



---

# Aanpassing en toepassing SWAP gericht op bodem- en hydrologische maatregelen

Deelrapport thema Bewuste Bodem in onderzoeksprogramma Lumbricus

Marius Heinen, Pim Dik, Joost Cruijssen



---

# Aanpassing en toepassing SWAP gericht op bodem- en hydrologische maatregelen

Deelrapport thema Bewuste Bodem in onderzoeksprogramma Lumbricus

Marius Heinen, Pim Dik, Joost Cruijssen

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in het kader van onderzoeksprogramma Lumbricus en mede gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (kennisbasisproject KB-24-002-006).

Wageningen Environmental Research  
Wageningen, februari 2021

---

Gereviewd door:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van team Bodem, Water en Landgebruik

Akkoord voor publicatie:

Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van team Bodem, Water en Landgebruik

Rapport 3059  
ISSN 1566-7197

---

Heinen, M., P.E. Dik, J.J.P. Cruijsen, 2021. *Aanpassing en toepassing SWAP gericht op bodem- en hydrologische maatregelen; Deelrapport thema Bewuste Bodem in onderzoeksprogramma Lumbricus*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3059. 100 blz.; 30 fig.; 20 tab.; 63 ref.

Eendimensionale bodemvocht- en gewasgroeimodellen, zoals SWAP-WOFOST, zijn benaderingen van de werkelijkheid en kunnen zinvol ingezet worden om relatief snel inzicht te verkrijgen in de waterbalans, gewasgroei en eventueel stikstofdynamiek op verschillende bodem-gewas locaties. SWAP-WOFOST is uitgebreid en getoetst aan de hand van veldwaarnemingen. Het betreft toevoeging van de bimodale variant van de Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen om infiltratie bij aanwezigheid van wormgangen te kunnen simuleren en de toetsing van de eenvoudige stikstofmodule om te onderzoeken of, bij aanwending van organische (rest)materialen boven op de kunstmestgift, dit kan leiden tot nitraatuitspoeling.

Trefwoorden: doorlatendheidskarakteristiek, infiltratie, nitraatuitspoeling, simulatiemodel, stikstof, SWAP-WOFOST, waterretentiekarakteristiek, wormgang

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/541561> of op [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research) (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2021 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research). Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- 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.

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3059 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Shutterstock

---

# Inhoud

	<b>Verantwoording</b>	<b>5</b>
	<b>Woord vooraf</b>	<b>7</b>
	<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Onderdeel wormen, maaiveldafvoer</b>	<b>15</b>
	2.1 Verificatie SWAP-infiltratie	15
	2.2 Literatuur – quickscan concepten simulatie macroporiën	18
	2.3 Bimodale Mualem-Van Genuchten	20
	2.4 SWAP-optie MacroPore	24
	2.5 Voorbeeld toepassing unimodaal, bimodaal en macroporiën	26
	2.6 Effect bui-intensiteit en tijdstapgrootte	29
<b>3</b>	<b>Onderdeel regelbare drainage en SAWAX</b>	<b>32</b>
	3.1 Aanpassing adaptieve drainage in basic drainage option	32
	3.2 Berekening	33
<b>4</b>	<b>Onderdeel stikstofmodule</b>	<b>34</b>
	4.1 Verificatie SWAP stoftransport	34
	4.2 Verificatie SWAP-bodemtemperatuur	35
	4.3 Aanpassing in SWAP-WOFOST-N	37
	4.4 Gemeten humificatiecoëfficiënten	38
<b>5</b>	<b>Toepassingen</b>	<b>40</b>
	5.1 Bimodale Mualem-Van Genuchten: wormgangen	40
	5.1.1 Wormenproef Stegeren	42
	5.1.2 Infiltratieproef Stegeren	43
	5.1.3 Effectiviteit wormgangen zandgronden	50
	5.2 Bodemfysische eigenschappen bij twee soorten grondbewerking	53
	5.2.1 Beschrijving	53
	5.3 Nitraatuitspoeling	58
<b>6</b>	<b>Onderdeel beheer en onderhoud algemeen en testcases</b>	<b>61</b>
	6.1 Beheer en onderhoud SWAP algemeen	61
	6.2 Nieuwe testcases	61
<b>7</b>	<b>Discussie en aanbevelingen</b>	<b>62</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>65</b>
	<b>Bijlage 1 Analytische oplossingen verificatie water</b>	<b>69</b>
	<b>Bijlage 2 Aanpassing tabel cofgen</b>	<b>71</b>
	<b>Bijlage 3 Afleiden <math>\alpha_2</math>, <math>m_2</math> en <math>\omega_1</math></b>	<b>72</b>
	<b>Bijlage 4 Details voor 418 bij scenario a1</b>	<b>74</b>
	<b>Bijlage 5 Analytische oplossing verificatie stoftransport</b>	<b>76</b>

---

<b>Bijlage 6</b>	<b>Voorwaarden voor nauwkeurige en oscillatie-vrije simulatie van stoftransport</b>	<b>77</b>
<b>Bijlage 7</b>	<b>Analytische oplossing warmtetransport in de bodem</b>	<b>78</b>
<b>Bijlage 8</b>	<b>Infiltratiemetingen wormenproef</b>	<b>79</b>
<b>Bijlage 9</b>	<b>Bodemprofielbeschrijvingen</b>	<b>87</b>
<b>Bijlage 10</b>	<b>Gemeten bodemfysische eigenschappen (Stegeren)</b>	<b>94</b>
<b>Bijlage 11</b>	<b>Invoerbestanden voor N-module</b>	<b>96</b>

---

# Verantwoording

Rapport: 3059

Projectnummer: 5200042777

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: teamleider van team Bodem, Water en Landgebruik

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 14-01-2021

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke, teamleider van team Bodem, Water en Landgebruik

datum: 14-01-2021





---

# Woord vooraf

Het onderzoek dat in dit rapport is beschreven, maakt onderdeel uit van het thema 'Bewuste Bodem' van het onderzoeksprogramma Lumbricus (looptijd 2016-2020). Lumbricus is een samenwerkingsprogramma met onderzoeksinstituten en regionale partijen, waarin doelstellingen met betrekking tot waterkwaliteit, zoetwatervoorziening, bodembeheer, klimaatadaptatie en waterveiligheid samenkomen. Kern van het programma Lumbricus is het ontwikkelen en implementeren van een klimaatrobuust bodem- en watersysteem door het op stroomgebiedsniveau geïntegreerd toepassen van innovatieve maatregelen op het gebied van bodem, ondergrond en water. Het Lumbricus-thema 'Bewuste Bodem' richt zich op de bodem als sleutel in vocht- en nutriëntenvoorziening voor landbouw en natuur en op een duurzaam bodem- en waterbeheer voor een gezonde bodem in relatie tot gebruiksfuncties. Het thema richt zich met name op de effectiviteit van hydrologische en bodemmaatregelen op perceelniveau en de verbetering van modellen om de effectiviteit te kunnen beoordelen.

Lumbricus bestaat uit een consortium van partijen, zijnde Waterschap Vechtstromen, Waterschap Aa en Maas, Waterschap Limburg, STOWA, Universiteit Twente, Radboud Universiteit, Wageningen Universiteit (departement Omgevingswetenschappen), Wageningen Environmental Research, KWR Watercycle Research Institute, Deltares, KnowH<sub>2</sub>O, FutureWater en het Louis Bolk Instituut.

Onderdelen van dit rapport zijn mede tot stand gekomen met input van verschillende personen en instanties: Jos van Dam (WU) voor onderdeel 3.1; Pim Dik (WENR) voor onderdeel 5.1.2; Joost Cruijssen (WENR) voor onderdeel 5.1.3. Verder zijn meetresultaten gebruikt uit andere onderdelen van het Lumbricus-thema 'Bewuste Bodem', zoals: infiltratiemetingen Wormenproef (Nick van Eekeren; LBI), infiltratiemetingen oppervlakkige afvoerproef (Perry de Louw en Vince Kaandorp; Deltares), nitraatuitspoeling van OS-managementproef (Joachim Rozemeijer en Jasperien de Weert (en Bas van der Grift bij opstartfase); Deltares) en nitraatuitspoeling bokashi-proef (Marius Heinen; WENR). Bij de laatste twee proeven ging het vooral om de humificatiecoëfficiënten van de gebruikte organische materialen (gemeten door het Louis Bolk Instituut). Tevens zijn bodemfysische eigenschappen bepaald in twee grondbewerkingsbehandelingen van een proef, uitgevoerd door het Louis Bolk Instituut en WLR en PPO (o.a. Joachim Deru, LBI).

Dit rapport betreft vooral technische achtergronddocumentatie over de aanpassing en toepassing van SWAP gericht op bodemmaatregelen en hydrologische maatregelen. In afzonderlijke eindrapporten zijn de eindbevindingen en eindconclusies samengevat voor de praktijkproeven rond bodemmaatregelen en hydrologische maatregelen (Heinen (red.; 2021; en referenties daarin); De Wit et al., 2021a, b). Een totaal overzicht van Lumbricus is beschreven in Bartholomeus (red.; 2021).



---

# Samenvatting

In het onderzoeksprogramma Lumbricus is in thema 'Bewuste Bodem' aandacht besteed aan het toetsen op effectiviteit van mogelijke maatregelen (zowel bodemgerichte als hydrologische maatregelen) ter verbetering van de waterhuishouding in de bovengrond. Omdat met veldexperimenten voor lang niet alle bodem-gewas-klimaatcombinaties deze bodem- en hydrologische maatregelen getest kunnen worden op hun effectiviteit, ligt het voor de hand om hierbij modellen te gebruiken. Met de modellen kunnen: a) de waarnemingen uit de experimenten verklaard worden (o.a. aandacht voor vochtvoorziening, piekafvoeren, uit- en afspoeling, gewasproductie), b) eventueel (nieuwe) model-concepten gevalideerd en/of gekalibreerd worden en c) de effectiviteit geschat worden voor andere bodem-gewas-klimaatcombinaties. Omdat enkele van de in het veld geteste bodemgerichte en hydrologische maatregelen niet of onnauwkeurig met de toen bestaande versie van SWAP konden worden doorgerekend, zijn in SWAP aanpassingen doorgevoerd om dit mogelijk te maken.

In de literatuur zijn diverse concepten voorgesteld om infiltratie bij aanwezigheid van macroporiën te schematiseren en benaderen. In Lumbricus ging het vooral over de invloed van de aanwezigheid van verticale wormgangen of het effect van gebruik van vertidrainen op infiltratie. Er is gekozen om dergelijke situaties te beschouwen door de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken voor homogene gronden aan te passen in het natte traject via de zogenaamde bimodale variant voor deze karakteristieken. De extra benodigde parameters kunnen worden afgeleid uit het aantal (worm)gangen per oppervlakte-eenheid en de diameter van de (worm)gang. Op deze manier kunnen op eenvoudige wijze de retentie en doorlatendheid onder natte omstandigheden verhoogd worden. Met deze aanpassingen bleek het mogelijk om infiltratiemetingen bij afwezigheid en aanwezigheid van verticale wormgangen (0, 50 en 100 m<sup>-2</sup>) goed na te bootsen. Echter, het betreft hier slechts een paar puntmetingen in ruimte en tijd. Aanvullende meetreeksen zijn dus gewenst om dit concept in de toekomst nader te valideren. Via scenarioberekeningen is nagegaan in hoeverre de aanwezigheid van wormgangen zal leiden tot meer infiltratie en dus minder oppervlakkige afvoer op zandgronden in Nederland. Op basis van de BOFEK2012-schematisatie en de bodemfysische eigenschappen van de Staringreeks 2018 blijkt echter dat deze maatregel weinig effect zal hebben, omdat zelfs bij afwezigheid van wormgangen en/of toepassing van vertidrainen de infiltratiecapaciteit van de landelijk geschematiseerde zandgronden al groot genoeg is. De effectiviteit op andere gronden, zoals zavel- en kleigronden, is wel aantoonbaar via dit modelconcept.

Gevoelsmatig komen deze bevindingen niet overeen met wat vanuit de landbouwpraktijk en praktijk van de waterschappen wordt waargenomen. Ook op zandgronden wordt beperkte infiltratie ervaren en zodoende is het vreemd om hier te constateren dat het voor zandgronden niet nodig lijkt om de infiltratiecapaciteit te verhogen, omdat deze in het algemeen voldoende is. Dit geeft aan dat er een discrepantie is tussen gebiedservaring en modelberekeningen en daarnaast tussen veldsituatie en laboratoriumanalyses, maar ook tussen perceel-bodeminformatie en gegeneraliseerde informatie voor berekening op landelijke schaal zoals BOFEK en de Staringreeks. De uitdaging voor de toekomst is dus om te achterhalen wat de oorzaak is van die beperkte infiltratie bij zandgronden die vooralsnog niet in modelconcepten voorkomt.

Van verschillende soorten grondbewerking kan worden verwacht dat deze invloed hebben op de bodemfysische eigenschappen van de bodem, en daarmee op het hydrologische gedrag. Om hier meer inzicht in te krijgen, zijn deze eigenschappen in drievoud gemeten aan het eind van een achtjarige proef in geploegde (P) plots en in plots waar alleen grondbewerking met een strokenfrees (S) is toegepast. Op basis van een visuele beoordeling zijn de retentiecurven voor de S-behandeling voor de bovenste laag iets naar rechts verschoven (lossere grond) ten opzichte van de P-behandeling; onder droge omstandigheden is de doorlatendheid van de bovengrond voor S geringer dan voor P. In de tweede laag is de porositeit voor de P-behandeling duidelijk lager als gevolg van een hogere dichtheid, hetgeen kan duiden op een ploegzool. Ondanks deze visuele verschillen is de waterbeschikbaarheid in de wortelzone vrijwel gelijk. Dat geldt ook voor de kritieke stijghoogte. Uit voorbeeldsimulaties met

---

SWAP-WOFOST (mais) blijkt dat de transpiratiereductie en gewasgroei weinig verschilt voor beide behandelingen; het is zelfs zo dat de S-behandeling steeds een fractie meer transpiratiereductie per jaar oplevert.

Met de eenvoudige stikstofmodule die in SWAP-WOFOST aanwezig is, kan een eerste inschatting gemaakt worden van de invloed van N op gewasgroei en de bijbehorende N-balansposten. Op deze manier kan onder meer snel inzicht verkregen worden wat de invloed is van het aanwenden van verschillende soorten organische (rest)materialen op de gewasontwikkeling en potentiële nitraatuitspoeling. Het advies blijft om vervolgens de gedetailleerde stikstofbalans door te rekenen met ANIMO. Echter, nu kan ANIMO wel beter gevoed worden met gegevens over gewasontwikkeling die mogelijk door N-limitatie kan zijn beïnvloed.

Naast de hier genoemde bodemgerichte maatregelen is in Lumbricus Bewuste Bodem ook gekeken naar enkele hydrologische maatregelen (klimaatadaptieve drainage met sub-infiltratie; de slimme SAWAX stuw). Hiervoor wordt verwezen naar de rapporten van De Wit et al. (2021a, b) waarin deze maatregelen uitgebreid worden beschreven, inclusief bijbehorende modelsimulaties.

Naast deze toepassingsgerichte voorbeelden is SWAP ook conceptueel getoetst aan de hand van situaties waarvoor analytische oplossingen beschikbaar zijn. Hiermee is aannemelijk gemaakt dat SWAP goed in staat is om infiltratie, stoftransport en bodemtemperatuur als functie van de tijd en diepte te simuleren. Hiermee is aangetoond dat de numerieke oplossingsmethoden in SWAP juist zijn. Belangrijk hierbij is te constateren dat dit goed gaat, juist omdat de bodemfysische eigenschappen en de boven-, onder- en zijrandvoorwaarden exact bekend zijn. In de praktijk wordt SWAP toegepast voor landelijke en regionale studies. Hierbij worden inschattingen gemaakt van perceel-gemiddelde bodemfysische eigenschappen en moeten juiste randvoorwaarden worden ingesteld. Daarbij wordt vaak gebruikgemaakt van de landelijke bodemfysische data zoals beschikbaar in de Staringreeks2018 en BOFEK2012 (binnenkort BOFEK2020). Dat zijn gemiddelde eigenschappen, die dus zeer waarschijnlijk afwijken van de toestand in het studiegebied.

De aanpassingen in SWAP maken het vanaf nu mogelijk om de volgende aspecten te bestuderen.

- De invloed van de aanwezigheid van bioporiën (wormgangen, oude wortelgangen) of vertidrainen. Dat is gedaan door de bestaande (verondersteld geldend voor situaties zonder aanwezigheid verticale gangen) bodemfysische eigenschappen aan te passen op basis van het aantal gangen per vierkante meter en hun diameter. Hiermee kan aangetoond worden dat er meer water kan infiltreren bij grote buien, mits de uitgangstoestand beperkend is.
- Daarnaast is de N-module getoetst op mogelijke nitraatuitspoeling bij toedienen van organische (rest)materialen. Op basis van de afbreeksnelheid (humificatiecoëfficiënt) kan dan een eerste inschatting gemaakt worden van de nitraatverliezen aan de onderzijde van de wortelzone. Hierbij wordt een meer realistisch invoerbestand voor ANIMO gegenereerd, zodat in ANIMO meer in detail de N-balans kan worden doorgerekend.

Uit metingen van bodemfysische eigenschappen en dichtheid voor langjarige geploegde plots en voor langjarige behandelingen met strokenfrees zijn geen grote verschillen naar voren gekomen. Toch is uit de internationale literatuur bekend dat dichtheid, en zeker veranderingen in de tijd van de dichtheid (direct na grondbewerking en de daaropvolgende consolidatie), van invloed is op de bodemfysische eigenschappen. Het verdient daarom zeer de aanbeveling om dergelijke relaties tussen droge bulkdichtheid en waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken ook voor Nederlands bodems vast te stellen.

### **Samenvattend**

Bij aanvang van Lumbricus is in overleg vastgesteld over welke mogelijke maatregelen in het bodemwatersysteem onvoldoende informatie bekend was. In veldexperimenten is geprobeerd meer te weten te komen over juist die maatregelen en de effectiviteit ervan voor bodemkwaliteit, waterbeheer en landbouwproductie. Met veldexperimenten is het echter niet of nauwelijks mogelijk om voor allerlei bodem-gewas-klimaatcondities bodem- en hydrologische maatregelen in het veld te testen op

---

effectiviteit. Daarom gebruiken we simulatiemodellen om de effecten ook voor andere omstandigheden te kunnen onderzoeken.

Bij de start van Lumbricus was het modelinstrumentarium SWAP-WOFOST niet in staat om berekeningen voor alle gekozen maatregelen uit te voeren. In dit rapport zijn aanpassingen en verbeteringen beschreven waardoor dit voor deze maatregelen nu wel mogelijk is geworden. Via het toevoegen van bijvoorbeeld een eenvoudige aanpassing aan de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken kunnen we nu het verschil in infiltratiegedrag van de bovengrond simuleren voor situaties zonder en met aanwezigheid van verticale macroporiën (i.c. wormgangen). De extra benodigde parameters zijn eenvoudig in te schatten op basis van aantal en afmeting van deze extra poriën. Dergelijke model-verbeteringen maken het zodoende beter mogelijk om het effect van maatregelen voor waterbeheerders en landgebruikers te kwantificeren.

Er is echter wel een kanttekening nodig, want ondanks alle inspanningen ontbreekt het vooralsnog aan voldoende robuuste meetgegevens (zowel gegevens voor invoer als gegevens om te valideren) om deze modelaanpassingen goed te valideren. Op basis van de landsdekkende Nederlandse Staringreeks en BOFEK-bouwstenen blijkt op dit moment dat bij afwezigheid van wormgangen de infiltratiecapaciteit bij zandgronden nauwelijks wordt overschreden, waardoor de effectiviteit van wormgangen voor zandgronden nihil zal zijn. Dit ligt niet aan de tekortkoming van de aanpassing, maar aan de tekortkoming van de gemiddelde bodemfysische eigenschappen voor zandgronden voor zover die bekend zijn. In de praktijk wordt beperkte infiltratie wel waargenomen, maar dit kunnen we dus (nog) niet met metingen en simulaties onderbouwen. Voor andere grondsoorten in Nederland blijkt uit de simulaties dat de infiltratiecapaciteit wel duidelijk verbetert indien de optie met wormgangen wordt doorgerekend.



---

# 1 Inleiding

Het onderzoek dat in dit rapport is beschreven, maakt onderdeel uit van het thema 'Bewuste Bodem' van het onderzoeksprogramma Lumbricus (<https://www.programmalumbricus.nl/>; looptijd 2016-2020). Lumbricus is een samenwerkingsprogramma met onderzoeksinstituten en regionale partijen, waarin doelstellingen met betrekking tot waterkwaliteit, zoetwatervoorziening, bodembeheer, klimaatadaptatie en waterveiligheid samenkomen. Kern van het programma Lumbricus is het ontwikkelen en implementeren van een klimaatrobuust bodem- en watersysteem door het op stroomgebiedsniveau geïntegreerd toepassen van innovatieve maatregelen op het gebied van bodem, ondergrond en water. Het Lumbricus-thema 'Bewuste Bodem' richt zich op de bodem als sleutel in vocht- en nutriëntenvoorziening voor landbouw en natuur en op een duurzaam bodem- en waterbeheer voor een gezonde bodem in relatie tot gebruiksfuncties. Het thema richt zich met name op de effectiviteit van hydrologische en bodemmaatregelen op perceelniveau en de verbetering van modellen om de effectiviteit te kunnen beoordelen.

## **Aanleiding, doelstelling**

Waterbeheerders hebben behoefte aan instrumenten en/of simulatiemodellen waarmee zij kunnen onderzoeken of het beter is om te investeren in bodemgerichte maatregelen of hydrologische maatregelen dan wel in andere maatregelen, zoals een noodoverloopgebied. Simulatiemodellen zijn daarbij hulpmiddelen, en zullen dus niet een uniek antwoord opleveren. Het ligt voor de hand dat in de basis wordt uitgegaan van een agrohydrologisch model waarmee de waterhuishouding in de bovenlaag (onverzadigde zone plus een deel van de verzadigde zone) wordt beschouwd, zodat aandacht besteed kan worden aan waterberging, water aan- en afvoer en aan gewasproductie. Hier zal worden uitgegaan van het simulatiemodel SWAP-WOFOST, wat vooral op perceelschaal kan worden toegepast. Recentelijk heeft het model SWAP-WOFOST in het kader van Waterwijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018; zie ook Lumbricus Bewuste Bodem Cluster 1) een upgrade gehad met betrekking tot een juiste inschatting van droogte-, zuurstof- en zoutstress. Daarnaast zijn er echter nog meerdere aspecten die verbeterd c.q. toegevoegd moeten worden in SWAP-WOFOST.

Binnen Lumbricus Bewuste Bodem Cluster 2 wordt daartoe samengewerkt aan het toetsen op effectiviteit van mogelijke maatregelen (bodem, hydrologie) ter verbetering van de waterhuishouding in de bovengrond en de daartoe benodigde aanpassingen c.q. verbeteringen in het model SWAP-WOFOST.

Omdat met veldexperimenten voor lang niet allerlei bodem-gewas-klimaatcondities de bodem en hydrologische maatregelen getest kunnen worden op hun effectiviteit, ligt het voor de hand om hierbij modellen te gebruiken om a) de waarnemingen uit de experimenten te kunnen verklaren (o.a. aandacht voor vochtvoorziening, piekafvoeren, uit- en afspoeling, gewasproductie), b) eventueel (nieuwe) modelconcepten te kunnen valideren en/of kalibreren en c) om de effectiviteit te schatten voor andere bodem-gewas-klimaatcondities.

Omdat enkele van de te testen bodemgerichte en hydrologische maatregelen niet of onnauwkeurig in huidige modellen worden beschouwd, is het doel van dit onderdeel om in een bestaand model de modelcode hierop aan te passen en te toetsen aan de hand van de gegevens die in het veld worden verzameld.

Binnen het thema 'Bewuste Bodem' is een deelproject geformuleerd *Aanpassen en doorontwikkelen modelinstrumentarium ten behoeve van bodem en hydrologische maatregelen*. Het beoogde model-instrumentarium was het model SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017; <https://swap.wur.nl/>), dat geschikt is om lokaal (punt, perceel) de waterbalans in combinatie met gewasgroei te modelleren. In Lumbricus Bewuste Bodem Cluster 2 wordt ook aandacht besteed aan het modelleren van de effectiviteit van de maatregelen. Enerzijds om waarnemingen te kunnen verklaren, anderzijds om modelconcepten te kunnen valideren of kalibreren. Maar ook kunnen de modellen (lokaal en regionaal

---

(zie Lumbricus thema 'Wellend Water')) gebruikt worden om regionale effecten inzichtelijk te maken. Zo vormen zij mede de schakel tussen perceel en regio of stroomgebied.

Omdat in Lumbricus enkele nieuwe bodemgerichte en hydrologische maatregelen in de praktijk zijn getest, was voorzien dat SWAP aanpassingen zou behoeven om de effectiviteit van deze maatregelen te kunnen simuleren.

Bij aanvang van Lumbricus waren derhalve de volgende onderdelen benoemd die in onderhavig deelproject zijn uitgevoerd:

- Effectiviteit van verticale wormgangen, vertidraains of grondbewerking op de infiltratie van water (hoofdstuk 2).
- Regelbare drainage inclusief sub-irrigatie, SAWAX stuw en berekening (hoofdstuk 3).
- Nitraatuitspoeling bij aanwending van organische materialen aan de bodem (hoofdstuk 4).
- Toetsing van bestaande en nieuwe concepten aan de hand van veldmetingen (hoofdstuk 5).
- Algemeen beheer en onderhoud en toevoegen nieuwe testcases (hoofdstuk 6).



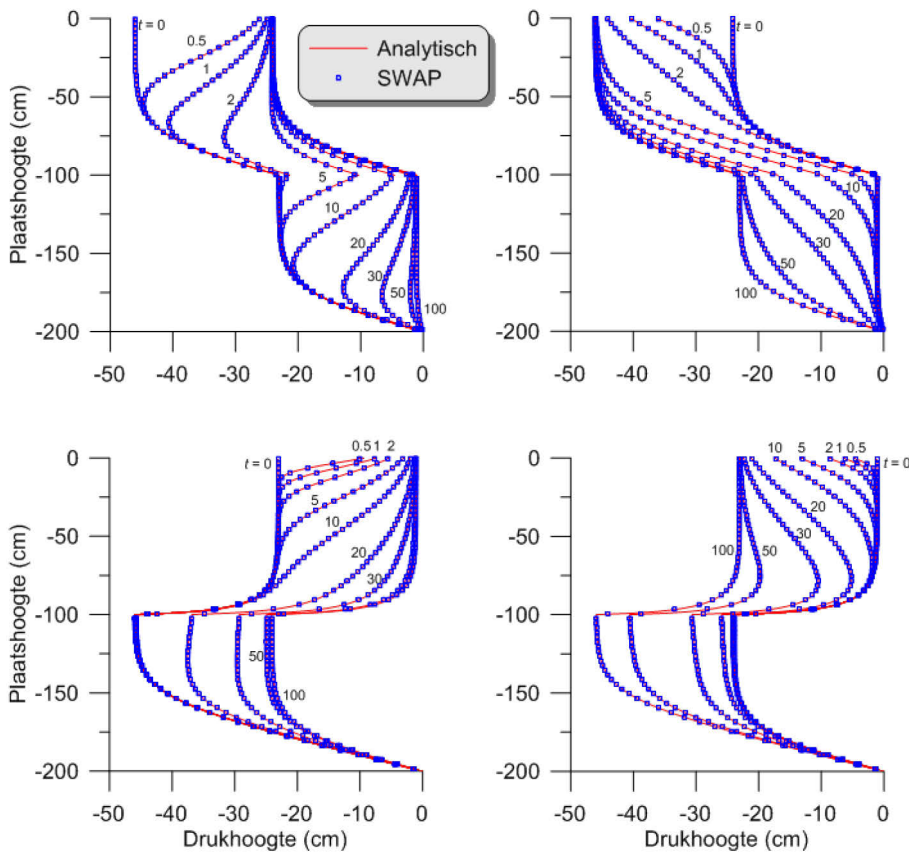
---

## 2 Onderdeel wormen, maaiveldafvoer

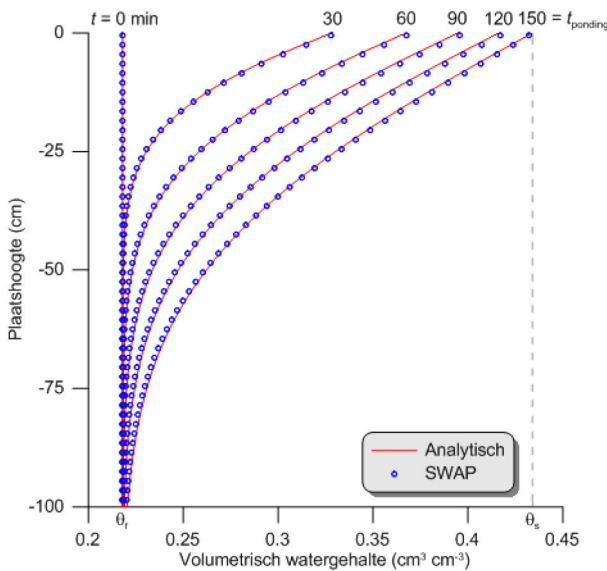
Een van de belangrijke aandachtspunten is de vraag of en in welke mate maatregelen genomen kunnen worden die ervoor zorgen dat meer water kan infiltreren en door de bodem kan worden vastgehouden, waardoor piekafvoeren naar grond- en oppervlaktewater worden gedempt. Om dat goed te kunnen onderzoeken, mede met behulp van modellen, is het van belang dat we er zeker van zijn dat het model het infiltratieproces technisch goed kan beschrijven. In paragraaf 2.1 wordt daarom het modelconcept voor infiltratie getoetst aan de hand van analytische oplossingen. Een van de beoogde maatregelen betrof de invloed van verticale bioporiën (wormgangen) of verticale draingaten (vertidraains). In SWAP bestond al een optie om dit via macroporiën te beschrijven. Hier is echter ook nagegaan of hiervoor mogelijk een eenvoudiger concept gebruikt kan worden. Daarom is eerst gekeken wat voor concepten in de literatuur beschikbaar zijn (quickscan; paragraaf 2.2). Hieruit zijn twee concepten nader toegelicht: het bimodale Mualem-Van Genuchten-concept (paragraaf 2.3) en het bestaande macroporiënconcept in SWAP (paragraaf 2.4). Beide concepten zijn onderling vergeleken voor een willekeurige situatie (paragraaf 2.5). Ten slotte is een voorbeeld gegeven betreffende het effect van een bui-intensiteit op de berekening van infiltratie en oppervlakkige afvoer (runoff; paragraaf 2.6). Hier wordt alvast gemeld dat later het bimodale Mualem-Van Genuchten-concept zal worden gebruikt (hoofdstuk 5).

### 2.1 Verificatie SWAP-infiltratie

Volgens van Schaik et al. (2010) geldt: *"An important threshold for macropore flow initiation is the infiltration capacity of the matrix: as long as the matrix infiltration capacity is not reached, the net precipitation will infiltrate mainly into the matrix, but as soon as the infiltration capacity is exceeded, the water will start ponding and infiltration to macropores will become important."* Dit betekent dat de berekening van de infiltratiesnelheid (of infiltratiecapaciteit) door een simulatiemodel zoals SWAP dus goed beschreven moet worden. Srivastava & Yeh (1991) en Basha (1999) geven analytische oplossingen voor infiltratie. Deze oplossingen gaan uit van exponentiële relaties voor de waterretentie-karakteristiek  $\theta(h)$  en doorlatendheidskarakteristiek  $K(h)$  (zie Bijlage 1). Omdat in SWAP dergelijke relaties oorspronkelijk niet zijn ingebouwd, is SWAP in het kader van dit project aangepast, zodat dergelijke verbanden ook beschouwd kunnen worden. Daarmee is het mogelijk om SWAP-simulaties te vergelijken met de analytische oplossingen. De voorbeelden van Srivastava & Yeh (1991) voor infiltratie in initieel droge en natte gelaagde bodems zijn nagerekend (details eigenschappen en afmetingen: zie Srivastava & Yeh, 1991). Figuur 2-1 en Tabel 2-1 laten de goede overeenkomst zien tussen analytische en SWAP gesimuleerde  $h(z)$  profielen als functie van de tijd voor verschillende gelaagdheden en initiële natte dan wel droge toestand. Ook de flux aan de onderzijde van de grondkolom werd goed door SWAP gesimuleerd (Tabel 2-2; grafiek niet opgenomen).



**Figuur 2-1** Vergelijking analytische oplossing (Srivastava & Yeh (1991); rode lijn) en SWAP-simulaties (symbolen) voor eindimensionale infiltratie in gelaagde bodems:  $h(z)$  voor verschillende tijdstippen  $t$  (uur). Linksboven (A): initieel droog met bovengrond beter doorlatend dan ondergrond; rechtsboven (B): idem maar dan initieel nat; linksonder (C): initieel droog met bovengrond slechter doorlatend dan ondergrond; rechtsonder (D), idem maar dan initieel nat.



**Figuur 2-2** Vergelijking analytische oplossing (Basha (1999); rode lijn) en SWAP-simulaties (symbolen) voor eindimensionale infiltratie:  $\theta(z)$  voor verschillende tijdstippen  $t$  (min).

De analytische oplossing van Basha (1999) geeft  $\theta(z,t)$  en tevens een uitdrukking voor het tijdstip waarop ponding begint. Het voorbeeld van Basha (1991) is nagerekend, waarbij de parameters iets zijn aangepast zodat tijdstip van ponden precies na 150 min optreedt. Figuur 2-2 en Tabel 2-3 laten de goede overeenkomst zien tussen analytische en SWAP gesimuleerde  $\theta(z)$  profielen als functie van de tijd.

**Tabel 2-1** Overeenkomst in  $h(z,t)$  tussen SWAP-simulaties en analytische oplossing van Srivastava & Yeh (1991) uitgedrukt in vier 'goodness-of-fit'-variabelen voor de vier cases uit Figuur 2-1.

Statistics	Time (h)								
	0,5	1	2	5	10	20	30	50	100
<b>A</b>									
Pearsons $r^2$	1.0000	1.0000	1.0000	0.9998	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
NRMSE	-0.0010	-0.0013	-0.0018	-0.0035	-0.0044	-0.0052	-0.0056	-0.0062	-0.0063
NSME	1.0000	1.0000	1.0000	0.9998	0.9999	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
IoA	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b>B</b>									
Pearsons $r^2$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
NRMSE	-0.0025	-0.0029	-0.0031	-0.0033	-0.0031	-0.0026	-0.0024	-0.0023	-0.0022
NSME	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
IoA	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b>C</b>									
Pearsons $r^2$	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	0.9998	0.9998
NRMSE	-0.0051	-0.0054	-0.0054	-0.0056	-0.0061	-0.0082	-0.0108	-0.0133	-0.0139
NSME	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	0.9998	0.9998
IoA	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999
<b>D</b>									
Pearsons $r^2$	0.9998	0.9998	0.9998	0.9997	0.9997	0.9996	0.9996	0.9998	0.9998
NRMSE	-0.0133	-0.0140	-0.0140	-0.0127	-0.0117	-0.0098	-0.0078	-0.0058	-0.0053
NSME	0.9998	0.9998	0.9997	0.9997	0.9997	0.9996	0.9996	0.9998	0.9998
IoA	1.0000	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	1.0000

**Tabel 2-2** Overeenkomst in  $q(t)$  tussen SWAP-simulaties en analytische oplossing van Srivastava & Yeh (1991) uitgedrukt in vier 'goodness-of-fit'-variabelen voor de vier cases uit Figuur 2-1.

Statistics	A	B	C	D
Pearsons $r^2$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
NRMSE	0.0032	0.0075	0.0036	0.0083
NSME	1.0000	0.9999	1.0000	0.9999
IoA	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

**Tabel 2-3** Overeenkomst in  $\theta(z,t)$  tussen SWAP simulaties en analytische oplossing van Basha (1999) uitgedrukt in vier 'goodness-of-fit'-variabelen.

Statistics	Time (min)				
	30	60	90	120	150
Pearsons $r^2$	0.9998	0.9999	0.9998	0.9999	0.9999
NRMSE	0.0019	0.0027	0.0037	0.0039	0.0036
NSME	0.9995	0.9996	0.9995	0.9996	0.9997
IoA	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999

### Samenvattend

De numerieke oplossing van SWAP voor waterbeweging inclusief infiltratie is getoetst tegen een tweetal analytische oplossingen voor infiltratie: de SWAP-uitkomsten zijn identiek aan de analytische oplossingen voor bekende bodemfysische eigenschappen. Wanneer uit SWAP-simulaties blijkt dat er meer of minder infiltratie wordt gesimuleerd dan gemeten, dan is dat zodoende niet toe te schrijven aan problemen met de numerieke oplossing, maar moet het gezocht worden in verbeterde beschrijving of parametrisatie van de bodemfysische eigenschappen.

---

## 2.2 Literatuur – quickscan concepten simulatie macroporiën

### *Eendimensionale modellen*

Totdat er een coherente theorie beschikbaar is voor stroming in macroporeuze bodems stellen Beven & Germann (1982) dat er uitgegaan moet worden van een aanpak waarin twee domeinen worden onderscheiden: de bodemmatrix en de macroporiën. Dertig jaar later kijken Beven & Germann (2013) terug op de vorderingen in o.a. modellering van preferente waterstroming in macroporeuze bodems. Zij stellen dat er vier aanpakken kunnen worden onderscheiden:

1. De bodem wordt gezien als een enkelvoudig continuüm waarin preferente stroming wordt nagebootst door de hydraulische geleidbaarheid nabij verzadiging aan te passen;
2. De bodem bestaat uit twee continuüms: een continuüm is immobiel en het tweede wordt beschreven door Richards-Darcy en er vindt uitwisseling plaats tussen beide;
3. De bodem bestaat uit twee doorlatendheidsdomeinen ('dual-permeability'), met in beide een eigen Richards-Darcy-massabalans (bijv. Gerke & Van Genuchten, 1993);
4. De bodem bestaat uit twee porositeitsdomeinen ('dual-porosity') waarin preferente stroming in macroporiën via eenvoudige opvulling of via een kinematische golfvergelijking wordt beschreven en er uitwisseling met de Richards-Darcy-bodemmatrix plaatsvindt (bijv. SWAP (Kroes et al., 2017) en MACRO (Larsbo & Jarvis, 2003)).

Alle vier de aanpakken blijven echter afhankelijk van de Richards-Darcy-vergelijking welke impliciet veronderstelt dat de bodem homogeen is en dat er sprake is van evenwichtsgradiënten (Beven & Germann, 2013). Volgens Beven & Germann (2013) worden wel degelijk naar alternatieven gezocht, maar deze zijn nog (lang) niet rijp voor praktische toepassing op plot-, veld- of stroomgebiedsschaal. Zo'n aanpak zou kunnen bestaan uit een combinatie van capillaire effecten (stroming) in een heterogene bodem, the Navier-Stokes-vergelijking voor stroming in een macroporie, en een uitbreiding naar grotere, niet-laminaire fluxen. Met andere woorden, er is nog steeds geen overtuigende, geïntegreerde, coherente, fysische theorie voor stroming in macroporeuze bodems (Beven & Germann, 2013). Opvallend genoeg is er in een zeer uitgebreide review over uitdagingen en nieuwe perspectieven in bodemmodellen weinig tot geen aandacht voor modellering bij aanwezigheid van macroporiën (Vereecken et al., 2016).

Aan de hand van metingen en zeer gedetailleerde driedimensionale modellering vergeleken Köhne & Mohanty (2005) drie modelconcepten: twee 'dual permeability'-modellen (DPM), waarbij uitwisseling tussen beide domeinen met een eerste dan wel een tweede orde uitwisselingsterm geschiedde (gebaseerd op Gerke & van Genuchten, 1993), en een 'equivalent continuüm model' (ECM) inclusief bimodale versies van de Mualem (1976) - Van Genuchten (1980) relaties voor de doorlatendheid en waterretentiekaracteristieken (gebaseerd op Durner, 1994). Zij concludeerden dat de twee DPM-modellen in staat zijn om preferente stroming te beschrijven, waarbij het model met de 2<sup>e</sup> orde uitwisseling de voorkeur verdient. Tevens concludeerden zij dat de ECM met de bimodale bodemfysische eigenschappen iets minder goede, maar nog steeds acceptabele resultaten opleverde. In de DPM-modellen worden voor beide domeinen de waterbalansen beschreven met analoge Richards-vergelijkingen en elk met hun eigen retentie- en doorlatendheidskarakteristieken.

De aanduiding bimodaal heeft betrekking op de poriëngrootte-frequentieverdeling: hierin komen dan twee clusters voor, elk met een eigen maximum, waarbij het eerste, meestal een smalle verdeling, betrekking heeft op grote poriën (wormgangen, holten, scheuren) en het tweede heeft betrekking op de poriënverdeling in de bodemmatrix. Als concept bestaat dit idee al langer (bijv. Fonck, 1968; niet betekenend dat dit de eerste verwijzing naar bimodaliteit is in de literatuur). Durner (1994) en Priesack en Durner (2006) beschrijven bimodale varianten van de klassieke Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen (zie verder paragraaf 2.3).

In de DPM-modellen worden voor beide domeinen de waterbalansen beschreven met analoge Richards-Darcy-vergelijkingen en elk met hun eigen retentie- en doorlatendheidskarakteristieken. Diverse anderen stellen dat de stroming in de macroporiën niet beschreven kan worden door Richards-Darcy (bijv., stroming niet laminair) en hanteren andere concepten voor stroming in de macroporiën

en vervolgens uitwisseling met de bodemmatrix. Een kort overzicht van hoe macroporiën in enkele modellen worden beschouwd, staat weergegeven in Tabel 2-4.

**Tabel 2-4** Enkele voorbeelden hoe in simulatiemodellen wordt of kan worden omgegaan met macroporiën.

Model	Beschrijving
MACRO (Larsbo & Jarvis, 2003)	<u>Bodemmatrix</u> : Richards + Mualem-van Genuchten <u>Macroporiën</u> : aangepaste kinematische golftheorie voor stroming in de porie, met uitwisseling (2 richtingen) tussen matrix en porie
SWAP (Kroes et al., 2017)	<u>Bodemmatrix</u> : Richards + Mualem-van Genuchten <u>Macroporiën</u> : zowel een 'main bypass' als een 'internal catchment' subdomein wordt onderscheiden, inclusief laterale uitwisseling met de bodemmatrix
HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2009)	<u>Bodemmatrix</u> : Richards + Mualem-van Genuchten (incl. alternatieven) <u>Macroporiën</u> : eigen massabalans beschreven als Richards + Mualem-van Genuchten; uitwisseling tussen bodemmatrix en macroporiën via een 1 <sup>e</sup> (of 2 <sup>e</sup> ) orde uitwisselingsterm
HYDRUS-2D/3D (Šimůnek et al., 2018)	<u>Bodemmatrix</u> : Richards + Mualem-van Genuchten <u>Macroporiën</u> : expliciet als open ruimte in door te rekenen domein te beschouwen; geen stroming in porie. Alternatief: zie beschrijving bij HYDRUS-1D
DAISY (Hansen, ongedateerd)	<u>Bodemmatrix</u> : Richards + Mualem-van Genuchten (incl. alternatieven) <u>Macroporiën</u> : tijdens stroming in de macroporie vindt geen uitwisseling met de bodemmatrix plaats; water gaat alleen de bodem in aan de onderzijde van de macroporie (bronterm in de Richards-vergelijking)
COUP (Jansson & Karlberg, 2011)	Per rekenlaag wordt bypass berekend wanneer de aanvoersnelheid groter is dan de infiltratiecapaciteit van het rekenlaagje. Bypass gaat naar het volgende rekenlaagje etc. Bypass stopt bij het grondwater. Water in de macroporiën wordt niet expliciet beschouwd
RZWQM (Malone et al., 2004)	<u>Bodemmatrix</u> : infiltratie volgens Green-Ampt <u>Macroporiën</u> : stroming via Poiseuille en zijdelingse uitwisseling met de bodemmatrix via Green-Ampt
APSIM-SWIMv2.1 (Verburg et al., 1996)	<u>Bodemmatrix</u> : Richards + Mualem-Van Genuchten (incl. alternatieven) <u>Macroporiën</u> : beperkt via aanpassing doorlatendheid nabij verzadiging en eventueel via aanpassing waterretentie; niet als apart domein
APSIM-WEIRDO (Brown et al., 2018)	De bodem wordt verdeeld in verschillende cohorten van poriëngrootte (de grootste poriën stellen macroporiën voor) elk met eigen (Poiseuille) doorlatendheid en watervasthoudend vermogen

Het macroporiënconcept van SWAP is reeds eerder toegepast om het effect van wormgangen op preferente stroming te bestuderen door Van Schaik et al. (2010). Recentelijk zijn de macroporieconcepten van HYDRUS-1D (namelijk DPM) en SWAP onderling vergeleken aan de hand van een vergelijking met metingen aan geconditioneerde (laboratoriumexperimenten) heterogene macroporiegeometrieën (Faúndez Urbina et al., 2019). Hoewel beide modellen conceptueel verschillend zijn, waren ze beide in staat om de drukhoogte op verschillende dieptes en de uitstroming aan de onderzijde redelijk te simuleren. Voor beide modellen zijn twee belangrijke parameters geïdentificeerd: de relatieve macro-porositeit en een maat voor de relatieve aggregaat-lengte.

De aanwezigheid van macroporiën heeft ook een groot effect op het vóórkomen van oppervlakkige afvoer (runoff). Doordat er meer water kan worden geborgen (en daarmee infiltreren), zal er minder oppervlakkige afvoer optreden in situaties met macroporiën dan in situaties waarbij geen macroporiën aanwezig zijn. In simulatiemodellen zou dit op een heel simpele manier kunnen worden benaderd door meer berging op het land toe te staan voordat runoff wordt berekend. Echter, dit kan mogelijk leiden tot een juiste voorspelling van oppervlakkige afvoer, maar deze aanpak geeft dan geen goede voorspelling van waterverdeling in de bodem, omdat preferentie stroming niet wordt beschouwd. Deze simpele aanpak zal niet verder worden beschouwd.

---

### Meerdimensionale modellen

De invloed van de aanwezigheid van een verticale wormgang (of anderszins mechanisch aangebrachte verticale gang) is door sommigen in detail met multidimensionale modellen bestudeerd. Alberti & Cey (2011) gebruikten HYDRUS3D om de preferente stroming via een of meerdere macroporiën te bestuderen. Zij concludeerden onder meer dat een toename van de macroporie-dichtheid vrijwel lineair gerelateerd was met de toename in preferente stroming en dat clustering van macroporiën leidt tot (lokale) diepere transportdiepte. Sander & Gerke (2009) gebruikten HYDRUS2D om preferente stroming als gevolg van een wormgang te bestuderen.

Dit zijn twee voorbeelden van zeer gedetailleerd bestuderen van het effect van open wormgangen op infiltratie met specifieke aandacht voor het meerdimensionale karakter. Een dergelijke aanpak leent zich niet voor een meer pragmatische aanpak voor perceelgerichte, eendimensionale simulatiemodellen. En, hoewel het bestuderen van de processen rondom een enkele wormgang inzichten oplevert, zal het uiteindelijk geen bruikbare informatie opleveren voor praktische toepassingen (hooguit voor zeer eenvoudige netwerk geometrieën) (Beven & Germann, 1982).

### Samenvattend

Beven & Germann (1982; 2013) stelden als uitdaging te komen tot een coherente theorie voor stroming in macroporeuze bodems. Tot die tijd stelden zij dat een aanpak bestaande uit twee domeinen – bodemmatrix, macroporiën – het beste alternatief was. Uit een quickscan in de literatuur blijkt dat de twee-domeinen aanpak (ieder met eigen invulling van details) tot nu toe nog het meeste gebruikt wordt. Een coherente theorie lijkt nog niet te bestaan. Als een benadering voor de genoemde coherente theorie voor stroming in macroporeuze bodems zou eventueel een bimodale beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek gebruikt kunnen worden (cf. Köhne & Mohanty, 2005): deze leidt nog tot acceptabele resultaten (Köhne & Mohanty, 2005) en is relatief makkelijk in bestaande modellen in te bouwen en te parametriseren. In de volgende paragraaf wordt de bimodale variant beschreven en in paragraaf 5.1 wordt deze methode toegepast.

## 2.3 Bimodale Mualem-Van Genuchten

In de meeste simulatiemodellen worden de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken beschreven door de relaties van, respectievelijk, Van Genuchten (1980) en Mualem (1976). In hun basale vorm gaan deze uit van een unimodale poriëngrootteverdeling, hetgeen terugkomt, en de vorm van de afgeleide van de waterretentiekarakteristiek, de zogenaamde differentiële vochtcapaciteit. Durner (1994) en Priesack & Durner (2006) geven equivalente Mualem-Van Genuchten-uitdrukkingen voor een bimodale poriëngrootteverdeling. De waterretentiekarakteristiek is gegeven als

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \sum_{i=1}^2 \omega_i \frac{1}{\left(1 + |\alpha_i h|^{n_i}\right)^{m_i}} \quad (2-1)$$

met  $\theta$  het volumetrisch watergehalte ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $h$  de drukhoogte (cm),  $\theta_r$  is een residueel watergehalte,  $\theta_s$  is het watergehalte bij verzadiging,  $\omega_i$  is een weegfactor waarbij geldt  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , en  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) en  $n$  en  $m$  (beide dimensieloos) zijn vormparameters en verschillend voor de 2 klassen  $i$ . Soms wordt de retentiekarakteristiek ook uitgedrukt voor de verzadingsgraad  $S$  (dimensieloos) als

$$S(h) = \sum_{i=1}^2 \omega_i \frac{1}{\left(1 + |\alpha_i h|^{n_i}\right)^{m_i}} \quad (2-2)$$

met  $S$  gegeven als

$$S(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2-3)$$

De doorlatendheidskarakteristiek is gegeven als [NB onder de voorwaarde dat  $m = 1-1/n$ ]

$$\begin{aligned}
K(S) &= K_s \left( \sum_{i=1}^2 \omega_i S_i \right)^\lambda \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^2 \omega_i \alpha_i \left( 1 - (S_i)^{1/m_i} \right)^{m_i}}{\sum_{i=1}^2 \omega_i \alpha_i} \right]^{-2} \\
&= K_s \left( \sum_{i=1}^2 \omega_i S_i \right)^\lambda \left[ \frac{\sum_{i=1}^2 \omega_i \alpha_i \left( 1 - |\alpha_i h|^{n_i-1} S_i \right)}{\sum_{i=1}^2 \omega_i \alpha_i} \right]^{-2}
\end{aligned}
\tag{2-4}$$

met  $K$  de doorlatendheid ( $\text{cm d}^{-1}$ ),  $K_s$  is de doorlatendheid bij verzadiging ( $\text{cm d}^{-1}$ ), en  $\lambda$  is een vormparameter (dimensieloos).

In SWAP is ook de eerste afgeleide van  $\theta(h)$  nodig. Dit is de differentiële vochtcapaciteit  $C(h)$  ( $= d\theta/dh$ ) en wordt voor de bimodale variant gegeven als

$$C(h) = (\theta_s - \theta_r) \sum_{i=1}^2 \omega_i \alpha_i n_i m_i |\alpha_i h|^{n_i-1} \left( 1 + |\alpha_i h|^{n_i} \right)^{-1-m_i}
\tag{2-5}$$

Voor de unimodale en bimodale beschrijvingen zijn de volgende 6, respectievelijk 9 parameters nodig:

- Unimodaal:  $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s, \lambda$  (NB  $m = 1-1/n$ )
- Bimodaal:  $\theta_r, \theta_s, \alpha_1, n_1, K_s, \lambda, \omega_1, \alpha_2, n_2$  (NB  $m_i = 1-1/n_i$ ;  $\omega_2 = 1 - \omega_1$ )

In SWAP worden deze parameters opgeslagen in de tabel 'cofgen'. Vanwege de introductie van de bimodale Mualem-Van Genuchten vergelijkingen is deze tabel uitgebreid (zie Bijlage 2).

### Beperkingen

De huidige bimodale versie van Mualem-Van Genuchten is (nog) niet geschikt om in combinatie met de volgende aspecten gebruikt te worden:

- Hysterese (swhyst = 1)
- Tabellarische invoer fysische eigenschappen (uiteraard kan wel een bimodale variant als tabel worden opgegeven in combinatie met iHWCKmodel = 1)
- Uitvoer gegevens voor een grove discretisatie (swdiscrvert = 1)
- Macroporiën
- Zuurstofstress module oxygenstress
- Impliciet beschouwen  $K$  in oplosschema (swKimpl=1)

Indien de gebruiker een van deze combinaties in de invoer opgeeft, dan zal SWAP dit melden en zal de simulatie niet worden uitgevoerd.

De functie 'prhead', waarin  $h$  wordt berekend op basis van  $\theta$ , kan niet expliciet gegeven worden voor de bimodale variant van MvG;  $h(\theta)$  zal dan iteratief bepaald moeten worden. Omdat deze functie alleen maar wordt aangeroepen bij berekeningen van hysterese, uitvoer voor een grove discretisatie en macroporiën, is het dus (voorlopig) niet belangrijk om de functie 'prhead' geschikt te maken om iteratief een waarde voor  $h$  te vinden voor gegeven  $\theta$ .

Indien de gebruiker de bimodale variant kiest en ook  $h_{enpr}$ -waarden  $< 0$  opgeeft, wordt een waarschuwing gegeven dat  $h_{enpr}$  niet wordt gebruikt.

In SWAP is hysterese ingebouwd onder de veronderstelling dat in de  $K(\theta)$  ofwel  $K(S)$  relatie geen (noemenswaardige) hysterese aanwezig is en hysterese dus alleen in de retentiekarakteristiek  $\theta(h)$  beschouwd hoeft te worden (bijv. cf. experimentele gegevens van Topp, 1969). In de bimodale variant is echter geen sprake meer van een uniek verband in  $K(\theta)$  of  $K(S)$ , omdat  $\theta$  of  $S$  is opgebouwd uit twee deeltermen die berekend moeten worden aan de hand van  $h$ . Dus feitelijk is de doorlatendheid  $K$  gegeven als functie van  $h$ , en  $K(h)$  is ook gekenmerkt door hysterese. Dat betekent dat een zeer

ingrijpende aanpassing van de hysteresefunctionaliteit in SWAP moet plaatsvinden om hysteresis in  $K$  mee te kunnen nemen. Dat valt buiten de mogelijkheden van het onderhavige project.

### Voorbeeld

Priesack & Durner (2006) hebben parameters afgeleid voor gegevens voor een zavelgrond met biologische macroporiën (case 1) en voor een geaggregeerde zavelgrond (case 2) (Tabel 2-5; Figuur 2-3). Case 1 is een typisch voorbeeld voor een situatie bestaande uit een bodemmatrix en een gedeelte met macroporiën: de vorm van de  $C(h)$  curve laat duidelijk twee gescheiden pieken zien, hetgeen duidt op een bimodale poriëngrootteverdeling. Case 2 laat zien dat de bimodale vergelijkingen ook gebruikt kunnen worden om ander gedrag van de waterretentie en doorlatendheid te beschouwen. Uiteraard kan bovenstaande uitgebreid worden naar een hogere orde-modaliteit, mochten metingen daar aanleiding toe geven.

In Figuur 2-3 zijn voor de waterretentie en vochtcapaciteit tevens de bijdragen aan het totaal van beide delen gegeven (immers het totaal is de som van twee delen); voor de doorlatendheid is dat niet mogelijk, omdat de uitdrukking Eq. (2-4) niet-lineair is. Merk op dat voor de doorlatendheid de waarde  $K_s$  betrekking heeft op de bulk: bodemmatrix + macroporiën. Hoewel het wiskundig niet mogelijk is om de afzonderlijke bijdragen in de  $K$ -curve te benoemen, is het toch inzichtelijk te maken dat de  $K$ -curve opgebouwd gezien kan worden als de som van twee afzonderlijke componenten. In Figuur 2-4 is de bimodale Mualem-curve gegeven voor Case 1 uit Tabel 2-5 en zijn twee unimodale versies van de Mualem-curve gegeven met  $\alpha = \alpha_1$  en  $n = n_1$  en  $K_s = K_{s,1} = 0.1 \text{ cm d}^{-1}$  en met  $\alpha = \alpha_2$  en  $n = n_2$  en  $K_s = K_{s,2} = 1 \text{ cm d}^{-1}$ . In het droge traject is de curve volledig bepaald door de eerste curve (bodemmatrix) en in het natte traject voornamelijk door de 2<sup>e</sup> curve (macroporiën). Dit laat ook zien dat er impliciet ook sprake is van twee waarden voor  $K_s$ : een waarde voor bodemmatrix en een waarde voor macroporiën. Hiermee dient rekening gehouden te worden indien we resultaten van unimodale en bimodale rekenvoorbeelden met elkaar willen vergelijken. De som van beide  $K(h)$  relaties is niet gelijk aan Eq. (2-4), maar kan eventueel toch als een vereenvoudigd alternatief gelden. In dat geval kan  $K(h)$  geschreven worden als

$$K(h) = \sum_{i=1}^2 K_{s,i} \frac{\left( \left( 1 + |\alpha_i h|^{n_i} \right)^{m_i} - |\alpha_i h|^{n_i-1} \right)^2}{\left( 1 + |\alpha_i h|^{n_i} \right)^{m_i(\lambda_i+2)}} \quad (2-6)$$

Of,  $K(S_e)$  als

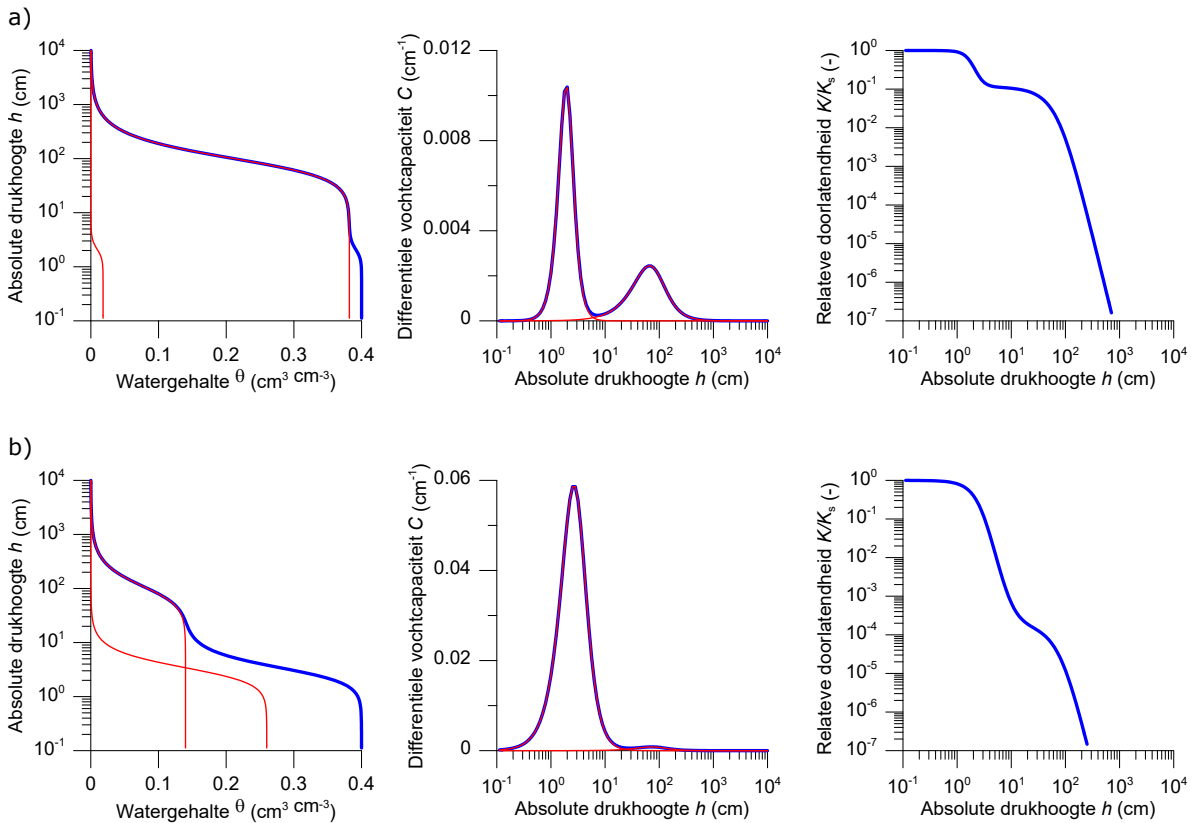
$$K(S_e) = \sum_{i=1}^2 K_{s,i} S_{e,i}^\lambda \left( 1 - \left( 1 - S_{e,i}^{1/m_i} \right)^{m_i} \right)^2 \quad (2-7)$$

Uiteraard geldt dat voor  $\omega_1 = 0.5$  en  $\alpha_2 = \alpha_1$  en  $n_2 = n_1$  de bimodale variant reduceert tot en identiek is aan de unimodale variant.

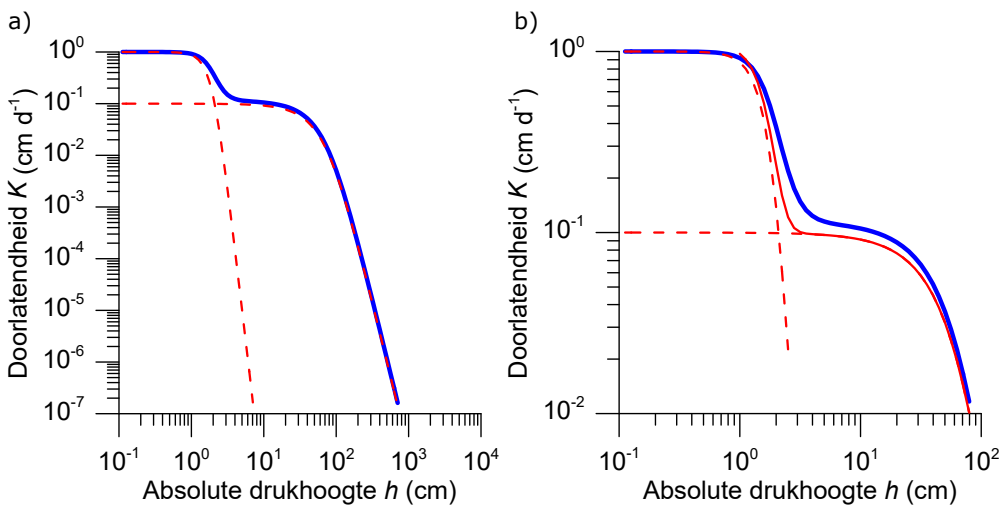
**Tabel 2-5** Vormparameters voor bimodale Mualem-Van Genuchten-relaties voor twee cases (NB  $m=1-1/n$ ;  $\omega_2=1-\omega_1$ ).

Case	$\omega_1$	$\alpha_1$	$n_1$	$\alpha_2$	$n_2$	Bron
1	0.955	0.0123	2.5	0.5	5.0	Priesack & Durner (2006), gebaseerd op metingen van Mohanty (1999)
2	0.65	0.332	3.123	0.0112	2.527	Priesack & Durner (2006), gebaseerd op metingen van Smettem & Kirkby (1990)



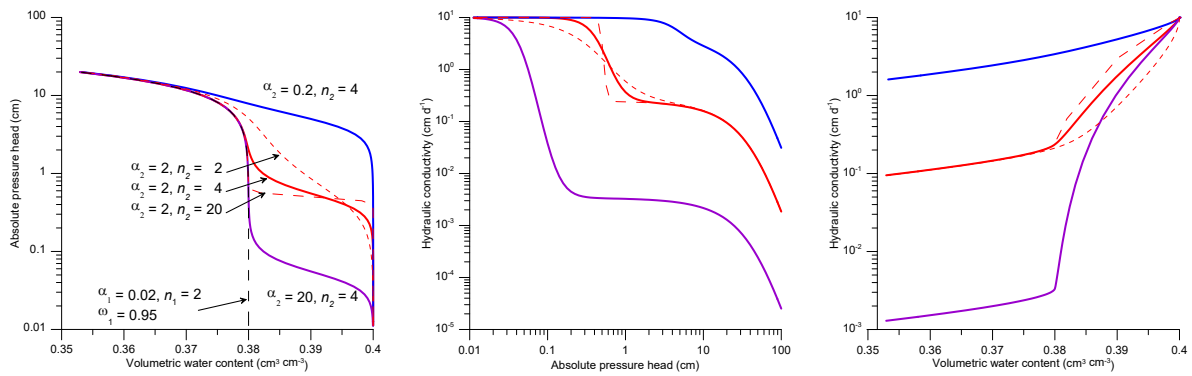


**Figuur 2-3** Grafische weergave waterretentie (linkerkolom), differentiële vochtcapaciteit (middelste kolom) en doorlatendheid (rechterkolom) voor a) case 1 en b) case 2, met bimodale parametersets zoals gegeven in Tabel 2-5, waarbij aangenomen  $\theta_r = 0$  en  $\theta_s = 0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .



**Figuur 2-4** a) Grafische weergave doorlatendheid voor case 1 (blauwe lijn) en 2 Mualem-relaties (rode lijnen) die gezien kunnen worden als componenten voor bodemmatrix en macroporiën; b) zoomt in op het natte traject en laat zien dat bij benadering de som van de twee enkelvoudige Mualem-relaties (rode doorgetrokken lijn, Eq. (2-6) of (2-7)) redelijk de bimodale variant (blauw, Eq. (2-4)) benadert (zie verder tekst).

Met de parameters  $\alpha_2$  en  $n_2$  (of  $m_2$ ) kan de vorm van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristiek nabij verzadiging worden aangepast (effect (biologische) macroporiën). Bijvoorbeeld, voor  $\theta_r = 0$ ,  $\theta_s = 0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_1 = 0.02 \text{ cm}^{-1}$ ,  $n_1 = 2$ ,  $\omega_1 = 0.95$  zijn voor verschillende waarden van  $\alpha_2$  en  $n_2$  enkele voorbeelden van de invloed van deze laatste twee parameters op de vorm gegeven in Figuur 2-5: hoe groter  $\alpha_2$ , des te lager het 2<sup>e</sup> plateau (in  $h(\theta)$  relatie) nabij verzadiging, en hoe groter  $n_2$ , des te vlakker dit 2<sup>e</sup> plateau.



**Figuur 2-5** Grafische weergave  $h(\theta)$  (linkerkolom),  $K(h)$  (middelste kolom) en  $K(\theta)$  (rechterkolom) voor verschillende waarden van  $\alpha_2$  en  $n_2$  en gegeven waarden voor  $\theta_r = 0$ ,  $\theta_s = 0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\alpha_1 = 0.02 \text{ cm}^{-1}$ ,  $n_1 = 2$ , en  $\omega_1 = 0.95$ .

De grootte van de waarden van deze twee parameters bepalen de ligging en waarde van het extra buigpunt dat in de curve wordt toegevoegd. Dit kan aangetoond worden door de eigenschappen van het buigpunt van de klassieke unimodale versie van de van Genuchten-curve te beschouwen. De verzadigingsgraad in het buigpunt  $S_{\text{inf}}$  is gegeven door (bijv., Heinen en Bakker, 2016)

$$S_{\text{inf}} = (1 + m)^{-m} \quad (2-8)$$

De bijbehorende drukhoogte waar dit buigpunt ligt,  $h_{\text{inf}}$ , is dan gegeven door

$$h_{\text{inf}} = -\frac{1}{\alpha} m^{1-m} \quad (2-9)$$

en de helling in het buigpunt,  $C_{\text{inf}}$ , is dan gegeven door

$$C_{\text{inf}} = -\alpha (\theta_s - \theta_r) \frac{m \left( \frac{m}{1+m} \right)^m}{m^2 - 1} \quad (2-10)$$

Dus  $\alpha_2$  en  $m_2$  bepalen zowel de ligging als de helling van het buigpunt. Grofweg geldt: vooral  $\alpha_2$  bepaalt de positie (waarde) van  $h_{\text{inf},2}$ , en  $m_2$  (of  $n_2$ ) bepaalt voornamelijk de helling van het buigpunt. Hiermee kan dus de ligging en vorm van de uitbreiding bepaald worden. In Bijlage 3 wordt een uitwerking gegeven hoe  $\alpha_2$ ,  $m_2$  en  $\omega_1$  ingeschat kunnen worden op basis van het aantal (worm)gangen per vierkante meter en de diameter van de wormgangen.

### Samenvattend

De klassieke beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken volgens Mualem-Van Genuchten gelden voor een unimodale verdeling van de poriëngrootte. Indien die verdeling daarvan afwijkt, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van relatief veel grotere bio- of macroporiën (bimodale verdeling van de poriëngrootte), kan dat beschreven worden met de bimodale variant van de Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen. Bijvoorbeeld, voor wormgangen is hier beschreven hoe de extra benodigde parameters afgeleid kunnen worden op basis van aantal wormgangen per oppervlakte-eenheid en de diameter van de wormgangen. In paragraaf 5.1 wordt deze methode toegepast.

## 2.4 SWAP-optie MacroPore

Zoals in paragraaf 2.2 reeds gemeld, heeft SWAP een optie om macroporiën te beschouwen. Het valt buiten de doelstelling van dit rapport om toe te lichten hoe dit precies gebeurt; details zijn te vinden in hoofdstuk 6 van Kroes et al. (2017). Het ligt sterk voor de hand dat deze optie vooral bedoeld is voor de beschouwing van scheurvorming in kleigronden. Van Schaijk et al. (2010) laten echter zien dat het concept ook toegepast kan worden voor wormgangen.

Tabel 2-6 beschrijft de benodigde input voor de optie MacroPore in SWAP.

**Tabel 2-6** Benodigde input voor optie MacroPore in SWAP.

Variable	Explanation	Remark
<b>Geometry and other general parameters</b>		
Z_AH	Depth bottom A-horizon	
Z_IC	Depth bottom Internal Catchment (IC) domain	
Z_ST	Depth bottom Static macro-pores	
Z_TP	Thickness soil cover on top of macro-pores (GEM)	Optional; default: Z_TP = 0
Z_MB50	Depth for decline with depth of MB domain (to determine exponent PowMb50) (PEARL)	Optional; default: Z_MB50 = $0.5*(Z\_IC+ZST)$
VLMPSTSS	Volume of Static Macro-pores at Soil Surface	
PPICSS	Proportion of IC domain at Soil Surface	Error if PPICSS > 0 and NUMSBDM = 0
NUMSBDM	Number of Subdomains in IC domain	idem
POWM	Power M for frequency distribution curve IC domain	Could be made optional with default 1
RZAH	Fraction macro-pores ended at bottom A-horizon	Could be made optional with default 0
SPOINT	Symmetry Point for frequency distribution curve	Could be made optional with default 1
SWPOWM	Switch for double convex/concave frequency distribution curve	Could be made optional with default 0
DIPOMI	Minimal diameter soil polygons (shallow)	
DIPOMA	Maximal diameter soil polygons (deep)	
PNDMXMP	Threshold value for ponding (cm) on soil surface before overland flow into macro-pores starts	
<b>Parameters for shrinking characteristics</b>		
SWSoilShr [1...numlay]	Switch for kind of soil for determining shrinkage curve	
SwShrInp	Switch for determining shrinkage curve	Could be made optional; not needed if SWSoilShr = 0
ThetCrMP		idem; ThetaCrMP should be less than ThetaS (=cofgen(2))
GeomFac	Geometry factor (3 = isotropic shrinkage)	idem
ShrParA ShrParB ShrParC ShrParD ShrParE	Shrinkage curve parameters	idem
ZnCrAr	Depth at which crack area of soil surface is calculated	
<b>Parameters for exchange between macro-pores and soil matrix</b>		
SwSorp [1...numlay]	Switch for kind of sorptivity function	
SorpFacParl	factor for modifying Parlange function	
SorpMax	maximal sorptivity at theta residual	
SorpAlfa	fitting parameter for empirical sorptivity curve	
ShapeFacMp	Shape factor Darcy exchange	
CritUndSatVol	Idem	
SwDarcy	Idem	
<b>Parameters for rapid drainage</b>		
SwDrRap	Switch for rapid drainage	only possible when at least one drainage level (not checked)
RapDraResRef	Reference rapid drainage resistance	only if SwDrRap = 1
RapDraReaExp	exponent for reaction rapid drainage to dynamic crack width	only if SwDrRap = 1
NumLevRapDra	Number of drainage system connected to rapid drainage	only if SwDrRap = 1
swdtyp(1)		if DRAMET=1
zdrabas = zbotdr(1)		idem

---

De optie MacroPore (swmacro = 1) kan niet toegepast worden in combinatie met:

- Optie vorst (swfrost = 1)
- Initieel grondwater aan maaiveld (swbotb = 1 and gw1 > z(1))
- Doorstart (swinco = 3)
- Bimodale versie Mualem-Van Genuchten (iHWCKmodel = 3)

## 2.5 Voorbeeld toepassing unimodaal, bimodaal en macroporiën

Bodemprofiel met A-horizont (0-30 cm) gegeven door parameters van Case 1 uit Tabel 2-5: voor de unimodale variant zijn alleen de vormparameters  $\alpha_1$  en  $n_1$  gebruikt, met daarbij  $\theta_r = 0$ ,  $\theta_s = 0.42975$ ,  $\lambda = 0.5$  en  $K_s = 0.5 \text{ cm d}^{-1}$ . Voor de bimodale variant zijn  $\alpha_1$ ,  $n_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $n_2$  en  $\omega_1$  gebruikt, met aanvullend  $\theta_r = 0$ ,  $\theta_s = 0.45$ ,  $\lambda = 0.5$  en  $K_s = 5 \text{ cm d}^{-1}$ . De bijhorende curves zijn getoond in Figuur 2-6.

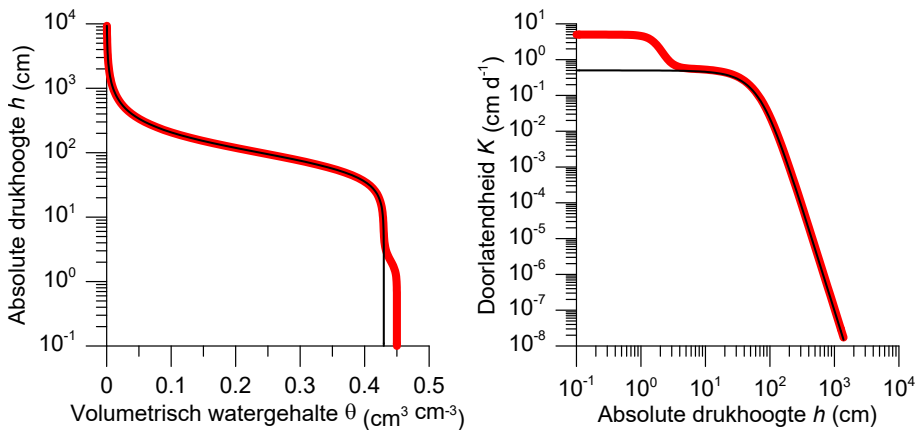
Voor de optie macroporiën is de unimodale variant gebruikt, met aanvullende invoergegevens voor macroporiën zoals gegeven in Tabel 2-7; hierbij zijn twee varianten onderscheiden: a) casus 1: alleen het domein voor preferente stroming werd beschouwd en geen internal catchment; b) casus 2: macroporiën zijn voornamelijk via het internal catchment-domein gerepresenteerd zoals gedaan in Van Schaijk et al. (2010). Er werden geen zwel en krimp en geen snelle drainage verondersteld. De ondergrond (30-200 cm) was een Staringreeks O2-bouwsteen. Er werd gerekend met een constante grondwaterstand op 120 cm -mv ( $h = +80 \text{ cm}$  op 2 m diepte), geen drains en het landgebruik was gemaaid grasland.

Voor de unimodale variant werd in één jaar 25 mm oppervlakkige afvoer (runoff) berekend, voor de bimodale variant was dat slechts 1 mm, terwijl er voor de unimodale+macroporiën-varianten geen runoff werd gesimuleerd (Figuur 2-7 a). Voor de unimodale variant werd in één jaar 626 mm infiltratie aan maaiveld berekend (neerslag was 862 mm), voor de bimodale variant was dat 651 mm, en voor de unimodale+macroporiën-variant was de infiltratie aan maaiveld gelijk aan 518 mm (casus 1) of 488 mm (casus 2) en de infiltratie vanuit de macroporiën de bodemmatrix in, was 136 mm (casus 1) of 165 mm (casus 2), zodat de totale infiltratie voor beide casussen gelijk was aan 653 mm (Figuur 2-7 b).

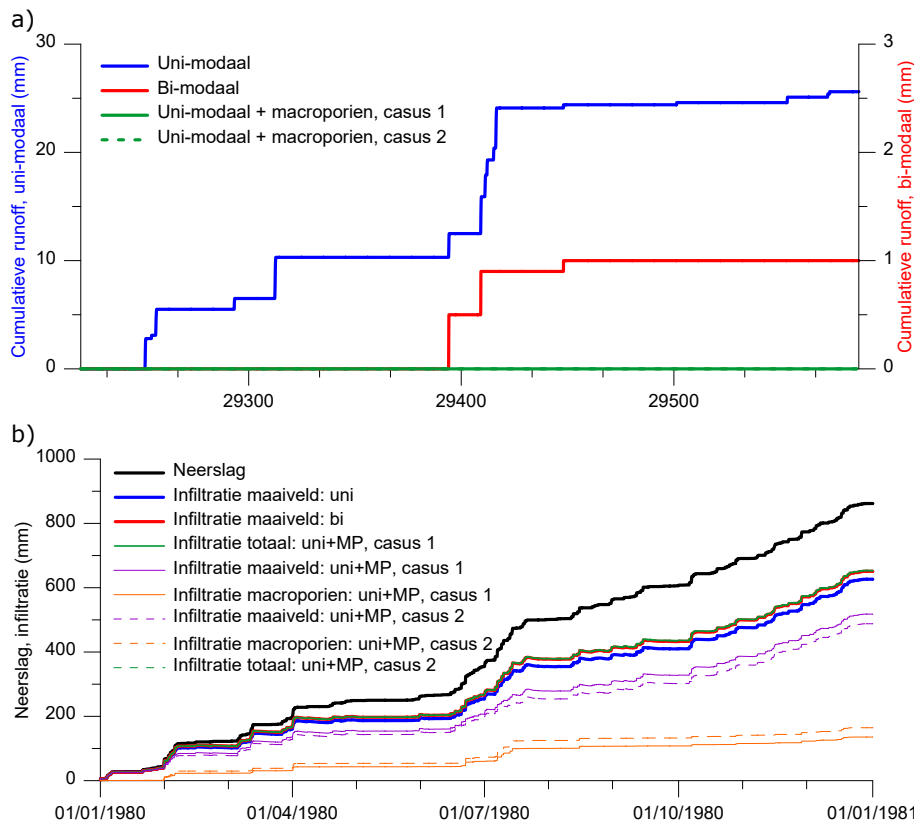
Het verloop van de drukhoogte op 15 cm (midden in A-horizont) en op 60 cm (op maximale diepte van de macroporiën) als functie van de tijd voor de drie varianten, vertoont kleine verschillen (Figuur 2-8; Tabel 2-8): op 15 cm diepte wordt af en toe wat drogere situaties berekend in geval van unimodaal+macroporiën casus 1, terwijl op grotere diepte er kleine piekjes (vernatting) zichtbaar zijn als gevolg van infiltratie vanuit onderzijde macroporiën de bodemmatrix in (voor casus 1). Opvallend is dat de overeenkomst tussen de bimodale variant en de variant unimodaal+macroporiën met alleen internal catchment (casus 2) groot is (Tabel 2-8).

**Tabel 2-7** Macroporiën invoergegevens gebruikt in voorbeeld toepassing.

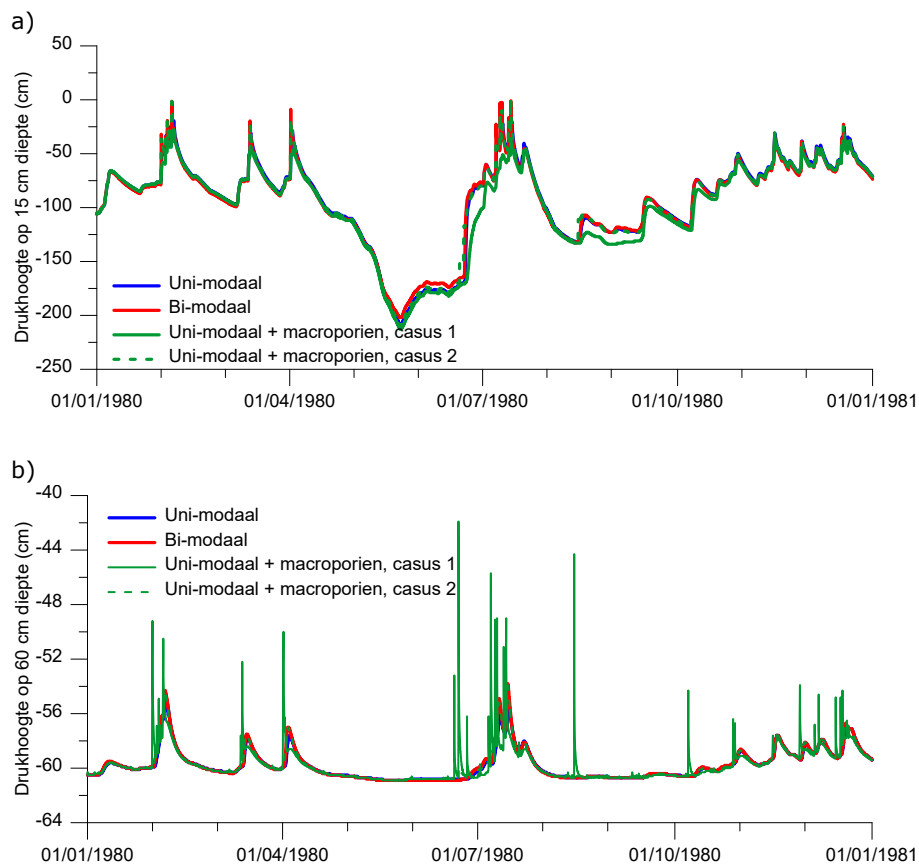
Variabele		Casus 1 (alleen bypass domein)	Casus 2 (voornamelijk internal catchment domein; Van Schaijk et al., 2010)
Z_AH	[cm]	-30	-5
Z_IC	[cm]	-60	-30
Z_ST	[cm]	-60	-42
Z_TP	[cm]	0	0
Z_MB50	[cm]	$0.5*(Z\_IC+Z\_ST)$	$0.5*(Z\_IC+Z\_ST)$
VLMPSTSS	[cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	0.02025	0.04
PPICSS		0	0.99
NUMSBDM		10	18
POWM		1	4
RZAH		0	0.3
SPOINT		1	0.56
SWPOWM		0	0
DIPOMI	[cm]	10	7
DIPOMA	[cm]	50	50
PNDMXMP		0	0
SWSoilShr [1...numlay]		allen 0	allen 0
ZnCrAr	[cm]	0	0
SwSorp [1..numlay]		allen 1	allen 1
SorpFacParl		allen 0.33	allen 0.33
SorpMax	[cm d <sup>-0.5</sup> ]	allen 0.3	allen 0.3
SorpAlfa		allen 0.5	allen 0.5
ShapeFacMp		1.5	1.5
CritUndSatVol		0.1	0.1
SwDarcy		1	1
SwDrRap		0	0



**Figuur 2-6** Grafische weergave waterretentie (links) en doorlatendheid (rechts) voor de unimodale (zwarte lijn; met of zonder macroporiën) en bimodale (rode lijn) situaties in voorbeeld toepassing.



**Figuur 2-7** a) Gesimuleerde oppervlakkige afvoer (let op verschillende y-assen) en b) gesimuleerde infiltratie voor de drie beschouwde situaties in voorbeeld toepassing (uni = unimodaal, bi = bimodaal, MP = macroporiën).



**Figuur 2-8** Tijdsverloop van de drukhoogte op a) 15 cm en b) 60 cm diepte voor de drie beschouwde situaties in voorbeeld toepassing (let op verschil in y-assen).

**Tabel 2-8** Verband tussen gesimuleerde drukhoogtes op twee dieptes (-15, -60 cm) gesimuleerd volgens bimodaal-concept versus unimodaal en twee situaties met optie macroporiën, uitgedrukt als de helling, intercept en  $R_2$ .

	bimodaal vs. unimodaal		bimodaal vs. optie macroporiën, casus 1		bimodaal vs. optie macroporiën, casus 2	
	-15	-60	-15	-60	-15	-60
Helling	0.948	1.090	0.929	0.677	0.959	1.024
Intercept	-5.319	5.416	-2.611	-19.273	-4.408	1.447
$R^2$	0.992	0.970	0.954	0.532	0.994	0.993

### Samenvattend

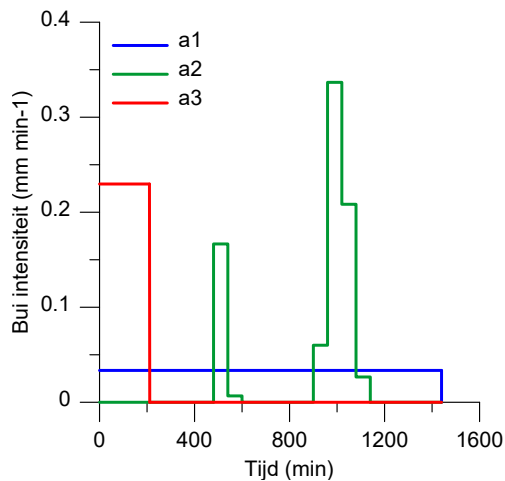
In deze paragraaf is het verschil in infiltratie, runoff en drukhoogte op twee verschillende dieptes getoond voor simulaties met de standaard unimodale Mualem-Van Genuchten-relaties (bodem zonder beschouwing bioporiën), met de bimodale Mualem-Van Genuchten-relaties om bioporiën te beschouwen en met de macroporie-optie van SWAP. Voor een situatie waarbij de unimodale variant leidt tot gesimuleerde runoff, is dat nauwelijks of niet het geval voor de twee simulaties met bioporiën, omdat hier meer infiltratie wordt berekend. De macroporie-optie in SWAP laat zien dat de drukhoogte op grotere diepte af en toe korte periodes van vernatting geeft. Dat kan niet met de bimodale variant verkregen worden. Buiten de buien om zijn de drukhoogteprofielen voor beide bioporie-simulaties vergelijkbaar.

## 2.6 Effect bui-intensiteit en tijdstapgrootte

In dit voorbeeld gaan we in op het effect van een bui-intensiteit op de berekening van infiltratie en runoff. Dat gebeurt op twee manieren: a) beschouwing van de neerslagverdeling over de dag en b) beschouwing van grootte rekentijdstap in het simulatiemodel.

Uitgangssituatie is een vooraf gesimuleerde toestand op 05-06-1998 en vervolgens wordt de neerslag van 06-06-1998 bestudeerd. Dit betreft in totaal 48.3 mm. Drie situaties worden onderscheiden (Figuur 2-9): a1) neerslag evenredig verdeeld over de gehele dag (dagsom;  $0.034 \text{ mm min}^{-1}$ ), a2) gemeten neerslag per uur (uursom; gedurende 6 uurvakken is in totaal 48.3 mm neerslag gevallen variërend van 0.4 tot 20.2 mm per uur ofwel  $0.0067\text{-}0.337 \text{ mm min}^{-1}$ ) en a3) neerslag geconcentreerd in de eerste 210 minuten van de dag (fractie van de dag waarop neerslag is gemeten), dat wil zeggen met een intensiteit van  $0.23 \text{ mm min}^{-1}$  (dagsom+tijdsduur). Merk op dat de fractie waarop neerslag is gevallen in a3) kleiner is dan de fractie van het aantal uurvakken per dag ( $0.146 < 0.25$ ) en dat komt omdat de neerslag niet gedurende de hele tijd in een uurvak is gevallen.

Het is bekend dat in SWAP de processen van ponding en runoff niet volledig impliciet in het oplos-schema zijn opgenomen. Dat houdt onder meer in dat in SWAP niet exact gezocht wordt naar de momenten waarop ponding en/of runoff begint en later weer verdwijnt; met andere woorden, de momenten waarop deze aspecten optreden en verdwijnen (hetgeen gepaard gaat met wijziging van type randvoorwaarde aan de bovenkant van de gesimuleerde bodemkolom), worden niet exact berekend. Omdat in SWAP met variabele tijdstappen wordt gerekend, is het ook voorstelbaar dat situaties die met relatief kleine tijdstappen worden doorgerekend, beter de werkelijkheid zullen benaderen dan situaties waar met grote rekentijdstappen wordt gerekend. Daarom wordt in dit voorbeeld ook gekeken naar het effect van de maximale tijdstap die SWAP mag hanteren. Hier zijn de volgende maximale tijdstappen gebruikt: 0.001 d (ca. 1 min), 0.04 d (ca. 1 uur) en 0.2 d. Voorheen werd meestal 0.2 d gehanteerd, maar in het kader van Waterwijzer Landbouw (Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018) is reeds geadviseerd om 0.04 d te hanteren.



**Figuur 2-9** Bui-intensiteiten voor drie situaties waarbij de neerslag van 48.3 mm op 06-06-1998 over de dag is verdeeld: a1: uniform verdeeld over de dag, a2: uurlijkse neerslagwaarden, a3: dagsom en totale tijdsduur per dag (toegekend aan begin van de dag).

In Kroes et al. (2017) is beschreven hoe runoff in SWAP wordt beschouwd. Hierin spelen met name de volgende twee parameters een belangrijke rol: de drempelhoogte voor waterlaagje op maaiveld waarboven runoff zal gaan optreden  $h_{0,threshold}$  (cm) en een weerstand  $\gamma$  (d). Voor de berekeningen van WaterWijzer Landbouw (Werkgroep WaterWijzer Landbouw, 2018) zijn hiervoor gehanteerd:  $\gamma = 0.5$  d,  $h_{0,threshold} = 0.2$  cm. Recente ervaringen en een poging om  $\gamma$  en  $h_{0,threshold}$  te koppelen aan veldeigenschappen laten zien dat  $\gamma$  kleiner moet zijn en  $h_{0,threshold}$  groter. Daarom hebben we hier gekozen voor  $\gamma = 0.05$  d,  $h_{0,threshold} = 0.5$  cm. Hier worden deze waarden toegepast voor verschillende bodemsoorten. Hoewel de drempelwaarde wat hoger is (die hoeveelheid water zal niet afstromen), is als gevolg van de veel geringere weerstand de netto berekende runoff groter dan in de WWL-berekeningen.

De volgende BOFEK2012 bodemprofielen zijn beschouwd:

- 304 Zwak lemige (podzol)gronden
- 313 Lemige (beekeerd)gronden
- 317 Lemige zandgronden met een dik cultuurdek (enkeerdgronden)
- 408 Lichte zavel op zand (marien en fluviaal)
- 418 Zwarte zavel homogeen profiel (marien en fluviaal)

Al deze profielen komen voor in proeftuin Oost en/of proeftuin Zuid (zie bijv. Heinen et al., 2017).

## Resultaten

De berekende runoff volumes voor de diverse grondsoorten, a1-a3 scenario's en maximale tijdstap-groottes staan vermeld in Tabel 2-9. Neerslag uitgesmeerd over de hele dag (a1) leidt tot onderschatting van runoff; immers, er wordt gerekend met lage neerslagintensiteiten waardoor vaak de infiltratiecapaciteit in het model niet wordt overschreden.

Schokkend is wel dat de uitkomsten, in dit geval met name voor zandgronden, sterk afhankelijk zijn van de invoervariabele  $\Delta t_{max}$ . Dit is nader uitgezocht (hier niet nader in detail toegelicht), waarbij een conceptuele fout in de tijdstapregeling in SWAP is aangepast.<sup>1</sup> Voor scenario's a2 en a3 zijn de nieuw berekende runoff-volumes gegeven in Tabel 2-10: de runoff-volumes zijn nu niet (nauwelijks) meer afhankelijk van de invoervariabele  $\Delta t_{max}$ .

Voor scenario a1 voor BOFEK2012-eenheid 418 leidt de aanpassing van de tijdstapregeling niet tot onderling vergelijkbare runoff-volumes (Tabel 2-10); dat was ook al niet zo voor aanpassing van de tijdstapregeling (Tabel 2-9). Vanwege de veel lagere neerslagintensiteit in scenario a1 versus die in scenario's a2 of a3 zal in SWAP een grotere tijdstap gehanteerd kunnen worden. Bovendien wordt in de numerieke oplossing van SWAP niet gezocht naar het exacte moment waarop de flux

<sup>1</sup> Simulaties voor Waterwijzer Landbouw versie 1 zijn uitgevoerd met  $\Delta t_{max} = 0.4$  d en de fout in tijdstapregeling; simulaties voor Waterwijzer Landbouw versie 2 zijn uitgevoerd met  $\Delta t_{max} = 0.4$  d en de nieuwe tijdstapregeling.



randvoorwaarde aan de bovenzijde (flux = neerslagintensiteit) moet worden vervangen door een druk rand-voorwaarde (drukhoogte = ponding hoogte) en vice versa. Bijlage 4 geeft inzicht hoe het verloop van ponding en runoff verschilt voor de situaties met verschillende  $\Delta t_{max}$ .

**Tabel 2-9** Gesimuleerde runoff (mm) op 06-06-1998 voor vijf BOFEK2012-bodemprofielen waarbij de verdeling van de neerslag volgens drie scenario's is beschouwd (a1, a2, a3) en waarbij drie maximale rekentijdstappen in SWAP worden gehanteerd: voor aanpassing tijdstapregeling in SWAP.

	$\Delta t_{max}$ (d)		
	0.001	0.04	0.2
<b>304 (2001)</b>			
a1) dagsom	0	0	0
a2) uursom	4.8	13.4	14.2
a3) dagsom + tijdsduur	5.1	22.0	30.7
<b>313</b>			
a1) dagsom	0	0	0
a2) uursom	0	8.8	9.9
a3) dagsom + tijdsduur	0	16.6	27.3
<b>317</b>			
a1) dagsom	0	0	0
a2) uursom	0	8.9	10.0
a3) dagsom + tijdsduur	0	17.2	27.9
<b>408</b>			
a1) dagsom	8.7	10.9	21.1
a2) uursom	21.6	23.8	24.1
a3) dagsom + tijdsduur	26.4	29.7	33.2
<b>418</b>			
a1) dagsom	11.8	13.2	20.1
a2) uursom	22.2	23.9	24.0
a3) dagsom + tijdsduur	26.9	29.5	32.3

**Tabel 2-10** Gesimuleerde runoff (mm) op 06-06-1998 voor 5 BOFEK2012-bodemprofielen voor scenario's a2 en a3 en waarbij drie maximale rekentijdstappen in SWAP worden gehanteerd: na aanpassing tijdstapregeling in SWAP.

	$\Delta t_{max}$ (d)		
	0.001	0.04	0.2
<b>304 (2001)</b>			
a2) uursom	4.8	4.8	4.8
a3) dagsom + tijdsduur	5.1	6.1	6.1
<b>313</b>			
a3) dagsom + tijdsduur	0.0	0.9	0.9
<b>317</b>			
a3) dagsom + tijdsduur	0.0	0.6	0.6
<b>408</b>			
a3) dagsom + tijdsduur	26.4	26.8	26.9
<b>418</b>			
a1) dagsom	11.8	12.9	18.3
a2) uursom	22.3	22.4	22.4
a3) dagsom + tijdsduur	27.1	27.6	27.7

### Samenvattend

De berekening van runoff (oppervlakkige afvoer) in SWAP is sterk afhankelijk van hoe de dagelijkse neerslag wordt verdeeld over de dag. Indien deze wordt uitgesmeerd over de hele dag, dan wordt veel minder (of geen) oppervlakkige afvoer gesimuleerd. Het gebruik van uurlijkse neerslaggegevens of de neerslag toekennen aan de fractie van de dag dat het heeft geregend, geven in de hier gehanteerde voorbeelden wel ongeveer gelijke oppervlakkige afvoer (na correctie tijdstapregeling in SWAP).

---

## 3 Onderdeel regelbare drainage en SAWAX

Bij het onderzoek naar hydrologische maatregelen (zie De Wit et al., 2021a, b) zijn in SWAP een paar aanpassingen doorgevoerd. Dit betreft de uitbreiding in de standaard drainage optie, zodat ook daar adaptieve drainage mee beschouwd kan worden (paragraaf 3.1; met dank aan Jos van Dam) en enkele verbeteringen en aanpassingen in de beregeningsopties (paragraaf 3.2).

### 3.1 Aanpassing adaptieve drainage in basic drainage option

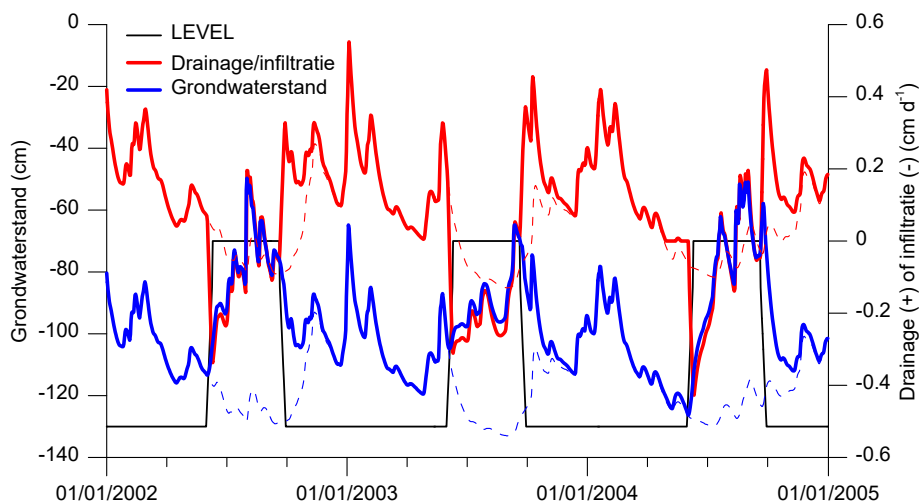
(met dank aan Jos van Dam)

Voor de basic drainage optie in SWAP is het mogelijk gemaakt om adaptieve drainage te beschouwen. Voor draintype buisdrainage geldt dat deze op een vast installatiediepte aanwezig zijn (ZBOTDR). Via een tijdsafhankelijk 'uitstroomniveau' (LEVEL) kan nu worden aangegeven of drainage kan optreden (Grondwaterstand > ZBOTDR > LEVEL) dan wel infiltratie (indien toegestaan) kan optreden.

SWAP kent de mogelijkheid om maximaal vijf drainagesystemen te onderscheiden, welke afzonderlijk van elkaar opereren. Er vindt echter geen controle plaats over consistentie van de invoer voor verschillende systemen. Dit vraagt dus om een goede check van de invoer door de gebruiker. Bijvoorbeeld, indien de grotere drainagesystemen (sloot, kanaal) alleen een laag peil hebben (beneden drain-buisniveau) en er wordt gesteld dat voor buisdrainage het niveau LEVEL ondiep is, treedt infiltratie via de drainbuizen op, terwijl er in werkelijkheid geen wateraanvoer mogelijk zou zijn. Dus de tijdsafhankelijke waarden voor LEVEL voor buisdrainage moet afgestemd zijn met niveaus van overige watervoerende systemen.

#### Test

De standaard met SWAP uitgeleverde test case 'Hupsel' is als uitgangspunt genomen. Vervolgens is voor de 'basic drainage' situatie (SWDRA = 1) de optie met regelbare drainage aangezet (DRAMET = 3). Er is één drainageniveau (NRLEVS = 1): buis drains (SWDTYP = 1) met onderlinge afstand 20 m (L1) op diepte 120 cm (ZBOTDR) en met drainage- en infiltratieweerstand van 100 d (DRARES, INFRES; SWALLO1 = 1). Een fictief tijds patroon voor LEVEL werd opgelegd: -130 cm voor oktober tot juni en -70 in periode juni tot oktober. De gesimuleerde grondwaterstand en drainage dan wel infiltratiefluxen zijn weergegeven in Figuur 3-1, waarin ook LEVEL is weergegeven. Bij een diep niveau van LEVEL treedt drainage op, terwijl er bij ondiep niveau LEVEL infiltratie wordt gesimuleerd. Ter vergelijking zijn de simulatieresultaten van SWAP, waarin regelbare basic drainage nog niet aanwezig was, ook weergegeven als stippellijnen.



**Figuur 3-10** Voorbeeld van verloop drainage/infiltratie en grondwaterstand bij buisdrainage voor opgelegde drainageniveaus (LEVEL). De gestippelde lijnen geven het verloop indien adaptieve drainage niet gesimuleerd kan worden (versie SWAP 4.0.1).

### Samenvattend

Voor de basic drainage optie in SWAP is het mogelijk gemaakt om adaptieve drainage te beschouwen.

## 3.2 Berekening

In de beregeningsmodule van SWAP zijn enkele kleine verbeteringen doorgevoerd: o.a. diverse berekeningen hoeven per gewas slechts eenmalig. De optie berekening op basis van overschrijding drukhoogte dan wel watergehalte op sensordiepte (optie 5) is opgesplitst in of overschrijding drukhoogte (optie 7), of overschrijding watergehalte (optie 8).

---

## 4 Onderdeel stikstofmodule

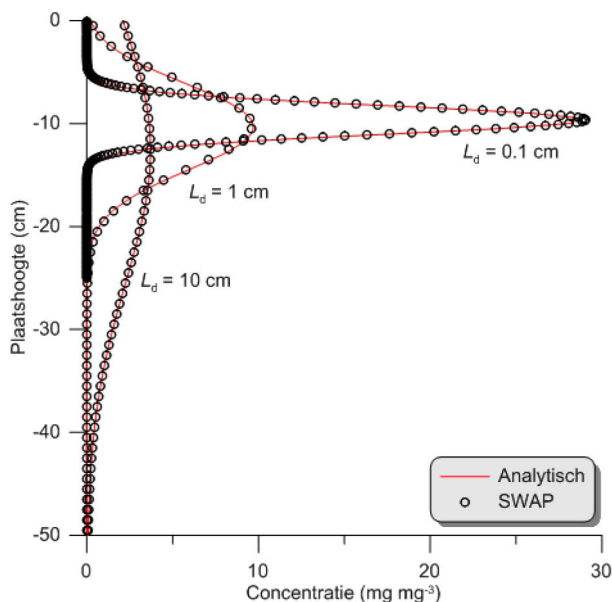
Lumbricus Bewuste Bodem richtte zich niet alleen op waterkwantiteitsaspecten, maar er is ook beperkt aandacht besteed aan waterkwaliteit, met name gericht op nitraatuitspoeling naar het bovenste grondwater (De Weert et al., 2020; Heinen (red.), 2021). In SWAP kan stoffentransport gemodelleerd worden. In paragraaf 4.1 wordt de oplossing voor stoffentransport in SWAP vergeleken met een analytische oplossing. Omdat bij omzettingsprocessen van stoffen de bodemtemperatuur een belangrijke rol speelt, is in paragraaf 4.2 de oplossing voor bodemtemperatuur in SWAP vergeleken met een analytische oplossing. De N-module in SWAP (Groenendijk et al., 2017) kan gebruikt worden om een eerste inschatting van de N-balans te berekenen, rekening houdend met gewasgroei en eventueel gereduceerde gewasgroei als gevolg van watertekorten of -overlast. De N-module is uitgebreid met specifieke uitvoer die gebruikt kan worden in eventuele naberekeningen met ANIMO (paragraaf 4.3). Belangrijke invoer voor de N-module (en ook voor ANIMO) is de humificatiecoëfficiënt van organische materialen die aan de bodem worden toegediend. Binnen Lumbricus Bewuste Bodem is voor een drietal materialen de humificatiecoëfficiënten bepaald (paragraaf 4.4).

### 4.1 Verificatie SWAP stoftransport

In SWAP wordt stoffentransport numeriek via een expliciete methode opgelost. Om de juistheid van deze oplossing te testen, wordt een vergelijking gemaakt met een analytische oplossing. De analytische oplossing heeft betrekking op een stationaire waterstroom door een verticale grondkolom waarbij gedurende een korte tijd aan de bovenkant een verhoogde stofconcentratie met het water wordt meegegeven. Voor deze situatie geven Van Genuchten & Alves (1982) een analytische oplossing (zie Bijlage 5). Belangrijke parameters hierbij zijn: geen retardatie of exclusie ( $R = 1$ ), de dispersiecoëfficiënt  $D$  ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ ) welke gelijk is aan de dispersie lengte  $L_d$  (cm) maal de stroomsnelheid van water  $v$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ), met  $v = q/\theta$  waarbij  $q$  de fluxdichtheid is ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{d}^{-1} = \text{cm d}^{-1}$ ) en  $\theta$  het (constante) volumetrisch watergehalte ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ). De initiële concentratie in de grondkolom is  $c_i$  ( $\text{mg cm}^{-3}$ ), de concentratie van de puls input is  $c_0$  ( $\text{mg cm}^{-3}$ ) en de tijdsduur van de concentratie input is  $t_0$  (d). In het voorbeeld nemen we:  $t_0 = 1 \text{ d}$ ,  $q = 0.1 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ,  $\theta = 0.319 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ,  $L_d = 0.1, 1 \text{ or } 10 \text{ cm}$ ,  $c_i = 0 \text{ mg cm}^{-3}$ , en  $c_0 = 319 \text{ mg cm}^{-3}$ . Figuur 4-1 laat de goede overeenkomst zien tussen de analytische oplossing en de door SWAP gesimuleerde  $c(z)$  verdeling in de grondkolom voor  $t = 31 \text{ d}$ . Voor alle situaties geldt dat de overeenkomst in termen van Pearson  $R^2$ , of Wilmott (1982) 'index of agreement', of Nash-Sutcliffe (1970) 'modelling efficiency'  $> 0.999$  is; de 'normalized root mean square error' was 0.049, 0.046 en 0.002 voor, respectievelijk,  $L_d = 0.1, 1$  en  $10 \text{ cm}$ .

Voor  $L_d = 1$  en  $10 \text{ cm}$  zijn in SWAP compartimenten met een dikte  $\Delta z = 1 \text{ cm}$  gebruikt, en voor  $L_d = 0.1 \text{ cm}$  was  $\Delta z = 0.1$ . Voor geringe dispersielengtes moeten dunnere numerieke compartimenten gebruikt worden om een nauwkeurige, oscillatievrije oplossing te verkrijgen zoals nader toegelicht in Bijlage 6.

NB In het verleden werden SWAP-stoffentransportuitkomsten vergeleken met een analytische oplossing voor de situatie met  $t_0 = 0$ , waarbij de input als een momentane puls (Dirac puls) werd beschouwd. Omdat SWAP een momentane input niet kan simuleren, was die vergelijking iets minder goed dan zoals hier gegeven.



**Figuur 4-1** Vergelijking analytische oplossing en SWAP-simulaties voor eendimensionale puls input van een stof aan de bovenzijde voor drie waarden van dispersielengte  $L_d$ .

**Tabel 4-1** Overeenkomst in  $c(z)$  tussen SWAP-simulaties en analytische oplossing gegeven door Van Genuchten & Alves (1982), uitgedrukt in vier 'goodness-of-fit'-variabelen.

Statistics	$L_d = 0.1 \text{ cm}$	$L_d = 1 \text{ cm}$	$L_d = 10 \text{ cm}$
Pearsons $r^2$	0.9994	0.9997	1.0000
NRMSE	0.0491	0.0459	0.0020
NSME	0.9994	0.9996	1.0000
IoA	0.9999	0.9999	1.0000

### Samenvattend

De numerieke oplossing van SWAP voor stoffentransport is getoetst tegen een analytische oplossing: de SWAP-uitkomsten zijn identiek aan de analytische oplossing.

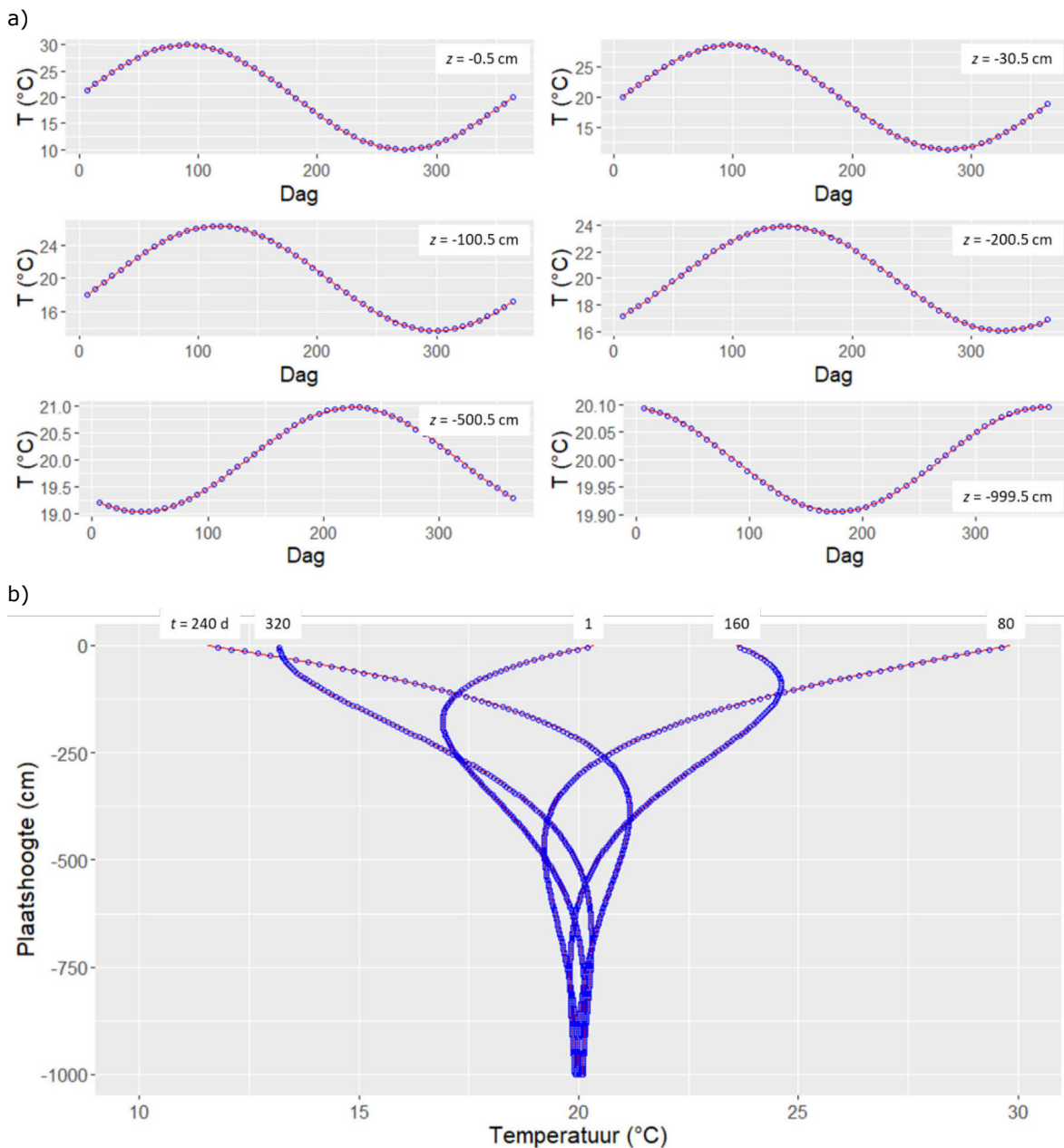
## 4.2 Verificatie SWAP-bodemtemperatuur

Bij het onderdeel stikstofmodellering speelt de bodemtemperatuur een rol bij omzettingsprocessen. Hier wordt de warmtetransportmodule van SWAP vergeleken met een analytische oplossing bij steady-state watergehalten in een uniforme bodem (zie Bijlage 7).

In Figuur 4-2 is de overeenkomst tussen gesimuleerde en analytische oplossing getoond: de overeenkomst is zeer goed (Tabel 4-2). De gebruikte parameters zijn:  $T_{\text{mean}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{ampl}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\omega = 2\pi/365 \text{ d}^{-1}$ ,  $t_{\text{max}} = 90 \text{ d}$ ,  $C_h = 1.702 \text{ J cm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  en  $\lambda_h = 676.465 \text{ J cm}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . De initiële  $T(z, t=0)$  verdeling en de randvoorwaarde  $T(z=0, t)$  en  $T(z=-1000, t)$  waren berekend met de analytische oplossing en opgelegd aan SWAP.

**Tabel 4-2** Overeenkomst in  $T(z,t)$  tussen SWAP-simulaties en analytische oplossing (gegeven in Bijlage 7), uitgedrukt in drie 'goodness-of-fit'-variabelen.

Depth (cm)	Pearsons $r^2$	RMSE	NSME
-0.5	1.0000	0.0023	1.0000
-30.5	0.9999	0.0487	0.9999
-100.5	0.9999	0.0341	0.9999
-200.5	0.9999	0.0208	0.9999
-500.5	0.9999	0.0057	0.9999
-999.5	0.9997	0.0012	0.9997
1	1.0000	0.0054	1.0000
80	1.0000	0.0132	1.0000
160	1.0000	0.0180	0.9999
240	1.0000	0.0213	0.9999
320	1.0000	0.0128	1.0000



**Figuur 4-2** Vergelijking analytische oplossing en SWAP-simulaties voor bodemtemperatuur: a) als functie van de tijd voor zes verschillende dieptes (gesimuleerde waarden per week geplot; let op verschillende y-assen), en b)  $T$ -diepte profielen voor vijf tijdstippen (gesimuleerde waarden per 5 cm geplot).

## Samenvattend

De numerieke oplossing van SWAP voor bodemtemperatuur is getoetst tegen een analytische oplossing: de SWAP-uitkomsten zijn identiek aan de analytische oplossing.

## 4.3 Aanpassing in SWAP-WOFOST-N

Groenendijk et al. (2016) beschrijven de uitbreiding van SWAP-WOFOST met een N-module. De N-module is met name gericht op de invloed van mogelijke N-limitatie (naast eventuele limitatie door water of zuurstof) op gewasontwikkeling. Hiermee wordt een betere inschatting van gewasgroei verkregen dan wanneer alleen naar water/zuurstof-limitatie wordt gekeken. De N-balans wordt, c.f. de werkwijze van WOFOST, beperkt tot één laag die de wortelzone representeert. Dat betekent dat de N-balans op grove schaal wordt bijgehouden. Dus deze N-module is minder geschikt om gedetailleerde uitspraken over bijvoorbeeld uitspoeling te doen. Uitspoeling kan benaderd worden door de uitgaande post aan onderzijde wortelzone te vermenigvuldigen met een factor conform de LMM-werkwijze. De voor- en nadelen van de N-module zijn verder benoemd in Groenendijk et al. (2016).

Voor een beter inzicht in de N-balans en N-stromen in de bodem is het advies om ANIMO (Groenendijk et al., 2005; Renaud et al., 2005) te gebruiken. Destijds is er niet voor gekozen om ANIMO in SWAP-WOFOST te integreren vanwege de complexiteit van beide modellen. ANIMO kan alleen gebruikt worden wanneer er gegevens van een waterbalansmodel (SWAP of evt. WatBal (Berghuijs-van Dijk, 1985)) beschikbaar zijn wanneer er gegevens over gewasontwikkeling beschikbaar zijn. In STONE (Wolf et al., 2003) wordt bijvoorbeeld via het model QuadMod (Ten Berge et al., 2000) een gewas uitwisselingsbestand voor ANIMO gegenereerd waarin onder andere de N-opname als functie van de tijd wordt aangeleverd. Daarom is besloten om zo'n uitwisselingsbestand vanuit SWAP-WOFOST-N te genereren, zodat het mogelijk wordt om na een SWAP-WOFOST-N simulatie een vervolgberekening met ANIMO uit te voeren (Tabel 4-3). Hierin worden naast uitwisseling van N-gegevens ook P-gegevens vermeld. Deze laatste zijn voorlopig (P ontbreekt immers in SWAP-WOFOST) gebaseerd op een vaste P:N-verhouding in het gewas (P:N = 0.1). Tevens is een foutje verwijderd in de berekening van de waterbalans in de N-module.

**Tabel 4-3** Fictief voorbeeld van uitwisselingsbestand *crop\_ext* (gegenereerd door SWAP-WOFOST-N en input voor ANIMO). Gemakshalve zijn hier alleen de tiendaagse gegevens voor de periode april-oktober getoond.

year-mo-da	nishmi	nishma	niromi	niroma	poshmi	poshma	poromi	poroma
1991-04-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-04-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-04-03	5.9347E-01	1.1869E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-05-01	2.4627E+00	4.9254E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-05-02	3.1311E+00	6.2622E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-05-03	3.8206E+00	7.6413E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-06-01	6.0410E+00	1.0561E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-06-02	8.5465E+00	1.3932E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-06-03	9.4325E+00	1.4930E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-07-01	9.7951E+00	1.5163E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-07-02	9.5848E+00	1.4601E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
1991-07-03	8.8254E+00	1.2841E+00	3.8724E+01	3.9815E-01	5.9997E-02	5.8086E+01	5.9723E-01	8.9995E-02
1991-08-01	6.7338E+00	9.5343E-01	9.1962E+01	9.4554E-01	1.4248E-01	1.3794E+02	1.4183E+00	2.1372E-01
1991-08-02	5.8120E+00	8.2292E-01	1.6841E+02	1.7315E+00	2.6092E-01	2.5261E+02	2.5973E+00	3.9138E-01
1991-08-03	5.2769E+00	7.4714E-01	2.1868E+02	2.2485E+00	3.3882E-01	3.2802E+02	3.3727E+00	5.0822E-01
1991-09-01	3.8439E+00	5.4425E-01	3.4668E+00	3.5645E-02	5.3713E-03	5.2002E+00	5.3467E-02	8.0569E-03
1991-09-02	6.6940E-01	9.4780E-02	4.8421E+01	4.9786E-01	7.5021E-02	7.2632E+01	7.4679E-01	1.1253E-01
1991-09-03	0.0000E+00	0.0000E+00	7.9018E+01	8.1245E-01	1.2243E-01	1.1853E+02	1.2187E+00	1.8364E-01
1991-10-01	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1905E+02	1.2241E+00	1.8445E-01	1.7858E+02	1.8361E+00	2.7667E-01
1991-10-02	0.0000E+00	0.0000E+00	1.5451E+02	1.5886E+00	2.3939E-01	2.3176E+02	2.3829E+00	3.5908E-01
1991-10-03	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4027E+02	1.4422E+00	2.1733E-01	2.1041E+02	2.1634E+00	3.2599E-01

**Toelichting:**  
nishmi, nishma, poshmi, poshma : minimum en maximum N en P fractie in scheut (-)  
niromi, niroma, poromi, poroma : minimum en maximum N en P fractie in wortel (-)  
year-mo-da : datum  
Ntotuptake, Ptotuptake : totale opname N en P in afgelopen periode (kg ha<sup>-1</sup>)  
DMcressurf, N-cressurf, P-cressurf : gewasverliezen droge stof, N en P (scheut; kg ha<sup>-1</sup>)  
DMcresbott, N-cresbott, P-cresbott : gewasverliezen droge stof, N en P (wortel; kg ha<sup>-1</sup>)

## Samenvattend

Simulaties met de N-module van SWAP-WOFOST leiden tot een aangepaste invoertabel voor vervolgberekeningen met ANIMO. De aanpassing betreft een realistischere inschatting van gewasgroei en stikstofbehoefte dan wanneer SWAP-WOFOST of een ander waterbalansmodel zonder N-module wordt beschouwd.

## 4.4 Gemeten humificatiecoëfficiënten

De humificatiecoëfficiënt ( $h_c$ ) geeft de fractie weer van vers organisch materiaal dat één jaar na toediening nog over is in de bodem, de zogenaamde effectieve organische stof. Hoe lager  $h_c$ , des te gemakkelijker breekt het materiaal af. Tabel 4-4 geeft de gemeten waarden voor  $h_c$  voor bokashi (Heinen (red.), 2021), insectensubstraat en een compost (De Weert et al., 2020) zoals verkregen in Lumbricus Bewuste Bodem. In genoemde referenties worden deze waarden vergeleken met waarden voor andere soorten organische materialen.

**Tabel 4-4** De gemeten humificatiecoëfficiënt en (effectieve) organische stofgehalten van verschillende organische mestsoorten zoals gerapporteerd in Heinen (red.) (2021; bokashi) en De Weert et al. (2020; insectensubstraat, keurcompost).

Mestsoort	Humificatie-coëfficiënt	Organische stof (kg ton <sup>-1</sup> )	Effectieve organische stof (kg ton <sup>-1</sup> )	Initiële leeftijd (jaar)
Bokashi	0.78	131	102	4.09
Insectensubstraat	0.30	433	129	1.26
Keurcompost <sup>1</sup>	(0.99)	124	(123)	(35.7)

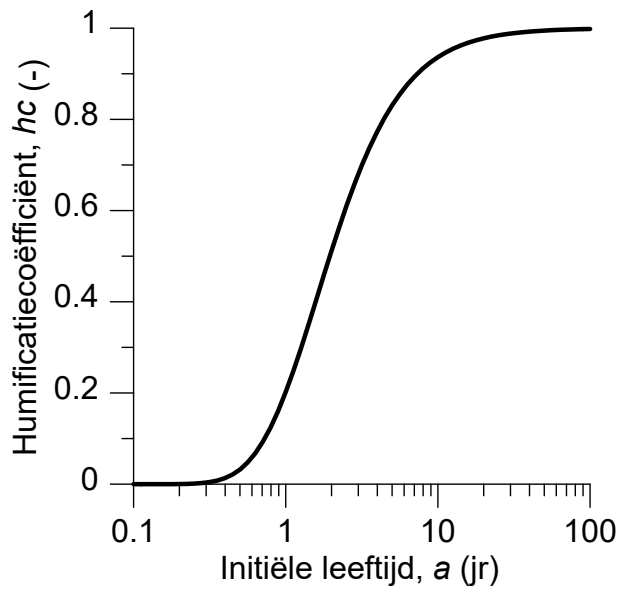
1: de meting voor keurcompost wordt in twijfel getrokken; zie toelichting in De Weert et al. (2020).

Bij modellering van organische stof wordt in sommige gevallen het MINIP-model van Janssen (1984) gehanteerd. Hierin wordt een afbraakcoëfficiënt voor het organisch materiaal gebruikt die de zogenaamde initiële (of 'apparent') leeftijd van het materiaal aanduidt ( $a$ ; jaar). Deze is gerelateerd aan de humificatiecoëfficiënt,  $h_c$  (-) volgens (Heinen et al., 2020b; Figuur 4-3):

$$h_c = \exp\left[b(a+1)^m - ba^m\right] \quad (4-1)$$

waarin  $b$  en  $m$  vaste constanten zijn:  $b = 4.7$ ,  $m = -0.6$ . Voor de gemeten  $h_c$ -waarden zijn in Tabel 4-4 de berekende initiële leeftijden  $a$  gegeven. Ook in ANIMO en in de N-module van SWAP-WOFOST wordt uitgegaan van de initiële leeftijd  $a$  van het organische materiaal.





**Figuur 4-3** De relatie tussen humificatiecoëfficiënt  $h_c$  en initiële leeftijd  $a$  (jr) volgens Eq. (4-1).

### Samenvattend

Organische (rest)materialen die aan de bodem worden toegediend zullen afbreken, waarbij stikstof vrijkomt. In Lumbricus-thema 'Bewuste Bodem' zijn in veldproeven drie organische materialen onderzocht waarbij de afbraaksnelheid (humificatiecoëfficiënt) verschillend was: gering voor compost, gemiddeld voor bokashi (bermmaaisel) tot zeer snel voor een insectensubstraat. Deze gegevens worden later gebruikt in voorbeeldberekeningen gericht op nitraatuitspoeling (paragraaf 5.3).

---

## 5 Toepassingen

Nadat SWAP was uitgebreid en getest aan de hand van analytische oplossingen (zie hoofdstuk 2, 3 en 4), is SWAP toegepast voor enkele maatregelen zoals getest onder veldomstandigheden in Lumbricus Bewuste Bodem. In proeftuin Oost (deelgebied Stegeren) is gekeken naar de effectiviteit van het toedienen van verticaal pendelende wormen en naar de effectiviteit van grondbewerking, vertidraains, en (kunstmatige) wormgangen op de infiltratie. Voor deze situaties zijn SWAP-modelberekeningen uitgevoerd met toepassen van de bimodale beschrijving van de Mualem-Van Genuchten-modellen voor de hydrofysische eigenschappen (paragraaf 5.1). Met betrekking tot grondbewerking zijn grondmonsters genomen aan het eind van een achtjarige grondbewerkingsproef in Noord-Brabant. De verkregen Mualem-Van Genuchten hydrofysische eigenschappen voor de behandelingen traditioneel ploegen en strokenfrees zijn beschreven in paragraaf 5.2. In een tweetal proeven (bokashi nabij proeftuin Oost; OS-managementproef in proeftuin Zuid) zijn nitraatgehaltes in het bovenste grondwater tijdens het winterseizoen gemeten. Op basis van de gemeten afbraaksnelheden van de daarbij gebruikte organische materialen (zie paragraaf 4.4) zijn enkele voorbeeldberekeningen met de SWAP-WOFOST N-module uitgevoerd (paragraaf 5.3). In dit rapport worden geen toepassingen beschreven van SWAP voor de hydrologische maatregelen; deze zijn elders beschreven (De Wit et al., 2021a, b).

### 5.1 Bimodale Mualem-Van Genuchten: wormgangen

Zoals gesteld in paragraaf 2.3 is het bimodale Mualem-Van Genuchten (MvG) model te gebruiken om het effect van de aanwezigheid van verticale wormgangen (of vertidraains) op de infiltratie en berekende oppervlakkige afvoer te simuleren. Een belangrijke vraag daarbij is hoe we vanuit een bekende unimodale MvG-parametrisatie en de kenmerken van de wormgangen de bimodale MvG-parameters kunnen afleiden. Uiteraard zou het veel beter zijn om de bimodale parameters af te leiden op basis van gemeten hydrofysische eigenschappen, maar omdat de verwachting is dat dit zeer moeilijk realiseerbaar is, kiezen we hier voor een theoretische aanpak.

Pendelende wormen graven verticale wormgangen van enkele decimeters diep. Een deel van de weggegraven grond komt terecht op maaiveld. De verwachting is dus dat de dichtheid van de bulk-bodem tussen de wormgangen niet verandert. De hydrofysische eigenschappen van de bulkbodem zullen dus ook niet wijzigen. Daarom stellen we voor dat het bimodale MvG-model voor het grootste deel zal bestaan uit de huidige bekende unimodale beschrijving (cf. Staringreeks). Het effect van de aanwezigheid van de wormgangen wordt dan toegevoegd als de tweede modaliteit. Hiervoor moeten we vaststellen wat de waarden zijn voor de extra parameters  $\omega_1$ ,  $\alpha_2$ , en  $n_2$  (en daarmee ook  $m_2$ ) (zie paragraaf 2.3). Ook moeten we voor de bimodale variant een nieuwe waarde voor  $\theta_s$  en  $K_s$  vaststellen, zoals later uitgelegd.

In paragraaf 2.3 en Bijlage 3 is reeds ingegaan op hoe  $\alpha_2$  en  $m_2$  (en dus  $n_2$ ) kunnen worden ingeschat op basis van de diameters van de wormgangen. Over het algemeen geldt dat de wormgangen diameters hebben van 6-8 mm (Nick van Eekeren, persoonlijke mededeling). De parameter  $\omega_1$  geeft aan welk aandeel van het totaal toegeschreven wordt aan de bulk en welk deel aan het overige, d.w.z. wormgangen. Deze parameter kan dan geschat worden op basis van het oppervlakte- of volume-aandeel van de wormgangen per eenheid totale oppervlakte of volume. Onder ideale omstandigheden mag verwacht worden dat er 50-100 wormen per vierkante meter aanwezig zijn, en meestal geldt dat een pendelende worm één wormgang onderhoudt (Nick van Eekeren, persoonlijke mededeling).

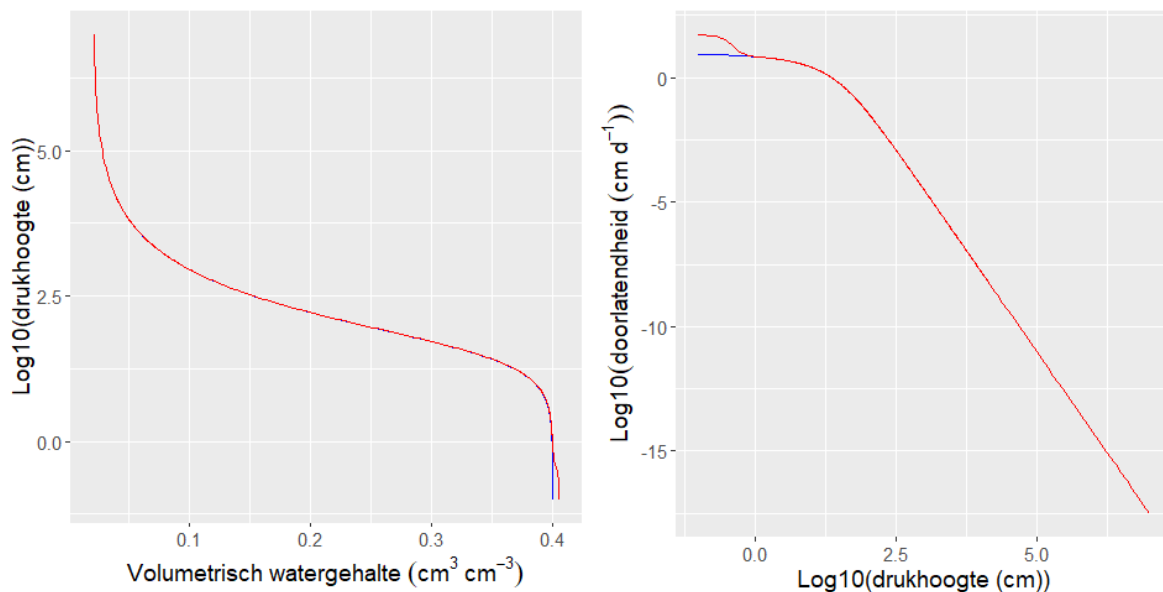
Stel uni-modaal  $\theta_{s,1} = 0.4$ . Bij aanwezigheid wormgangen komt daarbij de porositeit van de wormgangen:  $\theta_{s,2} = \theta_{\text{worm}} = 0.005$  (bij 100 wormen/m<sup>2</sup>). Dan geldt:  $\theta_s = \theta_{s,1} + \theta_{s,2} = 0.4 + 0.005 = 0.405$ . De waarde voor  $\omega_1$  is dan gelijk aan  $\omega_1 = 0.4/(0.4+0.005) = 0.988$  (zie Bijlage 3).

In paragraaf 2.5 (zie o.a. Figuur 2-5) is beschreven hoe de afbuiging van de waterretentiecurve bij de overgang van de tweede tak naar de hoofdtak verloopt. De  $n$ -parameter geeft in feite aan hoe snel de wormgangen leeglopen bij een kleine verandering van de drukhoogte. Hoe homogener de diameters van de wormgangen zijn, des te abrupter zal het watergehalte veranderen: dus hoe kleiner de spreiding in diameter wormgangen, des te groter zal  $n$  zijn. Omdat de diameters van pendelende wormgangen in een nauwe range ligt (6-8 mm), stellen we voor de waarde voor  $n_2$  vast te leggen op  $n_2 = 5$ .

De keuze van  $n_2$  heeft impact op de afleiding van de  $\alpha_2$  parameter (zie Bijlage 3), maar deze wordt gering geacht. De waarde voor  $\alpha_2$  volgt uit de diameter van de wormgang,  $m_2$  ( $m_2 = 1 - 1/n_2$ ) en de capillair-theorie. Voor  $r_{\text{worm}} = 4$  mm en  $n_2 = 5$  volgt dan  $\alpha_2 = 2.6805$ .

De uitdrukking voor de bimodale variant van de  $K(h)$  relatie bestaat niet uit de som van de bijdrage van 2 afzonderlijke  $K(h)$  (hooguit bij benadering). Wanneer de porositeit toeneemt bij aanwezigheid van de wormen, mag ook verwacht worden dat de waarde voor  $K_s$  in vergelijking (2-4) toeneemt ten opzichte van de waarde bij de unimodale variant. Omdat we gezien hebben dat de waterretentiecurve in het drogere traject nauwelijks wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de wormgangen, stellen we hier dat dit ook moet gelden voor de doorlatendheid. Daarom wordt voorgesteld om de waarde voor  $K_s$  voor de bimodale variant te optimaliseren, zodanig dat de  $K(h)$ -curve in het traject vanaf  $h = -10$  cm en droger zo goed mogelijk past bij de unimodale variant. Bijvoorbeeld, voor  $\alpha_1 = 0.025$  cm<sup>-1</sup>,  $n_1 = 1.5$ ,  $\lambda = 0.5$  en  $K_s(\text{uni}) = 10$  cm d<sup>-1</sup> en de eerder genoemde bimodale parameters wordt dan verkregen  $K_s(\text{bi}) = 55.45$  cm d<sup>-1</sup>.

De uni- en bimodale waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken voor het hier beschouwde voorbeeld zijn weergegeven in Figuur 5-1.



**Figuur 5-1** Voorbeelden van uni- (blauw) en bimodale (rood) curves voor de waterretentie (links) en doorlatendheid (rechts) (zie tekst voor toelichting).

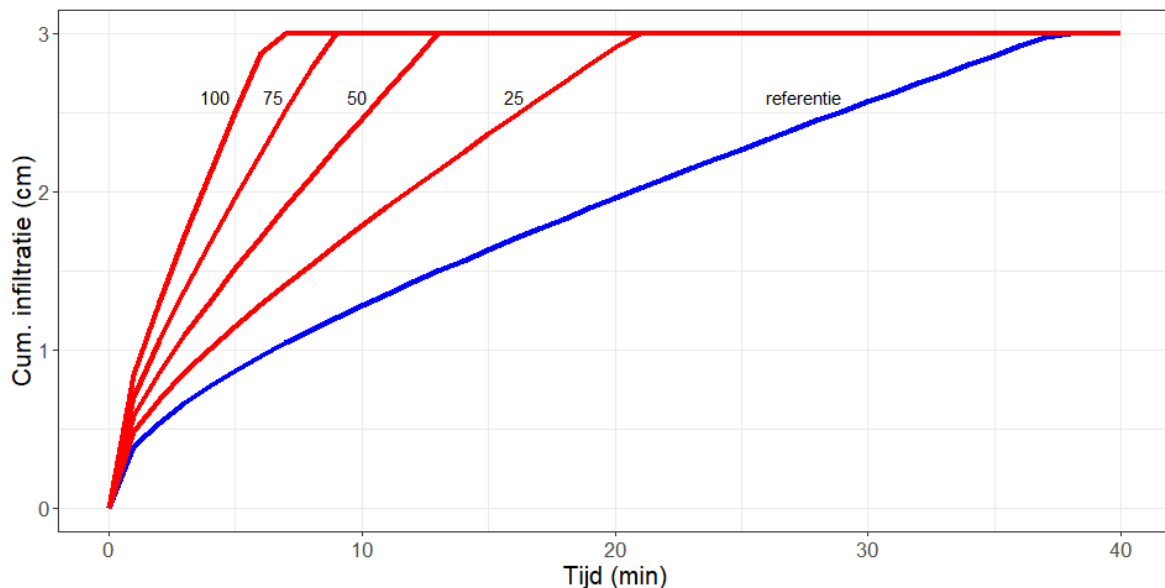
In het onderzoeksprogramma waren drie onderdelen waarvoor de effectiviteit van wormgangen of vertidraïns is toegepast. Voor de locatie Stegeren was een wormenproef opgezet om na te gaan of en hoe de wormen in de lokale situatie gedijen en overleven. Hierbij is aanvullend geprobeerd de infiltratie te meten in plots zonder en plots met pendelende wormen. Op een tweede locatie in Stegeren is de infiltratie gemeten in kunstmatig aangebrachte (geboorde) wormgangen en vertidraïns en vergeleken met infiltratie in een referentieplot. De derde toepassing betreft een modeltoepassing van uni- versus bimodale simulaties voor zandgronden in Nederland om een indruk te krijgen van de effectiviteit van wormgangen op infiltratie en het voorkomen van plasvorming en oppervlakkige afvoer. Deze toepassingen worden hieronder behandeld.

### 5.1.1 Wormenproef Stegeren

Door het Louis Bolk Instituut (LBI) is op een locatie in proeftuin Stegeren een wormenproef opgestart met als doel te bestuderen hoe wormen geïntroduceerd kunnen worden en wat voor management nodig is om hun bestaan in stand te houden. Hiertoe werden 20 metalen buizen in de grond aangebracht waar in 10 buizen 15 pendelende wormen (*Lumbricus terrestris*) werden aangebracht. Omdat de buizen (diameter 61 cm) een stuk boven het maaiveld uitstaken, werd besloten om te proberen infiltratiemetingen uit te voeren. Hiertoe werd het gras handmatig kortgeknipt, werd een plastic zeil aangebracht waar 9 L water (overeenkomend met een waterlaag van 3 cm) werd opgebracht. Het zeil werd vervolgens (voorzichtig) verwijderd, waarna de daling van het waterniveau als functie van de tijd werd geregistreerd.

Tijdens het uitwerken van deze infiltratiemetingen werd duidelijk dat de methode achteraf toch niet de juiste aanpak is om een goede infiltratieproef uit te voeren. Met name is het op deze manier niet goed te realiseren dat op tijdstip  $t = 0$  een instantane waterlaag van 3 cm over het gehele oppervlak van de buis is te realiseren. Dat betekent dat infiltratie niet overal egaal plaatsvindt, waarbij een groot deel van de infiltratie optreedt in het eerste stuk dat vrijgemaakt wordt van plastic, en dat het niet mogelijk is om de volledige infiltratie van 3 cm te registreren. Daarom wordt hier nu niet nader ingegaan op de meetresultaten; deze zijn ter informatie opgenomen in Bijlage 8.

In plaats van toetsing aan de metingen geven we hier alleen de theoretisch (model) verwachting van het effect van de aanwezigheid van wormgangen volgens het bimodale Mualem-Van Genuchten-concept. Figuur 5-2 toont het verloop van de berekende cumulatieve infiltratie in een zandgrond (BOFEK 304; Gt VI) in een initieel relatieve droge grond voor situaties zonder wormgangen en vier situaties met verschillende hoeveelheid wormgangen: 25, 50, 75 en 100 wormen per vierkante meter (worm diameter: 8 mm). Hoe meer wormgangen per vierkante meter, des te sneller verloopt het infiltratieproces en des te sneller zal het opgebrachte waterlaagje (van in dit geval 3 cm) geïnfiltreerd zijn. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op infiltratie gemeten met de zogenaamde dubbele ring infiltrometer voor situaties zonder en met kunstmatig geboorde wormgaten.



**Figuur 5-2** Gesimuleerde cumulatieve infiltratie bij aanwezigheid van verticale wormgangen volgens het bimodale Mualem-Van Genuchten-concept voor 4 hoeveelheden wormen per vierkante meter (25, 50, 75, 100 wormen  $m^{-2}$ ; rood) en de referentiesituatie zonder wormen (unimodale Mualem-Van Genuchten; blauw) voor een situatie waarbij er op  $t = 0$ , 3 cm water op het land wordt aangebracht.

---

### 5.1.2 Infiltratieproef Stegeren

In een andere proef binnen Lumbricus is de infiltratie m.b.v. de dubbele ring infiltrometer uitgevoerd op een controleplot en op twee plots met geboorde wormgangen (50 en 100 m<sup>-2</sup>; 40 cm diep) (proeftuin Oost, Stegeren). Omdat de wormgangen vlak van tevoren aangebracht waren, was er nu wel sprake van een duidelijk verschil in behandeling. Uit de metingen van de infiltrometer werden (in de zomer van 2019) significante verschillen in infiltratiesnelheid tussen deze drie behandelingen waargenomen (Kaandorp et al., 2021).

Het perceel bestaat uit permanent grasveld en is in de afgelopen (ongeveer) tien jaar niet geploegd. Het onderhoud bestaat hoofdzakelijk uit maaien en irrigeren. Het perceel is omgrensd door sloten en heeft een maaiveldhoogte van 8 m +NAP (zuidkant) tot 7.5 m +NAP (noordkant). Het perceel heeft een microreliëf waarbij de maaiveldhoogte enkele centimeters varieert over kleine afstand. Ter plaatse van de uitgevoerde proeven is de maaiveldhoogte 7.5-7.6 m +NAP.

De gebruikte meteorologische gegevens zijn hetzelfde als in andere modelstudies binnen proeftuin Oost (De Wit et al., 2021a, b). Het betreft neerslag- en verdampingsgegevens op basis van radar-gegevens (periode 2018-2019; bron: Janine de Wit, KWR).

In het studiegebied Stegeren is het dominante bodemprofiel een leemarme veldpodzol. De bijbehorende BOFEK-eenheid is 304 (zwak lemige (podzol)gronden). Volgens de bodemkaart uit ca. 2000 en de BOFEK2012-kaart (Wösten et al., 2013; gebaseerd op oude bodemkaart) ligt de infiltratieproef in een gebied met moerige gronden. Echter, volgens de recente update van de bodemkaart (zie PDOK) en de lokaal beschreven bodemprofielen (zie Bijlage 9; object IDs 111-114) ligt de infiltratieproef in een leemarme veldpodzol. Naast de update van de bodemkaart is ook de Staringreeks recentelijk aangepast op basis van nieuwe toegevoegde monsters (Heinen et al., 2020a). Deze is in deze studie gebruikt. BOFEK-eenheid 304 bestaat uit verschillende lagen (dieptetraject, bouwsteen): 0-25 B2, 25-60 O2, 60+ O1. Volgens de lokale bodemprofielbeschrijvingen is ter plaatse de ondergrond wat lemiger dan volgens BOFEK2012, zodat in de simulaties de laag 60+ als O2 is beschouwd.

Later in deze paragraaf zullen ook resultaten gegeven worden op basis van simulaties waarin lokaal gemeten retentiecurven en  $K_{sat}$  voor de bovenlaag zijn gebruikt. Omdat die karakterisering niet volledig was voor het hele bodemprofiel is de focus eerst op de simulaties gebaseerd op de BOFEK2012-Staringreeks2018 beschrijving.

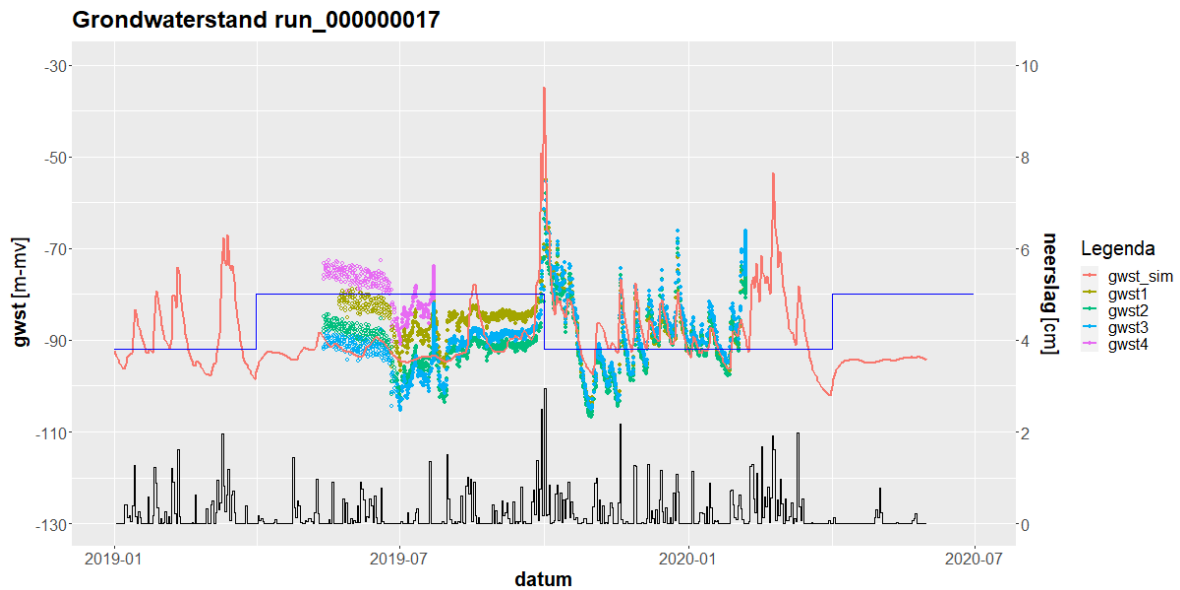
Het perceel is in gebruik als grasland en er is gerekend met WOFOST-gras en een verondersteld maaieregime.

Het perceel is niet gedraineerd. Dit geldt wel voor het perceel dat grenst aan de noordzijde van het onderzoekperceel waar ook subirrigatie wordt toegepast. Het peil volgens de legger is 6.75 m +NAP, voor zowel de zomer als de winter, dat is circa 80 cm -mv. Grondwaterstanden lijken te duiden op een iets lager winterpeil dan zomerpeil (praktijkpeilen). Bij de simulatie is uitgegaan van een zomerpeil van 80 cm -mv en een winterpeil van 92 cm -mv. Tevens is een ondiepe greppel (20 cm -mv) met een lage drainageweerstand (20 d) geparametriseerd.

Voor de onderrandvoorwaarde sluiten we aan bij de condities die gehanteerd worden bij de KAD-subinfiltratieproef elders in proeftuin Oost (De Wit et al., 2021a, b). Daar werd een wegzijging van ongeveer 400 mm verondersteld. Omdat deze niet ieder jaar hetzelfde is, is in deze studie uitgegaan van een wegzijgingssituatie geparametriseerd door een lage stijghoogte (300 cm -mv) en een grote weerstand (1500 d), die gemiddeld op ongeveer 400 mm per jaar wegzijging uitkomt.

Voorafgaand aan het doorrekenen van de infiltratieproef is SWAP enkele jaren doorgerekend, waarbij enkele parameters zijn gekalibreerd (handmatig) om een zo goed mogelijke overeenkomst te krijgen tussen gesimuleerde en lokaal gemeten grondwaterstanden. Dit betrof met name de drainage- en de infiltratieweerstanden. De grondwaterstandmetingen vertoonden bij aanvang veel ruis. Later in de tijd (vanaf oktober 2019) waren de verschillen in metingen tussen de vier plots nihil, en de metingen

konden vrij goed door het model benaderd worden (Figuur 5-3). Dit resulteerde in de volgende gekalibreerde parameters: drainageweerstand 50 d; infiltratieweerstand 50 d; zomerpeil/winterpeil 80/92 cm -mv; wegzijging flux 1.3 mm/d (dynamisch en afhankelijk van grondwaterstand).



**Figuur 5-3** Gesimuleerde grondwaterstand (rode lijn) in vergelijking tot gemeten grondwaterstanden voor de locatie infiltratieproef. De blauwe lijn geeft het verloop van de omgevingspeilen (zomer/winter) weer, de zwarte lijn geeft de neerslag weer. Casus waarbij landelijk gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn gebruikt.

Gesimuleerd zijn de infiltratie in de referentiebehandeling en de behandelingen met 50 en 100 wormgaten  $m^{-2}$ . Omdat de wormgaten daags voor de metingen waren aangebracht, mag ervan worden uitgegaan dat de condities bij aanvang van de infiltratieproef voor deze drie plots identiek is geweest.

Het is niet bekend hoeveel water in de infiltraties is opgezet. De dubbele-ring infiltrometers zijn 25 cm hoog en ze worden circa 5 cm in de bodem geslagen. De ring zal tot circa 5 cm onder de rand gevuld worden, dus dan zal aan het begin ca. 10-15 cm waterschijf op maaiveld staan. De SWAP-simulaties zijn gestart op 23-07-2019 00:00, waarbij de beginsituatie gelijk werd gesteld aan de eindsituatie van de voorberekening (22-07-2019 24:00). Om 10.00 u. is aan het model 15 cm dan wel 10 cm op maaiveld toegevoegd. De oppervlakkige afvoer werd uitgeschakeld door de drempelhoogte voor oppervlakkige afvoer een grote waarde toe te kennen.

Volgens de eerder beschreven methodiek (paragraaf 5.1) zijn de parameters voor de bimodale variant van Mualem-Van Genuchten afgeleid (Tabel 5-1).

**Tabel 5-1** De parameters voor de unimodale en bimodale Mualem-Van Genuchten-relaties voor de Staringreeksbouwstenen B02 en O02 zoals gebruikt bij de simulaties van de infiltratiemetingen.

Naam	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$\lambda$	$K_{sfit}$	$\alpha_2$	$n_2$	$\omega_1$
<b>Referentie</b>									
'B02-uni'	0.02	0.434	0.022	1.349	7.202	83.242			
'O02-uni'	0.02	0.387	0.016	1.524	2.440	22.762			
<b>Wormgangen: diameter = 8 mm; aantal = 50/m2</b>									
'B02-bi'	0.02	0.436	0.022	1.349	7.202	255.934	2.681	5	0.994
'O02-bi'	0.02	0.390	0.016	1.524	2.440	100.255	2.681	5	0.994
<b>Wormgangen: diameter = 8 mm; aantal = 100/m2</b>									
'B02-bi'	0.02	0.439	0.022	1.349	7.202	536.124	2.681	5	0.989
'O02-bi'	0.02	0.392	0.016	1.524	2.440	235.210	2.681	5	0.987

Vanwege COVID19 was in 2020 de meetcapaciteit van het bodemfysisch laboratorium van WENR beperkt. Het was daarom niet mogelijk om voor deze onderzoekslocatie een volledige bodemfysische karakterisering uit te voeren. Wel mogelijk was om enkele meetpunten van de waterretentie-karakteristiek voor drie bodemlagen en de doorlatendheid bij verzadiging van de toplaag te meten. Op basis van deze metingen konden de parameters van het Mualem-Van Genuchten-model gefit worden (exclusief de  $\lambda$  parameter; deze is gesteld op de waarde 0.5 (advieswaarde volgens Mualem (1976) indien onbekend) en lijkt een vrij goed gemiddelde voor de  $\lambda$ -waarden voor zandgronden uit de Staringreeks 2018 (Heinen et al., 2020a)) (Tabel 5-2; afzonderlijke metingen in Bijlage 10). Wat opvalt, zijn de lage waarden voor het watergehalte bij verzadiging. Dat is toe te schrijven aan de grote droge bulkdichtheid voor die lagen. De gemiddelde droge bulkdichtheid voor de bemonsterde lagen was: 1320.2 (H1), 1738.4 (H2) en 1776.3 (H3)  $\text{kg m}^{-3}$ .

Om het mogelijk te maken met lokaal gemeten bodemfysische eigenschappen de infiltratieproef door te rekenen, is echter ook de doorlatendheid op grotere diepten nodig. Omdat het watergehalte bij verzadiging voor de onderste twee dieptes nogal afwijkt van die voor O1 en O2 uit de Staringreeks, is het beter om de  $K_{\text{sat}}$ -waarde van de Staringreeks-bouwstenen O1 of O2 niet te gebruiken. De ingeschatte droge bulkdichtheid voor O1 en O2 is ca.  $1650 \text{ kg m}^{-3}$  ( $\rho_d = 2650 \cdot (1 - \theta_s)$ ). Bekend is dat de  $K_{\text{sat}}$ -waarde samenhangt met de dichtheid: een hogere dichtheid leidt tot een lagere  $K_{\text{sat}}$ -waarde. De lokale eigenschappen kunnen o.b.v. de gemeten dichtheid benaderd worden via het model van Assouline (2006), dat de  $K_{\text{sat}}$ -waarde berekent op basis van de verandering in watergehalte bij verzadiging en de dichtheid ten opzichte van de gemiddelde waarden voor Staringreeks2018-bouwstenen O1 en O2 volgens:

$$K_{\text{sat,H}} = K_{\text{sat,SR}} \left( \frac{\theta_{s,H}}{\theta_{s,SR}} \right)^3 \left( \frac{\rho_{d,H}}{\rho_{d,SR}} \right)^{-3} \quad (5-1)$$

Hierin verwijst subscript 'H' naar de lokale situatie en subscript 'SR' naar de waarden uit de Staringreeks 2018. Hieruit volgt dat  $K_{\text{sat,H}} = 9.4 \text{ cm d}^{-1}$  (ten opzichte van  $K_{\text{sat,SR}} = 22.5 \text{ cm d}^{-1}$ ).

Voor de bovenlaag zien we dat de gemeten  $K_{\text{sat}}$  groter is dan de waarde in de Staringreeks voor B2: 116.8 versus  $83.2 \text{ cm d}^{-1}$ . Toepassen van Eq. (5-1) voor deze laag zou leiden tot  $K_{\text{sat,H}} = 141.9 \text{ cm d}^{-1}$ . Dit laat zien dat deze werkwijze plausibel is.

**Tabel 5-2** De parameters voor de unimodale en bimodale Mualem-Van Genuchten-relaties, gebaseerd op lokaal gemeten waterretentiekarakteristieken en doorlatendheid bij verzadiging. Bemonsteringsdieptes: H1 0-25 cm, H2 30-40, H3 55-65. Voor  $\lambda$  en  $K_{\text{ffit}}$  zie toelichting in tekst.

Naam	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$\lambda$	$K_{\text{ffit}}$	$\alpha_2$	$n_2$	$\omega_1$
<b>Referentie</b>									
'H1-uni'	0.013	0.456	0.0276	1.312	n.b. (0.5)	116.8			
'H2-uni'	0.013	0.294	0.0228	1.450	n.b. (0.5)	n.b. (9.4)			
'H3-uni'	0.011	0.307	0.0123	2.553	n.b. (0.5)	n.b. (9.4)			
<b>Wormgangen: diameter = 8 mm; aantal = 50/m2</b>									
'H1-bi'	0.013	0.458	0.0276	1.312	n.b. (0.5)	276.2	2.681	5	0.9945
'H2-bi'	0.013	0.297	0.0228	1.450	n.b. (0.5)	n.b. (38.0)	2.681	5	0.9915
'H3-bi'	0.011	0.309	0.0123	2.553	n.b. (0.5)	n.b. (72.9)	2.681	5	0.9919
<b>Wormgangen: diameter = 8 mm; aantal = 100/m2</b>									
'H1-bi'	0.013	0.461	0.0276	1.312	n.b. (0.5)	503.8	2.681	5	0.9891
'H2-bi'	0.013	0.299	0.0228	1.450	n.b. (0.5)	n.b. (85.9)	2.681	5	0.9832
'H3-bi'	0.011	0.312	0.0123	2.553	n.b. (0.5)	n.b. (196.9)	2.681	5	0.9839

### Resultaten (gebaseerd op landelijke schematisatie)

De gesimuleerde en gemeten verandering van het waterlaagje op maaiveld bij initieel 15 en 10 cm water in de meetopstelling is gegeven in Figuur 5-4. De simulaties komen beter met de metingen overeen indien wordt begonnen met 10 cm water in de ring. De gemeten daling varieerde van iets

---

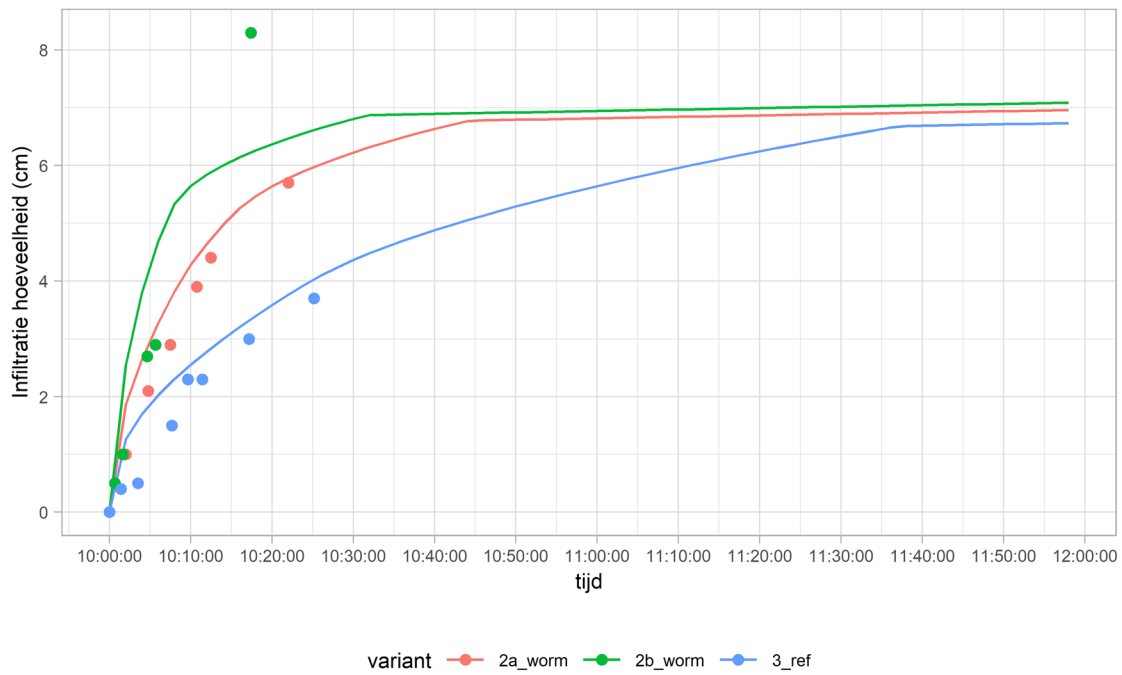
minder dan 4 tot iets meer dan 8 cm. Met name aan het eind is het vaststellen van de hoogte van het waterlaagje lastig, omdat de vlotter gehinderd wordt door het gras.

Wat opvalt, is dat bij de simulaties de afname van het waterlaagje op een gegeven moment stagneert. Dat zijn de momenten waarop in de simulaties het bodemprofiel verzadigd raakt. De daling van het waterlaagje verloopt dan heel veel trager en wordt bepaald door de afvoer naar drains en sloten. Als toelichting: bij een ontwateringsbasis van zeg 1 m en een drainageweerstand van  $50 d$ , is de stationaire afvoer  $20 \text{ mm d}^{-1}$  (bijna  $1 \text{ mm h}^{-1}$ ). Voor de referentieplot is in Figuur 5-5 het verloop van het watergehalte als functie van de tijd gegeven, en in Figuur 5-6 is het bijbehorende verloop van het luchtgevulde poriënvolume gegeven. Na ca. 100-110 minuten is het gesimuleerde 1D-profiel volledig verzadigd; tot die tijd bleef de grondwaterstand op ca. 92 cm -mv en steeg daarna direct tot aan maaiveld. In de SWAP-simulaties wordt deze infiltratieproef volledig als een 1D-situatie gezien; ofwel, er wordt verondersteld dat het hele perceel initieel volledig onder water staat. In werkelijkheid zal bij zo'n dubbele-ring-infiltratieproef al vrij snel een horizontale stromingscomponent tijdens de infiltratie optreden. Immers, de ringen zijn ca. 5 cm de grond ingewerkt, maar zodra het vochtfront beneden die 5 cm komt, zal er sprake zijn van horizontale divergentie van het vochtfront. De metingen stoppen voor de referentiesituatie na circa 25 minuten als circa 37 mm is geïnfiltreerd. Volgens de berekening bevindt het infiltratiefront zich dan op 30 cm -mv. Dan heeft de radiale component mogelijk al een grote rol gespeeld.



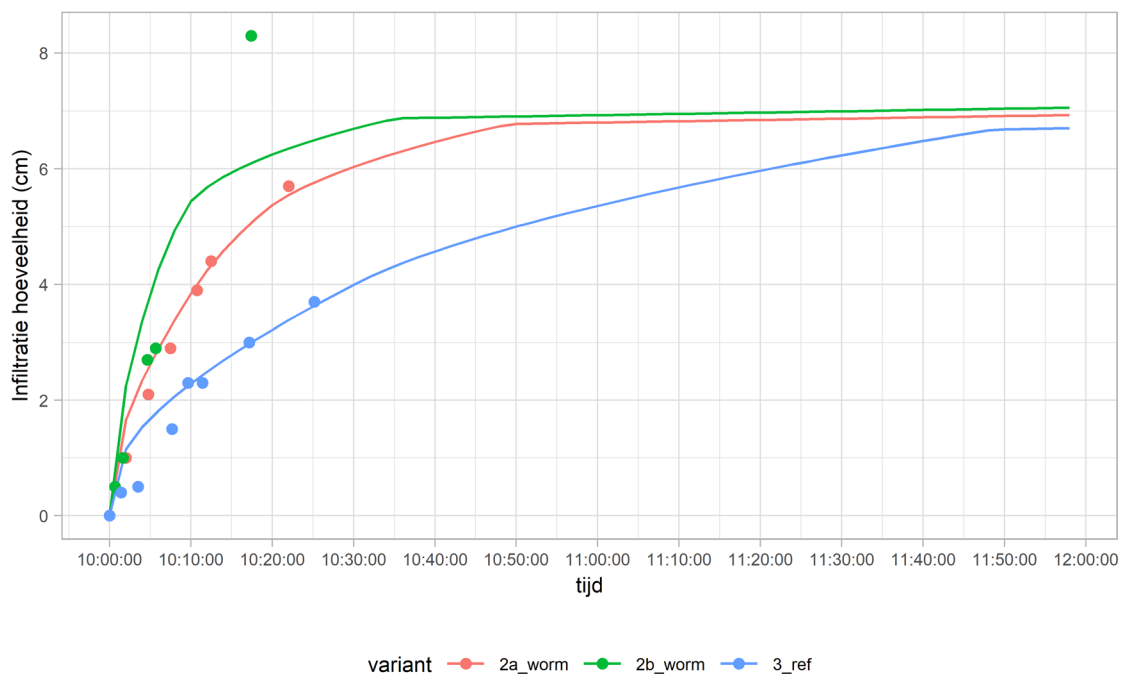
a)

### Infiltratie initieel 15 cm met bodemfysica 2018

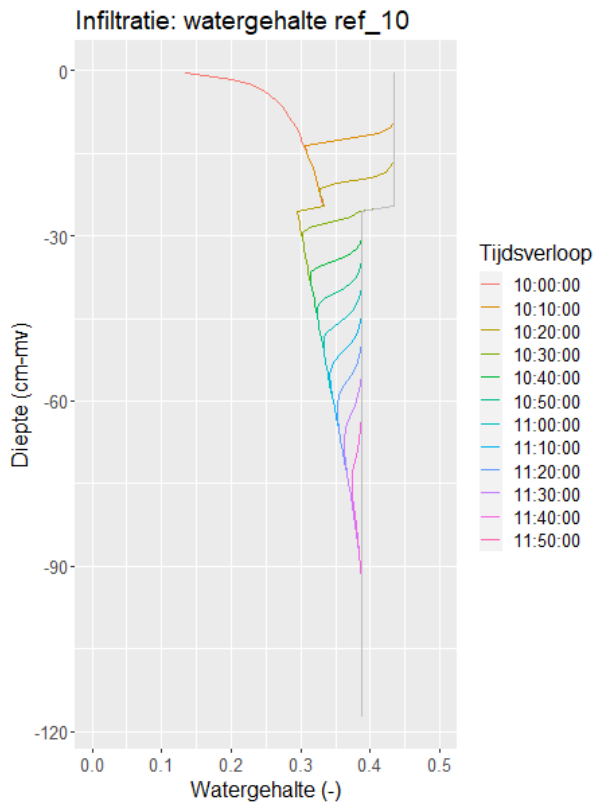


b)

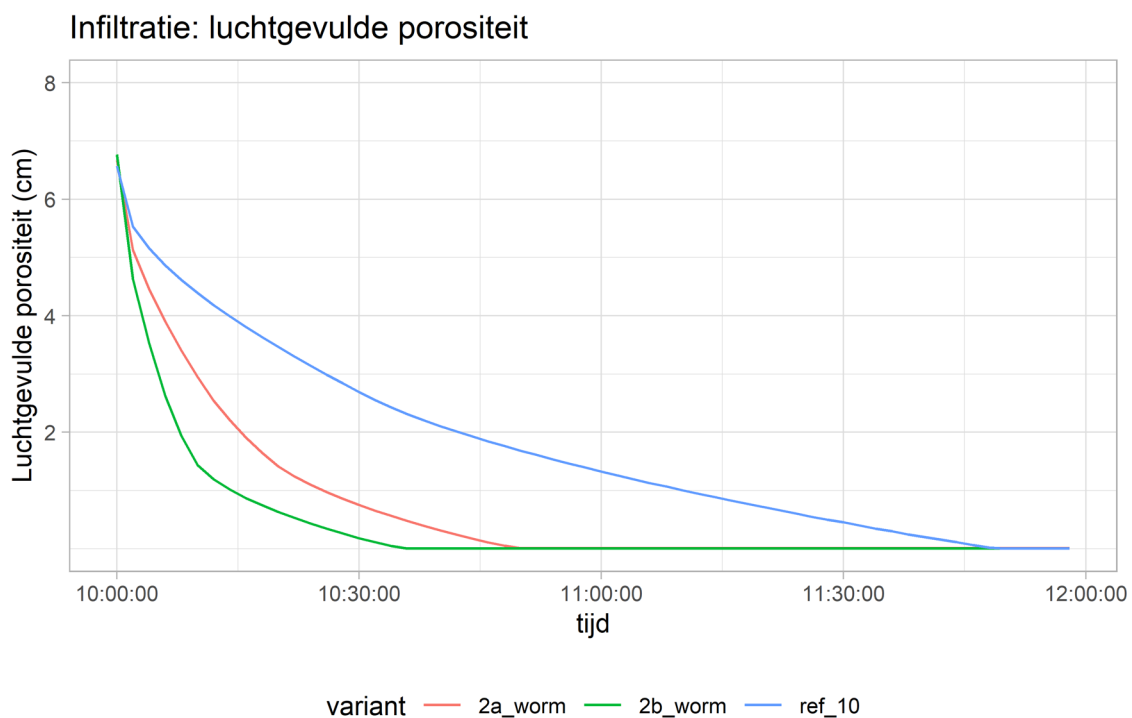
### Infiltratie initieel 10 cm met bodemfysica 2018



**Figuur 5-4** Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (symbolen) veranderingen in hoogte waterlaagje op maaiveld tijdens de dubbele-ring-infiltratieproef (datum: 23-07-2019) bij initieel a) 15 cm en b) 10 cm water in de ringen voor de referentieplot (blauw), de plot met 50 wormgaten  $m^{-2}$  (rood) en de plot met 100 wormgaten  $m^{-2}$  (groen). Casus waarbij landelijk gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn gebruikt.



**Figuur 5-5** Gesimuleerde verlopen van het volumetrisch watergehalte in de referentieplot als functie van de tijd. Casus waarbij landelijk gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn gebruikt.

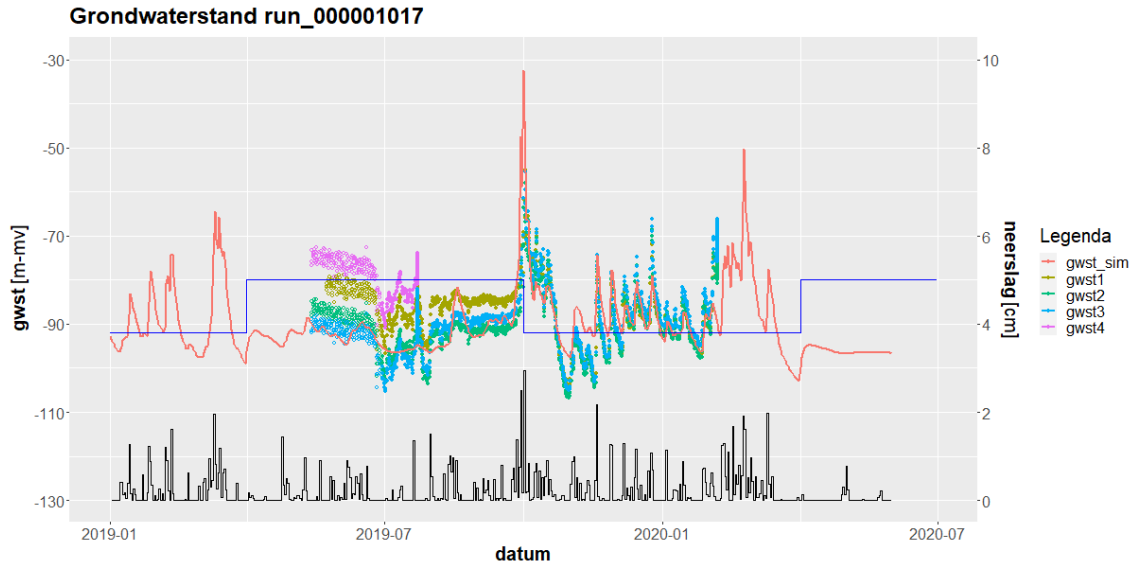


**Figuur 5-6** Gesimuleerde veranderingen in het luchtgevulde poriënvolume voor de referentieplot (blauw), de plot met 50 wormgaten  $m^{-2}$  (rood) en de plot met 100 wormgaten  $m^{-2}$  (groen). Casus waarbij landelijk gemiddelde waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn gebruikt.

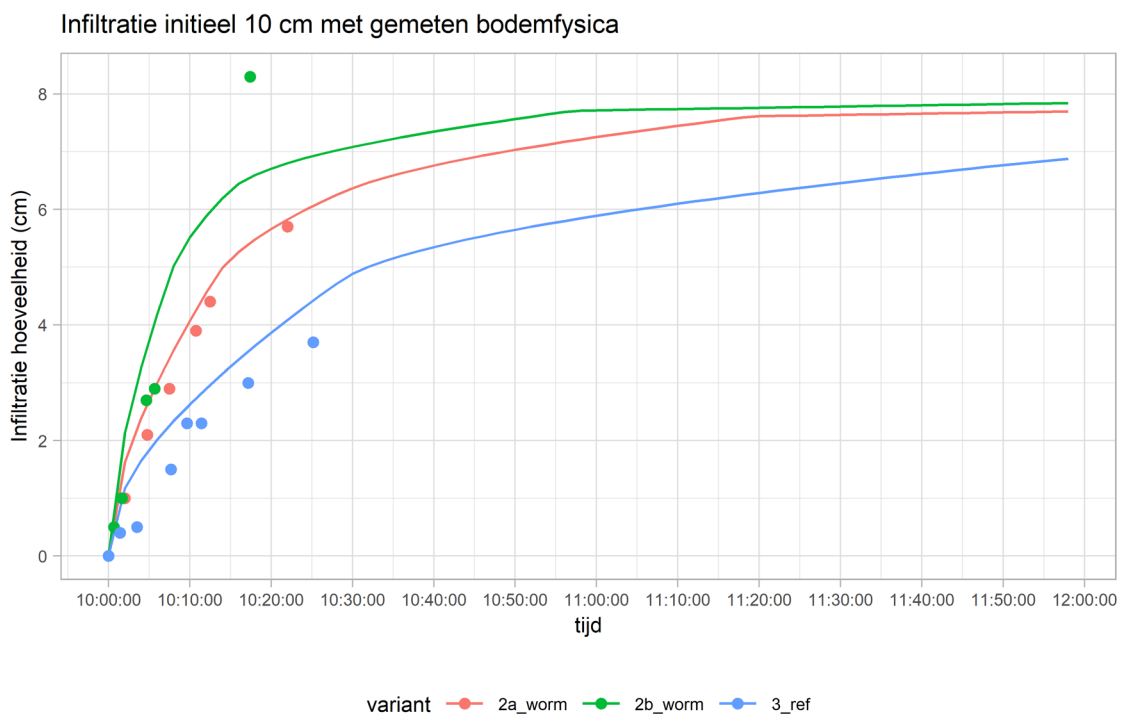
### Resultaten (gebaseerd op lokale eigenschappen)

Indien de lokaal gemeten/afgeleide bodemfysische kenmerken worden gebruikt, worden vrijwel dezelfde resultaten verkregen. In de periode voorafgaand aan de infiltratieproef wordt een vrijwel identiek verloop

van de grondwaterspiegel berekend (Figuur 5-7). De overeenkomst tussen gemeten en gesimuleerde infiltratie bij een initieel 10 cm waterlaagje is ook nu weer goed (Figuur 5-8). De uitgangssituatie voor beide cases was vrijwel identiek. Vervolgens wordt een infiltratieproef uitgevoerd. Hierbij zullen vooral de eigenschappen van de bovengrond van belang zijn. Omdat de water-retentie- en doorlatendheidskarakteristieken van de bovenlaag zoals lokaal gemeten nauwelijks afwijken van de Staringreeksbouwsteen B2, is het dus niet verwonderlijk dat de infiltratie in beide cases ongeveer hetzelfde wordt gesimuleerd. De invloed van verschillen in de ondergrond is dus gering.



**Figuur 5-7** Gesimuleerde grondwaterstand (rode lijn) in vergelijking tot gemeten grondwaterstanden voor de locatie infiltratieproef. De blauwe lijn geeft het verloop van de omgevingspeilen (zomer/winter) weer, de zwarte lijn geeft de neerslag weer. Casus waarbij lokaal gemeten/geschatte waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn gebruikt.



**Figuur 5-8** Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (symbolen) veranderingen in hoogte waterlaagje op maaiveld tijdens de dubbele-ring-infiltratieproef (datum: 23-07-2019) bij initieel a) 15 cm en b) 10 cm water in de ringen voor de referentieplot (blauw), de plot met 50 wormgaten  $m^{-2}$  (rood) en de plot met 100 wormgaten  $m^{-2}$  (groen). Casus waarbij lokaal gemeten/geschatte waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken zijn gebruikt.

---

In het rapport van Kaandorp et al. (2021) zijn ook resultaten gegeven voor infiltratieproeven volgend op een beregeningsgift op 23-07-2019. Dit hebben we ook geprobeerd na te rekenen. Echter, de beregeningsgift van 60-100 mm leidde opnieuw tot verzadigde situaties in de SWAP-berekeningen. De infiltratieproef die daar direct op volgde, leidt dan tot extreem lage berekende infiltratiesnelheden in de orde van  $1 \text{ mm h}^{-1}$  (zie eerder). Blijkbaar zijn de hydrofysische eigenschappen van de lokale situatie afwijkend van de Staringreeks. Zolang er geen hydrofysische gegevens van de lokale bemonstering beschikbaar zijn (zie eerder), heeft het geen zin om hier verder op in te gaan.

Naast de noodzaak om lokale eigenschappen te kennen, is het mogelijk ook interessant om in de toekomst na te gaan wat de invloed van hysteresis is in het narekenen van dergelijke proeven. Een eerste testberekening geeft aan dat onder invloed van hysteresis het vochtfront minder snel naar beneden beweegt doordat initieel minder water in de bodemkolom aanwezig is (en dus meer berging in het profiel aanwezig is).

Ten slotte: de plots met de verschillende behandelingen lagen aan de rand van het perceel en op relatief korte afstand van een watergang. Dat betekent dat ter plaatse de drainage- en infiltratie-weerstanden hierdoor beïnvloed zijn.

### 5.1.3 Effectiviteit wormgangen zandgronden

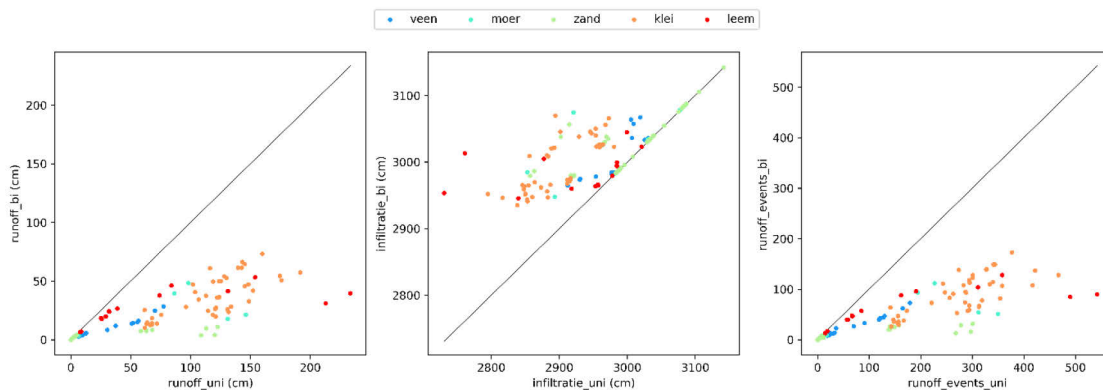
In het kader van de vertaling van effectiviteit van bodemgerichte maatregelen naar regionale modellen is binnen Lumbricus een deelproject *Regionale effecten van maatregelen Lumbricus* uitgevoerd (Pouwels et al., 2021). Hiervoor is onder meer nagegaan in welke mate de aanwezigheid van wormen (wormgangen of evt. vertidraïns) van invloed is op de verandering in infiltratie en daaraan gekoppelde oppervlakkige afvoer. Omdat regionale modellen uitgaan van landelijke informatie over de bodem, zijn we hier uitgegaan van BOFEK2012 (Wösten et al., 2013) en Staringreeks (versie 2018; Heinen et al., 2020a). Voor alle 72 BOFEK-bodemprofielen zijn SWAP-simulaties uitgevoerd voor de situatie zonder wormgangen (standaard Staringreeks-parameters; unimodaal) en voor de situatie met wormgangen (bimodaal). De aanvullend benodigde parameters in de lagen 0-60 cm (aangenomen: wormgangen zijn 60 cm diep) voor alle betreffende Staringreeks-bouwstenen zijn berekend volgens de werkwijze beschreven in paragraaf 5.1, met  $r_{\text{worm}} = 4 \text{ mm}$  en voor 75 wormen per vierkante meter (Tabel 5-3). Berekeningen zijn uitgevoerd voor gemaaid grasland en mais, voor de periode 1980-2019 (meteogegevens van De Bilt), en voor een beoogde Gt-klasse VI. Als basis is uitgegaan van invoerbestanden uit Waterwijzer Landbouw (<https://waterwijzerlandbouw.wur.nl>; Werkgroep Waterwijzer Landbouw, 2018).

In Figuur 5-9 is het verschil in cumulatieve oppervlakkige afvoer (runoff; in cm of aantal events) en het verschil in totale infiltratie gegeven voor de periode 1980-2019, uitgesplitst naar de vijf hoofdgrondsoorten van BOFEK2012. De infiltratie neemt voor de meeste BOFEK2012-eenheden toe bij aanwezigheid van wormgangen. Echter, dat is het minst het geval voor zandgronden (zie later). Dat betekent ook dat de oppervlakkige afvoer daarmee afneemt (in aantal events en absolute hoeveelheid). Voor zandgronden is het effect in detail getoond in Figuur 5-10. Voor de 27 zand-BOFEK-eenheden zien we dat de wormgangen in 21 gevallen geen effect vertonen. Er wordt alleen een effect waargenomen bij 6 profielen. Hierbij valt op dat dit zandprofielen zijn met een zavel bovengrond. Een veel duidelijker effect wordt waargenomen bij de zavel-klei-BOFEK-eenheden (Figuur 5-11).

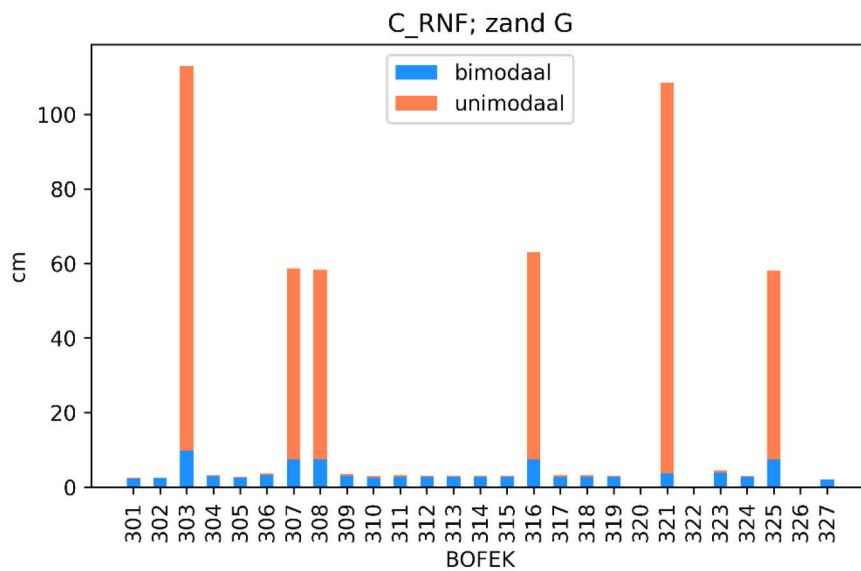
De getoonde resultaten hebben betrekking op gemaaid grasland. Voor akkerbouw (mais) werden vrijwel identiek resultaten verkregen en zijn derhalve hier niet getoond.

**Tabel 5-3** De parameters voor de unimodale en bimodale Mualem-Van Genuchten-relaties voor de 18 boven- en 18 ondergronden van de Staringreeks (SR; B01-B18, O01-O18) zoals gebruikt voor de landelijke berekeningen voor effectiviteit verticale wormgangen. De factor in de laatste kolom is de verhouding  $K_{sfit,2}/K_{sfit}$ .

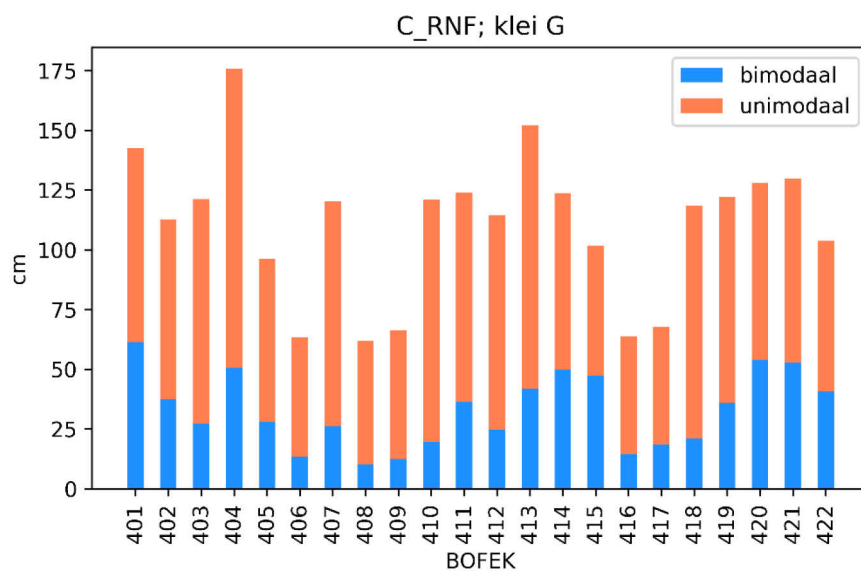
SR	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$\lambda$	$K_{sfit}$	$\theta_{s,2}$	$n_2$	$\alpha_2$	$\omega_1$	$K_{sfit,2}$	factor
B01	0.02	0.4275	0.02166	1.735	0.981	31.23	0.4313	5	2.681	0.991258	137.76	4.41
B02	0.02	0.4339	0.02164	1.349	7.202	83.24	0.4376	5	2.681	0.991386	381.83	4.59
B03	0.02	0.4428	0.01499	1.505	0.139	19.08	0.4466	5	2.681	0.991558	121.51	6.37
B04	0.02	0.4619	0.01488	1.397	0.295	34.88	0.4657	5	2.681	0.991905	213.37	6.12
B05	0.01	0.3809	0.04281	1.808	0.024	63.65	0.3847	5	2.681	0.990199	167.04	2.62
B06	0.01	0.3848	0.02092	1.242	-1.200	104.10	0.3886	5	2.681	0.990298	523.26	5.03
B07	0	0.4006	0.01835	1.248	0.952	14.58	0.4044	5	2.681	0.990677	82.98	5.69
B08	0.01	0.4327	0.01048	1.278	-1.919	3.00	0.4364	5	2.681	0.991362	30.79	10.25
B09	0	0.4295	0.00696	1.267	-2.387	1.75	0.4333	5	2.681	0.991300	32.81	18.77
B10	0.01	0.4481	0.01283	1.135	4.581	3.83	0.4519	5	2.681	0.991657	30.27	7.90
B11	0.01	0.5913	0.02162	1.107	-5.549	6.31	0.5951	5	2.681	0.993665	19.51	3.09
B12	0.01	0.5297	0.01656	1.091	-4.494	2.25	0.5335	5	2.681	0.992934	10.07	4.49
B13	0.01	0.4161	0.00836	1.437	-1.357	29.83	0.4199	5	2.681	0.991021	449.24	15.06
B14	0.01	0.4168	0.00541	1.302	-0.335	0.90	0.4205	5	2.681	0.991036	26.81	29.96
B15	0.01	0.5285	0.02373	1.282	-1.478	87.45	0.5322	5	2.681	0.992917	282.19	3.23
B16	0.01	0.7861	0.02107	1.279	-1.221	12.36	0.7898	5	2.681	0.995227	31.85	2.58
B17	0	0.7186	0.01906	1.137	0.000	4.48	0.7224	5	2.681	0.994781	13.54	3.02
B18	0	0.7655	0.02047	1.151	0.000	13.14	0.7692	5	2.681	0.995099	35.57	2.71
O01	0.01	0.3658	0.01599	2.163	2.868	22.32	0.3696	5	2.681	0.989800	171.05	7.66
O02	0.02	0.3871	0.01608	1.524	2.440	22.76	0.3908	5	2.681	0.990354	160.39	7.05
O03	0.01	0.3398	0.01724	1.703	0.000	12.37	0.3436	5	2.681	0.989028	91.81	7.42
O04	0.01	0.3641	0.01364	1.488	2.179	25.81	0.3678	5	2.681	0.989751	243.13	9.42
O05	0.01	0.3367	0.03030	2.888	0.074	17.42	0.3405	5	2.681	0.988927	69.06	3.96
O06	0.01	0.3334	0.01596	1.289	-1.010	32.83	0.3372	5	2.681	0.988820	272.83	8.31
O07	0.01	0.5131	0.01199	1.153	-2.013	37.55	0.5169	5	2.681	0.992707	258.50	6.88
O08	0	0.4538	0.01132	1.346	-0.904	8.64	0.4575	5	2.681	0.991760	75.48	8.74
O09	0	0.4582	0.00972	1.376	-1.013	3.77	0.4620	5	2.681	0.991840	39.94	10.60
O10	0.01	0.4723	0.01005	1.246	-0.793	2.30	0.4761	5	2.681	0.992082	22.38	9.73
O11	0	0.4436	0.01432	1.126	2.357	2.12	0.4474	5	2.681	0.991573	14.54	6.85
O12	0.01	0.5607	0.00881	1.158	-3.172	1.08	0.5645	5	2.681	0.993321	9.80	9.08
O13	0.01	0.5733	0.02785	1.080	-6.091	9.69	0.5770	5	2.681	0.993467	24.82	2.56
O14	0.01	0.3939	0.00329	1.617	0.514	2.50	0.3976	5	2.681	0.990519	194.39	77.88
O15	0.01	0.4101	0.00776	1.287	0.000	2.79	0.4138	5	2.681	0.990890	48.71	17.45
O16	0	0.8892	0.00971	1.364	-0.665	1.46	0.8930	5	2.681	0.995778	6.87	4.70
O17	0.01	0.8486	0.01193	1.272	-1.249	3.40	0.8524	5	2.681	0.995577	13.51	3.97
O18	0.01	0.5803	0.01266	1.316	-0.786	35.95	0.5840	5	2.681	0.993545	201.91	5.62



**Figuur 5-9** Vergelijking simulatieresultaten voor situaties zonder wormgangen (unimodaal; x-as) en met wormgangen (bimodaal; y-as) voor (links) cumulatieve runoff, (midden) cumulatieve infiltratie en (rechts) aantal runoffevents gedurende de periode 1980-2019.



**Figuur 5-10** Cumulatieve gesimuleerde runoff over 40 jaar voor situaties zonder wormgangen (unimodaal; oranje) en met wormgangen (bimodaal; blauw) voor de 27 BOFEK2012-zandeenheden.



**Figuur 5-11** Cumulatieve gesimuleerde runoff over 40 jaar voor situaties zonder wormgangen (unimodaal; oranje) en met wormgangen (bimodaal; blauw) voor de 22 BOFEK2012 klei-/zavel-eenheden.

### Samenvattend

De effectiviteit van wormgangen op de infiltratie bij zandgronden lijkt uit deze analyse gering te zijn. Omdat bovengenoemde regionale studie zich richtte op het stroomgebied van de Vecht waar voornamelijk zandprofielen voorkomen, is besloten dat niet nader naar de effectiviteit van wormgangen en vertidraains in de regionale modellering zal worden gekeken.

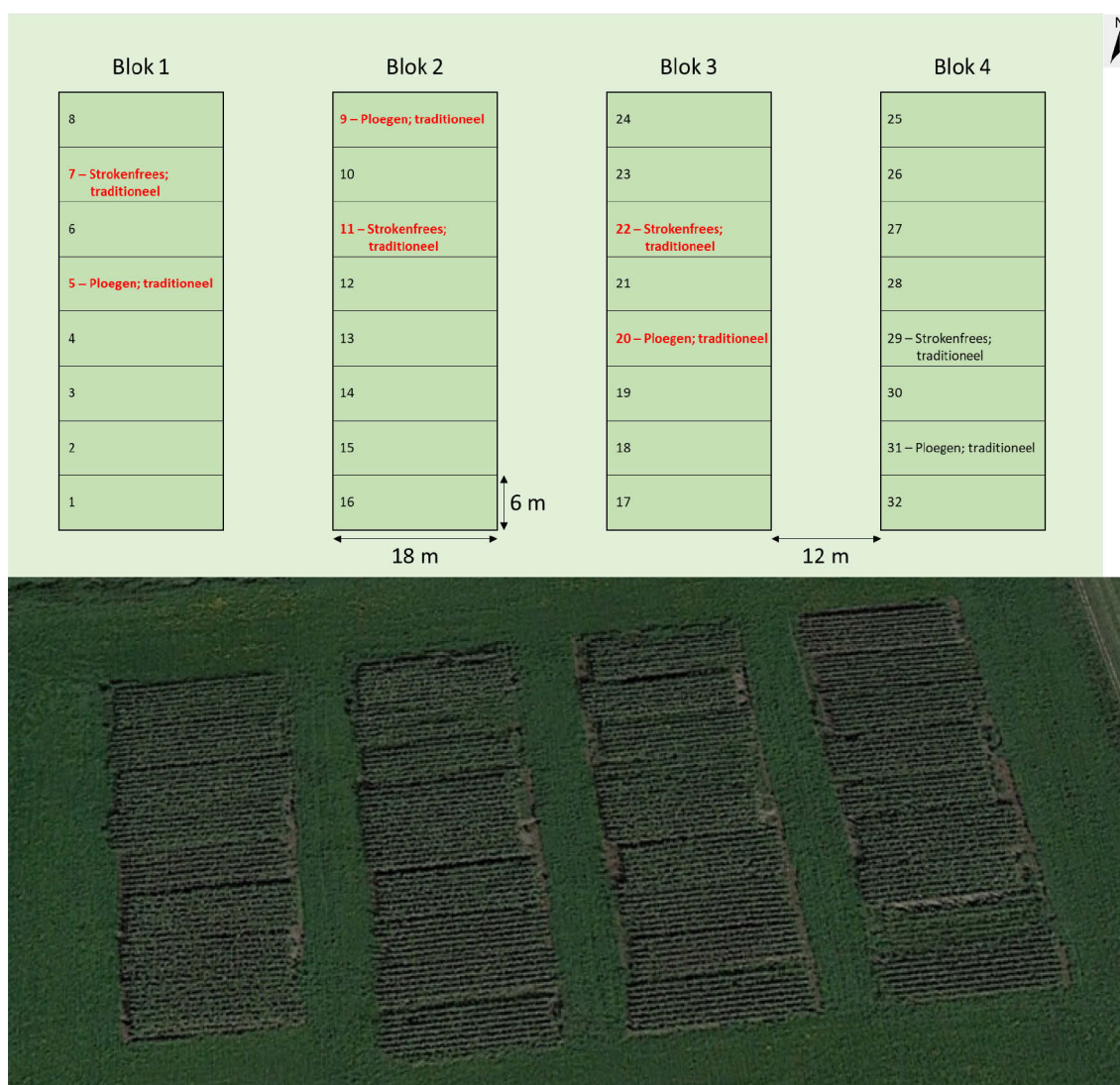
Omdat lokaal in Stegeren toch af en toe plasvorming wordt waargenomen, duidt dit erop dat er soms problemen met infiltratie zijn. Dit treedt nauwelijks op wanneer we de standaard BOFEK2012 en Staringreeks-eigenschappen beschouwen. Cruijsen (2020) heeft een eerste gevoeligheidsanalyse gedaan op a) de drempelhoogte wanneer plasvorming tot oppervlakkige afvoer leidt en op b) de verandering van bodemfysische eigenschappen voor verdichte bovengronden. Afname drempelhoogte en verdichting (vertaald in veranderingen in de waterretentie en doorlatendheid) geven aanleiding tot minder infiltratie en meer oppervlakkige afvoer. Dat effect is groter naarmate de bovengrond lemiger is. Details zijn te vinden in Cruijsen (2020). Het verdient aanbeveling om in de toekomst meer aandacht te besteden aan de (veranderingen in) dichtheid van de bodems en de invloed daarvan op de bodemfysische eigenschappen en de daaropvolgende simulatieresultaten.

## 5.2 Bodemfysische eigenschappen bij twee soorten grondbewerking

### 5.2.1 Beschrijving

Het Louis Bolk Instituut heeft in de jaren 2012-2019 een grondbewerkingsproef (traditioneel ploegen; strokenfrees; niet-kerende grondbewerking (woeler+rotorkoepel); direct zaaien zonder grondbewerking) uitgevoerd ten westen van de Loonse en Drunense Duinen (De Moer) (Stienezen et al., 2021). Voorafgaand aan de proef was het perceel in gebruik als grasland. In onderling overleg zijn voor de behandelingen ploegen (p) en strokenfrees (s) grondmonsters verzameld waaraan de bodemfysische eigenschappen zijn bepaald conform de vereisten voor de BasisRegistratie Ondergrond (BRO; zie bijv. Bakker et al., 2019).

De proefopzet bestond uit acht behandelingen (grondbewerking + bouwplan) die in viervoud (blokken) was aangelegd. Elk blok bestond uit acht proefvelden met afmetingen 6\*18 m. Voor deze bemonstering zijn drie van de vier<sup>2</sup> blokken bemonsterd in de p- en s-varianten met een traditioneel bouwplan (mais en rogge als groenbemester): het betreft proefvelden 5, 9, 20 (ploegen, p), 7, 11, 22 (strokenfrees, s). Plots 9, 20, 7 en 11 zijn op drie dieptes bemonsterd, plots 5 en 22 op twee dieptes (onderste laag niet bemonsterd).



**Figuur 5-12** Boven: proefopzet grondbewerkingsproef waarbij bodemfysische eigenschappen zijn bepaald in proefvelden 5, 9, 20 (allemaal ploegen) en 7, 11 en 22 (allemaal strokenfrees) (overige behandelingen zijn niet bemonsterd); onder: Google Earth-opname van 24-08-2019 van de proeflocatie.

<sup>2</sup> Het vierde (meest oostelijk gelegen) blok ligt in een verhoging in het perceel en is derhalve buiten beschouwing gelaten.

Volgens de BOFEK2012-kaart ligt de proef in eenheid 310: zwak-lemige zandgronden met een matig dik cultuurdek. Dat komt overeen met de lokale bodemprofielbeschrijvingen in de bemonsterde plots (zie Bijlage 9).

### 5.2.1.1 Resultaten

In totaal zijn op 16 locaties de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken bepaald en hiervoor zijn de Mualem-Van Genuchten-parameters afgeleid (Tabel 5-4). De curves zijn te zien in Figuur 5-13. Voor de laag 5-15 cm zien we dat de waterretentiecurves voor de behandeling strokenfrees rechts van de curves voor de behandeling ploegen liggen. Het watergehalte bij verzadiging is groter voor s- dan voor p-behandelingen, wat overeenkomt met de lagere dichtheid voor de s-behandeling dan voor de p-behandeling. De doorlatendheid in het droge traject is voor de s-behandeling lager dan voor de p-behandeling.

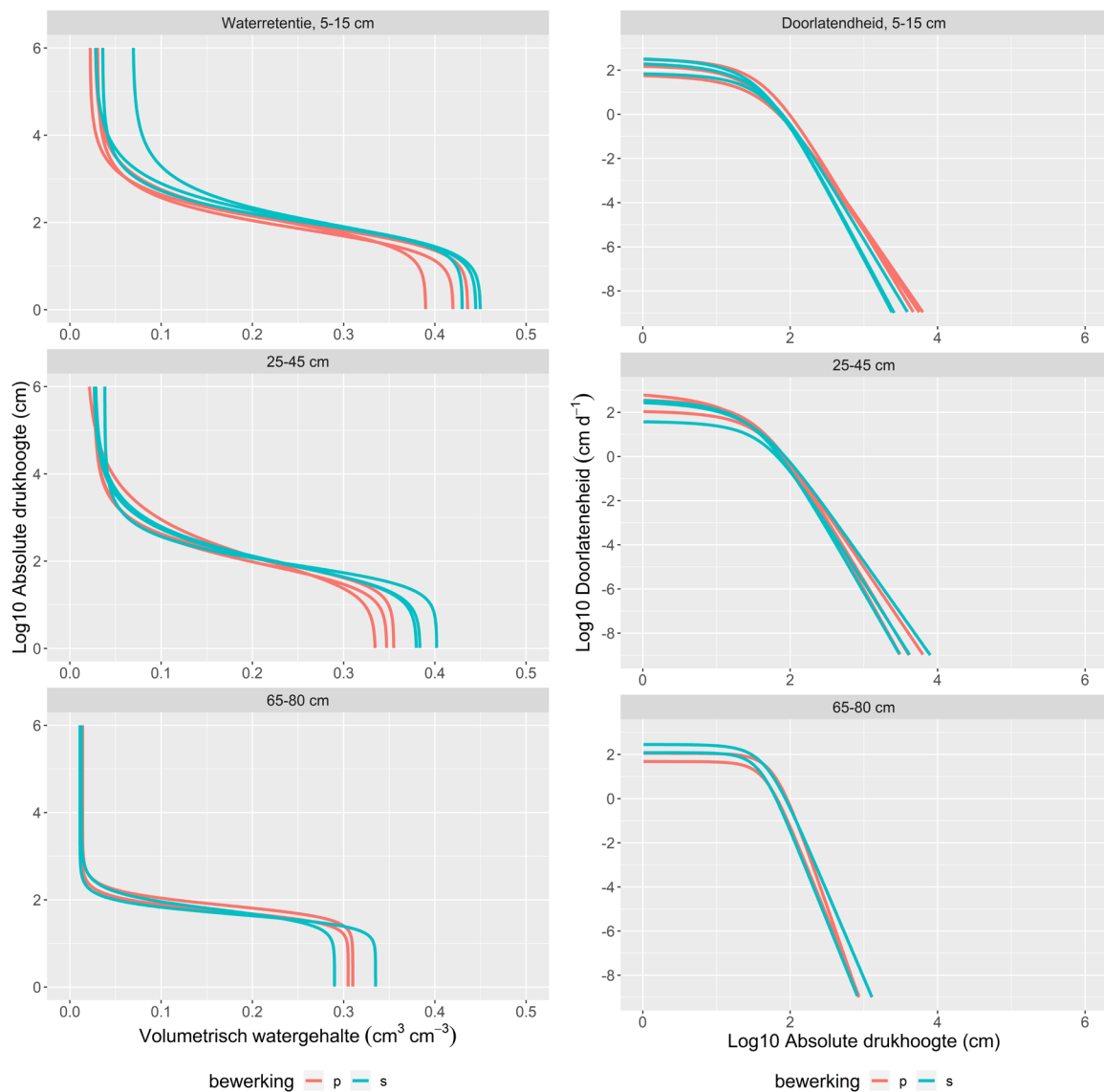
In de tussenlaag verschillen de waterretentiecurves met name nabij verzadiging, waarbij het watergehalte bij verzadiging voor de p-behandeling lager is, hetgeen veroorzaakt wordt door de grotere dichtheid in deze laag bij de p-behandeling. Deze grotere dichtheid is mogelijk het gevolg van verdichting na meerjarig ploegen.

In de onderste laag zijn de verschillen in de curves niet zichtbaar, hetgeen ook niet te verwachten is omdat daar de behandelingen geen effect meer hebben gehad.

**Tabel 5-4** De parameters voor de unimodale en bimodale Mualem-Van Genuchten-relaties voor de 16 bodemmonsters in de p- en s-behandelingen.

Blok	Plot	Bewerking	Diepte (cm)	Laag	$\theta_r$ (-)	$\theta_s$ (-)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$ (-)	$\lambda$ (-)	$K_{\text{sat,fit}}$ ( $\text{cm d}^{-1}$ )	$\rho_d$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )
1	5	p	5-15	1Aap	0.0303	0.420	0.02377	1.786	1.725	167.95	1317.5
2	9	p	5-15	1Aap	0.0221	0.436	0.01925	1.783	2.482	335.77	1393.5
3	20	p	5-15	1Aap	0.0278	0.390	0.01826	1.684	2.159	64.05	1466.0
1	7	s	5-15	1Aap	0.0276	0.450	0.01984	1.641	3.549	227.77	1422.5
2	11	s	5-15	1Ap	0.0691	0.445	0.02090	1.674	4.412	376.60	1345.7
3	22	s	5-15	1Aap	0.0360	0.430	0.01654	1.830	3.113	72.94	1383.7
1	5	p	30-40	1Aa	0.0173	0.335	0.02524	1.429	4.880	966.29	1543.8
2	9	p	30-40	1Aa	0.0272	0.355	0.01677	1.763	3.262	118.54	1513.9
3	20	p	30-40	1Aa	0.0265	0.347	0.02196	1.685	3.180	411.76	1547.7
1	7	s	25-35	1Aa1	0.0262	0.384	0.02324	1.620	4.150	415.33	1468.9
2	11	s	35-45	1Ah/Bhe	0.0275	0.380	0.02302	1.592	2.592	344.08	1548.5
3	22	s	25-35	1Aa	0.0383	0.402	0.01828	1.927	1.543	39.26	1493.0
2	9	p	65-75	1Ce1	0.0131	0.305	0.02035	3.332	0.706	47.93	1720.0
3	20	p	70-80	1Ce	0.0139	0.310	0.01537	3.141	1.549	113.55	1722.1
1	7	s	70-80	2Ce1	0.0112	0.335	0.02424	3.361	0.657	120.82	1660.4
2	11	s	70-80	1Ce1	0.0126	0.290	0.01997	2.755	1.328	284.06	1708.1





**Figuur 5-13** Links: waterretentie- en (rechts) doorlatendheidskarakteristieken voor drie bodemlagen in de behandelingen ploegen (p) en strokenfrees (s).

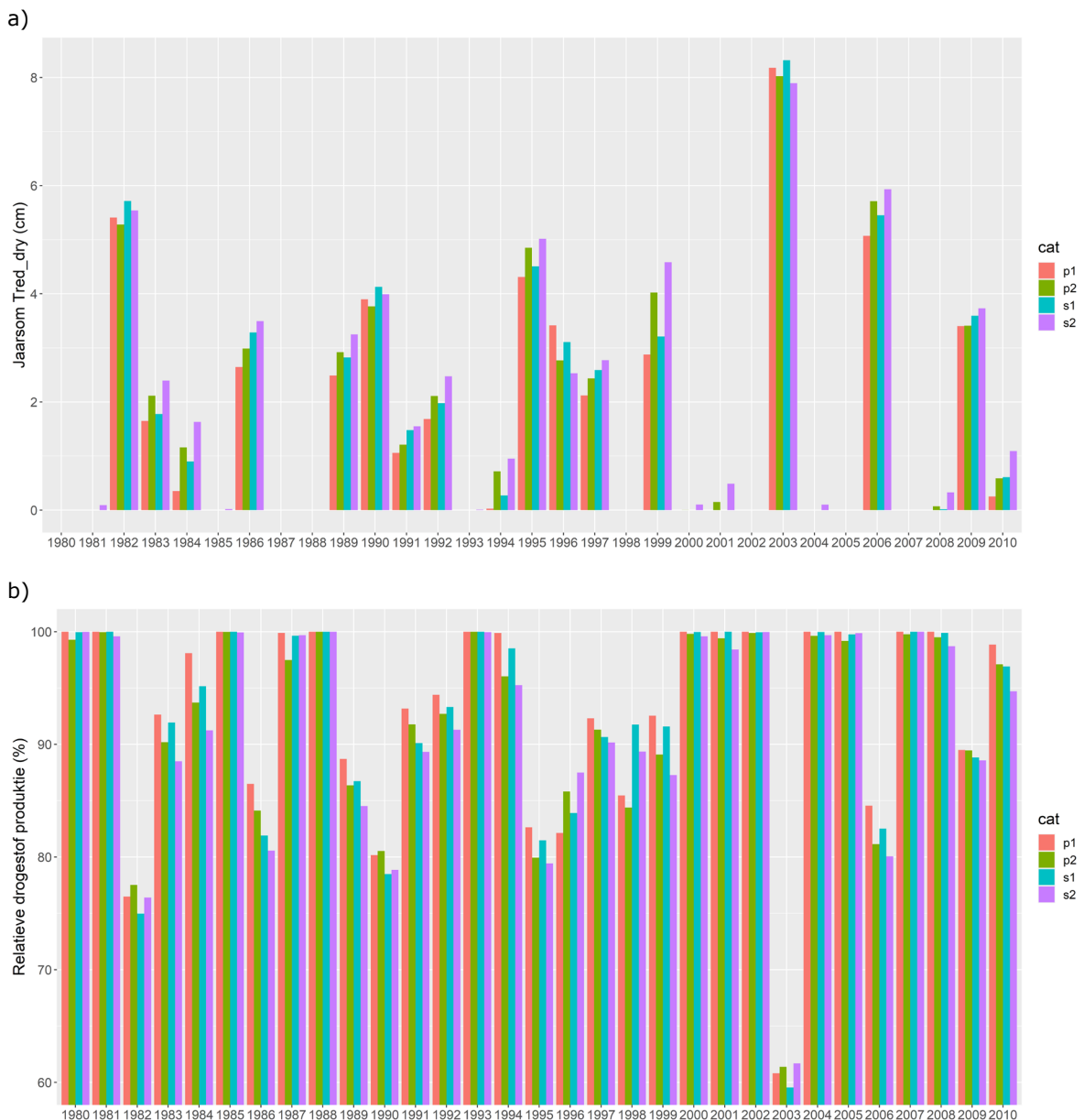
#### Modelberekeningen

Voor vier plots (2 x p, 2 x s) zijn de karakteristieken op alle drie de dieptes bekend. Voor deze vier plots zijn SWAP-WOFOST-berekeningen uitgevoerd voor mais<sup>3</sup> voor de periode 1980-2010 om na te gaan of de behandelingen leiden tot verschillen in transpiratiereductie als gevolg van droogte. Als uitgangspunt zijn de invoergegevens voor BOFEK 310, Gt-VI uit Waterwijzer Landbouw gebruikt, en alleen de laagindeling en bijbehorende fysische eigenschappen zijn aangepast.

Behalve in 1996 zien we dat de gemiddelde transpiratiereductie als gevolg van droogte bij de strokenfrees-behandeling hoger is dan die bij de behandeling ploegen (Figuur 5-14a). Transpiratiereductie als gevolg van zuurstofstress is verwaarloosbaar klein (uitzondering: 1998, met gemiddeld 1 mm; overige situaties kleiner dan 0.1 mm en meestal zelfs < 0.025 mm). Opvallend genoeg blijkt de gemiddelde waterbeschikbaarheid ( $\theta(h=-100) - \theta(h=-16000)$ ) voor de behandeling s in de bovenste laag net iets groter te zijn dan voor de behandeling p, de kritieke stijghoogte is vrijwel identiek, daarentegen is de gemiddelde kritieke flux die de p-profielen kunnen leveren bijna tweemaal zo groot als die voor de s-profielen (Tabel 5-5). De hogere waterbeschikbaarheid betekent dus niet dat dit leidt tot een geringere transpiratiereductie. Het lijkt erop dat de hogere kritieke flux in de geploegde profielen ervoor zorgt dat er steeds op het juiste moment voldoende water beschikbaar is.

<sup>3</sup> Er is voor de winterperiode wel een vanggewas beschouwd in de simulatie, maar deze periode wordt niet meegenomen in de presentatie van de resultaten voor mais (groeiperiode: 16 april tot en met 15 oktober).

De drogestofproductie in de geploegde simulatieruns voor mais (Figuur 5-14b) is dan ook in sommige jaren een paar procentpunten hoger. Dus, over het algemeen geldt dat minder transpiratiereductie (p) leidt tot een iets hogere drogestofproductie. Er zijn enkele jaren waarin de drogestofproductie voor de behandeling p lager is dan die voor de behandeling s (1996, 1998). Voor 1998 moet dat het gevolg zijn van de zuurstofstress; er was in dat jaar geen verschil in lengte van het groeiseizoen (indirecte effecten). In 1996 was de lengte van het groeiseizoen voor de geploegde situaties iets langer (gemiddeld 2 d) dan voor de strokenfreessimulaties, en opvallend genoeg leidt dit tot een geringere relatieve productie. NB In deze simulaties is de bewortelingsdiepte voor alle situaties hetzelfde gehouden. Dat kan in werkelijkheid natuurlijk ook beïnvloed zijn door de behandelingen. Bewortelingsdieptes zijn niet gemeten in de genoemde proef.

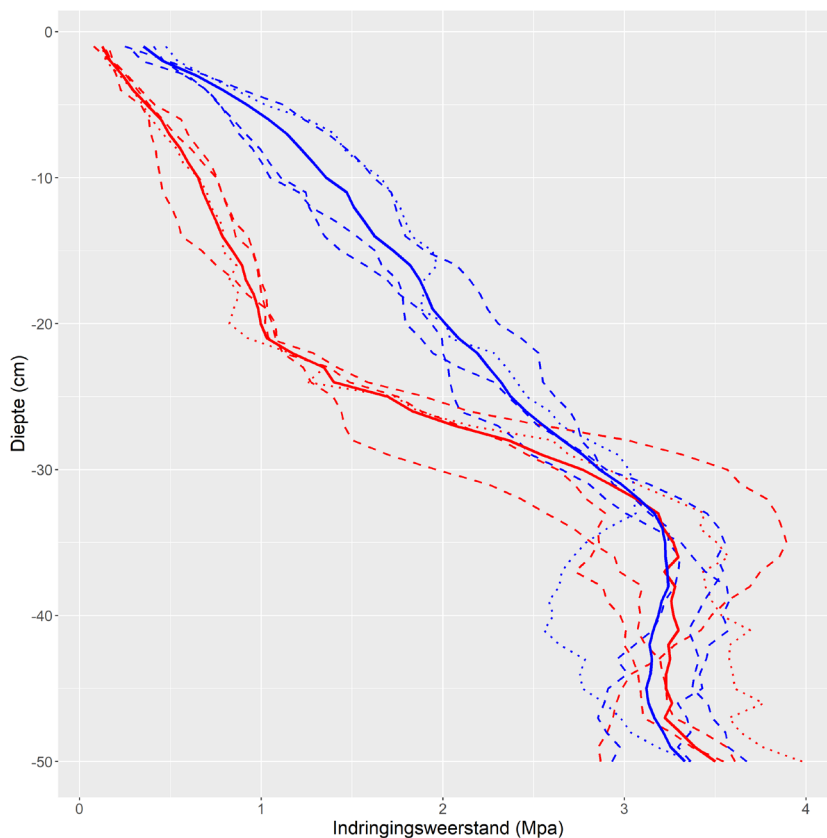


**Figuur 5-14** a) Gesimuleerde transpiratiereductie (jaarsom) en b) gesimuleerde relatieve drogestofproductie mais (%) voor de periode 1980-2010 voor de behandelingen (cat) ploegen (p) en strokenfrees (s) voor de afzonderlijke twee simulaties per behandeling.

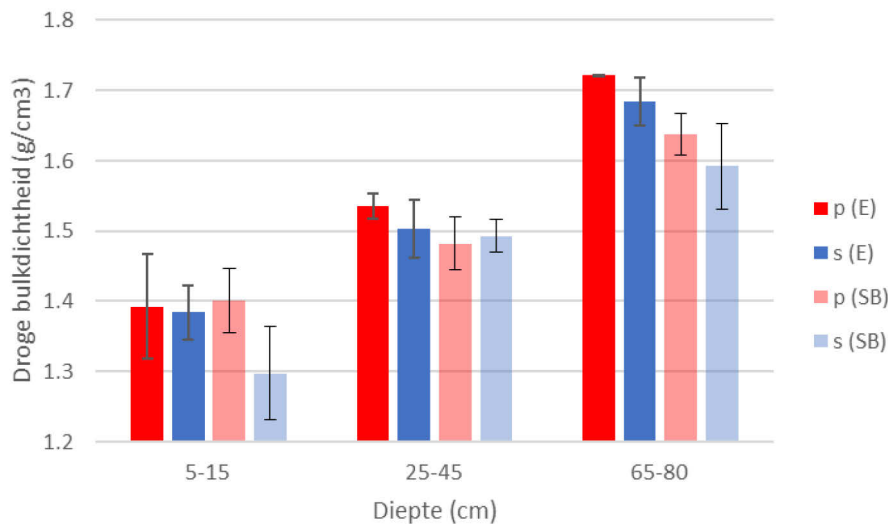
**Tabel 5-5** Enkele karakteristieke kenmerken van de doorgerekende bodemprofielen voor de twee behandelingen ploegen (p) en strokenfrees (s) en hun gemiddelden; AvWat1, AvWat2 = gemakkelijk (1) en moeilijk (2) beschikbaar water in de laag 0-30 cm (cm); Zcrit1, Zcrit2 = kritiek stijghoogte bij flux van 1 en 2 mm d<sup>-1</sup> (cm); qcrit = kritieke flux die mogelijk is bij grondwater op 120 cm -mv en h = -16000 cm aan maaiveld (cm d<sup>-1</sup>).

Plot	Bewerking	AvWat1	AvWat2	Zcrit1	Zcrit2	qcrit
9	p	4.01	2.31	117.2	107.5	0.329
20	p	3.49	2.43	141.8	127.7	0.232
7	s	3.86	2.91	111.9	102.3	0.174
11	s	3.46	2.45	145.6	132.2	0.142
	p, gemiddeld	3.75	2.37	129.5	117.6	0.281
	s, gemiddeld	3.66	2.67	128.8	117.2	0.158

Enkele dagen voorafgaand aan de bemonstering heeft het Louis Bolk Instituut indringingsweerstand gemeten in de beschouwde behandelingen (Stienezen et al., 2021; Figuur 5-15). Hier valt op dat de indringingsweerstand in de geploegde plots in de bovengrond lager is dan die van de gefreesde plots. Dat lijkt niet in overeenkomst met de gemeten droge bulkdichtheden in de grondmonsters, want die komen per diepte-interval onderling overeen (Figuur 5-16). Voor een geploegde bovengrond verwacht je inderdaad lagere indringingsweerstand, omdat bij ploegen de grond intensiever los wordt gemaakt dan met een rijenfrees, zelfs als de dichtheid ongeveer hetzelfde is (Jan van den Akker, persoonlijke mededeling). Door het intensieve losmaken worden namelijk allerlei verbindingen tussen de korrels verbroken, waardoor de cohesie lager wordt. Dit kan aanzienlijk in de indringingsweerstand schelen. Herstel van deze verbindingen kan lang duren. Omdat de behandelingen elk jaar werden herhaald, is er geen herstel opgetreden. Het verschil in indringingsweerstand kan ook niet toegeschreven worden aan verschillen in vochtcondities, want die waren zo goed als identiek tijdens de meting. Deze analyse geeft aan dat de indringingsweerstand dus niet zonder meer een maat voor de droge bulkdichtheid is, maar dat daarbij ook het landmanagement beschouwd moet worden.



**Figuur 5-15** Gemeten indringingsweerstand in viervoud (onderbroken lijnen) en hun gemiddelde (doorgetrokken lijnen) voor de behandelingen ploegen (p; rood) en strokenfrees (s; blauw) als functie van de diepte. Bron: Stienezen et al., 2021 (data: J. Deru, LBI).



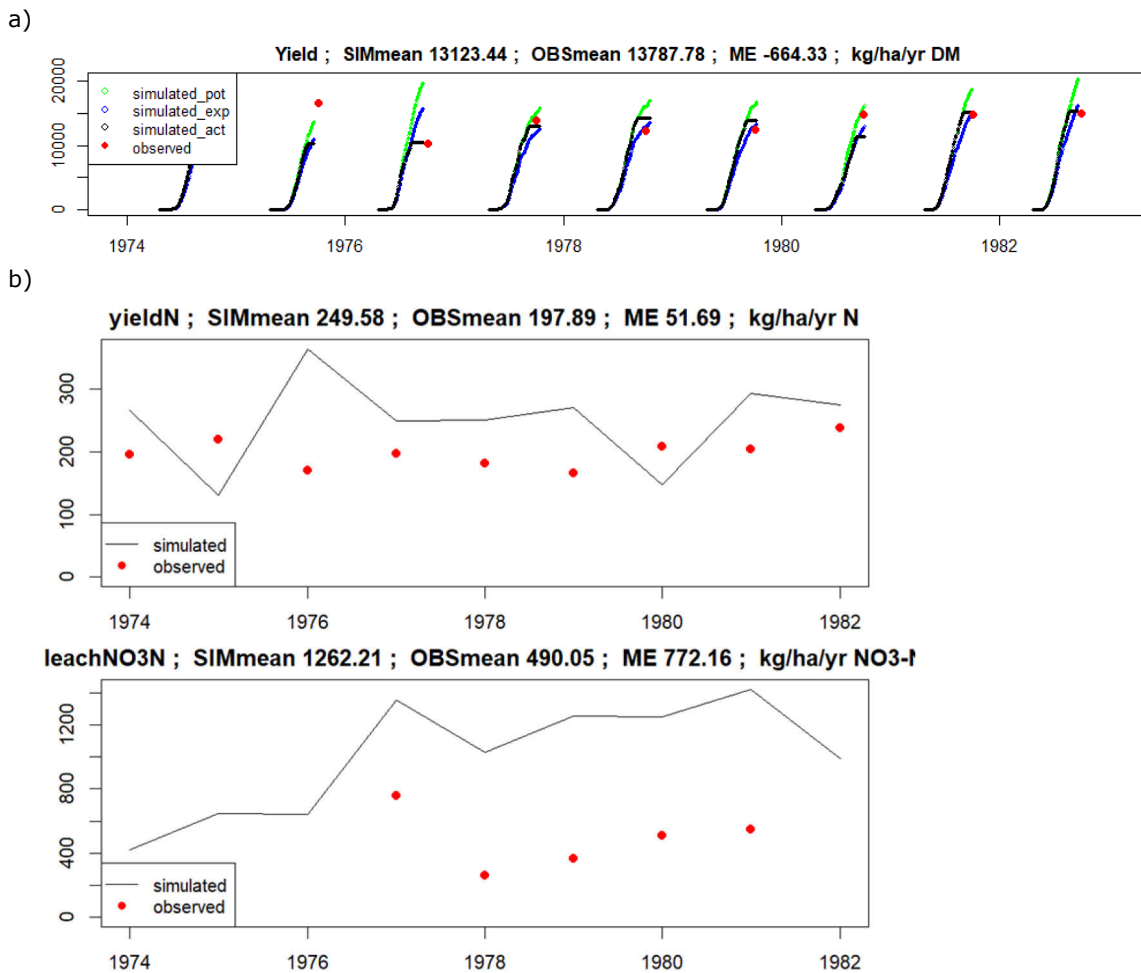
**Figuur 5-16** Droge bulkdichtheid op drie dieptes voor de behandelingen ploegen (p) en strokenfrees (s). Metingen zijn uitgevoerd in grote (666 cm<sup>3</sup>; E; donkere kleuren) en kleine (100 cm<sup>3</sup>; SB; lichte kleuren) monsters (n = 3).

### Samenvattend

Aan het eind van een achtjarige grondbewerkingsproef zijn in plots die steeds werden geploegd en in plots waar met een strokenfrees is gewerkt, de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken bepaald. Visueel zijn er kleine verschillen en de dichtheden verschilden nauwelijks. De uit deze eigenschappen berekende fysische kengetallen voor beschikbaar water en kritieke stijghoogte waren vrijwel identiek. Wel was de zogenaamde kritiek flux (zie Heinen et al., 2021) groter voor de geploegde situatie dan voor de strokenfrees-situatie. Uit simulatieberekeningen volgde dat de transpiratiereductie voor de behandeling strokenfrees een fractie groter was dan bij ploegen. Opvallend was de observatie dat de indringingsweerstand van de bovenlaag in de geploegde plots geringer was dan in de stroken-frees-plots. Omdat de dichtheid in beide behandelingen vrijwel hetzelfde was, geeft dit aan dat er geen unieke relatie bestaat tussen dichtheid en indringingsweerstand. De verklaring voor deze waarneming luidt dat tijdens ploegen de verbindingen tussen de bodemdeeltjes meer worden verbroken, waardoor de indringingsweerstand lager uitvalt.

## 5.3 Nitraatuitspoeling

In Groenendijk et al. (2017) is een voorbeeld gegeven van het gebruik van de N-module in SWAP-WOFOST. Dit betrof een proef in Cranendonck in de periode 1974-1982, waarbij extreem hoge runderdrijfmestgiften werden gebruikt. SWAP-WOFOST was goed in staat de opbrengst van zowel de droge stof als die van N in het gewas na te rekenen. De daarin gepresenteerde schatting voor de NO<sub>3</sub>-N-verliezen aan de onderzijde van de wortelzone blijken niet correct te zijn weergegeven (fout in interpretatie metingen). Ook met de huidige versie van SWAP-WOFOST kon deze proef goed worden nagerekend (Figuur 5-17). De gesimuleerde verliezen aan de onderzijde van de wortelzone zijn groter dan de waargenomen gemeten uitspoeling. Hierbij moet worden bedacht dat de verliespost aan de onderzijde van de wortelzone tijdens verder verblijf in de bodem en transport naar het grondwater toe nog aan omzettingsprocessen onderhevig is, waardoor het berekende verlies aan de onderzijde van de wortelzone dus een overschatting voor uitspoeling zal zijn. Verder geldt dat de N-module in SWAP-WOFOST primair bedoeld is om een eerste inschatting van de gewasproductie onder invloed van N (naast water) te geven, welke vervolgens verder gebruikt kan worden als input voor detail N-berekeningen met ANIMO (hier niet uitgevoerd, omdat dit geen onderdeel binnen Lumbricus was). De gesimuleerde N-verliezen aan de onderzijde van de wortelzone met SWAP-WOFOST zijn dus niet exact, maar indicatief. Wel kan hiermee inzicht verschaft worden over de verschillen tussen scenario's of verschillen tussen verschillende toedieningen van N, zoals hieronder.



**Figuur 5-17** Gesimuleerde a) gewasopbrengst en b) N in opbrengst en  $\text{NO}_3\text{-N}$ -verlies aan de onderzijde van de wortelzone vergeleken met metingen (symbolen) voor de Cranendonck testcase uit Groenendijk et al. (2017), hier nagerekend met de huidige versie van SWAP-WOFOST.

Uitgaande van deze testcasus is een nieuwe uitgangssituatie doorgerekend waarbij enkel decennialang alleen kunstmest is gegeven. Vervolgens zijn drie berekeningen uitgevoerd waarbij de in Lumbricus Bewuste Bodem toegepaste organische materialen zijn toegediend: bokashi, insectensubstraat en keurcompost (zie paragraaf 4.4). Deze organische materialen zijn toegevoegd boven op de standaard basis kunstmestgift van  $210 \text{ kg N ha}^{-1}$ . De verliezen aan de onderzijde van de wortelzone zijn vergeleken met die verkregen voor de referentiesituatie van alleen kunstmest (zonder aanvullende N) (Tabel 5-6).

De simulaties zijn voor negen achtereenvolgende jaren uitgevoerd. Voor bokashi is aangehouden een jaarlijkse gift van  $20 \text{ ton ha}^{-1}$  met een N-gehalte van  $29.4 \text{ g kg}^{-1}$  (gehalte in gras; bokashi was gemaakt van bermmaaisel). Dat gaf een jaarlijkse additionele N-gift van  $67 \text{ kg N ha}^{-1}$ . In de proef met insectensubstraat en keurcompost werden wisselende hoeveelheden per jaar toegediend. Hier zijn de gemiddelde waarden gebruikt. Er is  $20 \text{ ton ha}^{-1}$  insectensubstraat toegediend; met een gemiddeld N-gehalte van  $28.8 \text{ g kg}^{-1}$  kwam dat neer op  $88 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Er is  $50 \text{ ton ha}^{-1}$  keurcompost toegediend; met een gemiddeld N-gehalte van  $8.16 \text{ g kg}^{-1}$  kwam dat neer op  $65 \text{ kg N ha}^{-1}$ . De inhoud voor de specifieke invoerbestanden voor de N-module voor de vier varianten zijn gegeven in Bijlage 11.

De toediening van  $60$  tot  $90 \text{ kg N ha}^{-1}$  via organische materialen boven op de kunstmestgift laat zien dat er voor bokashi en insectensubstraat een iets hogere opbrengst (droge stof en N in gewas) wordt gesimuleerd (Tabel 5-6). Voor keurcompost treedt dit niet op; dit kan worden toegeschreven aan het feit dat keurcompost zeer langzaam afbreekt, zodat er netto maar weinig N aanvullend beschikbaar komt in de wortelzone. Hoewel er een deel van het extra vrijgekomen N wordt opgenomen door het gewas, zien we ook dat de verliezen aan de onderzijde van de wortelzone voor bokashi en insectensubstraat duidelijk hoger zijn dan voor de referentiesituatie (Tabel 5-6). Van alle extra beschikbare N

dat is vrijgekomen door mineralisatie is een klein deel opgenomen door het gewas; het overgrote deel wordt aangemerkt als verliezen aan de onderzijde van de wortelzone.

**Tabel 5-6.** De beschouwde jaarlijkse N-gift en gesimuleerde opbrengst, N in opbrengst en verliezen aan de onderzijde van de wortelzone voor de vier casussen. De N-gift is gegeven als kunstmest (210) plus aanvullende N via organische materialen. Resultaten zijn gemiddelden over een periode van negen jaar (1974-1982).

Casus	N gift (kg ha <sup>-1</sup> )	Gesimuleerd Opbrengst (kg ha <sup>-1</sup> )	N in opbrengst (kg ha <sup>-1</sup> )	Verlies NO <sub>3</sub> -N (kg ha <sup>-1</sup> )
Referentie	210 + 0	12261	150	149
Bokashi	210 + 67	12348	155	170
Insectensubstraat	210 + 88	12499	165	202
Keurcompost	210 + 65	12250	149	141

De hier behandelde voorbeelden hebben gedeeltelijk betrekking op proeven uitgevoerd in Lumbricus Bewuste Bodem (zie Heinen, 2021; De Weert et al., 2020). Omdat de proeven niet zodanig waren opgezet om een formele validatie van SWAP-WOFOST + N-module uit te kunnen voeren, zijn de hier beschouwde situaties alleen illustratief te beschouwen en is het niet mogelijk om de gemeten uitspoeling te vergelijken met de gesimuleerde N-verliezen uit de onderzijde van de wortelzone. Wel is duidelijk geworden dat er zowel in de proeven als in de simulaties extra nitraatuitspoeling optreedt wanneer organische (rest)materialen aan de bodem worden toegediend boven op de kunstmestgift (welke is afgestemd op gewasbehoefte).

### Samenvattend

Met het SWAP-WOFOST-model, inclusief de N-module, zijn voorbeeldsimulaties uitgevoerd voor situaties waarbij naast kunstmest (afgestemd op gewasbehoefte) drie verschillende organische (rest)materialen zijn toegediend, die onderling verschillen in afbraaksnelheid en stikstofmineralisatie. De extra vrijkomende stikstof leidde weliswaar tot een iets hogere opbrengst en N-opname, maar voornamelijk tot een toename in de nitraatverliezen aan de onderzijde van de wortelzone. Dat wil nog niet zeggen dat de gesimuleerde verliezen gelijk zijn aan de nitraatconcentraties in het bovenste grondwater in het winterseizoen, maar wel dat het aannemelijk is dat er extra uitspoeling zal optreden indien de bemesting (kunst + organische (rest)materialen) niet is afgestemd op de gewasbehoefte. Dit past bij de waarnemingen uit veldonderzoek.

---

# 6 Onderdeel beheer en onderhoud algemeen en testcases

## 6.1 Beheer en onderhoud SWAP algemeen

Tijdens de diverse toepassingen en testberekeningen binnen Lumbricus, inclusief Waterwijzer Landbouw, zijn enkele aanpassingen doorgevoerd die voor algemeen gebruik van belang zijn. Deze worden niet in detail beschreven, maar enkele belangrijke zijn hier opgesomd (NB Vanaf SWAP-versie 4.1.0, hetgeen de versie is zoals gebruikt bij oplevering Waterwijzer Landbouw 1.0):

- Bugs irrigatie opgeheven (4.1.3); opsplitsing irrigatie optie tc5 (4.1.29; zie paragraaf 3.2);
- Verbetering berekening waterbalans N-module (4.1.8);
- Toestaan adaptieve drainage in optie 'basic drainage' (4.1.10; zie paragraaf 3.1);
- Verbetering (en versnelling rekentijd) module stoftransport (4.1.25);
- Toevoegen exponentiële relaties voor retentie en doorlatendheid (4.1.26; zie paragraaf 2.1);
- Toevoegen bimodale Mualem-Van Genuchten-relaties voor retentie en doorlatendheid (4.1.27; zie paragraaf 2.3);
- Verbetering restart gewas groeiseizoen (4.1.30; 4.1.43);
- Verbetering tijdstapregeling (4.1.38; zie paragraaf 2.6);
- Toevoegen optie uitvoer volgens opgave door gebruiker: .csv uitvoer bestand (4.1.39; 4.1.45; 4.1.48; 4.1.52);
- Meteogegevens in één bestand aanleveren (i.p.v. per jaar) (4.1.39; 4.1.41);
- Enkele gewasgroei gerelateerde aanpassingen/verbeteringen (diversen);
- Extra optie voor h(gewogen) harmonische K-middeling op grensvlak rekencompartimenten (4.1.61);
- Algemene beheer en onderhoud, o.a. weglaten inlezen overbodige informatie; vastzetten constante waarden in parameters; veelvuldig gebruikte berekeningen van constante grootheden eenmalig bij initialisatie en bewaard, etc.; dit leidt tot versnelling rekentijd.

In het kader van een intern kennisbasisproject is via een vergelijking van SWAP-WOFOST met WOFOST nagegaan of beide de potentiële groei identiek berekenen. Na een paar kleine aanpassingen in de SWAP-WOFOST-code was dat te realiseren. Deze verbeteringen komen ten goede aan toekomstige Waterwijzer Landbouw-berekeningen (tabel en maatwerk).

## 6.2 Nieuwe testcases

In hoofdstuk 2 en 4 zijn tests gepresenteerd waar SWAP-simulaties zijn vergeleken met analytische oplossingen voor infiltratie, stoftransport en bodemtemperatuur. Deze kunnen worden herhaald indien SWAP belangrijke aanpassingen heeft ondergaan.

De vergelijking van SWAP-simulaties versus analytische oplossingen voor infiltratie (casus Srivastava & Yeh, 1991; casus Basha, 1999; zie Bijlage 1): vergelijking tussen gesimuleerde  $h(z)$ ,  $q(t)$  of  $\theta(z)$  worden met de analytische oplossingen (zie paragraaf 2.1).

De vergelijking van SWAP-simulaties versus analytische oplossing voor stoftransport (casus van Genuchten & Alves, 1982; zie Bijlage 5): vergelijking tussen gesimuleerde  $c(z)$  voor drie waarden van de dispersielengte  $L_d$  met een analytische oplossing (zie paragraaf 4.1).

De vergelijking van SWAP-simulaties versus analytische oplossing voor bodemtemperatuur (zie Bijlage 7): vergelijking tussen gesimuleerde  $T(z,t)$  met een analytische oplossing (zie paragraaf 4.2).

---

## 7 Discussie en aanbevelingen

Modellen zoals SWAP-WOFOST kunnen zinvol ingezet worden om relatief snel inzicht te verkrijgen in de waterbalans, gewasgroei en eventueel stikstofdynamiek op verschillende bodem-gewaslocaties. Sommige processen ontbreken echter in dergelijke modellen of zijn nog niet goed getoetst. Binnen Lumbricus thema 'Bewuste Bodem' was in cluster 2 een deelproject uitgevoerd: *Aanpassen en doorontwikkelen modelinstrumentarium ten behoeve van bodem- en hydrologische maatregelen*. De aanpassingen betroffen met name onderdelen die aansloten bij de onderzoeksonderwerpen binnen het thema 'Bewuste Bodem': bodem- en hydrologische maatregelen.

Bij aanvang van Lumbricus zijn in het thema 'Bewuste Bodem' onderwerpen gedefinieerd waarvoor aanvullend onderzoek nodig is om inzicht te krijgen in de effectiviteit van bodem- en hydrologische maatregelen. De betreffende maatregelen waren gekozen omdat er enerzijds geen effectiviteit (onder Nederlands omstandigheden) voor bekend was en anderzijds omdat deze door de betrokkenen als kansrijk werden gezien. Het waren geen noviteiten, maar desondanks ontbrak voldoende voorkennis. Er werd tevens vastgesteld dat de destijds bestaande simulatiemodellen niet (of niet voldoende) in staat waren om die effectiviteit op gefundeerde wijze in te schatten. Vandaar dat voor de meeste maatregelen is nagegaan of en zo ja wat er dan in de bestaande modellen, i.c. SWAP-WOFOST, aangepast of toegevoegd moest worden. Voor onderwerp 'wormen, grondbewerking en maaiveld-afvoer' was gewenst om na te gaan in hoeverre bioporiën en grondbewerking van invloed zijn op infiltratie en eventuele oppervlakkige afvoer van water dat niet kan infiltreren. Voor de hydrologische maatregelen 'klimaat-adaptieve drainage met subirrigatie' en 'slimme stuw SAWAX en berekening' zijn in de afgelopen jaren wijzigingen in SWAP doorgevoerd. Er was ook enige aandacht voor maatregelen en hun effect op (grond)waterkwaliteit. Daarvoor was het nodig om de N-module in SWAP-WOFOST te toetsen en te voorzien van juiste informatie over de afbraaksnelheid van organische (rest)materialen.

Op basis van een quickscan-literatuuronderzoek is voorgesteld om de invloed van verticale (worm)gangen in de bovengrond te benaderen door middel van de zogenaamde bimodale variant van de Mualem-Van Genuchten-modellen voor de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken. De extra benodigde parameters die hiervoor nodig zijn, kunnen worden bepaald aan de hand van het aantal en de diameter van de (worm)gangen. Het is mogelijk gebleken om met deze bimodale variant enkele infiltratieproeven in het veld na te rekenen. Zowel uit metingen (Kaandorp et al., 2021) als uit simulaties blijkt dat hoe meer (worm)gangen per vierkante meter, des te meer water infiltreert onder verzadigde omstandigheden met water op het land. Wanneer vervolgens met deze bimodale beschrijving de situatie voor de afgelopen veertig weerjaren wordt doorgerekend op zandgronden, dan zien we echter nauwelijks of geen effect op infiltratie in vergelijking tot situaties zonder (worm)gangen. Dat betekent dat voor zandgronden die zijn geschematiseerd en geparameteriseerd volgens de Staringreeks2018 en BOFEK2012 de doorlatendheid van de bovengrond niet beperkend is. Voor andere grondsoorten (bijv. klei, zavel) volgt dat de aanwezigheid van verticale (worm)gangen via het bimodale concept leidt tot toename van de hoeveelheid water die kan infiltreren (en dus niet oppervlakkig zal afstromen). Omdat op zandgronden soms plasvorming en oppervlakkige afstroming wordt waargenomen, zijn er waarschijnlijk meer processen/omstandigheden die een rol spelen, waardoor een beperkte infiltratie optreedt. Mogelijk dat bovengrondverdichting hier mede oorzaak van is. Wanneer de bovengrond meer verdicht is (dan de gemiddelde waarde zoals behorend bij de Staringreeks), zullen de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken ook moeten veranderen, waardoor dat impact heeft op de infiltratie (zie bijv. Cruijssen, 2020). Een andere oorzaak kan zijn dat gedurende natte omstandigheden een beperkte beschikbare berging in de bodem aanwezig is en vervolgens een grote neerslaggebeurtenis optreedt. Dit vraagt om aanvullend onderzoek.

In dit onderzoek is bij aanvang voorgesteld na te gaan of en in hoeverre een bimodale beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken gebruikt kan worden om de effectiviteit van verticale (worm)gangen ten aanzien van infiltratie te simuleren. In dit onderzoek is dit concept succesvol toegepast. Dat wil niet zeggen dat we hiermee stellen dat dit het enige concept is om de



---

infiltratie bij aanwezigheid van macroporiën (bioporiën, scheuren etc.) te beschouwen. De ontwikkelingen gaan door op het gebied van de simulatie van het effect van macroporiën, maar ook ten aanzien van het kwantificeren van de benodigde invoergegevens voor ingewikkelder modelconcepten, zoals het macroporiënconcept in SWAP (zie bijv. Faúndez Urbina et al., 2019; 2020).

De huidige manier van agrohydrologische modellering, zoals uitgevoerd in Waterwijzer Landbouw en NHI/LHM, beperkt zich tot de interactie bodem-gewas op basis van simulatie van water in de onverzadigde zone. Gewassen hebben naast water (en zuurstof) ook nutriënten nodig om te kunnen groeien. De huidige simulaties veronderstellen dus impliciet dat nutriënten nooit limiterend (niet te weinig of te veel) zijn. In het consensusmodel STONE (Wolf et al., 2003) wordt bijvoorbeeld wel naar de stikstofbalans gekeken. Hierbij wordt SWAP gebruikt, waarbij de berekende waterbalans termen vervolgens als input worden gebruikt voor de N-berekeningen van ANIMO (Groenendijk et al., 2005; Renaud et al., 2005). Echter, in dat geval is de gewasgroei en daarmee de verdamping gebaseerd op alleen de interactie van water op bodem-gewas, maar een eventuele interactie met N is dan niet beschouwd. Op deze manier kunnen gewasgroei en verdamping worden overschat. Daarom is SWAP in het verleden uitgebreid met een eenvoudige N-module (Groenendijk et al., 2017). Hiermee kan op een eenvoudige manier toch rekening worden gehouden met de interactie water-stikstof op de gewasontwikkeling. Deze aangepaste gewasontwikkeling en waterbalansinformatie kunnen dan vervolgens weer gebruikt worden in ANIMO. Met deze eenvoudige N-module hebben we hier laten zien dat eventueel te veel aanwenden van N zal leiden tot een overmaat aan verliezen aan de onderzijde van de wortelzone, wat tot grotere uitspoeling zal leiden. Hiermee kan op een snelle manier gesimuleerd worden wat de invloed is van aanwenden van organische (rest)materialen op de N-balans van het perceel. Zowel uit metingen (De Weert et al., 2020; Heinen (red.), 2021) als uit voorbeeldsimulaties is gebleken dat extra uitspoeling optreedt.

In dit onderzoek is aangetoond dat SWAP technisch goed in staat is om infiltratie, stoftransport en bodemtemperatuur te simuleren. Dat is aangetoond door SWAP-simulaties te vergelijken met analytische oplossingen voor deze drie aspecten. Hiermee is vastgesteld dat de numerieke oplossing in SWAP goed functioneert. Belangrijk hierbij is te constateren dat dit goed gaat juist, omdat de bodemfysische eigenschappen en de boven-, onder- en zijrandvoorwaarden exact bekend zijn. In de praktijk wordt SWAP toegepast voor landelijke en regionale studies. Hierbij moeten inschattingen gemaakt worden van perceel-gemiddelde bodemfysische eigenschappen en moeten juiste randvoorwaarden worden ingesteld. Daarbij wordt vaak gebruikgemaakt van de landelijke bodemfysische data zoals beschikbaar in de Staringreeks2018 (Heinen et al., 2020) en BOFEK2012 (Wösten et al., 2013; binnenkort verschijnt BOFEK2020, Heinen et al., 2021). Dat zijn gemiddelde eigenschappen, die dus zeer waarschijnlijk afwijken van de toestand in het studiegebied.

Het valt buiten de scope van dit rapport om de belangrijkste overall bevindingen van het onderzoek in Lumbricus thema 'Bewuste Bodem' (cluster 2) hier te herhalen. Deze zijn terug te vinden in enerzijds de afzonderlijke deelrapporten van de diverse veldexperimenten (Kaandorp et al., 2021; De Weert et al., 2020; Van de Logt & Van Eekeren, 2021), in het samenvattende rapport over de bodemgerichte maatregelen (Heinen (red.), 2021), en in het overall eindproduct van Lumbricus (Bartholomeus (red.), 2021); zie ook <https://www.stowa.nl/deltafacts/lumbricus-klimaatrobuuste-hogere-zandgronden>).

Het model SWAP-WOFOST is aangepast, zodat het in staat is om situaties zonder en met aanwezigheid van grotere bioporiën (bijv. wormgangen of vertidraïns) te kunnen simuleren en daarbij het effect op infiltratie en eventueel gesimuleerde oppervlakkige afvoer te onderzoeken. In geval van aanwezigheid van bioporiën kan daarmee een hogere infiltratiesnelheid berekend worden. Of er dan daadwerkelijk meer water infiltreert, hangt natuurlijk nog wel af van de bodemfysische eigenschappen: als die bij afwezigheid van wormgangen al goed zijn, zal het toevoegen van de optie bioporiën uiteraard geen effect opleveren. Daarnaast is de N-module getoetst op mogelijke nitraatuitspoeling bij toedienen van organische (rest)materialen. Op basis van de afbreeksnelheid (humificatiecoëfficiënt) kan dan een inschatting gemaakt worden van de nitraatverliezen aan de onderzijde van de wortelzone. Voor een betere stikstofbalans blijft het echter nog wel nodig om daarna het model ANIMO te draaien. Het voordeel van de SWAP-WOFOST-N-berekening is dan wel dat de gewasgroei en stikstofbehoefte zoals berekend met SWAP-WOFOST-N zorgt voor een meer realistische invoer richting ANIMO. Het verdient nog wel de aanbeveling meerdere tests uit te voeren.

---

Uit metingen is gebleken dat voor twee soorten langjarige grondbewerking de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken, de dichtheid, waterbeschikbaarheid en kritieke stijghoogte nauwelijks verschillen. In Van der Bolt et al. (2020) zijn eerste ervaringen opgedaan waarin de dichtheid en dientengevolge de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken tijdsafhankelijk zijn tijdens en enkele weken volgend op grondbewerking (bijv. ploegen). Hiervoor is het echter wel noodzakelijk om aanvullende invoer te verkrijgen over hoe snel de dichtheid weer toeneemt na grondbewerking, maar zeer waarschijnlijk ook een extra meetpunt in de waterretentiekarakteristiek voor de situatie direct na ploegen. Dergelijke informatie ontbreekt. In zijn stageonderzoek heeft Cruijssen (2020) een eerste gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij het effect van een verandering in dichtheid en dientengevolge in de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van invloed is op infiltratieberekeningen met SWAP. Een toename in dichtheid van de bovengrond op zandgronden kan leiden tot meer plasvorming en oppervlakkige afvoer. Uit internationaal onderzoek is gebleken dat de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken veranderen wanneer de dichtheid verandert. Deze informatie is gebruikt in de studies van Van der Bolt et al. (2020) en Cruijssen (2020), maar er is nog geen analyse gedaan in welke mate deze afhankelijkheden in Nederland op dezelfde wijze verlopen, of dat er unieke Nederlandse vertaalfuncties moeten worden afgeleid. De Staringreeks 2018 is gebaseerd op informatie van individuele monsters, en per bouwsteen worden hiervoor gemiddelde curves afgeleid. Dat betekent dat deze gemiddelde curves per definitie gelden voor 'gemiddelde' dichtheden. Daarmee zal met de Staringreeks nooit een goede lokaal-specifieke simulatie waar een verdichte bovengrond aanwezig is, uitgevoerd kunnen worden. In toekomstig onderzoek (bijvoorbeeld in KLIMAP<sup>4</sup>) is verdichting een van de onderzoeksonderwerpen. Er is tevens een meer fundamenteel onderzoeksproject ingediend waarin in meer detail naar bodemverdichting zal worden gekeken (werknaam: BoVer).

---

<sup>4</sup> <https://www.wur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Onderzoeksinstituten/Environmental-Research/show-wenr/Meerjarig-onderzoek-naar-klimaatadaptieve-inrichting-hoge-zandgronden-1.htm>

---

# Literatuur

- Alberti, D.R. and E.E. Cey. 2011. Evaluation of Macropore Flow and Transport Using Three-Dimensional Simulation of Tension Infiltration Experiments. *Vadose Zone Journal* 10:603–617. doi:10.2136/vzj2010.0104
- Assouline, S. 2006. Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Hydraulic Conductivity Function. *Vadose Zone Journal* 5(2): 697-705. doi: 10.2136/vzj2005.0084.
- Bakker, G., M. Heinen, H.P.A. Gooren, W.J.M. de Groot, F.B.T. Assinck & E.W.J. Hummelink. 2019. Hydrofysische gegevens van de bodem in de Basisregistratie Ondergrond (BRO) en het Bodemkundig Informatie Systeem (BIS); Update 2018. WOt-technical report 149, Wageningen Environmental Research, Wageningen. <http://edepot.wur.nl/474161>
- Bartholomeus, R. (red.) 2021. Programma Lumbricus. Integrale benadering van een klimaatrobuuste inrichting en beheer van stroomgebieden. Een overzicht. Rapport 2021-05, STOWA, Amersfoort. Zie ook: Lumbricus: voldoende water van goede kwaliteit. <https://www.stowa.nl/lumbricus>; Zie ook: <https://www.programmalumbricus.nl/> en <https://www.stowa.nl/deltafacts/lumbricus-klimaatrobuuste-hogere-zandgronden/inrichten-en-beheren-welke-maatregelen-kun>
- Basha, H.A. 1999. Multidimensional linearized nonsteady infiltration with prescribed boundary conditions at the soil surface. *Water Resources Research* 35(1): 75-83.
- Berghuijs-van Dijk, J.T. 1985. WATBAL A simple water-balance model for a unsaturated/saturated soil profile. Nota 1670, Institute for Land and Water Management Research, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/211082>
- Beven, K., and P. Germann. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research* 18: 1311-1325. <http://dx.doi.org/10.1029/WR018i005p01311>.
- Beven, K., and P. Germann. 2013. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research* 49 (6): 3071-3092. <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20156>.
- Brown, H., S. Carrick, K. Müller, S. Thomas, J. Sharp, R. Cichota, D. Holzworth, and B. Clothier. 2018. Modelling soil-water dynamics in the rootzone of structured and water-repellent soils. *Computers and Geosciences* 113: 33-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2018.01.014>.
- Crujisen, J.J.P. 2020. Wormgangen voor klimaatadaptatie op de zandgronden. Verslaglegging en reflectie: stage Wageningen Environmental Research. Stageverslag Wageningen Universiteit.
- Daus, A.D., E.O. Frind, and E.A. Sudicky. 1985. Comparative error analysis in finite element formulations of the advection-dispersion equation. *Advances in Water Resources* 8: 86-95.
- De Weert, J., J. Rozemeijer, A. Cinjee, E. van Vilsteren, M, Heinen, W. de Groot. 2020. Bodemverbeterende maatregelen: Pilot met toevoegen organisch materiaal. Effecten op nitraatuitspoeling naar het grondwater. Rapport 1220765-000-BGS-0022, Deltares, Delft/Utrecht. [http://publications.deltares.nl/1220765\\_000.pdf](http://publications.deltares.nl/1220765_000.pdf)
- De Wit, J., Van Huigevoort, M., Van den Eertwegh, G., Van Deijl, D., Bartholomeus, R., 2021a. Technische rapportage veldproeven met watermaatregelen Stegeren. Ontwerp en monitoring van vijf veldproeven met (automatisch gestuurde) regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuw in Stegeren (2017-2020). KWR, Nieuwegein.
- De Wit, J., Van Huijgevoort, M., Van Deijl, D., Van den Eertwegh, G., Bartholomeus, R., 2021b. Regelbare drainage met subirrigatie en slimme stuwen - Veldproeven en modelanalyses in het zandgebied van Nederland voor een meer robuuste waterhuishouding op lokale en regionale schaal. KWR, Nieuwegein.
- Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research* 30: 211-223.
- Faúndez Urbina, C.A., J.C. van Dam, R.F.A. Hendriks, F. van den Berg, H.P.A. Gooren, and C.J. Ritsema. 2019. Water Flow in Soils with Heterogeneous Macropore Geometries. *Vadose Zone Journal* 18 (1). <https://dx.doi.org/10.2136/vzj2019.02.0015>.
- Faúndez Urbina, C.A., J.C. van Dam, F. van den Berg, C.J. Ritsema, and D.W.S. Tang. 2020. Determination of the relative macroporosity and the effective aggregate width for different macropore geometries with disk infiltrimeters. *Vadose Zone Journal* 2020;19:e20048. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20048>

- 
- Fonck, H. 1968. Een onderzoek naar de infiltratiecapaciteit van gronden in de Gelderse Achterhoek. Nota 455, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.  
<https://edepot.wur.nl/257539>
- Gerke, H. H., and M. T. Van Genuchten. 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Research* 29: 305-319.
- Groenendijk, P., Boogaard, H., Heinen, M., Kroes, J., Supit, I., and de Wit, A. 2016. Simulation of nitrogen-limited crop growth with SWAP/WOFOST; Process descriptions and user manual. Report 2721. Wageningen Environmental Research, Wageningen, The Netherlands.  
<https://edepot.wur.nl/400458>
- Groenendijk, P., Renaud, L. V., & Roelsma, J. 2005. Prediction of nitrogen and phosphorus leaching to groundwater and surface waters. Process descriptions of the Animo 4.0 model. Alterra-rapport 983. Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/35121>
- Hanks, R.J. and G.L. Ashcroft. 1980. *Applied Soil Physics*. Advanced Series in Agricultural Sciences 8, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Hansen, S. Undated. Daisy, a flexible Soil-Plant-Atmosphere system Model. Beschikbaar: <https://daisy.ku.dk/publications/DaisyDescription.pdf>
- Heinen, M. (red.). 2021. Samenvatting resultaten bodemaatregelen: Lumbricus Bewuste Bodem. WENR rapport 3060, Wageningen Environmental Research, Wageningen.  
<https://doi.org/10.18174/512762>
- Heinen, M. and G. Bakker. 2016. Implications and Application of the Raats Superclass of Soils Equations. *Vadose Zone Journal* 15(8), doi:10.2136/vzj2016.02.0012.
- Heinen, M., M. Mulder, D. Walvoort, R. Bartholomeus, S. Stofberg, M. Hack-ten Broeke. 2017. Praktijktoets waterwijzer landbouw in pilotgebieden de Raam en Vecht. Rapport 2017-44, STOWA, Amersfoort  
<http://stowa.nl/upload/Publicaties%202017/STOWA%202017%2044%20WEB%20LR.pdf>
- Heinen, M., G. Bakker, J.H.M. Wösten. 2020a. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Update 2018. Report 2987, Wageningen Environmental Research, Wageningen, <https://doi.org/10.18174/512761>
- Heinen, M., F. Assinck, P. Groenendijk and O. Schoumans. 2020b. Soil Dynamic Models: Predicting the Behavior of Fertilizers in the Soil. Chapter 8.2 in: E. Meers, G. Velthof, E. Michels, R. Rietra, C.V. Stevens (eds.), *Biorefinery of Inorganics: Recovering Mineral Nutrients from Biomass and Organic Waste*. Wiley.
- Heinen, M., F. Brouwer, K. Teuling, D. Walvoort. 2021. BOFEK 2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland. Update bodemfysische eenhedenkaart. WENR rapport 3056, Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/541544>
- Janssen, B.H. 1984. A simple method for calculating decomposition and accumulation of “young” soil organic matter. *Plant and Soil* 76: 297–304.
- Jansson, P.-E. and L. Karlberg. 2011. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. COUP manual. Beschikbaar: <http://www.coupmodel.com/documentation>
- Kaandorp, V., P. de Louw, N. van Eekeren, C. Versteeg. 2021. Demonstratie Maatregelen Maaiveldafvoer. Rapport 1220765-013-BGS-0002, Deltares, Delft/Utrecht.
- Köhne, J.M., and B.P. Mohanty. 2005. Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore: Experiment and hierarchical modeling. *Water Resources Research* 41: 1-17.  
<http://dx.doi.org/10.1029/2004WR003303>.
- Koorevaar, P., G. Menelik and C. Dirksen. 1983. *Elements of Soil Physics*. Developments in Soil Science 13, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, and P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. Beschikbaar <https://edepot.wur.nl/416321>; zie ook: [swap.wur.nl](http://swap.wur.nl)
- Larsbo, M. and N. Jarvis. 2003. MACRO 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description. Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. ISBN 91-576-6592-3. Beschikbaar: [https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/ckb/modeller\\_dokument/macro-5.0-technical-report-2003.pdf](https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/ckb/modeller_dokument/macro-5.0-technical-report-2003.pdf)

- Malone, R. W., L. R. Ahuja, L. Ma, R. D. Wauchope, Q. Ma, and K. W. Rojas. 2004. Application of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM), to pesticide fate and transport: An overview. *Pest Management Science* 60: 205-221. <http://dx.doi.org/10.1002/ps.789>.
- Moene A.F. and J.C. Van Dam. 2014. *Transport in the Atmosphere-Vegetation-Soil Continuum*. Cambridge University Press, New York.
- Mohanty, B.P. 1999. Scaling hydraulic properties of a macroporous soil. *Water Resources Research* 35: 1927-1931.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12: 513-522.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, 1, a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Or, D. and J.M. Wraith. 2002. Soil Water Content and Water Potential Relationships. In: A.W. Warrick (ed.), *Soil Physics Companion*, pp. 49-84. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Pouwels, J., P. van Walsum, C. van Rens, J. Hunink, M. Heinen, J. Cruijssen, A. Veldhuizen, G.-J. Nijsten. 2021. Regionale analyse van maatregelen Lumbricus. Lumbricus rapportage - Deltares, Wageningen Environmental Research, Waterschap Aa en Maas (in voorbereiding)
- Priesack, E., and W. Durner. 2006. Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function, *Vadose Zone Journal* 5: 121-124
- Renaud, L. V., Roelsma, J., & Groenendijk, P. 2005. ANIMO 4.0. User's guide of the ANIMO 4.0 nutrient leaching model. Alterra-rapport 224. Alterra, Wageningen. <http://www2.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/Alterrapporten/AlterraRapport224.pdf>
- Sander, T. and H.H. Gerke. 2009. Modelling field-data of preferential flow in paddy soil induced by earthworm burrows. *Journal of Contaminant Hydrology* 104: 126-136. doi:10.1016/j.jconhyd.2008.11.003
- Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten. 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 4.08. Department Of Environmental Sciences University Of California Riverside, California. Beschikbaar: [https://www.pc-progress.com/Downloads/Pgm\\_hydrus1D/HYDRUS1D-4.08.pdf](https://www.pc-progress.com/Downloads/Pgm_hydrus1D/HYDRUS1D-4.08.pdf)
- Šimůnek, J., M. Th. van Genuchten, and M. Šejna. 2018. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual Version 3. PC-Progress, Prague, Czech Republic. Beschikbaar: [https://www.pc-progress.com/downloads/Pgm\\_Hydrus3D3/HYDRUS3D\\_Technical\\_Manual\\_v3.pdf](https://www.pc-progress.com/downloads/Pgm_Hydrus3D3/HYDRUS3D_Technical_Manual_v3.pdf)
- Srivastava R. and T.-C.J. Yeh 1991. Analytical solutions for one-dimensional transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered Soils. *Water Resources Research* 27(5): 753-762.
- Stienezen, M.W.J., H.A. van Schooten, H.F. Huiting, J.G.C. Deru, J.W.M. Sleiderink, R.Y. van der Weide. 2021. Duurzaam bodembeheer maïs. Proefresultaten 2019 (*voorlopige titel*). Rapport xxx, Wageningen Livestock Research en Louis Bolk Instituut (in voorbereiding).
- Ten Berge, H.F.M., J.C.M. Withagen, F.J. de Ruijter, M.J.W. Jansen and H.G. van der Meer. 2000. Nitrogen responses in grass and selected field crops. QUADMOD parameterisation and extensions for STONE application. Report 24, Plant Research International, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/46015>
- Topp, G.C. 1969. Soil-water hysteresis measured in a sandy loam and compared with the hysteretic domain model. *Soil Science Society of America Proceedings* 33: 645-651.
- Van de Logt, R. & N. van Eekeren. 2021. Introduction of *Lumbricus terrestris* into permanent grasslands on sandy soil. *Submitted to Applied Soil Ecology*.
- van der Bolt, F.J.E., W.M. Cornelis, J. de Pue, H.M. Mulder, L. Lin, C.D. Thành, M. Volckaert, M. Heinen en R.F.A. Hendriks, 2020. Bodemverdichting in Vlaanderen. Vlaamse Overheid, departement Omgeving.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
- Van Genuchten, M.Th. and W.J. Alves. 1982. Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation. Technical Bulletin No. 1661, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Washington.

- 
- Van Schaik, N.L.M.B., R.F.A. Hendriks and J.C. van Dam. 2010. Parameterization of macropore flow using dye-tracer infiltration patterns in the SWAP model. *Vadose Zone Journal* 9: 95–106. doi:10.2136/vzj2009.
- Verburg, K., P.J. Ross, and K.L. Bristow. 1996. SWIMv2.1 User Manual. CSIRO Division of Soil, Australia. Beschikbaar: <https://www.apsim.info/Portals/0/Documentation/SWIMv21UserManual.pdf>
- Vereecken, H., A. Schnepf, J. W. Hopmans, M. Javaux, D. Or, T. Roose, J. Vanderborght, et al. 2016. Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal* 15 (5). <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>.
- Werkgroep Waterwijzer Landbouw (M. Mulder, M. Hack-ten Broeke, R. Bartholomeus, J. van Dam, M. Heinen et al.). 2018. Waterwijzer Landbouw: Instrumentarium voor kwantificeren van effecten van waterbeheer en klimaat op landbouwproductie. Rapport 2018-48. STOWA, Amersfoort. <http://www.waterwijzer.nl/Upload/waterwijzer/Publicaties/STOWA%202018-48%20WWL%20defversie.pdf>
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63: 1309–1313.
- Wolf, J., Beusen, A. H. W., Groenendijk, P., Kroon, T., Rötter, R., & van Zeijts, H. 2003. The integrated modeling system STONE for calculating nutrient emission from agriculture in the Netherlands. *Environmental Modelling & Software*, 18, 597-617.
- Wösten, H., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijkers & A. Bolman. 2013. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra-rapport 2387, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/247678>

---

# Bijlage 1 Analytische oplossingen verificatie water

Hier worden twee analytische oplossingen voor infiltratie van water in de bodem beschouwd die gebruikt zijn om de numerieke oplossing van SWAP te toetsen (verifiëren).

*Srivastava & Yeh (1991)*

Srivastava & Yeh (1991) geven een analytische oplossing voor eendimensionale, tijdsafhankelijke infiltratie in een gelaagd bodemprofiel met een vast grondwaterniveau aan de onderzijde. Deze oplossing vereist exponentiële relaties voor zowel de waterretentie- en de doorlatendheidskarakteristiek.

De exponentiële  $K(h)$  relatie is gegeven als:

$$K(h) = K_s \exp[\alpha h]$$

De waterretentiekarakteristiek is gegeven als:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp[\alpha h]$$

De differentiële vochtcapaciteit  $C(h) = d\theta/dh$  is gegeven als:

$$C(h) = \alpha(\theta_s - \theta_r) \exp[\alpha h]$$

De basisoplossing wordt gegeven door hun vergelijkingen 30(a-c) voor  $K(z,t)$  voor de betreffende bodemlagen. Omdat in hun oplossing diverse parameters voorkomen (zie hun vergelijkingen 2, 13, 14c, 15 (voor de initiële toestand), 20-23, 24-26, 27-29) die weer afhankelijk zijn van de feitelijke situatie die wordt beschouwd, wordt de oplossing hier niet uitgeschreven.

De verdeling van de drukhoogte als functie van de diepte volgt uit de oplossing voor  $K(z)$  door de inverse uitdrukking voor  $K(h)$  in te vullen:

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{K}{K_s} \right]$$

Er kunnen vier verschillende situaties beschouwd worden:  $K_{s2} > K_{s1}$  or  $K_{s2} < K_{s1}$  voor zowel vernatting als uitdroging (zie hun figuren 6 en 7); subscript 1 refereert naar de onderste laag en subscript 2 naar de bovenste laag.

Deze exponentiële relaties voor  $K(h)$ ,  $\theta(h)$  and  $C(h)$  zijn geïmplementeerd in SWAP als een speciale optie speciaal bedoeld voor deze verificatiedoeleinden (iHWCKmodel = 2). Er geldt dat  $K(S) = K_s S$  met  $S$  de effectieve verzadigingsgraad:  $S = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ .

*Basha (1999)*

Voor dezelfde exponentiële relaties als hierboven gegeven, heeft Basha (1999) een alternatieve analytische oplossing gegeven voor  $\theta(z,t)$  (zijn Eq. (31)) alsook een uitdrukking voor het tijdstip wanneer plasvorming (ponding) gaat optreden (zijn Eq. (32)). De oplossing is gegeven in dimensieloze grootheden welke via terugtransformatie volgens zijn vergelijkingen Eqs. (1), (7)-(9) kunnen worden omgezet naar werkelijke grootheden.

---

De dimensieloze oplossing is gegeven als:

$$u = \frac{q}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{\sqrt{4T}} - \sqrt{T} \right) - (1 + 2Z + 4T) \exp(2Z) \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{\sqrt{4T}} + \sqrt{T} \right) + 4 \sqrt{\frac{T}{\pi}} \exp \left( Z - T - \frac{Z^2}{4T} \right) \right]$$

Met

$$u = \exp(\alpha h)$$

$$Z = \frac{\alpha}{2} z$$

$$T = \frac{\alpha K_s}{4(\theta_s - \theta_r)} t$$

$$q = \frac{F}{K_s}$$

met  $F$  de fluxrandvoorwaarde aan maaiveld.

Het tijdstip waarop plasvorming begint, volgt uit de algemene oplossing door te stellen dat voor  $Z = 0$  de uitkomst  $u = 1$  (i.e.  $h = 0$ ) in te vullen:

$$1 = q \left[ (1 + 2T) \operatorname{erfc}(\sqrt{T}) - 2T + 2 \sqrt{\frac{T}{\pi}} \exp(-T) \right]$$

Het tijdstip kan dan iteratief berekend worden.



## Bijlage 2 Aanpassing tabel cofgen

Standaard wordt in SWAP uitgegaan van de Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen. De bijbehorende parameters en enkele afgeleiden worden intern opgeslagen in een tabel genaamd 'cofgen'. Voor de uitbreiding naar een bimodale variant van Mualem-Van Genuchten is deze tabel uitgebreid met de bijkomende extra parameters. De structuur van de tabel cofgen is hieronder gegeven (Tabel B2-1). NB De bimodale variant voor de Mualem-Van Genuchten-relaties is nog niet geschikt om gecombineerd te worden met hysteresis.

De tabel cofgen wordt per SWAP-rekenlaag opgeslagen. Invoer van de Mualem-Van Genuchten parameters vindt plaats per afzonderlijke bodemlaag (horizont) welke worden ingelezen in de tabel 'paramvg'. De tabel paramvg heeft 10 waarden, overeenkomend met de eerste 10 waarden zoals hieronder beschreven. De tabel paramvg is uitgebreid voor de bimodale variant, en vanwege overeenkomst met cofgen eveneens gedimensioneerd met 16 entries.

**Tabel B2-1** Beschrijving vector cofgen na toevoeging van de bimodale parameters.

cofgen entry	Parameter	Toelichting
1	$\theta_r$	uni- en bimodaal
2	$\theta_s$	uni- en bimodaal
3	$K_{s,fit}$	uni- en bimodaal
4	$\alpha, \alpha_1$	uni- en bimodaal
5	$\lambda$	uni- en bimodaal
6	$n, n_1$	uni- en bimodaal
7	$m, m_1$	uni- en bimodaal
8	$(\alpha_w)$	$\alpha$ voor vernattingscurve in geval hysteresis wordt beschouwd; overdracht $\alpha_w$ gaat niet via de tabel cofgen maar via de tabel paramvg
9	$h_{enpr}$	alleen unimodaal
10	$K_{sat,exm}$	alleen unimodaal
11	$S_{thr}$	alleen unimodaal
12	$K_{sat,thr}$	alleen unimodaal
13	$\alpha_2$	alleen bimodaal
14	$n_2$	alleen bimodaal
15	$m_2$	alleen bimodaal
16	$\omega_1$	alleen bimodaal

## Bijlage 3 Afleiden $\alpha_2$ , $m_2$ en $\omega_1$

Indien geen metingen nabij verzadiging beschikbaar zijn om de bimodale parameters rechtstreeks te fitten (voorkeursmethode), dan kan de volgende werkwijze gehanteerd worden om een inschatting te geven voor de parameters  $\alpha_2$  en  $m_2$  (en daarmee  $n_2$  volgens  $m_2 = 1-1/n_2$ ), met als doel hiermee de invloed van bioporiën te kwantificeren.

Bioporiën zullen over het algemeen een vergelijkbare diameter hebben. Dergelijke poriën zullen tot een bepaalde drukhoogte verzadigd blijven en bij overschrijding hiervan leegstromen. Op basis van de capillair-theorie geldt dat deze drukhoogte omgekeerd evenredig is met de straal van de porie (Hanks & Ashcroft, 1980; Koorevaar et al., 1983; Or & Wraith, 2002):

$$h = \frac{2\sigma \cos(\varphi)}{\rho_l g r}$$

Hierin is  $h$  de drukhoogte (stijghoogte) waarboven de porie zal leegstromen (m),  $\sigma$  is de oppervlaktespanning van water ( $0.07 \text{ N m}^{-1}$ ),  $\varphi$  is de contacthoek van water en de wand welke vaak gemakshalve op 0 gesteld wordt zodat  $\cos(\varphi) = 1$ ,  $\rho_l$  is de dichtheid van water ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $g$  is de gravitatie-constante ( $9.81 \text{ N kg}^{-1}$ ) en  $r$  is de straal van de porie (m). We kunnen deze schatting van drukhoogte toekennen aan het tweede buigpunt nabij verzadiging. Voor een bioporie met een diameter van 3 mm komt dat neer op  $h_{inf,2} \approx 1 \text{ cm}$ .

Wanneer de bioporiën vrijwel allemaal van gelijke grootte (gelijke straal) zijn, mag verwacht worden dat de waterretentiecurve in het tweede buigpunt vrij vlak zal lopen. Helaas geeft dit geen kwantitatieve informatie over  $C_{inf,2}$ ,  $\alpha_2$  of  $m_2$ . Uit Figuur 2-5 kunnen we opmaken dat hoe groter  $n_2$  (en dus hoe dichter  $m_2$  bij 1), hoe vlakker de curve zal lopen. Elke keuze zal arbitrair zijn; voor  $m_2$  kunnen we bijvoorbeeld kiezen de waarden 0.8 ( $n_2 = 5$ ) of 0.9 ( $n_2 = 10$ ). Voor veronderstelde  $m_2$  en geschatte waarde voor  $h_{inf,2}$  uit de diameter van de bioporiën kan  $\alpha_2$  berekend worden uit Eq. (2-9). Onderstaande Tabel B3-1 geeft waarden voor  $\alpha_2$  voor tien waarden van diameter van de bioporie en vier waarden van  $m_2$ .

**Tabel B3-1** Waarden voor  $\alpha_2$  als functie van porie-diameter  $d$  (of straal  $r$ ) en  $m_2$ .

d (mm)	r (mm)	$m_2$	0.8	0.85	0.9	0.95
		$n_2$	5	6.666667	10	20
		$h_{inf,2}$	$\alpha_2$			
10	5	0.2854	3.3506	3.4192	3.4669	3.4946
9	4.5	0.3171	3.0156	3.0773	3.1202	3.1451
8	4	0.3568	2.6805	2.7354	2.7735	2.7957
7	3.5	0.4077	2.3455	2.3934	2.4268	2.4462
6	3	0.4757	2.0104	2.0515	2.0801	2.0968
5	2.5	0.5708	1.6753	1.7096	1.7334	1.7473
4	2	0.7136	1.3403	1.3677	1.3867	1.3978
3	1.5	0.9514	1.0052	1.0258	1.0401	1.0484
2	1	1.4271	0.6701	0.6838	0.6934	0.6989
1	0.5	2.8542	0.3351	0.3419	0.3467	0.3495

Ten slotte moet ook nog een inschatting voor de weegfactor  $\omega_1$  gemaakt worden. Uit vergelijkingen (2-1)-(2-3) volgt dat voor de gecombineerde curve deze gegeven wordt door

$\theta^* = \theta_r + (\theta_s^* - \theta_r)(\omega_1 S_1 + (1 - \omega_1) S_2)$  waarin  $\theta^*$  het watergehalte van de gecombineerde curve is, en  $\theta_s^*$  het verzadigde watergehalte van de gecombineerde curve. Omdat meestal  $\theta_r$  erg klein is ten

---

opzichte van  $\theta_s$ , veronderstellen we nu dat  $\theta_r = 0$ . Verder veronderstellen we dat het watergehalte van de gecombineerde curve de som is van de watergehalten van de individuele curves waaruit ze is opgebouwd:  $\theta^* = \theta_1 + \theta_2$  en ook  $\theta_s^* = \theta_{s,1} + \theta_{s,2}$ ; NB:  $\theta_{s,2} = \theta_{\text{worm}}$ . Dat geeft dan:

$$\theta_1 + \theta_2 = (\theta_{s,1} + \theta_{s,2}) \left( \omega_1 \frac{\theta_1}{\theta_{s,1}} + (1 - \omega_1) \frac{\theta_2}{\theta_{s,2}} \right) \text{ Na wat algebra valt hieruit valt } \omega_1 \text{ op te lossen als}$$

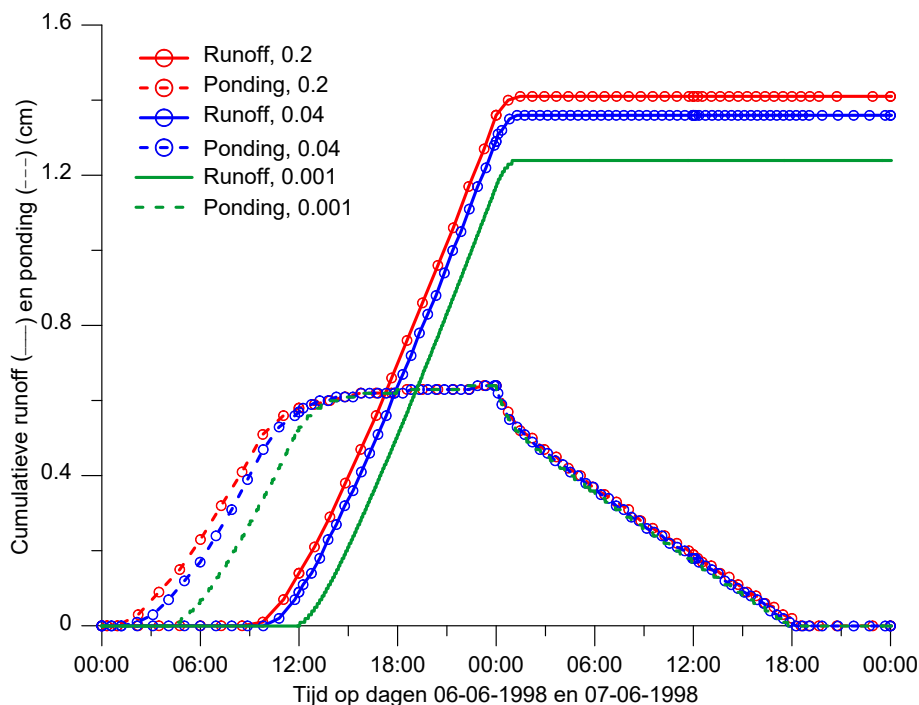
$$\omega_1 = \frac{\theta_{s,1}}{\theta_{s,1} + \theta_{s,2}}$$

De waarde voor  $\theta_{s,1}$  is het watergehalte bij verzadiging bij afwezigheid van (worm)gangen; bijvoorbeeld de waarden uit de Staringreeks 2018. De extra porositeit als gevolg van de aanwezigheid van (worm)gangen volgt uit het aantal gangen per vierkante meter ( $n$ ) en hun straal ( $r$ ):  $\theta_{s,2} = \pi n r^2$ . Bijvoorbeeld:  $r = 0.004$  m en  $n = 100$  m<sup>-2</sup>, dan volgt  $\theta_{s,2} = 0.005$ .

## Bijlage 4 Details voor 418 bij scenario a1

Voor BOFEK2012 eenheid 418 voor scenario a1 zijn voor drie waarden van invoervariabele  $\Delta t_{\max}$  (0.001 d (A), 0.04 d (B), 0.2 d (C)) enkele deelresultaten gegeven. De eerste figuur geeft de cumulatieve runoff en het verloop van de ponding-hoogte voor de drie situaties. Simulaties zijn uitgevoerd op basis van een identieke uitgangssituatie aan het begin van 05-06-1998, en de resultaten zijn gegeven voor de dagen 06-06-1998 en 07-06-1998. Voor situaties B en C begint ponding ongeveer op hetzelfde tijdstip (ca. 02:10), maar de ponding-drempelwaarde wordt iets na elkaar bereikt waardoor ponding voor C (09:47) eerder begint dan voor B (10:47). De afstand tussen de symbolen bij B en C stellen alle gehanteerde tijdstap-groottes tijdens de simulatie. Tijdstappen variëren, en slechts aan het eind van de dag 07-06-1998 worden de maximaal toelaatbare tijdstappen ook daadwerkelijk gebruikt. Voor situatie A wordt in de meeste gevallen de maximale tijdstapgrootte van 0.001 d gebruikt. Dit leidt tot een duidelijk effect op start ponding (04:29) en start runoff (12:04). Opvallend is dat aan het eind van dag 06-06-1998 de ponding-hoogtes voor de drie situaties gelijk zijn en dat de runoff snelheid (helling doorgetrokken lijnen) vrijwel identiek is. Vrij snel op dag 07-06-1998 zakt de ponding-hoogte beneden de drempelwaarde zodat de runoff stopt. Doordat situaties C en B langer een periode met runoff hebben gesimuleerd, is de totale runoff in die gevallen duidelijk groter dan voor situatie A.

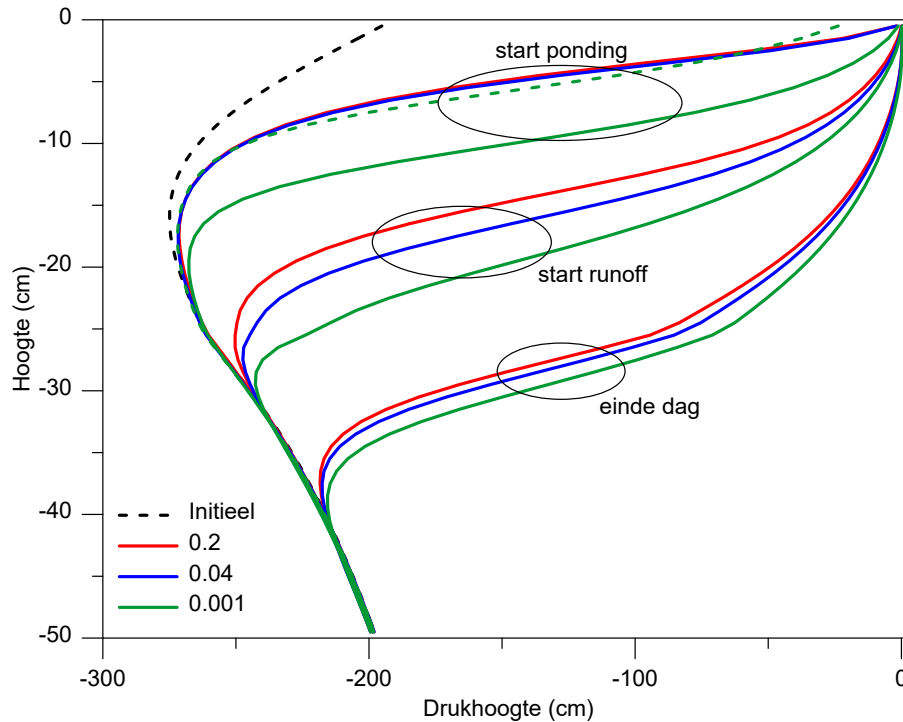
De cumulatieve runoff in onderstaande Figuur B4-1 voor dag 06-06-1998 wijkt iets af van de waarden gepresenteerd in Tabel 2-10, omdat in onderhavig voorbeeld is gestart met een identieke uitgangssituatie op 05-06-1998, terwijl de waarden gepresenteerd in Tabel 2-10 zijn gebaseerd op simulaties welke gestart waren op 01-01-1998, zodat op 05-06-1998 de situaties onderling al verschillend waren.



**Figuur B4-1** Gesimuleerde cumulatieve oppervlakkige afvoer (runoff) en dikte waterlaagje op maaiveld (ponding) als functie van de tijd voor drie waarden van maximaal toegestane rekentijdstap.

Wanneer het simulatiemodel SWAP met grotere tijdstappen kan rekenen, dan wordt blijkbaar eerder een situatie voorspeld met ponding. In onderstaande Figuur B4-2 zijn drukhoogte-diepte ( $h(z)$ ) profielen gegeven voor de drie situaties voor de momenten van start ponding, start runoff en aan het

eind van dag 06-06-1998. Initieel was de uitgangssituatie op 06-06-1998 zo goed als identiek (zwarte onderbroken lijn). Voor situaties A en B wordt vrijwel gelijktijdig start ponding voorspeld (zie hiervoor) en de  $h(z)$  zijn voor beide dan vrijwel gelijk. Het  $h(z)$  profiel voor situatie C bij aanvang ponding wijkt daar duidelijk van af: het vochtfront is dieper doorgedrongen. Ter illustratie is het  $h(z)$  profiel voor situatie C op tijdstap 02:10 (moment waarop voor situaties B en C ponding begint) ook gegeven (groene onderbroken lijn). Aan het eind van de dag liggen de vochtfronten voor de drie situaties weer redelijk dicht bij elkaar. De start- en eindtijdstippen voor ponding en runoff voor de drie situaties zijn gegeven in Tabel B4-1.



**Figuur B4-2** Gesimuleerde drukhoogte-diepte ( $h(z)$ ) profielen gegeven voor drie situaties voor de momenten van start ponding, start runoff en aan het eind van dag 06-06-1998.

**Tabel B4-1** Start- en eindtijdstippen voor ponding en runoff voor de drie situaties; waarden tussen haakjes zijn de tijdstapgroottes die op dat moment in SWAP werden gebruikt.

	A; $\Delta t_{\max} = 0.001$ d	B; $\Delta t_{\max} = 0.04$ d	C; $\Delta t_{\max} = 0.2$ d
<b>06-06-1998</b>			
Start ponding	04:05:54 (0.001)	02:08:50 (0.04)	02:12:44 (0.052672)
Start runoff	11:40:56 (0.001)	10:47:14 (0.04)	09:47:49 (0.052672)
<b>07-06-1998</b>			
Eind runoff	01:42:10 (0.001)	01:44:25 (0.019338)	01:27:57 (0.030539)
Eind ponding	17:57:44 (0.001)	18:39:34 (0.016443)	19:05:40 (0.022739)

# Bijlage 5 Analytische oplossing verificatie stoftransport

Genuchten & Alves (1982; case A2) geven een analytische oplossing voor een eindige puls-input van een stof in een bodem onder constante neerwaartse waterflux. Stoftransport is beschreven via:

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z}$$

Hierin is  $c$  de concentratie ( $\text{mg cm}^{-3}$ ),  $t$  is de tijd (d),  $z$  is de diepte (cm),  $D$  is de dispersiecoëfficiënt ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ ),  $v$  is de snelheid van water in de poriën ( $\text{cm d}^{-1}$ ) en  $R$  is de retardatiefactor (dimensieloos). De initiële voorwaarde en randvoorwaarden zijn gegeven als:

$$c(z, 0) = c_i$$

$$\left( -D \frac{\partial c}{\partial z} + vc \right)_{z=0} = \begin{cases} vc_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t_0 < t \end{cases}$$

$$\frac{\partial c}{\partial z}(\infty, t) = 0$$

Hierin is  $c_i$  de initiële concentratie in het profiel,  $c_0$  is de concentratie van input puls,  $t_0$  is de duur van de input puls (d); voor  $t > t_0$  is er geen aanvoer aan het oppervlak, en op diepte oneindig is er geen gradiënt in de concentratie (geen stofflux).

De oplossing is gegeven als

$$c(z, t) = \begin{cases} c_i + (c_0 - c_i) A(z, t) & 0 < t \leq t_0 \\ c_i + (c_0 - c_i) A(z, t) - c_0 A(z, t - t_0) & t_0 < t \end{cases}$$

met

$$A(z, t) = 0.5 \operatorname{erfc} \left[ \frac{Rz - vt}{2\sqrt{DRt}} \right] + \sqrt{\frac{v^2 t}{\pi DR}} \exp \left[ -\frac{(Rz - vt)^2}{4DRt} \right] - 0.5 \left( 1 + \frac{vz}{D} + \frac{v^2 t}{DR} \right) \exp \left[ \frac{vz}{D} \right] \operatorname{erfc} \left[ \frac{Rz + vt}{2\sqrt{DRt}} \right]$$

---

## Bijlage 6 Voorwaarden voor nauwkeurige en oscillatie-vrije simulatie van stoftransport

Volgens Daus et al. (1985) worden nauwkeurige en oscillatie-vrije oplossingen voor expliciete, numeriek opgeloste stoftransportvergelijkingen verkregen wanneer de verhouding van het Courant-getal ( $Co$ ) en het Pecletgetal ( $Pe$ ) kleiner of gelijk is aan 0.5. Deze verhouding staat bekend als het Fourier-getal,  $Fo$ . Dit betekent dat de restrictie voor de maximaal toegestane tijdstapgrootte berekend kan worden uit:

$$Fo = \frac{Co}{Pe} = \frac{\frac{v\Delta t}{\Delta z}}{\frac{v\Delta z}{D}} = \frac{D\Delta t}{\Delta z^2} \leq 0.5$$

ofwel

$$\Delta t \leq 0.5 \frac{\Delta z^2}{D}$$

Hierin is  $\Delta t$  de maximaal toegestane tijdstap (d),  $\Delta z$  is de dikte van een rekenlaagje (cm),  $D$  is de diffusie-dispersiecoëfficiënt ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ ) en  $v$  is de snelheid van water in de poriën ( $\text{cm d}^{-1}$ ).

Daus et al. (1985) geven aan dat er ook beperkingen zijn voor  $Co$  en  $Pe$ :  $Co \leq 1$  en  $Pe \leq 2$ . Voor stroming waar convectie domineert, is  $D$  gegeven als  $L_d v$ , waar  $L_d$  de dispersielengte is (cm). Dat betekent dat een geschikte laagdikte berekend kan worden uit  $Pe$  als

$$\Delta z \leq 2L_d$$

In vorige versies van SWAP werd de tijdstapregeling in de module SOLUTE berekend als  $\Delta t \leq 0.5\theta\Delta z^2/D$ . Het is niet bekend waarom hier de variabele  $\theta$  is toegevoegd; mogelijk is in het verleden een andere schrijfwijze voor stoftransport gehanteerd waarbij de bepalende variabele niet  $c$ , maar  $\theta c$  is geweest en waarbij  $D$  werd vermenigvuldigd met  $\theta$ . De vergelijking met een analytische oplossing (zie paragraaf 4.1) heeft laten zien dat de hierboven genoemde tijdstapregeling goed functioneert.

---

# Bijlage 7 Analytische oplossing warmtetransport in de bodem

De algemene warmtetransportvergelijking die in SWAP-numeriek wordt berekend, is gegeven als (Kroes et al., 2017)

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_h \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Hierin is  $T$  de bodemtemperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t$  de tijd (d),  $z$  de plaatshoogte (cm),  $C_h$  is de warmtecapaciteit van de bodem ( $\text{J cm}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) en  $\lambda_h$  is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem ( $\text{J cm}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Voor constante  $C_h$  en  $\lambda_h$  kan deze ook geschreven worden als

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Hierin is  $D_h = \lambda_h / C_h$  de warmtediffusiviteit ( $\text{cm}^2 \text{ d}^{-1}$ ). Voor eenvoudige randvoorwaarden kan hiervoor een analytische oplossing bepaald worden. Voor een sinusvormig verloop van  $T$  aan maaiveld en een constante temperatuur op oneindige diepte is de analytische oplossing gegeven als (Kroes et al., 2017; Moene & Van Dam, 2014)

$$T(z, t) = T_{\text{mean}} + T_{\text{ampl}} \exp\left[-\frac{z}{d_{\text{damp}}}\right] \sin\left[\frac{\pi}{2} + \omega(t - t_{\text{max}}) + \frac{z}{d_{\text{damp}}}\right]$$

Hierin is  $T_{\text{mean}}$  de gemiddelde temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\text{ampl}}$  is de amplitude van de sinusvormige bovenrandvoorwaarde ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\omega$  is de frequentie ( $\text{d}^{-1}$ ) van de sinus gegeven als  $2\pi/P$  met  $P$  de periode van de sinus (bijv. 365 d),  $t_{\text{max}}$  is het tijdstip waarop de  $T$  aan maaiveld maximaal is (d) en  $d_{\text{damp}}$  is de dempingsdiepte gegeven als  $d_{\text{damp}} = \sqrt{2D_h / \omega}$  (cm).



# Bijlage 8 Infiltratiemetingen wormenproef

## Proefopzet

In een perceel zijn 20 metalen pijpen (diameter 61 cm, lengte 100 cm) aangebracht (voorjaar 2019) waar in de helft van de plots 15 regenwormen (*Lumbricus terrestris*, LT) zijn toegediend. Figuur B8-1 geeft schematisch weer hoe de behandelingen zijn aangelegd. In oktober 2019 en in juni 2020 zijn infiltratiemetingen in de buizen uitgevoerd (zie later). De helft van elke behandeling (5 buizen per behandeling) is na de eerste infiltratiemeting tot 60 cm leeggehaald (in 3 lagen van 20 cm) om de wormen te tellen en alle wormen (inclusief strooiselbewoners bovenin) zijn uit de lagen verwijderd. De lagen zijn opnieuw teruggebracht in de pijpen en bij de LT-behandeling zijn opnieuw 15 wormen aangebracht. De opnieuw gevulde pijpen zijn aangeduid met cijfercode 1 (de niet tussentijds geoogste pijpen hebben cijfercode 2).

1	C2	C1	11
2	C2	LT1	12
3	C1	LT1	13
4	LT1	LT2	14
5	C1	C2	15
6	LT2	LT1	16
7	LT1	C2	17
8	LT2	C2	18
9	C1	C1	19
10	LT2	LT2	20

**Figuur B8-1** Schematische weergave proefopzet locatie Stegeren. De letters in de code duiden op: C = controle behandeling (zonder uitzetten wormen); LT = behandeling waarbij wormen (*Lumbricus Terrestris*, LT) zijn uitgezet; de cijfers in de code duiden op oogstmoment (zie tekst voor toelichting) van de behandeling: 1 = oktober 2019; 2 = juni 2020.

## Infiltratiemetingen – uitvoering

Voorafgaand aan de infiltratiemetingen werd het gras met de hand kort afgeknipt. Een liniaal werd op ca. 10 van de rand in de grond aangebracht waarbij de waarde 10 cm op ongeveer maaiveldhoogte kwam. Een plastic zeiltje werd op het gras gelegd en langs de metalen wanden omhooggehouden. Hierin werd stapsgewijs in totaal 9 L water aangebracht. In theorie zou dit overeen moeten komen met een waterlaagje van 3 cm. Het plastic werd vervolgens voorzichtig (om golfvorming en kans op overstroming tegen te gaan) verwijderd. Daarna werd de daling van het waterlaagje als functie van de tijd geregistreerd. Een goede startwaarde voor tijdstip  $t = 0$  is volgens deze werkwijze niet te verkrijgen, zodat alleen de veranderingen ten opzichte van het eerste registratiemoment zullen worden beschouwd. Bij de 2<sup>e</sup> meetserie (juni 2020) is wel gepoogd om een meetwaarde op  $t = 0$  te verkrijgen, maar deze blijkt niet hanteerbaar, omdat deze hoogte vrijwel altijd hoger dan 3 cm boven maaiveld ligt; immers, het plastic zeil ligt op de kortgeknipte grasstoppels en niet op maaiveld. Dus ook voor de tweede meetserie wordt uitgegaan vanaf het eerste registratiemoment na  $t = 0$ .

## Infiltratiemetingen – resultaten

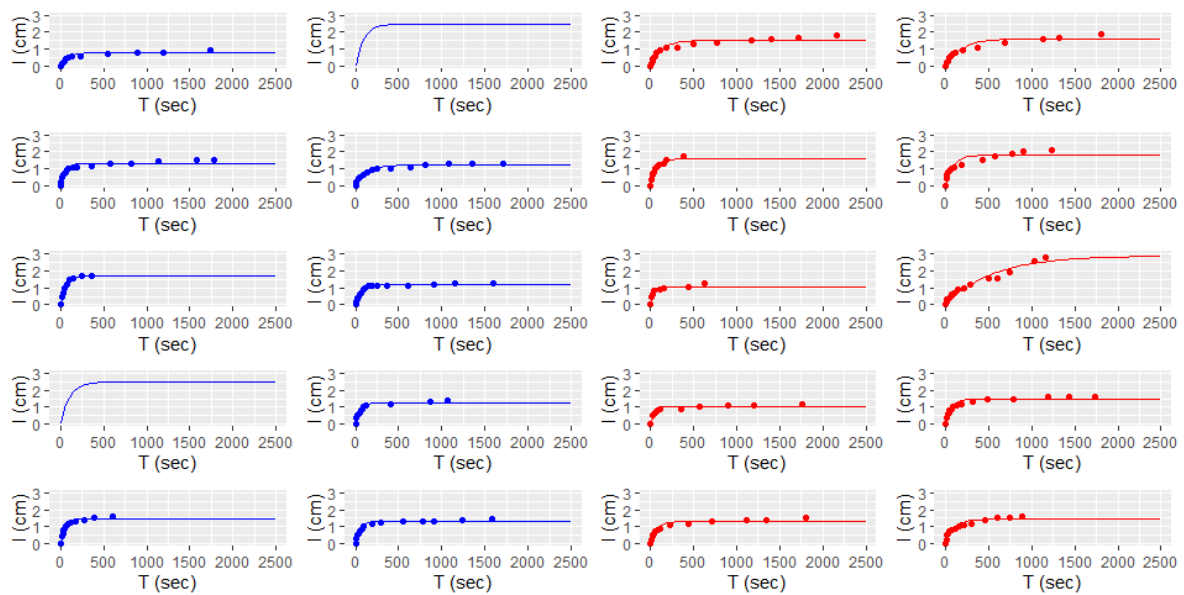
### Metingen oktober 2019

Figuur B8-2 geeft de gemeten cumulatieve infiltratie (cm water; symbolen) als functie van de tijd voor de controlebehandelingen (C; blauw) en voor de plots met LT-wormen (rood). Voor twee controlebehandelingen waren de metingen mislukt (geen data). Voor verdere analyse zijn door deze meetpunten

exponentiële relaties gefit (cf. theorie van Horton, 1939<sup>5</sup>), hetgeen het later mogelijk maakt om een gemiddelde infiltratiecurve per behandeling te berekenen. De exponentiële relatie is gegeven als

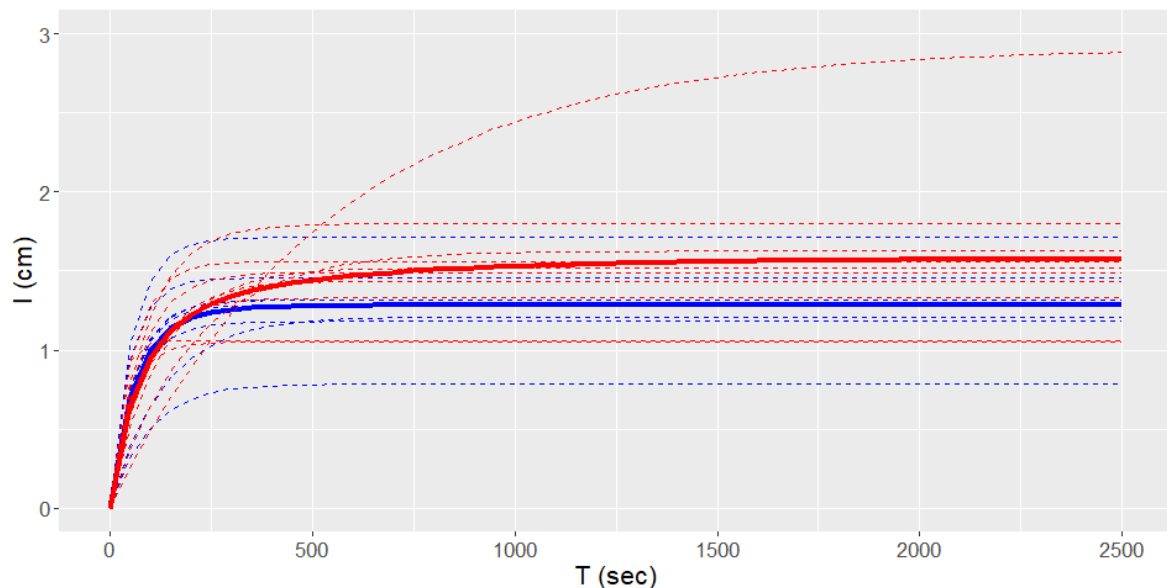
$$I = a(1 - \exp[-bt])$$

Hierin is  $I$  de cumulatieve infiltratie (cm),  $t$  is de tijd (sec), parameter  $a$  geeft de asymptotische maximuminfiltratie weer (cm) en parameter  $b$  is een vormparameter ( $\text{sec}^{-1}$ ). De initiële infiltratiesnelheid volgt als de afgeleide van deze relatie voor  $t = 0$  en is gegeven als  $ab$ , het product van parameters  $a$  en  $b$ . Tabel B8-1 geeft de gefitte parameters voor de 20 behandelingen; tevens staan hierin de berekende cumulatieve infiltratie na 60 en 120 sec. De variatie tussen de individuele plots is groot (Figuur B8-3), en het verschil tussen de gemiddelden voor de C- en LT-behandelingen is gering: er is geen duidelijk verschil in infiltratiesnelheid in de beginfase. Op basis van een variantieanalyse kan geen significant ( $P < 0.05$ ) worden vastgesteld. Tabel B8-2 geeft de metingen.



**Figuur B8-2** De gemeten cumulatieve infiltratie ( $I$ ) als functie van de tijd ( $T$ ) (symbolen) en de gefitte exponentiële relatie (lijnen) voor de controlebehandelingen (C; blauw) en de behandelingen met LT-wormen (rood) (locatie: Stegeren; tijdstip: oktober 2019).

<sup>5</sup> Horton, R.E., 1939. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. Trans. Am. Geophys. Union 20 (4), 693-711.



**Figuur B8-3** De individuele gefitte  $I(T)$  relaties (zie Figuur B8-2; onderbroken lijnen) voor de C (blauw) en LT (rood) behandelingen en hun gemiddelden (getrokken lijn) (locatie: Stegeren; tijdstip: oktober 2019).

**Tabel B8-1** De gefitte parameters  $a$  en  $b$ , hun product  $ab$  en de Pearsons  $r^2$  correlatiecoëfficiënt voor alle behandelingen en voor hun gemiddelden (NB Voor buizen 1 en 11 ontbreken metingen zodat geen parameters worden gegeven). De kolommen  $t_{60}$  en  $t_{120}$  geven de berekende cumulatieve infiltratie na 60 en 120 seconden (locatie: Stegeren; tijdstip: oktober 2019).

Buis	Behandeling	$a$ (cm)	$b$ (sec <sup>-1</sup> )	$r^2$	$ab$ (cm sec <sup>-1</sup> )	$t_{60}$ (cm)	$t_{120}$ (cm)
1	C						
2	C	1.2104	0.0076400	0.96375	0.0092473	0.44506	0.72647
3	C	0.7849	0.0104395	0.96216	0.0081939	0.36535	0.56064
4	LT	1.5195	0.0081589	0.94202	0.0123977	0.58819	0.94870
5	C	1.3151	0.0165493	0.94424	0.0217647	0.82791	1.13463
6	LT	1.6256	0.0050770	0.93605	0.0082530	0.42687	0.74164
7	LT	1.5584	0.0175026	0.97172	0.0272754	1.01312	1.36759
8	LT	1.7979	0.0112602	0.90547	0.0202444	0.88303	1.33236
9	C	1.7112	0.0182467	0.99084	0.0312244	1.13865	1.51965
10	LT	2.9122	0.0018238	0.96086	0.0053114	0.30187	0.57245
11	C						
12	LT	1.0598	0.0417212	0.90642	0.0442161	0.97309	1.05271
13	LT	1.0509	0.0209894	0.94271	0.0220575	0.75261	0.96623
14	LT	1.4896	0.0138252	0.95060	0.0205942	0.83975	1.20610
15	C	1.1797	0.0159549	0.98993	0.0188219	0.72677	1.00580
16	LT	1.3289	0.0127497	0.96191	0.0169435	0.71053	1.04116
17	C	1.2833	0.0173854	0.97768	0.0223108	0.83113	1.12398
18	C	1.3167	0.0168806	0.97776	0.0222272	0.83851	1.14305
19	C	1.4552	0.0206066	0.98160	0.0299874	1.03259	1.33249
20	LT	1.4354	0.0104965	0.92893	0.0150664	0.67074	1.02805
Gem.	C	1.2806	0.0151028	0.99958	0.0193407	0.76315	1.07152
Gem.	LT	1.5403	0.0081781	0.97782	0.0125968	0.59732	0.96301

**Tabel B8-2** De gemeten cumulatieve infiltratie (*I*; cm) als functie van de tijd (*T*; sec) voor buizen 1 tot en met 20 (locatie: Stegeren; tijdstip: oktober 2019); n.d.: geen meetwaarden beschikbaar of meting mislukt.

T1	I1	T2	I2	T3	I3	T4	I4	T5	I5	T6	I6	T7	I7	T8	I8	T9	I9	T10	I10
n.d.	n.d.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		13	0.2	11	0.1	7	0.1	10	0.2	13	0.2	7	0.3	11	0.4	14	0.5	9	0.2
		31	0.4	30	0.2	18	0.3	20	0.5	22	0.3	19	0.6	20	0.6	32	0.7	20	0.3
		53	0.5	42	0.3	27	0.4	29	0.6	38	0.5	32	0.7	34	0.8	47	1	36	0.4
		97	0.6	66	0.4	41	0.5	44	0.7	57	0.6	42	0.8	52	0.9	76	1.2	53	0.5
		142	0.8	85	0.5	53	0.6	55	0.8	86	0.7	59	1	78	1	100	1.5	68	0.6
		197	0.9	133	0.6	74	0.8	75	0.9	117	0.8	71	1.1	95	1.1	149	1.6	98	0.7
		252	1	232	0.6	104	0.9	95	1	204	0.9	100	1.2	188	1.2	250	1.7	146	0.9
		412	1	553	0.7	177	1.05	150	1.1	378	1.1	148	1.3	434	1.5	357	1.7	208	1
		640	1.1	887	0.8	312	1.1	190	1.1	694	1.4	186	1.5	567	1.7			286	1.2
		813	1.2	1195	0.8	491	1.3	363	1.15	1133	1.6	389	1.7	767	1.9			507	1.6
		1084	1.3	1739	0.9	772	1.4	576	1.25	1324	1.7			901	2			605	1.6
		1356	1.3			1172	1.5	824	1.3	1803	1.9			1230	2.1			740	1.9
		1717	1.3			1404	1.6	1135	1.4									1034	2.6
						1715	1.7	1581	1.5									1157	2.8
						2164	1.8	1777	1.5										

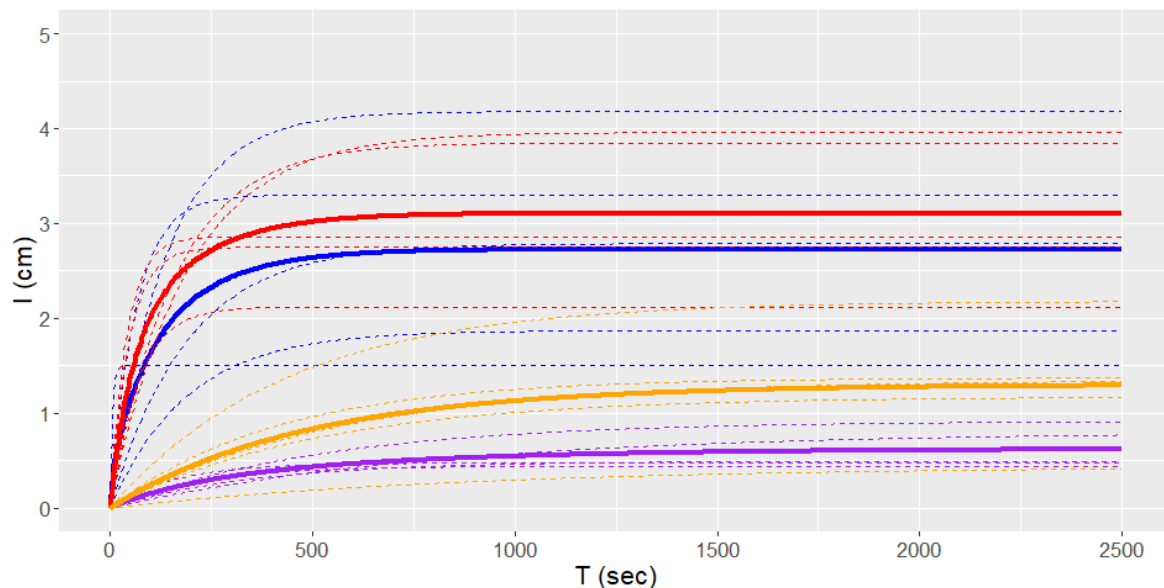
T11	I11	T12	I12	T13	I13	T14	I14	T15	I15	T16	I16	T17	I17	T18	I18	T19	I19	T20	I20
n.d.	n.d.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		10	0.5	22	0.5	12	0.4	9	0.2	8	0.2	13	0.4	11	0.3	15	0.4	10	0.2
		21	0.6	40	0.6	23	0.6	15	0.3	18	0.4	25	0.5	21	0.5	25	0.6	16	0.5
		42	0.8	55	0.7	39	0.7	25	0.4	28	0.5	36	0.6	30	0.6	35	0.8	26	0.6
		107	0.9	80	0.8	49	0.8	35	0.5	42	0.6	45	0.7	43	0.7	44	0.9	50	0.7
		155	1	105	0.9	69	0.9	46	0.6	57	0.7	59	0.8	60	0.8	58	1	73	0.8
		436	1.05	348	0.9	93	1	62	0.7	76	0.8	74	0.9	80	0.9	68	1.1	111	0.9
		632	1.3	567	1	126	1.1	87	0.9	113	0.9	96	1	96	1	89	1.2	152	1
				904	1.1	185	1.2	114	1	229	1.1	124	1.1	200	1.2	113	1.25	211	1.1
				1198	1.1	309	1.3	155	1.1	445	1.2	402	1.2	296	1.25	173	1.3	296	1.2
				1756	1.2	492	1.5	192	1.1	711	1.3	874	1.3	558	1.3	279	1.4	456	1.4
						781	1.5	248	1.1	1121	1.4	1065	1.4	783	1.3	384	1.5	595	1.5
						1188	1.6	370	1.1	1346	1.4			915	1.3	602	1.6	750	1.55
						1427	1.6	608	1.15	1808	1.5			1243	1.4			882	1.6
						1740	1.6	904	1.2					1577	1.45				
								1160	1.25										
								1600	1.25										

*Metingen juni 2020*

Figuur B8-4a geeft de gemeten cumulatieve infiltratie (cm water; symbolen) als functie van de tijd voor de Controle- en LT-behandelingen: C1 (opnieuw gevuld) in blauw, C2 (ongestoord) in paars, LT1 (opnieuw gevuld) in rood, en LT2 (ongestoord) in oranje. De opnieuw gevulde buizen (C1, LT1) laten een snellere infiltratie zien en de metingen passen ook niet altijd bij een exponentieel verband waardoor de gefitte relatie een hoog maximum oplevert. Daarom is de exponentiële fit herhaald met de eis dat  $a \leq 1.1 \cdot \text{maximum gemeten } I$  (Figuur B8-4b). De gemiddelde curves voor de vier behandelingen staan in Figuur B8-5 (gebaseerd op data uit Figuur B8-4b). Tabel B8-3 geeft de gefitte parameters (gebaseerd op data uit Figuur B8-4b) en de berekende cumulatieve infiltratie na 60 en 120 sec. Op basis van een variantieanalyse zijn de enige relevante significante ( $P < 0.05$ ) effecten de volgende: de maximuminfiltratie ( $a$ ) voor de opnieuw gevulde buizen zijn significant hoger dan die waargenomen in de ongestoorde buizen, voor zowel de C- als de LT-behandelingen. Tabel B8-4 geeft de metingen.



**Figuur B8-4** De gemeten cumulatieve infiltratie ( $I$ ) als functie van de tijd ( $T$ ) (symbolen) en de gefitte exponentiële relatie (lijnen) voor de volgende behandelingen: C1 (opnieuw gevuld) in blauw; C2 (ongestoord) in paars; LT1 (opnieuw gevuld) in rood; LT2 (ongestoord) in oranje (locatie: Stegeren; tijdstip: juni 2020). Bij onderdeel b) is de restrictie  $a < 1.1 \cdot \text{maximum meetwaarde}$  toegepast.



**Figuur B8-5** De gemeten cumulatieve infiltratie ( $I$ ) als functie van de tijd ( $T$ ) (symbolen) en de gefitte exponentiële relatie (lijnen) voor de volgende behandelingen: C1 (opnieuw gevuld) in blauw; C2 (ongestoord) in paars; LT1 (opnieuw gevuld) in rood; LT2 (ongestoord) in oranje (locatie: Stegeren; tijdstip: juni 2020).

**Tabel B8-3** De gefitte parameters  $a$  en  $b$ , hun product  $ab$  en de Pearsons  $r^2$  correlatiecoëfficiënt voor alle behandelingen en voor hun gemiddelden. De kolommen  $t_{060}$  en  $t_{120}$  geven de berekende cumulatieve infiltratie na 60 en 120 seconden (locatie: Stegeren; tijdstip: juni 2020).

Buis	Behandeling	$a$ (cm)	$b$ (sec <sup>-1</sup> )	$r^2$	$ab$ (cm sec <sup>-1</sup> )	$t_{060}$ (cm)	$t_{120}$ (cm)
1	C2	0.80574	0.0012516	0.94344	0.00100843	0.058290	0.112363
2	C2	0.91843	0.0018825	0.88449	0.00172898	0.098095	0.185712
3	C1	2.78859	0.0052411	0.99705	0.01461537	0.752425	1.301828
4	LT1	2.75000	0.0215108	0.98250	0.05915476	1.993497	2.541892
5	C1	1.49993	0.1806547	1.00000	0.27096908	1.499899	1.499928
6	LT2	2.18230	0.0022784	0.96363	0.00497205	0.278830	0.522035
7	LT1	3.85000	0.0062501	0.97973	0.02406307	1.203960	2.031421
8	LT2	1.34947	0.0017988	0.91072	0.00242738	0.138059	0.261993
9	C1	1.87000	0.0052385	0.97605	0.00979608	0.504357	0.872684
10	LT2	1.17423	0.0019601	0.97935	0.00230165	0.130287	0.246119
11	C1	4.18000	0.0073102	0.99818	0.03055645	1.484181	2.441378
12	LT1	2.12083	0.0143560	0.98107	0.03044670	1.224596	1.742093
13	LT1	3.96000	0.0052402	0.96065	0.02075121	1.068337	1.848456
14	LT2	1.37402	0.0024132	0.92628	0.00331583	0.185217	0.345467
15	C2	0.49645	0.0027589	0.89089	0.00136968	0.075739	0.139924
16	LT1	2.86000	0.0240818	0.94906	0.06887382	2.185702	2.701022
17	C2	0.44067	0.0047655	0.88353	0.00210003	0.109589	0.191925
18	C2	0.47553	0.0063181	0.81536	0.00300444	0.150036	0.252733
19	C1	3.30000	0.0157114	0.98537	0.05184769	2.014385	2.799150
20	LT2	0.44000	0.0011248	0.94713	0.00049491	0.028715	0.055556
Gem.	C1	2.71462	0.0086642	0.99147	0.02352013	1.100488	1.754845
Gem.	C2	0.60794	0.0024888	0.99644	0.00151303	0.084329	0.156960
Gem.	LT1	3.09102	0.0097292	0.99034	0.03007312	1.366842	2.129269
Gem.	LT2	1.29609	0.0020572	0.99997	0.00266629	0.150498	0.283521

**Tabel B8-4** De gemeten cumulatieve infiltratie (I; cm) als functie van de tijd (T; sec) voor buizen 1 tot en met 20 (locatie: Stegeren; tijdstip: juni 2020).

I1	T1	I2	T2	I3	T3	I4	T4	I5	T5	I6	T6	I7	T7	I8	T8	I9	T9	I10	T10
14.9	0	13.7	0	12.8	0	13.3	0	11.4	0	12.7	0	14	0	14.5	0	12.2	0	13.5	0
14.7	15	13.4	15	12.6	15	12.5	15	10.5	15	12.3	15	13.5	15	14.1	15	11.7	15	13.1	15
14.6	30	13.3	30	12.4	30	11.8	30	9.1	30	12	30	12.7	45	13.9	30	11.5	30	13	30
14.6	45	13.3	45	12.3	45	11.2	45	9	99	11.9	45	12.5	70	13.9	45	11.4	45	13	45
14.6	60	13.3	60	12	60	11	60			11.9	60	12	110	13.8	60	11.2	60	13	60
14.6	90	13.2	90	11.7	90	10.1	90			11.7	90	11.8	120	13.7	90	11	90	12.9	90
14.5	120	13.1	120	11.6	105	10	110			11.7	120	11.5	150	13.7	120	11	120	12.8	120
14.5	150	13.1	150	11.4	120					11.6	150	11	180	13.6	150	10.8	150	12.8	150
14.5	180	13.1	180	11.1	150					11.5	180	10.8	210	13.6	210	10.7	180	12.7	180
14.5	210	13.1	210	11	180					11.5	210	10.4	240	13.6	280	10.5	240	12.7	210
14.5	240	13	240	10.8	210					11.4	240	10.3	270	13.4	570	10.2	300	12.7	240
14.5	270	13	300	10.5	288					11.4	270	10	300	13.2	810	10	360	12.7	270
14.4	300	13	360	10	532					11.3	300			13.1	1290			12.6	300
14.4	330	12.9	498							11.3	330			12.8	2370			12.5	480
14.4	420	12.8	1026							11	540			12.5	2665			12	1170
14.3	600	12.7	1890							10.5	960							12	1500
14.2	810	12.5	2700							10.2	1290								
14.2	907	12.2	5850							10	1920								
14.1	1153																		
14.1	1340																		
14	2690																		
14	3420																		
13.7	6500																		

I11	T11	I12	T12	I13	T13	I14	T14	I15	T15	I16	T16	I17	T17	I18	T18	I19	T19	I20	T20
14.3	0	13.6	0	14.3	0	13	0	13.6	0	13.4	10	13.7	0	15	0	14.6	0	13.5	0
13.8	15	12.2	15	13.6	15	11.8	15	12.7	15	12.4	20	13	15	14	15	12.9	15	13.3	15
13.5	30	11.7	30	13.3	30	11.6	30	12.7	30	11.9	30	12.9	30	13.9	30	12.4	30	13.3	30
13.1	45	11.3	45	13	45	11.5	45	12.6	45	11.3	40	12.9	60	13.8	45	11.9	45	13.3	45
12.7	60	11.1	60	12.8	60	11.5	60	12.5	60	11.1	50	12.8	90	13.8	60	11.4	60	13.3	60
12.1	90	10.9	90	12.5	90	11.4	90	12.5	90	10.8	60	12.8	120	13.7	90	10.3	105	13.2	90
11.6	120	10.6	120	12.2	120	11.3	120	12.5	128	9.8	80	12.8	150	13.7	120	10	120	13.2	120
11.2	150	10.5	150	11.8	150	11.3	150	12.5	150			12.7	180	13.7	150	9.9	135	13.2	150
10.9	180	10.4	180	11.5	180	11.2	180	12.5	200			12.7	215	13.7	180			13.2	180
10.6	210	10.2	210	11.3	210	11.2	210	12.5	240			12.7	270	13.7	210			13.2	210
10.3	240	10.1	240	10.7	240	11.2	240	12.4	300			12.7	330	13.7	240			13.2	240
10.2	270	10	270	10.3	270	11.2	270	12.4	390			12.7	390	13.7	270			13.2	270
10	300			10	300	11.2	300	12.4	450			12.7	510	13.7	300			13.2	300
						11	450	12.4	600			12.6	1050	13.6	360			13.2	330
						10.9	600	12.3	1160			12.6	1590	13.6	420			13.2	360
						10.8	960	12.2	2040			12.5	2310	13.6	600			13	1020
						10.7	1560	12.2	2580			12.5	2940	13.5	930			12.9	1740
						10.5	2400	12.2	3345			12.5	3660	13.5	1650			12.9	2400
						10.4	2970	12.2	3960					13.5	2250				
						10.3	3720	12.1	4620					13.4	2340				
						10.3	4320												
						10.2	4800												

### Beschouwing meetmethode infiltratie in wormenproef Lumbricus

De wormenproef was niet opgezet om na te gaan of de met LT-wormen behandelde plots een betere infiltratie vertonen dan de controleplots waar geen LT-wormen aanwezig zijn. Dit omdat niet zeker is hoeveel wormen in de pijpen overleven en tot wanneer en hoe de gangen zich in de tijd ontwikkelen. Deze metingen zijn dus enkel informatief of een verschil kan worden gemeten. Bij de analyse van dergelijke metingen wordt er namelijk wel van uitgegaan dat a) het enige verschil tussen de twee

---

behandelingen de af- en aanwezigheid van LT-wormen is, en dat b) de meting zodanig is uitgevoerd dat feitelijke infiltratie de bodem in wordt gemeten.

Bij het eerste oogstmoment op locatie Stegeren bleek dat in de geoogste buizen die met LT-wormen waren behandeld minder dan de 15 uitgezette LT-wormen werden teruggevonden. En zelfs in de controlebehandelingen werd(en) soms 1 of 2 LT-worm(en) aangetroffen. Verder was het zo dat in beide behandelingen in de bovengrond relatief veel andere type wormen werden aangetroffen, die zich vooral net onder maaiveld bevinden. De extra aanwezige wormen beïnvloedden met name de initiële infiltratiemetingen, en daarmee is het de vraag of de resultaten verschillen kunnen opleveren die het effect van af- en aanwezigheid van de verticaal pendelende LT-wormen laat zien.

De wijze waarop het water werd aangebracht (op een zeil dat boven op grasstoppels lag), blijkt het ook lastig te maken om een goed beeld van de initiële infiltratie te verkrijgen. Immers, de eerste daling van het waterniveau betreft het zakken van het water van een positie boven de grasstoppels naar de positie tussen de grasstoppels. De wijze waarop het plastic (voorzichtig) wordt verwijderd, betekent ook dat er geen instantane waterlaag op maaiveld ontstaat over de gehele oppervlakte van de bodem in de buis. Daar waar plastic het eerste is verwijderd, begint meteen al de infiltratie, terwijl het overige deel van de buis nog afgeschermd is met plastic. Pas nadat het plastic in zijn geheel is verwijderd, begint de meetserie.

Het idee om een groot oppervlak te beschouwen voor infiltratie is als uitgangspunt zeer goed, immers dan wordt een beter gemiddeld beeld verkregen (i.v.m. ruimtelijke variabiliteit). De praktische uitvoering laat achteraf toch de hierboven beschreven beperkingen zien. Een mogelijk ander aandachtspunt is de mogelijkheid dat tijdens het inbrengen van de metalen buizen het contact tussen de metalen buiswand en de grond aan de binnenzijde niet volledig is, waardoor het water daar snel kan wegzakken. Mogelijk dat bij de plots waar de bovenlaag opnieuw is gevuld (C1, LT1) dit contact beter is, omdat de grond handmatig is aangestampt. We zien voor deze behandelingen inderdaad dat we beter de verwachte infiltratie van 3 cm hebben gemeten.

Het advies voor toekomstig onderzoek zou kunnen zijn:

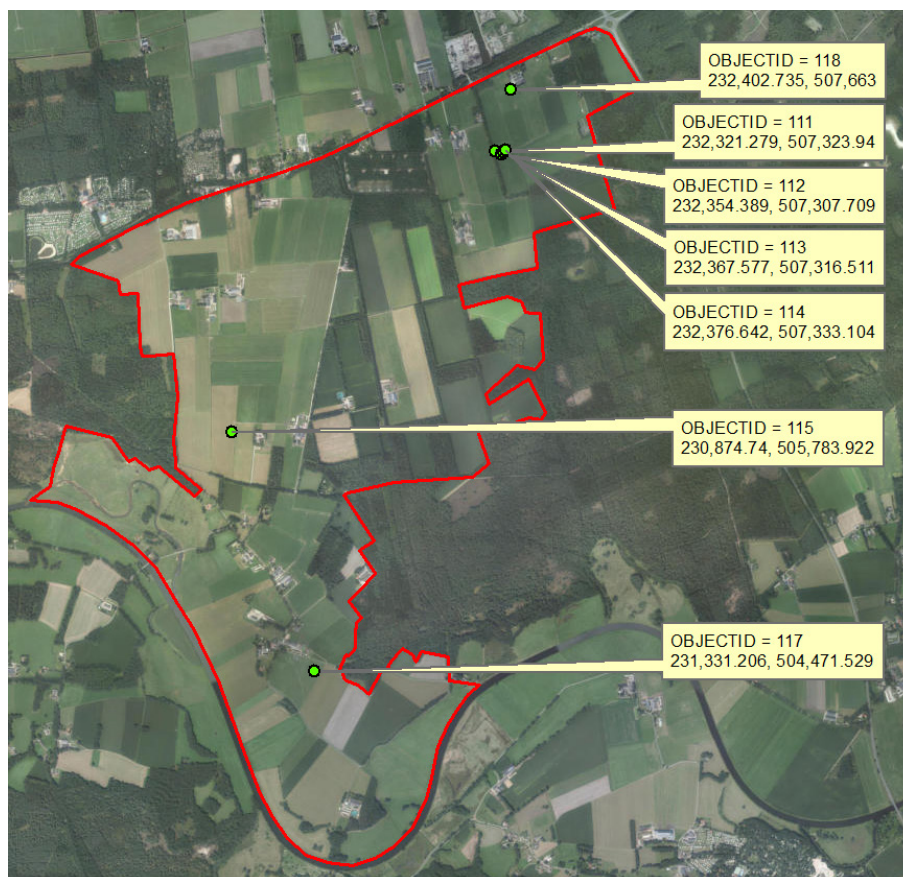
- Voer een laboratoriumexperiment uit met infiltratiemetingen in een grondkolom zonder en met LT-wormen (of alternatief: geboorde 'wormgangen') (zonder gewas). Voor een dergelijke proefopzet wordt een aantal van de bovengenoemde beperkingen en nadelen ontweken en kunnen we een 'theoretisch' verschil laten zien (en modelleren).
- Voor veldmetingen zouden in de toekomst, in plaats van de hierboven gehanteerde infiltratiemethode, infiltratiemetingen met de dubbele-ring-infiltrometer uitgevoerd kunnen worden binnen de buis. Omdat het totaaloppervlak van de ring-infiltrometer kleiner is, kan beter een instantane start gerealiseerd worden, waardoor mogelijk een beter onderscheid in infiltratiegedrag tussen de behandelingen verkregen kan worden.



## Bijlage 9 Bodemprofielbeschrijvingen

### LOCATIE STEGEREN

Ten behoeve van modelberekeningen dan wel als hulp bij interpretatie van meetgegevens is het raadzaam om lokale beschrijvingen van de bodems beschikbaar te hebben. Daarom zijn in proeftuin Oost (Stegeren) op vier percelen bodemprofielbeschrijvingen opgesteld door WENR (Figuur B9-1: a) voor de locatie van de wormenproef (OBJECTID=115), b) voor de locatie van de maaiveld-afvoerproef (OBJECTID=111-114), c) voor de locatie met de SAWAX-proef (OBJECTID=118), en d) voor de locatie van de demoproef diepwortelende gewassen (OBJECTID=117).



**Figuur B9-1** Duiding locaties bodemprofielbeschrijvingen mei-juni 2019.

Tabel B9-1 geeft de bodemprofielbeschrijvingen inclusief textuur schattingen. Voor alle locaties is het grondgebruik gras.

Tabel B9-2 geeft de veldschattingen van GHG en GLG en afgeleide Gt-klassen.

Tabel B9-3 geeft de vertaling naar Staringreeks bouwstenen op basis van textuur, en de vervolgvvertaling naar een bijbehorend BOFEK2012-profiel (zie ook Figuur B9-2). Vergelijking met de BOFEK2012-codes die volgens de landelijke BOFEK2012-kaart voor de betreffende locaties gelden, laat zien dat voor de Object ID's 111-114 volgens de landelijke BOFEK2012-kaart er een 205 – zanddek op moerige tussenlaag op zandondergrond – zou liggen; echter, volgens de lokale veldkartering wordt er geen moerige tussenlaag aangetroffen (heel soms houtresten op grotere diepte), waardoor er lokaal een zandcode (304; zwak lemige (podzol)gronden) wordt afgeleid. Mogelijk dat de moerige tussenlaag door natuurlijke afbraak is verdwenen en nu als minerale laag wordt aangemerkt.

**Tabel B9-1** Beschrijving bodemprofielen.

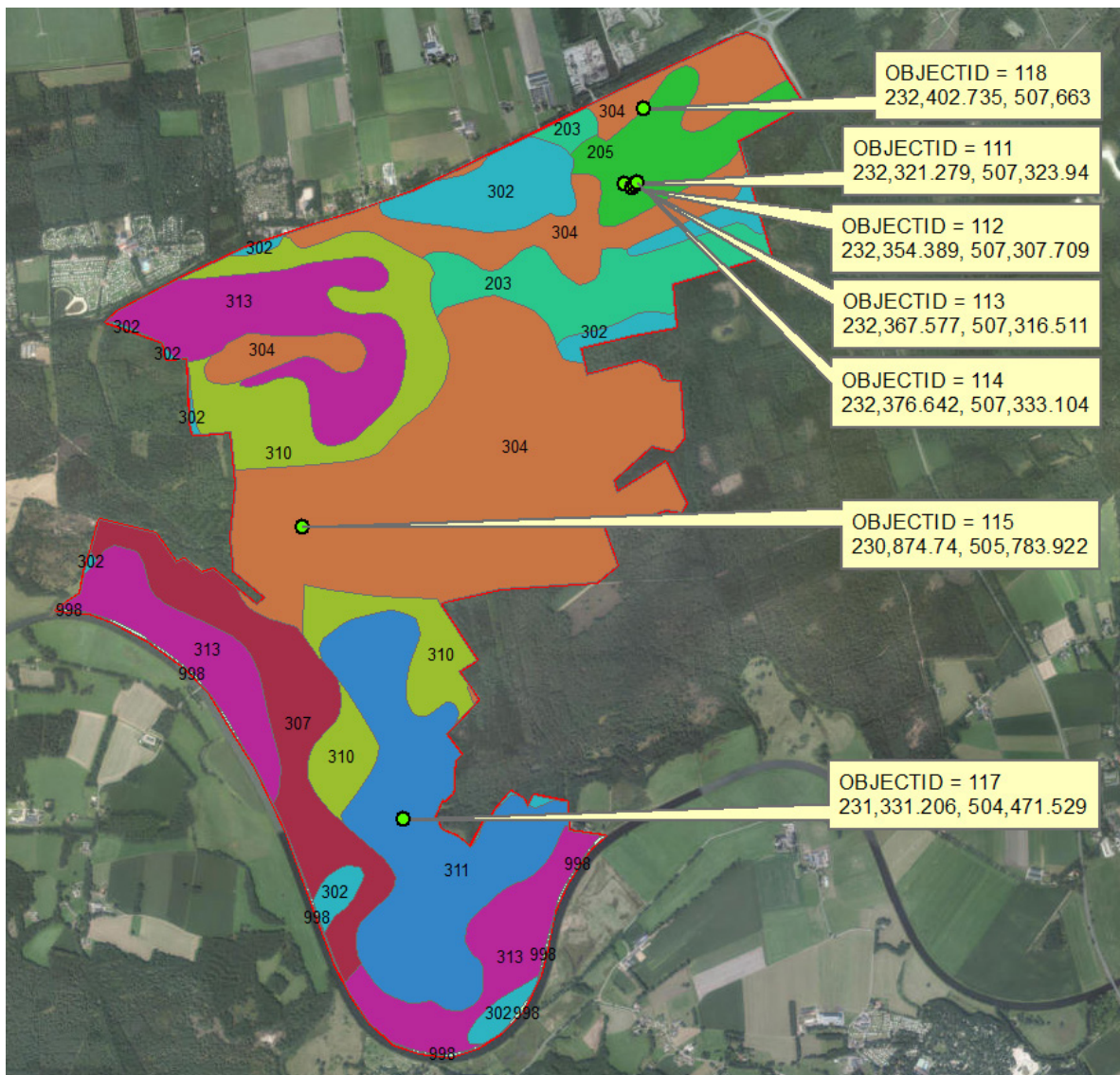
OBJECTID	LaagID	Laag	Boven (cm)	Onder (cm)	Hor. code	Meng verh.	OS (%)	Lutum	Leem	M50	GEO	Opmerking	Silt
111	1147	1	0	15	1Ap	0	5	1	14	145	411		16
	1148	2	15	25	1A/B	0	2	1	14	145	411	verwerkt	16
	1149	3	25	35	1BC	0	0.5	1	18	120	411		20
	1150	4	35	45	1Cg	0	0.3	1	22	120	411		24
	1151	5	45	110	1Ce	0	0.3	1	14	145	411		16
	1152	6	110	130	1Cer	0	0.3	1	12	145	411		14
	1153	7	130	160	1Cr	0	0.3	1	12	155	411		14
112	1154	1	0	28	1Ap	0	6	1	14	145	411		16
	1155	2	28	35	1A/B	0	3	1	14	145	411		16
	1156	3	35	60	1BC1	0	0.5	1	14	145	411	dicht	16
	1157	4	60	110	1BC2	0	0.5	1	12	155	411		14
	1158	5	110	120	1Cer	0	0.2	1	12	155	411	houtresten	14
	1159	6	120	160	1Cr	0	0.2	1	12	155	411		14
113	1160	1	0	30	1Ap	0	5	1	14	145	411		16
	1161	2	30	35	1A/C	0	2.5	1	18	145	411		20
	1162	3	35	55	1Ce	0	0.5	1	22	140	411		24
	1163	4	55	100	1BC	0	0.5	1	14	160	411		16
	1164	5	100	130	1Cer	0	1	1	14	160	411	houtresten	16
	1165	6	130	160	1Cr	0	1	1	14	160	411	houtresten	16
114	1166	1	0	25	1Ap	0	3	1	12	145	411		14
	1167	2	25	90	1Ah/	50	8	1	16	145	411		18
	1168	3	25	90	1Cg/	50	0.5	1	14	145	411		16
	1169	4	90	110	1Cg	0	0.5	1	14	155	411		16
	1170	5	110	150	1Cr	0	0.5	1	12	155	411		14
115	1171	1	0	30	1Ap	0	4	1	12	160	411		14
	1172	2	30	40	1BC	0	0.7	1	10	170	411	vaag	12
	1173	3	40	70	1Ce	0	0.7	1	10	170	411	humeuze fibers	12
	1174	4	70	110	1Cer	0	0.3	1	8	170	411		10
	1175	5	110	160	1Cr	0	0.3	1	8	170	411		10
117	1197	1	0	50	1Aa1	0	5	1	9	160	692		11
	1198	2	50	70	1Aa2	0	4	1	9	160	692		11
	1199	3	70	90	1AC	0	2.5	1	9	160	411		11
	1200	4	90	110	1Cu	0	0.3	1	8	180	411		10
	1201	5	110	155	1Cg	0	0.2	1	8	180	411		10
118	1202	1	0	25	1A/C	0	4	1	12	160	411	verwerkt	14
	1203	2	25	30	2Cw	0	25	3	0	0	111		10
	1204	3	30	50	3BC	0	1.5	1	12	135	411		14
	1205	4	50	70	3Cw	0	50	10	0	0	160	schoensmeer	15
	1206	5	70	80	3Bh	0	2	1	12	140	411		14
	1207	6	80	130	3Cu	0	0.5	1	12	140	411		14
	1208	7	130	150	3Cr	0	0.2	1	12	140	411		14

**Tabel B9-2** Duiding GHG, GLG en bewortelingsdiepte, inclusief actuele grondwaterstand. De Gt-klasse is afgeleid uit gerapporteerde GHG en GLG.

OBJECTID	GHG (cm)	GLG (cm)	Beworteling (cm)	Opmerking	Opname datum	Gt
111	40	110	130	gws 79cm	23-05-2019	III/IV
112	45	110	40		23-05-2019	IV
113	45	110	35	gws 85cm	23-05-2019	IV
114	45	110	60	gwst 75 oude sloot evt.	23-05-2019	IV
115	45	110	30	gws 68cm	23-05-2019	IV
117	110	150	80		03-06-2019	VII
118	40	120	50	Het kan een oude sloot zijn	03-06-2019	III/IV

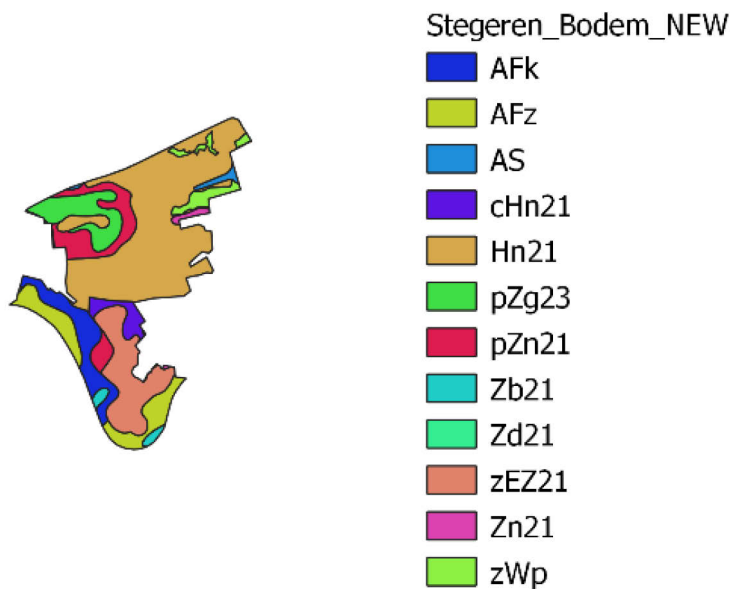
**Tabel B9-3** Toekenning Staringreeks-bouwsteen codes per bodemlaag uit Tabel 1, en de hieruit afgeleide lokale BOFEK2012-eenheid; ter vergelijking is de BOFEK2012-eenheid volgens de landelijke BOFEK2012-kaart ook gegeven (zie ook Figuur B9-2).

OBJECTID	LaagID	Laag	Boven (cm)	Onder (cm)	Staringreeks- bouwsteen	BOFEK2012, lokaal	BOFEK2012, landelijk
111	1147	1	0	15	B2	304 (zonder O3)	205
	1148	2	15	25	B2/O2		
	1149	3	25	35	O2/O3		
	1150	4	35	45	O3		
	1151	5	45	110	O2		
	1152	6	110	130	O2		
	1153	7	130	160	O2		
112	1154	1	0	28	B2	304	205
	1155	2	28	35	B2/O2		
	1156	3	35	60	O2		
	1157	4	60	110	O2		
	1158	5	110	120	O2		
	1159	6	120	160	O2		
113	1160	1	0	30	B2	304 (zonder O3)	205
	1161	2	30	35	B2/O2		
	1162	3	35	55	O3		
	1163	4	55	100	O2		
	1164	5	100	130	O2		
	1165	6	130	160	O2		
114	1166	1	0	25	B2	304 311, indien dik cultuurdek	205
	1167	2	25	90	B2		
	1168	3	25	90	O2		
	1169	4	90	110	O2		
	1170	5	110	150	O2		
	1171	1	0	30	B2		
1172	2	30	40	O1/O2			
1173	3	40	70	O1/O2			
1174	4	70	110	O1			
1175	5	110	160	O1			
117	1197	1	0	50	B1	327 (0-50 B1 op O1) 311 indien B2 als bovengrond	311
	1198	2	50	70	B1		
	1199	3	70	90	B1/O1		
	1200	4	90	110	O1		
	1201	5	110	155	O1		
118	1202	1	0	25	B2	205, i.v.m. O18 tussenlaag	op grens 205 / 304
	1203	2	25	30	O18		
	1204	3	30	50	O2		
	1205	4	50	70	O18		
	1206	5	70	80	O2		
	1207	6	80	130	O2		
	1208	7	130	150	O2		



**Figuur B9-2** Ligging bodemprofielbeschrijvingen geprojecteerd op de landelijke BOFEK2012-kaart.

Met de update van de bodemkaart van Nederland zien we dat de moerige gronden in het N en NO van het studiegebied Stegeren voor het grootste deel zijn verdwenen (Figuur B9-3). Wat resteert, is een miniem areaal moerig gronden 205 (21 ha; 3%), de rest zijn zandgronden: 302 (41.6 ha), 304 (304 ha), 307 (50 ha), 310 (76 ha), 311 (84 ha), 313 (107.5 ha) (Tabel B9-4; Tabel B9-5).



**Figuur B9-3** Ligging bodemprofielbeschrijvingen geprojecteerd op de landelijke BOFEK2012-kaart.

**Tabel B9-4** Verdeling bodemprofielen en gekoppelde BOFEK2012-eenheden op basis van de nieuwe bodemkaart voor deelgebied Stegeren.

Code	BOFEK-eenheid	Areaal (m <sup>2</sup> )	Areaal percentage
AFk	(307)	500624	7.32
AFz	(313)	582739	8.52
AS	(302)	286751	4.19
cHn21	310	178953	2.62
Hn21	304	3039434	44.42
pZg23	313	492187	7.19
pZn21	310	582206	8.51
Zb21	302	72708	1.06
Zd21	302	2207	0.03
zEZ21	311	839150	12.26
zN21	302	54415	0.80
zWp	205	210758	3.08

**Tabel B9-5** Profielopbouw voor aanwezige BOFEK2012-eenheden in deelgebied Stegeren.

BOFEK eenheid	Profielopbouw Staringreeks-bouwstenen		Opmerking
205	0-20	B2	Gras
	20-35	O18	
	35-60	O2	
	60-80	O2	
	80-100	O1	
	100-120	O1	
302	0-20	B2	Dit is niet het dominante BOFEK-profiel, maar profiel voor grasland (Zn21)
	20-120	O1	
304	0-25	B2	Gras en akkerbouw
	25-40	O2	
	40-60	O2	
	60-120	O1	
307	0-20	B8	Gras
	20-35	O9	
	35-45	O2	
	45-70	O1	
	70-120	O1	
310	0-25	B2	Gras en akkerbouw
	25-40	B2	
	40-60	O1	
	60-75	O1	
	75-120	O1	
311	0-25	B2	Gras en akkerbouw
	25-75	B2	
	75-90	B2	
	90-105	O2	
	105-120	O1	
313	0-25	B3	Akkerbouw; bij grasland ligt eerste grens bij 20 cm, rest gelijk
	25-30	B3	
	30-60	O3	
	60-120	O2	

### Aanvullende bodemprofielbeschrijvingen

Op 25-05-2020 zijn bij de proeflocaties 'wormen' (Object ID = 251) en 'maaiwafvoer' (Object ID = 250) grondmonsters genomen voor bodem-hydrofysische karakterisering. Daarbij zijn ter plaatse ook bodemprofielbeschrijvingen gemaakt. Deze staan beschreven in Tabel B9-6. De beschrijvingen komen overeen met de hierboven vermelde locaties: 250: 111-114; 251: 115.

**Tabel B9-6** Aanvullende bodemprofielbeschrijvingen

Object ID	Laag	Boven (cm)	Onder (cm)	Hor. code	OS (%)	Lutum	Leem	M50	Geo	Silt
250_1321	1	0	25	1Ap	4	1	12	145	411	14
250_1322	2	25	30	1A/Bh	2	1	12	145	411	14
250_1323	3	30	45	1BC	1	1	16	130	411	18
250_1324	4	45	100	1Ce	0.2	1	14	145	411	16
250_1325	5	100	120	1Cer	0.2	1	14	145	411	16
251_1326	1	0	25	1Ap	4.5	1	14	160	411	16
251_1327	2	25	45	1AC	1	1	12	160	411	14
251_1328	3	45	75	1Cg	0.5	1	16	145	411	18
251_1329	4	75	110	1Cer	0.2	1	14	145	411	16
251_1330	5	110	120	1Cr	0.2	1	14	155	411	16

Object ID	GHG (cm)	GLG (cm)	Bewortelingsdiepte (cm)	GT	X	Y
250	30	120	50	IIIb	232323.8	507323.2
251	40	120	40	IVu	230878.4	505783.6

## LOCATIE DE MOER

De bodemprofielbeschrijvingen gemaakt in 6 plots van de LBI-grondbewerkingsproef zijn gegeven in Tabel B9-7 (opnamedatum: oktober 2019).

**Tabel B9-7** Bodemprofielbeschrijvingen voor 6 plots van de LBI-grondbewerkingsproef, locatie De Moer.

Plot	GHG	GLG	Gt	Bewortelbare diepte	m+NAP	X	Y
5	60	130	Vlo	80	5.63	129177	405143
7	60	130	Vlo	80	5.60	129180	405155
9	60	150	Vlo	80	5.73	129207	405162
11	60	150	Vlo	80	5.75	129206	405149
22	65	>150	Vld	80	5.85	129237	405149
20	80	>150	Vld	80	5.89	129237	405138

Plot	Object id	Laag	Bovengrens	Ondergrens	Hor code	Org. stof	Lutum	Leem	M50	Kalk	Geo-code	Opmerking
5	514	1	0	25	1Aap	4.0	1	11	155	1	692	
5	515	2	25	60	1Aa	3.5	1	11	155	1	692	
5	516	3	60	75	1A/Bh	2.5	1	11	155	1	411	
5	517	4	75	110	1Ce1	0.2	1	9	145	1	411	
5	518	5	110	130	1Ce2	0.2	1	7	170	1	411	
5	519	6	130	140	1Cer	1.0	2	22	120	1	412	
5	520	7	140	155	1Cr	0.2	1	13	180	1	413	
7	521	1	0	20	1Aap	4.0	1	12	155	1	692	
7	522	2	20	40	1Aa1	3.5	1	11	155	1	692	
7	523	3	40	53	1Aa2	2.5	1	10	155	1	692	
7	524	4	53	60	2BC	1.0	1	9	155	1	411	
7	525	5	60	120	2Ce1	0.2	1	9	155	1	411	
7	526	6	120	135	2Ce2	0.2	1	9	165	1	411	
7	527	7	135	140	2Cr1	1.0	1	27	130	1	412	
7	528	8	140	150	2Cr2	0.2	1	11	220	1	412	
9	529	1	0	25	1Aap	4.0	1	13	160	1	692	
9	530	2	25	40	1Aa	3.0	1	12	160	1	692	
9	531	3	40	50	1A/Ce	1.5	1	9	160	1	411	
9	532	4	50	80	1Ce1	0.5	1	9	160	1	411	
9	533	5	80	120	1Ce2	0.2	1	8	160	1	411	
9	534	6	120	135	1Ce3	0.2	1	8	170	1	411	
9	535	7	135	145	1Cer	0.2	1	16	150	1	411	
9	536	8	145	150	1Ahb	4.0	2	22	130	1	411	
11	537	1	0	25	1Ap	4.0	1	12	160	1	411	
11	538	2	25	35	1Ah	3.5	1	12	160	1	411	
11	539	3	35	50	1Ah/Bhe	2.5	1	11	160	1	411	
11	540	4	50	65	1BCe	1.0	1	9	160	1	411	
11	541	5	65	110	1Ce1	0.2	1	9	160	1	411	
11	542	6	110	120	1Ce2	0.2	1	18	130	1	412	
11	543	7	120	150	1Cer	0.2	1	9	170	1	413	grindjes
22	544	1	0	25	1Aap	4.0	1	12	160	1	692	
22	545	2	25	55	1Aa	3.5	1	11	160	1	692	
22	546	3	55	75	1Ce1	0.5	1	9	160	1	411	
22	547	4	75	100	1Ce2	0.2	1	9	145	1	411	
22	548	5	100	115	1Ce3	0.2	1	18	140	1	411	
22	549	6	115	150	1Ce4	0.2	1	12	170	1	413	grindjes
20	550	1	0	20	1Aap	4.0	1	12	155	1	692	
20	551	2	20	40	1A/Bhe	3.0	1	11	155	1	411	
20	552	3	40	55	1BCe	1.0	1	9	155	1	411	
20	553	4	55	125	1Ce	0.2	1	8	155	1	411	
20	554	5	125	135	2Ce1	0.4	1	22	130	1	411	
20	555	6	135	145	2Ce2	0.2	1	12	170	1	411	
20	556	7	145	155	2Cer	0.2	1	9	180	1	413	

# Bijlage 10 Gemeten bodemfysische eigenschappen (Stegeren)

In proeftuin Oost (Stegeren) zijn in mei 2020 bodemmonsters genomen waarvoor de waterretentie-karakteristiek is gemeten op drie dieptes, de droge bulkdichtheid op drie dieptes, en de doorlatendheid bij verzadiging van de bovenlaag (één diepte). Alle metingen zijn in duplo uitgevoerd. Er zijn twee locaties bemonsterd: locatie 'H' verwijst naar het proefperceel van de infiltratie-proef (ter hoogte van ObjectIDs 111-114 (zoals getoond in Bijlage 9) en locatie 'K' verwijst naar het proefperceel van de wormenproef (ter hoogte van ObjectID 115 (zoals getoond in Bijlage 9)). De resultaten staan in onderstaande Tabel B10-1.

**Tabel B10-1** Gemeten volumetrische watergehalten ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) bij verschillende drukhoogtes (3, 10, ..., 1000000 (luchtdroog); cm), droge bulkdichtheid ( $\text{Rho}_d$ ;  $\text{g cm}^{-3}$ ) en doorlatendheid bij verzadiging ( $K_{\text{sat}}$ ;  $\text{cm d}^{-1}$ ) voor twee locaties (H, K) in proeftuin Oost op drie dieptes.

Locatie	Diepte	3	10	30	70	100	3000	14000	1000000	Rho_d	Ksat
H1	0-25	0.4298	0.4221	0.4122	0.3300	0.2937	0.1171	0.1009	0.0239	1.3584	116.84
H1	0-25	0.4563	0.4499	0.4389	0.3489	0.3127	0.1217	0.1001	0.0209	1.2819	(319.84) <sup>#</sup>
H2	30-40	0.2907	0.2869	0.2757	0.2304	0.1769	0.0610	0.0359	0.0117	1.7498	
H2	30-40	0.2826	0.2803	0.2673	0.2043	0.1776	0.0637	0.0347	0.0111	1.7270	
H3	55-65	0.3219	0.3197	0.3105	0.2469	0.1908	0.0164	0.0124	0.0068	1.7779	
H3	55-65	0.2913	0.2887	0.2820	0.2028	0.1548	0.0152	0.0110	0.0061	1.7747	
K1	0-25	0.3940	0.3882	0.3814	0.3739	0.3448	0.1076	0.0752	0.0196	1.4596	29.88
K1	0-25	0.3345	0.3257	0.3177	0.2945	0.2863	0.1159	0.0873	0.0230	1.6907	89.36
K2	30-40	0.3232	0.3211	0.3143	0.2772	0.2370	0.0353	0.0256	0.0106	1.7105	
K2	30-40	0.3043	0.3011	0.2885	0.2200	0.1955	0.0387	0.0308	0.0112	1.6775	
K3	50-60	0.3169	0.3074	0.2875	0.2066	0.1460	0.0214	0.0160	0.0082	1.6627	
K3	50-60	0.3030	0.2975	0.2882	0.2228	0.1404	0.0194	0.0149	0.0078	1.7137	

<sup>#</sup>: bevatte wortel en 2 levende wormen; meting  $K_{\text{sat}}$  buiten beschouwing gelaten.

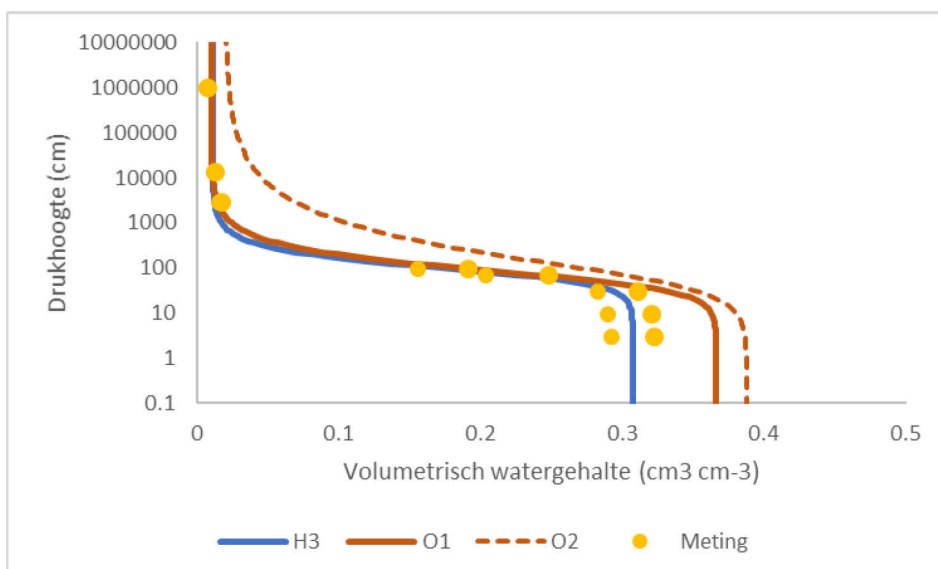
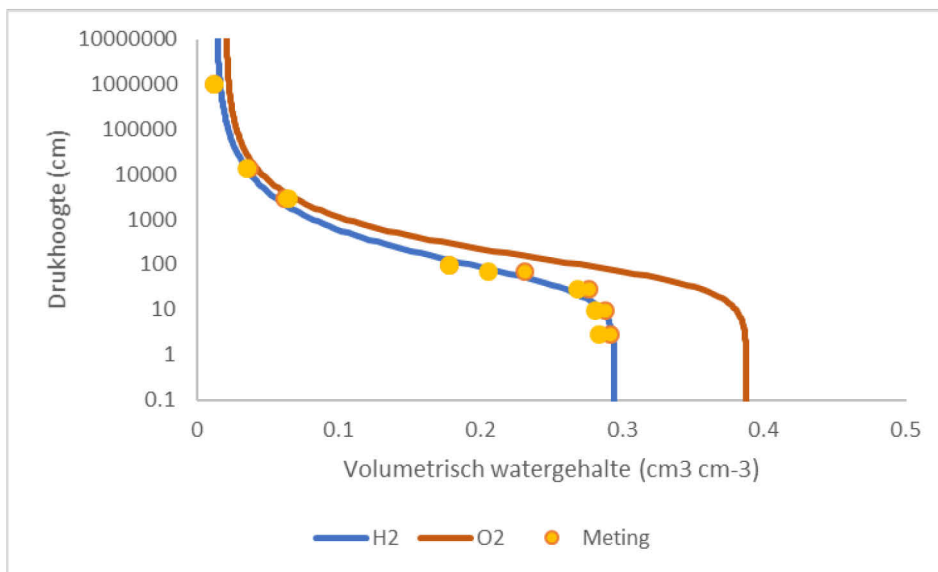
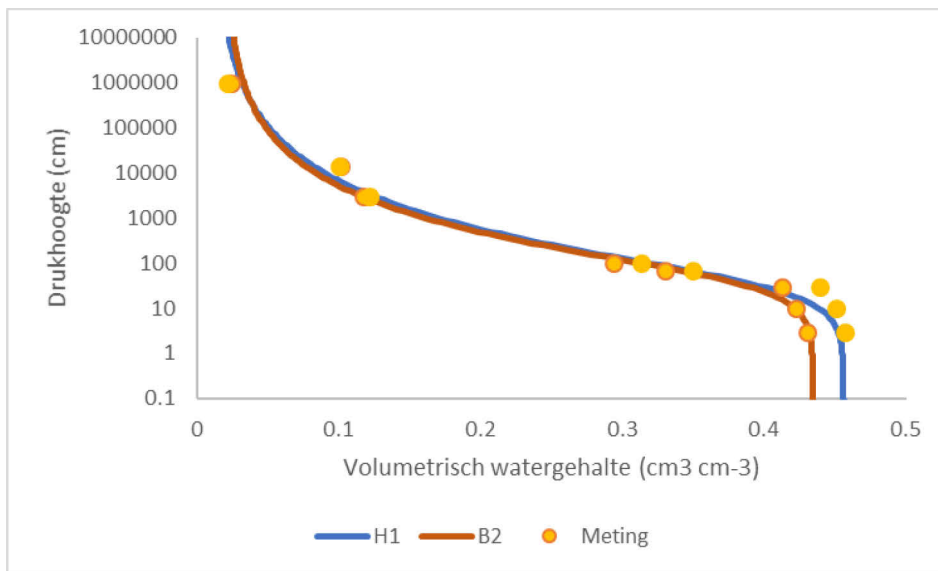
In Figuur B10-1 staan de metingen en de Van Genuchten-fits (Van Genuchten-parameters zijn gegeven in Tabel 5-2 in de hoofdtekst; zie ook Tabel B10-2). Ter illustratie zijn ook de Staringreeks2018-curves voor B2, O2 en O1 in de figuren opgenomen. Voor de bovengrond geldt dat de curves voor H1 en B2 niet erg verschillen.

**Tabel B10-2** De parameters voor de unimodale Mualem-Van Genuchten-relaties gebaseerd op lokaal gemeten waterretentiekarakteristieken en doorlatendheid bij verzadiging voor beide locaties.

Naam	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$\lambda$	$K_{\text{sfit}}$
'H1-uni'	0.013	0.456	0.0276	1.312	n.b. (0.5)	116.8
'H2-uni'	0.013	0.294	0.0228	1.450	n.b.	n.b.
'H3-uni'	0.011	0.307	0.0123	2.553	n.b.	n.b.
'K1-uni'	0.013	0.363	0.0076	1.380	n.b. (0.5)	51.7
'K2-uni'	0.016	0.317	0.0129	1.725	n.b.	n.b.
'K3-uni'	0.014	0.305	0.0132	3.003	n.b.	n.b.

n.b.: niet bekend.





**Figuur B10-1** Gemeten (symbolen) en gefitte (blauwe lijn) waterretentiekarakteristieken voor de locaties H1, H2, en H3. Ter illustratie zijn de Staringreeks2018-curves voor B2, O1 en O2 ook weergegeven.

# Bijlage 11 Invoerbestanden voor N-module

Simulaties met SWAP-WOFOST, waarbij de N-module wordt gebruikt, vragen om drie aanvullende invoerbestanden:

1. Een bestand met gegevens van de te gebruiken (organische) materialen (mest): de zogenaamde .smm file.
2. Een bestand met de initiële organische stof en stikstof toestandsvariabelen en overige stuurvariabelen; de zogenaamde .snp file.
3. Een bestand met de toedieningen per jaar per type mestsoort: de zogenaamde .sme file.

De drie gebruikte organische materialen uit paragraaf 5.3 zijn opgenomen in de .smm file; hierin staan ook de gegevens voor de kunstmest die is beschouwd. Voor alle vier de situaties geldt dat ze zijn gestart met dezelfde uitgangssituatie: gelijke .snp file voor allemaal. In de file .sme worden de tijdstippen van de gebruikte bemestingen opgegeven. Hier verschilt per case de hoeveelheid en de verwijzing naar type materiaal.

ad 1)

## Voorbeeld .smm file.

```
*****
* Filename: CranMais.smm
* Contents: Soil Management Material Definitions
*****
* Comment area:
*
* Case: Cranendonck - maize
*
*****
* soil management material definitions
MatNum , MatName , AppAge , OrgMatFrac,OrgNFrac, NH4NFrac,NO3NFrac
1 , 'Cattle manure' , 3.16 , 0.150 , 0.035 , 0.0012 , 0.0000
2 , 'Pig manure' , 1.36 , 0.161 , 0.037 , 0.0015 , 0.0000
3 , 'Poultry manure' , 1.36 , 0.376 , 0.058 , 0.0024 , 0.0000
4 , 'Cattle slurry' , 3.16 , 0.064 , 0.034 , 0.0022 , 0.0000
5 , 'Pig slurry' , 1.36 , 0.060 , 0.050 , 0.0042 , 0.0000
6 , 'Poultry slurry' , 1.36 , 0.093 , 0.047 , 0.0058 , 0.0000
7 , 'Compost' , 1.96 , 0.190 , 0.041 , 0.0008 , 0.0000
8 , 'Champost' , 1.36 , 0.220 , 0.025 , 0.0003 , 0.0000
9 , 'Urea' , 0.00 , 0.460 , 0.000 , 0.4600 , 0.0000
10 , 'Mineral N fertilizer' , 0.00 , 0.000 , 0.000 , 0.5000 , 0.5000
11 , 'Green leaves' , 0.92 , 1.000 , 0.000 , 0.0000 , 0.0000
12 , 'Overground crop residues' , 0.99 , 1.000 , 0.000 , 0.0000 , 0.0000
13 , 'Root and stubble residues' , 1.57 , 1.000 , 0.000 , 0.0000 , 0.0000
14 , 'Grass shoots' , 0.92 , 1.000 , 0.000 , 0.0000 , 0.0000
15 , 'Grass roots' , 1.20 , 1.000 , 0.000 , 0.0000 , 0.0000
16 , 'Tree leaves' , 2.25 , 1.000 , 0.000 , 0.0000 , 0.0000
17 , 'Spruce needles' , 3.34 , 1.000 , 0.000 , 0.0000 , 0.0000
18 , 'Bokashi' , 4.09 , 0.102 , 0.029 , 0.0004 , 0.0000
19 , 'Insect substrate' , 1.26 , 0.129 , 0.028 , 0.0008 , 0.0000
20 , 'Keur compost' , 35.7 , 0.112 , 0.0082 , 0.0003 , 0.0000
* End of input file .smm!
```

ad 2)

## Voorbeeld .snp file.

```
*****
* Filename: CranMais.snp
* Contents: Soil Nutrient Parameters
*****
* Comment area:
*
* Case: Cranendonck - maize
*
*****
* soil nutrient parameters
*
* initial states
FOM1_t = 0.004595
FOM2_t = 0.147426
FOM3_t = 0.000238
FOM4_t = 0.009615
FOM5_t = 0.009609
FOM6_t = 0.348066
FOM7_t = 0.000585
FOM8_t = 0.026068
Bio_t = 0.051265
Hum_t = 10.170340
cNH4_t = 0.000089
cNO3_t = 0.031356
```

```

* boundary concentrations
cNH4N_top = 0.0025 ! half of annual N-deposition input as NH4N in rain
cNH4N_lat = 0.0
cNH4N_seep = 0.0
cNO3N_top = 0.0025 ! half of annual N-deposition input as NO3N in rain
cNO3N_lat = 0.0
cNO3N_seep = 0.0

* Coefficients and rate constants
Temp_ref = 10.0
SorpCoef = 0.0005
RateConNitrif_ref = 1.0
RateConDenitr_ref = 0.06

* Response function parameters
WFPSCrit = 0.95
WFPScrit2 = 0.7
CdissiHalf = 0.001

* Soil supply uptake parameter
TCSF_N = 0.5

* Expert use: for maize initially force passive uptake [0 (default) ... 10]
LaiCritNupt = 5.0

* effective depth of soil layer
dz_WSN = 0.75

* End of input file .snp!

```

ad 3)

#### Voorbeeld voor referentie .sme file.

```

*****
* Filename: CranMais.sme
* Contents: Soil Management Events
*****
* Comment area:
*
* Case: Cranendonck - maize field 16
*
*****

* Soil management events:
* (smedate(1) must be after start of simulation !!)
smedate MatNum Dosagekggha VolatFraction
15-Apr-1974 10 105. 0.0
2-Jun-1974 10 105. 0.0
15-Apr-1975 10 105. 0.0
2-Jun-1975 10 105. 0.0
15-Apr-1976 10 105. 0.0
2-Jun-1976 10 105. 0.0
15-Apr-1977 10 105. 0.0
2-Jun-1977 10 105. 0.0
15-Apr-1978 10 105. 0.0
2-Jun-1978 10 105. 0.0
15-Apr-1979 10 105. 0.0
2-Jun-1979 10 105. 0.0
15-Apr-1980 10 105. 0.0
2-Jun-1980 10 105. 0.0
15-Apr-1981 10 105. 0.0
2-Jun-1981 10 105. 0.0
15-Apr-1982 10 105. 0.0
2-Jun-1982 10 105. 0.0

* End of input file .sme!

```

#### Voorbeeld voor bokashi .sme file.

```

*****
* Filename: CranMais.sme
* Contents: Soil Management Events
*****
* Comment area:
*
* Case: Cranendonck - maize field 16
*
*****

* Soil management events:
* (smedate(1) must be after start of simulation !!)
smedate MatNum Dosagekggha VolatFraction
15-Apr-1974 10 105. 0.0
16-Apr-1974 18 20000. 0.0
2-Jun-1974 10 105. 0.0
15-Apr-1975 10 105. 0.0
16-Apr-1975 18 20000. 0.0
2-Jun-1975 10 105. 0.0
15-Apr-1976 10 105. 0.0
16-Apr-1976 18 20000. 0.0
2-Jun-1976 10 105. 0.0
15-Apr-1977 10 105. 0.0
16-Apr-1977 18 20000. 0.0
2-Jun-1977 10 105. 0.0
15-Apr-1978 10 105. 0.0
16-Apr-1978 18 20000. 0.0
2-Jun-1978 10 105. 0.0
15-Apr-1979 10 105. 0.0
16-Apr-1979 18 20000. 0.0
2-Jun-1979 10 105. 0.0

```

15-Apr-1980	10	105.	0.0
16-Apr-1980	18	20000.	0.0
2-Jun-1980	10	105.	0.0
15-Apr-1981	10	105.	0.0
16-Apr-1981	18	20000.	0.0
2-Jun-1981	10	105.	0.0
15-Apr-1982	10	105.	0.0
16-Apr-1982	18	20000.	0.0
2-Jun-1982	10	105.	0.0

\* End of input file .sme!

### Voorbeeld voor insectensubstraat .sme file.

```
*****
* Filename: CranMais.sme
* Contents: Soil Management Events
*****
* Comment area:
*
* Case: Cranendonck - maize field 16
*
*****

* Soil management events:
* (smedate(1) must be after start of simulation !!)
  smedate   MatNum Dosagekg/ha VolatFraction
15-Apr-1974  10     105.      0.0
16-Apr-1974  19    20000.     0.0
2-Jun-1974   10     105.      0.0
15-Apr-1975  10     105.      0.0
16-Apr-1975  19    20000.     0.0
2-Jun-1975   10     105.      0.0
15-Apr-1976  10     105.      0.0
16-Apr-1976  19    20000.     0.0
2-Jun-1976   10     105.      0.0
15-Apr-1977  10     105.      0.0
16-Apr-1977  19    20000.     0.0
2-Jun-1977   10     105.      0.0
15-Apr-1978  10     105.      0.0
16-Apr-1978  19    20000.     0.0
2-Jun-1978   10     105.      0.0
15-Apr-1979  10     105.      0.0
16-Apr-1979  19    20000.     0.0
2-Jun-1979   10     105.      0.0
15-Apr-1980  10     105.      0.0
16-Apr-1980  19    20000.     0.0
2-Jun-1980   10     105.      0.0
15-Apr-1981  10     105.      0.0
16-Apr-1981  19    20000.     0.0
2-Jun-1981   10     105.      0.0
15-Apr-1982  10     105.      0.0
16-Apr-1982  19    20000.     0.0
2-Jun-1982   10     105.      0.0
```

\* End of input file .sme!

### Voorbeeld voor keurcompost .sme file.

```
*****
* Filename: CranMais.sme
* Contents: Soil Management Events
*****
* Comment area:
*
* Case: Cranendonck - maize field 16
*
*****

* Soil management events:
* (smedate(1) must be after start of simulation !!)
  smedate   MatNum Dosagekg/ha VolatFraction
15-Apr-1974  10     105.      0.0
2-Jun-1974   10     105.      0.0
3-Jun-1974   20    50000.     0.0
15-Apr-1975  10     105.      0.0
2-Jun-1975   10     105.      0.0
3-Jun-1975   20    50000.     0.0
15-Apr-1976  10     105.      0.0
2-Jun-1976   10     105.      0.0
3-Jun-1976   20    50000.     0.0
15-Apr-1977  10     105.      0.0
2-Jun-1977   10     105.      0.0
3-Jun-1977   20    50000.     0.0
15-Apr-1978  10     105.      0.0
2-Jun-1978   10     105.      0.0
3-Jun-1978   20    50000.     0.0
15-Apr-1979  10     105.      0.0
2-Jun-1979   10     105.      0.0
3-Jun-1979   20    50000.     0.0
15-Apr-1980  10     105.      0.0
2-Jun-1980   10     105.      0.0
3-Jun-1980   20    50000.     0.0
15-Apr-1981  10     105.      0.0
2-Jun-1981   10     105.      0.0
3-Jun-1981   20    50000.     0.0
15-Apr-1982  10     105.      0.0
2-Jun-1982   10     105.      0.0
3-Jun-1982   20    50000.     0.0
```

\* End of input file .sme!



---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research)

Wageningen Environmental Research  
Rapport 3059  
ISSN 1566-7197

---

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.500 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.





To explore  
the potential  
of nature to  
improve the  
quality of life



---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AB Wageningen  
T 317 48 07 00  
[www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research)

Rapport 3059  
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers (5.000 fte) en 12.500 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

