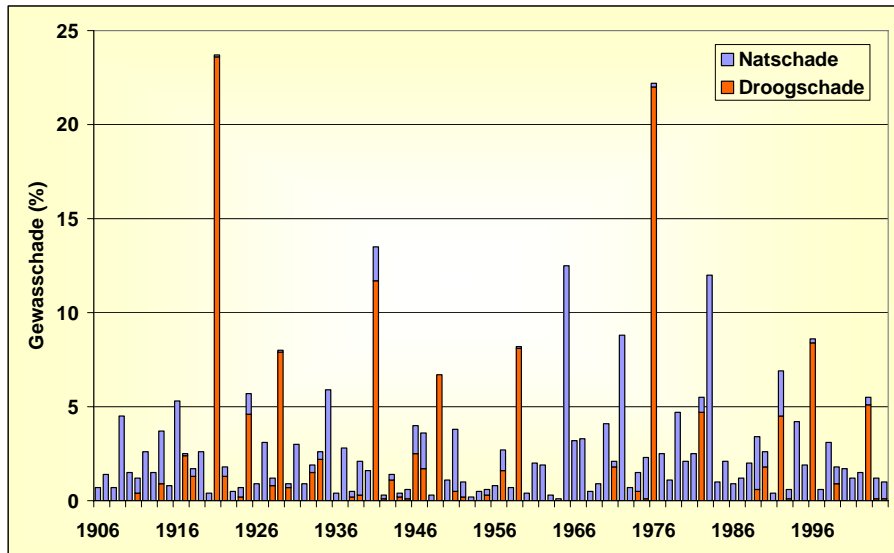
	slootpeil hoger dan (cm MV)		
	0	-20	-50
Huidig			
dagen in 100 jaar	0	0	2
Optimaal			
dagen in 100 jaar	0	0	1
NBW norm			
dagen in 100 jaar	1	3	8

Tabel 13. Kansen op droog- en natschade over de periode 1906-2005 voor Klei.

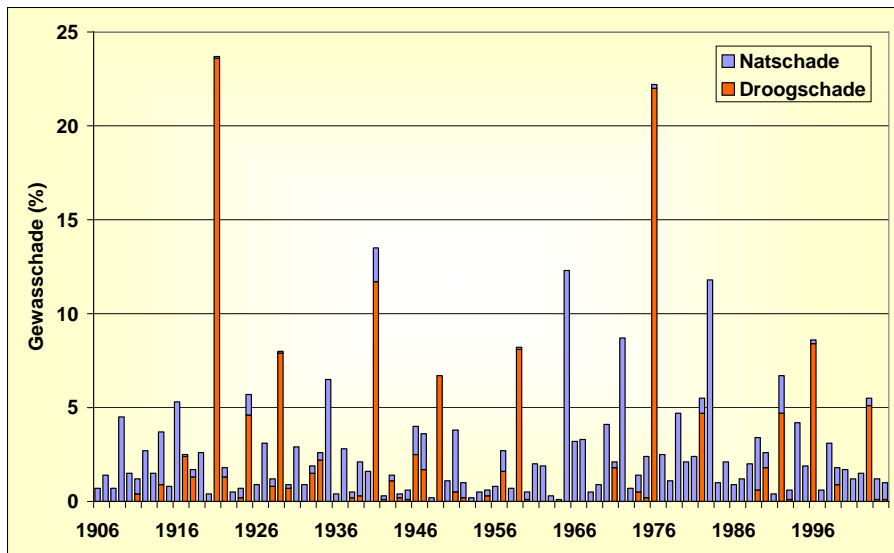
	droog- en natschade		
	> 3%	> 5%	> 10%
Huidig			
jaren met schade	29	16	5
jaren met droogteschade	11	8	3
jaren met natschade	14	5	2
Optimaal			
jaren met schade	29	16	5
jaren met droogteschade	11	8	3
jaren met natschade	14	5	2
NBW norm			
jaren met schade	28	16	5
jaren met droogteschade	11	8	3
jaren met natschade	13	5	2

Tabel 14. Kansen op wateroverlast tijdens poten en oogsten voor Klei.

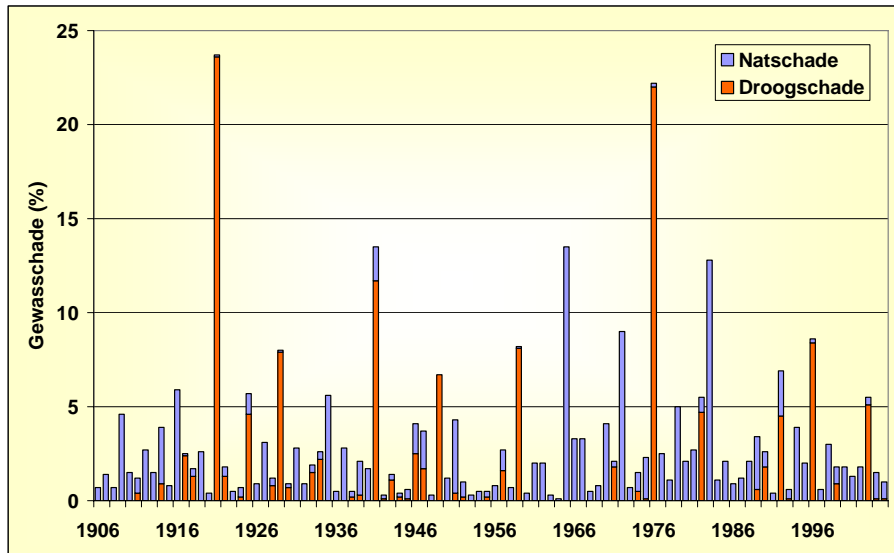
	grondwaterstand ondieper dan (cm MV)			
	0	-30	-50	-70
Huidig				
dagen in 100 jaar	258	480	1255	3353
dagen in oktober	29	44	100	254
dagen in augustus	8	9	10	13
Optimaal				
dagen in 100 jaar	246	471	1247	3338
dagen in oktober	29	42	100	256
dagen in augustus	7	9	10	13
NBW norm				
dagen in 100 jaar	311	578	1434	3534
dagen in oktober	32	49	116	261
dagen in augustus	8	9	11	13



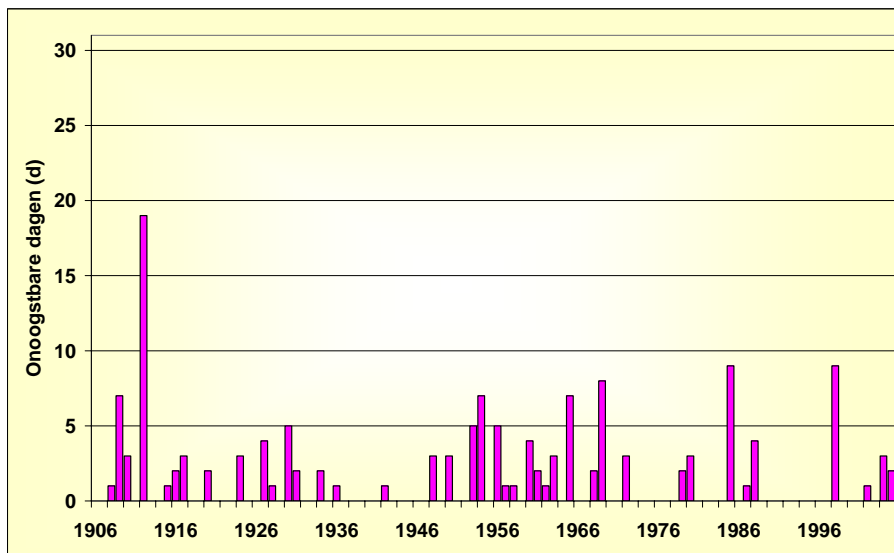
Figuur 21. Droog en natschade voor Klei voor de huidige situatie.



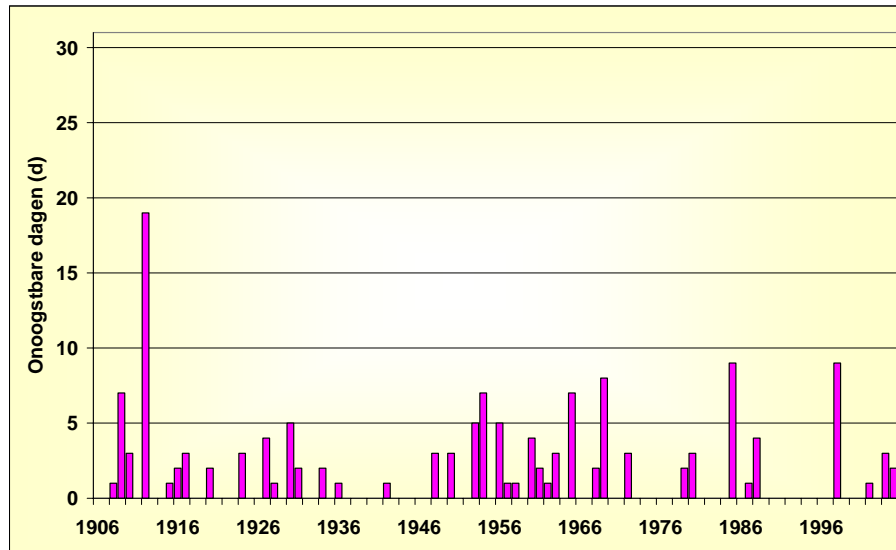
Figuur 22. Droog en natschade voor Klei voor de optimale afwatering.



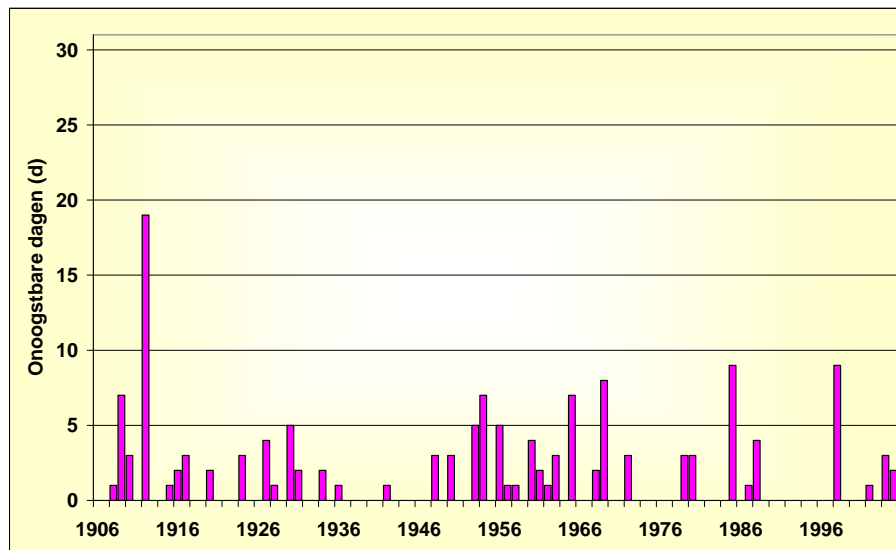
Figuur 23. Droog en natschade voor Klei voor de NBW norm.



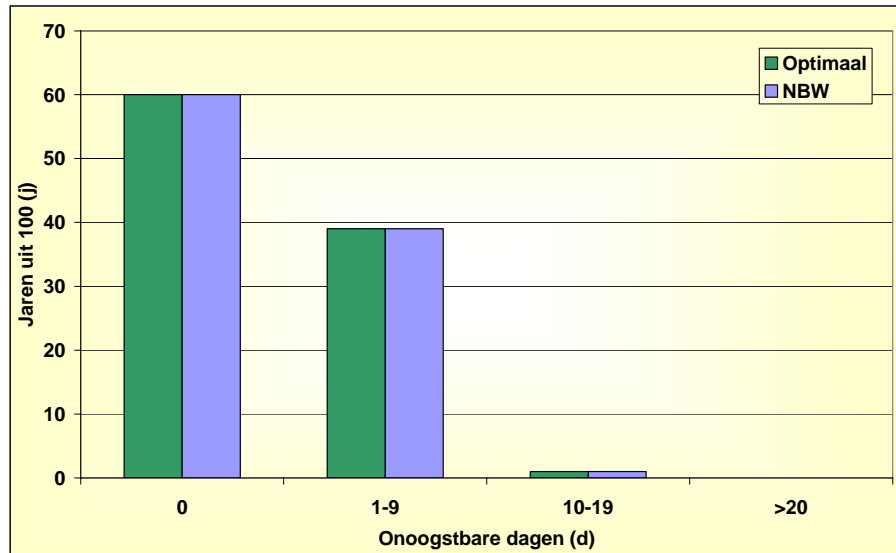
Figuur 24. Onoogstbare dagen voor Klei voor de Referentie, uitgedrukt als dagen in augustus met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.



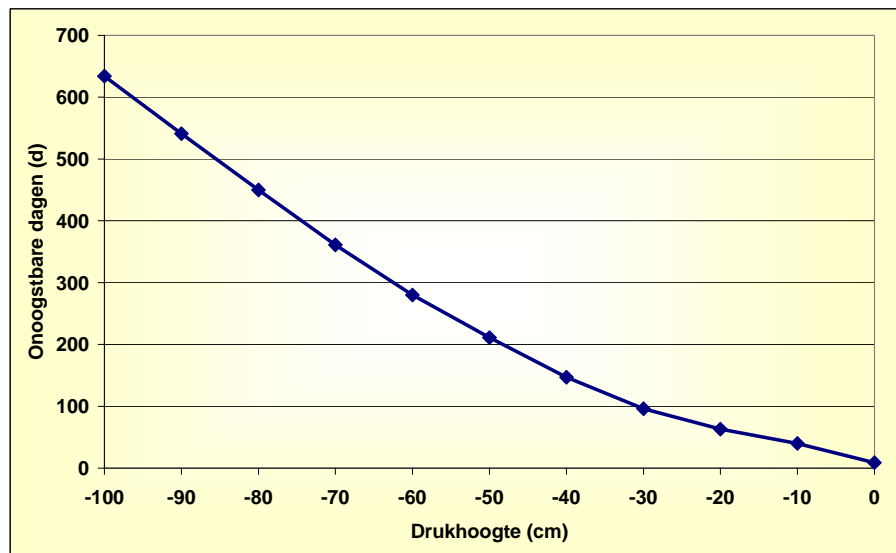
Figuur 25. Onoogstbare dagen voor Klei voor de Optimale Afwatering, uitgedrukt als dagen in augustus met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.



Figuur 26. Onoogstbare dagen voor Klei voor de NBW norm, uitgedrukt als dagen in augustus met een drukhoogte in de bovengrond groter dan -50 cm.



Figuur 27. Histogram van onoogstbare dagen voor Klei voor NBW norm en optimale afwatering.



Figuur 28. Onoogstbare dagen (in 100 jaar voor augustus) voor Klei voor NBW norm als functie van de gekozen drukhoogte voor bewerkbaarheid.

5 Conclusies

Een samenvatting van de resultaten zoals gepresenteerd in het voorgaande hoofdstuk is te zien in Tabel 15. Opbrengstderving als gevolg van suboptimale omstandigheden in de bodem, gedefinieerd als een jaar met meer dan 5% droogte- en natschade, vindt plaats in 20% van de jaren voor aardappelen. Voor wintertarwe vindt opbrengstderving plaats in 16% van de jaren. Deze opbrengstderving wordt amper beïnvloed door de gehanteerde afwateringscriteria. Dit kan verklaard worden doordat de afwateringscriteria slechts beperkend zijn voor maximaal enkele dagen per jaar. Bovendien zijn andere factoren veel belangrijker zoals onder andere drooglegging, gewastype, weer en bodem.

Het aantal dagen met hoge slootpeilen is uiteraard wel afhankelijk van de afwateringscriteria. Het aantal dagen met slootpeilen hoger dan 50 cm beneden maaiveld verschilt aanzienlijk voor de drie scenario's (Tabel 15), maar is nog steeds relatief laag. Dit komt vooral door de grotere drooglegging van Klei en door het verschil in percentage openwater. Voor Humeus bedraagt dit ongeveer 40 mm uitgaande van 4% openwater oppervlak en een drooglegging van 1 m. Voor Klei is dit 32 mm bij een openwater oppervlak van 2% en een drooglegging van 1,60 m.

Tenslotte blijkt dat het aantal dagen dat er beperkingen zijn voor zaaien/poten en oogsten wel beïnvloed wordt door het afwateringscriteria. Het aantal dagen dat omstandigheden in de zaai/poot/oogst maand te nat zijn, neemt aanzienlijk toe. Met name voor aardappelen (Humeus) zal de kans op natte omstandigheden tijdens rooien toenemen onder het NBW scenario. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat het aantal van 267 dagen zoals te zien in Tabel 15 nog relatief laag is. Het gaat namelijk om het totale aantal dagen in oktober gedurende 100 jaar. In andere woorden: van de 3100 dagen zijn er 267 te nat, of wel 9% van de dagen.

Een aantal punten zijn van belang bij het interpreteren van de resultaten en de conclusies:

- De gebouwde modellen zijn alleen gekalibreerd en gevalideerd op grondwaterstanden.
- De droog- en natschade aan gewassen worden voor een groot gedeelte bepaald door rassenkeuze. Voor deze studie zijn standaard waarden genomen.
- Het percentage openwater speelt een grote rol bij de overschrijdingskansen van openwaterpeilen.
- De mate van het voorkomen van macro-poriën is een belangrijke, maar ook onzekere factor voor Klei.

Aangezien het hier een vergelijkende modelstudie betreft zijn bovengenoemde punten zowel van invloed op de referentiesituatie als op de scenario's. Hierdoor zullen de relatieve verschillen (het verschil tussen referentie en scenario) nauwkeuriger zijn dan de eventuele onnauwkeurigheid in absolute zin.

Als eindconclusie kan gesteld worden dat met name voor wintertarwe op klei het hanteren van een wat minder droog afwateringscriterium weinig extra schade zal toebrengen. Voor aardappelen op de humeuze gronden zal het aantal onoogstbare dagen toenemen.

Tabel 15. Samenvatting belangrijkste resultaten.

	scenario			
	huidig	optimaal	NBW	verschil ²
Humeus (aardappelen)				
jaren > 5% opbrengtsderving	20	20	20	0 %
jaren > 5% droogteschade	8	8	8	0 %
jaren > 5% natschade	12	12	12	0 %
hoge grondwaterstand tijdens poten ¹	66	42	80	90 %
hoge grondwaterstand tijdens rooien	222	167	267	60 %
slootpeil hoger dan 50 cm (dagen in 100 jaar)	55	14	83	493 %
jaren met > 10 onoogstbare dagen	27	23	29	26%
jaren met > 20 onoogstbare dagen	6	4	9	125%
Klei (wintertarwe)				
jaren > 5% opbrengtsderving	16	16	16	0 %
jaren > 5% droogteschade	8	8	8	0 %
jaren > 5% natschade	5	5	5	0 %
hoge grondwaterstand tijdens zaaien	100	100	116	16 %
hoge grondwaterstand tijdens oogst	10	10	11	10 %
slootpeil hoger dan 50 cm (dagen in 100 jaar)	2	1	8	700 %
jaren met > 10 onoogstbare dagen	1	1	1	0%
jaren met > 20 onoogstbare dagen	0	0	0	0%

¹Aantal dagen in de zaai of oogstmaand in 100 jaar dat de grondwaterstand ondieper dan 50 cm bedraagt.

²Verschil tussen optimaal en NBW

6 Referenties

- CV, 1988. Werkgroep herziening Cultuurtechnisch Vademecum.
- CV, 2000. Cultuurtechnisch Vademecum. Vereniging voor Landinrichting
- Droogers, P., A. Fermont, and J. Bouma. 1996. Effects of ecological soil management on workability and trafficability of a loamy soil in the Netherlands. *Geoderma* 73: 131-145.
- Droogers, P. 1997. Effects of spatial and temporal variability on simulated transpiration ratios. *J. of Hydrology*. 203: 185-193.
- Droogers, P. en R. Loeve. 2003. Vasthouden en bergen: de mogelijkheden van regelbare stuwen. Opdrachtgever: Waterschap Zuiderzeeland. Rapport FutureWater, Arnhem.
- Droogers, P., W. Immerzeel, R. Loeve. 2005. Wateraanvoer en droogte: Analyse van de huidige situatie en de te verwachten invloed van klimaatverandering. Waterschap Hunze en Aa's. Rapport FutureWater, Wageningen.
- Feddes R.A., P.J. Kowalik, H. Zarandy. 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Simulation Monographs*. Pudoc. Wageningen, Nederland.
- Ines, V.M. and P. Droogers. 2002. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a genetic algorithm approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 6: 49-65.
- Kroes, J.G. en J.C. van Dam. 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Green World Research. Alterra-report 773. Wageningen, Nederland.
- Kroon, T., P.A. Finke, I. Peereboom, en A.H.W. Beusen. 2001. Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters. RIZA rapport 2001.017, Lelystad, Nederland.
- NBW, 2003. Nationaal Bestuursakkoord Water.
- PEST. 2002. Model-independant parameters estimation. *Watermark Numerical Computing*.
- Projectgroep Waterlood. 1998. Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater.
- Van Dam, J.C., J.N.M. Stricker, and P. Droogers. 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments. *Soil Science Society of America Journal* 58: 647-652.
- Wosten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groor en J. Stoke. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 153.