



---

# Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit

Deelstudies Goede Grond voor een duurzaam watersysteem

Piet Groenendijk, Peter Schipper, Rob Hendriks, Jan van den Akker en Marius Heinen



---

# Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit

Deelstudies Goede Grond voor een duurzaam watersysteem

Piet Groenendijk, Peter Schipper, Rob Hendriks, Jan van den Akker en Marius Heinen

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research (Alterra) in opdracht van en gedeeltelijk gefinancierd door de Stichting en gedeeltelijk gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken, in het kader van het KennisBasis onderzoekthema 'Sustainable natural resources' (projectnummer KB-24-002-006).

Wageningen Environmental Research  
Wageningen, juni 2017

---

Rapport 2811  
ISSN 1566-7197

STOWA-rapport 2017-020


---

Groenendijk, Piet, Peter Schipper, Rob Hendriks, Jan van den Akker en Marius Heinen, 2017. *Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit; Deelstudies Goede Grond voor een duurzaam watersysteem*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2811. 128 blz.; 53 fig.; 29 tab.; 86 ref.

De bufferende werking van de bodem wordt als een kans gezien voor adaptatie van klimaateffecten en daarnaast groeit het besef dat een goede bodemkwaliteit bijdraagt aan een verbetering van de benutting van meststoffen en het realiseren van milieudoelen. Als vervolg op een verkenning "Goede grond voor een duurzaam watersysteem" zijn enkele deelstudies uitgevoerd om kennis te verdiepen over de effecten van maatregelen ter verbetering van de bodemkwaliteit en voor een onderbouwing van meetinspanningen in veldonderzoek. Drie deelstudies zijn uitgevoerd: 1) meting en modellering van bodemverdichting en bewortelingsdiepte op een perceel van Vruchtbare Kringloop (Achterhoek), om na te gaan wat de meerwaarde is van specifieke metingen voor het kwantificeren van effecten ten opzichte van schattingen op basis van algemeen beschikbare gegevens; 2) beoordeling van bodemfysische parameters, verzameld in een onderzoek naar bodemverdichting in Vlaanderen, teneinde de bandbreedte van de effecten van bodemverdichting realistischer te kunnen schatten dan in voorgaande verkenningen en 3) modellering van effecten van maatregelen ter verhoging van het organische stofgehalte aan de hand van gegevens van proefbedrijf Vredepeel, om na te gaan of verwachtingen op de lange termijn terecht zijn. Daarnaast is een handreiking gedaan voor het modelleren van bodemverbeterende maatregelen met de modellen die worden ingezet voor Waterwijzer Landbouw. Vanuit de resultaten van de deelstudies zijn aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek in regionale pilots.

Trefwoorden: bodemkwaliteit, bodemverdichting, gewasgroei, maatregelen, organische stof, uitspoeling, handelingsperspectief

Dit rapport is gratis te downloaden van <http://dx.doi.org/10.18174/418283> 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.

 2017 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E [info.alterra@wur.nl](mailto:info.alterra@wur.nl), [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 Rapport 2811 | ISSN 1566-7197  
STOWA-rapport 2017-020

Foto omslag: Shutterstock

---

# Inhoud

	<b>Woord vooraf</b>	<b>5</b>
	<b>Ten Geleide</b>	<b>7</b>
	<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>15</b>
	1.1 Aanleiding	15
	1.2 Achtergrond	15
	1.3 Kennisvragen en doel	18
	1.4 Aanpak	19
	1.5 Leeswijzer	19
<b>2</b>	<b>Deelstudie Vruchtbare Kringloop</b>	<b>21</b>
	2.1 Overzicht veldwerk en metingen	21
	2.2 Aanvullende bepalingen bodemfysische parameters	21
	2.3 Modellerings met gemeten waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties	23
	2.4 Meerwaarde gemeten doorlatendheidsrelaties	28
	2.5 Kritische neerslaghoeveelheid voor het optreden van oppervlakkige afstroming	29
	2.6 Conclusies	29
<b>3</b>	<b>Vergelijking met dataset Vlaanderen</b>	<b>31</b>
	3.1 Samenvatting van onderzoek naar bodemverdichting in Vlaanderen	31
	3.2 Vergelijkingen met Nederlandse datasets	35
	3.3 Conclusies uit de vergelijking tussen de Vlaamse en Nederlandse datasets	39
	3.4 Resultaten modelstudie Vlaanderen	40
<b>4</b>	<b>Effecten langjarige aanvoer organische stof</b>	<b>44</b>
	4.1 Inleiding	44
	4.1.1 Effect op bodemwater	44
	4.1.2 Effectieve organische stof	45
	4.1.3 Beschikbaarheid organische reststromen in Nederland	46
	4.2 Experimenten op proefboerderij Vredepeel	47
	4.2.1 Gebiedsbeschrijving	47
	4.2.2 Overzicht van studies met gegevens van Vredepeel	49
	4.2.3 Proeven met drie systemen	50
	4.3 Modelberekeningen met SWAP-WOFOST	54
	4.3.1 Methoden	54
	4.4 Resultaten modelijking en -toetsing	59
	4.4.1 Hydrologische onderrand	59
	4.4.2 Verloop organische stof	60
	4.4.3 Nitraatconcentraties	62
	4.5 Rekenscenario's met aanvoer van compost en gewasrotatie	64
	4.5.1 Definitie van scenario's	64
	4.5.2 Effecten op organische stof	64
	4.5.3 Effecten op gewasproductie	65
	4.5.4 Effecten op grondwateraanvulling	66
	4.5.5 Effecten op nitraatuitspoeling	66
	4.5.6 Effecten van vanggewassen op organische stof en nitraat	67
	4.6 Conclusies	68

---

<b>5</b>	<b>Handreiking modellering bodemverbeterende maatregelen</b>	<b>71</b>
5.1	Inleiding	71
5.2	SWAP	71
5.2.1	Introductie	71
5.2.2	Waterstroming	72
5.2.3	Warmtetransport	74
5.2.4	Stoftransport	74
5.3	WOFOST of eenvoudige gewasgroei optie	74
5.4	Meta-SWAP	75
5.5	Doorrekenen maatregelen	75
5.5.1	Beworteling	75
5.5.2	Aanvoer compost	76
5.5.3	Effect regenwormen	77
5.5.4	Grondbewerking	78
5.6	Voorbeeld	78
5.7	Aanbeveling voor toepassing	79
<b>6</b>	<b>Synthese</b>	<b>80</b>
6.1	Beantwoording kennisvragen	80
6.2	Conclusies	83
6.3	Strategie voor kwantificeren effecten	85
6.4	Aanbevelingen vanuit de deelstudies	86
6.5	Aanbevelingen voor pilots en metingen	86
	<b>Literatuur</b>	<b>91</b>
	<b>Bijlage 1 Bemonstering en bepaling van bodemfysische grootheden</b>	<b>96</b>
	<b>Bijlage 2 Beoordeling fysische bodemkwaliteit voor verdichting</b>	<b>104</b>
	<b>Bijlage 3 Meetresultaten en modellering Vruchtbare Kringloop 2015</b>	<b>105</b>
	<b>Bijlage 4 Rekenregels Assouline</b>	<b>115</b>
	<b>Bijlage 5 Rekenregels PENETR</b>	<b>118</b>
	<b>Bijlage 6 Effect humusgehalte op Mualem-Van Genuchten- parameters</b>	<b>119</b>
	<b>Bijlage 7 Gebruiksaanwijzing voor het script R-SWAP-extremes</b>	<b>121</b>
	<b>Bijlage 8 Aanpassing bodemfysische relaties voor effecten van bodemverdichting in MetaSWAP</b>	<b>122</b>
	<b>Bijlage 9 Belemmeringen en kansen voor de toepassing van reststromen als bodemverbeteraar</b>	<b>124</b>
	<b>Bijlage 10 Algemene aspecten van handelingsperspectieven</b>	<b>125</b>

---

# Woord vooraf

Dit rapport is een vervolg op het STOWA-rapport 2015-19 "Goede grond voor een Duurzaam Watersysteem; Verdere verkenningen in de relatie tussen agrarisch bodembeheer, bodemkwaliteit en waterhuishouding." Het is het resultaat van deelstudies naar de gevolgen van enkele aspecten van bodemkwaliteit voor de waterhuishouding van percelen en de nitraatuitspoeling.

Het onderzoek werd gefinancierd door het ministerie van EZ in de vorm van Kennisbasis Onderzoek (KB) in het thema 'Sustainable natural resources' (projectnummer KB-24-002-006) en door Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA). Aan dit onderzoek is door verschillende mensen bijgedragen, waarvoor dank:

- Falentijn Assinck, Gerben Bakker en Willy de Groot (bemonstering en metingen van bodemfysische grootheden in het laboratorium);
- Harry Verstegen en Janjo de Haan van Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (PPO) voor het verstrekken van gegevens ten aanzien gewas, bodem en meststoffengebruik op proefvelden van de Proeflocatie Vredepeel;
- Joop Kroes en Iwan Supit (advies t.a.v. gebruik van de modellen SWAP en WOFOST);
- Martin Mulder voor zijn bijdrage in de vorm van R-scripts voor het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses en het verwerken van modeluitvoer naar extremen per jaar;
- Auke Sietsma (student Hogeschool Van Hall Larestein) en Laurens Gerner (waterschap Rijn en IJssel) voor hun databestanden en resultaten van het onderzoek naar de fysische bodemkwaliteit in het project "Vruchtbare Kringloop".

Het onderzoek is begeleid door:

- Michelle Talsma en Rob Ruijtenberg (STOWA)
- Bas Worm (Waterschap Vechtstromen)
- Marinus van Dijk (Waterschap Vallei en Veluwe)
- Laurens Gerner (Waterschap Rijn en IJssel)
- Frank van der Bolt (Waterschap Aa en Maas)
- Wilbert van Zeventer (DGRW, Min van I&M)
- Jan Huinink (Min van EZ)
- Joachim Rozemeijer (Deltares)
- Marleen Zanen en Nick van Eekeren (Louis Bolk Instituut)

Dit rapport is geschreven voor twee doelgroepen:

1. De informatie in de hoofdstukken "Ten geleide" en "Samenvatting" is bedoeld voor lezers met algemene kennis van de relatie tussen water, bodem en landbouw.
2. De informatie in de andere hoofdstukken is bedoeld voor bodem- en waterspecialisten.

Wageningen, mei 2017

De auteurs





---

# Ten Geleide

**Bodem perspectiefvol voor het waterbeheer. Monitoring noodzakelijk om gebiedspecifieke bijdrage aan het waterbeheer in beeld te brengen.**

**Vanuit het waterbeheer wordt met de nodige interesse gekeken naar de mogelijke bijdrage van goed bodembeheer aan** het behalen van de KRW-doelen, het oplossen van zoetwatertekorten, het tegengaan van wateroverlast en daarmee aan het robuuster maken van het watersysteem. In een eerdere STOWA-studie (STOWA 2015-19) is aangegeven dat in potentie diverse maatregelen, waaronder het verhogen van het organisch stof gehalte, diepere beworteling van gewassen en het stimuleren van het bodemleven, tot een significante verlaging van de piekafvoeren en vermindering van droogtegevoeligheid zou kunnen leiden. De opbrengst voor de waterkwaliteit dat wil zeggen minder uit – en afspoeling van stikstof en nitraat, bleek echter niet eenduidig.

In deze vervolgstudie is gekeken naar de nadere kwantificering van die effecten van beter bodembeheer. Duidelijk is geworden dat de potentie van de bodem groot is, maar dat maatwerk nodig is. Zo is de bijdrage aan extra waterberging bij gronden met name groot bij gronden met een laag organisch stofgehalte (< 2%). De waterkwaliteitseffecten (nitraatuitspoeling) blijven ook in deze studie niet eenduidig.

Door gericht te gaan monitoren, kunnen de effecten van bodemverbetering beter gekwantificeerd worden. Hiervoor is een handreiking gemaakt. Met behulp van de gekwantificeerde gegevens uit de monitoring kan de waterbeheerder een afgewogen keuze maken voor maatregelen die het meest bijdragen aan de doelen van het waterbeheer: minder droogteschade, minder wateroverlast en/of een betere waterkwaliteit.

In een vervolg wil STOWA samen met andere partijen waaronder het ministerie van I&M, EZ, provincies, LTO, terreinbeheerders en kennisinstituten gezamenlijk bepalen wat de te volgen koers kan zijn om het perspectief van de bodem te benutten. Tevens is het belangrijk om in beeld te brengen welke rol de verschillende partijen hierbij kunnen hebben.

Amersfoort, mei 2017  
Directeur STOWA  
Ir. J.J. Buntsma



---

# Samenvatting

## Aanleiding

Agrariërs en waterbeheerder hebben baat bij een goede bodemkwaliteit<sup>1</sup>. In het waterbeleid wordt de bufferende werking van de bodem als een kans gezien voor adaptatie van klimaateffecten.

In een eerdere studie in opdracht van STOWA, 'Goede Grond voor een Duurzaam Watersysteem' (GGDW), zijn praktijkprojecten voor bodemverbetering geïnventariseerd en verkennende modelberekeningen uitgevoerd. De resultaten gaven aan dat als bodemverdichting wordt opgeheven en de bodem verrijkt wordt met organische stof, de waterretentie van de bodem toeneemt en de droogtegevoeligheid en de oppervlakkige afstroming afneemt. Dit leidt tot een lagere beregeningsbehoefte in droge zomers en tot lagere piekafvoeren bij hevige neerslag. Voor de uit- en afspoeling van stikstof en fosfaat waren de effecten niet duidelijk en soms tegenstrijdig.

## Doelstelling

De verkenningen gaven aan dat bodemverbeterende maatregelen in potentie tot een significante verlaging van piekafvoeren en vermindering van droogtegevoeligheid kunnen leiden, maar ook dat een gedegen basis ontbreekt om dit te kwantificeren. Het doel van het onderhavige onderzoek is om antwoord te geven op de vraag: "Hoe kunnen effecten van maatregelen ter verbetering van de bodemkwaliteit op het watersysteem gekwantificeerd worden, welke meetgegevens zijn daarvoor nodig en hoe kunnen de effecten kwantitatief in beeld gebracht worden zodat ze meegewogen kunnen worden in besluitvormingsprocessen?"

## Aanpak via deelstudies

Om deze vraag te kunnen beantwoorden en richting te geven aan vervolgonderzoek, zijn enkele deelstudies uitgevoerd:

### A. *Vruchtbare Kringloop Liemers-Achterhoek*

In 2014-2015 is de bodemconditie<sup>2</sup> bepaald op twaalf graslandpercelen en zijn van een groot aantal bodemmonsters de textuur, dichtheid en waterretentiecurven bepaald. Meer dan de helft van de percelen bleek te kampen met verdichting en ondiepe beworteling. Om het effect daarvan op de waterhuishouding te kunnen kwantificeren, zijn voor de deelstudie op één perceel opnieuw bodemmonsters genomen, waarvan nu ook de doorlatendheidsrelatie is gemeten. Met deze metingen is een model opgezet met SWAP-WOFOST en zijn berekeningen uitgevoerd die inzicht geven in de invloed van bodemverdichting en ondiepe beworteling op de beregeningsbehoefte en de oppervlakkige afstroming naar waterlopen.

### B. *Vergelijking dataset onderzoek bodemverdichting Vlaanderen met de Nederlandse situatie*

In Vlaanderen is in 2014-2016 onderzoek uitgevoerd naar de gevolgen van bodemverdichting op de bodemvochthuishouding. Hierbij is een database opgebouwd met historische en nieuwe metingen van bodemfysische gegevens. In de deelstudie is de database vergeleken met de Nederlandse bodemdata en zijn de modelresultaten bestudeerd. Het SWAP-model is voor een zestal percelen getoetst aan gemeten vochtgehalten op verschillende diepten en vervolgens is op gebiedsniveau het effect van verdichting en ondiepe beworteling op de verdamping en piekafvoeren bij enkele klimaatscenario's voorspeld.

### C. *Effecten langjarige aanvoer van organisch stof*

Aan de hand van bodem- en bemestinggegevens van het proefbedrijf te Vredepeel zijn modelberekeningen uitgevoerd met SWAP-WOFOST. Hieraan is een module toegevoegd die de stikstofleverantie door de bodem aan het gewas simuleert. Met het model is berekend wat de

---

<sup>1</sup> Met het begrip "bodemkwaliteit" wordt het totaal van bodemfysische aspecten (vochthoudend vermogen, doorlatendheid, indringingsweerstand, etc.), bodemchemische aspecten (organische stofgehalte, zuurgraad, fosfaatgehalte, fosfaatbindend vermogen, etc.) en bodem-biologische aspecten (regenwormen, bacteriën, schimmels, etc.) aangeduid.

<sup>2</sup> Aan de hand van de bodemconditiescore <http://www.mijnbodemconditie.nl/>.

---

effecten zijn van de langjarige aanvoer van compost en de teelt van vanggewas op de opbouw van organische stof, de vochtthuishouding, de gewasproductie en de nitraatuitspoeling.

#### D. *Handreiking modellering bodemverbetering*

Omdat nog weinig ervaring is opgedaan om effecten van veranderingen in de bodemconditie te simuleren, is een handreiking opgezet hoe dit gesimuleerd kan worden met SWAP-WOFOST en MetaSWAP.

De kwantitatieve onderbouwing van de effecten vergt langjarig veldonderzoek in combinatie met modelonderzoek<sup>3</sup>. In de deelstudies is verder inzicht verkregen in de meetgegevens die van belang zijn voor het simuleren van effecten van bodemaatregelen.

## Resultaten

### *Hoe te kwantificeren?*

Voor de kwantificering van effecten van maatregelen ter verbetering van de bodemkwaliteit op het watersysteem zijn rekenmodellen nodig voor:

- de interpretatie van meetgegevens en monitoringsresultaten;
- de berekening van effecten van maatregelen op vochtvoorziening, piekafvoeren, uit- en afspoeling en gewasproductie;
- de berekening van effecten van maatregelen bij verschillende klimaatscenario's.

SWAP-WOFOST is een proces-georiënteerd perceelmodel voor de simulatie van waterkwantiteitsprocessen. Om ook nutriënten mee te kunnen nemen, kan ANIMO aan dit model worden gekoppeld. ANIMO wordt binnen het STONE-model toegepast voor ondersteuning van evaluaties van de Meststoffenwet. Voor een adequate kwantificering van oppervlakkige afstroming in het SWAP-WOFOST model dient 1) het model geschikt te zijn om met tijdstappen van 15 minuten te rekenen en 2) een methode uitgewerkt te worden voor de vertaling van veldinformatie naar modelparameters waarmee berging op het maaiveld en maaiveldplassen wordt gesimuleerd.

Om effecten van bodemverbetering zodanig in beeld te brengen dat ze door regionale waterbeheerders meegewogen kunnen worden in besluitvorming, is het nodig om deze op gebiedsniveau te kwantificeren. Voor de opschaling van de kennis op perceelniveau naar stroomgebieden zijn regionale modellen nodig waarin naast ontwatering ook processen in de onverzadigde zone, gewasgroei en de relatie met het oppervlaktewater zijn beschreven. Door hiermee scenario- en onzekerheidsanalyses met variatie van klimaat en bodemeigenschappen uit te voeren, kunnen bandbreedtes van effecten in beeld gebracht worden en kan een uitspraak gedaan worden over de robuustheid van een maatregel. Een dergelijke analyse vergt een goed inzicht in de gevoeligheden van het model en een kwantificering van de onzekerheden van modelinvoer en -parameters. Dit geldt ook voor de alternatieven die in de investeringsbeslissing worden overwogen.

### *Verdampingsreductie<sup>4</sup>*

Voor de bodem in Vruchtbare Kringloop is een langjarige gemiddelde verdampingsreductie als gevolg van bodemverdichting berekend van 13–56 mm jr<sup>-1</sup> voor grasland en 46–55 mm jr<sup>-1</sup> voor snijmaïs, afhankelijk van de diepte van de bewortelbare laag en de dikte van de verdichte laag. De verdampingsreductie als gevolg van bodemverdichting is in de Vlaanderenstudie berekend op 0 tot 6 mm jr<sup>-1</sup> bij het huidige klimaat. Bij een klimaatscenario met natte winters en droge zomers leidt bodemverdichting tot een extra verdampingsreductie van 20–38 mm jr<sup>-1</sup>. Het effect van bodemverdichting is in Vlaanderen kleiner dan in de Vruchtbare Kringloop. Dit wordt verklaard door de kleinere mate van verdichting in Vlaanderen en grotere bewortelingsdiepten. Als de verdichte laag zich op grotere diepte bevindt, is het effect ervan op gewasverdamping beperkt.

---

<sup>3</sup> Vanwege de nieuwe vraagstelling zullen enkele modelconcepten verbeterd moeten worden.

<sup>4</sup> De *verdampingsreductie* is een indicator voor het optreden van een verminderde gewasproductie door droge of natte omstandigheden.

---

### *Oppervlakkige afstroming*

In de modelberekeningen voor Vruchtbare Kringloop is het langjarige gemiddelde effect van bodemverdichting berekend op enkele mm jr<sup>-1</sup> voor grasland en op ca. 10 mm jr<sup>-1</sup> voor snijmaïs. Voor oppervlakkige afstroming die optreedt bij extremere weersituaties is het effect van bodemverdichting berekend op enkele mm jr<sup>-1</sup> voor grasland en op ca. 12 mm jr<sup>-1</sup> voor snijmaïs.

In de Vlaanderenstudie leidt bodemverdichting, berekend met uurwaarden voor de neerslag, tot een toename van de jaarlijkse oppervlakkige afstroming van 5 naar 14 mm. In de klimaatscenario's zijn de gesimuleerde jaarwaarden voor de oppervlakkige afstroming voor zowel de niet-verdichte situatie als de verdichte situatie ongeveer even groot.

Geconcludeerd wordt dat de gesimuleerde oppervlakkige afstroming van het perceel van Vruchtbare Kringloop en in de gebieden van de Vlaanderenstudie in dezelfde orde van grootte ligt als in eerdere modelverkenningen. Opgemerkt wordt dat de methode voor de analyse van effecten op oppervlakkige afstroming nog niet gestandaardiseerd is, en dat dit een zuivere en eenduidige interpretatie van modelresultaten bemoeilijkt.

De studie heeft duidelijk gemaakt dat de standaardwaarden voor de verzadigde doorlatendheid van de toplaag en de ruwheid van het maaiveld<sup>5</sup> tot de relatief lage waarden van de oppervlakkige afstroming leiden. Lagere waarden voor deze parameters leiden tot een hogere berekende waarde voor de oppervlakkige afstroming, echter de vertaling van veldkenmerken naar een inschatting van deze modelparameters ontbreekt nog. Hier is nader onderzoek voor nodig.

### *Effecten van langjarige aanvoer organische stof*

Het verhogen van het organisch stofgehalte door de aanvoer van compost of met andere maatregelen is een langdurig proces. Een verhoging van 1% kan tientallen jaren duren. Voor het schatten van effecten op het waterbergend vermogen is in deze studie alleen gekeken naar het effect van inerte organische stof op de textuur. Een verhoging van het organische stofgehalte is voor het waterbergend vermogen relevant voor zandgronden met een laag organische stofgehalte (circa < 2%). Voor gronden met een hoger initieel organische stofgehalte draagt de toevoeging van inerte organische stof weinig bij aan het waterbergend vermogen.

De extra aanvoer van organische stof kan ook andere effecten hebben, bijvoorbeeld op de structuur en het bodemleven. Dit kan indirecte effecten hebben op het waterbergend vermogen, die mogelijk groter zijn dan het effect van de textuur, maar daar is geen kwantitatieve informatie over.

Voor de maatregel "extra aanvoer van organische stof", waarbij een deel van de dierlijke mest is vervangen door compost, is een 1–7% hogere gewasopbrengst berekend als gevolg van de extra aanvoer van 70 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> stikstof. De extensivering van het teeltplan door de vervanging van aardappelen door een graan, leidt op termijn tot 6–8% lagere droge stofopbrengsten van de andere akkerbouwgewassen binnen de rotatie, omdat minder stikstof werd aangevoerd en geen gebruik werd gemaakt van de mogelijkheid het nagewas te bemesten.

Langetermijneffecten van toevoer van organische stof met compost op de nitraatuitspoeling worden eveneens sterk bepaald door de eventuele extra toevoer van stikstof. Opbouw van organische stof door de teelt van een vanggewas zonder extra mestgift kan tot zowel een toe- als afname van de nitraatconcentratie leiden. Dit wordt bepaald door het effect van het vanggewas op de stikstofopname van het hoofdgewas en de afname van de grondwateraanvulling.

### *Meetgegevens ten behoeve modellering maatregelen*

Afhankelijk van de wateropgave zijn probleemgerichte meetgegevens nodig voor modelstudies. Voor de kwantificering van effecten van bodemverdichting en van maatregelen zijn de volgende bodemfysische gegevens nodig:

- de diepte en dikte van verdichte bodemlagen<sup>6</sup>;

---

<sup>5</sup> In het SWAP-WOFOST model komt de ruwheid tot uitdrukking in een drempelhoogte en een weerstand. Als de waterhoogte boven deze drempel stijgt, treedt oppervlakkige afstroming op.

<sup>6</sup> Af te leiden uit profielkuilen en metingen van de indringingsweerstand.

- 
- de bewortelingsdiepte;
  - de droge bulkdichtheid van deze lagen;
  - de waterretentiecurve en doorlatendheidsrelatie van de bovenste bodemlagen, inclusief de verzadigde doorlatendheid;
  - De ruwheid van het maaiveld.

Voor het ontrafelen van effecten van bodemverdichting en effecten van slemp en structuurbederf binnen het groeiseizoen<sup>7</sup>, is het raadzaam om de toplaag van de bodem (bovenste paar cm) als afzonderlijke laag te onderscheiden.

Als bodemverdichting of ander structuurbederf is geconstateerd, zijn meetgegevens nodig van de waterretentiecurve. Het hangt van de uitgangssituatie af of aanvullende metingen van de doorlatendheidsrelatie meerwaarde hebben. De deelstudie in Vruchtbare Kringloop geeft aan dat metingen van de verzadigde doorlatendheid de bandbreedte van de berekende oppervlakkige afstroming significant verkleinen en metingen van de doorlatendheidsrelatie in het traject droger dan  $pF=2$  de bandbreedte van de transpiratiereductie significant verkleinen. Door de metingen kunnen met grotere zekerheid conclusies getrokken worden.

Als uit veldwaarnemingen blijkt dat duidelijk sprake is van bodemverdichting op geringe diepte, en dat dit leidt tot transpiratiereductie en/of oppervlakkige afstroming, wordt aanbevolen de doorlatendheidsrelatie te meten. In situaties waarin eventuele bodemverdichting niet of dieper in het bodemprofiel aanwezig is, kan worden volstaan met expert judgement of een schatting op basis van de gelijkenis van waterretentiecurven.

Als ook gekeken wordt naar de risico's op uit- en afspoeling van meststoffen is – aanvullend aan de gegevens die nodig zijn voor het kwantificeren van oppervlakkige afstroming – ook informatie nodig over de mineralenbalans van de bodem, teelthandelingen, organische stofgehalten, de fosfaattoestand van de bouwvoor en bindingseigenschappen voor fosfaat van de diepere ondergrond.

Voor toetsing van modelresultaten zijn meetgegevens nodig van vochtgehalten in de onverzadigde zone op meerdere dieptes, de infiltratiecapaciteit en de tijdstippen waarop plassen op het land staan.

#### *Meerwaarde bodemfysische gegevens Vlaanderen*

Toevoeging van de Vlaamse dataset aan de Nederlandse bodemdatabase levert door het relatief grote aantal een waardevolle aanvulling op de Nederlandse database, omdat het de statistische onderbouwing verbetert. Echter, deze metingen betreffen nagenoeg alleen de middenmoot van de range aan bulkdichtheden. In de extremere situaties van verdichting is een aanvulling van de dataset met veldmetingen nodig om effecten van verdichting op de waterhuishouding beter te kunnen kwantificeren.

## Handelingsperspectieven

Uit de synthese van de resultaten van de deelstudies blijkt dat het voor de waterbeheerder handelingsperspectieven biedt om de bijdrage van bodemverbeterende maatregelen aan de wateropgaven verder te onderzoeken.

Voor robuuste<sup>8</sup> effectschattingen zijn metingen nodig van een aantal parameters. Welke parameters verzameld moeten worden, hangt af van de aard van het probleem en de eigenschappen van het gebied. Met de volgende strategie kunnen efficiënt en doelgericht meetgegevens voor kwantificering worden verzameld:

- De eventuele aanwezigheid van bodemverdichting kan worden afgeleid uit een beschrijving van het bodemprofiel, metingen van de indringingsweerstand en de bulkdichtheid.

---

<sup>7</sup> Zie paragraaf 3.4 Resultaten modelstudie Vlaanderen.

<sup>8</sup> Onder robuuste maatregel wordt verstaan dat men er zeker van kan zijn dat uitvoering van de maatregel het verwachte effect oplevert.

- Als de bodem verdicht blijkt te zijn, wordt geadviseerd gebiedsspecifieke metingen uit te voeren van bewortelingsdiepten, waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties.
- Voor zandgronden met een organische stofgehalte lager dan 2%, wordt geadviseerd gebiedsspecifieke metingen uit te voeren van de waterretentiecurven om effecten van een verhoging van het organische stofgehalte te kunnen monitoren.
- Door de aanvoer van extra organische stof wordt extra stikstof aangevoerd, met risico's op de lange termijn voor extra nitraatuitspoeling als gevolg. Om effecten te kunnen voorspellen, is een goede registratie van de aan- en afvoerposten van organische stof en stikstof nodig, alsmede de registratie van de grondwaterstand en eventuele beregeningsgiften. Als buisdrainage aanwezig is, dient ook de waterafvoer uit de buizen gemeten te worden.

## Aanbevelingen

Naar aanleiding van de resultaten van de deelstudie *Vruchtbare Kringloop* wordt het volgende aanbevolen:

- In situaties waarin bodems verdicht zijn en/of vaak plassen op het land blijven staan, de waterretentiecurve, de verzadigde doorlatendheid en de doorlatendheidsrelatie te meten, waarbij de gevoeligheid van  $K_{sat}$  en de doorlatendheid in het natte traject wordt vergeleken met metingen door andere methoden.
- In de selectie van onderzoeklocaties de voorgeschiedenis t.a.v. landgebruik, bemesting en grondbewerking te inventariseren en behalve de kopeinden en het midden van het perceel ook de perceelranden te bemonsteren, omdat de kans voor het aantreffen van een ongestoorde situatie bij een perceelrand groter is.
- Karakteristieken ten aanzien van bodemleven die relevant zijn voor de wateropgaven verder uit te werken.

Naar aanleiding van de deelstudie *dataset bodemverdichting Vlaanderen* wordt aanbevolen:

- De gegevens uit Vlaanderen op te nemen in de Nederlandse database en aanvullend gegevens te verzamelen voor zwaar verdichte gronden in Nederland.
- Te onderzoeken of de drempelwaarden voor bulkdichtheid en verzadigde doorlatendheid als indicatie voor bodemverdichting voldoende zijn afgestemd op de wateropgaven "droogte" en "piekafvoeren". In de huidige beoordeling geldt een drempelwaarde van  $K_{sat}=10 \text{ cm d}^{-1}$ .

De resultaten van de deelstudie *Effecten langjarige aanvoer organische stof* leiden tot de volgende aanbevelingen:

- De mogelijk rol van aanvoer van organische stof breder te bekijken dan alleen voor het effect op textuur en het daarvan afgeleide waterbergend vermogen. De invloed van organische stof op erosie en slempgevoeligheid en structuurvorming zijn in deze studie buiten beschouwing gebleven en mogelijk zijn de effecten van deze factoren voor het watersysteem groter dan van enkel het effect op de textuur.
- Rekening te houden met langetermijneffecten van de verhoging van het organische stofgehalte door de aanvoer van compost en teeltkeuze en de samenhang tussen *aanvoer organische stof – bemesting – nawerking van vanggewas* en *afvoer met gewas* in beschouwing te nemen. Door veranderingen in bodemvoorraden en mineralisatie kan de nitraatconcentratie toenemen.
- Rekening te houden met een mogelijke verandering van de grondwateraanvulling door de teelt van een vanggewas en het effect hiervan op voorspelde nitraatconcentraties.

Aanbevolen wordt om de vuistregels en adviezen verder uit te testen in gebiedsstudies waarbij gericht wordt gemeten om met de modellen de effecten van bodemverbeterende maatregelen nauwkeuriger te kwantificeren. Wanneer de resultaten van een eerste fase van een gebiedsstudie bevestigen dat de maatregelen bijdragen aan het verbeteren van de waterkwaliteit en / of klimaatadaptatie, is het zaak de benodigde meetgegevens systematisch te verzamelen en de modellen gericht te verbeteren.





---

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In tal van projecten stimuleren overheden en waterbeheerders agrariërs om de conditie van hun landbouwbodems te verbeteren. Dit biedt namelijk perspectieven op win-winsituaties, gunstige effecten voor gewasopbrengsten en bedrijfsvoering alsmede gunstige effecten op het watersysteem (waterkwaliteit en -kwantiteit). In die projecten wordt echter geen kennis of monitoring informatie verzameld om de effecten op het watersysteem te kunnen kwantificeren. Kennis over deze effecten is bepalend voor het handelingsperspectief van waterbeheerders om te investeren in verbetering van landbouwbodems. Daarom heeft Vallei & Veluwe in 2013 verkennende berekeningen op perceelniveau uitgevoerd (Van Dijk en Miltenburg, 2013) en is daarop aansluitend het onderzoek "Goede grond voor een duurzaam watersysteem, fase 1", uitgevoerd, verder afgekort als GGDW (Schipper et al. 2015).

In de eerste fase (Schipper et al. 2015) zijn praktijkprojecten voor bodemverbetering geïnventariseerd, adviezen gegeven voor monitoring van bodemparameters en verkennende modelberekeningen voor zandgronden in de Baakse Beek uitgevoerd op perceel- en stroomgebiedniveau. In deze berekeningen zijn worst case, doch niet onrealistische, aannames gedaan voor verandering van de bodemfysische eigenschappen die bepalend zijn voor waterberging en infiltratiesnelheid. De resultaten gaven aan dat als bodemverdichting wordt opgeheven, gewassen dieper wortelen en door een hoger organische stofgehalte de waterretentie van de bodem toeneemt en de droogtegevoeligheid en oppervlakkige afstroming afnemen. Hiermee neemt in droge perioden de beregeningsbehoefte af en treden bij hevige neerslag lagere piekafvoeren op. De resultaten gaven ook aan dat effecten op de uit- en afspoeling van nutriënten moeilijk te voorspellen zijn, maar dat een verhoging van de benutting van meststoffen in het algemeen wel tot een vermindering van de milieubelasting leidt.

## 1.2 Achtergrond

Onderzoek naar effecten van de bodemkwaliteit was in het verleden veelal gericht op de relatie tussen bodemverdichting en gewasopbrengst. Enkele resultaten van veldproeven in de jaren tachtig van de vorige eeuw:

- Alblas et al. (1994) beschreven de effecten van verschillende as-belastingen bij de teelt van snijmaïs op 4 locaties met zandgrond. Afhankelijk van het bodemprofiel en de weersomstandigheden werd een vermindering van de gewasopbrengst van 15% en 4% gemeten bij een as-belasting van resp. 10 en 4 ton. De auteurs schreven dit toe aan verminderde mogelijkheden voor een goede wortelontwikkeling. Geschat werd dat door hoge as-belastingen veroorzaakte bodemverdichting een reductie van 7% van de totale Nederlandse maïsproductie tot gevolg had.
- Arts et al. (1994) beschreven de effecten van verdichting van een initieel losse zandgrond op de grasproductie en de graskwaliteit in 1988 t/m 1992 op het proefbedrijf Oostwaardhoeve van IMAG-DLO. Verdichting van de proefvelden vond plaats met een 2 meter brede stalen rol, gemonteerd in een speciaal belastingframe. In alle jaren werd de hoogste drogestofopbrengst gemeten in het proefveld met een bodembelasting van 4,5 ton en werd bij een stikstofbemesting van 285 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> voor het proefveld met een bodembelasting van 14,5 ton een 12% lagere opbrengst gevonden. De drogestofopbrengst met de losse grond in het onbereiden proefveld was vergelijkbaar met die van het proefveld met een bodembelasting van 14,5 ton.
- Snijders et al. (1994) beschreven de effecten van bodemverdichting op de opbrengst en de stikstofopname van Engels raaigras op een droogtegevoelige zandgrond van het proefbedrijf Cranendonck te Maarheeze. De drogestofopbrengst op de verdichte proefvelden was in de eerste snede van het jaar na inzaai lager. In de jaren daarna was de opbrengst op de belaste proefvelden significant hoger. Er waren sterke aanwijzingen dat een betere vochtvoorziening als gevolg van capillaire opstijging daarbij een belangrijke rol speelde.

---

De resultaten lieten zien dat de effecten van bodemverdichting op gewasproductie meestal gering zijn bij een normale vochtvoorziening, een goede nutriëntenbeschikbaarheid en een niet te ernstige bodemverdichting. Bij losse gronden had enige verdichting een positief effect op de grasproductie (Arts et al. 1994; Snijders et al. 1994). Bij droogtegevoelige gronden had verdichting een lagere productie van snijmaïs tot gevolg (Alblas et al. 1994). De resultaten van deze onderzoeken geven echter geen antwoord op de vraag welk effect bodemverdichting heeft op de gewasproductie bij extremere weersomstandigheden, zoals die te verwachten zijn door klimaatverandering, en bij mestgiften volgens het huidige mestbeleid, die gericht zijn op lagere overschotten. De respons van gewasproductie op de nutriëntenbeschikbaarheid is hierdoor sterker dan vroeger en beperkingen door bodemverdichting kunnen daardoor een groter effect hebben.

Modelverkenningen in het kader van het onderzoek "Goede grond voor een duurzaam watersysteem" (Schipper et al. 2015) bevestigen de veronderstelling dat bodemverbeterende maatregelen kunnen leiden tot een verminderde droogtegevoeligheid, een groter waterbergend vermogen, verminderde risico's op opbrengstreducties door droogte en verminderde nutriëntenverliezen naar grond- en oppervlaktewater. De maatregelen bieden hiermee perspectief voor zowel de agrariër als de waterbeheerder. Tabel 1.1 geeft een overzicht van de effecten van maatregelen zoals deze in de afgelopen vier jaar zijn gerapporteerd.

De resultaten van de in Tabel 1.1 genoemde onderzoeken zijn steeds vanuit verschillende invalshoeken gerapporteerd. Samenvattend:

- De grootste effecten ten aanzien van verdampingsreductie en oppervlakkige afstroming door het opheffen van bodemverdichting treden op voor bodems met een verdichte laag op geringe diepte. Als bodemverdichting zich op grotere diepte voordoet (Vlaanderen), zijn de effecten kleiner.
- In het rapport van Schipper et al. (2015) is de langjarig gemiddelde **verdampingsreductie** als gevolg van bodemverdichting geschat op 19 mm jr<sup>-1</sup> voor grasland op droge gronden en 10–12 mm jr<sup>-1</sup> voor grasland op zandgrond met grondwatertrap III of IV. Voor snijmaïs werd de langjarig gemiddelde verdampingsreductie als gevolg van bodemverdichting berekend op enkele millimeters.
- In een droog jaar neemt de **beregeningsbehoefte** van grasland af met 50–90 mm.
- **Piekafvoeren** kunnen worden geremd door een hogere infiltratiecapaciteit en bergend vermogen van de bovengrond. Modelverkenning 1 liet grote effecten zijn als gevolg van extreme aannamen in de modelinvoer. In modelverkenning 2 bedroeg de 4-uurspiekafvoer in een zomersituatie circa 2 mm bij een herhalingstijd van eenmaal in de 2 jaar en 5 mm bij een herhalingstijd van eenmaal in de 10 jaar. Door bodemverbetering kunnen dergelijke piekafvoeren tot 50% worden gereduceerd. De 24-uurspiekafvoer in een wintersituatie bedroeg 5–10 mm bij een herhalingstijd van 2 jaar en 12–22 mm bij een herhalingstijd van 10 jaar. Bodemverbetering resulteert in een reductie van deze piekafvoeren van 5–15%.
- Onder normale omstandigheden heeft het opheffen van matige bodemverdichting nauwelijks effect op **gewasopbrengsten**, maar voor erg droge jaren is een 17–23% hogere opbrengst van grasland berekend, omdat minder droogteschade optreedt. Voor snijmaïs is een nog iets groter effect berekend. Langjarig gemiddeld werd hierdoor een 3–5% hogere opbrengst van grasland berekend en een 2% hogere opbrengst van snijmaïs.
- In modelverkenning 5 werd een 5–20% lagere **nitraatconcentratie** in het grondwater berekend als gevolg van bodemverbetering in combinatie met andere maatregelen (nagewas) die leiden tot een verbeterde benutting door gewassen. In modelverkenning 2 werd geconstateerd dat enkele bodemprocessen kunnen leiden tot hogere concentraties, terwijl andere processen leiden tot lagere concentraties. Het effect hangt sterk van de situatie en de wijze waarop maatregelen worden genomen.
- **De belasting van het oppervlaktewater** met stikstof kan 5–20% afnemen door bodemverbeterende maatregelen in combinatie met andere maatregelen (modelverkenning 5). Het opheffen van verdichting kan tot iets diepere transportroutes en een verbeterde beluchting van de bodem leiden. Het hangt sterk af van de lokale situatie of bodemverbeterende maatregelen tot een reductie van de uit- en afspoeling naar het oppervlaktewater leiden.

**Tabel 1.1** Resultaten van modelverkenningen naar effecten van bodemverbeterende maatregelen.

Bron <sup>1</sup>	Effect op	Omvang van effect	Opmerking
1	Oppervlakkige afstroming	Grote reductie van oppervlakkige afstroming van zware regenbui (30 mm/d) Extra waterberging van 3 tot 12.5 mm van zware regenbui	Verhoging $K_{sat}$ met factor 3 tot 9 Enkele % groter poriënvolume door hoger org. stofgehalte
	Droogte-gevoeligheid	Aantal dagen met droogtestress in 1984 neemt af 23-30 dagen naar 1-22 dagen, afhankelijk van bodemtype en bewortelingsdiepte	Extreme aanname voor verhoging bewortelingsdiepte van 25/30 naar 50/80 cm
2	Piekafvoer	Ca. 50% reductie van 4-uurspiekafvoeren in de zomer en 5-15% reductie van 24-uurs piekafvoeren in de winter	Aanname bodemfysische relaties o.b.v. beoordeling eigenschappen in database
	Droogte-gevoeligheid	Perceelniveau: afname beregeningsbehoefte 50 mm (veldpodzol) en 60-90 mm (ooivaaggrond) in droog jaar. Stroomgebied: effect kleine landbouw beslaat slechts een deel van het oppervlak	Resultaat afhankelijk van definitie criteria voor optimale vochtvoorziening
	Nutriënten uit- en afspoeling	Minder afspoeling van fosfor en minder uitspoeling van nitraat	Terugkoppelingen tussen processen zijn complex, maken voorspellingen moeilijk en zijn nog onvoldoende in de modelketen ontwikkeld om betrouwbare rekenresultaten te leveren
	Gewasopbrengst	Grasland: 3-5% langjarig gemiddeld hogere opbrengst en 17-23% in droog jaar Snijmaïs: tot 2% langjarig gemiddeld hogere opbrengst en 3-41% in droog jaar	Effecten "bodemverbetering", opheffen verdichting geeft soms andere effecten
3	Uit- en afspoeling fosfor	Afname P-belasting oppervlaktewater groter dan 0.05 kg ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup> op 11% van landbouwgrond. Opheffen verdichting kan tot extra P-belasting leiden in gebieden met hoge P-concentratie dieper in de bodem	Modelverkenning met PLEASE-model. Effect als gevolg van wijziging in verhouding transportroutes
4	Verdamping	Transpiratie 0 - 3% kleiner door bodemverdichting bij ongewijzigd klimaat	Studie naar ernst en omvang van bodemverdichting in Vlaanderen en effecten ervan op de waterhuishouding. Effecten bij klimaatscenario's soms groter
	Grondwateraanvulling	Grondwateraanvulling iets groter bij verdichting (0-2%) door lagere verdamping	
	Oppervlakkige afstroming	Jaartotaal 14 mm bij verdichting en 4 mm zonder verdichting (2008; uurneerslag)	
5	Nitraat grondwater	Vermindering nitraatuitspoeling zandgronden 10-15% voor akkerbouw en 6-21% voor melkveehouderij (gras+snijmaïs)	Scenario bestond uit pakket aan maatregelen, doorgerekend met STONE
	Uit- en afspoeling stikstof	Vermindering stikstofuitspoeling zand- en kleigronden 10-14% voor akkerbouw en 7-26% voor melkveehouderij (gras+snijmaïs)	

<sup>1</sup> [1] Van Dijk en Van Miltenburg, Swart en Broos 2013 [2] Schipper et al. 2015 [3] Van der Salm et al. 2015 [4] Van der Bolt et al. 2016 [5] Groenendijk et al. 2016.

Schattingen van de effecten van bodemverbetering door stimulering van het bodemleven op basis van expert judgement, lopen uiteen van een reductie van de N-belasting van het oppervlaktewater van 1.5 tot 10 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> en een reductie van de P-belasting van het oppervlaktewater van 0 tot 1.5 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (Rozemeijer et al. 2016). Daarbij is aangegeven dat de getallen zijn gebaseerd op de mening van elf respondenten in een enquête, waarvan enkele materiedeskundigen, en daarmee eigenlijk niet onderbouwd zijn.

Over het effect van de langjarige aanvoer van organische stof op gewasopbrengsten, en daarmee indirect op de nutriëntenverliezen en de risico's op uitspoeling, bestaat verschil van inzicht.

- In de publieke opinie bestaat het beeld dat organische stofgehalten dalen in zandgronden met snijmaïs en akkerbouwgewassen. De zorg bestaat dat hiermee de bodemvruchtbaarheid afneemt en dat dit op termijn leidt tot afnemende opbrengsten en hogere nutriëntenverliezen<sup>9</sup>.
- In modelverkenningen is verondersteld dat een verhoging van het organische stofgehalte een duidelijk effect heeft op de waterberging in de bodem (Van Dijk en Van Miltenburg, 2013; Swart en Broos, 2013; Schipper et al. 2015). In welke mate een verhoging van het organische stofgehalte in de praktijk mogelijk is, is onduidelijk.
- In de CLM-studie van De Lijster et al. (2016) wordt verondersteld dat een stijging van het organische stofgehalte van de bodem met 1% in 10 jaar reëel is en dat dit leidt tot een opbrengstverhoging van – in ieder geval – rooigewassen van 10%. Voor granen en grassen veronderstellen De Lijster et al. (2016) een opbrengststijging van 2% als gevolg van de verhoging van het organische stofgehalte.
- Een peer-reviewed artikel van Hijbeek et al. (2017), waarin op basis van gegevens van 20 langetermijnexperimenten in verschillende Europese landen een meta-analyse van de organische stofaanvoer op gewasopbrengsten van akkerbouwgewassen is beschreven, wordt geconcludeerd dat het additionele effect niet significant is. Deze analyse is uitgevoerd door het effect van de organische stof te corrigeren voor het effect van de nutriënten die met de stalmest, compost en gewasresten worden aangevoerd. Voor wortel- en knolgewassen, zomergranen, zandgronden met een laag organische stofgehalte en voor natte klimaatomstandigheden werd als gevolg van organische inputs wel een geringe stijging van de opbrengst gevonden.

Standpunten in de discussies over het effect van organische stof op gewasopbrengsten en nutriëntenverliezen zijn soms ingegeven door een wens van verruiming van mestgebruiksnormen, waarbij vaak het langetermijneffect van de nawerking van langzaam mineraliserende organische stof wordt veronachtzaamd. Het is daarom nodig om verschillende effecten van bodemkwaliteitsverbetering door de aanvoer van organische stof te ontrafelen.

### 1.3 Kennisvragen en doel

De hiervoor beschreven verkenningen geven aan dat bodemverbeterende maatregelen in potentie tot een significante verlaging van piekafvoeren en een vermindering van de droogtegevoeligheid kunnen leiden, maar ook dat een gedegen kwantitatieve basis ontbreekt voor het kwantificeren van effecten van bodemverbetering. Dit leidt tot de hoofdvraag: "Hoe kunnen effecten van maatregelen ter verbetering van de bodemkwaliteit op het watersysteem gekwantificeerd worden, welke meetgegevens zijn daarvoor nodig en hoe kunnen de effecten kwantitatief in beeld gebracht worden zodat ze meegewogen kunnen worden in besluitvormingsprocessen?" Voor de beantwoording van deze vraag is langjarig onderzoek nodig met verschillende veldproeven in combinatie met de verbetering, ijking en toetsing van rekenmodellen. Om richting te kunnen geven aan zulk langjarig onderzoek en het verzamelen van meetgegevens, zijn in de onderhavige studie enkele onderwerpen nader onderzocht. Hierbij zijn de volgende kennisvragen geformuleerd:

1. Welke effecten op de waterkwantiteit worden berekend als gebruik wordt gemaakt van gemeten bodemfysische parameters, in tegenstelling tot resultaten gebaseerd op standaardwaarden? In welke mate leidt dit tot een bijstelling van het inzicht verkregen uit de voorgaande modelverkenningen?
2. Welke bodemfysische parameters moeten goed bekend zijn om effecten van bodemverdichting te kunnen kwantificeren? En zijn metingen van de doorlatendheidsrelatie nodig of kunnen de parameters worden geschat met expert judgement en op basis van gelijkenis van waterretentiecurve?
3. Levert het toevoegen van de Belgische gegevens aan de Nederlandse bodemdatabase een duidelijke meerwaarde voor de kwantificering van de effecten van bodemverdichting?
4. Wat zijn de langetermijneffecten van maatregelen ter verhoging van het organische stofgehalte op de vochtbeschikbaarheid, de gewasopbrengst en de nitraatuitspoeling?
5. Hoe kunnen bodemverbeterende maatregelen worden benaderd in bodemvochtmodellen?

<sup>9</sup> <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2017/02/20/beantwoording-kamervragen-over-mestbeleid/beantwoording-kamervragen-over-mestbeleid.pdf>

- 
6. Welke meetgegevens zijn minimaal nodig om met modellen de vochthuishouding te simuleren en daarbij 1) onderscheid te maken tussen een goede en slechte bodemstructuur en 2) effecten van maatregelen te kunnen kwantificeren?

Doel van het onderzoek is om deze kennisvragen te beantwoorden en hiermee duidelijker aan te kunnen geven wat de handelingsperspectieven zijn voor de waterbeheerder en agrariër om te investeren in de kwaliteit van landbouwbodems. Nevendoelstelling is om handvatten te bieden voor verzameling van meetgegevens en modelonderzoek in regionale onderzoeksprojecten.

## 1.4 Aanpak

De volgende deelstudies zijn uitgevoerd:

- A. *Meting van waterretentiecurven en aansluitend de toepassing van de meetgegevens in het rekenmodel dat is toegepast in het onderzoek voor Vruchtbare Kringloop*

Voor het project Vruchtbare Kringloop waren in 2014-2015 op 12 graslandpercelen een groot aantal bodemmonsters genomen voor de analyse van de textuur, dichtheid, organische stofgehalte en waterretentiecurve. In een studentonderzoek is met deze gegevens een modelstudie met SWAP uitgevoerd, waarbij de doorlatendheidsrelatie werd geschat op basis van expert judgement. Voor de deelstudie A zijn op 1 perceel opnieuw bodemmonsters genomen waarvan zowel de waterretentiecurve als de doorlatendheidsrelatie is gemeten. Om de kennisvragen 1 en 2 te beantwoorden, is een model opgezet met de gegevens van dit perceel. Verder is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd door de parameters binnen de bemeaten bandbreedtes te variëren qua mate van verdichting en bewortelingsdiepte.

- B. *Analyse van de toepasbaarheid van onderzoekresultaten naar bodemverdichting in Vlaanderen en voor de Nederlandse situatie*

In Vlaanderen (België) is in 2014-2016 onderzoek uitgevoerd naar de gevolgen van bodemverdichting op de bodemvochthuishouding. Hierbij is een database opgebouwd met historische en nieuwe metingen van bodemfysische gegevens en zijn modelberekeningen uitgevoerd om de effecten van bodemverdichting op oppervlakkige afstroming en droogte te kwantificeren. Om kennisvraag 3 te beantwoorden, is deze Vlaamse database vergeleken met de Nederlandse gegevens. Ook is voor beantwoording van de kennisvragen 1 en 2 gekeken naar de resultaten van de modellering.

- C. *Modelstudie naar effecten van langjarige aanvoer van organisch stof met SWAP-WOFOST*

Voor het simuleren van de nitraatuitspoeling is gebruikgemaakt van een module voor de stikstofleverantie. Na toetsing op meetgegevens zijn de effecten van langjarige aanvoer van compost en de teelt van vanggewas berekend op de opbouw van organische stof, vochthuishouding, gewasproductie en nitraatuitspoeling.

- D. *Opstellen van een handreiking modellering bodemverbetering*

Het rekenmodel SWAP-WOFOST is in staat om op perceelniveau interacties tussen gewas, bodem en ontwatering ten aanzien van water, organische stof en stikstof in detail te simuleren. Er is nog weinig ervaring om effecten van veranderingen in de bodemconditie te simuleren. Een handreiking voor de parameterisering van SWAP-WOFOST model is opgesteld.

Op basis van de resultaten van deze deelstudies en conclusies van andere onderzoeken zijn de handelingsperspectieven nader gedefinieerd en is een monitoringsstrategie (kennisvraag 6) opgesteld.

## 1.5 Leeswijzer

De resultaten van de deelstudies zijn opgenomen in hoofdstuk 2 (Vruchtbare Kringloop), hoofdstuk 3 (Toepasbaarheid meetgegevens Vlaanderen), hoofdstuk 4 (Langjarige aanvoer organische stof) en hoofdstuk 5 (Handreiking modellering). In hoofdstuk 6 wordt een synthese gegeven van de onderzoeksresultaten. Hierbij wordt ingegaan op de handelingsperspectieven en een strategie voor monitoring. De conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 7.

---

Relevante achtergrondinformatie is opgenomen in de volgende bijlagen:

- Bijlage 1 Bemonstering en bepaling van bodemfysische grootheden (deelstudie A)
- Bijlage 2 Beoordeling fysische bodemkwaliteit voor verdichting (deelstudie A en B)
- Bijlage 3 Meetresultaten en modellering Vruchtbare Kringloop 2015 (deelstudie A)
- Bijlage 4 Rekenregels Assouline (deelstudie D)
- Bijlage 5 Rekenregels PENETR (deelstudie D)
- Bijlage 6 Effect humusgehalte op Mualem-Van Genuchten parameters (deelstudie D)
- Bijlage 7 Gebruiksaanwijzing voor het script R-SWAP-extremes
- Bijlage 8 Aanpassing bodemfysische relaties effecten bodemverdichting in MetaSWAP
- Bijlage 9 Belemmeringen en kansen toepassen reststromen bodemverbetering (deelstudie C)
- Bijlage 10 Algemene beschouwing over handelingsperspectieven voor waterbeheerders en agrariërs

---

## 2 Deelstudie Vruchtbare Kringloop

### 2.1 Overzicht veldwerk en metingen

Tijdens stageonderzoeken voor de Hogeschool VHL (Larenstein) is in de periode 2014–2015 veldwerk verricht om de bodemconditiescore van graslandpercelen te bepalen bij 12 melkveehouderijbedrijven die meedoen met het project Vruchtbare Kringloop Liemers-Achterhoek. De locaties van deze bedrijven liggen verspreid over de zandgronden in de Achterhoek. Het merendeel zijn podzolgronden (matig fijn dekzand). Per bedrijf is op een jong en oud graslandperceel een profielkuil gemaakt van 100x100x50 cm in het perceelsmidden en de kopakker. Bij een aantal locaties is ook een profielkuil gemaakt op een onbereden deel (perceelrand). De studenten hebben op de percelen ook infiltratiemetingen verricht en indringingsweerstand gemeten. De resultaten van de stageonderzoeken zijn samengevat in het rapport "Bodemgezondheid in de Vruchtbare Kringloop" (Sietzema, 2015).

In het onderzoek van Schipper et al. (2015) is het initiatief genomen om bij het maken van de profielkuilen ook ongestoorde bodemonsters te steken ter bepaling van bodemfysische eigenschappen. De bodemonsters, 192 in totaal, zijn door de studenten genomen onder begeleiding van Alterra en in een koeling bewaard bij de WUR. Voor het steken van de ongestoorde grondmonsters zijn Kopecky-ringen gebruikt met een inhoud van 100 cm<sup>3</sup> (hoogte 5 cm, doorsnede 5 cm). Er zijn 4 lagen bemonsterd: 0-10 cm -mv, 10-20 cm -mv, 20-30 cm -mv en 35-45cm -mv. Per laag zijn in het midden van de laag drie monsters (A, B en C) genomen, waarbij de ring op de juiste hoogte in de bodem is gedrukt, voorzichtig is uitgegraven en de boven- en onderkant kant vervolgens vlak is afgesneden.

Van alle 192 bodemonsters zijn in opdracht van STOWA het gloeiverlies, het actuele vochtgehalte en de bulkdichtheid bepaald in het bodemlaboratorium van de WUR. Het gloeiverlies is een gangbare maat voor het organische stofgehalte. Van 48 bodemonsters is ook de textuur bepaald en van 24 monsters is de waterretentiecurve bepaald. De gehanteerde methodes van deze bepalingen worden toegelicht in Bijlage 1. De beoordeling voor bodemverdichting wordt toegelicht in Bijlage 2.

De metingen hebben informatie opgeleverd over de toestand van de bodems op het perceelsmidden, de kopakker en enkele perceelranden met betrekking tot de infiltratiecapaciteit, de indringingsweerstand, de textuur, de bulkdichtheid, het organische stofgehalte en de waterretentiecurve. De resultaten hiervan zijn opgenomen in Bijlage 3.

Samengevat wordt uit het veldwerk en de metingen geconcludeerd dat iets meer dan de helft van de podzolen kampt met ondergrondverdichting. De kopakkers zijn duidelijk meer verdicht van het midden van de percelen. De bodemconditiescore op de kopakkers is daarbij overwegend onvoldoende en op het perceelsmidden overwegend matig. Het verschil in de mate van verdichting tussen de kopakker en het perceelsmidden is het grootst op perceel 10. Dit perceel is daarom gekozen voor nadere bemonstering (paragraaf 2.2).

### 2.2 Aanvullende bepalingen bodemfysische parameters

Op te onderzoeken of de gemeten doorlatendheidsrelaties essentieel zijn voor de schatting van effecten van bodemverdichting zijn extra bodemonsters genomen op het perceel van bedrijf 10. De resultaten van de dichtheid, textuur en de parameters voor de bodemfysische relaties zijn weergegeven in Tabel 2.1. De gemeten waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties zijn grafisch weergegeven in Figuur 2.1. Uit Figuur 2.1 is af te lezen dat de doorlatendheid van de kopakker groter is dan die van het perceelsmidden. De gemiddelde doorlatendheidsrelatie van de ondergrond is gebruikt in de modellering van paragraaf 2.3.

**Tabel 2.1** Gemeten waarden bodemonsters perceel 10 van de volumieke massa, lutum, organische stof en verzadigde doorlatendheden (Ksat) en op metingen gefitte waarden van Mualem-VanGenuchten-parameters om de waterretentie- en doorlatendheidsrelaties te beschrijven.

Locatie	Bodemplagen		Vol.massa (kg m <sup>-3</sup> )	Gehalten (%) <sup>1</sup>		Ksat <sup>2</sup> (cm d <sup>-1</sup> )	Mualem-VanGenuchten-parameters					
	naam	diepte (cm)		lutum	org. stof		RES	OSAT	ALFA	NPAR	KFIT	LEXP
Kop-akker	bovenlaag	5-15	1358	2,4	4,34	<u>21,9</u>	0,149	0,461	0,0125	2,149	9,5	0,795
	middenlaag	35-45	1720	0,9	0,95	<u>54,4</u>	0,042	0,310	0,0143	2,563	20,2	0,534
	middenlaag	35-45				36,9						
	ondergrond	60-70	1776	0,6	0,67	45,1	0,022	0,280	0,0108	2,988	14,9	0,598
Perceelsmidden	middenlaag	35-45	1360	2,8	4,58	<u>106,0</u>	0,031	0,448	0,0215	1,226	58,6	4,731
	middenlaag	35-45				24,9						
	ondergrond	60-70	1756	1,2	1,22	-	0,066	0,324	0,0078	3,337	6,9	0,445
Onbewerkt	middenlaag	33-43	1667	1,4	1,07	<u>416,2</u>	0,038	0,326	0,0141	3,768	6,8	0,086
	middenlaag	33-43				<u>167,4</u>						

<sup>1</sup> massa-%: lutum van minerale delen

ORES = residueel volum. vochtgehalte (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)

NPAR= vormfactor n (-)

org stof van droge stof

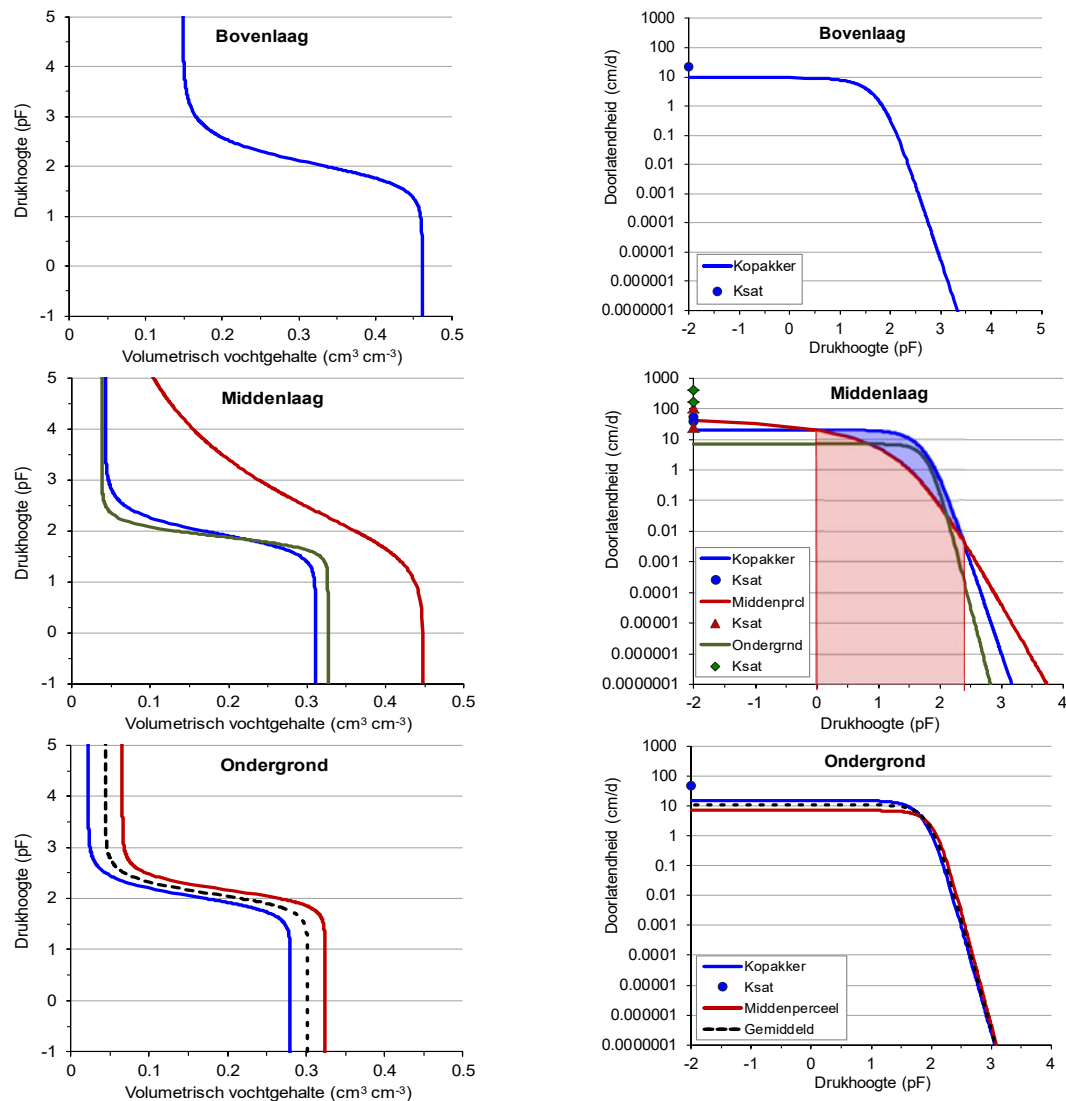
OSAT = verzadigd volumetrisch vochtgehalte (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)

KFIT = verzadigde doorlatendheid (cm d<sup>-1</sup>)

<sup>2</sup> onderstreept: (veel) wormgaten

ALFA = vormfactor a (cm<sup>-1</sup>)

LEXP= exp. doorlatendheidsfunct. (-)



**Figuur 2.1** Waterretentiecurven (links) en doorlatendheidsrelaties (rechts) van de drie lagen van de drie monsterlocaties kopakker, perceelsmidden en onbewerkt van bedrijf 10, gebaseerd op de waarden van Tabel 2.2. Het rode vlak bij de doorlatendheidsrelatie van de middenlaag markeert het drukhoogtebereik van -1 tot -250 cm (pF 0-2.4).



---

## 2.3 Modelling met gemeten waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties

Aanvullend op de in Bijlage 3 beschreven modelberekeningen van Sietzema (2015) is een modellering uitgevoerd met de metingen van bedrijf 10 die in de voorgaande paragraaf zijn behandeld. De meerwaarde van deze modellering ten opzichte van de modelberekeningen van Sietzema (2015) is dat voor de modelinput naast de waterretentiecurve nu ook beschikt kon worden over de bijbehorende gemeten doorlatendheidsrelatie. Met de gemeten bodemfysische eigenschappen zijn bodemprofielen geschematiseerd die bestaan uit de drie kenmerkende lagen die in het verdichtingsonderzoek – zowel veld- als modelonderzoek – meestal worden onderscheiden:

1. De bovenlaag: dit is de wortelzone en eventueel de geploegde laag. Deze laag kan door landbouwkundig gebruik worden verdicht, maar heeft een groot herstelvermogen door de beworteling, een (relatief) groot organische stofgehalte, het daarmee samenhangende bodemleven en eventueel vorstwerking. Ook bodembewerking kan verdichting van deze laag opheffen. De dikte varieert meestal; in dit modelonderzoek tussen 15 en 45 cm.
2. De middenlaag: dit is de laag die door berijden en landbouwkundige bewerkingen kan worden verdicht, dan vaak aangeduid met 'ploegzool'. Meestal heeft deze laag een dikte van ca. 30 cm; in dit modelonderzoek is de dikte gevarieerde tussen 10 en 30 cm.
3. De onderlaag: de laag onder de middenlaag die te diep ligt om te kunnen worden verdicht. De dikte hiervan is in de modelbenadering afhankelijk van de dikte van de twee bovenliggende lagen en de onderbegrenzing, die in het modelonderzoek op een ruime diepte van 600 cm beneden maaiveld is gelegd.

### Modelkolommen

Voor de SWAP-berekeningen zijn in totaal 72 bodemkolommen gemodelleerd: 18 combinaties van verschillende eigenschappen van de drie modellagen, elk doorgerekend voor twee landbouwgewassen, gras en snijmaïs, in combinatie met twee varianten, groot en klein, van waterberging op het maaiveld. Gras en snijmaïs zijn gekozen vanwege hun sterk verschillende waterbehoefte in het jaar en hun daarmee samenhangende bewortelingsdiepte. Gras heeft door het langere groeiseizoen (nagenoeg een jaar) een grotere waterbehoefte dan snijmaïs, dat een groeiseizoen heeft van hooguit een halfjaar. Daarnaast is de bewortelingsdiepte van gras enkele decimeters, terwijl snijmaïs dieper kan wortelen, tot ruim 1 meter diep als een diepe grondwaterstand dat vereist en de bodem dat toestaat.

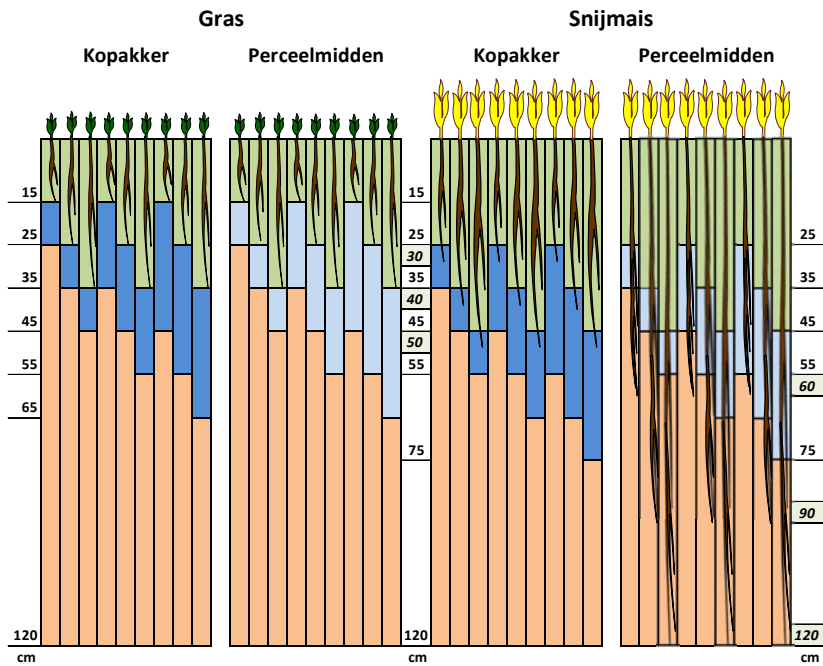
De verschillende combinaties zijn samengesteld op basis van bodemfysische eigenschappen en laagdikten. Voor de doorlatendheidsrelatie zijn alleen van de middenlaag twee varianten doorgerekend: die van de bemonsteringslocaties 'kopakker' en 'perceelsmidden'<sup>10</sup>. De dikte van de middenlaag is bij beide gewassen op 10, 20 en 30 cm verondersteld. De dikte van de bovenlaag verschilt per gewas. Voor gras is deze dikte op 15, 25 en 35 cm gesteld en voor snijmaïs is deze dikte op 25, 35 en 45 cm verondersteld. De dikte van de onderlaag is een resultante van de som van de dikten van de twee bovenliggende lagen.

De bewortelingsdiepte hangt niet alleen af van het gewas, maar ook van de dikte van de bovenlaag in combinatie met de dichtheid en de dikte van de middenlaag (Tabel 2.1). Bij een grotere dichtheid in combinatie met een grotere dikte wortelt het gewas minder diep. De diepten van de beworteling zijn bij gras gelijk gehouden aan de dikte van de bovenlaag. Bij snijmaïs is de aangehouden beworteling op de kopakker 5 cm dieper dan de bovenlaagdikten en op het perceelsmidden respectievelijk 60, 90 en 120 cm. Dit zijn bewortelingsdiepten die kunnen voorkomen bij een geringe dichtheid van de middenlaag, afhankelijk van de dichtheid van de onderlaag. De dichtheid van de middenlaag van de kopakker is veel groter dan die van het perceelsmidden: 1750 tegen 1360 kg m<sup>-3</sup> (Figuur A3.8 in Bijlage 3).

Figuur 2.2 toont de 36 combinaties van eigenschappen van bodemprofiellagen en gewassen in de verschillende SWAP-modellen. De twee varianten met verschillende parameters voor waterberging op het maaiveld zijn niet weergegeven. Het totaal aantal doorgerekende combinaties bedraagt daarmee de 36 weergegeven modelkolommen maal 2.

---

<sup>10</sup> Die van locatie 'onbewerkt' is niet meegenomen vanwege de kwaliteit van het monster.



**Figuur 2.2** Schematische voorstelling van de 36 doorgerekende modelkolommen als 9 combinaties van laagdikten van de 3 bodemlagen (onder-, midden- en bovenlaag) en bewortelingsdiepten, voor 2 bemonsteringslocaties – de kopakker en het perceelsmidden – en voor de 2 beschouwde gewassen gras en snijmaïs. De bewortelingsdiepte van snijmaïs is cursief aangegeven in groene rechthoekjes links en rechts van de snijmaïskolommen.

In het SWAP-model is de bovenste meter onderverdeeld in 1 cm dikke rekenlaagjes, de tweede meter in 2 cm dikke laagjes, de derde in 5 cm dikke laagjes en de diepste drie meter, die permanent verzadigd is, in laagjes van 100 cm dikte. De maximale grootte rekestap was 1 uur, de minimale tijdstapgrootte  $10^{-7}$  dag. Voor de parametrisering van bodemfysische eigenschappen is gemeten verzadigde doorlatendheid gebruikt. Voor de bovenlaag zijn de beschikbare meetwaarden van een bovenlaagmonster, die van de kopakker, gebruikt. Voor de onderlaag zijn de waarden van de twee beschikbare monsters, die van de kopakker en van het perceelsmidden, gemiddeld.

### Randvoorwaarden

Aan de bovenrand is neerslag de drijvende kracht van het hydrologische bodemsysteem. Interceptie van neerslagwater door de vegetatie en het verdampen van dit water, bodemverdamping en transpiratie door het gewas, zijn voor de bodem verliestermen naar de atmosfeer. Voor de berekening hiervan zijn meteorologische gegevens van KNMI-weerstations genomen die het dichtst bij de bemonsteringslocaties liggen. Een correcte berekening van de effecten van bodemverdichting op piekafvoeren door oppervlakkige afstroming vereist neerslaggegevens op tijdbasis van maximaal één uur. Gegevens van KNMI-neerslagstations vallen daarmee af.

Vanaf 1993 is Hupsel het dichtst bij de meetlocaties gelegen weerstation; vanaf 1981 is dat Eelde. De rekenperiode bedroeg 30 jaar en liep van 1981 tot en met 2010. Deze periode wordt gezien als de representatie van het huidige weer in Nederland. De weergegevens van deze twee stations zijn respectievelijk genomen vanaf de genoemde jaren. Voor de neerslag is de optie gebruikt om neerslagbuien in te voeren. De buien zijn verkregen door de neerslagsom  $P_u$  (mm) en -duur  $D_u$  (dag) op uurbasis om te zetten in een bui die begint aan het begin van het uur en een intensiteit heeft van  $P_u / D_u$  mm per dag. De verdamping is berekend met de SWAP-optie 'Penman-Monteith' op dagbasis.

De transpiratie wordt in sterke mate bepaald door de mogelijkheid om water aan de bodem te onttrekken door de wortels. Daarbij speelt de bewortelingsdiepte een grote rol. Deze wordt weer bepaald door de dichtheid van de verschillende bodemlagen. In de modelberekeningen zijn dat de varianten van de bewortelingsdiepte. Een daarmee samenhangend proces is het vermogen tot 'capillaire nalevering' van de bodemlagen, die vaak groter is bij (enigszins) verdichte bodems, omdat

---

de kleinere poriën beter als capillairen functioneren om grondwater van diepere lagen tegen de zwaartekracht in naar de planten wortels te 'zuigen' dan de grote poriën in onverdichte zandbodems. Dit proces zou deels kunnen compenseren voor achtergebleven beworteling door een verdichte laag.

Een bijzonder proces aan de bovenrand is de vorming van plassen aan en de afstroming over het maaiveld naar afwateringssystemen als de regen te hevig is om direct in de bodem te kunnen infiltreren. In werkelijkheid bepalen microtopografie (o.a. door teeltsysteem), begroeiing en vooral ook helling deze verhouding. In SWAP wordt de verhouding bepaald door twee parameters: de drempel voor afstroming (de gemiddelde diepte van plassen voor afstroming begint) en de weerstand tegen afstroming van het maaiveld. De combinatie van drempelhoogte en weerstand wordt in het vervolg van dit rapport vaak aangeduid met "ruwheid van het maaiveld". In de berekeningen zijn twee varianten meegenomen: grote en kleine berging. De eerste is gemodelleerd met een drempel van 5 mm en een weerstand van 1 dag, de tweede met een drempel van 2 mm en een weerstand van 0,25 dagen.

De onder- en zijrand fungeren in het gemodelleerde systeem van het bemonsterde perceel samen om het overtollige neerslagwater af te voeren naar het regionale en lokale afvoersysteem. Het perceel heeft grondwatertrap (Gt) VII, dat betekent een gemiddelde hoogste (GHG) en laagste (GLG) grondwaterstand van meer dan 80 cm respectievelijk 120 cm beneden maaiveld. De onder- en zijrand zijn zo ingeregeld dat SWAP over de simulatieperiode een Gt VII voor het perceel berekent. Voor de zijrand zijn twee ontwateringsystemen gemodelleerd (perceelsloot en afwateringsloot) met drainageweerstanden van 400 en 1200 dagen, drainagebases van 120 en 150 cm beneden maaiveld en slootafstanden van 224 m en 415 m (afgelezen van kaart van Google Earth). De onderrand is beschreven door een gemengde randvoorwaarde. De stijghoogte van het diepere grondwater bedraagt gemiddeld 120 cm -mv met een amplitude van 20 cm en de weerstand tegen verticale stroming 1200 dagen.

### **Doelgrootheden**

De doelgrootheden zijn de grootheden van het gemodelleerde systeem waarvan we willen weten hoe ze reageren op de varianten van de modelinvoer. In het modelonderzoek is gekozen voor de doelgrootheden natschade en droogteschade van het gewas, uitgedrukt in mm transpiratiereductie per jaar, en het voorkomen van afvoerpieken, uitgedrukt in de jaarlijkse oppervlakteafvoer in mm en de herhalingsstijd van jaarlijkse piekafvoeren (drainage plus oppervlakteafvoer) in jaren.

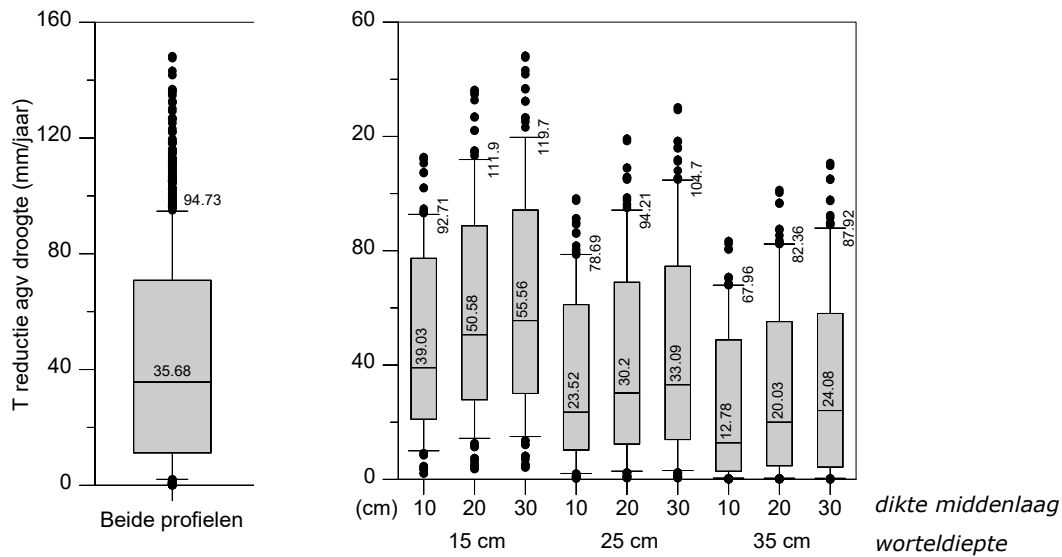
### **Resultaten gras**

Van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor gras worden eerst de effecten van de modelvarianten op de droogtestress beschreven en vervolgens de effecten op de oppervlakteafstroming en piekafvoeren. De natschade wordt niet besproken, omdat deze droge bodems met Gt VII geen natschade van betekenis laten zien en daarom ook geen variatie daarin van de modelvarianten.

#### *Droogteschade gras*

Figuur 2.3 toont de berekende transpiratiereductie als gevolg van droogtestress in relatie tot de modelvarianten. De mediaan van alle modelresultaten bedroeg 35,7 mm jr<sup>-1</sup>, met een maximum van ongeveer 150 mm jr<sup>-1</sup> (Figuur 2.3 links). De spreiding was zeer groot, wat is toe te schrijven aan de grote variatie van het weer. De reductie was voor de kopakker bijna de helft lager dan voor het midden van het perceel. De reductie bleek ook afhankelijk van zowel de diepte van de bovenlaag als van de dikte van de middenlaag (Figuur 2.3 rechts): hoe groter de bewortelde diepte, hoe kleiner de transpiratiereductie, en hoe dikker de tweede laag, hoe groter de reductie.

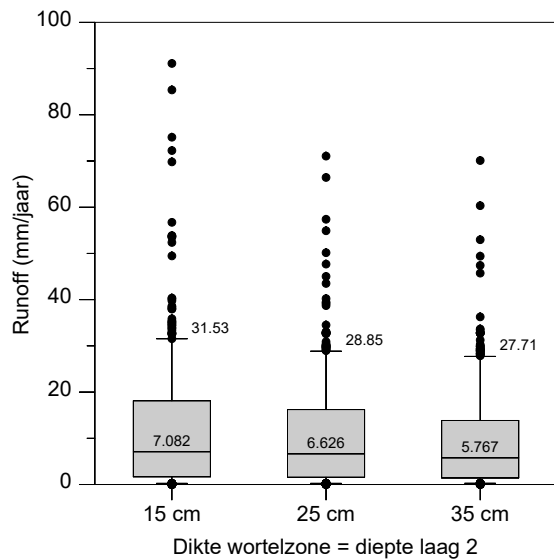
De grotere reductie bij het perceelsmidden kan het gevolg zijn van de veel grotere verzadigde doorlatendheid van de middenlaag van dit perceel in vergelijking met de kopakker. Hierdoor kan minder water worden vastgehouden in de bewortelde bovenlaag, vooral bij kleine worteldiepten. In droge tijden kan de oorzaak zijn dat de middenlaag van de kopakker met een grotere dichtheid een betere capillaire nalevering van water vanuit de ondergrond kan verzorgen dan de middenlaag van het perceelsmidden. Een aanwijzing hiervoor is de kleinere Lambda-waarde van de middenlaag van de kopakker dan die van de middenlaag van het perceelsmidden. Een lagere waarde geeft een vlakkere doorlatendheidscurve in het droge traject en daardoor een betere capillaire geleiding onder droge omstandigheden, die veelvuldig voorkomen in deze bodem met diepe grondwaterstanden.



**Figuur 2.3** Boxplots van de berekende transpiratiereductie door droogte bij gras. Links zijn de resultaten van alle varianten samengevat en rechts zijn de resultaten per dikte van de middenlaag en per veronderstelde worteldiepte weergegeven. De lijn in het midden van de grijze box is de mediaan, de ondergrens en bovengrens van de box zijn het 25<sup>ste</sup> en 75<sup>ste</sup> percentiel en de verticale lijnen onder en boven de grijze box geven de 10- en 90-percentielwaarde weer. De punten zijn de extremen.

#### Oppervlakkige afstroming gras

De relevante modelresultaten voor de oppervlakteafstroming zijn weergegeven in Figuur 2.4.



**Figuur 2.4** Boxplots van de berekende oppervlakkige afstroming bij gras, weergegeven voor de modelvarianten van de dikte van de bovenlaag (laag 2 = de middenlaag).

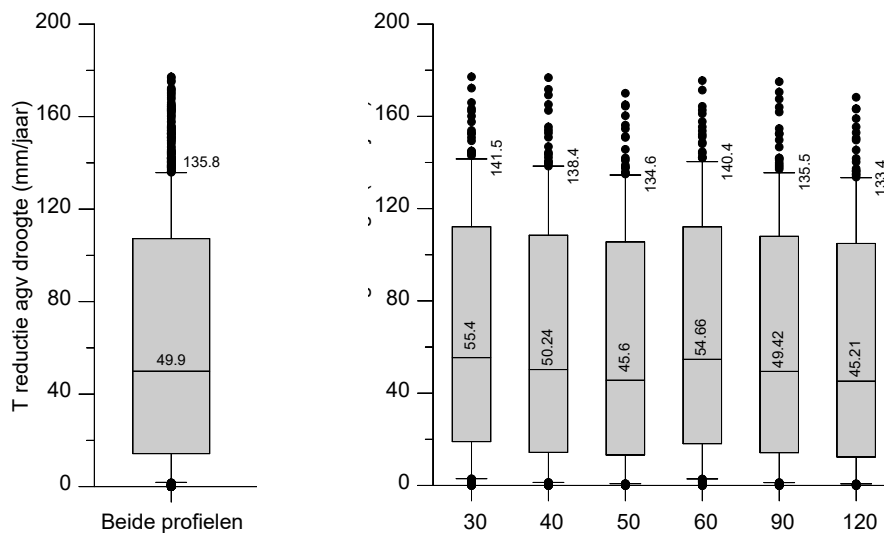
Ook bij de oppervlakteafstroming was de spreiding groot als gevolg van de grote verschillen in het weer. Maar ook door de twee varianten van waterberging op het maaiveld. Er waren geen overduidelijke effecten te zien van variatie in bodemprofiel of dikte van laag 2. In Figuur 2.6 is daarom alleen het hoofdeffect getoond van de dikte van de wortelzone (tevens gelijk aan de diepte waarop laag 2 begint). Er is een geringe trend van minder oppervlakkige afstroming naarmate de worteldiepte toeneemt. Bij de kopakker is de potentiële waterberging in de bovenste laag groter dan in de middenlaag; een dikkere bovenlaag betekent dus meer mogelijkheid tot waterberging. Voor het perceelsmidden geldt dat niet. Het is daarom niet duidelijk waarom er weinig verschil is tussen kopakker en perceelsmidden.

## Resultaten snijmaïs

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse voor snijmaïs zijn deels gelijk aan die van gras en deels verschillend. Voor snijmaïs worden ook eerst de effecten van de modelvarianten op de droogtestress beschreven en vervolgens de effecten op de oppervlakteafstroming en piekafvoeren. Vooral ook bij maïs met zijn grotere bewortelingsdiepte komt natschade van betekenis niet voor op deze droge bodems met Gt VII.

### Droogteschade snijmaïs

Figuur 2.5 toont de berekende transpiratiereductie als gevolg van droogtestress bij snijmaïs in relatie tot de modelvarianten. De droogteschade was met een mediaan van alle modelresultaten van 35,7 mm per jaar groter dan bij gras, ondanks de diepere beworteling van snijmaïs (Figuur 2.5 links).



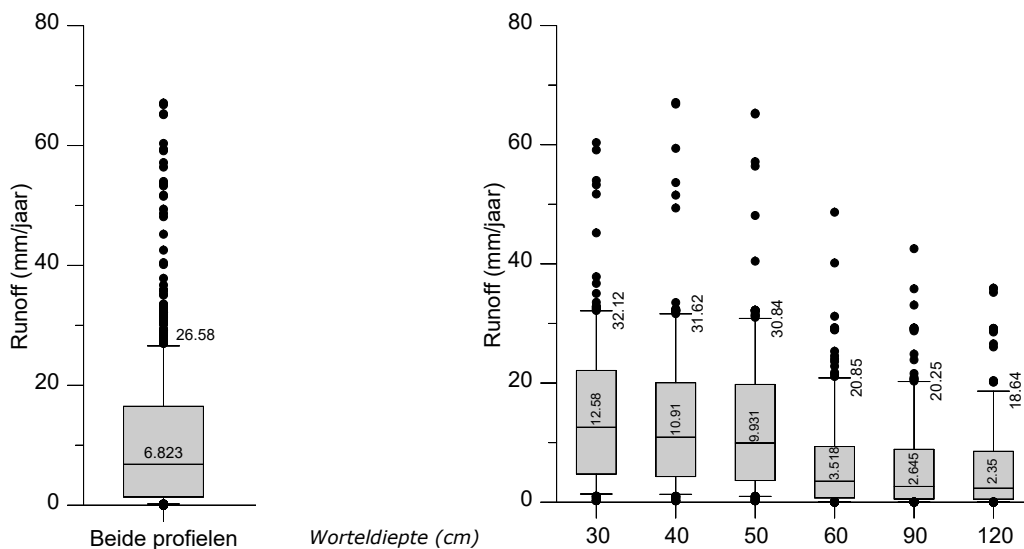
**Figuur 2.5** Boxplots van de berekende transpiratiereductie door droogte bij snijmaïs. Links zijn de resultaten van alle varianten samengevat en rechts zijn de resultaten per veronderstelde worteldiepte weergegeven.

Ook de uitschieters bleken groter dan die bij gras, met een maximum van bij 180 mm jr<sup>-1</sup>. Reden kan zijn dat het groeiseizoen van snijmaïs voornamelijk in de droge periode valt en daarom niet wordt gecompenseerd voor een deel van het groeiseizoen in het natte seizoen, zoals bij gras. Opvallend is dat de transpiratiereductie bij het perceelsmidden ongeveer in de orde van grootte lag van de vergelijkbare reductie bij gras, maar dat de reductie bij de kopakker van snijmaïs veel groter was dan bij gras en slechts weinig kleiner dan bij het perceelsmidden. De berekende transpiratiereductie is onafhankelijk van de dikte van de middenlaag. Het effect van de bewortelingsdiepte is gering, diepere beworteling gaf een iets geringere transpiratiereductie.

### Oppervlakkige afstroming snijmaïs

Figuur 2.6 toont de relevante modelresultaten voor de oppervlakteafstroming. Net als bij de droogtestress en de oppervlakteafstroming van gras, was de spreiding groot als gevolg van de grote verschillen in het weer en de twee varianten in waterberging aan maaiveld. Wel lagen de extremen fors lager dan bij gras (ca. 20 mm jr<sup>-1</sup>). Voor de medianen gold dat nauwelijks. De verschillen tussen de twee locaties waren klein.

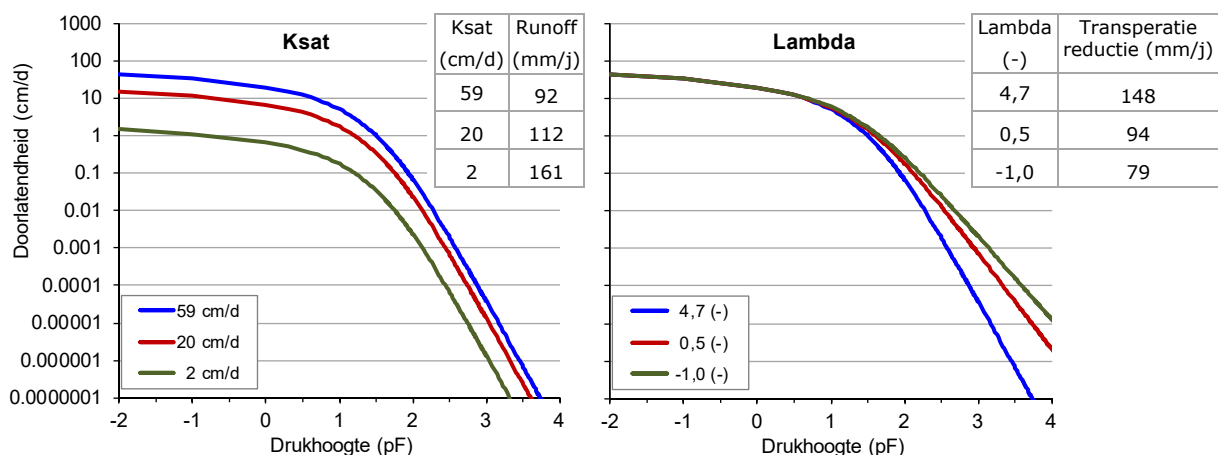
De effecten van de bewortelingsdiepte op de oppervlakteafvoer waren groter (Figuur 2.8 rechts). Bij beworteling alleen in de bovenlaag (en tot 5 cm in de middenlaag) werd meer oppervlakkige afstroming gesimuleerd dan bij beworteling tot onder de middenlaag. De effecten van de dikte van de middenlaag waren minimaal.



**Figuur 2.6** Boxplots van de berekende oppervlakteafstroming bij snijmaïs voor de twee locaties kopakker (profiel 1) en perceelsmidden (profiel 2). Links zijn de resultaten van de modelvarianten met verschillende worteldiepten samengevat en rechts zijn de resultaten per worteldiepte weergegeven.

## 2.4 Meerwaarde gemeten doorlatendheidsrelaties

Vanuit gemeten waterretentiecurven kunnen de Mualem-Van Genuchten-parameters worden afgeleid. Hiermee zijn twee van de vier parameters voor de doorlatendheidsrelatie vastgelegd. Daarnaast dienen de parameters lambda en de verzadigde doorlatendheid nog bepaald te worden. Uit de metingen van het perceel op bedrijf 10 blijkt dat hierin een grote variatie zit. Modelmatig zijn enkele berekeningen uitgevoerd voor het perceel waar zowel de vocht- als de doorlatendheidsrelaties zijn gemeten. Hierbij zijn doorlatendheidsrelaties ingevoerd bij aannames voor Lambda en Ksat voor de situatie als de doorlatendheidsrelatie niet gemeten zou zijn. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 2.7.



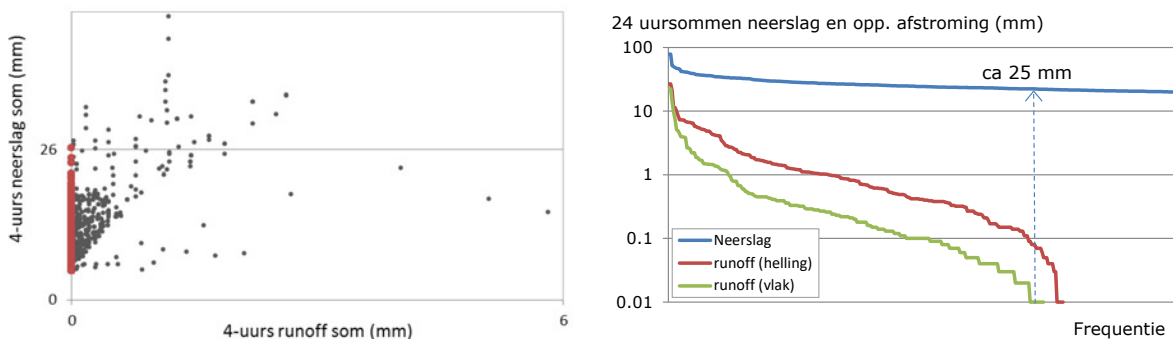
**Figuur 2.7** Effect van een alternatieve keuze van parameters van de doorlatendheidsrelaties op basis van aanvullende metingen op de oppervlakkige afstroming (bij alternatieve Ksat) en op de transpiratiereductie (bij alternatieve Lambda).

Uit de resultaat tabellen in Figuur 2.7 blijkt dat de onzekere aannames voor Lambda en Ksat tot een duidelijke variatie in de doorlatendheidsrelatie leiden en dat deze variaties sterk doorwerken in de berekende oppervlakkige afstroming en de verdampingsreductie in droge periodes (droogtestress).

## 2.5 Kritische neerslaghoeveelheid voor het optreden van oppervlakkige afstroming

De modelresultaten laten zien, evenals de studie van Schipper et al. (2015), dat bodemverbetering ertoe leidt dat tijdens hevige neerslag water sneller infiltreert en de infiltratiecapaciteit groter is, waardoor piekafvoeren minder vaak voorkomen en ze geringer zijn van omvang. Echter, bij hoge neerslagintensiteiten of grote neerslaghoeveelheden kan ook de gunstigste bodem de neerslag niet verwerken. De kwantificering van de kritische neerslaghoeveelheid die nog kan infiltreren zonder dat oppervlakkige afstroming optreedt, is niet rechttoe rechtaan. De voorgeschiedenis speelt mee. Bij kleinere neerslaghoeveelheden kan oppervlakkige afstroming optreden als voorafgaand aan deze gebeurtenis grote regenbuien zijn gevallen.

Om een indicatie te krijgen van de neerslag die geborgen kan worden door een goed doorlatende bodem, is een analyse uitgevoerd van de rekenresultaten voor veldpodzolgrond met grasland zonder verdichtingsverschijnselen. Uit deze resultaten (1981 t/m 2003) zijn de 4-uurs neerslagsommen geselecteerd die groter zijn dan 5 mm.



**Figuur 2.8a** Relatie tussen de 4-uurs neerslagsommen en bijbehorende berekende oppervlakkige afstroming (run-off) van een veldpodzolgrond met gras zonder verdichting.

**Figuur 2.8b** Deel van de cumulatieve frequentieverdeling van de 24 uursneerslagsommen en de oppervlakkige afstroming voor dit bodemprofiel.

Figuur 2.8a toont de relatie tussen de 4 uursneerslagsommen en de berekende oppervlakkige afstroming (piekafvoeren). De figuur laat zien dat ook bij lagere neerslaghoeveelheden oppervlakkige afstroming kan optreden, maar dat bij een 4 uursneerslagwaarde van 26 mm altijd oppervlakkige afstroming optreedt. In Figuur 2.8b is een deel van de cumulatieve frequentieverdeling van de 24 uursommen van de neerslag en van de oppervlakkige afstroming weergegeven. Dit is gedaan voor twee varianten van de modelberekeningen: 1) van een vlak perceel en 2) van een perceel onder geringe helling. In deze figuur is te zien dat de frequentiewaarde waar de oppervlakkige afstroming nagenoeg nul is, correspondeert met een neerslagwaarde van ca. 25 mm.

Uit beide figuren kan worden afgeleid dat de kritische neerslagsom waarbij geen oppervlakkige afstroming hoeft op te treden, 25–30 mm bedraagt. Afhankelijk van de voorgeschiedenis kan bij lagere waarden van de neerslagsom wel oppervlakkige afstroming optreden.

## 2.6 Conclusies

Uit het veldwerk en de metingen in het bodemlaboratorium kan geconcludeerd worden dat ruim de helft van de podzolgronden aantoonbaar verdicht is, met name ondergrondverdichting. Voor de modelleringen die voor de bodemprofielen zijn uitgevoerd en waarbij de bodemconditiescore, de textuur, dichtheid, organisch stofgehalte en waterretentie zijn bepaald, konden belangrijke invoerparameters die bepalend zijn voor het effect op de waterhuishouding worden gebaseerd op

---

meetwaarden. Dit is een belangrijk verschil met de studie van Schipper et al. (2015), omdat daar geen bodemdata voor handen waren die een directe link leggen tussen bodemverdichting, diepte worteling en waterretentiecurve.

De modelresultaten wijzen in dezelfde richting als de verkennende modelberekeningen van Schipper et al. (2015). Verslechtering van de bodemconditie, en met name verdichting en beperkte worteling, geven significant grotere afvoerpieken naar de sloot door oppervlakkige afstroming, kunnen minder water in de onverzadigde zone bergen en geven meer droogtestress. Hoewel de modellering dus meer dan in de studie van Schipper et al. (2015) is gebaseerd op gemeten bodemfysische waarden, geldt wel de kanttekening dat waar alleen de waterretentiecurve is gemeten en niet de doorlatendheidsrelatie, dit nog veel onzekerheden geeft in de modellering van droogtestress en oppervlakkige afstroming.



---

## 3 Vergelijking met dataset Vlaanderen

### 3.1 Samenvatting van onderzoek naar bodemverdichting in Vlaanderen

Deze paragraaf beschrijft een samenvatting van het onderzoek in Vlaanderen zoals beschreven in het rapport van Van der Bolt et al. (2016)<sup>11</sup>. De doelstelling van het onderzoek in Vlaanderen was het vaststellen van het effect van ondergrondverdichting op het watertransport in Vlaamse bodems. Vooral een beperkte infiltratie en een toename van de oppervlakkige afstroming – en daarmee gepaard gaande wateroverlast en eventuele erosie – worden als probleem gezien.

De gevolgen van bodemverdichting op het watertransport door een bodem zijn verkend door gecombineerd te meten en te modelleren volgens de volgende stappen:

1. Verzamelen van een groot aantal bodemmonsters en in-situ metingen op 26 percelen;
2. Bepalen verzadigde doorlatendheid  $K_{sat}$ , waterretentiecurven, doorlatendheidsrelaties en textuur;
3. Opstellen van pedotransferfuncties;
4. Continue bodemvochtmetingen voor 6 percelen;
5. Simuleren van het watertransport voor de 6 percelen met SWAP en toetsing aan metingen;
6. Ruimtelijk modellering voor 5 stroomgebieden met het bestaande Vlaanderen model.

In deze samenvatting richten we ons specifiek op de punten 1 en 2 betreffende de verworven data en niet op de monitoring en de modelleringen.

#### *Metingen*

Op 26 percelen in Vlaanderen zijn op 2 locaties (kopakker en midden perceel) op 3 dieptes – in de bovengrond (globaal 0-30 cm-mv), de verdichte ondergrond (globaal 30-60 cm-mv) en de ondergrond (globaal > 60 cm-mv) – monsters verzameld. De percelen zijn verdeeld over 6 strata op basis van textuur: klei, leem, zandleem, lichte zandleem, lemig zand en zand.

Per perceel zijn 60 penetrometer-metingen uitgevoerd om te bepalen of de percelen verdicht zijn en op 3 plekken in het perceel is het vochtgehalte bepaald. Op de kopakker en in het midden van ieder perceel zijn op 3 dieptes 6 ongestoorde ringmonsters genomen (in totaal 36 monsters per perceel). Er werden in totaal 1560 metingen van de indringingsweerstand gedaan en er zijn 936 ongestoorde monsters genomen. Van elk ringmonster is de verzadigde doorlatendheid bepaald, van 1 monster uit iedere serie van 6 zijn simultaan de waterretentie- en doorlatendheidscurve gemeten met de verdampingsmethode. Ook zijn de bulkdichtheid, het poriënvolume, de textuur en het gehalte organische koolstof bepaald voor de ringmonsters. De resultaten zijn toegankelijk via een database.

Op de middendelen van 6 percelen met een range aan eigenschappen zijn aanvullend de bodemvochtgehalten op drie dieptes en de grondwaterstand continu gemeten met intervallen van 1 uur om modelberekeningen voor deze percelen te kunnen toetsen.

Om een onderbouwde uitspraak te doen over de toestand van bodemverdichting, is in deze studie een combinatie van indicatoren gebruikt:

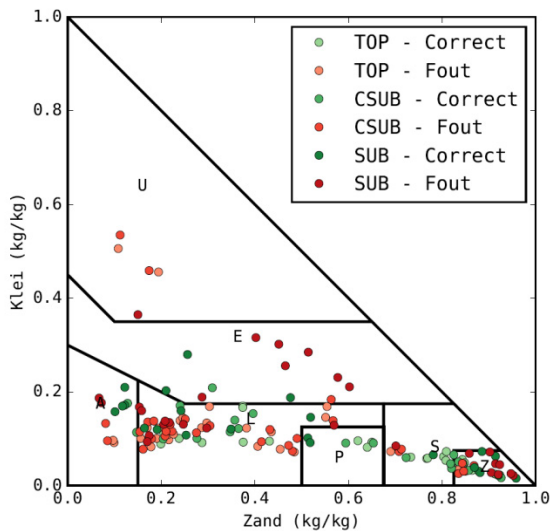
- Indringingsweerstand (grenswaarde 3 MPa),
- Bulkdichtheid (grenswaarden  $1,75 - 0,009 \times \text{kleigehalte Mg m}^{-3}$  voor kleigehalte > 17,5% en  $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$  voor kleigehalte  $\leq 17,5\%$ ),
- Luchtcapaciteit (grenswaarde  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ),
- Verzadigde doorlatendheid (grenswaarde  $10 \text{ cm d}^{-1}$ ),
- Macroporiënvolume (grenswaarde  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).

---

<sup>11</sup> <https://www.vlaanderen.be/nl/publicaties/detail/bodemverdichting-in-vlaanderen-1>

### Meetresultaten

De textuur en organische koolstofgehalten van de monsters hebben een grote spreiding, zodat de dataset representatief wordt geacht voor een groot deel van de Vlaamse bodems. De resultaten van de tweede laag, de verdichte ondergrond direct onder de bovengrond, zijn vermeld in de Tabellen 3.1 en 3.2. We richten ons op deze laag, omdat die door het rijden in de open voor tijdens het ploegen en door de steeds zwaardere mechanisatie in toenemende mate wordt verdicht. Deze laag is in het algemeen de bottleneck voor de infiltratie en de beworteling. Opvallend is dat de gemeten textuur nogal vaak verschilt van de textuur zoals deze op de bodemkaart staat vermeld. Deels zal dit komen omdat de tabellen betrekking hebben op de (bovenste) ondergrond, terwijl de textuurklasse op de bodemkaart voornamelijk wordt bepaald door de bovengrond. In Figuur 3.1 zijn in de textuurdriehoek met Belgische klassenindeling de verschillen in textuur tussen gemeten en volgens de bodemkaart aangegeven.



**Figuur 3.1** Textuurdriehoek volgens de Belgische bodemclassificatie met de textuur van elk van de 156 meetpunten (26 percelen, twee meetlocaties, drie dieptes, i.e., bovengrond TOP, verdichte ondergrond CSUB en diepere ondergrond SUB). Rood wijst op een discrepantie tussen de werkelijke textuurklasse en deze vooropgesteld op basis van de Aardewerk-bodemdatabank en de Belgische bodemkaart. Textuurklassen: A = leem; E = klei; L = zandleem; P = licht zandleem; S = lemig zand; U = zware klei en Z = zand (Figuur 5.2 in Van der Bolt et al. 2016).

Uit de tabellen 3.1 en 3.2 blijkt zelfs bij een globale beschouwing al dat de kopakkers in het algemeen meer verdicht en slechtere bodemfysische eigenschappen hebben dan het middendeel. Kopakkers worden in het algemeen zwaarder en frequenter belast dan het middendeel. De verwachting is dat het middendeel wat betreft verdichting steeds meer gaat lijken op de kopakker door de nog steeds toenemende zware mechanisatie en doordat ondergrondverdichting slecht herstelt en daardoor cumulatief is. In de verdichte ondergrond is bij bijna alle percelen bij de kopakker, en vaak ook bij het middendeel, de indringingsweerstand te hoog ( $I_w > 3 \text{ MPa}$ ), waardoor wortelgroei belemmerd kan worden. Op de meeste percelen is de luchtcapaciteit in de verdichte ondergrond te laag ( $L_c < 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), waardoor een goede luchthuishouding daar in het gedrang kan komen, zeker onder natte omstandigheden. Het gunstigst waren de zandbodems, al is ook hier de luchtcapaciteit in een paar gevallen te laag. De bulkdichtheid (BD), een directe maat voor bodemverdichting, is op verschillende percelen hoger dan of bijna de drempelwaarde voor bodemverdichting, maar toch is dit voor de meeste percelen niet het geval. Het macroporiënvolume ligt op ruim de helft van de percelen onder de grenswaarde ( $\text{MacPOR} < 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Op de zandbodems blijft deze indicator echter zelfs in de verdichte ondergrond boven de grenswaarde. Te verwachten valt dat door de beperkte hoeveelheid macroporiën een snelle drainage van overtollig water in vele bodems belemmerd wordt. Bij ongeveer een kwart van de perceelmiddens en een derde van de kopakkers is de gemiddelde doorlatendheid  $K_s$  lager dan  $10 \text{ cm d}^{-1}$ , zodat daar problemen met de infiltratie van water kunnen worden verwacht. Dit komt in het algemeen goed overeen met een te laag

macroporiënvolume. De minimale verzadigde doorlatendheid blijkt bij ca. 40% van de perceelmiddens en ca. 65% van de kopakkers te laag te zijn in de verdichte ondergrond. Lokaal kan de infiltratiecapaciteit dus sterk belemmerd worden. Een beschouwing van de verzadigde doorlatendheid van de diepere ondergrond SUB laat zien dat slechts bij één kopakker en bij twee perceelmiddens de gemiddelde verzadigde doorlatendheid lager is dan  $10 \text{ cm d}^{-1}$ . Indien we ervan uitgaan dat de verzadigde doorlatendheid van de nu verdichte ondergrond CSUB vroeger ongeveer overeenkwam met de huidige verzadigde doorlatendheid van de ondergrond SUB, dan is de verzadigde doorlatendheid van CSUB door verdichting fors achteruitgegaan, waarbij de nog slechtere verzadigde doorlatendheden van CSUB bij de kopakkers laten zien dat een forse verdere achteruitgang mogelijk is.

**Tabel 3.1** Overzicht van de bodemkwaliteits-indicatorwaarden per perceel gemeten in de verdichte ondergrond van het middendeel, met indicatie van de textuurklasse van het perceel op de bodemkaart en de werkelijke textuurklasse in de verdichte ondergrond (CSUB). De aangewende kleuren geven een indicatie voor de bodemkwaliteit: rood betekent niet gunstig (t.o.v. de drempelwaarde), groen betekent gunstig (meer dan 20% gunstiger t.o.v. de drempelwaarde<sup>1</sup>) en de gradatie van lichtrood via geel naar groen betekent 20% of minder gunstig t.o.v. de drempelwaarde, met lichtrood en lichtgroen respectievelijk het dichtst bij en het verst van de drempelwaarde) (Tabel 5.1 in Van der Bolt et al. 2016).

Textuur-klasse bodem-kaart	Code	Textuurklasse CSUB <sup>2</sup>	Iw (MPa)	BD (kg/m <sup>3</sup> )	Lc (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	K <sub>s,geom</sub> (cm/d)	K <sub>s,min</sub> (cm/d)	MacPOR (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
A	h1	Zandleem (L)	3.0	1609.4	0.093	30.4	0.6	0.065
A	h2	Leem (A)	3.0	1568.1	0.042	200.5	91.6	0.027
A	h3	Zandleem (L)	5.8	1435.9	0.029	26.7	2.2	0.016
A	ref	Zandleem (L)	2.4	1454.0	0.095	142.7	69.4	0.069
A	zh1	Leem (A)	2.1	1503.9	0.056	56.2	24.6	0.029
E	h1	Klei (E)	6.1	1462.8	0.072	18.3	18.0	0.049
E	h2	Zware Klei (U)	2.1	1304.5	0.000	5.6	0.9	0.000
E	ref	Zandleem (L)	3.1	1516.0	0.043	15.2	3.1	0.036
E	zh1	Zandleem (L)	3.6	1507.8	0.070	74.3	11.3	0.042
L	l1	Zandleem (L)	2.0	1506.6	0.054	5.1	0.4	0.039
L	ml1	Zandleem (L)	5.8	1485.0	0.101	59.1	37.1	0.069
L	ml2	Zandleem (L)	2.7	1667.0	0.008	3.0	0.2	0.001
L	ml3	Zandleem (L)	2.7	1384.7	0.075	346.4	113.8	0.061
L	ref	Leem (A)	3.3	1488.4	0.024	121.4	28.0	0.000
P	l1	Lichte Zandleem (P)	4.5	1584.7	0.063	165.4	31.8	0.044
P	l2	Zandleem (L)	3.7	1655.9	0.040	1.4	0.4	0.021
P	l3	Lichte Zandleem (P)	3.8	1558.1	0.023	8.2	5.2	0.011
P	l4	Klei (E)	2.2	1527.9	0.000	2.4	1.0	0.000
P	ref	Zandleem (L)	4.2	1524.3	0.044	40.8	12.7	0.017
S	h1	Lemig Zand (S)	4.2	1646.6	0.160	11.7	1.2	0.116
S	l1	Lemig Zand (S)	5.7	1542.5	0.131	36.2	14.8	0.082
S	ref	Zand (Z)	6.0	1624.0	0.084	5.7	1.6	0.077
S	zh1	Zand (Z)	2.6	1358.6	0.114	53.7	38.1	0.095
Z	h1	Zand (Z)	2.7	1527.6	0.123	83.9	28.5	0.103
Z	h2	Zand (Z)	3.0	1375.3	0.140	54.5	39.0	0.117
Z	ref	Zand (Z)	5.8	1595.4	0.086	210.4	22.0	0.063

<sup>1</sup> Voor bulkdichtheid werd 20% van  $200 \text{ kg m}^{-3}$  van de drempelwaarde afgetrokken en voor de indringingsweerstand 20% van 2 MPa. Dus, voor een drempelwaarde van  $1600 \text{ Mg m}^{-3}$  betekent dit  $1560 \text{ Mg m}^{-3}$  en voor de indringingsweerstand 2.6 MPa.

<sup>2</sup> In deze kolom betekent rood dat minimum vijf van de zes bodemkwaliteitsindicatoren zijn overschreden, groen maximaal één en oranje twee tot vier.

**Tabel 3.2** Overzicht van de bodemkwaliteits-indicatorwaarden gemeten in de verdichte ondergrond van de kopakker per perceel, met indicatie van de textuurklasse van het perceel op de bodemkaart en de werkelijke textuurklasse in de verdichte ondergrond (CSUB). De aangewende kleuren geven een indicatie voor de bodemkwaliteit: rood betekent niet gunstig (t.o.v. de drempelwaarde), groen betekent gunstig (meer dan 20% gunstiger t.o.v. de drempelwaarde<sup>1</sup>) en de gradatie van lichtrood via geel naar groen betekent 20% of minder gunstiger t.o.v. de drempelwaarde, met lichtrood en lichtgroen respectievelijk het dichtst bij en het verst van de drempelwaarde). (Tabel 5.2 in Van der Bolt et al. 2016.)

Textuur-klasse bodem-kaart	Code	Textuurklasse CSUB <sup>2</sup>	Iw (MPa)	BD (kg/m <sup>3</sup> )	Lc (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	K <sub>s,geom</sub> (cm/d)	K <sub>s,min</sub> (cm/d)	MacPOR (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
A	h1	Zandleem (L)	3.5	1582.3	0.020	6.8	2.3	0.013
A	h2	Zandleem (L)	5.1	1422.2	0.043	2.9	1.7	0.003
A	h3	Zandleem (L)	6.0	1514.6	0.063	7.2	0.3	0.040
A	ref	Zandleem (L)	2.8	1683.0	0.012	8.1	0.5	0.007
A	zh1	Zandleem (L)	5.1	1494.3	0.110	14.7	12.2	0.073
E	h1	Zandleem (L)	6.1	1642.5	0.077	92.2	4.3	0.050
E	h2	Zware Klei (U)	1.8	1307.2	0.000	112.9	33.2	0.000
E	ref	Zandleem (L)	3.7	1587.3	0.049	44.7	13.4	0.033
E	zh1	Zandleem (L)	4.3	1520.8	0.019	3.9	1.0	0.007
L	l1	Zandleem (L)	4.5	1587.4	0.044	1.5	1.1	0.026
L	m11	Zandleem (L)	5.4	1448.4	0.075	51.9	10.5	0.046
L	m12	Zandleem (L)	5.0	1688.1	0.000	7.1	0.9	0.000
L	m13	Zandleem (L)	4.7	1406.9	0.015	41.8	9.5	0.010
L	ref	Leem (A)	3.5	1454.7	0.059	5.1	2.2	0.044
P	l1	Lemig Zand (S)	5.1	1396.7	0.083	35.5	15.3	0.052
P	l2	Zandleem (L)	4.6	1432.0	0.098	12.5	10.7	0.044
P	l3	Lemig Zand (S)	4.6	1548.7	0.047	9.9	5.0	0.030
P	l4	Zandleem (L)	4.8	1495.0	0.066	91.3	31.9	0.047
P	ref	Zandleem (L)	4.5	1612.2	0.035	12.6	2.3	0.015
S	h1	Lemig Zand (S)	6.3	1524.0	0.087	40.2	5.3	0.066
S	l1	Lemig Zand (S)	5.6	1553.6	0.055	22.4	18.6	0.033
S	ref	Zand (Z)	7.2	1539.2	0.099	88.4	2.7	0.077
S	zh1	Zand (Z)	3.9	1463.0	0.113	55.0	25.9	0.093
Z	h1	Zand (Z)	3.7	1552.4	0.129	21.1	2.2	0.100
Z	h2	Zand (Z)	4.0	1300.7	0.105	158.3	156.6	0.062
Z	ref	Zand (Z)	6.1	1626.0	0.083	24.5	14.6	0.070

<sup>1</sup> Voor bulkdichtheid werd 20% van 200 kg m<sup>-3</sup> van de drempelwaarde afgetrokken en voor de indringingsweerstand 20% van 2 MPa. Dus voor een drempelwaarde van 1600 Mg m<sup>-3</sup> betekent dit 1560 Mg m<sup>-3</sup> en voor de indringingsweerstand 2.6 MPa.

<sup>2</sup> Rood betekent dat minimum vijf van de zes bodemkwaliteitsindicatoren zijn overschreden, groen maximaal één, en oranje twee tot vier.

Globaal gezien kan worden gesteld dat de zandbodems, ondanks hun hoge indringingsweerstand, het minst onderhevig zijn aan de (gevolgen van) bodemverdichting. De textuurklasse zandleem blijkt het gevoeligst te zijn voor bodemverdichting.

De waterretentie- en doorlatendheidscurven zijn bepaald met de verdampingsmethode. Daarbij zijn de metingen gefit aan het Peters-Durner-Iden (PDI) model (Peters, 2013, 2014; Iden en Durner, 2014), dat een hoge flexibiliteit heeft. Er is gefit zowel met als zonder K<sub>sat</sub>. Voor invoer in modellen zijn ook de Mualem-Van Genuchten-parameters bepaald met behulp van een fit aan punten gegenereerd met het PDI-model.

Wat de waterretentie- en doorlatendheidscurves betreft, toonde de studie aan dat de effecten van verdichting vooral een impact hebben in het natte traject, nabij verzadiging. Zeker vanaf veldcapaciteit konden geen uitgesproken trends worden waargenomen.

De variatie in de dataset wordt – zoals te verwachten – in de eerste plaats verklaard door de textuur: de verschillen tussen bijvoorbeeld een klei- en een zandgrond zijn groot. Door bodemverdichting treedt binnen een textuurklasse een verschuiving op, waardoor poriëgehalten, doorlatendheden voor lucht en water en luchtgehalten lager worden en onder de grenswaarden kunnen komen.

---

## 3.2 Vergelijkingen met Nederlandse datasets

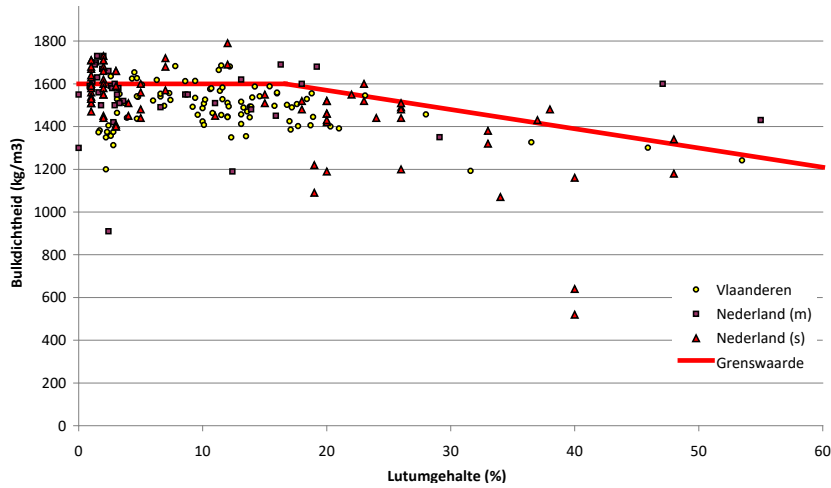
Een belangrijk resultaat van het onderzoek naar bodemverdichting in Vlaanderen is dat er een database is gecreëerd waarin gegevens van verzadigde doorlatendheden en waterretentie- en doorlatendheidscurven zijn vastgelegd. De gegevens zijn verzameld in bodemprofielen op de kopakker en het middendeel van 26 percelen in representatieve bodemlagen en voor verschillende textuurklassen. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de toplaag (TOP), verdichte ondergrond (CSUB) en de diepere ondergrond (SUB). Per bodemprofiel en per bodemlaag zijn de textuur en het organische stofgehalte gemeten en in de database opgenomen. Per monster zijn de dichtheden gemeten en in de database opgenomen. Omdat de Vlaamse en Nederlandse bodems zeer vergelijkbaar zijn, geeft dit de mogelijkheid om de Nederlandse en Vlaamse databases te combineren tot één database. De Universiteit Gent is bereid om hieraan mee te werken. Niet alleen kan op deze wijze de hoeveelheid data sterk worden uitgebreid met recente metingen, maar bovendien heeft ongeveer een derde van de Vlaamse data betrekking op de verdichte ondergrond (CSUB) onder de toplaag (TOP). Dit is een laag die juist gemist wordt in de Nederlandse database. In Nederland wordt namelijk tot nu toe voor de opbouw van de database standaard bemonsterd in de boven- en in de ondergrond, waarbij in de ondergrond in het algemeen het monster op een diepte onder de verdichte ondergrond (CSUB) wordt genomen. In het onderzoek naar de effecten van ondergrondverdichting op de waterhuishouding zouden de Vlaamse data in ieder geval deels een gat kunnen opvullen in de Nederlandse database. In deze paragraaf wordt onderzocht in hoeverre dit inderdaad mogelijk is. Dit wordt gedaan op basis van de droge bulkdichtheden en de verzadigde doorlatendheden.

### *Vergelijking droge dichtheden van de ondergrond van de Vlaamse en twee Nederlandse datasets*

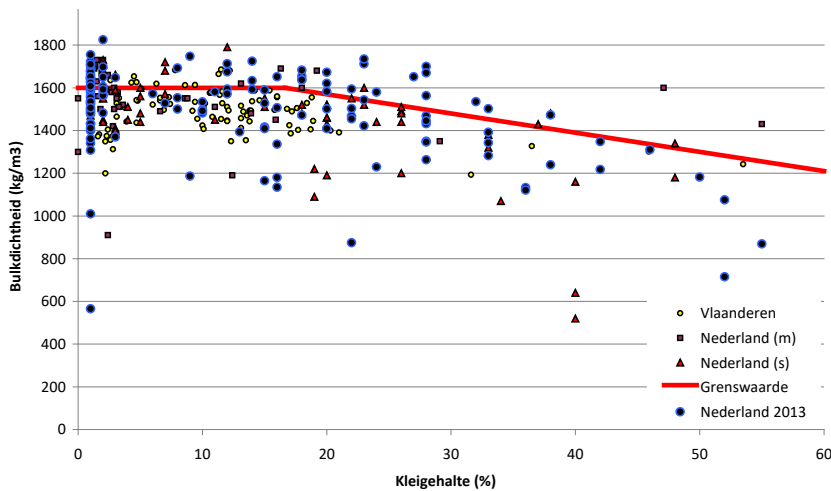
De beschouwde datasets zijn de Vlaamse dataset, een dataset met dichtheden en verzadigde doorlatendheden gedestilleerd uit het Nederlandse Bodem Informatie Systeem (BIS) en een dataset met dichtheden van de verdichte ondergrond (CSUB) bepaald in een Nederlandse inventarisatie in 2013 (Van den Akker en Hendriks, 2015). De dichtheden uit deze dataset zijn het gemiddelde van 3 monsters. De monsters in de Vlaamse dataset zijn voor de helft in de ondergrond direct onder de toplaag (bouwvoor) genomen (CSUB) en voor de helft in de bodemlaag dieper dan 60 cm (SUB). De helft van de monsters is op de kopakker en de helft op het middendeel van het perceel genomen. De dichtheden in de Vlaamse dataset zijn het gemiddelde van 5 monsters. De monsters van de Nederlandse dataset gedestilleerd uit BIS zijn op verschillende diepten onder de toplaag genomen. Het is niet goed bekend hoeveel monsters zijn genomen voor de bepaling van de dichtheid in BIS, maar het zijn er tegenwoordig minimaal twee. Verder moet worden bedacht dat de Vlaamse dataset uitsluitend betrekking heeft op landbouwpercelen, terwijl beide Nederlandse datasets betrekking hebben op alle bodems buiten de bebouwde kom, dus ook natuurgebieden, bossen en bijvoorbeeld boomgaarden. Het overgrote deel heeft echter wel betrekking op landbouwpercelen.

We beschouwen alleen de dichtheden van de ondergrond, omdat in het project 'Goede grond voor een duurzaam watersysteem' zich wat betreft verdichting vooral richt op de ondergrond. Daarnaast zijn de dichtheden van de bovengrond door grondbewerking zeer veranderlijk en daardoor kunnen verschillen tussen de Vlaamse en Nederlandse bovengrond sterk zijn bepaald door bijvoorbeeld het tijdstip van bemonstering in het seizoen. Van de monsters in de Vlaamse dataset zijn de textuur door meting bepaald. Bij de Nederlandse dataset gedestilleerd uit BIS is van een deel de textuur bepaald door meting en een deel door schatting door een bodemkarterder. Bij de Nederlandse dataset uit de inventarisatie in 2013 is de textuur bepaald door schatting van een bodemkarterder.

In Figuur 3.2 zijn de dichtheden van de monsters uit de Vlaamse dataset en de Nederlandse dataset gedestilleerd uit BIS met elkaar vergeleken. De dichtheden zijn daarbij uitgezet tegen het lutumgehalte (kleigehalte), omdat de Nederlandse textuurindeling sterk wordt bepaald door het lutumgehalte en omdat de kritische dichtheid afhankelijk is van het lutumgehalte (zie paragraaf 3.1). Deze kritische dichtheid is als grenswaarde aangegeven in de figuur. Uit Figuur 3.1 volgt op het eerste gezicht dat het aantal monsters dat boven de grenswaarde komt en als oververdicht kan worden aangemerkt, beperkt is. Dit geldt sterker voor de Vlaamse monsters dan voor de Nederlandse monsters. Voor de zeer lage lutumgehalten (zand) is dit echter niet goed te zien. In Figuur 3.3 zijn de monsters van de Nederlandse inventarisatie uit 2013 toegevoegd. Deze hebben betrekking op de verdichte ondergrond (CSUB) en het lijkt erop dat een groter deel van de monsters is oververdicht.



**Figuur 3.2** Bulkdichtheden van de monsters in de Vlaamse en de Nederlandse dataset uit BIS in relatie met het lutumgehalte. Bij de Nederlandse monsters is onderscheid gemaakt tussen gemeten (m) en geschatte textuur (s). De aangegeven lijn met de grenswaarde is bepaald met de formule voor kritische dichtheid zoals aangegeven in paragraaf 3.1. Dichtheden boven de grenswaarde geven vaak bewortelingsproblemen.



**Figuur 3.3** Bulkdichtheden zoals aangegeven in Figuur 3.2 aangevuld met de monsters uit de Nederlandse inventarisatie van de verdichte bovengrond (CSUB) uit 2013.

Tabel 3.3 geeft per dataset en per grondsoort het aantal bemonsterde bodemlagen met de mediaan van de bulkdichtheden, de gemiddelde bulkdichtheden en standaarddeviatie en het aantal en percentage bodemlagen dat de grenswaarde voor de bulkdichtheid overschrijdt. Uit de tabel volgt dat de indrukken uit de figuren 3.2 en 3.3 worden bevestigd. De bulkdichtheden van de bemonsterde bodemlagen blijken in Vlaanderen duidelijk lager te zijn dan in de Nederland. Dit komt ook sterk tot uitdrukking in het percentage van de bulkdichtheden die de grenswaarde overschrijden. Dit percentage blijkt in Vlaanderen nog niet de helft te zijn van die in beide Nederlandse databases. Hoewel het totaalpercentage van het aantal oververdichte bodems bij beide Nederlandse databases ongeveer gelijk is, zijn er duidelijk overeenkomsten en tegenstellingen. Bij beide databases is een groot percentage zandgronden en lichte zavelen oververdicht. Het percentage zware zavelen en lichte kleien met een oververdichte ondergrond zijn in de inventarisatie van 2013 duidelijk hoger dan in BIS. Het omgekeerde geldt voor de zware kleien. Wel geldt voor alle databases dat het aantal bodemlagen met kleigronden te beperkt is voor een goede analyse per database. Uit de gezamenlijke databases kan wel worden geconcludeerd dat zware kleien, maar ook lichte kleien wat minder te lijden hebben van bodemverdichting dan de andere grondsoorten.

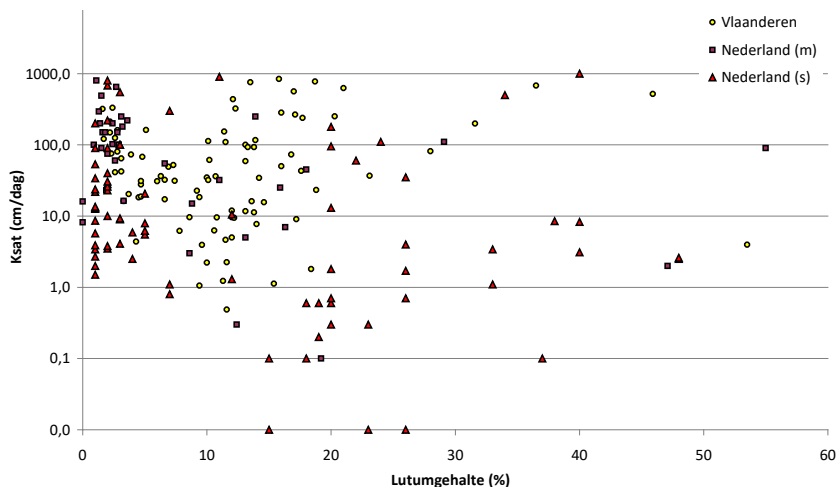
**Tabel 3.3** Bulkdichtheden van de bemonsterde bodemlagen in de Vlaamse en de twee Nederlandse databases naar grondsoort. Bij de dataset van de inventarisatie is een aantal ondergronden met hoog organische stofgehalte (en daardoor lage bulkdichtheden) weggelaten.

	Lutumgehalte (%)	Aantal bemonsterde bodemlagen (n)	Mediaan bulkdichtheid DBmed (kg/m <sup>3</sup> )	Gemiddelde bulkdichtheid DBgem (kg/m <sup>3</sup> )	Stand. dev. bulkdichtheid SDdb (kg/m <sup>3</sup> )	Aantal > grenswaarde (-)	Percentage > grensw. (%)
<b>Nederland BIS</b>							
Zand	0 - 8	66	1580	1565	126	27	40,9
Lichte zavel	8 - 17,5	13	1550	1541	147	4	30,8
Zware zavel	17,5 - 25	16	1500	1469	143	3	18,8
Lichte klei	25 - 35	9	1380	1360	147	0	0,0
Zware klei	> 35	9	1340	1198	378	1	11,1
Totaal		113	1530	1503	194	35	31,0
<b>Vlaanderen</b>							
Zand	0 - 8	30	1523	1492	116	6	20,0
Lichte zavel	8 - 17,5	45	1497	1508	78	5	11,1
Zware zavel	17,5 - 25	8	1455	1467	73	0	0,0
Lichte klei	25 - 35	2	1324	1324	187	0	0,0
Zware klei	> 35	3	1301	1290	43	0	0,0
Totaal		88	1497	1487	104	11	12,5
<b>Nederland 2013</b>							
Zand	0 - 8	51	1582	1569	110	22	43,1
Lichte zavel	8 - 17,5	25	1553	1544	131	7	28,0
Zware zavel	17,5 - 25	21	1580	1523	192	8	38,1
Lichte klei	25 - 35	14	1457	1477	133	3	21,4
Zware klei	> 35	8	1228	1253	119	0	0,0
Totaal		119	1553	1524	154	40	33,6

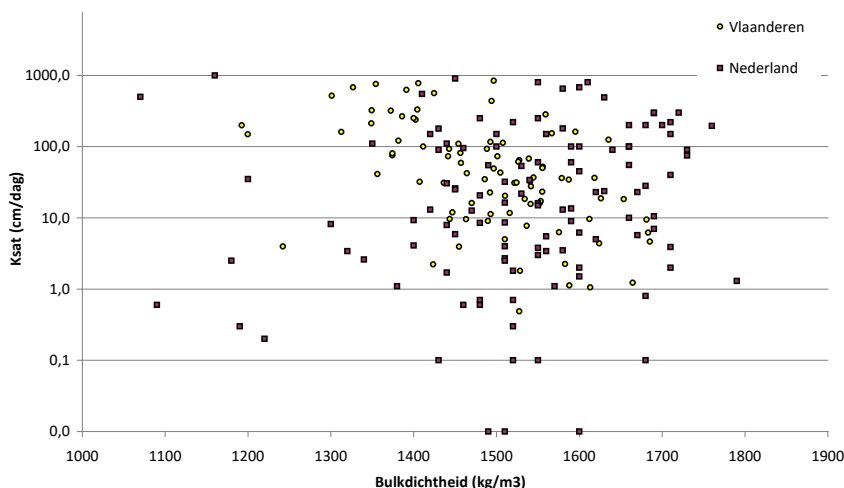
Door Van den Akker en Hendriks (2015) is aangegeven dat ca. 45% van alle Nederlandse gronden is oververdicht. Dit lijkt in tegenspraak met de 33,6% die in Tabel 3.3 is aangegeven bij het totaal in Nederland in 2013. Echter, dit is het percentage van het aantal bemonsterde bodemlagen die is oververdicht. In de 45% van Van den Akker en Hendriks (2015) is daarnaast rekening gehouden met het oppervlakte per grondsoort en het landgebruik.

*Vergelijking verzadigde doorlatendheden van de ondergrond bij de Vlaamse en de Nederlandse database gebaseerd op BIS*

Bij de Nederlandse inventarisatie van 2013 zijn geen verzadigde doorlatendheden gemeten en deze database blijft daarom buiten beschouwing. De verzadigde doorlatendheden zijn in Vlaanderen per beschouwde bodemlaag bepaald aan 6 monsters met een diameter van 8 cm en een hoogte van 5 cm. De verzadigde doorlatendheid Ksat is vervolgens bepaald als het geometrisch gemiddelde van de 6 monsters, echter in een beperkt aantal gevallen waren minder monsters beschikbaar, omdat de doorlatendheden extreem hoog waren door bijvoorbeeld een doorgaande wormgang (Bolt et al. 2016). De verzadigde doorlatendheden in BIS zijn veelal bepaald aan een of twee monsters met een diameter van ca. 19 cm en een hoogte van 10 cm. Door de grote diameter wordt rekening gehouden met de structuur en grootte van structurelementen in de bodemlaag en de variatie in doorlatendheid die daardoor optreedt. Bij de Vlaamse bemonstering wordt deze variatie opgevangen door het grotere aantal monsters. Daarmee worden de in Vlaanderen en in Nederland bepaalde verzadigde waterdoorlatendheden vergelijkbaar.



**Figuur 3.4** Verzadigde doorlatendheden  $K_{sat}$  in cm/dag van de monsters in de Vlaamse en de Nederlandse dataset uit BIS in relatie tot het lutumgehalte. Bij de Nederlandse monsters is onderscheid gemaakt tussen gemeten (m) en geschatte textuur (s). De grenswaarde voor verzadigde doorlatendheid is 10 cm/dag, zoals aangegeven in paragraaf 3.1. Verzadigde doorlatendheden onder die 10 cm/dag geven vaak problemen met infiltratie en leiden bij hevige regens tot plasvorming.



**Figuur 3.5** Verzadigde doorlatendheden  $K_{sat}$  in cm/dag van de monsters in de Vlaamse en de Nederlandse dataset uit BIS in relatie met bulkdichtheid. De grenswaarde voor verzadigde doorlatendheid is 10 cm/dag.

In Figuur 3.4 zijn de verzadigde doorlatendheden  $K_{sat}$  uitgezet tegen het lutumgehalte. Daaruit blijkt dat de verzadigde doorlatendheid van bodemlagen met een zeer laag lutumgehalte (zand) in een belangrijk deel van de gevallen boven de grenswaarde van 10 cm/dag ligt en geen probleem vormt. Bij hoge lutumgehalten (zavel- en kleigronden) zijn de verzadigde doorlatendheden vaak wel een probleem, echter veel vaker bij de Nederlandse dan bij de Vlaamse gronden. Verder valt op dat bij een deel van de zwaardere gronden de  $K_{sat}$  juist erg hoog is. Dit laatste zou een gevolg kunnen zijn van de aanwezigheid van macroporiën door een goede structuur, krimp- of rijpingsscheuren of bioporiën. In Figuur 3.5 zijn de verzadigde doorlatendheden uitgezet tegen de bulkdichtheid. Zoals ook al aangegeven in de vorige alinea, blijkt dat de dichtheden in de Vlaamse dataset vaak wat lager zijn dan in de Nederlandse dataset uit BIS. De verzadigde doorlatendheden blijken in de Nederlandse dataset in het algemeen lager te zijn dan in de Vlaamse dataset. Dit komt ook tot uitdrukking in Tabel 3.4. Net als bij de dichtheden blijkt ook bij de verzadigde doorlatendheden dat het percentage van de bodemlagen die niet voldoen aan de grenswaarde voor in dit geval de doorlatendheid ( $K_{sat} < 10$  cm/d) in Vlaanderen ongeveer de helft is van die in Nederland. Bij de Nederlandse verzadigde doorlatendheden lijkt het probleem toe te nemen met de zwaarte van de grond: het laagste percentage met  $K_{sat} < 10$  cm/d bij zand en het hoogste percentage bij zware klei. Bij de Vlaamse verzadigde doorlatendheden lijkt het



probleem vooral op te treden bij de lichte zavel. Doordat het aantal bodemlagen met klei zeer beperkt is, kunnen daarover geen uitspraken worden gedaan. Vergelijking van de Nederlandse en Vlaamse zandgronden laat zien dat de Nederlandse zandgronden duidelijk veel vaker een probleem hebben met de verzadigde doorlatendheid dan de Vlaamse zandgronden, die weinig problemen lijken te hebben.

**Tabel 3.4** Verzadigde doorlatendheden Ksat van de bemonsterde bodemlagen in de Vlaamse en de Nederlandse BIS-databases naar grondsoort.

	Lutum-gehalte (%)	Aantal bemonsterde bodemlagen (n)	Mediaan verz. doorl. Ksat-med (cm/d)	Gemiddelde verz. doorl. Ksat-gem (cm/d)	Standaard-deviatie SDksat (cm/d)	Aantal < 10 cm/d	Percentage < 10 cm/d (%)
<b>Nederland BIS</b>							
Zand	0 - 8	66	29	121	192	21	31.8
Lichte zavel	8 - 17,5	13	7	96	251	7	53.8
Zware zavel	17,5 - 25	16	1	32	53	10	62.5
Lichte klei	25 - 35	9	3	73	164	6	66.7
Zware klei	> 35	9	3	124	329	7	77.8
Totaal		113	15	102	198	51	45.1
<b>Vlaanderen</b>							
Zand	0 - 8	30	44	81	85	2	6.7
Lichte zavel	8 - 17,5	45	23	107	193	16	35.6
Zware zavel	17,5 - 25	8	141	250	298	1	12.5
Lichte klei	25 - 35	2	140	140	83	0	0.0
Zware klei	> 35	3	518	400	352	1	33.3
Totaal		88	39	122	190	20	22.7

### 3.3 Conclusies uit de vergelijking tussen de Vlaamse en Nederlandse datasets

Hoewel het in alle beschouwde datasets bodemlagen uit de ondergrond betreffen, zijn de bemonsteringsstrategieën nogal verschillend geweest. Niettemin is de bodemfysische toestand (dichtheid en de verzadigde doorlatendheid) van de beschouwde bodemlagen in Vlaanderen duidelijk beter dan in Nederland. De bulkdichtheid van de Vlaamse bodemlagen is in het algemeen lager dan in Nederland en het percentage bodemlagen dat de grenswaarde voor de bulkdichtheid overschrijdt, is in Vlaanderen slechts 12%, terwijl dat in Nederland ca. 32% is. Hetzelfde geldt voor de verzadigde doorlatendheden. In Nederland zijn deze duidelijk lager dan in Vlaanderen. In Vlaanderen voldoet 23% van de verzadigde doorlatendheden niet aan het criterium dat de verzadigde doorlatendheid minstens 10 cm/dag moet zijn. In Nederland voldoet bijna het dubbele aantal (45%) niet aan dit criterium.

Bij de bemonsteringsstrategie van de Vlaamse dataset is gericht bemonsterd op het verkrijgen van een breed spectrum met dichtheden met een groot aantal verdichte lagen. Daarom is bewust gekozen voor twee lagen in de ondergrond waaronder de laag direct onder de bovengrond (bouwvoor). Bovendien is ook gekozen om naast een bemonstering in het middendeel van het perceel ook de kopakker te bemonsteren. De verwachting was dan ook dat een uitbreiding van de Nederlandse dataset met de Vlaamse dataset een aanzienlijke uitbreiding richting (ver)dichte bodemlagen zou opleveren. Dit blijkt echter niet het geval te zijn. Mede gezien de beperkte omvang van de Nederlandse dataset is een uitbreiding zeer welkom. Dit vergroot de mogelijkheden voor statistische analyses. Echter, de toevoeging van de Vlaamse dataset zal vooral in de middenmoot van het dichtheidsspectrum een bijdrage leveren en maar in beperkte mate kunnen bijdragen aan de studie naar het effect van verdichting op de waterhuishouding.

---

## 3.4 Resultaten modelstudie Vlaanderen

### Pedotransferfuncties

Op basis van gemeten eigenschappen als mogelijk verklarende parameters zijn nieuwe pedotransferfuncties voor de waterretentie- en doorlatendheidscurve afgeleid die de actuele bodemtoestand in Vlaanderen weerspiegelen (Van der Bolt et al. 2016). Hierbij zijn verklarende parameters gebruikt om te zoeken naar de k-dichtste buren (k-NN) in de bodemfysische database. Deze pedotransferfuncties gaven zeer bevredigende resultaten en scoorden beter dan functies vermeld in de literatuur, zelfs wanneer enkel textuur en organisch-koolstofgehalte werden meegenomen. Wordt bulkdichtheid toegevoegd als predictor-variabele, dan nam de voorspellingsfout af, vooral in het 'nattere' traject van de waterretentie- en doorlatendheidscurves.

### Modeltoetsing

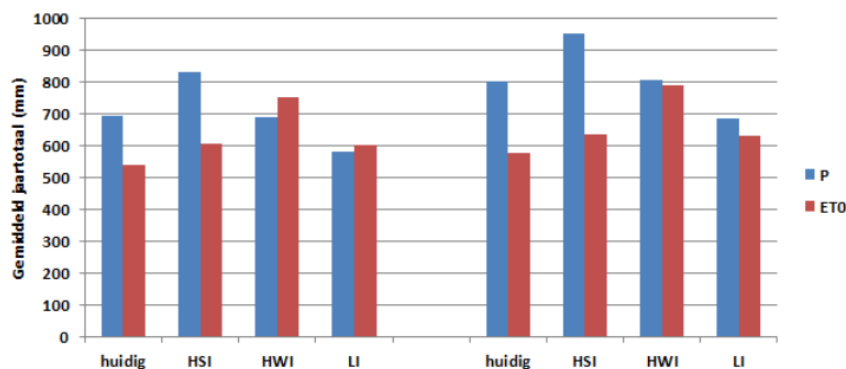
Voor 6 percelen waren continue bodemvocht- en grondwaterstandmetingen verricht en is het SWAP-model (Van Dam et al. 2008) toegepast om met behulp van de perceel-specifieke bodemfysische eigenschappen de bodemvochtbeweging en waterbalansen te simuleren (Van der Bolt et al. 2016). Gebruik is gemaakt van lokale neerslagdata als bovenrand en van de gemeten grondwaterstanden als onderrand. De eerste rekenresultaten zijn gebruikt om de modellen, met name de gewasfactor, te kalibreren. De gewassen gras, maïs en aardappelen zijn met het gewasgroeimodel WOFOST doorgerekend, de overige gewassen met het eenvoudig gewasgroeimodel van SWAP. Na de kalibratie zijn modelexperimenten uitgevoerd om de robuustheid van de pedotransferfuncties en de gevoeligheid van parameters te verkennen. Daartoe is gerekend met de door de pedotransferfuncties afgeleide tabellen, de hieraan gefitte Mualem-Van Genuchten-functies en de laatste in combinatie met een vaste grondwaterstand conform het Vlaanderenmodel voor deze bodems. Uiteindelijk zijn de rekenresultaten getoetst door deze te vergelijken met de op drie diepten gemeten vochtgehalten.

De simulaties met SWAP van het vochtgehalte op drie diepten gingen goed voor percelen met klei (E), leem (A) en zandleem (L), vrij goed voor het perceel met licht zandleem (P) en minder goed op de velden met zand (Z) en lemig zand (S). Verschillen tussen gemeten en gesimuleerde vochtgehalten konden vaak (deels) worden verklaard uit de verschillen tussen het vochtgehalte bij verzadiging op basis van metingen aan de bodemmonsters en het maximale in het perceel gemeten vochtgehalte bij verzadiging.

De toetsing aan de gemeten vochtgehalten op 3 diepten liet zien dat het SWAP-model bij gebruik van goede data in staat is gemeten vochtgehalten en de bodemvochtstroming goed te simuleren. Het gaf hiermee het vertrouwen dat het model te gebruiken is om met de database van bodemfysische gegevens met verschillende textuur en in niet-verdichte en verdichte toestand, de effecten van verdichte bodems te voorspellen.

### Klimaatscenario's voor stroomgebieden

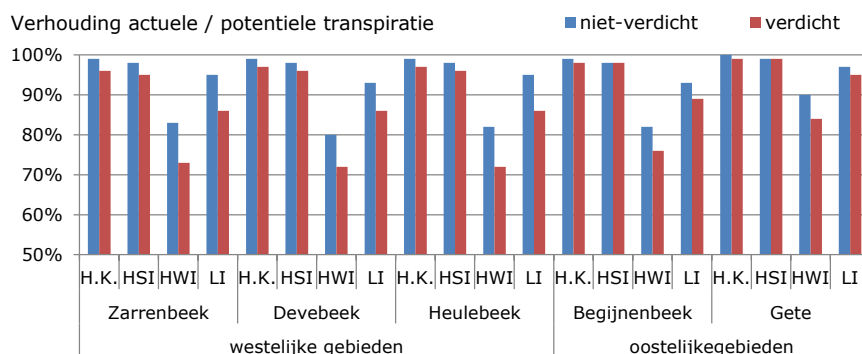
Met het SWAP-model is een verkenning uitgevoerd van het effect van bodemverdichting voor 5 stroomgebieden verkend in combinatie met 4 klimaatscenario's (Van der Bolt et al, 2016). De range van klimaatscenario's bestaat uit 4 klimaatscenario's die het domein omspannen en een indicatie geven van de onzekerheid van de klimaatscenario's. De potentiële maandelijkse verdamping in de zomer stijgt sterk voor het 'high winter'-scenario en stijgt matig voor het 'mean'-scenario (Figuur 3.6). Voor alle andere scenario's is er geen of slechts een beperkte stijging van de potentiële verdamping. De neerslag tijdens de zomer vertoont voor het 'high summer'-scenario een sterke stijging. Voor het 'high winter'- scenario is de stijging van de totale maandelijkse neerslag in de winter beperkter. De 'high winter'- en 'low'-scenario's voorspellen een daling van de neerslag in de zomer. Het 'mean'-scenario verschilt voor de totale maandelijkse neerslag slechts weinig van het referentiescenario.



**Figuur 3.6** Gemiddelde jaartotalen van neerslag P en potentiële evapotranspiratie ETO bij huidig klimaat en de klimaatscenario's 'high summer' (HSI), 'high winter' (HWI) en 'low' (LI) voor de westelijke gebieden Zarrenbeek, Devebeek en Heulebeek (links) en de oostelijke gebieden Gete en Begijnenbeek (rechts). Bron: Van der Bolt et al. (2016).

In de scenario's werd geen rekening gehouden met mogelijke veranderingen in wortelgroei, waterstressrespons van de vegetatie of andere teelten. Voor de vijf studiegebieden zijn simulaties uitgevoerd voor een periode van 11 jaar voor verdichte en niet-verdichte bodems bij huidig klimaat en onder drie klimaatscenario's.

Resultaten van de gesimuleerde verhouding tussen actuele en potentiële transpiratie zijn voor de scenario's weergegeven in Figuur 3.7.

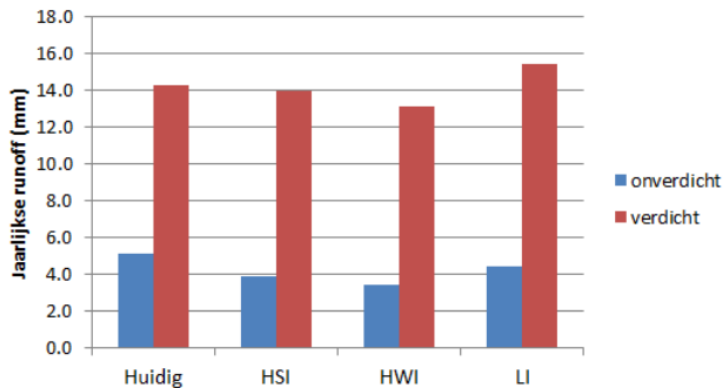


**Figuur 3.7** Verhouding tussen actuele en potentiële transpiratie bij huidig klimaat (H.K.) en de klimaatscenario's 'high summer' (HSI), 'high winter' (HWI) en 'low' (LI) voor de westelijke gebieden Zarrenbeek, Devebeek en Heulebeek (links) en de oostelijke gebieden Gete en Begijnenbeek (rechts). Bron: Van der Bolt et al. (2016).

Wanneer we de verhouding tussen de actuele transpiratie en de potentiële transpiratie zien als een indicator voor waterstress, blijkt dat de stress in alle klimaatscenario's groter is<sup>12</sup> dan bij ongewijzigd klimaat. Bij verdichting is er een kleine verhoging van de waterstress bij huidig klimaat, maar de waterstress neemt meer toe onder de klimaatscenario's bij verdichting dan in de niet-verdichte situatie. De verschillen zijn met name zichtbaar in het 'high winter'- en 'low'-scenario, en treden nauwelijks op in het 'high summer'-scenario. Aangezien het 'high winter'- en 'low'-scenario gekenmerkt worden door een hogere potentiële evapotranspiratie en geen of weinig (beperkt in de winter in 'high winter') toename in neerslag, kan men de toename in waterstress voornamelijk toeschrijven aan een toename in droogtestress.

<sup>12</sup> Lagere waarden voor verhouding actuele transpiratie / potentiële transpiratie duiden op grotere stress.

De gesimuleerde oppervlakkige afstroming met dagwaarden voor de neerslag als modelinvoer leverde onrealistisch lage waarden. Een aanvullende berekening voor de Heulebeek met uurwaarden voor de neerslag als modelinvoer liet een duidelijk effect zien van bodemverdichting op de oppervlakkige afstroming (Figuur 3.8).



**Figuur 3.8** Berekende jaarlijkse oppervlakkige afstroming (run-off) voor het gebied van de Heulebeek op basis van uurlijkse neerslag in 2008. Bron: Van der Bolt et al. (2016).

Uit Figuur 3.8 blijkt dat bij verdichting er een aanzienlijke toename (tot een factor 4 bij gebruik van uurlijkse neerslagdata) is in berekende oppervlakkige afstroming en dat dit effect sterker is dan het effect van klimaatscenario's. Daarbij moet worden gerealiseerd dat deze factor verder kan toenemen bij gebruik van neerslagdata voor kortere tijdintervallen zoals kwartierwaarden.

De resultaten van de berekeningen zijn als volgt samen te vatten:

- Onder de verschillende klimaatscenario's is de berekende transpiratie altijd hoger dan bij ongewijzigd klimaat. Bij verdichting neemt de transpiratie bij ongewijzigd klimaat af (in met name de westelijke stroomgebieden).
- Onder de klimaatscenario's is er een gewijzigde respons bij verdichting: de toename in transpiratie ligt lager in de verdichte situatie vergeleken met de niet-verdichte situatie. De berekende waterstress is onder alle klimaatscenario's hoger dan bij ongewijzigd klimaat. Bij verdichting is er een kleine verhoging van de waterstress bij huidig klimaat, maar de waterstress neemt meer toe onder de klimaatscenario's bij verdichting dan in de niet-verdichte situatie.
- Onder de klimaatscenario's is er minder afname in grondwatervoeding bij verdichting vergeleken met de niet-verdichte situatie. De berekende effecten op oppervlakkig afstroming zijn beperkt, waarschijnlijk mede door gebruik van de dagelijkse neerslag. Simulaties met uurlijkse neerslag voor één stroomgebied bevestigen dit.
- Het effect van verdichting op de waterhuishouding is op basis van de resultaten van de regionale simulaties beperkt. Bij scenario's van klimaatverandering is de reactie echter verschillend bij niet-verdichte en verdichte bodems en zijn de verdichte bodems droogtegevoeliger (relatief lagere transpiratie en meer toename in waterstress).

#### Synthese: effect van bodemverdichting op het watertransport in de bodem

De gesimuleerde effecten van bodemverdichting op de waterhuishouding waren beperkt. Dit neemt niet weg dat de lokale effecten aanzienlijk kunnen zijn, gelet op de grote variatie in bodemverdichting die binnen de percelen werd gemeten. De verschillen zijn beperkt tussen de verdichte en niet-verdichte situaties in stroomgebieden.

Bij klimaatverandering zijn de effecten van verdichting groter: klimaatscenario's leiden op verdichte bodems tot meer oppervlakkige afstroming en meer droogtegevoeligheid dan niet-verdichte bodems.

De effecten van bodemverdichting op het watertransport in de bodem van Vlaanderen lijkt beperkt te zijn. In de praktijk worden echter plassen op het maaiveld waargenomen die wijzen op een geringe infiltratiecapaciteit. Nu bodemverdichting niet direct een oorzaak lijkt van deze plasmvorming, wordt

---

geadviseerd te verkennen of slemp dan wel structuurbederf in de bouwvoor binnen een groeiseizoen de plasvorming kan veroorzaken. De effecten van deze verschijnselen zijn niet onderzocht in deze studie, maar verdienen wel nadere aandacht.

# 4 Effecten langjarige aanvoer organische stof

## 4.1 Inleiding

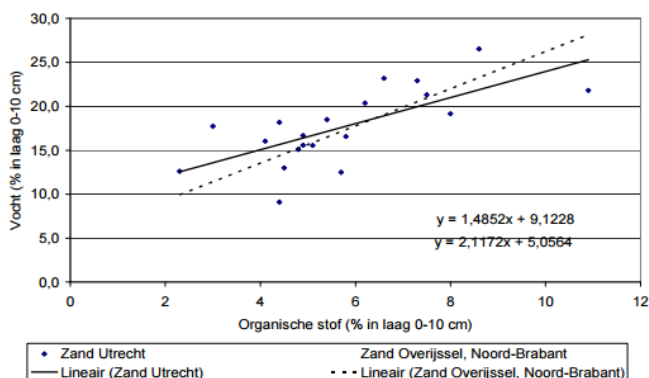
### 4.1.1 Effect op bodemwater

In het W+-scenario wordt voorspeld dat door klimaatverandering de grondwaterstand in de hoge zandgronden van Zuid-Nederland in de zomer tot enkele decimeters dieper kan uitzakken dan in het huidige klimaat. Gemiddeld neemt het vochttekort in het zomerhalfjaar toe van 36 naar 75 mm (Verhagen et al. 2012). De structuur, het bodemleven en het gehalte organische stof van de bodem zijn bepalend voor diensten als waterregulerend vermogen, weerstand tegen stress en ziekte- en plaagwering (TCB, 2012). Bodemorganische stof staat in de belangstelling als een mogelijkheid om effecten van klimaatverandering op het watersysteem te bufferen.

Onder landbouwers bestaan er zorgen over een veronderstelde afname van organische stofgehalten in landbouwbodems. Deze afname is niet geconstateerd in de analyses van Chardon et al. (2009), Reijneveld (2009) en Schils et al. (2012). In grote lijnen is er eerder sprake van een stabiele situatie of een lichte toename van het organisch stofgehalte in bodems. De organische stofgehalten zijn bij de meeste combinaties van grondsoort en gewas stabiel gebleven of vertonen een stijgende lijn. Op maïsland en ander bouwland op zandgrond komen wel situaties voor met dalende organische stofgehalten. Behalve de kwantiteit van organische stof is ook de kwaliteit van organische stof van belang voor de capaciteit van de bodem om nutriënten te bufferen.

Het effect van organische stof op de hoeveelheid beschikbaar water in de bodem varieert met het bodemtype. In zandgronden is de relatie tussen organische stofgehalte en vochthoudend vermogen het grootst, maar niet groter dan 15% van de variatie in bodemvocht. In bodems met een fijne textuur zoals klei, zorgt organische stof voor een afname in volumedichtheid, een toename in poriëgrootte en is een groter deel van de poriën gevuld met lucht, waardoor het vochthoudend vermogen zelfs kan afnemen (Loveland & Webb, 2003).

Een effect van een hoger organisch stofgehalte is dat door een intensiever bodemleven de infiltratiesnelheid toeneemt, waardoor hevige regenbuien beter verwerkt worden en het risico op afstroming kleiner is en dat beworteling door gewassen wordt gestimuleerd. Daarnaast is in zandgronden het beschikbaar vocht gecorreleerd met het organische stofgehalte (Figuur 4.1).



**Figuur 4.1** Relatie tussen organische stofgehalte in de laag 0-10 cm en het vochtpercentage in de laag 0-10 cm in Utrecht (Van Eekeren en Bokhorst, 2010) en in Overijssel en Noord-Brabant (Van Eekeren et al. 2010). Bron: Van Eekeren en Zaneveld Reijnders (2011).

De experimentele gegevens tussen beschikbaar vocht en het organische stofgehalte zijn vrijwel altijd verzameld op verschillende locaties. Het is niet mogelijk om vast te stellen of het organische stofgehalte de directe oorzaak is van een toename van het beschikbare vocht of dat de toename veroorzaakt wordt door verschillen in bodemtype en daarmee samenhangend verschillen in bodemstructuur. De relaties van Van Eekeren en Bokhorst (2010) en Van Eekeren et al. (2010) zijn daarom niet direct toe te passen op bodemverbeterende maatregelen waarmee het organische stofgehalte wordt verhoogd. De toegepaste relaties in De Lijster et al. (2016)<sup>13</sup> missen daarmee een onderbouwing. Janssen (1995) geeft aan dat een verhoging van het organische stofgehalte zou kunnen leiden tot een verhoging van het beschikbare vocht in de bodem van enkele procenten.

#### 4.1.2 Effectieve organische stof

Effectieve organische stof (EOS) is de hoeveelheid organische stof die één jaar na toediening van verse organische stof nog over is in de bodem en dan deel uitmaakt van de bodem-organische stof. Om het organische-stofgehalte in de bodem te handhaven, moet er evenveel effectieve organische stof (EOS) worden aangevoerd als de hoeveelheid humus die wordt afgebroken. Als vuistregel gaat men ervan uit dat een aanvoer van ca. 2 ton ha<sup>-1</sup> effectieve organische stof nodig is om de afbraak van bodem organische stof te compenseren. Gewasresten van snijmaïs kunnen voor een klein deel in de aanvoerbehoefte voorzien. Gewasresten van granen kunnen bij het achterlaten van stro ruim in deze behoefte voorzien. Een andere bron voor EOS is de aanvoer van dierlijke mest of compost.

Verse organische stof bevat o.a. stikstof en fosfor. Als de verse organische stof uit externe bronnen (stalmest, compost, etc.) wordt aangevoerd, telt deze stikstof en fosfor mee in de berekening van de mestgebruiksruimte van een agrarisch bedrijf. De stikstof en fosfor in verse organische stof in de vorm van plantenresten die achterblijven tellen niet mee in de berekening van de mestgebruiksruimte. De hoeveelheid mest en compost die op een perceel gebracht kan worden, is dus gelimiteerd door de mestnormen. In Tabel 4.1 is een overzicht gegeven van de maximum dosering van verschillende vormen van organische stof op een snijmaïspanceel in het zuidelijke zandgebied. Verondersteld is dat de fosfaattoestand van de bodem "neutraal" is (Pw in de range 36–55 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond). Voor werkzame stikstof geldt dan volgens de regels van het 5<sup>e</sup> Actieprogramma Nitraat een gebruiksnorm van 112 kg ha<sup>-1</sup> en voor fosfaat een gebruiksnorm van 60 kg ha<sup>-1</sup>.

**Tabel 4.1** Stikstof en fosfaatgehalten in organisch stofbronnen en daarvan afgeleid de maximum dosering.

Organische stofbron	Gehalten				Maximum toediening				
	N-werking <sup>14</sup>	Org. stof	N-totaal	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fosfaat	Werkz. stikstof	Vers product	Org. stof	EOS
	%	kg per ton vers product			kg ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup>		ton ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup>		
<b>Rundermest</b>									
drijfmest	60	71	4.0	1.5	60	96	40.0	2.8	2.0
Vast	40	155	7.7	4.3	60	43	14.0	2.2	1.5
dunne fr. hoog rend.	80	32	3.2	0.8	35	112	43.8	1.4	1.0
dunne fr. laag rend.	80	50	4.1	1.2	41	112	34.1	1.7	1.2
dikke fractie r.m.	40	188	7.8	4.4	60	43	13.6	2.6	1.8
<b>Varkensmest</b>									
drijfmest	80	79	7.0	3.9	60	86	15.4	1.2	0.4
dunne fr. hoog rend.	80	22	6.1	2.4	55	112	23.0	0.5	0.2
dunne fr. laag rend.	80	34	6.7	3.6	60	89	16.7	0.6	0.2
dikke fractie	55	116	10.5	12.4	60	28	4.8	0.6	0.2
GFT-compost	10	242	8.9	4.4	100 <sup>15</sup>	20	22.6	5.5	4.1
Champost	25	211	7.6	4.5	98	41	21.8	4.6	2.3

<sup>13</sup> Rekenregel: 1% extra organische stof in de bodem draagt bij aan 6,8 mm extra waterberging op zandgrond en 9,3 mm op kleigrond.

<sup>14</sup> Forfaitaire werkingscoëfficiënten zoals gepubliceerd op <http://www.rvo.nl/>

<sup>15</sup> Voor compost met een laag fosfaatgehalte bestaat een uitzondering. Hiervoor geldt een fosfaatvrije voet. Tot een fosfaatgehalte van 3,5% telt 50% van de fosfaat mee in het berekenen van de gebruiksruimte en daarboven telt 100% mee.

Uit Tabel 4.2 is af te lezen dat, met uitzondering van de dunne fractie van rundermest en de dunne fractie van varkensmest, gescheiden met een hoog rendement, altijd de fosfaatnorm van 60 kg ha<sup>-1</sup> beperkend is voor de toevoer van dierlijke mest. Voor compost geldt de regel dat het fosfaatgehalte tot 3,5% voor 50% meetelt in de berekening van de fosfaatgebruiksruimte en het deel daarboven voor 100%. Dit leidt ertoe dat ca 100 kg ha<sup>-1</sup> fosfaat aangevoerd kan worden met gft-compost en champost. Deze dosering correspondeert met een aanvoer van ca. 200 kg ha<sup>-1</sup> stikstof met gft-compost en 166 kg ha<sup>-1</sup> stikstof met champost.

#### 4.1.3 Beschikbaarheid organische reststromen in Nederland

Voor de beoordeling van het effect van de langjarige aanvoer van organische stof naar de bodem is het van belang te weten in welke mate organische stof uit reststromen beschikbaar is. In opdracht van directie Duurzaamheid van het ministerie van I&M is door Natuur & Milieu een onderzoek uitgevoerd naar de betekenis van biotische reststromen voor bodemvruchtbaarheid (Gombault et al, 2016). Het rapport bevat een tabel waarin de informatie over beschikbaarheid, huidig gebruik en een globale beoordeling van de geschiktheid als bodemverbeteraar van reststromen in Nederland is weergegeven.

**Tabel 4.2** Reststromen in Nederland: beschikbaarheid, huidig gebruik en globale beoordeling van geschiktheid als bodemverbeteraar (bron: Gombault, 2016).

(Rest)stroom	Beschikbaarheid	Geschiktheid	gebruik	Bron
Groenafval, incl. houtsnippers, maaisel riet, maaisel gras	> 2,5- 3 mln. ton 0,8 mln. ton Potentie 7 ton ds/ha Potentie 5 ton ds/ha	Ja, vnl. OS-opbouw Bermgras is niet altijd geschikt	Compost, soms biogas, stromen uit natuurgebieden blijven veelal achter op het land	JR, AB
Gft-afval	1,3 mln. ton	Ja, vnl. OS-opbouw	Biogas, compost (0,6 mln. ton)	JR, TNO <sup>7</sup>
Stromen uit aardappel-industrie (o.a. stoomschillen en persvezels)	0,8 mln. ton (schillen en persvezels)	Gecomposteerde gewasresten, aardappelsap, slib	Biogas, veevoer, vezels, humane voeding, compost	AB, PBr, TNO <sup>5</sup> , WUR <sup>8</sup>
Stromen uit suikerbietenfabriek (vnl. pulp, melasse, Betacal)	0,4 mln. ton perspulp 0,3 mln. ton Betacal	Ja, pulp en Betacal (structuur, OS en kalk)	Pulp: veevoer en biogas Melasse: vinasse (biologische kalimeststof) Betacal: bodem, dekaarde t.b.v. champignonsteelt	AB, PBs, TNO <sup>5</sup> , WUR <sup>6</sup>
Bierborstel	0,5 mln. ton	Nee	Biogas, veevoer	TNO <sup>5</sup>
Champost	0,8 mln. ton	Ja, van belang voor opbouw EOS	Compost	JR, TNO <sup>5</sup>
Gewasresten (tuinbouw)	0,2 mln. ton	Ja, levert veelal jonge organische stof	Blijft achter op land, compost	TNO <sup>5</sup>
Stro	1,1 mln. ton	Ja	Blijft achter op land, veehouderij, biogas	TNO <sup>5</sup>

JR: interview Jan Roefs, ZLTO en teler

AB: interview Arjen Brinkman, BVOR

PBr: interview Pieter Brooijmans, Suikerunie/Consun

PBs: interview Peter Bruinenberg, Avebe

<sup>5</sup> Bespreking ministerie EZ over verslag Jaar van de Bodem, hoe verder, dec 2015

<sup>6</sup> Werken aan oude kracht (2013), masterplan mineralenmanagement, een initiatief van LTO Nederland, de Nederlandse Akkerbouw Vakbond en het Productschap Akkerbouw

<sup>7</sup> TNO-Rapport 2013 R10864 – Kansen voor de circulaire economie in Nederland.

<sup>8</sup> WUR Rapport 1200 – De beschikbaarheid van biomassa voor energie in de agro-industrie (<http://edepot.wur.nl/163580>)

Grasland verrijkt de bodem met organische stof en heeft geen behoefte aan aanvullende aanvoer. Veengronden hebben evenmin behoefte aan aanvullende aanvoer. Snijmaïs, akkerbouwgewassen en vollegrondsgroenteteelt hebben vaak wel een behoefte aan aanvoer van EOS en het oppervlak van deze gewassen op zand-, löss- en kleigrond bedraagt ca. 800 000 ha. De beschikbaarheid aan groenafval en gft-afval bedraagt meer dan 4 mln. ton (conservatieve schatting) en daarmee kunnen de genoemde gewassen een gift van ca 5 ton ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>. Bij selectief gebruik (gronden met een laag

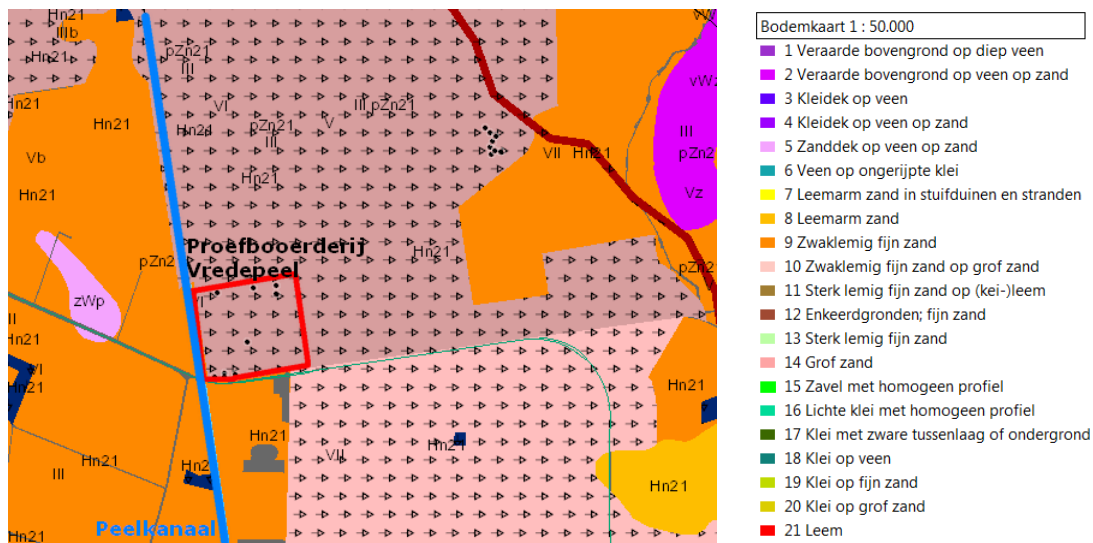


organisch stofgehalte) is de beschikbaarheid groot genoeg om jaarlijks 10 ton ha<sup>-1</sup> toe te dienen. Bijlage 10 bevat een overzicht van geïdentificeerde belemmeringen en kansen zoals genoemd door Gombault et al. (2016).

## 4.2 Experimenten op proefboerderij Vredepeel

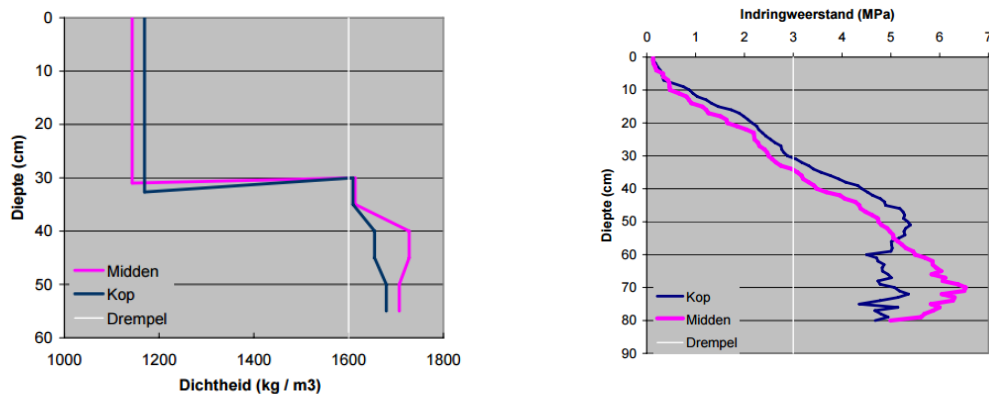
### 4.2.1 Gebiedsbeschrijving

Het proefbedrijf Vredepeel ligt 3 km ten zuidoosten van Rips langs het Peelkanaal op 27.50 m +NAP. De percelen van proefboerderij Vredepeel zijn gelegen op jonge ontginningsgrond, die in de periode 1951-1955 grotendeels in handontginning is gereedgemaakt (Hellings, 1965). Het Peelkanaal werd in 1939-1940 aangelegd tussen Griendtsveen en het riviertje De Raam en maakt deel uit van De Peel-Raamstelling. De bodemkundige toestand van de percelen van de proefboerderij volgens de kaart 1:50000 is weergegeven in Figuur 4.2.



**Figuur 4.2** Overzicht van de bodems in het gebied van het proefbedrijf Vredepeel.

Vrijwel het gehele terrein bestaat uit humuspodzolgronden. Plaatselijk worden over kleine oppervlakten gronden aangetroffen zonder duidelijke podzol-B-horizont, de zgn. gooreerdgronden. De bovengrond bestaat uit leemarm matig fijn zand en de ondergrond uit leemarm of zwak lemig matig fijn zand. (Stiboka, 1969). Volgens de bodemkaart wordt de grondwaterstand gekarakteriseerd door grondwatertrap VI. De Vos et al. (2002) maken melding van een hoge waarde van de bulkdichtheid van 1740 kg m<sup>-3</sup> op ca. 70 cm -mv. Dit zou kunnen wijzen op verdichting. Ook Van den Akker en De Groot (2008) maken melding van een risico op ondergrondverdichting. In hun oriënterend onderzoek bepaalden zij bulkdichtheden en de indringingsweerstand van perceel 18 (Figuur 4.3).



**Figuur 4.3** Dichtheid en indringingsweerstand als functie van de diepte gemeten in perceel 18 door Van den Akker en de Groot (2008).

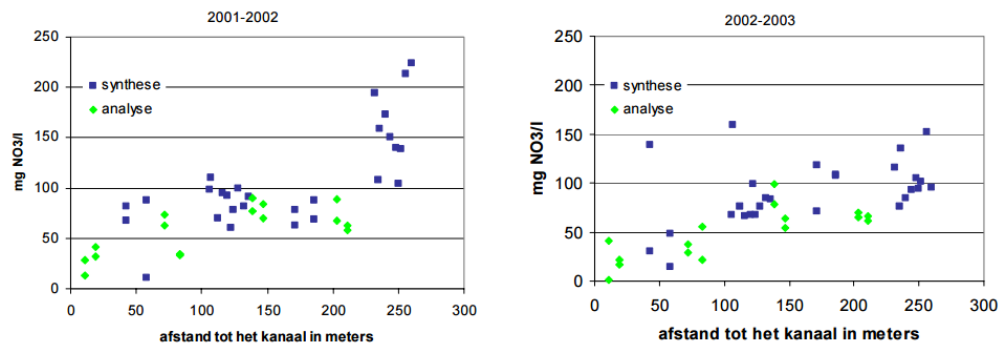
Van den Akker en De Groot (2008) vergeleken de gemeten dichtheden met door Hamminga et al. (1994) gerapporteerde dichtheden en kwamen tot de conclusie dat dichtheid van de ondergrond in 2006 hoger was dan in 1992.

De beschrijvingen van de geohydrologische opbouw verschillen van elkaar in enkele details. Meinardi (1988) beschrijft de geohydrologie op een punt in een bosperceel op ruim een kilometer ten zuidoosten van het bedrijf. In een Arcadis achtergrondrapport "Water en bodem" over de aanleg van een aardgastransportleiding, wordt voor de omgeving van het proefbedrijf een geohydrologische indeling gegeven van "2 à 12 meter fijn zand met leem- en veenlenzen, op een pakket bestaande uit grof zand, grind en klei- en leemlenzen" (Arcadis, 2009). Van Beek et al. (2005) vermelden de bodemopbouw als volgt, gebaseerd op een beschrijving van de Rijks Geologische Dienst, 1975):

0 – 0.6 m – m.v.	Zand, Matig fijn, humeus, lichtbruin, ingesloten enkele recente wortelresten
0.6 – 1.5 m – m.v.	Zand, fijn, lichtgeel
1.5 – 2.0 m – m.v.	Zand, fijn, lichtgrijs
2.0 – 2.7 m – m.v.	Zand, matig fijn, zwak lemig, zwak humeus, bruin
2.7 – 3.2 m – m.v.	Veen
3.2 – 5.5 m – m.v.	Zand, matig fijn, humeus, donkerbruin
5.5 – 7.8 m – m.v.	Zand, zeer grof, bruingrijs, met weinig overwegend wit kwartzand
> 7.8 m – m.v.	Grond, fijn en grof

De veenlaag op 2.7 m –m.v. is slecht doorlatend en vormt hiermee een fysische barrière voor verticaal transport van water en stoffen. De weerstand van de veenlaag werd op 100 dagen geschat (Van Beek et al. 2005).

Het Peelkanaal heeft een duidelijke invloed op de ontwatering en de grondwaterstanden. Het peil in het kanaal ligt meer dan 2 m onder het maaiveld van de proefvelden. De percelen 16 t/m 19 en de percelen 28 en 29 (zie Figuur 4.4) zijn voorzien van drainbuizen. Smit et al. (2004) laten duidelijk zien dat de nitraatconcentraties gecorreleerd zijn aan de afstand tot het Peelkanaal.



**Figuur 4.4** Nitraatconcentraties gemeten in het 'Telen met Toekomst'-onderzoek te Vredepeel op verschillende afstanden van het Peelkanaal in twee uitspoelseizoenen. Bron: Smit et al. (2004).

Dit verband zou mogelijk verklaard kunnen worden door het wel of niet aanwezig zijn van buisdrainage. Op grotere afstand tot het Peelkanaal zijn de percelen niet gedraineerd. Als een deel van het neerslagoverschot aan het begin van het uitspoelseizoen wordt afgevoerd door drainbuizen, wordt ook nitraat afgevoerd en heeft het water dat naar het grondwater uitspoelt gemiddeld lagere nitraatconcentraties dan in de situatie zonder buisdrains.

Na afloop van het onderzoeksprogramma Telen met Toekomst in 2004 is in alle onderzoekspercelen buisdrainage aangelegd met een onderlinge afstand van 6 m en een diepte van 70–80 cm (De Haan, 2016, pers. comm.). De ijking van het model en de scenario's zijn gebaseerd op de situatie voordat de buisdrainage werd aangelegd.

#### 4.2.2 Overzicht van studies met gegevens van Vredepeel

Het proefbedrijf Vredepeel werd direct na de ontginning in 1956 gesticht op initiatief van de Subcommissie voor het onderzoek van de verdroging en verstuiwing in Midden- en Noord-Limburg. In 1958 werd gestart met experimenten met beregening en sub-infiltratie (Hellings, 1965). In de loop der jaren hebben verschillende projecten en onderzoeksprogramma's gebruikgemaakt van de faciliteiten van het proefbedrijf:

- In de periode 1989–1993 en de periode 1993–1999 zijn in twee fasen diverse onderzoeken uitgevoerd met akker- en tuinbouwvruchtwisselingen en onderzoek naar gewasbeschermingsmiddelen in het kader van het MJPG.
- In de periode 2000–2004 zijn diverse onderzoeken uitgevoerd in het kader van het programma Telen Met Toekomst.
- In de periode 2005–2009 zijn de effecten van een aantal waterbeheersmaatregelen op de nutriëntenhuishouding en uitspoeling onderzocht in het kader van Nutriënten Waterproof.
- In de periode 2010–2015 zijn onderzoeken uitgevoerd in het kader van het programma Bodemkwaliteit Zandgronden.

Tabel 4.1 geeft een niet volledig overzicht van rapporten, publicaties en brochures die verschenen zijn naar aanleiding van onderzoeksresultaten behaald op het proefbedrijf.

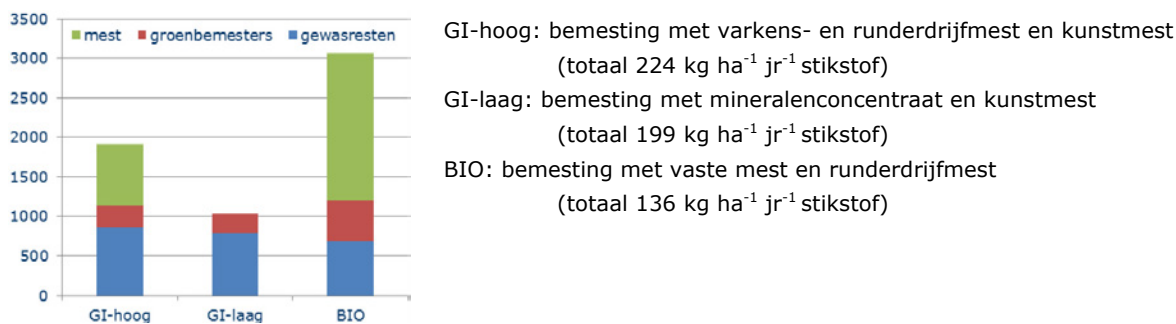
**Tabel 4.3** Gerapporteerde studies uitgevoerd in de periode 2000–2015 in het systeemonderzoek van proefbedrijf Vredepeel.

Auteurs	Onderwerp
Assinck, F.B.T. en P. de Willigen, 2004	Modelberekeningen met FUSSIM2 & MOTOR: 1.toetsing 2.ruimtelijk extrapolatie 3. maatregelen
Berg, M. v.d. en M.M. Pulleman, 2003	Kwaliteit van grond- en oppervlaktewater
Dijk et al. 2007	
Dijkstra et al. 1995	Simulatie ANIMO vocht en nitraat 1990-1993
Ehlert, P. & G. Koopmans, 2002	Fosfaattoestanden praktijkbedrijven
Ehlert, P. & G. Koopmans, 2004	Fosfaatkarakteristiek kernbedrijf Vredepeel
Geel, W.C.A. van & J.J. de Haan, 2007	Effecten o.s.fbeheer in Nutriënt Waterproof
Geel, W.C.A. van, et al. 2011	Opbrengstvergelijking Nutr. Waterproof
Groenigen, et al. 2005	N2O metingen
Haan, J.J. de & Sukkel 2007	Bemesting & bodemkwaliteit op zandgrond
Haan, J.J. de, van Geel, 2010	Nutriënten Waterproof
Haan, J.J. de, 2014	Bodemkwaliteit op zandgrond 3
Haan, J.J. de, van Asperen, 2016	De bodem weerloos en weerbaar
Hospers-Brands & Van der Burgt, 2013	NDICEA 25jaarscenarios basis 2005-2010
Postma, R., 2002	Organische stofopbouw en N-mineralisatie op kernbedrijven; toetsing model Janssen
Postma, R. & T.A. van Dijk, 2004	Toetsing MINIP(2002, 2003)
Postma et al, 2004	Modeltoepassing MINIP met berekening aanvoer groencompost
Smit, A., K. Zwart & J. van Kleef, 2003	N-Mineralisatie
Smit, A., K. Zwart & J. van Kleef, 2004	Grondwaterkwaliteit N 2001-2003
Stolk&Kroes	SWAP-WOFOST-ANIMO toets 2002
Visser, J.R. van der Schoot, G. Korthals & J. de Haan, 2014	T nul meting 2011. Opmerkingen: veel verschillende behandelingen (pag. 14)
De Vos, et al. 2002	Hydraul.karakteristieken
De Vos, et al. 2003	Invloed waterh. N- en P-verliezen
Vos, J.A. de & F.B.T. Assinck, 2004	Nitraatuitspoeling 2002, 2003
De Vos, et al. 2006	Veldexperim N- en P-verliezen vernatting
Zwart, K.B., A. Smit & C. Rappoldt, 2002	Denitrificatie
Zwart, K.B., 2003	Denitrificatie in de bouwvoor en de ondergrond

#### 4.2.3 Proeven met drie systemen

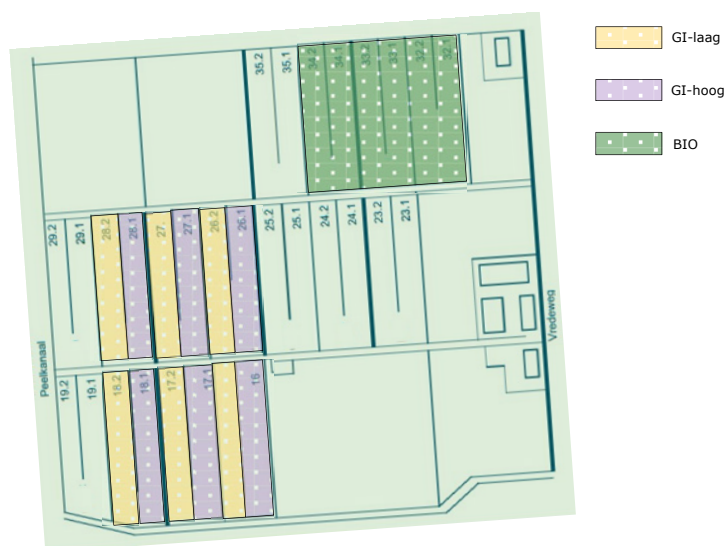
In de verschillende onderzoeksperioden is aan de systemen een verschillende naam gegeven. In het onderzoeksprogramma "Bodemkwaliteit op Zand" dragen de systemen de naam "Standaard", "Laag" en "Hoog", maar in dit rapport gebruiken we de namen "GI-hoog", "GI-laag" en "BIO", omdat dit aansluit bij de meerderheid van de informatie die te vinden is in rapporten en andere publicaties.

Op een aantal kavels is vanaf het programma 'Telen met Toekomst' een min of meer constant beheer van bemesting en aanvoer van organische stof gehandhaafd om verschillende systemen met elkaar te kunnen vergelijken (Figuur 4.5).



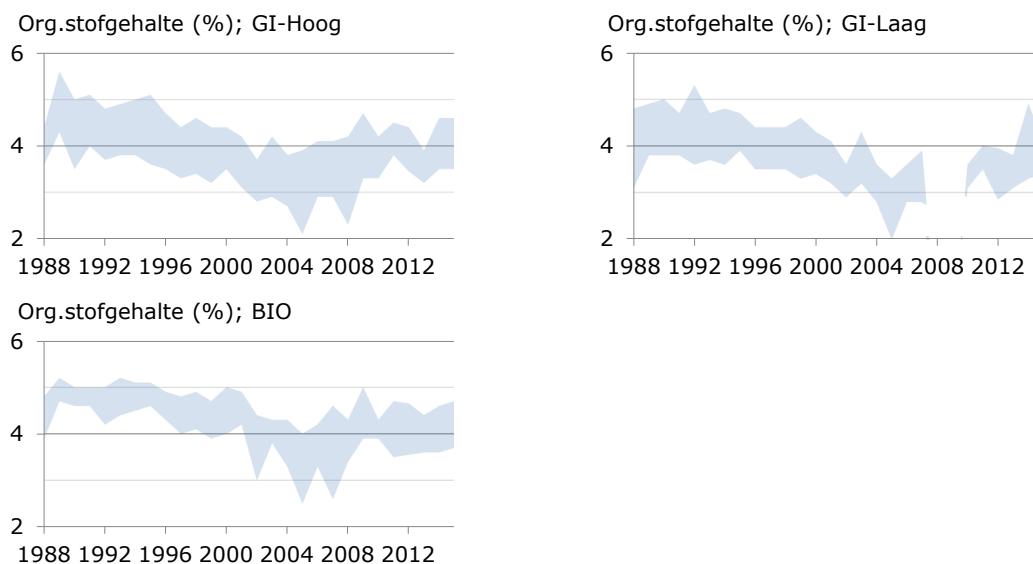
**Figuur 4.5** Jaarlijkse aanvoer van effectieve organische stof in drie teeltsystemen van het Proefbedrijf Vredepeel. Bron: De Haan et al. 2015. (<http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/385692>) en De Haan en Versteegen, 2015 ([http://www.handboekbodemenbemesting.nl/upload\\_mm/a/9/6/70418662-700f-49c8-818e-c9465aaefe94\\_Artikel%20tuinbouwrelatiedagen%20Venray.pdf](http://www.handboekbodemenbemesting.nl/upload_mm/a/9/6/70418662-700f-49c8-818e-c9465aaefe94_Artikel%20tuinbouwrelatiedagen%20Venray.pdf))

De ligging van de drie systemen op het proefbedrijf is aangegeven in Figuur 4.6.



**Figuur 4.6** Plattegrond van de percelen op het Proefbedrijf Vredepeel en de ligging van de drie systemen.

Binnen de drie systemen vindt een vruchtwisseling plaats, zodat in een jaar op de verschillende percelen verschillende gewassen kunnen staan. Daarnaast wordt sinds 2010 in het programma Bodemkwaliteit Zandgronden onderzoek gedaan naar het effect van niet-kerende grondbewerking. Binnen een systeem wordt een deel van de percelen geploegd, terwijl op een ander deel niet-kerende grondbewerking wordt toegepast. De percelen zijn niet allemaal jaarlijks bemonsterd geweest op organische stofgehalte van de bodem. In Figuur 4.7 is de bandbreedte aangegeven van de gemeten organische stofgehalten in de drie systemen.



**Figuur 4.7** Bandbreedte van organische stofmetingen in de bodem van drie systemen van proefbedrijf Vredepeel.<sup>16</sup>

In de drie systemen vond tussen 1988 en 2005 een daling plaats van het organische stofgehalte van ca. 0,06% per jaar. In de periode 2005–2010 lijkt in de drie systemen een lichte stijging te zien. In Figuur 4.7 wordt het beeld voor de periode 2005–2010 medebepaald door de lage waarde voor het minimum in 2005. Of daadwerkelijk sprake is van een stijging in de periode 2005–2010 en wat hiervan de oorzaak zou kunnen zijn, is onduidelijk. Als er sprake zou zijn van een stijging is deze niet te verklaren uit een verschil in de systemen, want de stijging treedt behalve in GI-hoog en BIO ook op in GI-laag. Na 2010 lijkt het organische stofgehalte stabiel te zijn. De periode is nog te kort en de variatie is te groot om verschillen tussen de systemen te kunnen onderscheiden.

De daling tussen 1988 en 2005 zou het gevolg kunnen zijn van na-ijling van de recente ontginning. Het organische stofgehalte was in de eerste vijftig jaar na ontginning nog niet in evenwicht en de afbraak was groter dan de jaarlijkse aanvoer met gewasresten en meststoffen. De Ruijter en Wilms (2007) geeft een waarde van 13 voor de C/N ratio en 84 kg ha<sup>-1</sup> als waarde voor het stikstof-leverend vermogen van de veldjes met een aardbeienproef in 2007. Alhoewel deze aardbeienproef niet op een van de in deze studie beschouwde proefvelden is uitgevoerd (De Haan, 2016, pers. comm.), ligt deze waarde wel in de range van wat verwacht kan worden bij een daling van het organische stofgehalte van ca. 0,06% per jaar zonder aanvoer van organische stof met dierlijke mest of compost. De stikstoflevering is te beschouwen als een achtergrondwaarde die ook zal optreden als geen aanvoer plaatsvindt van stikstofhoudende organische stof, in de vorm van gewasresten en dierlijke mest.

De trendbreuk van het organische stofverloop is waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van factoren, waarbij niet duidelijk is hoe groot de invloed van elk van de factoren is geweest:

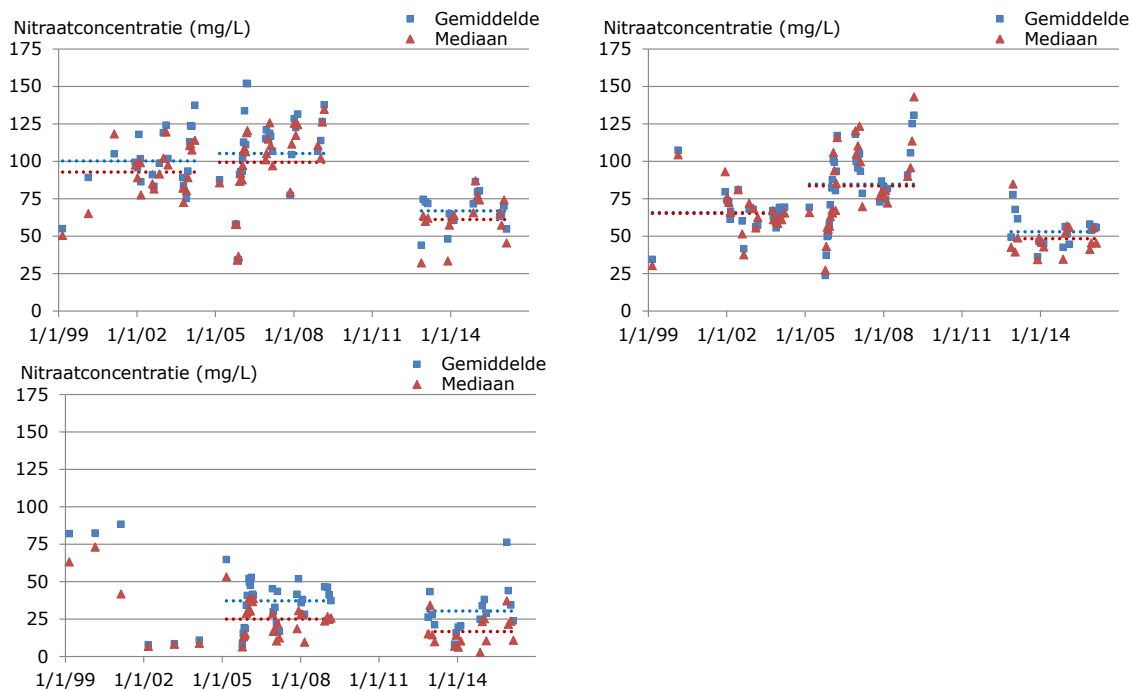
- In deze periode is het Bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewasonderzoek (BLGG) overgegaan op een andere analysemethode voor organische stofbepalingen.
- Na 2005 is de organische stofaanvoer met dierlijke mest toegenomen.

Postma et al. (2004) gaven op basis van een modelstudie aan dat voor het teelt- en bemestingsplan dat vanaf 1993 is gerealiseerd, over een periode van 50 jaar een afname van het organische stofgehalte van 4,1 naar 3,4% zou optreden. Om het organische stofgehalte te handhaven, was een aanvoer van 6 ton droge stof ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> met groencompost nodig. Hospers-Brands en Van der Burgt (2013) geven in hun modelverkenning aan dat bij continuering van een jaarlijkse compostgift van

<sup>16</sup> Voor de periode 2008–2010 waren voor het GI-laag systeem onvoldoende gegevens over organische stofgehalten ter beschikking van de auteurs van dit rapport ten tijde van het onderzoek. Later bleken voor deze jaren wel gegevens beschikbaar te zijn in andere databestanden. Deze nieuwe gegevens hebben geen invloed op de bandbreedte en de trends en beïnvloeden de conclusies niet.

10 ton ha<sup>-1</sup> het organische stofgehalte zou stijgen, maar ook dat de opslag van stikstof nog lang kan doorgaan, waardoor de mineralisatie met 50 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> kan toenemen. Als deze extra hoeveelheid beschikbare stikstof niet gepaard gaat met een verlaging van mestgiften kan het tot extra uitspoeling leiden (Hospers-Brands en Van der Burgt, 2013).

Nitraatmetingen in de drie systemen laten opmerkelijke verschillen zien (Figuur 4.8).



**Figuur 4.8** Gemiddelde en mediane nitraatconcentraties van meetlocaties 2, 4 en 7 op de percelen van de systemen GI-hoog (links); GI-laag (rechts) en BIO (onder) van het proefbedrijf te Vredepeel.

In de periode 1998–1999 was de meetfrequentie te laag om verschillen in metingen te onderscheiden. De metingen van GI-hoog en GI-laag laten voor die periode en grote variatie zien. In de periode 2000–2004 lagen de nitraatconcentraties van GI-hoog aanmerkelijk hoger dan van GI-laag. Van het BIO-systeem zijn uit die periode weinig metingen beschikbaar. In de periode 2001–2003 is in het BIO-systeem één keer per jaar gemeten.

Het tijdvak 2005–2008 is de eerste periode waarin de nitraatconcentraties met elkaar te vergelijken zijn. Hierin is duidelijk te zien dat de gemiddelde nitraatconcentratie in het grondwater van het GI-hoog systeem hoger is dan 100 mg L<sup>-1</sup>. Onder het GI-laag systeem en het BIO systeem is de gemiddelde concentratie ca. 85 mg L<sup>-1</sup> en ca. 40 mg L<sup>-1</sup>. Of dit een effect is van het verschil in systemen is moeilijk te duiden. Het is moeilijk om metingen te selecteren die kunnen dienen als representatief voor een nulsituatie:

- In de beginperiode waarin nog geen effect van de systemen te verwachten is, zijn de nitraatconcentraties in GI-laag al lager dan in GI-hoog.
- Voor deze periode zijn van het BIO systeem te weinig gegevens beschikbaar.
- In 2004 is in alle percelen buisdrainage aangelegd. Het is niet duidelijk of de buizen daadwerkelijk water en nitraat hebben afgevoerd.

Vanaf 2005 is er een duidelijk verschil. De nitraatconcentraties in de periode 2012 t/m 2015 waren binnen de systemen duidelijk lager dan de concentraties in de periode 2005 t/m 2008. Verder is er sprake van een afname in de tijd in alle drie systemen. Het systeem BIO had zowel in de periode 2005 t/m 2008 als in de periode 2012 t/m 2015 nitraatconcentraties lager dan 50 mg/L. Het systeem GI-laag had in de periode 2005 t/m 2008 een gemiddelde concentratie hoger dan 50 mg/L, maar in de periode 2012 t/m 2015 een gemiddelde nitraatconcentratie op het niveau van ca. 50 mg/L.

---

Opmerkelijk is het grote verschil tussen de gemiddelde en de mediane waarde in het systeem BIO. Een gemiddelde waarde hoger dan de mediane waarde wijst erop dat het gemiddelde medebepaald wordt door een of enkele uitschieters met hoge concentraties.

## 4.3 Modelberekeningen met SWAP-WOFOST

Voor de beantwoording van de kennisvraag "Wat zijn de langetermijneffecten van maatregelen ter verhoging van het organische stofgehalte op de vochtbeschikbaarheid, de gewasopbrengst en de nitraatuitspoeling?" is een studie uitgevoerd met het SWAP-WOFOST-model dat een combinatie is van een agrohydrologisch model en een gewasgroeimodel. Aan dit model is recentelijk een module voor stikstofleverantie door de bodem aan het gewas toegevoegd (Groenendijk et al. 2016). Deze module kan ook de dynamiek van de organische stof in de bodem en de uitspoeling van nitraat uit de wortelzone berekenen. SWAP-WOFOST sluit aan bij de effectmodule die voor onderzoeksprogramma Waterwijzer (actualisatie HELP-tabellen) wordt ontwikkeld.

De kennisvraag is nader gespecificeerd in de onderzoeksvragen:

- Welk effect heeft de vervanging van een deel van dierlijke mest door compost – waardoor extra organische stof kan worden aangevoerd – op het organische stofgehalte, de opbrengsten en de nitraatuitspoeling?
- Welke andere effecten heeft het biologische teeltsysteem met aanvoer van compost en maximale inzet van vanggewassen op het watersysteem?

### 4.3.1 Methoden

De onderzoeksvragen zijn beantwoord door het simulatiemodel toe te passen op een gestileerde wijze op de drie teeltsystemen GI-hoog, GI-laag en BIO. Op basis van de gegevens van verschillende proefvelden van de drie teeltsystemen zijn keuzes gemaakt voor deze gestileerde rekenwijze. Er zijn geen simulaties uitgevoerd van de teelt en de bodemprocessen van concrete velden, omdat:

- de proefvelden in de loop der jaren voor verschillende onderzoeksdoelen zijn gebruikt. Het GI-laag, GI-hoog en BIO systeem hebben in hoofdlijn wel een behandeling gehad gericht op een bemestingsregime met respectievelijk minerale mest, drijfmest en rundermest (vaste en drijfmest), maar daar moest soms van worden afgeweken als de omstandigheden daartoe aanleiding gaven. Ook zijn binnen de systemen deelonderzoeken uitgevoerd met verschillende mestsoorten en vormen van grondbewerking.
- het vruchtwisselingsplan niet permanent was, maar varieerde in de loop van de tijd. Daarom zijn in een modelstudie de effecten van verschillende teelten moeilijk met elkaar te vergelijken.
- in de vruchtwisselingen groentegewassen voorkwamen waarvoor het gewasgroeimodel WOFOST nog geen parameters heeft.
- binnen de systemen zich verschillen in waterhuishouding voordoen. Een deel van de velden van GI-hoog en GI-laag is voorzien van buisdrainage. Het is niet bekend welk deel van het neerslagoverschot door de drainbuizen wordt afgevoerd. Het BIO systeem ligt NNO ten opzichte van het GI-laag en GI-hoog systeem en wordt niet gedraineerd en wordt minder beïnvloed door het Peelkanaal.

De argumenten in deze lijst leidden tot twee concrete keuzen in de modelaanpak:

1. Voor de drie teeltsystemen zijn proefvelden gekozen die voor de hydrologische omstandigheden zo veel mogelijk op elkaar lijken. Omdat binnen de velden van het BIO-systeem hydrologisch gezien minder variatie is, zijn de hydrologische omstandigheden van deze velden als leidend genomen: relatief ver van het Peelkanaal gelegen en niet met drainbuizen gedraineerd. Dit geeft de volgende keuze van de proefpercelen:
  - GI-hoog: percelen 26.1 en 27.1 (inclusief de subvarianten a en b);
  - GI-laag: percelen 26.2 en 26.2 (inclusief de subvarianten a en b);
  - BIO: percelen 32.1, 32.2, 33.1, 33.2, 34.1 en 34.2 (inclusief de subvarianten a en b).



- 
2. Voor de gewasrotatie van de drie systemen is een vaste 4-jarige vruchtwisseling aangehouden met akkerbouwgewassen. Daarin wijkt de modelberekening af van de praktijk op het proefbedrijf, waarin de vruchtwisseling niet permanent was en ook meestal ruimer met groentegewassen. De gewassen zijn gekozen op basis van de gewassen die in het GI-hoog en GI-laag systeem het meest voorkwamen in de periode 1989–2015: snijmaïs – consumptie aardappelen – suikerbiet – triticale (gesimuleerd met wintertarwe). Om per jaar een systeemgemiddelde waarde te kunnen berekenen, zijn de systemen viermaal doorgerekend met steeds een ander gewas in het startjaar en met behoud van dezelfde volgorde. Met vanggewassen is rekening gehouden (zie Par. 4.3.1.2).

De modellen zijn gevoed met gegevens uit de literatuur en gegevens direct verkregen van de proefboerderij Vredepeel. Voor niet alle invoergegevens waren realistische waarden beschikbaar die de doorgerekende systemen realistisch konden simuleren. Daarom is het model – geijkt op beschikbare meetgegevens van grondwaterstanden en berekende gewasopbrengsten en nitraatconcentraties – globaal vergeleken met metingen.

#### **4.3.1.1 Opzet modelberekeningen**

In de modelberekeningen is allereerst de hydrologie van SWAP geijkt op een grondwaterstandenreeks van de periode 2001–2004. Vervolgens zijn alle berekeningen met dit geijkte model uitgevoerd.

Eerst is een 12-jarige 'aanlooperperiode' doorgerekend die duurde van 1989 tot 2001. Het doel van deze berekening was het verkrijgen van een uitgangssituatie voor de daarop volgende berekeningen, die was gebaseerd op zo veel mogelijk realistische omstandigheden uit deze periode. Het ging hierbij niet om een werkelijk perceel, maar om een gestileerde, realistische vorm van een van de drie teeltsystemen. Hiervoor is GI-hoog gekozen, omdat dat systeem wat betreft organische stofaanvoer en -toestand tussen beide andere systemen in zit. Voor deze berekeningen is zo veel mogelijk de gewasrotatie en bijbehorende bemesting van dit systeem in deze periode gebruikt.

Na de aanlooperperiode is het laatste jaar 2000 uit deze periode opnieuw doorgerekend met de toestand van bodemvocht, organische stof en N-mineraal (minerale stikstof) zoals die was bereikt aan het einde van dat jaar, en afwisselend met de vijf gewassen die in deze modelstudie zijn opgenomen: aardappelen, snijmaïs, suikerbieten, wintertarwe en zomergerst. In deze vijf berekeningen zijn de gewassen geijkt op de opbrengsten die in systeem GI-hoog zijn bepaald voor dat jaar.

Met de geijkte gewassen en de uitgangstoestand van de bodem aan het einde van de aanlooperperiode is twee keer een 15-jarige reeks achter elkaar doorgerekend, gebaseerd op de weerreeks 2001–2015. De eerste is gebruikt om SWAP te toetsen aan gemeten organische stofgehalten en nitraatconcentraties. De tweede voor een toekomstvoorspelling voor de periode 2016–2030. In deze scenarioberekeningen is het verloop van de organische stofvoorraad en de nitraatuitspoeling, en de gemiddelde gewasproductie en grondwateraanvulling, in de toekomstige vijftien jaar gesimuleerd en de effecten van composttoediening en ingrijpen in de gewasrotatie op dit verloop. De ingreep in de gewasrotatie betreft het vervangen van het gewas aardappelen met de grootste nitraatuitspoeling door zomergerst waarbij een geringere uitspoeling is te verwachten.

Bij deze twee keer 15-jarige periode zijn alle scenario's vier keer doorgerekend met steeds een ander gewas van de rotatie als begingewas. Dus achtereenvolgens de gewassen 1, 2, 3, 4, dan 2, 3, 4, 1, dan 3, 4, 1, 2 en als laatste 4, 1, 2, 3. De bij de gewassen behorende bemesting werd op dezelfde manier gewisseld. De uitkomsten van de vier varianten zijn op dagbasis gemiddeld tot de scenario-uitkomsten die verder zijn verwerkt en geïnterpreteerd.

#### **4.3.1.2 Modelinvoer**

De modelinvoer wordt besproken voor de verschillende componenten van het gemodelleerde systeem. Een nadere beschrijving van de werking en de benodigde invoer van SWAP geeft paragraaf 2.2 (2.2.2.1).

---

### Bodem

De onderzoeksvraag heeft betrekking op het effect van de aanvoer van compost en de wijziging van de vruchtwisseling. Omdat het model niet nauwkeurig te ijken is aan de metingen van één systeem, is ervoor gekozen om het model globaal te toetsen aan de metingen voor de drie teeltsystemen. De uitgangssituatie voor de drie systemen ten aanzien van bodemfysische eigenschappen, de bodemchemische karakterisering en de relatie met het oppervlaktewater en het diepere grondwater is gelijk verondersteld. De bodemopbouw in verschillende bodemhorizonten en de bodemfysische eigenschappen van de horizonten zijn overgenomen van Stolk en Kroes (2012). Zij voerden een SWAP-WOFOST-berekening uit voor perceel 26.2 van Vredepeel. Ook andere (detail)aspecten van de SWAP-parametrisering zijn van deze modelstudie overgenomen. Stolk en Kroes (2012) gebruikten de bodemfysische parameters van perceel 28.2 zoals bepaald door De Vos et al. (2002), maar pasten die op enkele punten aan. In onderhavige modelstudie is voor enkele parameters teruggevallen op de oorspronkelijke waarden.

De bodem is gekarakteriseerd als een veldpodzol (De Vos et al. 2002) met leemarm fijn zand met een humusrijke ploeglaag. De voorkomende horizonten zijn:

- Ap horizont; dieptetraject: 0-20 cm;
- B horizont; dieptetraject: 20-35 cm;
- C1 horizont; dieptetraject: 35-65 cm;
- C2 horizont; dieptetraject: 65 en dieper (300 cm in het model).

De organische stofvoorraad en de concentratie N-mineraal aan het begin van de aanlooperperiode zijn afgeleid uit gegevens van de percelen 26.1 en 27.1, die zijn aangeleverd door Proefboerderij Vredepeel.

### Meteorologie

Voor een aantal jaren waren meteorologische gegevens beschikbaar van het proefbedrijf, maar toch is voor simuleren van de jaren 1989 tot en met 2015 gebruikgemaakt van de gegevens van de dichtstbij gelegen KNMI-stations. Dat zijn weerstation Eindhoven (370) en neerslagstation Ysselsteyn (913). Voor een aantal jaren zijn de neerslaggegevens vergeleken met de lokale waarden, waarbij geconcludeerd werd dat dagwaarden soms van elkaar kunnen verschillen, maar voor jaartotalen zijn de verschillen relatief beperkt. Een ander argument voor het gebruik van de KNMI-gegevens is dat eventuele verschillen die leiden tot een verschil in droogte worden gecompenseerd door het gebruik van de berekeningsoptie in het SWAP-model. Van het weerstation zijn de gegevens genomen die nodig zijn voor berekening van verdamping met de Penman-Monteith-optie van SWAP. Van het neerslagstation zijn de neerslaggegevens betrokken. Omdat deze worden gegeven vanaf 8:00 u de vorige dag tot 8:00 u de huidige dag, is twee derde van deze neerslag toegekend aan de vorige dag en een derde aan de huidige.

### Hydrologie

De modelstudie was naar uitspoeling van nitraat naar het bovenste grondwater, niet naar nitraatbelasting van het oppervlaktewater. Daarom, en omdat er weinig goede gegevens waren over de detailontwatering van de niet-gedraineerde percelen op Vredepeel, is gekozen voor een ontwatering van de modelpercelen in de vorm van een onderrandvoorwaarde. Dat houdt in dat afvoer naar lokale ontwateringsmiddelen als sloten en het Peelkanaal niet expliciet zichtbaar is in de modelresultaten. Het overtollige neerslagwater verlaat de modelkolom over de onderrand naar een 'ongedefinieerd' ontwateringssysteem met verschillende niveaus.

De onderrandvoorwaarde die in SWAP is gebruikt is de 'q-h-relatie'. Hierbij is de waterafvoer  $q$  over de onderrand een functie van de grondwaterstandhoogte  $h$ . Deze relatie is verkregen door kalibratie (zie 4.3.1.3).

### Gewassen

De basisgewasrotatie in de simulatieperiode 2001–2030 was snijmaïs – aardappel – suikerbiet – wintertarwe. Met behoud van deze basisvolgorde zijn voor deze periode de vier mogelijke varianten met een wisselend begingewas doorgerekend (zie 4.3.1.1). Bij de aanlooperperiode 1989–2000 week

deze volgorde enigszins af op basis van de werkelijke gewasrotatie, maar kwam elk gewas wel drie keer voor in de twaalf simulatiejaren. Hetzelfde gewas kwam nooit twee jaren achter elkaar voor.

In de aanlooperperiode en scenarioperiode werden na de oogst gewasresten aan de bodem toegevoegd. De hoeveelheid was afhankelijk van het gewas en de behaalde productie en bedroeg voor de drie systemen rond de 800 kg EOS ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (EOS = effectieve organische stof), wat goed overeenkomt met de hoeveelheid van Figuur 4.5. Vanggewassen werden alleen in de scenario's toegepast. De frequentie verschilde per systeem en was ruwweg gebaseerd op de hoeveelheden groenbemester van Figuur 4.5. Ze bedroeg per 15 jaar 3 keer per bij GI-laag, 8 keer bij GI-hoog en 12 keer bij BIO. Bij GI-laag was dat na hoofdgewas snijmaïs, bij GI-hoog na snijmaïs en aardappelen en bij BIO na snijmaïs, aardappelen (zomergerst bij scenario 'zomergerst') en wintertarwe. Voor het vanggewas is hoofdgewas wintertarwe genomen. Het vanggewas is direct na oogsten gezaaid en twee dagen voor het zaaien of poten van het hoofdgewas ondergeploegd.

Voor de parametrisering van de vijf gewassen zijn waarden verkregen van WUR-deskundigen op het gebied van gewasmodellen WOFOST en LinTul4. Voor aardappelen is ook gebruikgemaakt van de gekalibreerde waarden uit de modelstudie van Stolk en Kroes (2012). De parametrisering van het stikstofdeel van de invoer van WOFOST, nodig voor de koppeling met de N-module, is gedaan met waarden afkomstig uit gewasbestanden van LinTul4.

Proefboerderij Vredepeel heeft aangegeven dat er in het verleden bij de verschillende onderzoeken die zijn uitgevoerd op de proefboerderij normaliter geen restrictie was in berekening van de gewassen. Er werd berekend naar de behoefte van het gewas. In WOFOST is daarom ingesteld dat wordt berekend tot de actuele gewastranspiratie 95% van de potentiële transpiratie bedraagt.

Om de gemeten gewasproductie rond 2000 te kunnen simuleren, zijn enkele gewasparameters van WOFOST gekalibreerd. Dit wordt behandeld in 4.1.3.1.

#### Bemesting

In de aanlooperperiode is zo veel mogelijk de gemiddelde bemesting in het model ingevoerd die in deze periode hoorde bij de vier gesimuleerde gewassen. Ook in de eerste 15 jaar van de scenarioperiode is dit gedaan, maar dan in drie blokken van een aantal jaren. Voor de laatste 15 jaar is de bemesting per gewas constant gehouden; de waarden zijn verkregen uit de gemiddelde bemesting van de periode 2011–2015. Bij het BIO-scenario 'Compost' is de 10 ton toegediende compost in mindering gebracht op de runderdrijfmestgift naar rato van de verhouding van de effectieve stikstof in beide mestsoorten. Alle gebruikte gegevens zijn afkomstig van Proefboerderij Vredepeel. De mestgiftten zijn als gemiddelden per systeem en simulatieperiode samengevat in Tabel 4.5.

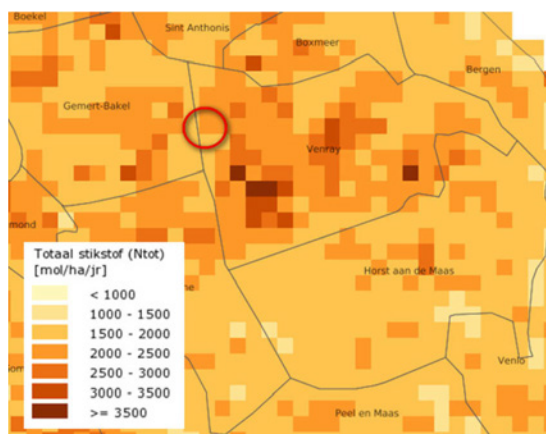
**Tabel 4.4** Systeemgemiddelde mestgiftten in de aanlooperperiode en de ijkings- en toetsingsperiode (2001–2015) in de modelsimulaties met het SWAP/WOFOST-model.

Systeem	Periode	Kunstmest	Varkensdrijfmest		Runderdrijfmest		Vaste runderm.		Totaal	
			O.S.	N	O.S.	N	O.S.	N	O.S.	N
	1989-2000	41	614	86	969	61			1583	188
GI-laag	2001-2015	146	146						-	146
GI-hoog	2001-2015	96	538	76	727	46			1265	217
BIO	2001-2015	-	96	13	727	48	1537	66	2360	127

#### Depositie

In het verleden werd in berekeningen van de stikstofbalans van de bodem rekening gehouden met een stikstofdepositie van ca. 45 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (Compendium voor de Leefomgeving, 2011). In de loop der jaren is de depositie echter afgenomen. Het Compendium voor de Leefomgeving maakt melding van een landelijk gemiddelde afname van de vermestende depositie van 35% ten opzichte van de depositie in 1990. Verwacht mag worden dat in gebieden met intensieve veehouderij en relatief hoge ammoniakemissies en hoge deposities de afname sterker is geweest. Op de Grootschalige Concentratie-

en Depositiekaarten Nederland van het RIVM (<http://geodata.rivm.nl/gcn/>) wordt voor 2015 voor het gebied waarin het proefbedrijf Vredepeel een depositie aangegeven van 1500–2000 mol ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (Figuur 4.9). Dit komt overeen met 21–28 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> stikstof.



**Figuur 4.9** Depositie van totaal stikstof (mol/ha/jr) in het gebied rondom het proefbedrijf Vredepeel.

Verwacht mag worden dat een deel van de daling van de nitraatconcentraties in de drie systemen wordt veroorzaakt door een afname van de stikstofdepositie.

In de berekeningen is voor de gehele aanlooperperiode 1989–2000 een waarde van 45 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> gebruikt. In de simulatieperiode liep de waarde lineair af van 45 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> in 2001 tot 25 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> in 2015. Voor de jaren na 2015 is het depositieniveau van 25 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> constant gehouden.

#### 4.3.1.3 Modelijking en -toetsing

##### Hydrologie

De grondwaterstand-afvoerrelatie die als onderrand is gebruikt in SWAP is verkregen door het model te kalibreren aan gemeten grondwaterstanden van de periode 19 december 2002 tot 16 maart 2004. Dit was de langste beschikbare reeks gemeten grondwaterstanden. De verkregen relatie heeft een geknikte vorm (zie 4.3.2) en is daarom in tabelvorm ingevoerd. De resultaten van deze ijking worden besproken in 4.3.2.1. De relatie laat een geringe mate van toestroming over de onderrand (kwel) toe. Deze treedt op bij grondwaterstanden dieper dan 130 cm.

##### Gewassen

Om de gemeten gewasproducties te kunnen simuleren, zijn enkele gewasparameters van WOFOST gekalibreerd. De belangrijkste daarvan was de effectieve worteldiepte. De N-module in SWAP rekent met één laag waarin processen van de organische stof- en stikstofkringloop worden gesimuleerd. Deze laag mag niet te dik zijn om te voorkomen dat de organische stof-rijke toplaag van het bodemprofiel wordt uitgesmeerd over een te grote diepte. Daarom is voor de dikte van deze laag 30 cm genomen. De meeste gewassen uit de rotatie wortelen dieper. De stikstofopname in het model vindt voornamelijk plaats door opname met de waterstroom via de wortels. Dieper dan 30 cm bevat de gesimuleerde bodem, en dus ook het daaruit onttrokken water, geen stikstof. Bij stikstofgebrek stagneert de gewasgroei en daarmee de gewasproductie. De effectieve worteldiepte is daarom verkleind. De juiste diepte is per gewas gevonden door kalibratie tegen gemeten gewasproducties. Voor deze productie zijn gemiddelde waarden genomen van 2001–2003 uit Smit et al. (2004). In Tabel 4.6 zijn deze samengevat.

**Tabel 4.5** Gemiddelde drogestofproductie en stikstofopname in 2001–2003 in onderzoeksexperimenten Synthese (S) en Analyse (A) voor de relevante gewassen te Vredepeel (uit: Smit et al. 2004).

Gewas	Drogestofproductie (kg/ha/j)		Stikstofopname (kg N/ha/j)	
	S	A	S	A
granen	5743	4742	130	95
maïs	17277	17275	229	202
aardappel	13240	12419	229	190
suikerbiet	16655	15918	212	202

### Nitraatconcentraties

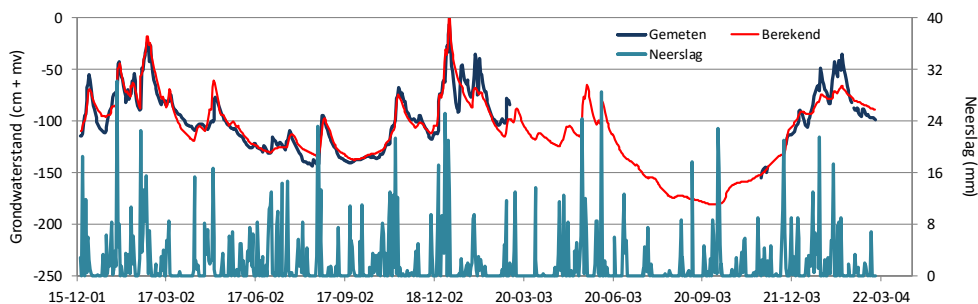
Door te rekenen met een geschematiseerde situatie kon geen kalibratie worden uitgevoerd. Na de instelling van de parameters voor de aanlooperperiode zijn de parameters niet meer bijgesteld. Voor het berekenen van de nitraatconcentraties in het grondwater is het concept van de "uitspoelfractie" toegepast (zie Par. 4.4.3). Met de nitraatconcentraties voor het eerste jaar waarin metingen beschikbaar waren, is een uitspoelfractie berekend. Deze uitspoelfractie is vergeleken met de waarden die gevonden zijn in het Landelijke Meetnet Effecten mestbeleid (Fraters et al. 2012). De gevonden uitspoelfractie is verder niet meer aangepast en is gebruikt voor de berekening van nitraatconcentraties in de volgende jaren.

Voor deze toetsing zijn meetgegevens van nitraatconcentraties gebruikt van de percelen die zijn opgenomen in deze modelstudie. Deze gegevens zijn verkregen van Proefboerderij Vredepeel. Voor elk jaar zijn alleen metingen van de grondwaterstandbuizen 2, 4 en 7 op de velden met een van de vier gewassen van de gewasrotatie gebruikt.

## 4.4 Resultaten modelijking en -toetsing

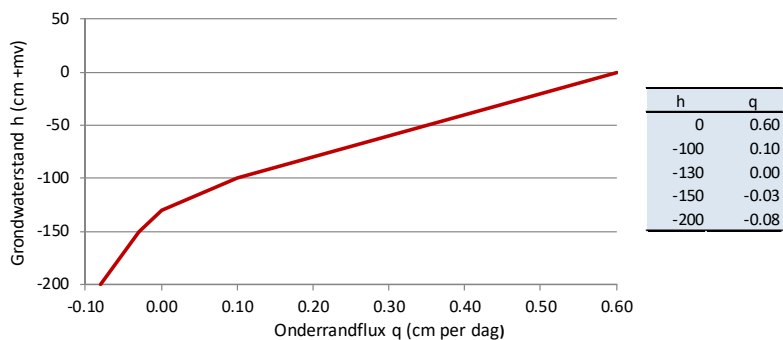
### 4.4.1 Hydrologische onderrand

De resultaten van de kalibratie van de grondwaterstand-afvoerrelatie als onderrandvoorwaarde van SWAP is als vergelijking van de berekende grondwaterstanden met de gemeten getoond in Figuur 4.10. De afwijking tussen berekende en gemeten grondwaterstanden als RMSE (root mean squared error) bedraagt 7,6 cm voor 2002 en 9,8 cm voor de gehele periode.



**Figuur 4.10** Gemeten en na kalibratie van de onderrandvoorwaarde berekende grondwaterstanden.

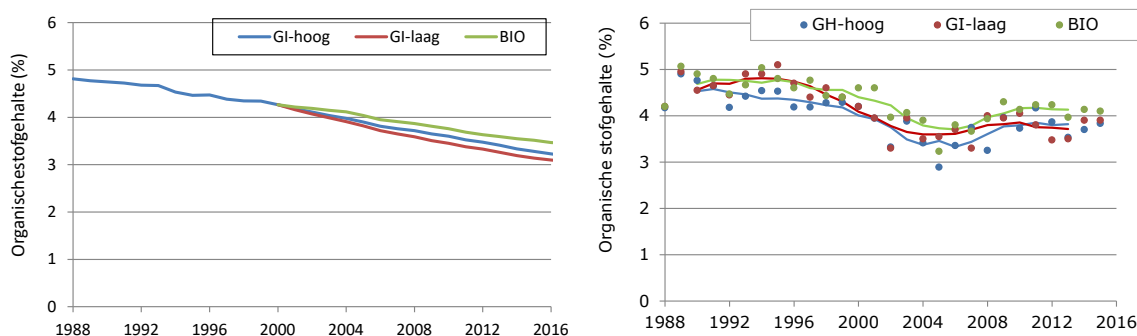
Het resultaat van de kalibratie als de verkregen q-h-relatie geeft Figuur 4.11. Te zien is dat bij een grondwaterstand dieper dan 130 cm beneden maaiveld afvoer over de onderrand ( $q > 0$ ) omslaat in aanvoer ( $q < 0$ ).



**Figuur 4.11** Gekalibreerde grondwaterstand-afvoerrelatie in het SWAP-model. Positieve q betekent afvoer over de onderrand.

#### 4.4.2 Verloop organische stof

Het berekende verloop van het organische stofgehalte is globaal vergeleken met metingen (Figuur 4.12). Hiervoor zijn metingen geselecteerd van de geploegde delen van percelen 16, 17, 26 en 27 voor GI-hoog en GI-laag en van de geploegde delen van percelen 32 t/m 34 voor BIO. Alleen percelen waarvoor meer dan 21 jaarlijkse metingen beschikbaar zijn, zijn meegenomen in de analyse.



**Figuur 4.12** Berekend (links) en gemeten (rechts) verloop van het organische stofgehalte in de bodem van de drie systemen te Vredepeel. Trendlijn in de metingen is een 5-jarig voortschrijdend gemiddelde.

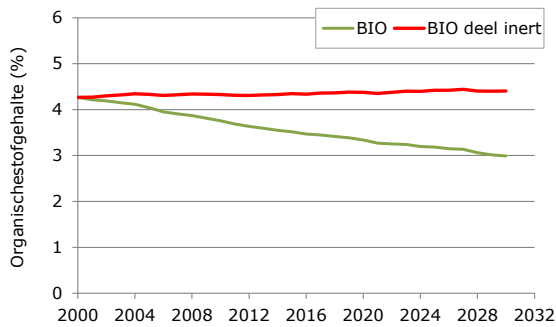
Het berekende verloop van het organische stofgehalte laat een permanente daling zien. Vanaf het moment dat onderscheid gemaakt wordt in de drie teeltsystemen vanaf 2001, daalt het organische stofgehalte in het BIO-systeem minder snel en in het GI-laag systeem sneller dan in het GI-hoog systeem. De daling en de dalingsnelheid komen globaal overeen met het gemeten verloop tot 2005. In de metingen vanaf 2005 is een constant verloop of misschien een lichte stijging te zien die niet in de berekeningen is nagebootst.

##### Trendbreuk organische stofgehalte

Zoals in Par. 4.2.3 is aangegeven, laten de metingen van het organische stofgehalte vanaf 2005 geen daling zien, zoals dat voor de periode 1988–2004 het geval was, maar een lichte stijging of een stabiel verloop. Dit fenomeen kan niet met de normale parametrisering van het rekenmodel worden nagebootst. Hierbij zijn de volgende opmerkingen te maken:

- In eerdere modelstudies is voorbijgegaan aan dit fenomeen. De modelverkenning van Postma et al. (2004) met het MINIP-model laat bij een aanvoer van 6 ton droge stof per ha via groencompost nog steeds een geringe daling van het organische stofgehalte in de bodem zien. In de modelverkenningen van het effect van stalmest en compost op verloop van het organische stofgehalte in het BIO-systeem met NDICEA door Hopsers-Brands en Van der Burgt (2013) is het verloop vanaf 2005 gesimuleerd, waarbij aan de daling in de periode 1988–2005 geen aandacht is gegeven.

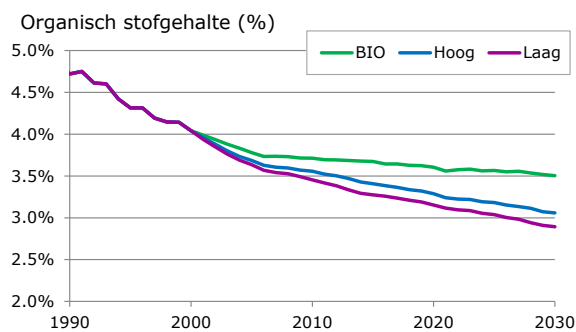
- De organische-stofmodule in het SWAP/WOFOST model is afgeleid van het RothC-26.3-model (Coleman et al. 1997) en kent een aantal vrijheidsgraden voor het toekennen van de initieel aanwezige voorraad organische stof aan pools. In de in deze deelstudie gehanteerde parametrisering is de volledige voorraad toegekend aan pools die sneller of langzamer afbreken. Het originele Roth-C-model kent daarnaast nog een zgn. inerte pool. De organische stof in de inerte pool is niet aan afbraak onderhevig en er komen ook geen afbraakproducten uit andere pools in terecht. Met de gegevens van het BIO-systeem is een testberekening met een dergelijke inerte pool uitgevoerd (Figuur 4.13). De aanwezigheid van een dergelijke pool zou verklaard kunnen worden door de ontstaansgeschiedenis van de organische stof. Een relatief groot deel is nog afkomstig van de periode voor de ontginning en het overige deel is ontstaan als restproduct van de aangevoerde gewasresten en dierlijke mest sinds de ontginning.



**Figuur 4.13** Berekend verloop van het organische stofgehalte in de bodem van het BIO-systeem met een parametrisering waarin de gehele organische stofvoorraad kan afbreken (BIO) en waarin een deel inert is (BIO deel inert).

Zoals blijkt uit Figuur 4.13 is de organische stofmodule in het SWAP/WOFOST model met een aangepaste parametrisering goed in staat om voor het BIO-systeem een stijgend organische stofverloop te simuleren. Het is echter niet mogelijk om met deze parametrisering de trend in de periode tot aan 2004 en de trend vanaf 2005 correct te simuleren.

- De trendbreuk doet zich voor na het systeemonderzoek van het programma Telen met Toekomst en voor de onderzoeksperiode van Nutriënten Waterproof. Mogelijk is een verschil in de wijze en diepte van grondbewerking van invloed geweest op het gemeten verloop van het organische stofgehalte. Nagegaan is of een andere grondbewerking tot een ander berekend verloop van het organische stofgehalte zou kunnen leiden, waarbij verondersteld is dat een ondiepere en minder frequente grondbewerking tot minder verlies van organische stof leidt. Hiervoor zijn aanvullende modelberekeningen uitgevoerd voor het GI-hoog-, GI-laag- en het BIO-systeem waarbij de omzettingssnelheid van de humuspool vanaf 2005 is gehalveerd.



**Figuur 4.14** Berekend verloop van het organische stofgehalte in de bodem van de drie systemen met een halvering van de omzettingssnelheid van de humus-pool vanaf 2005.

---

In Figuur 4.14 is te zien dat ondanks de aanpassing nog steeds een daling van het organische stofgehalte optreedt in de drie systemen.

Alhoewel de analyse van de experimentele gegevens in deze deelstudie en de modelsimulaties geen antwoord geven op de vraag waarom het organische stofgehalte daalde in de periode 1988–2005 en daarna stabiel was of een lichte stijging vertoonde, kan het model wel als uitgangspunt dienen voor de relatieve vergelijking van effecten van scenario's.

#### 4.4.3 Nitraatconcentraties

De organische stof- en stikstofmodule in het SWAP/WOFOST-model berekent de organische stofhuishouding en de stikstofkringloop in het gewas en de bouwvoor. De module berekent geen nitraatconcentraties in het grondwater. Om de modelresultaten te kunnen vergelijken met nitraatmetingen, is gebruikgemaakt van het concept van de "uitspoelfractie". De uitspoelfractie geeft de verhouding aan tussen gemeten nitraatconcentraties in het bovenste grondwater ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en de uitspoelconcentratie die berekend kan worden op basis van het stikstofoverschot op de bodembalans ( $\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ ) en het netto-neerslagoverschot ( $\text{mm jr}^{-1}$ ). Bij de interpretatie van nitraatmetingen in het Landelijke Meetnet Effecten mestbeleid (LMM) wordt de uitspoelfractie gebruikt om nitraatconcentraties te voorspellen als gevolg van gewijzigde stikstofoverschotten op de bodembalans. Door Fraters et al. (2012) is de uitspoelfractie vastgesteld per grondsoort, per gewas en per grondwatertrap.

De kalibratie in deze deelstudie heeft zich beperkt tot het bepalen van de zgn. uitspoelfractie voor de drie systemen. In deze studie is de uitspoelfractie als volgt berekend voor de beginjaren waarvoor nitraatmetingen beschikbaar waren:

$$\text{Uitspoelfractie} = \frac{\text{gemeten nitraatconcentratie} \times \text{netto neerslagoverschot}}{443 \times \text{stikstofoverschot op bodembalans}}$$

De uitspoelfractie is dimensieloos, de nitraatconcentratie is uitgedrukt in  $\text{mg L}^{-1}$ , het netto-neerslagoverschot in  $\text{mm jr}^{-1}$  en het stikstofoverschot op de bodembalans in  $\text{kg ha}^{-1} \text{jr}^{-1}$ .

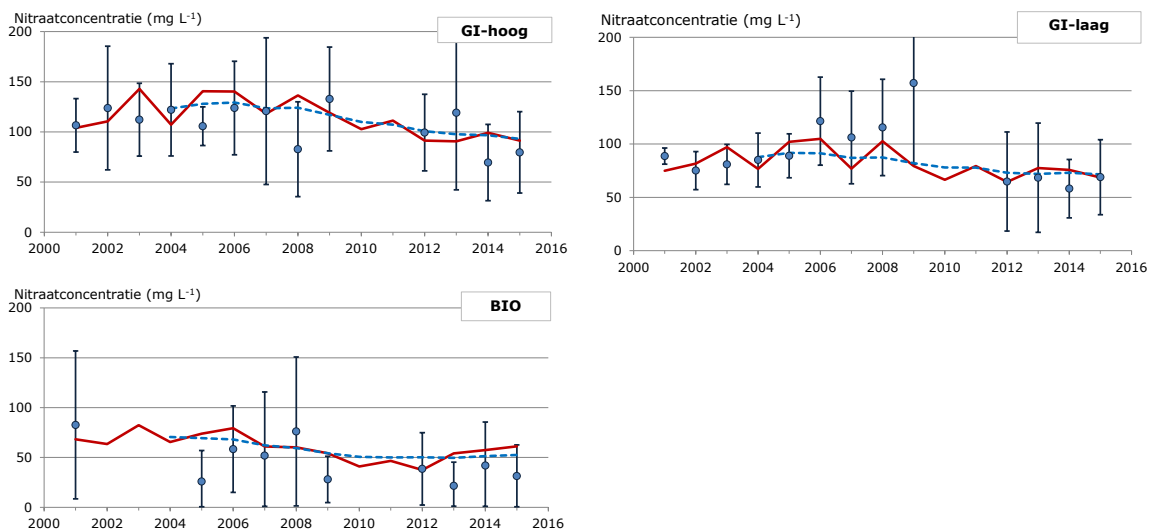
De volgende waarden zijn berekend:

- GI-hoog: 0,614 (op basis van metingen in 2001)
- GI-laag: 0,524 (op basis van metingen in 2001)
- BIO: 0,4232 (op basis van metingen in 2006 – 2008)

Deze waarden liggen in de range die verwacht kan worden op grond van de uit LMM afgeleide waarden. Fraters et al. (2012) geven een waarde voor bouwland op zand met grondwatertrap VI van 0,59 en 0,43 voor grondwatertrap V\*. De lagere waarde voor het BIO-systeem geeft aan dat de hydrologische situatie van dit systeem afwijkt van die van het GI-hoog en GI-laag systeem en dat daarmee effecten van verschillen in mestgiften tussen de systemen moeilijk te vergelijken zijn.

De nitraatconcentraties in de jaren na de periode waarin de uitspoelfracties zijn vastgesteld, zijn berekend met de resultaten uit het SWAP/WOFOST-model in combinatie met de genoemde fractie. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.15.





**Figuur 4.15** Gemeten en berekend verloop van nitraatconcentraties in het grondwater onder de drie systemen. Gemiddelde waarde en standaarddeviaties van metingen zijn aangegeven met punten en verticale lijnen. Berekend verloop van systeemgemiddelde concentratie is aangegeven met getrokken lijn en 7-jaars voortschrijdend gemiddelde is aangegeven met stippellijn.

De berekende nitraatconcentratie vertoont geen perfecte fit met de metingen, maar dat mag ook niet worden verwacht.

- In de berekeningen is uitgegaan van een standaardrotatie met 4 akkerbouwgewassen en in de metingen kwamen soms ook teelten van groentegewassen voor.
- In de berekeningen zijn de mestgiften voor de gewassen afgeleid van de registraties per systeem en per gewas en omdat in de praktijk ook andere gewassen voorkwamen, verschilt de veronderstelde bemesting met de hoeveelheid die in de praktijk is toegediend.
- In de berekeningen is standaard in de vierjarige cyclus eenmaal, tweemaal of driemaal een wintervanggewas verondersteld voor resp. GI-laag, GI-hoog en BIO. Dit komt niet helemaal overeen met de praktijk.

De metingen zijn verricht op een aantal tijdstippen, terwijl voor de berekende waarden is uitgegaan van de jaarlijkse stikstofoverschotten op de bodembalans en de jaarlijkse neerslagoverschotten. Gegeven deze beperkingen in de vergelijking, is de overeenkomst van de berekende concentraties met de metingen goed te noemen. In enkele jaren overschrijdt of onderschrijdt de berekende waarde de bandbreedte (gemiddelde plus of min standaarddeviatie) van de metingen. In het 2008 lag de berekende concentratie van GI-hoog hoger dan de metingen. Maar in 2007 en 2009 is er wel een goede overeenkomst. Het is niet duidelijk waarom de metingen in dat jaar in GI-hoog lager uitvielen dan in de andere jaren. In GI-laag is de nitraatconcentratie in 2009 beduidend hoger dan in de voorliggende jaren, terwijl dit niet tot uiting komt in het berekende verloop. Dit hangt samen met de teelt van aardappelen in 2008. De berekende concentratie heeft betrekking op een gemiddeld bouwplan en het verloop is daarom gelijkmatiger. De uitspoelfractie voor het BIO-systeem is geijkt op de waarden in de periode 2006–2008. Voor 2012 is een goede overeenkomst van de berekende met de gemeten waarde te zien, maar in de latere jaren lijkt de berekende concentratie weer iets te stijgen door lagere neerslagoverschotten in de jaren 2013 t/m 2015 t.o.v. het neerslagoverschot in 2012.

De overeenkomst tussen gemeten en berekende trends en gemeten en berekende gemiddelde waarden van de nitraatconcentraties voor de drie systemen wordt als een goede basis beschouwd voor de vergelijking van relatieve effecten van scenario's.

## 4.5 Rekenscenario's met aanvoer van compost en gewasrotatie

### 4.5.1 Definitie van scenario's

Twee scenario's zijn gedefinieerd en doorgerekend met maatregelen die tot doel hadden de organische stoftoevoer te vergroten en de uitspoeling te verminderen:

- De vervanging van een deel van de dierlijke mest door compost. Hiermee wordt de aanvoer van organische stof groter, maar ook de aanvoer van stikstof. Stikstof in rundermest heeft voor de mineralenboekhouding een werkingscoëfficiënt van 60%, terwijl compost een werkingscoëfficiënt heeft van 10%. De aanvoermogelijkheden van stikstof in de vorm van compost zijn groter dan de aanvoermogelijkheden van stikstof in de vorm van rundermest.
- De vervanging van aardappelen in de rotatie door een graan. Granen hebben een lagere behoefte aan stikstof dan aardappelen en daarom kan gemiddeld voor de rotatie met een lagere mestgift worden volstaan. Daarnaast dragen gewasresten van granen in grotere mate bij aan de toevoer van organische stof dan aardappelen.

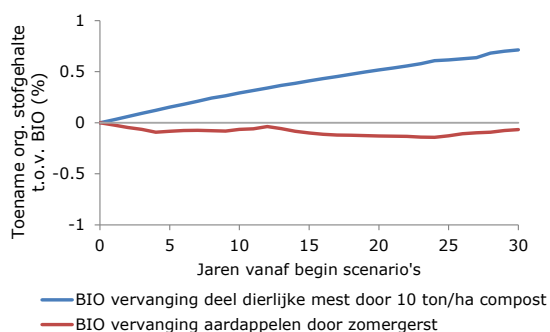
Voor deze twee scenario's gold het BIO-systeem als uitgangspunt. De mestgiften, gemiddeld over een rotatie, zijn vermeld in Tabel 4.4.

**Tabel 4.6** Systeemgemiddelde mestgiften in de scenario's (2016-2016) gesimuleerd met SWAP/WOFOST.

Scenario	Periode	Runderdrijfmest		Vaste rundermest		Compost		Totaal	
		O.S.	N	O.S.	N	O.S.	N	O.S.	N
BIO	2016-2030	1330	84	2020	87	-	-	3350	171
BIO-compost	2016-2030	1250	79	2179	94	1510	68	4940	241
BIO-z.gerst	2016-2030	727	46	1136	49	-	-	1864	95

### 4.5.2 Effecten op organische stof

Het organische stofgehalte vertoont in het scenario met de aanvoer van compost een toename t.o.v. het verloop dat zou zijn opgetreden in het BIO-systeem (Figuur 4.16). De toename bedraagt ruim 0,7% in 30 jaar. De stijging verloopt constant in de tijd. Effecten van verschillende gewassen zijn in de figuur niet te zien, omdat een systeemgemiddelde is weergegeven.

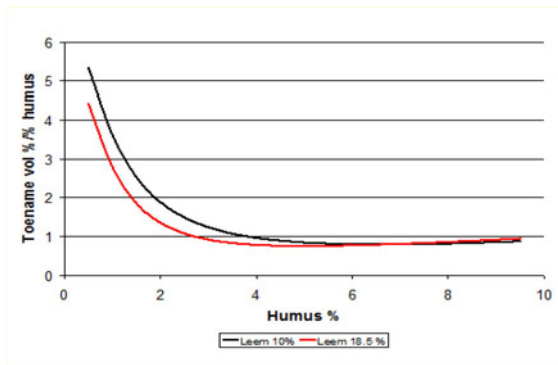


**Figuur 4.16** Effect van de vervanging van een deel van dierlijke mest door compost en van de vervanging van aardappelen door zomergerst op het organische stofgehalte van het BIO-systeem, uitgedrukt als verschil met het verloop in het BIO-systeem zonder aanvullende maatregelen.

In het scenario waarin aardappelen zijn vervangen door zomergerst blijft het organische stofgehalte min of meer constant. In dit scenario wordt vanwege de lagere stikstofbehoefte van granen minder bemest en wordt ca. 1500 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> minder organische stof aangevoerd met dierlijke mest. Doordat

granen meer organische stof aan de bodem toevoegen dan aardappelen kan desondanks het organische stofgehalte toch op peil blijven.

Het directe effect van de berekende verhoging van het organische stofgehalte van 0,7% in 30 jaar tijd op een verhoging van het beschikbaar vocht is naar verwachting gering (Figuur 4.16).



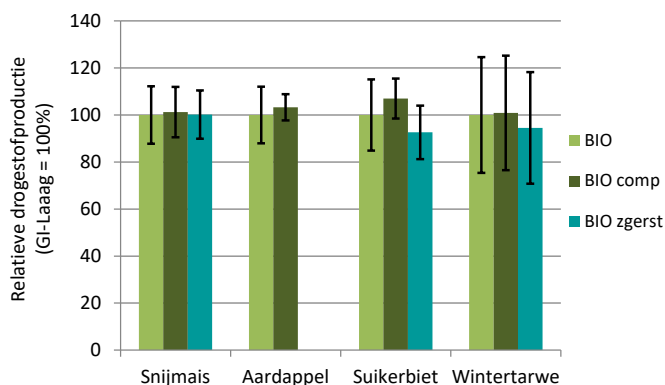
**Figuur 4.17** Toename van het beschikbare vocht tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt per procent humustoename als functie van het humuspercentage, afgeleid van de pedotransferfuncties van (Wösten et al. 2001).

Voor zandgronden met een organische stofpercentage van ca. 4% wordt verwacht dat de toename van het organische stofgehalte van 0,7% tot een verhoging van minder dan 1% van het beschikbaar vocht zal leiden; dit komt overeen met maximaal 3 mm voor een wortelzone van 30 cm dik. Bij deze schatting wordt het volgende opgemerkt:

- De verwachting is afgeleid van relaties tussen textuurkenmerken en het verzadigd vochtgehalte. Mogelijk zullen door de indirecte effecten op de bodemstructuur en via een toename van het bodemleven grotere effecten op het waterbergend vermogen van de bodem optreden.
- Op basis van het correlatieve verband tussen het organische stofgehalte en het vochtpercentage in de bovenste 10 cm van de bodem (Figuur 4.1), zoals door Van Eekeren en Zaneveld Reinders (2011) is gerapporteerd, zou men een groter effect verwachten. Het correlatieve verband heeft echter betrekking op verschillende meetlocaties en is niet tot stand gekomen door de verhoging van het organische stofgehalte. Verschillen in het organische stofgehalte in de populatiemetingen kunnen duiden op verschillen in bodemstructuur.

#### 4.5.3 Effecten op gewasproductie

De gewasproductie neemt toe bij aanvoer van compost (BIO comp in Figuur 4.17). Bij snijmaïs en wintertarwe is de relatieve toename zeer klein, rond 1%. Bij aardappelen en suikerbieten neemt de gewasproductie echter duidelijk toe, met ruim 3% en 7%. Telen van zomergerst (BIO zgerst) heeft nauwelijks effect op de opbrengst van snijmaïs, maar geeft lagere opbrengsten van suikerbieten (7,5%) en wintertarwe (5,5%).



**Figuur 4.18** Effect van de vervanging van een deel van dierlijke mest door compost (BIO comp) en van de vervanging van aardappelen door zomergerst (BIO zgerst) op de relatieve gewasopbrengsten, uitgedrukt in procenten van de droge stofopbrengst van het BIO-systeem. De zwarte lijntjes geven het bereik van twee keer de standaardafwijking aan.

Dit is vooral het gevolg van verschillen in stikstofaanvoer: bij het systeem met compost is de aanvoer van stikstof gemiddeld  $70 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  hoger dan bij BIO (Tabel 4.7), terwijl bij het systeem met zomergerst – door de geringere bemesting van dit gewas – de aanvoer gemiddeld  $146 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$  lager is dan bij BIO. Blijkbaar leidt deze geringere bemesting eens in de vier jaar tot een lagere stikstofopname (en daardoor gewasproductie) voor de gewassen in de overige drie jaar van de gewasrotatie.

#### 4.5.4 Effecten op grondwateraanvulling

De jaarlijkse grondwateraanvulling is kleiner naarmate vaker vanggewassen zijn opgenomen in het teeltplan (Tabel 4.8). Vanggewassen verdampen in het najaar en vroege voorjaar meer water door interceptieverdamping en transpiratie dan de verdamping van een kale grond.

**Tabel 4.7** Verschil van de grondwateraanvulling ( $\text{mm jr}^{-1}$ ) t.o.v. de grondwatervoeding ( $327 \text{ mm jr}^{-1}$ ) van teeltsysteem GI-laag (negatief cijfer betekent lagere grondwateraanvulling).

BIO	BIO; vervanging deel dierlijke mest door compost	BIO; vervanging aardappelen door zomergerst
-60	-60	-74

Bij de referentie, systeem GI-laag, wordt alleen na snijmaïs een vanggewas geteeld. Dit komt één keer per vier jaar voor. In het BIO-systeem wordt driemaal in de vier jaar een vanggewas geteeld. Voor elk jaar extra is de grondwateraanvulling gemiddeld 30 mm. De geringere grondwateraanvulling bij BIO met zomergerst is een indicatie voor de geringere transpiratie van zomergerst ten opzichte van aardappelen. Een deel van de dierlijke mest vervangen door compost heeft in de modelberekeningen geen effect op de grondwateraanvulling.

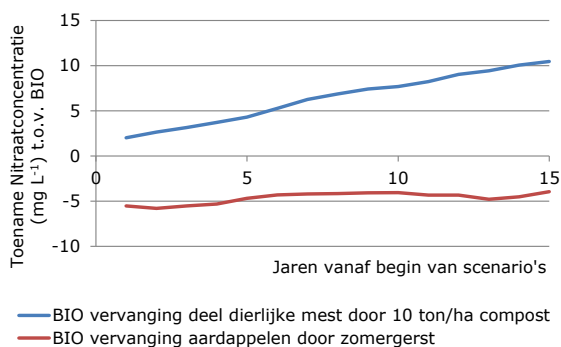
De vermindering van de grondwateraanvulling treedt vooral op in de winterperiode. Dat zou tot uiting kunnen komen in lagere afvoeren in het oppervlaktewater. Het is niet duidelijk of deze vorm van vermindering van grondwateraanvulling ook gevolgen heeft voor de voorjaarsgrondwaterstand in grondwaterafhankelijke ecosystemen.

#### 4.5.5 Effecten op nitraatuitspoeling

Vanwege de middelingsprocedure waarmee effecten van variatie van het weer zijn gefilterd, beginnen de berekende lijnen van de nitraatconcentraties in het jaar 0 vanaf het start van de simulaties niet in het nulpunt. Desondanks geven de lijnen toch een goede indruk van het gesimuleerde effect.

De berekende nitraatconcentratie in het scenario waarin dierlijke mest is vervangen door compost vertoont een stijgend verloop. Door de aanvoer van compost hoopt zich meer organische stof op in de bodem waaruit door mineralisatie stikstof kan vrijkomen. Deze extra mineralisatie t.o.v. de voor BIO berekende waarde bedraagt na 30 jaar ca.  $45 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ . Deze waarde stemt goed overeen met de door Hospers-Brands en Van der Burgt (2013) vermelde waarde van  $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ . Met deze mineralisatie (nawerking) is bij het opleggen van de mestgiften geen rekening gehouden. Hospers-Brands en Van der Burgt (2013) geven aan dat als de nawerking wordt meegenomen bij het definiëren van de mestgiften het stikstofoverschot op de bodembalans en de nitraatuitspoeling niet toe hoeven te nemen.

Zowel in het BIO-systeem als het in BIO-compost scenario worden wintervanggewassen maximaal ingezet. De extra mineralisatie kan dus niet worden opgevangen door een nog grotere inzet van vanggewassen.

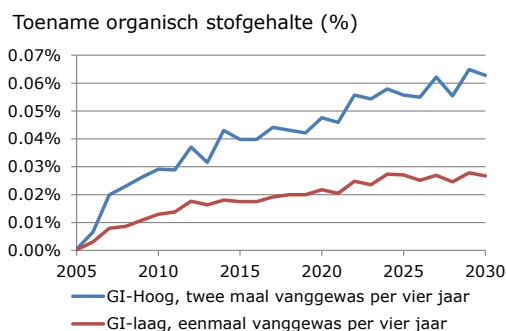


**Figuur 4.19** Berekend verloop van de nitraatconcentratie ( $\text{mg L}^{-1}$ ) onder BIO en de scenario's waarin een deel van dierlijke mest is vervangen door compost en de teelt van aardappelen is vervangen door zomergerst.

De extra aanvoer van compost kan tot een hogere denitrificatiesnelheid leiden, waardoor nitraat wordt afgebroken voordat het grondwater bereikt. In het rekenmodel is wel rekening gehouden met het effect op de denitrificatiecapaciteit in de bouwvoor, maar niet met een eventueel effect onder de bouwvoor. Om een dergelijk effect te simuleren, zou van een meer geavanceerd uitspoelingsmodel gebruik moeten worden gemaakt, waarin ook de uitspoeling van opgeloste organische stof wordt beschreven.

#### 4.5.6 Effecten van vanggewassen op organische stof en nitraat

Behalve de twee in Par. 4.5.5 beschreven scenario's voor het BIO-systeem is voor het GI-Hoog en het GI-laag systeem een berekening uitgevoerd waarbij de vanggewassen achterwege zijn gelaten om de effecten van vanggewassen op organische stofverloop en nitraatuitspoeling in beeld te brengen. In dit scenario is geen wijziging aangebracht in de mestgiften. De maatregel is vanaf 2005 doorgerekend.



**Figuur 4.20** Berekend effect van een vanggewas op het organische stofgehalte.

Bij toepassing van een vanggewas eenmaal in de vier jaar in het GI-laag systeem stijgt het organische stofgehalte met ruim 0,025% in 25 jaar tijd. Bij tweemaal in de vier jaar toepassing in het GI-hoog systeem stijgt het organisch stofgehalte met ruim 0,06% in 25 jaar tijd. Voor beide lijnen is te zien dat de stijging afvlakt in de loop van de tijd.

Om het verloop in nitraatconcentraties te kunnen begrijpen, is het zinvol om enkele termen van de stikstof- en waterbalans te beschouwen. Tabel 4.6 toont de verschillen van gewasopname, terugstroom van plantenresten naar de bodem, mineralisatie en grondwateraanvulling van de systemen met en zonder vanggewas. Deze waarden hebben betrekking op de rotatiegemiddelden, waarbij overeen periode van 15 jaar is gesimuleerd, met een voorgeschiedenis waarin reeds 10 jaar vanggewassen zijn toegepast. In de simulaties is verondersteld dat in droge perioden kan worden berekend. De mestgiften zijn niet aangepast.

**Tabel 4.8** Verschil van enkele termen van de stikstofbalans en de grondwateraanvulling als gevolg van de teelt van een vanggewas, uitgedrukt als langjarig gemiddelde voor een rotatie van 4 jaar.

	Verskil Hoog (tweemaal per jaar vanggewas) en Hoog zonder vanggewas	Verskil Laag (éénmaal per jaar vanggewas) en Laag zonder vanggewas
Opname door plantenwortels	25	9
N-organisch met gewasresten	23	9
N-mineralisatie	22	8
Uitspoeling uit bouwvoor	-3	0
Grondwateraanvulling (mm jr <sup>-1</sup> )	-48	-31
Nitraatconcentratie (mg L <sup>-1</sup> )	8	4

De vanggewassen leiden gemiddeld voor het systeem van hoofdgewas+vanggewas tot een extra opname van stikstof door plantenwortels. Een klein effect treedt op in het hoofdgewas, dat door de teelt van het vanggewas extra stikstof weet te onttrekken, maar het grootste deel van de extra opgenomen stikstof keert weer terug naar de bodem met gewasresten. Na lange tijd, als zich een nieuw evenwicht tussen aanvoer en afvoer heeft ingesteld, mineraliseren deze gewasresten voor bijna 100%. Het verschil in uitspoeling uit de bouwvoor tussen de systemen wordt dan veroorzaakt door de extra gewasopname van het hoofdgewas of de extra denitrificatie. De berekende denitrificatie in de bouwvoor is verwaarloosbaar klein. De extra opname van stikstof door het hoofdgewas van enkele procenten is verhoudingsgewijs kleiner dan de vermindering van de grondwateraanvulling (10–15%). In deze hypothetische situatie neemt de nitraatconcentratie met 7–9% toe.

Hierbij wordt opgemerkt dat:

- Het effect van vanggewassen zoals dat in veldproeven tot uiting komt, meestal betrekking heeft op de eerste periode na introductie en niet op de langetermijnperiode waarin zich een nieuw evenwicht kan hebben ingesteld.
- In de berekeningen is verondersteld dat de mestgiften niet worden aangepast. Als hier wel rekening mee wordt gehouden, kan wel een verlaging van de nitraatconcentraties worden gerealiseerd en kan een deel van het opbrengstverlies door de verminderde bemesting door de overdracht van stikstof uit vanggewassen op het volgende hoofdgewas worden gecompenseerd.

Bij beschouwingen over een mogelijke rol van vanggewassen voor de opbouw van organische stof in de bodem is het raadzaam om zowel effecten op de stikstofbalans als effecten op de waterbalans te schatten.

## 4.6 Conclusies

De lange tijdreeks aan metingen en registraties van het organische stofgehalte van de bodem en verschillende termen van de stikstofbalans maakt dat de dataset van het proefbedrijf Vredepeel uniek is, en waardevol voor toetsing en ijking van modellen. Een goede interpretatie van de grote hoeveelheid meetgegevens van het proefbedrijf Vredepeel is bijzonder complex door de opeenvolging

---

van verschillende onderzoeksthema's in de loop der jaren en de daarmee samenhangende verschillen in behandeling. Voor de interpretatie van veldgegevens is de rol van de "achtergrondmineralisatie", die samenhangt met de trend van het organische stofgehalte, wel echter van belang. Het lag niet binnen het bestek van deze studie om de oorzaken van de trendbreuk in het organisch stofgehalte omstreeks 2005 te ontrafelen.

De gegevens van het proefbedrijf Vredepeel zijn gebruikt om het model te ijken en om voor een deel de aannames voor het compostscenario op te baseren. De resultaten en de interpretatie van de doorgerekende scenario's staan echter los van de experimentele resultaten van het proefbedrijf.

#### Bemestingsplan

Effecten van maatregelen op het organische stofgehalte, zoals de aanvoer van compost, een wijziging van de vruchtwisseling en de teelt van een vanggewas, moeten in samenhang met veranderingen in het bemestingsplan worden beschouwd. Als maatregelen die op lange termijn leiden tot extra mineralisatie gepaard gaan met een aangepaste bemesting, kunnen ze het beoogde doel bereiken zonder dat dit leidt tot hogere nitraatconcentraties. Dit vergt een inbedding in de gehele bedrijfsstructuur. Daarvoor is behalve kennis van bemesting, gewassen en bodemprocessen ook kennis nodig van de bedrijfsvoering en risicomanagement binnen de sector.

#### Gewasproductie

De gedeeltelijke vervanging van dierlijke mest door compost, waarbij in totaal ca 70 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> extra stikstof wordt aangevoerd, leidt op termijn door de hogere stikstofbeschikbaarheid als gevolg van mineralisatie van de in compost aanwezige stikstof tot een iets hogere drogestofproductie (1-7%) dan in de situatie zonder vervanging. De extensivering van het teeltplan door de vervanging van aardappelen door een graan leidt op termijn tot 6-8% lagere droge stofopbrengsten van de andere akkerbouwgewassen binnen de rotatie.

#### Organische stof in de bodem

Bij de gehanteerde aannamen voor het gebruikte SWAP/WOFOST-model in deze studie is met de jaarlijkse aanvoer van 10 ton/ha compost een langzame stijging, of een minder snelle daling van het organische stofgehalte van de bodem te verwachten. Berekend is een stijging van minder dan 1% in 30 jaar. Aan de vervanging van stikstof in dierlijke mest door een grotere hoeveelheid stikstof in compost kleef het risico dat de uitspoeling kan toenemen door extra mineralisatie als de nawerking niet wordt meegenomen bij het definiëren van de mestgiften. In de doorgerekende situatie was de extra inzet van een vanggewas niet mogelijk, omdat in de referentie al een maximale inzet van een vanggewas aanwezig was. In hoeverre de aangevoerde compost een verhogend effect heeft van de denitrificatiecapaciteit van de bodem dieper dan de bouwvoor is niet te berekenen met het SWAP/WOFOST-model.

Een vermindering van de organische stoftoevoer met dierlijke mest door de extensivering van het teeltplan waarbij aardappelen worden vervangen door een graangewas hoeft niet te leiden tot een daling van het organische stofgehalte, omdat een graangewas meer organische stof aan de bodem toevoegt. Dit heeft echter wel grote saldo-effecten voor een akkerbouwbedrijf.

De teel van een vanggewas leidt tot de aanvoer van extra "effectieve organische stof". Berekend is dat op een termijn van 25 jaar een verhoging van het organische stofgehalte in de bouwvoor kan worden bereikt van 0,03% bij de teelt van een vanggewas eenmaal per vier jaar en een verhoging van 0,06% bij de teelt van tweemaal per vier jaar. In de loop van de tijd neemt de stijging af.

#### Watersysteem

Effecten van de toevoer van organische stof op het waterbergend vermogen worden gering ingeschat op basis van een relatie tussen het beschikbaar vocht en het organische stofpercentage. In gronden met een organische stofpercentage lager dan 2% is het effect groter. In deze benadering is het eventuele indirecte effect van organische stof op de bodemstructuur en het bodemleven niet meegenomen. Mogelijk zullen, door de indirecte effecten, de infiltratiecapaciteit en het bergend vermogen wel toenemen. Kwantitatieve kennis hierover ontbreekt. Op het proefbedrijf is in eerder

---

onderzoek bodemverdichting onder de bouwvoor geconstateerd, maar een eventuele invloed hiervan op de infiltratiecapaciteit is niet vastgesteld.

De inzet van wintervanggewassen en de extensivering door vervanging van aardappelteelt door graanteelt kan tot een verminderde grondwateraanvulling leiden. Of een dergelijke vermindering zou kunnen leiden tot ongewenste effecten op grondwaterafhankelijke ecosystemen in de omgeving, is niet met de gebruikte modellen te schatten. Hiervoor is een dynamisch grondwatermodel nodig.

#### Nitraatconcentraties

De vervanging van een deel van de werkzame stikstofgift in de vorm van dierlijke mest door een gelijke hoeveelheid werkzame stikstofgift in de vorm van compost heeft het risico van een verhoging van nitraatuitspoeling als de extra mineralisatie niet goed is op te vangen door de inzet van wintervanggewassen. De extensivering van het bouwplan en een lagere stikstofaanwending in de vorm van dierlijke mest leiden tot lagere nitraatconcentraties.

Als door maatregelen of systeemveranderingen de nitraatuitspoelingsflux minder dan evenredig met de grondwateraanvulling vermindert, kunnen deze maatregelen of veranderingen leiden tot hogere nitraatconcentraties. Om milieueffecten van maatregelen te voorspellen dient behalve naar de stoffenbalans ook gekeken te worden naar eventuele effecten op de waterbalans.



---

# 5 Handreiking modellering bodemverbeterende maatregelen

## 5.1 Inleiding

Veranderingen in de dichtheid van de bodem kunnen allerlei gevolgen hebben voor hydrologische en agronomische effecten, zoals uit- en afspoeling, bewortelbaarheid, ontstaan van schijngrondwaterspiegels, zuurstofstress, beïnvloeding van capillaire nalevering en gewasopbrengst. Dergelijke gevolgen moeten ook zichtbaar worden bij het gebruik van simulatiemodellen, zoals het hydrologische model SWAP (Kroes et al. 2008), in combinatie met het gewasmodel WOFOST (Boogaard et al. 1998). De vraag is dan welke (invoer)gegevens voor deze modellen moeten worden aangepast. In deze handreiking wordt aangegeven welke parameters daarvoor in aanmerking komen. Aandacht voor verdichting ('compaction') is actueel. In bijvoorbeeld de position paper "Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives" van Vereecken et al. (2016) wordt hier expliciet aandacht aan besteed. Zo wordt onder meer opgemerkt dat we nog steeds onvoldoende weten over het effect van bodemverdichting op o.a. hydrologische effecten, ondanks dat we steeds meer weten over wat er fysisch verandert tijdens verdichting.

Dichtheidsveranderingen zijn veelal het gevolg van zware belasting van de bodem door landbouwmachines. Dit leidt tot samendrukking van de bodem in de bovenlaag en veelal tot extreme verdichting in de vorm van een ploegzool. De dichtheid neemt toe: de hoeveelheid vaste delen per eenheid volume grond neemt toe, de porositeit neemt af, maar ook zal de verdeling van de poriëngroottes veranderen. Dit heeft gevolgen voor diverse fysische aspecten (waterretentiecurve, doorlatendheid, temperatuurgeleiding), chemische en fysiologische aspecten (beworteling). Sommige veranderingen van de dichtheid zijn van tijdelijke aard. Dat betekent dat bijbehorende parameters tijdsafhankelijk zijn. Omdat er naar ons beste weten geen simulatiemodellen bestaan waarin de betreffende invoerparameters tijdsafhankelijk zijn, worden in deze memo alleen de permanente veranderingen beschouwd<sup>17</sup>.

## 5.2 SWAP

### 5.2.1 Introductie

Rekenen met SWAP kan alleen indien er duidelijk sprake is van 1D-transport. Indien het effect van lokale verdichting, bijvoorbeeld bij vaste rijpaden, bestudeerd moet worden, dan zal een 2D-model (FUSSIM2 (Heinen, 2001; Heinen & De Willigen, 1998), Hydrus2 (Šimůnek et al. 2016)) gebruikt moeten worden.

In het verleden opgedane ervaringen geven aan dat voor nauwkeurige bestudering van het effect van verdichte lagen de volgende aspecten een rol spelen (Rob Hendriks, persoonlijke mededeling):

- Voorkeur om neerslaggegevens op uurbasis te gebruiken (zie ook Schipper et al. 2015). Dit heeft vooral invloed op de berekening van oppervlakkige afstroming.
- De dikte van de verdichte laag heeft grote invloed op hydrologische effecten.
- Dikte van de laag boven de sterk verdichte laag (bijv. ploegzool) heeft grote invloed op hydrologische effecten.
- Omdat de doorlatendheid van de verdichte laag veel verschilt van de omliggende lagen, verdient het de voorkeur om bij de discretisatie in en rondom de verdichte laag te kiezen voor dunne compartimenten.

---

<sup>17</sup> In theorie moet het mogelijk zijn om met tijdsafhankelijke invoerparameters te werken, mits hiervoor tijdsafhankelijke beschrijvingen beschikbaar zijn. Daarbij moet wel nauwkeurig rekening worden gehouden met de bijbehorende massabalans van bijvoorbeeld water.

In de studie naar het effect van verdichte bodems in Vlaanderen zijn met SWAP berekeningen uitgevoerd waarbij a) regionale uurlijkse neerslaggegevens zijn gebruikt, b) de verdichte laag expliciet is gedefinieerd, en c) locatie-specifieke (gemeten) hydraulische eigenschappen zijn gebruikt (Van der Bolt et al. 2016 (in voorbereiding)).

Verdichte bodems kunnen aanleiding geven tot toename van piekafvoeren, zowel in de zomer- als in de winterperiodes (Schipper et al. 2015) en kunnen minder water bergen (Sietzema, 2016). Overigens zijn er ook ervaringen met situaties waar verdichting geen grote hydrologische effecten tot gevolg had (Rob Hendriks, pers. med.).

## 5.2.2 Waterstroming

Voor een aantal secties voor SWAP-invoer zijn geen specifieke wijzigingen nodig om te rekenen voor een situatie met verdichting. Dit betreft de secties:

- initieel
- plassen op het maaiveld en oppervlakkige afstroming
- bodemverdamping
- hysteresis
- 'similar media scaling of soil hydraulic functions'
- 'preferential flow due to water repellency' (optie niet langer meer actief in SWAP)
- sneeuw en vorst
- numerieke criteria<sup>18</sup>
- onderrandvoorwaarde

Hieronder worden de secties waarvoor wel veranderingen nodig zijn apart besproken.

### 5.2.2.1 Discretisatie bodemprofiel

Indien een verdichte laag, bijvoorbeeld ploegzool, wordt beschouwd met bijbehorende bodemfysische kenmerken, dan dient de laagindeling voor SWAP hierop te worden aangepast. Uiteraard moet hierbij rekening gehouden worden met de exacte diepte waarop de verdichte laag zich bevindt. Omdat de doorlatendheid van de verdichte laag veel verschilt van de omliggende lagen verdient het de voorkeur om bij de discretisatie in en rondom de verdichte laag te kiezen voor dunne compartimenten.

### 5.2.2.2 Droge bulkdichtheid

Voor de opties rekenen met zuurstofstress volgens het Bartholomeus-concept (Bartholomeus et al. 2008), voor intern stoftransport, of voor het gebruiken van de N-module binnen SWAP moet per bodemlaag een droge bulkdichtheid (BDENS, kg m<sup>-3</sup>) worden opgegeven. Hiermee wordt dan ook rekening gehouden met de hogere dichtheid van de verdichte bodemlaag.

### 5.2.2.3 Bodem hydraulische eigenschappen

De bodem-hydraulische eigenschappen betreffen de waterretentiecurve, de relatie tussen het volumetrisch watergehalte  $\theta$  (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) en de drukhoogte  $h$  (cm),  $(\theta(h))$  en de doorlatendheidsrelatie, de relatie tussen de doorlatendheid  $K$  (cm d<sup>-1</sup>) en  $\theta$  of  $h$ ,  $(K(\theta))$  of  $(K(h))$ . Hiervoor worden veelal de relaties van Mualem (1976) en Van Genuchten (1980) gebruikt, hier gegeven als:

$$S(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha h|^n\right)^{-m} \quad [1]$$

en

$$K(S) = K_s S^\lambda \left(1 - \left(1 - S^{1/m}\right)^m\right)^2 \quad [2]$$

Tabel 5.1 geeft de betekenis van de parameters en de bijbehorende variabele namen van SWAP.

<sup>18</sup> Eventueel nader onderzoeken: effect middeling doorlatendheid  $K$  bij grote verschillen in  $K$  bij sterk verdichte lagen.

**Tabel 5.1** Variabelen in de Mualem-Van Genuchten-relaties.

Variabele	Eenheid	Betekenis	SWAP variabele
$\theta_r$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	residueel volumetrisch watergehalte	ORES
$\theta_s$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	volumetrisch watergehalte bij verzadiging ( $\leq$ porositeit)	OSAT
$\alpha$	$\text{cm}^{-1}$	vormparameter	ALFAD
$n, m$	-	vormparameter; hier geldt $m = 1 - 1/n$	NPAR
$\lambda$	-	vormparameter	LEXP
$K_s$	$\text{cm d}^{-1}$	doorlatendheid bij verzadiging	KSAT

Per onderscheiden bodemlaag moet in SWAP informatie opgegeven worden betreffende de hydraulische eigenschappen, bijvoorbeeld in de vorm van de Mualem-Van Genuchten-parameters. Een verdichte laag krijgt hierbij dus zijn eigen parametrisatie. Grofweg kunnen drie methoden onderscheiden worden hoe een dergelijke parametrisatie tot stand kan komen:

1. Via een rechtstreekse bepaling van de hydraulische eigenschappen middels bepaling van de waterretentie- en doorlatendheidsrelatie in het laboratorium waarvoor vervolgens de Mualem-Van Genuchten parameters worden afgeleid.
2. Zoek uit alle onderliggende curves waaruit de Staringreeks (Wösten et al. 1994; 2001) bouwstenen zijn opgebouwd hydraulische eigenschappen die representatief geacht werden voor een referentie (niet-verdichte) en verdichte situaties. Dit is onder meer toegepast in de studie van Schipper et al. (2015).
3. De parameters van de Mualem-Van Genuchten-relaties voor een verdichte laag kunnen worden berekend uit de parameters voor een niet-verdichte situatie op basis van de dichtheidsverschillen. Deze methode is onder meer toegepast door Schlüter et al. (2012), gebaseerd op de theorieën van Assouline (2006a,b) (zie Bijlage 4).

Omgekeerd kan ook: het losmaken van de bovengrond (bijv. zaaibed bereiding) leidt tot een lagere droge bulkdichtheid. Dit zou met dezelfde pedotransferfuncties behandeld kunnen worden. Echter, Schlüter et al. (2012) geven de voorkeur aan een bimodale aanpak volgens het concept van Durner (1994).

#### 5.2.2.4 Maximale bewortelingsdiepte

Een sterk verdichte bodemlaag kan de maximale bewortelingsdiepte beperken. In dat geval moet de variabele RDS (cm) daarop worden aangepast.

Over het algemeen wordt gesteld dat de bewortelingsdiepte afhankelijk is van de indringingsweerstand van de bodem. Een verdichte laag kan daarbij bepalend zijn, indien de indringingsweerstand van die laag te hoog wordt. Over het algemeen wordt gesteld dat een indringingsweerstand van 2.5 MPa enigszins kritisch is en dat bij 5 MPa of meer beworteling niet meer mogelijk is (anderen nemen een grenswaarde van 3 MPa aan) (Canarache, 1990). Canarache (1990) geeft rekenregels om de indringingsweerstand te berekenen op basis van de bulkdichtheid, het kleigehalte en het gravimetrische watergehalte<sup>19</sup> (o.m. ook toegepast in het model SIMWASER van Stenitzer and Murer (2003)) (zie Bijlage 5).

#### 5.2.2.5 Laterale drainage

Er is op dit moment nog geen goede ervaring met de effecten van verdichting op de laterale drainage. Hypothetisch (Rob Hendriks, pers. med.) kan men denken aan een verschuiving (naar boven) van de basis van de interflow laag (indien gemodelleerd), of juist het ontstaan van interflow bij het ontstaan van een ploegzool, of het veranderen van de interflow coëfficiënt (COFINTFLB, EXPINTFLB; in DRA file) als de verdichte laag de bovenste laag is die eerder interflow had omdat deze op een ploegzool lag.

#### 5.2.2.6 Preferential flow due to macro pores

Bij de optie 'macropore flow' moeten enkele parameters per bodemlaag (ISOILLAY) worden ingevoerd: SWSoilShr, SwShrInp, ThetCrMP, GeomFac, ShrParA, ShrParB, ShrParC, ShrParD, ShrParE, SwSorp,

<sup>19</sup> Relatie tussen gravimetrisch watergehalte  $w$  en volumetrisch watergehalte  $\theta$  luidt:  $w = \theta/\rho_d$ , met  $\rho_d$  de droge bulkdichtheid (verondersteld is dat dichtheid van water gelijk is aan  $1 \text{ g/cm}^3$ ).

---

SorpFacParl, SorpMax, SorpAlfa (zie beschrijving in Kroes et al. 2008). Indien bekend of gewenst, dan moeten de waarden voor de verdichte bodemlaag aangepast worden.

Je zou verwachten dat zwellende en krimpende gronden niet gevoelig zijn voor verdichting omdat ze een groot herstelvermogen hebben (Jan van den Akker, pers. med.). Maar minder bekend is of de krimpkarakteristiek blijvend verandert indien de grond sterk verdicht is; volgens Rob Hendriks mogelijk niet (pers. med.). Verdichting in veengronden is niet relevant (Jan van den Akker, pers. med.).

De parameters die de geometrie van de macroporiën beschrijven kunnen veranderen. Het betreft dan: Z\_IC, Z\_ST, VIMpStSs, PpIcSs, PowM, en mogelijk DiPoMi (Rob Hendriks, pers. med.).

- Z\_IC : diepte onderkant internal catchment (IC) domein (cm)
- Z\_ST : diepte onderkant statische macroporiën (cm)
- VIMpStSs : volume fractie statische macroporiën aan het grondoppervlak ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
- PpIcSs : fractie IC domein aan het grondoppervlak (-)
- PowM : Power M voor de frequentieverdelingscurve van het IC domein (-)
- DiPoMi : minimale diameter van de ondiepe bodempolygonen (cm)

### 5.2.3 Warmtetransport

Verdichting heeft effect op de textuurverdeling (zand, silt en klei) en op het organische-stofgehalte (gewichtsbasis). Het effect van een verdichte laag zal via het effect op watergehalte in de verdichte laag invloed hebben op temperatuurdiffusie.

### 5.2.4 Stoftransport

Onderscheid wordt gemaakt in 2 vormen van stoftransport die met SWAP kunnen worden beschouwd: interne stoftransport (sectie 5.2.4.1) en een N-module (sectie 5.2.4.2).

#### 5.2.4.1 Intern stoftransport (SWSOLU = 1)

Per bodemlaag (ISOILLAY) moeten waarden voor LDIS, KF, BDENS en DECPOT worden opgegeven. Voor BDENS moeten de waarden voor de verdichte laag aangepast worden.

In de verdichte laag kan verder verondersteld worden: adsorptie (KF, FREXP, CREF) en decompositie (DECPOT, GAMPAR, RTHETA, BEXP, FDEPTH) volgens dezelfde parameters als in de niet-verdichte laag.

#### 5.2.4.2 N-module (flCropNut = .true.)

In deze N-module wordt N-dynamiek in 1 compartiment beschouwd (representatief voor bodemprofiel of wortelzone). Dat betekent dat verdichting in een specifieke laag niet beschouwd kan worden m.b.t. parametrisatie. Een optie is om effecten van bodemverdichting met behulp van effectieve parameters (dz\_WSN, TCSF\_N) tot uitdrukking te brengen.

De dikte van het compartiment, dz\_WSN (m) moet door de gebruiker worden opgegeven. Geadviseerd wordt voor grasland 0.3 m en voor wintergraan 1.0 m te gebruiken. Dat betekent dat het de bewortelde zone betreft. Bij aanwezigheid van een sterk verdichte laag kan de bewortelingsdiepte beperkt zijn (zie sectie 2.2.4) en moet dz\_WSN hierop worden aangepast: dat betekent afstemmen met, of gelijkstellen aan, RDS.

Een tweede variabele die afhankelijk is van het bewortelingspatroon (en grondsoort) is de transpiratie-concentratie factor TCSF\_N. Indien dz\_WSN wordt aangepast, dient mogelijk ook een aanpassing voor TCSF\_N plaats te vinden (evt. via kalibratie).

## 5.3 WOFOST of eenvoudige gewasgroei optie

Indien de eenvoudige gewasgroei optie in SWAP wordt gebruikt (CropFixed), moet in de gewasvoer file (CRP) een tabel opgegeven worden waarin de bewortelingsdiepte als functie van het ontwikkelingsstadium wordt gegeven: RDTB. De maximale bewortelingsdiepte moet worden afgestemd (kleiner of gelijk aan) met de waarde RDS zoals opgegeven in de SWP file.

Voor zowel de eenvoudige gewasgroei-optie als voor gebruik van WOFOST moet een tabel worden opgegeven waarin de relatieve wortelverdeling wordt gegeven als functie van de relatieve

---

bewortelingsdiepte: RDCTB. Hier kan rekening worden gehouden met de aanwezigheid van een verdichte laag (zie ook sectie 5.5.1).

Er is voornamelijk geen aanleiding om gewasspecifieke parameters aan te passen als gevolg van de aanwezigheid van een verdichte bodem of laag (Joop Kroes, Allard de Wit, Iwan Supit, pers. med.).

## 5.4 Meta-SWAP

De bodemfysische eigenschappen, beschreven volgens Mualem-Van Genuchten (zie sectie 5.2.2.3) voor de verdichte laag, kunnen gebruikt worden om tabellen te genereren voor de verdichte laag. In Bijlage 8 is de manier aangegeven waarop in de studie van Schipper et al. (2015) de waterretentiecurve en de doorlatendheidsrelatie zijn gemanipuleerd om als invoer te kunnen dienen om in het MetaSWAP-model effecten van bodemverdichting te kunnen doorrekenen.

## 5.5 Doorrekenen maatregelen

De meeste invoerparameters van de genoemde modellen zijn statisch: ze blijven constant gedurende de beschouwde simulatieperiode. Dat betreft ook de droge bulkdichtheid en de bodemfysische parameters. Dat betekent dat veranderingen in deze eigenschappen dus niet dynamisch door de modellen kunnen worden nagebootst. De invloed van bijvoorbeeld de aanwezigheid van een verdichte laag (niet alleen specifiek de ploegzool, maar dat kan ook de laag 0-30 cm zijn) kan dan alleen maar bestudeerd worden door simulaties met en zonder een verdichte laag met elkaar te vergelijken. Om de invloed van maatregelen te bestuderen, geldt dan hetzelfde: simulaties met en zonder maatregelen met elkaar vergelijken. Enkele maatregelen waaraan gedacht kan worden, zijn: beworteling (evt. via gewaskeuze), aanvoer compost, effect regenwormen.

### 5.5.1 Beworteling

Op basis van de bekende droge bulkdichtheid en kleigehaltes in de boven- en ondergrond en een inschatting van de gemiddelde watergehalten (relatief, droog, relatief nat) kan met behulp van het model PENETR (zie Bijlage 5) een schatting gemaakt worden of de indringingsweerstand van 2.5-5 MPa een rol gaat spelen. De diepte waarop dit relevant wordt, kan dan als maximale bewortelingsdiepte (RDS) in de invoer van SWAP worden gebruikt.

Van sommige gewassen is bekend dat ze toch door dichte lagen heen kunnen wortelen. Een voorbeeld is het gewas Sorghum. Kennelijk geldt hiervoor een hogere grenswaarde voor de maximale indringingsweerstand. In dat geval kan gekozen worden om een dergelijk gewas te telen om de verdichte laag enigszins te doorbreken. De maximale bewortelingsdiepte is in dat geval dan meer fysiologisch bepaald (tenzij er op andere dieptes fysisch of chemische beperkingen zijn). In andere gevallen zullen wortels door de verdichte laag heen groeien via aanwezige wormgangen. Luske et al. (2012) geven een paar voorbeelden uit de literatuur over het effect van verdichting op de beworteling (Figuur 5.1).

a)

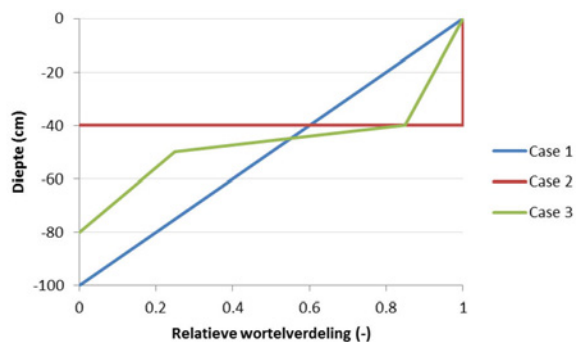


b)



**Figuur 5.1** a) verdeling maïs wortels bij normale dichtheid (links) en in verdichte grond (rechts), en b) wortels passeren verdichte lagen door verticale wormgangen (links: gerst) en van afgestorven wortels (rechts: jonge haverplant, onderste verticale wortels) (bron: Kutschera et al. (2009) zoals aan gerefereerd in Luske et al. 2012).

Het feit dat sommige gewassen toch door de verdichte laag heen kunnen wortelen, betekent nog niet dat de wortelverdeling met de diepte ongewijzigd is ten opzichte van een situatie zonder aanwezigheid van een verdichte laag. Op basis van visuele waarnemingen en expertkennis zal een goede inschatting gegeven moeten worden van de wortelverdelingsfunctie RDCTB in de gewasinvvoerfiles voor SWAP-WOFOST (zie voorbeelden in Figuur 5.2).



**Figuur 5.2** Visualisatie van verschillende bewortelingsprofielen: Case 1 voor een situatie zonder verdichte laag, Case 2 voor een situatie met verdichte laag op 40 cm die niet doorworteld is, en Case 3 voor een situatie waar de meeste wortels boven de verdichte laag zitten, en waarbij nog wel enkele wortels door de verdichte laag heen groeien.

### 5.5.2 Aanvoer compost

Aanvoer van organische stof in de vorm van compost of anders vindt over het algemeen oppervlakkig plaats en wordt in de bovenlaag (bijv. 0-30 cm) ingewerkt. Organische stof heeft een intrinsieke lage dichtheid. Bij aanvoer van grote hoeveelheden organische stof zal de dichtheid (droge bulkdichtheid, dichtheid vast fase) van de laag waar het wordt ingewerkt, veranderen (verminderen) en daarmee ook de porositeit en de poriëngrootteverdeling. Dat heeft tevens tot gevolg dat de waterretentiecure (Figuur 4.1 in Van Eekeren & Zaneveld-Reijnders, 2011) en de doorlatendheid veranderen. De nieuwe bodemfysische eigenschappen kunnen als volgt worden vastgesteld:

- Direct, via metingen in het laboratorium.

- Indirect, via bepaling nieuwe parameters voor de Mualem-Van Genuchten-relaties conform de formules [A-1]-[A-10] (zie Bijlage 4), waarbij we veronderstellen dat deze ook in de omgekeerde richting gehanteerd mogen worden en dat de bodemfysische eigenschappen van de bodem voorafgaand aan de toevoeging bekend waren.
- Indirect, via inschatting nieuwe parameters voor de Mualem-Van Genuchten-relaties op basis van bekende pedotransferfuncties die deze parameters relateren aan andere eenvoudig te meten variabelen.

Bij die laatste methode moet men zich realiseren dat dergelijke pedotransferfuncties empirische relaties zijn die zijn gebaseerd op een set parameters. De pedotransferfuncties zijn in principe alleen geldig voor het bereik waarin ze zijn afgeleid. Extrapolatie naar andere omstandigheden wordt niet aangeraden. In Bijlage C is voor een aantal bouwstenen uit de Staringreeks aangegeven hoe de Mualem-Van Genuchten-parameters veranderen als functie van het humusgehalte, gebruikmakend van de Staringreeks pedotransferfuncties (Wösten et al. 2001).

### 5.5.3 Effect regenwormen

In een opiniestuk concluderen Keesstra et al. (2012) dat de aanwezigheid en verdeling van macroporiën sterk zijn gecorreleerd met de aanwezigheid van wormen, en dit kan gebruikt worden om stroming onder invloed van macroporiën te parametriseren (zie ook van Schaik et al. 2010). Wel is er nog aanvullend onderzoek nodig om de efficiëntie van macroporiën voor zowel water- als stoftransport op grotere schaal te kwantificeren. Er worden drie soorten wormen onderscheiden: endogeïc, epigeïc and anecic wormen, waarbij de eerste twee soorten voornamelijk ondiep voorkomen en vooral horizontale wormgangen maken; de derde soort maakt diepe, verticale wormgangen. Verticale wormgangen kunnen daarbij ook door verdichte lagen heengaan (Figuur 5.3).



**Figuur 5.3** Voorbeeld van een grote doorgaande macroporie aanwezig in de verdichte ondergrond: links: bovenaanzicht; rechts: dwarsdoorsnede (bron: Van der Bolt et al. 2016).

Bioporiën: te beschouwen door in het SWAP model optie Macropore flow in SWAP aan te zetten.

De ruimtelijke verdeling van de functionele diepte van macroporiën is een uitgangspunt in het Macropore flowconcept in het SWAP-model. Deze kan worden beschreven in de vorm van een frequentieverdeling van het macroporievolume met de diepte. In SWAP kan deze verdeling nog worden opgedeeld in twee hoofddomeinen:

1. Main bypass flow domein: dat zijn (meestal) de grotere scheuren die een netwerk vormen en die daardoor ook water naar drains en sloten kunnen afleiden. Maar zij veroorzaken vooral transport van water naar grotere diepte daarbij 'bypassing' van het bovenste deel van het profiel, of bv. een ploegzool. In de Andelst-veldproef (lichte klei) zijn krimpscheuren en wormgangen dwars door de sterk verdichte ploegzool waargenomen en meegenomen in de modellering;

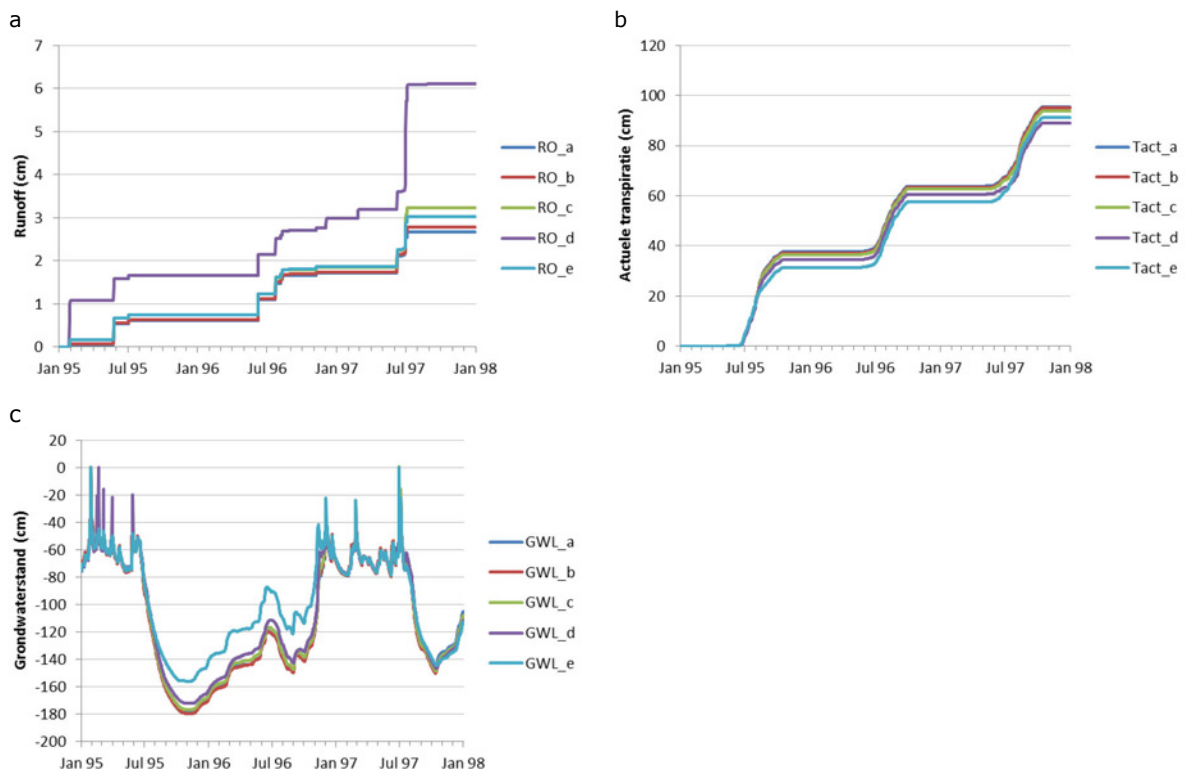
2. Internal catchment domein: dit is een deel van het macroporievolume dat functioneel eindigt op verschillende, geringere diepten en zorgt voor 'intern afvangen' van een deel van het aan maaiveld instromende water in het bodemprofiel.

#### 5.5.4 Grondbewerking

Ploegen en diepwoelen met als doel de verdichting op te heffen of te verminderen zal vooral effect hebben op de droge bulkdichtheid, maximale bewortelingsdiepte en de hydraulische eigenschappen; hier is hierboven aandacht aan besteed.

## 5.6 Voorbeeld

Met SWAP zijn enkele scenario's doorgerekend om invloed van een dunne of dikke verdichte laag in combinatie met discretisatie en maximale bewortelingsdiepte te duiden (Figuur 5.4)<sup>20</sup>. In dit voorbeeld heeft de dikte van de verdichte laag (15 cm versus 5 cm) relatief een grote invloed op berekende oppervlakkige afstroming en de maximale bewortelingsdiepte heeft een relatief grote invloed op transpiratiereductie (en daarmee gewasopbrengst) en grondwaterstand.



**Figuur 5.4** Effect van aanwezigheid verdichte laag op a) oppervlakkige afstroming (run-off), b) gewas transpiratie, en c) grondwaterstand voor 5 onderscheiden situaties.

\_a: Referentie (geen verdichte laag)

\_b: als \_a, maar met een verdichte laag van 5 cm op diepte 30-25 cm -mv;  $K_{s,d}/K_s = 0.01$

\_c: als \_b maar met een fijn grid

\_d: als \_c maar met dikke verdichte laag van 30-45 cm -mv

\_e: als \_c maar met maximale bewortelingsdiepte 40 cm

In Figuur 5.4 zijn de resultaten voor de berekende oppervlakkige afstroming, actuele transpiratie en grondwaterstand gegeven als functie van de tijd voor de vijf scenario's. In dit voorbeeld heeft de dikte van de verdichte laag (15 cm versus 5 cm) relatief een grote invloed op berekende oppervlakkige

<sup>20</sup> ZandB2 op zandO2, 2 m diep profiel op ondoorlatende laag; uurlijkse neerslagegegevens.



---

afstroming, en de maximale bewortelingsdiepte heeft enige invloed op transpiratiereductie (en daarmee gewasopbrengst) en grondwaterstand. Een meer gedetailleerde studie van het effect van de dikte van de verdichte laag, de diepte waarop deze begint, en de dikte van de wortelzone is gegeven in hoofdstuk 2.7. Daar wordt bijvoorbeeld een groter effect op de transpiratiereductie gevonden dan verkregen in dit voorbeeld. Dat heeft te maken met verschillen in bodemsoorten, meteorologische condities en met de gekozen onderrandvoorwaarde. In dit voorbeeld is de onderrand gesloten, zodat al het eventuele overschot in de nabijheid van de wortelzone opgeslagen blijft en in een later stadium alsnog voor transpiratie gebruikt kan worden. In een situatie met vrije drainage aan de onderrand (zoals in Hoofdstuk 2.7) is dat niet het geval.

## 5.7 Aanbeveling voor toepassing

De opgestelde handreiking biedt concrete adviezen en vuistregels om met het SWAP-WoFOST model bodemverbeterende maatregelen door te rekenen. Ook biedt het concrete handvatten om met regionale geohydrologische modellen, waarin MetaSWAP is geïmplementeerd voor de vochthuishouding van de onverzadigde zone, bodemverbeterende maatregelen door te rekenen. Aanbevolen wordt om de vuistregels en adviezen verder uit te testen in gebiedsstudies waarin gericht wordt gemeten om met behulp van de modellen de effecten van bodemverbeterende maatregelen nauwkeuriger te kunnen kwantificeren.

---

# 6 Synthese

## 6.1 Beantwoording kennisvragen

*Kennisvraag 1. Welke effecten op de waterkwantiteit (verdampingsreductie en oppervlakkige afstroming) worden berekend als voor een concrete situatie, in tegenstelling tot de studie van Schipper et al. (2015) en voorgaande studies, gebruik wordt gemaakt van gemeten variaties in bodemfysische parameters? In welke mate leidt dit tot een bijstelling van het inzicht verkregen uit de voorgaande modelverkenningen?*

### Verdampingsreductie<sup>21</sup>

- In voorgaande modelverkenningen is een langjarig gemiddelde verdampingsreductie als gevolg van bodemverdichting berekend van 18–28 mm jr<sup>-1</sup> voor grasland op een droge veldpodzolgrond en 10–13 mm jr<sup>-1</sup> voor grasland op zandgrond met grondwatertrap III of IV. Voor snijmaïs werd de langjarig gemiddelde verdampingsreductie als gevolg van bodemverdichting berekend op enkele millimeters.
  - Bij grasland werd de verdampingsreductie vooral veroorzaakt door droogteschade, maar bij snijmaïs op een nattere bodem droeg ook natschade bij aan het effect.
- in de studie Vruchtbare Kringloop is op basis van gemeten textuur, dichtheden, waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties een verdampingsreductie berekend van ca. 13–56 mm jr<sup>-1</sup> voor grasland en 46–55 mm jr<sup>-1</sup> voor maïs, afhankelijk van de diepte van de bewortelbare laag en dikte van de verdichte laag.
- De berekende verdampingsreductie als gevolg van bodemverdichting is in de Vlaanderen studie 0 tot 6 mm jr<sup>-1</sup> bij het huidige klimaat. Bij een klimaatscenario met natte winters en droge zomers wordt door bodemverdichting een extra verdampingsreductie van 20–38 mm jr<sup>-1</sup> berekend.

In de resultaten van Vruchtbare Kringloop worden de effecten van bodemverdichting op de langjarig gemiddelde verdampingsreductie ca. 0–25 mm jr<sup>-1</sup> hoger ingeschat dan in de eerdere verkenningen, maar in de Vlaanderenstudie worden ze 10–25 mm jr<sup>-1</sup> lager ingeschat. Dat in de Vlaanderenstudie een lagere reductie wordt berekend, komt omdat daar de mate van verdichting minder groot is en wat dieper in het profiel zit.

In aanvulling op voorgaande verkenningen maakt de onderhavige studie duidelijk dat bodemverdichting een duidelijke invloed heeft op gewasverdamping bij grasland als de bovenkant van de verdichte bodemlaag zich ondieper bevindt dan waar onder normale omstandigheden beworteling verwacht kan worden (25–30 cm). Als de verdichte laag zich op grotere diepte bevindt, is het effect ervan op gewasverdamping beperkt. Bij dieper wortelende gewassen, zoals snijmaïs en akkerbouwgewassen, is een effect op de gewasverdamping te verwachten als de verdichte laag ondieper dan 50 cm voorkomt.

### Oppervlakkige afstroming

- In een eerdere modelverkenning zijn zomerse 4-uurspiekafvoer berekend van ca. 2 mm bij een herhalingstijd van eenmaal in de 2 jaar en 5 mm bij een herhalingstijd van eenmaal in de 10 jaar. Volgens deze modelverkenning kunnen dergelijke piekafvoeren door bodemverbetering tot 50% worden gereduceerd. De 24-uurspiekafvoer in een wintersituatie werd berekend op 5–10 mm bij een herhalingstijd van 2 jaar en 12–22 mm bij een herhalingstijd van 10 jaar. Bodemverbetering zou resulteren in een reductie van de piekafvoeren van 5–15%.
- In de modelberekeningen voor Vruchtbare Kringloop is het langjarig gemiddelde effect van bodemverdichting op oppervlakkige afstroming berekend op enkele mm jr<sup>-1</sup> voor grasland en ca.

---

<sup>21</sup> De *verdampingsreductie* geeft aan in welke mate een gewas minder verdampt door droge of natte omstandigheden en is een indicator voor een vermindering van de gewasproductie.

---

10 mm jr<sup>-1</sup> voor snijmaïs. Het effect op de 95-percentielwaarde, omgerekend naar het langjarig gemiddelde, bedraagt enkele mm jr<sup>-1</sup> voor grasland ca 12 mm jr<sup>-1</sup> voor snijmaïs.

- In de Vlaanderenstudie leidt bodemverdichting, berekend met uurwaarden voor de neerslag, tot een toename van de jaarlijkse oppervlakkige afstroming van 5 naar 14 mm. In de klimaatscenario's zijn de gesimuleerde jaarwaarden voor de oppervlakkige afstroming voor zowel de niet-verdichte situatie als de verdichte situatie ongeveer even groot.

Alhoewel de manier waarop de cijfers berekend zijn verschilt voor de drie situaties, blijkt dat de gesimuleerde oppervlakkige afstroming in de deelstudies in dezelfde orde van grootte ligt als in de eerdere modelverkenning. De 95-percentielwaarden voor de piekafvoer met een herhalingstijd van 10 jaar zijn in de deelstudie Vruchtbare kringloop wel lager berekend als in de eerdere modelverkenning. De modellen waarmee de piekafvoeren berekend zijn, zijn consistent.

De onzekerheidsmarge is relatief groot en het resultaat wordt beïnvloed door verschillende factoren. Een inperking van de bandbreedte van modelresultaten en een kwantificering van de onzekerheid is alleen te verwachten door monitoring en metingen in veldsituaties.

De methode voor de modelmatige analyse van effecten op oppervlakkige afstroming is nog niet gestandaardiseerd. Dit bemoeilijkt een zuivere en eenduidige interpretatie van modelresultaten. Om verdere standaardisering te faciliteren, is een R-script ontwikkeld voor de verwerking van modelresultaten (Bijlage 8).

De onderhavige studie heeft duidelijk gemaakt dat de standaardwaarden voor de verzadigde doorlatendheid van de toplaag tot de relatief lage waarden van de oppervlakkige afstroming leiden. In studies naar bodemverdichting gaat de aandacht uit naar de eigenschappen van bijv. een ploegzool of een andere verdichte laag op enkele decimeters diepte. In Jansen et al. (2013) zijn modelexperimenten uitgevoerd met lagere waarden voor de verzadigde doorlatendheid van de bovenste 2 cm en met alternatieve waarden voor de potentiële berging van water op het maaiveld. De resultaten lieten zien dat met realistische alternatieve waarden voor modelparameters veel grotere waarden voor de oppervlakkige afstroming berekend worden, maar ook dat een vertaling van veldkenmerken naar een goede inschatting van deze modelparameters nog ontbreekt.

*Kennisvraag 2. Welke bodemfysische parameters moeten goed bekend zijn om effecten van bodemverdichting te kunnen kwantificeren? En zijn metingen van de doorlatendheidsrelatie nodig of kunnen de parameters worden geschat met expert judgement en op basis van gelijkenis van waterretentiecurve?*

De volgende bodemfysische gegevens zijn nodig voor een adequate inschatting van effecten van bodemverdichting en van maatregelen voor het opheffen ervan:

- de diepte en de dikte van verdichte bodemlagen, af te leiden uit boorbeschrijvingen en indringingsweerstand profielen. Voor het kunnen ontrafelen van effecten van bodemverdichting en effecten van slemp of andere vormen van structuurbederf is het raadzaam om de toplaag van de bodem (bovenste paar cm) als afzonderlijke laag te onderscheiden.
- de droge bulkdichtheid van deze lagen.
- de waterretentiecurve en de doorlatendheidsrelatie van de verschillende bodemlagen, inclusief de verzadigde doorlatendheid.

Resultaten van het onderzoek naar bodemfysische eigenschappen van een perceel van Vruchtbare Kringloop geven aan dat bij gebruik van metingen van de verzadigde doorlatendheid de bandbreedte van gesimuleerde oppervlakkige afstroming kleiner wordt. Bij gebruik van uit metingen afgeleide waarden van de parameter Lambda in de Van Genuchten-relatie wordt de bandbreedte van de transpiratiereductie kleiner. Voor zowel de oppervlakkige afstroming als voor de transpiratiereductie was de maximumwaarde ongeveer tweemaal zo groot als de minimumwaarde. Het hangt dan ook af van de uitgangssituatie of metingen van de doorlatendheidsrelatie meerwaarde hebben. In een situatie waarin de oppervlakkige afstroming gering is, zoals in de Vlaanderenstudie en het perceel van Vruchtbare Kringloop, heeft een stijging van 50% ervan weinig effect. Dit geldt ook voor de

---

transpiratiereductie. Als uit veldwaarnemingen blijkt dat duidelijk sprake is van bodemverdichting op geringe diepte en dat dit leidt tot transpiratiereductie en/of oppervlakkige afstroming, verdient het aanbeveling om of de doorlatendheidsrelatie te meten. Voor die relatie is het belangrijk om ook de verzadigde doorlatendheid goed te meten, maar de huidige meetmethodes leveren voor de verzadigde doorlatendheid nog een grote onzekerheidsmarge. In situaties waarin geen sprake is van bodemverdichting kan met een schatting op basis van expert judgement of op basis van de gelijkens van waterretentiecurven worden geschat. Dit geldt ook als onder grasland een verdichte laag zich dieper dan ca. 25-30 cm diepte bevindt en onder bouwland dieper dan 40-50 cm.

*Kennisvraag 3. Levert het toevoegen van Belgische gegevens aan de Nederlandse bodemdatabase een duidelijke meerwaarde voor de kwantificering van de effecten van bodemverdichting?*

In Vlaanderen is, mede door de recente studie naar bodemverdichting, een database opgebouwd met bodemmonsters waar naast de textuur, organische stof en bulkdichtheid, ook de waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties zijn gemeten. Toevoeging van deze dataset levert een waardevolle aanvulling aan de Nederlandse bodemdatabase, omdat de Nederlandse database statistisch gezien weinig monsters bevat. Voor een grotere statistische betrouwbaarheid van resultaten is een groter aantal waarnemingen gewenst. De Vlaamse data hebben echter vooral betrekking op de middenmoot van de range aan bulkdichtheden en leveren daarom weinig meerwaarde voor de meer extreme situaties van verdichting. Daarom is aanvulling van de dataset met veldmetingen nodig om effect van verdichting op de waterhuishouding adequaat te kunnen kwantificeren.

*Kennisvraag 4. Wat zijn de langetermijneffecten van maatregelen ter verhoging van het organische stofgehalte op de vochtbeschikbaarheid, de gewasopbrengst en de nitraatuitspoeling?*

Met de aanvoer kan het organisch stofgehalte worden verhoogd. Dit is een langdurig proces. Verhoging van het organisch stofgehalte met 1% vergt meer dan 30 jaar aanvoer. Het effect van inerte organische stof op het waterbergend vermogen neemt in zandgronden sterk toe wanneer het organische stofgehalte initieel lager is dan circa 2%. Verhoging van 1% naar 2% levert dan een verhoging van het beschikbare vocht<sup>22</sup> van circa 3%. Voor gronden met een hoger initieel organische stofgehalte draagt de toevoeging van inert organische stof veel minder bij aan het waterbergend vermogen: circa 0,7% extra beschikbaar bodemvocht per 1% stijging organische stofgehalte; dit komt overeen met ca. 2 mm voor een wortelzone van 30 cm dik.

Indirecte effecten op het waterbergend vermogen worden bepaald door de effecten van de toevoer van organische stof op het bodemleven en de bodemstructuur. Dit indirecte effect is mogelijk groter, maar daar is weinig kwantitatieve kennis over.

De effecten op gewasopbrengst worden vooral bepaald doordat met de toevoer van organische stof ook extra nutriënten worden aangevoerd. Berekend is dat de gedeeltelijke vervanging van dierlijke mest door compost, waarbij in totaal ca. 70 kg ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> extra stikstof wordt aangevoerd, op termijn leidt tot een iets hogere drogestofproductie (1-7%). De extensivering van het teeltplan door de vervanging van aardappelen door een graan, leidt op termijn tot 6-8% lagere droge stofopbrengsten van de andere akkerbouwgewassen binnen de rotatie, omdat minder stikstof wordt aangevoerd.

Langetermijneffecten van toevoer van organische stof met compost op de nitraatuitspoeling worden eveneens sterk bepaald door de eventuele extra toevoer van stikstof. Opbouw van organische stof door de teelt van een vanggewas zonder extra mestgift kan leiden tot zowel een toe- als afname van de nitraatconcentratie. Dit wordt bepaald door het effect van het vanggewas op de stikstofopname van het hoofdgewas en de afname van de grondwateraanvulling.

---

<sup>22</sup> Met beschikbaar vocht wordt de hoeveelheid vocht aangeduid die geborgen kan worden tussen pF 2.0 en pF 4.2 per diepte-eenheid.

---

*Kennisvraag 5. Hoe kunnen bodemverbeterende maatregelen worden benaderd in bodemvochtmodellen?*

In de handreiking is aangegeven hoe effecten van bodemverdichting verdisconteerd kunnen worden in de bodemfysische relaties in het SWAP-WOFOST-model. Aangegeven is hoe vanuit de bulkdichtheid en maximale bewortelingsdiepte de bodemfysische parameters aangepast kunnen worden om effecten van verdichting te kwantificeren. Deze kennis is ook toe te passen op het MetaSWAP-model waarmee binnen een aantal regionale grondwaterstromingsmodellen en het Landelijk Hydrologische Modelinstrumentarium (LHM) de bodemvochtberekeningen worden uitgevoerd.

*Kennisvraag 6. Welke meetgegevens zijn minimaal nodig om met modellen de vochthoudding te simuleren en daarbij 1) onderscheid te maken tussen een goede en slechte bodemstructuur; en 2) effecten van bodemverbeterende maatregelen te kunnen kwantificeren?*

Als basis dient een model als SWAP voorzien te worden van parameters voor meteo, gewas, bodemfysische parameters en randvoorwaarden voor ontwatering en diepere grondwater. Effecten van bodemverbetering (of verslechtering) op de vochthoudding worden berekend door de ondiepe ondergrond (tot circa 1m -mv) te variëren in:

- laagopbouw
- doorlatendheidsrelatie (onverzadigd en verzadigd)
- waterretentie curve
- bewortelingsdiepte
- maaiveld ruwheid (potentiële waterberging op maaiveld)

Meetgegevens die essentieel zijn om onderscheid te kunnen maken tussen een goede en slechte bodemstructuur en voor het kwantificeren van bodemverbeterende maatregelen zijn:

- beschrijving bodemprofiel, inclusief beworteling en visuele kenmerken van slemp en verdichting
- indringingsweerstand
- bulkdichtheid
- organische stof

Als er aanwijzingen zijn dat sprake is van bodemverdichting, slempverschijnselen, ander structuurbederf of het optreden van oppervlakkige afstroming, dienen ook veldgegevens te worden verzameld van de doorlatendheidsrelatie en de waterretentiecurve.

Voor toetsing van modelresultaten zijn meetgegevens nodig van:

- vochtgehalten onverzadigde zone op meerdere dieptes
- infiltratie capaciteit
- de tijdstippen waarop plassen op het land staan

## 6.2 Conclusies

De synthese maakt duidelijk dat het voor de waterbeheerder handelingsperspectieven biedt om verder te verkennen in hoeverre effecten van bodemverbeterende maatregelen bijdragen aan de wateropgaven. Voor het huidige klimaat is berekend dat de maatregelen kunnen leiden tot extra waterberging in de bodem ter grootte van 3 tot 13<sup>23</sup> mm, een vermindering van oppervlakkige afstroming van 2 tot 11<sup>24</sup> mm en op het verminderen van verdampingsreductie is het verwachte effect

---

<sup>23</sup> Van Dijk en Van Miltenburg (2013) 3–12,5 mm geeft als extra berging bij een zware regenbui.

<sup>24</sup> Schipper et al. (2015) geeft 5–10 mm aan voor de piekafvoer in de wintersituatie bij een herhalingstijd van T=2 jaar en 12–22 mm voor de zomersituatie bij herhalingstijd van T=10 jaar, waarvan ca. 50% is te reduceren door maatregelen. Modelberekeningen

---

10 tot 20<sup>25</sup> mm (langjarig gemiddeld). De te bereiken effecten worden groter bij klimaatverandering. Bodemverbeterende maatregelen dragen daarmee ook bij aan klimaatadaptatie.

Onzekerheden in effectschattingen komen voort uit de ruimtelijke variatie van bodemeigenschappen, de variatie van het weer en uit de onzekerheid van modelconcepten en modelparameters. Uit de deelstudies is duidelijk geworden dat de huidige beschikbare modelparameters nog leiden tot grote onzekerheden bij het kwantificeren van effecten. Deze onzekerheden zijn het grootst voor de oppervlakkige afstroming, kleiner voor de nitraatuitspoeling en het kleinst voor de transpiratiereductie.

Voor het robuuster<sup>26</sup> maken van de effectschattingen zijn metingen nodig van een aantal parameters. Welke parameters verzameld moeten worden, hangt af van de aard van het probleem en de eigenschappen van het gebied. Met de volgende strategie kunnen efficiënt en doelgericht meetgegevens voor kwantificering worden verzameld:

- In het algemeen geldt dat met het beschrijven van het bodemprofiel in profielkuilen, metingen van de indringingsweerstand en de bulkdichtheid het probleem van bodemverdichting kunnen karakteriseren.
- Als uit een eerste gebiedsanalyse blijkt dat er duidelijke aanwijzingen zijn van bodemverdichting, ondiepe beworteling en oppervlakkige afstroming, wordt geadviseerd gebiedsspecifieke metingen uit te voeren van bewortelingsdiepten, waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties. Zonder deze metingen kunnen met de reeds beschikbare gegevens geen effecten van maatregelen worden geschat.
- Als blijkt dat in het gebied sprake is van schrale gronden (organisch stofgehalte < 2%), wordt geadviseerd om ten behoeve van de kwantificering van het verhogen van het organisch stofgehalte gebiedsspecifieke metingen uit te voeren van de waterretentiecurven.
- Als gekozen wordt voor de opbouw van het organische stofgehalte van de bodem ter vermindering van droogtegevoeligheid en verbetering van de infiltratiecapaciteit dient men erop bedacht te zijn dat met de aanvoer van extra organische stof meestal ook extra stikstof wordt aangevoerd. Dit heeft op lange termijn het risico van extra nitraatuitspoeling. Om effecten van dergelijke maatregelen te kunnen voorspellen, is een goede registratie van alle teelthandelingen en van de aan- en afvoerposten van organische stof en stikstof nodig. Voor de voorspelling van het nitraatgehalte is tevens een monitoring van de grondwaterstand nodig alsmede een registratie van eventuele beregeningsgiften. Als buisdrainage aanwezig is, dient ook de waterafvoer uit de buizen gemeten te worden.

Voor de afweging van regionale waterbeheerders voor een investering in bodemkwaliteit in plaats van in andere maatregelen is het belangrijk dat een maatregel robuust en kosteneffectief is. Voor de bepaling van de omvang en de robuustheid van het effect zijn op het beheersgebied toegesneden modelberekeningen nodig, waarin door middel van onzekerheidsanalyse de bandbreedte van te verwachten effecten gekwantificeerd kan worden. Een dergelijke analyse vergt een goed inzicht in de gevoeligheden van het model en een kwantificering van de onzekerheden van modelinvoer en -parameters. Dit geldt ook voor de alternatieven die in de investeringsbeslissing worden overwogen.

---

<sup>25</sup> Schipper et al. (2015) geeft 19 mm jr<sup>-1</sup> voor gras op droge zandgrond en 10–12 mm jr<sup>-1</sup> voor grasland op zandgrond met Gt III en IV. Voor Vruchtbare Kringloop (dit rapport) is de oppervlakkige afstroming berekend op enkele tot 12 mm jr<sup>-1</sup> en voor Vlaanderen (Van der Bolt et al. 2016) op 0–14 mm jr<sup>-1</sup>.

<sup>26</sup> Onder robuuste maatregel wordt verstaan dat men er zeker van kan zijn dat uitvoering van de maatregel het verwachte effect oplevert.

---

## 6.3 Strategie voor kwantificeren effecten

Voor waterbeheerders die bodemverbetering als strategie zien voor klimaatadaptatie en de realisatie van KRW-doelen is de hoofdvraag:

*"Hoe kunnen effecten van maatregelen ter verbetering van de bodemkwaliteit op het watersysteem gekwantificeerd worden, welke meetgegevens zijn daarvoor nodig en hoe kunnen de effecten kwantitatief in beeld gebracht worden zodat ze meegewogen kunnen worden in besluitvormingsprocessen?"*

De deelstudies hebben nieuwe inzichten opgeleverd voor het meten en kwantificeren met modellen.

### *Conclusies voor strategie monitoring*

Om de omvang van problemen en effecten van maatregelen te kunnen kwantificeren, is experimenteel veldwerk en/of modelonderzoek nodig. Hiervoor zijn, in aanvulling op algemeen beschikbare data/gegevens, extra gegevens nodig. Het vertrekpunt is om voor een gebied inzicht te krijgen of zich problemen met bodems voordoen. Wanneer deze bekend zijn, kan gericht verder worden gekeken. Afhankelijk van de wateropgave zijn probleemgerichte meetgegevens nodig:

- Voor droogtegevoeligheid en piekafvoeren zijn de diepte en de mate van bodemverdichting van belang (bulkdichtheid, indringingsweerstand, bewortelingsdiepte).
- Voor de risico's op oppervlakkige afstroming is de doorlatendheidsrelatie van de toplaag en een karakterisering van de ruwheid van het maaiveld nodig. Hierbij is het nodig om de meetmethode van de verzadigde doorlatendheid van de toplaag te verbeteren, omdat de nu gangbare methodes een grote onzekerheidsmarge hebben met een grote bandbreedte in de berekende afstroming als gevolg.
- Voor de potentie van extra waterberging in de bodem ter bestrijding van droogte zijn metingen nodig van de waterretentiecurven en organische stof.
- Voor de potentie van het verminderen van de uit- en afspoeling van meststoffen en andere contaminanten, is het nodig om aanvullend op de metingen voor oppervlakkige afstroming bedrijfsspecifieke gegevens te verzamelen over de boekhouding van mestgiften, gewasopbrengsten, teelthandelingen en voor de bodem organische stof en de fosfaattoestand.

### *Conclusies voor strategie modellering*

Maatregelen ter verbetering van de bodemkwaliteit op het watersysteem kunnen gekwantificeerd worden met rekenmodellen waarin processen ten aanzien van bodemvochthuishouding in relatie tot weersvariatie en klimaatverandering, gewasproductie, bodemfysica, transportprocessen aan het maaiveld, ontwatering en de organische stofkringloop en nutriëntenhuishouding zijn beschreven. Afhankelijk van de wateropgave in een gebied zijn enkele van deze processen meer of minder belangrijk.

Voor een adequate kwantificering van oppervlakkige afstroming in het SWAP-WOFOST-model dient 1) het model geschikt te zijn om met tijdstappen van 15 min. te rekenen en 2) een methode uitgewerkt te worden voor de vertaling van veldinformatie naar modelparameters waarmee maaiveldplassen worden gesimuleerd.

Om effecten van bodemverbetering zodanig in beeld te brengen dat ze door regionale waterbeheerders meegewogen kunnen worden in besluitvorming, is het nodig om deze op gebiedsniveau te kwantificeren. Voor de opschaling van de kennis op perceelniveau naar stroomgebieden zijn regionale modellen nodig waarin naast ontwatering ook processen in de onverzadigde zone, gewasgroei en de relatie met het oppervlaktewater zijn beschreven. Door hiermee scenario- en onzekerheidsanalyses met variatie van klimaat en bodemeigenschappen uit te voeren, kunnen bandbreedtes van effecten in beeld gebracht worden en kan een uitspraak gedaan worden over de robuustheid van een maatregel. Een dergelijke analyse vergt een goed inzicht in de gevoeligheden van het model en een kwantificering van de onzekerheden van modelinvoer en -parameters. Dit geldt ook voor de alternatieven die in de investeringsbeslissing worden overwogen.

---

## 6.4 Aanbevelingen vanuit de deelstudies

Naar aanleiding van de resultaten van deelstudie A (Vruchtbare Kringloop) wordt aanbevolen:

- Daar waar aanwijzingen zijn dat bodems verdicht zijn en/of vaak plassen op het land blijven staan, de waterretentiecurve ook de verzadigde doorlatendheid en de doorlatendheidsrelatie te meten, waarbij de gevoeligheid van  $K_{\text{sat}}$  en de doorlatendheid in het natte traject vergeleken wordt met metingen door andere methoden.
- De voorgeschiedenis t.a.v. landgebruik, bemesting en grondbewerking bij de selectie te betrekken en behalve de kopeinden en het midden van het perceel ook de perceelranden te bemonsteren, omdat de kans voor het aantreffen van een ongestoorde situatie bij een perceelrand groter is.
- Karakteristieken ten aanzien van bodemleven die relevant zijn voor de wateropgaven verder uit te werken.

Naar aanleiding van deelstudie B (bodemverdichting Vlaanderen) wordt aanbevolen:

- De gegevens uit Vlaanderen op te nemen in de Nederlandse database en aanvullend gegevens te verzamelen voor zwaar verdichte gronden in Nederland.
- Te onderzoeken of de gekozen drempelwaarden voor bulkdichtheid en verzadigde doorlatendheid waarbij sprake is van bodemverdichting voldoende zijn afgestemd op de wateropgaven "droogte" en "piekafvoeren". In de huidige beoordeling geldt een drempelwaarde van  $K_{\text{sat}}=10 \text{ cm d}^{-1}$ .

De resultaten van de modelstudie naar het effect van de langjarige aanvoer van compost en teeltmaatregelen bij zandgronden leidt tot de volgende aanbevelingen:

- De mogelijk rol van aanvoer van organische stof breder te bekijken dan alleen voor het effect op textuur en het daarvan afgeleide waterbergend vermogen. De invloed van organische stof op erosie en slempgevoeligheid en structuurvorming zijn in deze studie buiten beschouwing gebleven en mogelijk zijn de effecten van deze factoren voor het watersysteem groter dan van enkel het effect op de textuur.
- Rekening houden met langetermijneffecten van de verhoging van het organische stofgehalte door de aanvoer van compost en teeltkeuze en de samenhang tussen *aanvoer organische stof – bemesting – naverwerking van een nagewas* en *afvoer met gewas* en in beschouwing te nemen. Door veranderingen in bodemvoorraden en mineralisatiesnelheden kan de nitraatconcentratie toenemen.
- Rekening houden met een mogelijke verandering van de grondwateraanvulling door de teelt van een vanggewas en het effect hiervan op voorspelde nitraatconcentraties.

Aanbevolen wordt om de vuistregels en adviezen verder uit te testen in gebiedsstudies waarbij gericht wordt gemeten om m.b.v. de modellen de effecten van bodemverbeterende maatregelen nauwkeuriger te kunnen kwantificeren. Wanneer deze resultaten bevestigen dat de maatregelen bijdragen aan de wateropgaven en klimaatadaptatie, is het zaak de benodigde meetgegevens systematisch te gaan verzamelen en het modelinstrumentarium gericht te verbeteren.

## 6.5 Aanbevelingen voor pilots en metingen

De verschillende studies laten zien dat verbeteren van de bodemstructuur en bodemkwaliteit handelingsperspectief biedt voor het opvangen van afvoerpieken, het vasthouden van water, het voorkomen van de afspoeling van fosfor naar het oppervlaktewater en het voorkomen van de uitspoeling van nitraat naar het grondwater. De exacte effecten zijn niet goed te kwantificeren door het ontbreken van meetgegevens. Aanbevolen wordt om in de regio's met zandgronden pilots op te zetten om te kwantificeren in welke omstandigheden bodemverbetering hoeveel bij kan dragen aan de wateropgaven.

Voor de realisatie van de 'regionale pilots' wordt aanbevolen stapsgewijs te werk te gaan. Als eerste stap is een verkenning nodig van de wateropgaven (wateroverlast, droogte, uit- en afspoeling) voor verschillende delen van het beheersgebied en van de kansen die de bodem biedt voor het voldoen aan de opgaven.



---

Verdere onderzoeksfases voor de pilots zijn:

1. gebiedsverkenningen
2. selectie proefpercelen
3. ontwerp van experimenten met bijbehorende metingen
4. meten
  - meten van de toestand om het handelingsperspectief aan te kunnen scherpen
  - langjarige toetsing van effecten van bodemaatregelen
  - meten t.b.v. validatie van de modelresultaten
5. modelleren
  - extrapolatie van de effecten en scenarioanalyse

#### **Ad 1: Gebiedsverkenning**

In de gebiedsverkenning worden de wateropgaven (wateroverlast, droogte, uit- en afspoeling) voor verschillende delen van het beheersgebied geïnventariseerd, evenals van de kansen die de bodem biedt. Daartoe worden de volgende vragen beantwoord :

- Waar liggen hot-spots t.a.v. de knelpunten in het bodem- en watersysteem waar goed bodembeheer aan kan bijdragen?
- Welke issues spelen er ten aanzien van de bodemkwaliteit en wat zijn de risico's?
- Waar liggen kansen voor bodemverbeterende maatregelen die zowel gunstig zijn vanuit agrarisch perspectief als voor de regionale waterbeheerder?

Afhankelijk van de knelpunten, worden de volgende onderdelen meegenomen in de analyse:

- Veldbezoeken bij agrarische bedrijven om a.d.h.v. gesprekken met de boeren via een veldbezoek een gezamenlijke verkenning van de bodemcondities in profielkuilen op de kop en in het midden van de te bezoeken percelen).
- Eurofins-data van bodemfysica, bodemvruchtbaarheid (Pw / PAL) getal) betrekken e.a. informatie die bepalend is bij de kwantificering van effecten.
- Inzicht geven in de ligging van percelen waar, op basis van karteerbare kenmerken:
  - Plasvorming op het land optreedt als gevolg van piekbuien en waar mogelijk afstroming naar sloten of greppels water via het maaiveld optreedt.
  - zich hot-spots voor de afspoeling van fosfaat en de uitspoeling van nitraat voorkomen.

#### **Ad 2: Selecteren proefpercelen**

In deze stap worden percelen gezocht die representatief zijn voor knelpunten die in de verkenning zijn geïnventariseerd en een beeld kunnen geven van de bodemkwaliteit. Daarbij wordt behalve gezocht naar percelen die kunnen dienen als referentie in een vergelijking van effectresultaten ook gezocht naar percelen waar nadrukkelijk problemen spelen en naar percelen waar al langdurig bodemaatregelen zijn uitgevoerd.

#### **Ad 3: Ontwerp van experimenten met bijbehorende metingen**

Om knelpunten in het gebied op te lossen worden experimenten ontworpen. Bij het ontwerp wordt rekening met de volgende eisen:

- Vastleggen van de nulsituatie
- Effecten van maatregelen aantonen: de experimenten gaan uit van een behandeling en referentie
- Bevatten voldoende herhalingen voor statistisch toetsen van hypothesen
- Meten van de voor modellen benodigde bodemparameters
- Zijn geschikt om modelresultaten te valideren

#### **Ad 4: Meten**

Om effecten van maatregelen te kwantificeren en om de modellen te voeden met invoergegevens en voor modelvalidatie, zullen metingen en registraties uitgevoerd moeten worden aan gewas, bodem en water. Deze zijn nader benoemd in Tabel 6.2 en op de lijst met metingen ten behoeve van modelinvoer en modelvalidatie. Vanwege de verschillende type metingen, is een multidisciplinair onderzoeksteam nodig. De nodige aandacht zal ook besteed moeten worden aan het opslaan, controleren, beheren en ontsluiten van de data.

---

### **Ad 5: Modelleren**

Modellen worden toegepast en zo nodig verbeterd om effecten van maatregelen te kwantificeren:

- opzetten modellen en simuleren van de bodemvocht-, water- en nutriëntenhuishouding, bijvoorbeeld met SWAP-WOFOST op perceelschaal;
- validatie van de modelresultaten;
- implementeren van de relevante bodemprocessen en parameters in een stroomgebiedsmodel waarin de onverzadigde zone beschreven is met MetaSwap, bij voorkeur in een model dat al voorhanden is;
- extrapolatie van de effecten door toepassing van het stroomgebiedsmodel en scenarioanalyse;
- analyse regionaal gedifferentieerd handelingsperspectief;
- benoemen (ruimtelijk gedifferentieerde) effectieve maatregelen en de situaties waarin deze effectief kunnen zijn (maatwerk);
- verkenning van de mogelijkheden voor inpassing in de landbouwkundige bedrijfsvoering, gekoppeld aan het handelingsperspectief van de agrariër.

### **Onderzoek naar oppervlakkige afstroming**

Diverse effecten van bodemverbeterende maatregelen hangen samen met oppervlakkige afstroming. In de huidige situatie ontbreken inzicht en gegevens van de gebieden waar oppervlakkige afstroming vooral plaatsvindt, de hoeveelheden die bij hevige neerslag oppervlakkig afstromen naar de lokale ontwateringsmiddelen en de kwaliteit van afstromend water. Om beter inzicht te verwerven in oppervlakkige afstroming, wordt aanbevolen om in te zetten op 4 pijlers:

1. Remote sensing regionaal, ter verificatie en verbetering modelschattingen risico-percelen (plassen op het land, connectiviteit met sloten).
2. Inzetten van technieken voor precisielandbouw (drones) op proefpercelen.
3. Veldexperimenten: Proeven waar debieten en de kwaliteit van afstromend water op een landbouwperceel wordt gemonitord, bij voorkeur i.c.m. het meten aan buisdrainage en slootafvoeren, opdat het aandeel van de oppervlakkige afstroming in de totale water- en stoffenbelasting kan worden bepaald.
4. Ad hoc tijdens extreme neerslag: nemen van watermonsters in plassen en deze opnemen in een centrale database, met daarbij relevante en beschikbare informatie over het perceel (GT, P-toestand bodem, tijdstip meest recent uitgevoerde bemesting e.d.).

### **Welke metingen?**

Als uit vooronderzoek geconcludeerd wordt dat zich problemen met de bodem voordoen en/of dat maatregelen perspectieven bieden voor waterberging, vermindering droogtegevoeligheid of verbetering van waterkwaliteit, ligt het voor de hand effecten van maatregelen te kwantificeren met modellen. Vanuit de deelstudies is in Tabel 6.1 een indeling gemaakt van indicatoren die bepalend zijn voor de effecten van bodemverbeterende maatregelen op het watersysteem. Behalve de in Tabel 6.1 genoemde beïnvloedende bodemfactoren zijn voor de doorrekening van effecten van maatregelen met simulatiemodellen ook andere gegevens nodig als invoer en voor ijking en toetsing:

- Neerslag
- verdamping
- Bodemvocht
- Grondwaterstand
- Bij aanwezigheid buisdrains: drainafvoer
- Mestgift/soort/samenstelling
- Droge stofproductie en afvoer nutriënten met gewas
- Concentraties in bodemvocht en N- en P-gehalten van de bodem
- Concentraties bovenste grondwater
- Concentraties in drainwater

**Tabel 6.1** *Beïnvloedende factor per type wateropgave en het belang voor de opgave.*

Wateropgave	Beïnvloedende bodemfactor	Belang voor opgave	Motivatie (bron 1)
Piekafvoer zomer	Infiltratiecapaciteit bovengrond	★ ★ ★	DS1, DS2, G1
	Slemp of verdichte toplagen	★ ★	DS1, G1
	Reliëf maaiveld	★ ★	G1, GR
Piekafvoer winter	Infiltratiecapaciteit bovengrond	★	DS2, G1, GR
	Waterberging onverzadigde zone	★ ★	G1, GR
	Ploegzool / diepere bodemverdichting	★	G1, DS2
	Reliëf maaiveld	★ ★	G1, GR
Droogte-gevoeligheid	Beperking bewortelingsdiepte door bodemverdichting	★ ★ ★	G1, DS2
	Ongunstige bodemfysische eigenschappen	★	G1, DS2
Afspoeling nutriënten	Infiltratiecapaciteit bovengrond	★ ★	G1
	Slemp of verdichte toplagen	★ ★	G1
	Reliëf maaiveld	★ ★	G1
	Fosfaattoestand bodem	★ ★	Andere studies
Nitraat-uitspoeling	Suboptimale benutting mest door groeireductie	★ ★	G1 e.a. studies
	Beheer moerige lagen	★	DS3

<sup>1)</sup> Bronnen: Deelstudies: DS1) Vlaanderen, DS2) Vruchtbare Kringloop, DS3) Vredepeel. Overige bronnen: G1) Schipper et al (2015), GR) Gebiedsanalyse Raam.

In Tabel 6.2 is per beïnvloedende factor aangegeven welke parameters op perceelschaal gemeten zouden moeten worden om 1) de omvang van de processen goed te kwantificeren, 2) modellen te valideren en 3) om effecten van maatregelen te kwantificeren.

Daarnaast dient ook rekening gehouden te worden met kosten voor het gebiedsdekkend maken van bodemparameters die bepalend zijn voor de effecten door extrapolatie. Hiervoor zijn metingen nodig door steekproeftechnieken te kiezen op locaties binnen het stroomgebied. Het type en aantal metingen is afhankelijk van de wateropgave, de karakteristieken van het gebied en de reeds aanwezige data.

**Tabel 6.2** Te meten parameters per beïnvloedende factor en een indicatie van de kosten per parameter.

Beïnvloedende factor	Te meten parameters	Beschikbaarheid gegevens	Indicatie kosten <sup>1</sup>
Infiltratiecapaciteit bovengrond	Doorlatendheid relaties k-h, Ksat, (lab).	Huidige database niet gericht op dit doel	★ ★ ★
	Karakterisering bodembioïologie	Onderdeel bodemconditiescore	★
	Infiltratiemeting (veld)	Incidenteel, ad-hoc en niet gestandaardiseerd	★
	Plassen op het land	Remote sensing in ontwikkeling	★
Slemp of verdichte toplagen	Textuur	Huidige database niet gericht op dit doel	★
	Structuur		
	bulkdichtheid		
	beworteling		
Ploegzool / diepere bodemverdichting	Indringingsweerstand		
	Bewortelingsdiepte	database onderzoek verdicht beperkt van omvang	★
	Bulkdichtheid		
	Indringingsweerstand		
Reliëf maaiveld	Visueel (profielkuil)		
	Micro-topografie	Goed (AHN2)	★
Waterberging onverzadigde zone	Waterretentiecurve (pF-curve)	huidige database niet gericht op dit doel	★ ★
	Textuur	doel	★
	structuur		★
Beperking diepte beworteling door bodemverdichting	beworteling	Huidige database niet gericht op dit doel	★
	Indringingsweerstand	doel	
Ongunstige bodemfysische eigenschappen	Bodemprofiel beschrijving	Huidige database niet gericht op dit doel	★
	Waterretentiecurve	doel	★ ★
	Doorlatendheid relaties k-h, Ksat, (lab)		★ ★ ★
P-toestand bodem	Pal, Pw, Pox, P-CaCl2	Eurofinsdata, niet standaard voor alle percelen	★
Suboptimale benutting mest door groeireductie <sup>2</sup>	Mestboekhouding perceelsniveau	niet standaard geregistreerd	★
	Gewasopbrengst incl N&P gehalten	Idem	★
	Nitraat metingen	Niet standaard gemeten	★ ★
	N-min bodemmonsters	Idem	★
Beheer moerige lagen zandgronden	Profielbeschrijving, geschiedenis	Profielbeschrijving niet standaard aanwezig Geschiedenis matig bekend	★
	CN-bepalingen	Niet standaard gemeten	★
	N-leverend vermogen	Niet standaard gemeten	★

<sup>1</sup> gericht op 1 perceel, statistisch verantwoord.

<sup>2</sup> groeireductie gerelateerd aan bodemkwaliteit

Kosten per proefperceel:	> € 15.000	★ ★ ★
	€ 5000 - 15.000	★ ★
	€ <5000	★

---

# Literatuur

- Alblas, J., F. Wanink, J. van den Akker en H.M.G. van der Werf, 1994. Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of silage maize in The Netherlands. *Soil & Tillage Research* 29, 157 – 165.
- Arcadis, 2009. MER aanleg aardgastransportleiding Odiliapeel – Schinnen, Achtergrondrapport water en bodem. 110623/CE9/078/000623
- Arts, W.B.M., B.R. Verwijs en J. van Maanen, 1994. De invloed van berijding op de fysische bodemconditie van zandgrond en de gevolgen daarvan voor de gasproductie. Wageningen, Dienst Landbouwkundig Onderzoek, Instituut voor Milieu- en Agrotechniek. IMAG-DLO rapport 94-5.
- Assinck, F.B.T. en P. de Willigen, 2004. Stikstofstromen op het kernbedrijf Vredepeel. Modelberekeningen met FUSSIM2 en MOTOR. Plant Research International, OV0402, Wageningen.
- Assouline, S., 2005. On the relationships between the pore size distribution index and characteristics of the soil hydraulic functions. *Water Resources Research* 41, W07019, doi:10.1029/2004WR003511.
- Assouline, S., 2006a. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal* 5:554–563. doi:10.2136/vzj2005.0083
- Assouline, S., 2006b. Modeling the relationship between soil bulk density and the hydraulic conductivity function. *Vadose Zone Journal* 5: 697–705. doi:10.2136/vzj2005.0084
- Bartholomeus, R.P., J.-Ph.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam, and R. Aerts, 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360: 147-165.
- Berg, M. v.d. en M.M. Pulleman, 2003. Kwaliteit van grond- en oppervlaktewater in het project Telen met toekomst 2002. Plant Research International B.V. Wageningen.
- Boogaard, H.L., C.A. van Diepen, R.P. Rötter, J.C.M.A. Cabrera, and H.H. van Laar, 1998. WOFOST 7.1. User guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST control center 5.1. Technical document 52, Alterra, Wageningen, the Netherlands.
- Bos, Jules, Janjo de Haan & Wijnand Sukkel, 2007. Energieverbruik, broeikasgasemissies en koolstofopslag: de biologische en gangbare landbouw vergeleken. Rapport 140. Wageningen UR, Wageningen. 76 p.
- Burgt, G.J.H.M. van der, G.J.M. Oomen, A.S.J. Habets and W.A.H. Rossing, 2006. The NDICEA model, a tool to improve nitrogen use efficiency in cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (2006) 74: 275 –294.
- Burgt, G.J.H.M. van der, P.H.M. Dekker, W.C.A. van Geel, J.G. Bokhorst en W. van den Berg, 2011. Analysemethoden om de stabiliteit van de organische stof van verschillende organische meststoffen inclusief digestaat te beoordelen. Eindrapportage 2010. PPO 448.
- Canarache, A., 1990. PENETR - a Generalized Semi-empirical Model Estimating Soil Resistance to Penetration. *Soil and Tillage Research* 16: 51-70.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klir, J., Korschens, M., Poulton, P.R., Richter, D.D., 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, 81(1-2), 5–28. [http://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)88181-5](http://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)88181-5).
- De Lijster, E., J. van den Akker, A. Visser, B. Allema, A. van der Wal en W. Dijkman, 2016. Waarderen van bodemwatermaatregelen. Culemborg, CLM Onderzoek en Advies, CLM-912.
- De Ruijter, F.J. en J.A.M. Wilms, 2007. Stikstofbemesting met verschillende meststoffen bij aardbei bij twee niveaus van beregening. Wageningen, Plant Research International, PRI rapport 160.
- Dijk, W. van, S. Burgers, H.F.M. ten Berge, A.M. van Dam, W.C.A. van Geel & J.R. van der Schoot, 2007. Effecten van een verlaagde stikstofbemesting op marktbaar opbrengst en stikstofopname van akker- en tuinbouwgewassen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving (PPO 366), Lelystad.
- Dijkstra, J.P., M.J.D. Hack-ten Broeke, F.G. Wijnands, B.M.A. Kroonen-Backbier, 1995. Stikstofemissie naar het grondwater van geïntegreerde en gangbare bedrijfssystemen in de akkerbouw op de proefboerderijen Borgerswold en Vredepeel; Simulatie van de vocht- en nitraathuishouding op de proefboerderij Vredepeel voor de jaren 1990-1993. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 287.2.

- Durner, W., 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research* 30: 211–223. doi:10.1029/93WR02676.
- Ehlert, P. & G. Koopmans, 2002. Fosfaattoestanden op de praktijkbedrijven van Telen met toekomst. Een analyse van de situatie bij de start van het project. Alterra.
- Ehlert, P.A.I. & G.F. Koopmans, 2004. Fosfaatkarakteristieken van de bodem van de kernbedrijven Meterik en Vredepeel. Telen met toekomst-rapport OV0404.
- Geel, W.C.A. van & J.J. de Haan, 2007. Effecten van organische\_stofbeheer in Nutriënten Waterproof op het organische\_stofgehalte en de koolstofopslag in de bodem.
- Geel, W.C.A. van, H.A.G. Verstegen & J.J. de Haan, 2011. Opbrengstvergelijking percelen Nutriënten Waterproof en praktijkpercelen. PPO 428.
- Gombault, M., K. Gosselink, G. Kleijer, en B. Hermans, 2016. Bodem en reststromen. Onderzoek naar de betekenis van biotische reststromen voor bodemvruchtbaarheid. *Natuur en Milieu in opdracht van directie Duurzaamheid van het ministerie van IenM*.
- Groenendijk, P., P.N.M. Schipper, D. Swart, G.M.C.M. Janssen, M. Zanen, en M.J.G. Talsma, 2015. Waterbeheerder ontdekt belang van de bodem. *Bodem* 6: 30-32.
- Groenigen, J.W. van, P.J. Georgius, C. van Kessel, E.W.J. Hummelink, G.L. Velthof en K.B. Zwart, 2005. Subsoil 15N-N<sub>2</sub>O concentrations in a sandy soil profile after application of 15N-fertilizer. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72:13-25.
- Haan, J.J. de, 2004. Uittreksel veldproeven – Alterra-Project 5232870-02 Relatie Grond- en Oppervlaktewater.
- Haan, J.J. de en W. Sukkel, 2007. Bemesting & bodemkwaliteit op zandgrond. Ervaringen uit Nutriënten Waterproof. Powerpointpresentatie.
- Haan, J.J. de en W.C.A. van Geel, 2010. Nutriënten Waterproof. Nitraatnorm op zand verdraagt geen intensieve landbouw. Brochure (?) PPO.
- Haan, J.J. de, 2014. Bodemkwaliteit op zandgrond 3. Resultaten 2013. Informatieblad Bodemkwaliteit op zandgrond. WUR.
- Haan, J.J. de en Van Asperen, 2016. De bodem weerloos en weerbaar. Hoe onderzoek bijdraagt aan een betere kwaliteit van de bodem – en dus stabielere opbrengst – voor de lange termijn. Flyer Bodemkwaliteit op zand.
- Hamminga, W., C.J. Ritsema en L.W. Dekker, 1994. Transport van water en bromide in een waterafstotende zandgrond, onderzocht in een landbouwperceel bij Vredepeel. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 274.
- Heinen, M. & P. de Willigen, 1998. FUSSIM2 A two-dimensional simulation model for water flow, solute transport and root uptake of water and nutrients in partly unsaturated porous media, *Quantitative Approaches in Systems Analysis* No. 20, DLO Research Institute for Agrobiological and Soil Fertility and the C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology, Wageningen, The Netherlands. Available at: <http://edepot.wur.nl/4408>
- Hellings, A.J., 1965. Het onderzoek op het proefbedrijf Vredepeel. Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, ICW-nota 290.
- Hospers-Brands, & Van der Burgt, 2013. Verkenningen organische stof - Proefbedrijf Vredepeel. Louis Bolk, Publicatie 2013-023 LbP.
- Huber, S., Prokop, G., Arrouays, D., Banko, G., Bispo, A., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Lexer, W., Möller, A., Rickson, R.J., Shishkov, T., Stephens, M., Toth, G. Van den Akker, J.J.H., Varallyay, G., Verheijen, F.G.A., Jones, A.R. (eds), 2008. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring: Volume I Indicators & Criteria*. EUR 23490 EN/1, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 339 pp. <http://eu-soils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/>.
- Hijbeek, R, M.K. van Ittersum, H.F.M, ten Berge, G. Gort, H. Spiegel en A.P. Whitmore, 2017. Do organic input matter – a meta-analysis of additional yield effects for arable crops in Europe. *Plant Soil* (2017) 411: 293. doi:10.1007/s11104-016-3031-x
- Janssen, J., 1995. Organische stof in de akker- en tuinbouw. Een nieuwe benadering of “oude wijn in een nieuwe fles”. Ede. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Informatie en kennis Centrum Landbouw. Afdeling Milieu, Kwaliteit en techniek.
- Keesstra, S.D., V. Geissen, K. Mosse, S. Piirainen, E. Scudiero, M. Leistra, and L. van Schaik, 2012. Soil as a filter for groundwater quality. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4: 507–516.
- Koopmans, C., J. Bokhorst, 2002. Nitrogen mineralisation in organic farming systems: a test of the NDICEA model. *Agronomie, EDP Sciences*, 2002, 22 (7-8), pp. 855-862.

- Kroes, J.G., J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks, and C.M.J. Jacobs, 2008. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Alterra report 1649, Alterra, Wageningen, the Netherlands.
- Laliberte, G.E., A.T. Corey, and R.H. Brooks, 1966. Properties of unsaturated porous media. Hydrological Papers No. 17, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Luske, B., J. Deru, H. Wösten, J. Faber en N. van Eekeren, 2012. Beworteling van grasland en droogtetolerantie. Maatregelen voor een diepere beworteling. Publicatienummer 2012-028 LbD, Louis Bolk Instituut, Driebergen. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/247300>.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12: 513-522.
- Mualem, Y., and S. Assouline, 1989. Modeling soil seal as a nonuniform layer. *Water Resources Research* 25: 2101-2108.
- Noij, G.J., J. Rozemeijer, V. Linderhof en E. van Boekel, 2016. Quicksan van kosten en effecten van DAW maatregelen. Expert judgement kosteneffectiviteit van maatregelen om de belasting van oppervlaktewater met nutriënten vanaf landbouwgrond terug te dringen. Wageningen, Alterra Wageningen UR, Landbouw Economisch Instituut, Deltares. interne notitie in opdracht van PBL, niet gepubliceerd.
- Or, D., and T.A. Ghezzehei, 2002. Modeling post-tillage soil structural dynamics: A review. *Soil Tillage Research* 64: 41-59. doi:10.1016/S0167-1987(01)00256-2
- Or, D., F.J. Leij, V. Snyder, and T.A. Ghezzehei, 2000. Stochastic model of post-tillage soil pore space evolution. *Water Resources Research* 36: 1641-1652.
- Postma, R., 2002. Organische stofopbouw en N-mineralisatie op kernbedrijven; toetsing model Janssen. Telen met toekomst rapport OV 0203, 40 pp.
- Postma, R. & T.A. van Dijk, 2004. Organische stofopbouw en N-mineralisatie op kernbedrijven; toetsing MINIP met resultaten 2002 en 2003. Telen met toekomst OV0408.
- Postma, R., T.A. van Dijk & A.G.G. van der Weijden, 2004. Organische stofopbouw en N mineralisatie; praktijktoepassing van een verbeterd model. Telen met Toekomst OV0413.
- Reijneveld, A., J. van Wensem, O. Oenema, 2009. Soil organic carbon contents of agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004, *Geoderma*, 152, 231-238.
- Rozemeijer, J., G.J. Noij, E. van Boekel en V. Linderhof, 2016. Expertbeoordeling van landbouwmaatregelen voor oppervlaktewaterkwaliteit. H2O-online / 28 november 2016. [https://www.h2owaternetwerk.nl/images/12artikelimages/1611-07\\_Quicksan\\_N\\_P\\_maatregelen-v2.pdf](https://www.h2owaternetwerk.nl/images/12artikelimages/1611-07_Quicksan_N_P_maatregelen-v2.pdf)
- Schils, R.L.M.; Dijk, W. van; Middelkoop, J.C. van; Oenema, J.; Verloop, J.; Huijsmans, J.F.M.; Ehlert, P.A.I.; Salm, C. van der; Reuler, H. van; Vreeburg, P.J.M.; Dekking, A.J.G.; Geel, W.C.A. van; Schoot, J.R. van der, 2012. Effect van mestbeleid op bodemvruchtbaarheid en gewasopbrengst: Evaluatie Meststoffenwet 2012: deelrapport ex post. Wageningen, Alterra Wageningen UR, Alterra-report 2266.
- Schipper, P., P. Groenendijk, N. van Eekeren, M. van Zanen, J. Rozemeijer, G. Jansen, en B. Swart. 2015. Goede grond voor een duurzaam watersysteem. Verdere verkenningen in de relatie tussen agrarisch bodembeheer, bodemkwaliteit en waterhuishouding. STOWA rapport 2015-19, Amersfoort.
- Schlüter, S., H.-J Vogel, O. Ippisch, P. Bastian, K. Roth, H. Schelle, W. Durner, R. Kasteel, and J. Vanderborght, 2012. Virtual soils: assessment of the effects of soil structure on the hydraulic behavior of cultivated soils. *Vadose Zone Journal*, doi:10.2136/vzj2011.0174.
- Schrama, M., J.J. de Haan, S. Carvalho, M. Kroonen, H. Verstegen & W.H. van der Putten, 201?. Yield gap and stability in 1 organic and conventional farming systems. concept paper.
- Sietzema, A., 2016. Bodemverdieping. De invloed van bodemverdichting op de waterhuishouding en gewasproductie van graslanden gelegen op de zandgronden van de Achterhoek. Afstudeerscriptie Land- en watermanagement, Hogeschool VHL, Velp.
- Šimůnek, J., M.Th. van Genuchten, and M. Šejna, 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages, *Vadose Zone Journal*, 15(8), pp. 25, doi: 10.2136/vzj2016.04.0033.
- Smit, A., K. Zwart & J. van Kleef, 2003. Stikstofstromen op de kernbedrijven Vredepeel en Meterik. Mineralisatie van bodem en gewasresten. Telen met toekomst OV0304.
- Smit, A., K. Zwart & J. van Kleef, 2004. Stikstofstromen op de kernbedrijven Vredepeel en Meterik. De grondwaterkwaliteit gemeten van 2001 tot 2004. Telen met toekomst OV0416.

- Snijders, P.J.M., F.A. Wopereis, H. Everts en A.P. Wouters, 1994. Effect bodemverdichting op opbrengst en stikstofopname Engels raaigras op zandgrond. Lelystad, Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij en Paardenhouderij (PR). Rapport nr. 152.
- Stenitzer, E., and E. Murer, 2003. Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model. *Soil and Tillage Research* 73: 43–56.
- Stolk, P.C. en J.G. Kroes, 2012. Water en nutriënten gelimiteerde gewasopbrengst; Koppeling van de modellen SWAP-ANIMOWOFOST. Alterra-rapport 2346.
- Sukkel, W., Geel, W. van & Haan, J.J. de, 2008. Carbon sequestration in organic and conventional managed soils in the Netherlands. 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy, June 16-20, 2008.
- Van den Akker, J.J.H., 2006. Evaluation of soil physical quality of Dutch subsoils in two databases with some threshold values. In: Horn, R., Fleige, H., Peth, S. and Peng, X (eds.), *Soil Management for Sustainability. Advances in GeoEcology 38*, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, pp 490-497.
- Van den Akker, J.J.H. en W.J.M. de Groot, 2008. Een inventariserend onderzoek naar ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavelen. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1450.
- Van der Bolt, F., W. Cornelis, J. de Pue, R. Hendriks, J. van den Akker, H. Massop, I. Joris, J. Dams, en Johan Vos, 2016. Bodemverdichting in Vlaanderen. Kwantificeren van de gevolgen. Alterra rapport, Wageningen, in voorbereiding.
- Van Eekeren, N. en J. Zaneveld-Reijnders, 2011. Bewust herstel van de natuurlijke buffercapaciteit van de bodem. Inhoudelijk rapportage 2010. <http://www.louisbolk.org/downloads/2433.pdf>.
- 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 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(1): 95–106.
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M.H., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S.D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., Ghezzehei, T., Hallett, P., Hendricks Franssen, H.J., Heppell, J., Horn, R., Huisman, J.A., Jacques, D., Jonard, F., Kollet, S., Lafolie, F., Lamorski, K., Leitner, D., McBratney, A., Minasny, B., Montzka, C., Nowak, W., Pachepsky, Y., Padarian, J., Romano, N., Roth, K., Rothfuss, Y., Rowe, E.C., Schwen, A., Šimůnek, J., Tiktak, A., Van Dam, J., van der Zee, S.E.A.T.M., Vogel, H.J., Vrugt, J.A., Wöhling, T., and Young, I.M., 2016. Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives. *Vadose Zone Journal*, doi: 10.2136/vzj2015.09.0131.
- Verhagen, F.Th., A.J.J. Kanen-verlinden, F.C. van Herpen, R.F.M. Buskens, A. Wielinga, J. van Sijl en B.J. van der Wal, 2012. Analyse van de effecten en gevolgen van klimaatverandering op het watersysteem en functies. Regionale knelpuntenanalyse Zuid-Nederland (Fase 2). Arnhem, Royal Haskoning Nederland B.V., Rapport in opdracht van de Stuurgroep Deltaplan Hoge Zandgronden.
- Visser, J.R. van der Schoot, G. Korthals & J. de Haan, 2014. Bodemkwaliteit Op Zand: T nul meting bodem. Vaststellen uitgangssituatie door waarnemingen aan fysische, biologische en chemische bodemparameters. PPO nr. 614.
- Vos, J.A. de, E.W.J. Hummelink & T.S. van Steenbergen, 2002. Waterretentie en waterdoorlatendheidskarakteristieken van Telen met toekomstproefvelden Meterik en Vredepeel. Telen met toekomst, OV 0204.
- Vos, J.A. de, O.A. Clevering, F.P. Sival, J. Alblas, N. Reijers, H. van Reuler, 2003. De invloed van de waterhuishouding op stikstof- en fosfaatverliezen in open teelten. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 596.
- Vos, J.A. de & F.B.T. Assinck, 2004. Nitraatuitspoeling Vredepeel 2002 – 2003. PRI. Telen met toekomst OV0406.
- Vos, de, J.A., F.P. Sival, O.A. Clevering en J. van Kleef, 2006. Stikstof- en fosfaatverliezen naar grond- en oppervlaktewater bij vernatting van landbouwgronden. Veldexperimenten Vredepeel 2003-2005. Alterra, Wageningen & PPO-Akkerbouw, Groene Ruimte en vollegrondsgroente, Alterra-rapport 1392, Lelystad en Wageningen.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte, 1994. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994. Technisch Document 18, Staring Centrum-DLO, Wageningen.



- 
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte, 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra-rapport 153, Alterra, Wageningen.
- Yang, H.S., 1996. Modelling organic matter mineralization and exploring options for organic matter management in arable farming in northern China. Proefschrift Landbouwuniversiteit Wageningen, 159 p.
- Yang, H.S. & B.H. Janssen, 2000. A mono\_component model of carbon mineralization with a dynamic rate constant. *European Journal of Soil Science* 51, p. 571\_529.
- Zwart, K.B., A.P. Whitmore & J.G. Bokhorst, 1999. Beheer van organische stof in open biologische, ecologische en geïntegreerde teeltsystemen. AB-DLO Rapport 102.
- Zwart, K.B., A. Smit & C. Rappoldt, 2002. Stikstofverliezen door denitrificatie in akkerbouw en vollegrondsgroenteteelt. Onderzoek op de kernbedrijven Vredepeel en Meterik van het project 'Telen met toekomst'. Telen met toekomst, OV 0204.
- Zwart, K.B., 2003. Denitrificatie in de bouwvoor en de ondergrond; Resultaten van metingen in 13 profielen tot 2 m diep. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 724.

---

# Bijlage 1 Bemonstering en bepaling van bodemfysische grootheden

## Inleiding

Er is toenemende behoefte aan inzichten, methoden en technieken voor het onderzoek naar 'duurzaam en gezond bodemgebruik'. Bodemhydrofysische gegevens, zoals waterretentiecurven en doorlatendheidsrelaties, zijn essentieel bij de bepaling van grondwaterstromingen in de verzadigde en onverzadigde zone. Deze spelen vervolgens een grote rol bij maatschappelijke onderwerpen die te maken hebben met oogstophbrengsten, effecten van de bodemeigenschappen op klimaatverandering door broeikasgasemissies, uitspoeling en retentie van nutriënten en contaminanten, natuurwaarden, bodemverdichting, erosie, efficiëntie van watergebruik en de invloed van de bodem op de veiligheid van dijken. Het project *Goede Grond voor een duurzaam watersysteem* geeft inzicht in de relaties tussen het water in de bodem en het open water en de belangen die de agrariër en de waterbeheerder hierin hebben. Voor dit onderzoek zijn bodemhydrofysische parameters van belang, zoals hieronder omschreven. Deze parameters zijn in dit onderzoek bepaald in het Bodemhydrofysisch laboratorium van Wageningen UR.

Bepaalde parameters:

- Textuur
- Droge bulkdichtheid
- Gloeiverlies (organisch stofgehalte)
- Verzadigde waterdoorlatendheid
- Waterretentiecurve
- doorlatendheidsrelatie
- Beschrijving van de retentie- en doorlatendheidsrelatie met de Mualem-Van Genuchten-vergelijkingen
- Profielbeschrijving
- Landgebruik
- Coördinaten

## Bemonsteringswijze

Op de geselecteerde locaties zijn monsters genomen in het midden van de betreffende horizont:

- Roestvrijstalen monsterringen (hoogte  $h=5$  cm, diameter  $D\approx 5$  cm) voor onverstoorde monsters ten behoeve van de bepaling van de retentiecurve op de zandbak voor het traject  $h = 0$  tot  $-100$  cm ( $pF=2$ ).
- PVC-monsterringen ( $h=8$  cm,  $D\approx 10$  cm) voor onverstoorde monsters ten behoeve van de bepaling van de retentiecurve en curve van de onverzadigde waterdoorlatendheid op de verdampingsopstelling voor het traject  $h = -10$  tot  $-700$  cm ( $pF=1$  tot  $pF=2.8$ ).
- PVC-monsterringen ( $h=10$  cm,  $D\approx 20$  cm) voor onverstoorde monsters ten behoeve van de bepaling van de verzadigde waterdoorlatendheid ( $h = 0$ ).
- Verstoorde grondmonsters in zakken ter bepaling van de textuur en organische stof.

De ringen voor de onverstoorde monsters zijn dusdanig voorzichtig met de hand in de grond gebracht dat de structuur van de grond behouden is gebleven.

Tijdens monsternamen is tevens een profielbeschrijving gemaakt en zijn onder andere de volgende gegevens genoteerd op de veldcomputer:

- Monstercode
- Locatie
- XY coördinaten
- Horizont
- Diepte boven- en onderkant monster
- Monsterdatum
- Monsternemer
- Bodemgebruik

- Grondwatertrappen (GtCode, GLG, GHG)
- Geologische ondergrond
- Grondsoort

## Analysemethoden

### Textuur

Voor bodemkartering worden van oudsher de textuurklassen van de Stiboka (Stichting voor Bodemkartering) gebruikt. Voor kleigronden werden andere fractieverdelingen gehanteerd dan voor zandgronden. De Nederlandse norm NEN 5753/C1 (2006, 2009) en de gelijksoortige internationale norm ISO 11277 (2009) schrijven geen specifieke fracties voor, maar geven wel een overzicht van de meest gebruikte fracties. De Rijks Geologische Dienst (RGD) gebruikt enigszins afwijkende fractieverdelingen in het bereik 50 tot 150  $\mu\text{m}$ . Voor textuurverdeling is een combinatie van systemen aangehouden die in overeenstemming zijn met de systemen van zowel Stiboka als de Rijks Geologische Dienst (RGD), zodat ze geldig zijn ongeacht de gehanteerde indeling en bovendien niet strijdig zijn met de Nederlandse norm NEN 5753/C1 (2006, 2009) en de gelijksoortige internationale norm ISO 11277 (2009).

Uitgegaan is van de fracties ten opzichte van de minerale delen, waarvan de hoofdonderdelen als volgt worden benoemd:

- Lutum: 0 - 2  $\mu\text{m}$
- Silt: 2 - 50  $\mu\text{m}$
- Leem: 0 - 50  $\mu\text{m}$
- Zand: 50 - 2000  $\mu\text{m}$

De fractie < 63  $\mu\text{m}$  wordt in het Chemisch Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB) geanalyseerd volgens de pipet- en natte zeefmethode. De fractie 63–2000  $\mu\text{m}$  wordt daarna in het Bodemfysisch Laboratorium verder geanalyseerd door middel van droogzeven.

In het laboratorium wordt voor de fracties < 63  $\mu\text{m}$  de grond met waterstofperoxide voorbehandeld om aanwezige organische stof te oxideren. Daarna volgt een behandeling met zoutzuur om aanwezige carbonaten in oplossing te brengen. Voor ijzerrijke grond kan het gewenst zijn de korrelgrootteverdeling van de minerale delen zonder ijzeroxide te bepalen. Hierbij wordt het aanwezige ijzeroxide in oplossing gebracht. Na verwijdering van de opgeloste zouten wordt het monster door zeven in twee fracties verdeeld. De hoofdfractie met grovere deeltjes wordt gedroogd en gewogen en via zeven met verschillende maaswijdte onderverdeeld in subfracties en vervolgens nogmaals gewogen. De hoofdfractie met de kleinere deeltjes wordt onderverdeeld in subfracties op basis van verschil in bezinkingssnelheid. Hierbij wordt van een suspensie van het monster in een maatcilinder, na toevoeging van een peptisatiemiddel op verschillende tijdstippen en diepten, in de cilinder een monster gepipetteerd. Tijdstippen en diepten voor het pipetteren van bepaalde fracties worden met de wet van Stokes berekend. De gepipetteerde suspensie wordt ingedampt en gedroogd en door weging wordt het massapercentage van de gepipetteerde fractie bepaald.

**Tabel A1.1** Gehanteerde fracties voor Goede Grond en de gebruikte labmethode.

Textuurklasse ( $\mu\text{m}$ )	Gebruikte methode
<2	Pipetmethode
2-16	Pipetmethode
16-50	Pipetmethode
50-63	Natte zeefmethode
63-105	Droge zeefmethode
105-150	Droge zeefmethode
150-210	Droge zeefmethode
210-420	Droge zeefmethode
420-2000	Droge zeefmethode

## Gloeiverlies

Het gloeiverlies is een maat voor het organisch stofgehalte van een grondmonster. Hoe groter het aandeel organisch materiaal, hoe groter het gloeiverlies zal zijn. In het laboratorium wordt het in het veld genomen verstoorde grondmonster gezeefd over een zeef met 2 mm maaswijdte. De fractie kleiner dan 2 mm wordt gedroogd bij 105 °C, gewogen en vervolgens gegloeid bij 550 °C. Het gloeiverlies  $w_{gv}$  wordt vervolgens berekend uit:

$$w_{gv} = \frac{m_{105} - m_{550}}{m_{105} - m_0} \times 100\%$$

waarin:

$w_{gv}$  = gloeiverlies op basis van stoofdroge grond (%);

$m_0$  = massa van het lege kroesje (g);

$m_{105}$  = massa van het kroesje met het stoofdroge monster (g);

$m_{550}$  = massa van het kroesje met het gegloeide monster (g).

Het organische stofgehalte is per definitie kleiner of gelijk aan het gloeiverlies. Het organische stofgehalte kan volgens de NEN 5754 bepaald worden door de gloeiverliesbepaling vergezeld te laten gaan van een lutumgehaltebepaling en een bepaling van het gehalte aan vrij ijzer. Het OS-gehalte wordt dan als volgt berekend:

$$w_{OS} = w_{gv} - 0.07 * L - 0.12 * Y$$

waarin:

$w_{OS}$  = organisch stofgehalte van stoofdroge grond (%);

$L$  = lutumgehalte (%);

$Y$  = gehalte aan vrij ijzer (%). (Alleen corrigeren bij >5%.)

## Waterretentie- en onverzadigde doorlatendheidsrelatie

De waterretentiecure wordt bepaald met drie verschillende laboratoriumopstellingen:

- Zandbak voor het bereik  $h = 0$  tot  $-100$  cm ( $pF \leq 2$ )
- Verdampingsopstelling voor het bereik  $h = -10$  tot  $-700$  cm ( $1 \leq pF \leq 2,8$ )
- Drukpanopstelling voor het bereik  $h = -1000$  tot  $h = -15000$  cm ( $3 \leq pF \leq 4,2$ )

De relatie voor de onverzadigde waterdoorlatendheid met het vochtgehalte wordt bepaald met behulp van de verdampingsopstelling voor het bereik  $h = -50$  tot  $-700$  cm ( $1,7 \leq pF \leq 2,8$ ).

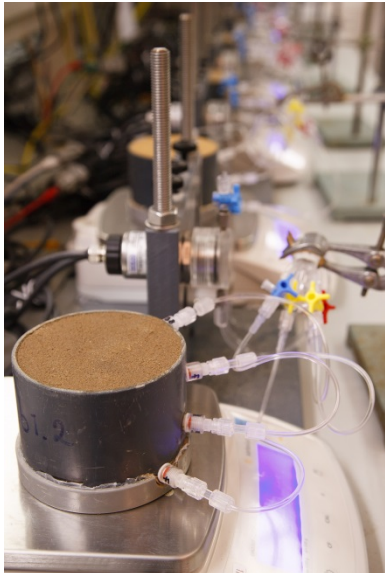
### Zandbakmethode

Voor deze methode wordt een onverstoord gestoken grondmonster van  $100 \text{ cm}^3$  in een roestvrijstalen monsterring ( $h=5$  cm,  $D \approx 5$  cm) met water verzadigd en vervolgens met het nylongaasje op de zandbak geplaatst. De zandbak bevat een fijn gesorteerde grondsoort die een hoge doorlatendheid combineert met een kleine poriediameter. De drukhoogte van de grond in de bak zelf blijft in het te meten gebied, van  $h = 0$  tot ongeveer  $-100$  cm, nagenoeg verzadigd. Door middel van een drainagebuis onder in de bak die verbonden is met een waterreservoir, kan het bodemwater op elke gewenste zuigspanning worden gebracht. Door het monster in contact te brengen met deze zuigspanning, zal het water in het monster deze zuigspanning overnemen en zal er water uit het monster stromen (desorptie). Zodra na herhaaldelijk wegen geconcludeerd wordt dat er geen water meer uit het monster stroomt en het monster dus in evenwicht is met de aangelegde zuigspanning, wordt het monster definitief gewogen. Vervolgens wordt een nieuwe zuigspanning aangelegd en wordt de procedure herhaald. Zodra alle zuigspanningen op deze wijze zijn doorgemeten, wordt het monster gedroogd bij 105 °C en wordt het opnieuw gewogen. Al het water is nu uit het monster verdwenen en de volumetrische vochtgehalten bij de aangelegde zuigspanningen kunnen worden berekend. De methode is beschreven in de ISO 11274 (1998).

### Verdampingsmethode

De verdampingsmethode wordt gebruikt om een deel van de retentie- en onverzadigde doorlatendheidsrelatie te bepalen. Voor deze methode (ISO 11275, 2004) wordt een onverstoord gestoken grondmonster van circa  $600 \text{ cm}^3$  in een PVC-monsterring ( $h=8$  cm,  $D \approx 10$  cm) aan de boven- en onderzijde vlak afgewerkt. Op deze wijze ontstaat een monster met een nauwkeurig bekend

grondvolume. De onderzijde wordt afgesloten met een water- en luchtdichte bodemplaat. Het monster wordt met water verzadigd en vervolgens op een weegschaal geplaatst. Om verdamping mogelijk te maken, staat de bovenzijde bloot aan de omgevingslucht. De drukhoogte wordt op bekende tijdstippen in het monster gemeten met 4 tensiometers die op gelijke verticale afstanden worden geplaatst. Ook de tensiometerdoorgangen in de monsterring zijn lucht- en waterdicht afgesloten, zodat hierdoor geen verdamping kan optreden. Naast de drukhoogten bepaalt men op dezelfde tijdstippen het totale gewicht van het monster. Hieruit berekent men de afname van het totale watergehalte door verdamping. Zodra de watergevulde tensiometers stoppen met werken, meestal in de buurt van de  $h = -700$  tot  $-900$  cm, bepaalt men het ovendroge gewicht van het monster, zodat het gemiddelde watergehalte op elk tijdstip is terug te rekenen.



**Figuur A1.1** Laboratoriumopstelling voor verdampingsmethode.

Tevens bepaalt men de gemiddelde gemeten drukhoogte. Dit resulteert in de gemeten waterretentiecurve. Deze gebruikt men om, volgens een iteratieve procedure, de vochtgehalten per tensiometerhoogte te bepalen op basis van de gemeten drukhoogten. De onverzadigde waterdoorlatendheid volgens Darcy kan nu berekend worden op basis van de verandering in watergehalte per tijdseenheid, de compartimenthoogte en de gradiënt van de stijghoogte in het monster. De data worden verkregen met een geautomatiseerde opstelling die door Wageningen UR in eigen beheer is ontwikkeld (Figuur A1.1).

#### *Drukpanmethode*

Met een hangende waterkolom, zoals aangebracht met de zandbakopstelling, kan een maximale theoretische zuigspanning van 1000 cm worden aangebracht. Vanaf dat punt zal het water gaan koken en is een betrouwbare meting niet meer mogelijk. Om toch bij grotere zuigspanningen te kunnen meten, wordt met een overdruk in plaats van een onderdruk gewerkt. Verschillende kleine verzadigde bodemonsters worden op een met water verzadigde keramische plaat geplaatst. De keramische plaat wordt vervolgens in een drukpan gemonteerd. De keramische plaat is aan de onderzijde afgesloten met een rubbermat. Tussen de plaat en de mat bevindt zich water. Door de plaat zit een afvoerbuisje naar de bovenzijde van de plaat, dat met een slangetje naar een punt buiten de drukpan wordt geleid. De onderzijde van het afvoerbuisje bevindt zich tussen de rubbermat en het keramiek en is daarmee in staat water naar buiten af te voeren dat door de poriën van de keramische plaat wordt getransporteerd. Door middel van een overdruk in de drukpan wordt er een waterpotentiaal aangebracht tussen het water in het monster en de buitenlucht. De atmosferische druk wordt via een dunne slang overgebracht van buiten de drukpan naar de afgesloten onderzijde van de keramische plaat. Door de fijne poriestructuur van de plaat is de overdruk niet in staat om de poriën die gevuld zijn met water leeg te drukken. Wel kan er via de watergevulde poriën watertransport plaatsvinden vanuit het monster door de plaat en het slangetje naar buiten. Zodra het monster in evenwicht is met

de aangelegde druk, wordt de druk weggenomen en worden de monsters gewogen. Daarna worden ze gedroogd bij 105 °C en nogmaals gewogen. Om het volumetrisch vochtgehalte te kunnen bepalen, is dan wel nog de droge bulkdichtheid van een onverstoord monster nodig:

$$\theta = \frac{\rho_d}{\rho_l} w$$

waarin:

$\rho_d$  = droge bulkdichtheid ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

$\rho_l$  = dichtheid van water ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

$w$  = watergehalte op gewichtsbasis en is gelijk het gewicht van het water in het monster gedeeld door het gewicht aan van de oven-droge grond ( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Bij zuigspanningen  $< -3000$  cm kunnen verstoorde grondmonsters worden gebruikt. De methode wordt gebruikt voor het meetbereik van  $h = -1000$  tot  $h = -15000$  cm ( $3 \leq pF \leq 4,2$ ). In het meetbereik  $-1000 < h < -3000$ , dan worden de onverstoorte monsters van de zandbak gebruikt. De methode is beschreven in de ISO 11274 (1998).

#### *Verzadigde waterdoorlatendheid*

Een niet-verstoord, homogeen grondmonster in een ring wordt in een opstelling geplaatst. Het monster wordt geheel verzadigd met water. Boven op het grondmonster wordt een waterlaag met constante hoogte gehandhaafd. Bovendien wordt de onderzijde van het monster geheel verzadigd gehouden. Er wordt een constante stijghoogtegradiënt ingesteld door de uitstroomslang op een vaste positie te houden. Door de hoeveelheid uitstromend water per tijdseenheid te meten, kan de verzadigde waterdoorlatendheid  $K_s$  volgens de wet van Darcy worden bepaald:

$$k_s = \frac{V}{|\nabla H| \cdot \Delta t \cdot A}$$

waarin:

$k_s$  = verzadigde waterdoorlatendheid ( $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ); 'd' stelt een geheel etmaal voor;

$V$  = volume water dat gedurende  $\Delta t$  is uitgestroomd ( $\text{cm}^3$ );

$|\nabla H|$  = absolute hydraulische stijghoogtegradiënt ( $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$ );

$A$  = oppervlakte van het grondmonster ( $\text{cm}^2$ );

$\Delta t$  = tijd waarin het uitstromende water is gemeten (d).

Voor de meting wordt afgeweken van de NEN 5789 (1991). De NEN gaat uit van vrije uitstroom aan de onderzijde van het monster. Omdat in dat geval onverzadigde delen aan de onderzijde van het monster ontstaan en de te overwinnen cohesie- en adhesiekrachten aan de onderzijde ongelijk aan nul zijn, is de gemeten waterdoorlatendheid lager dan de werkelijke verzadigde waterdoorlatendheid. Door de onderzijde verzadigd te houden, wordt dit probleem ondervangen (Vos et al. 1997).

#### **Parametrisering onverzadigde doorlatendheidsrelatie met Mualem-Van Genuchten**

De metingen van de drukhoogten, vochtgehalten en tijd van de verschillende meetmethoden en de verzadigde waterdoorlatendheden zijn gebruikt om de retentie- en onverzadigde waterdoorlatendheidsrelatie te bepalen. Daarbij is in dit project gebruikgemaakt van het Mualem-Van Genuchten-model (Mualem, 1976, Van Genuchten, 1980). Voor het uitvoeren van de berekeningen en fitprocedure is in dit project een filter en een Excelrekensheet gebruikt dat voor het Bodem Informatie Systeem en de BRO (Bodemregistratie Ondergrond) is ontwikkeld. In het lab wordt met zeer korte tijdsintervallen gemeten, zodat verstoringen en temperatuurinvloeden duidelijker zichtbaar worden. Dit resulteert in grote databestanden. Het is daarom wenselijk het aantal datapunten te ontdoen van ruis en te reduceren voorafgaand aan verdere verwerking. Omdat kleine schommelingen in de data (ruis, of temperatuurinvloeden) tot grote afwijkingen kunnen zorgen in de afgeleide data (met name de onverzadigde waterdoorlatendheid in het natte traject), is een filter ontwikkeld waarmee de meetset gereduceerd wordt tot een kleinere set met essentiële data. Er worden geen data aangepast, alleen selectief volgens een vast protocol weggelaten. Vervolgens wordt deze gereduceerde dataset gebruikt in het nieuw ontwikkelde Excelrekensheet dat gebruik maakt van het RETC-programma (Van Genuchten et al. 1991; Leij et al. 1992). Het grote voordeel van deze werkwijze is dat de fitprocedure op een veel kleiner detailniveau geanalyseerd kan worden. Te denken valt daarbij aan uitbijters of berekende en gemeten gewichtsafnamen in de tijd. Vooral de prefit-fase, waarin de puntenwolk van de onverzadigde doorlatendheid wordt afgeleid, moet altijd kritisch door

---

een expert worden beschouwd, omdat met name in het natte traject door modellering fouten kunnen ontstaan in de afgeleide gegevens vanwege beperkingen van het model en meetnauwkeurigheid. Het filter voorkomt al voor een groot deel afwijkingen in het natte traject.

#### *Prefit – De eerste Van Genuchten-retentiefit*

De metingen van de drukhoogten en gemiddelde volumetrische vochtgehalten van de ruwe meetdata van de verdampingsmethode worden gebruikt om de Van Genuchten-retentiecurve voor de eerste keer te fitten. Deze gemiddelde fit wordt gebruikt om vochtgehalten te berekenen in elk compartiment van het bodemonmonster, ofwel op elke hoogte van de tensiometers en op elk tijdstip. Door de berekende vochtgehalten per compartiment te vermenigvuldigen met het volume van het monstercompartiment, ontstaat een berekende hoeveelheid water per compartiment. De som van deze hoeveelheden water moet gelijk zijn aan de totale gemeten hoeveelheid water in het monster. Als hierin een afwijking zit, worden de vochtgehalten van de retentiecurve aangepast. Op deze wijze wordt de fit door iteratie geoptimaliseerd. De prefits in dit project zijn, afhankelijk van de resultaten, uitgevoerd met een 1, 2 of 3 modale functie van Van Genuchten (Durner, 1992).

De geoptimaliseerde prefit wordt vervolgens gebruikt om de waterbeweging tussen de 4 bodemlagen in de tijd te berekenen. Met de vergelijking van Darcy worden vervolgens voor elke set van 2 tensiometers de doorlatendheden als functie van de drukhoogte berekend, resulterend in 3 datasets van 3 tensiometerparen. Deze methode is gebaseerd op de zogenaamde 'instantaneous profile method' en is bijvoorbeeld beschreven in Peters and Durner (2008). In het natte bereik kunnen in de praktijk door kleine meetfouten  $dh/dz$ -waarden, die dicht bij de waarde 1 liggen, resulteren in negatieve waarden van  $k$  of in waarden die grote uitschieters vertonen. Met het filter worden deze problemen grotendeels ondervangen. Mochten er toch nog dergelijke fouten optreden, dan worden deze waarden in dit project als uitbijters beschouwd en niet meegenomen in de verdere analyse. In de literatuur wordt in deze context veelvuldig gewezen op de onzekere uitkomsten van  $k-h$ -relaties in het natte gebied. Afhankelijk van de grondsoort is het in de praktijk daarom lastig om betrouwbare  $k-h$ -relaties te vinden in het gebied  $h = 0$  tot  $-50$  cm. Er zal daarom niet altijd een meting van de doorlatendheid berekend kunnen worden in het gebied  $h = 0$  tot  $-10$  cm. Hoewel kwaliteitsstatus A dit wel vereist, zijn de data wel opgenomen in BIS, maar is hiervan een melding gemaakt in het commentaarveld. Via aanvullende methoden zijn bepalingen van doorlatendheden in dit natte traject wel mogelijk, zoals via de sproeimethode of de druppel-infiltrometer, maar daar waren in dit project geen middelen voor beschikbaar.

#### *Uiteindelijke Mualem-Van Genuchten-fit*

Samen met de metingen uit de zandbak-, drukpan- en verzadigde waterdoorlatendheidsmethode, worden de retentie- en 3 series met onverzadigde waterdoorlatendheidsdata uit de prefit gebruikt om de uiteindelijke Mualem-Van Genuchten-fit uit te voeren. De uiteindelijke parametrisering van de waterretentiecurve kan afwijken van de prefit pF-curve, omdat de uiteindelijke fit geoptimaliseerd is in combinatie met de doorlatendheidsdata, terwijl de prefit alleen gebaseerd is op vochtgehalten en drukhoogten. Bovendien is de uiteindelijke fit een 1-modale fit, terwijl de prefit vaak een hogere modaliteit heeft.

#### *Droge bulkdichtheid en actueel vochtgehalte*

Door toepassing van de gravimetrische methode zijn de droge bulkdichtheid (deel vaste stof per volume-eenheid) en het actuele volumetrisch vochtgehalte (deel water per volume-eenheid) bepaald. Het veldvochtig grondmonster is daartoe gewogen en daarna gedroogd in de droogstoof bij  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  voor een tijdsduur van 24 uur. Na het drogen zijn de monsters een halfuur in de exsiccator<sup>27</sup> gezet en daarna weer gewogen. Bij deze bepaling is uitgegaan van NEN5781, eerste druk augustus 1992 (uitzondering is dat bij het uitvoeren een droogtemperatuur van  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  is toegepast), en ISO11272. Het toegepaste standaardwerkvoorschrift is Alterra 2004, gravimetrische methode: Bepaling watergehalte en/of droge volumieke massa van grond. Deze bepaling is uitgevoerd voor alle 192 grondmonsters.

---

<sup>27</sup> Een exsiccator is een droogkast met droogmiddel waarin vochtgevoelige grondmonsters afgekoeld worden tot de temperatuur gelijk is aan de omgevingstemperatuur.

### *Gloeiverlies / organische stofgehalte*

Het organische stofgehalte van het grondmonster is bepaald door meting van het gloeiverlies en dit vervolgens te corrigeren voor het lutumgehalte. Bij de bepaling van het gloeiverlies is uitgegaan van NEN5754. Het toegepaste standaardwerkvoorschrift is Alterra 2002, Bepaling voor het gloeiverlies in grond. De bepaling van het gloeiverlies is uitgevoerd op alle 192 grondmonsters code A2. Het lutumgehalte waarvoor het gloeiverlies gecorrigeerd is, is afkomstig van de textuurbepaling.

### *Textuur*

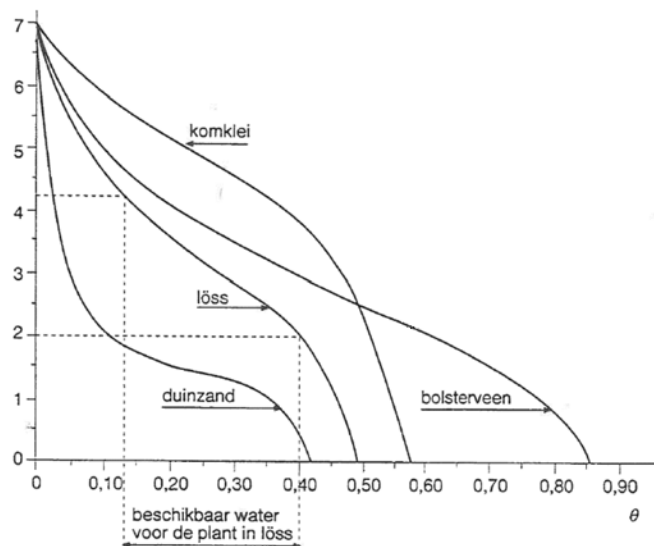
De textuur (korrelgrootteverdeling) geeft de verhouding in gewichtsprocenten weer van de minerale fractie <2000  $\mu\text{m}$  van het grondmonster. De fracties met bijbehorende analysemethode zijn:

- Droge zeefmethode: 2000–420  $\mu\text{m}$ , 420–210  $\mu\text{m}$ , 210–150  $\mu\text{m}$ , 150–105  $\mu\text{m}$
- Natte zeefmethode: 105–63  $\mu\text{m}$ , 63–50  $\mu\text{m}$
- Pipetmethode: 50–2  $\mu\text{m}$ , < 2  $\mu\text{m}$

De pipetmethode is uitgevoerd in het Chemisch Biologisch Laboratorium Bodem op de allerkleinste fracties (< 2  $\mu\text{m}$  en < 50  $\mu\text{m}$ ). Hierbij is het grondmonster van tevoren ontdaan van organische stof en ijzer. De fracties tussen 50  $\mu\text{m}$  en 2000  $\mu\text{m}$  zijn bepaald door middel van zeven, waarbij de fractie van 50 - 63  $\mu\text{m}$  en 63 - 105  $\mu\text{m}$  met de natte zeefmethode en de fractie 105  $\mu\text{m}$  - 2000  $\mu\text{m}$  met de droge zeefmethode is bepaald. Bij deze bepaling is uitgegaan van de fractieverdeling zoals voorgesteld door Bakker, Heinen, Wesselink, De Groot, Assink, 2015 en de methode volgens ISO11277. Door iedere fractie te wegen zijn de procentuele verhoudingen tot de gehele fractie én de zandmediaan bepaald. De bepaling van de textuur is uitgevoerd op 48 grondmonsters.

### *Waterretentiecurve*

De waterretentiecurve geeft aan hoeveel vocht er in de bodem aanwezig is bij een bepaalde zuigspanning (de kracht die de plant moet leveren om water te onttrekken). In de grafiek van de waterretentiecurve wordt het vochtgehalte uitgezet tegen drukhoogte (in cm waterkolom), waarbij de waterkolom (WK) in een logaritmische schaal wordt weergegeven (Figuur A1.2).



**Figuur A1.2** Waterretentiecurve, op de y-as de pF (zuigspanning), op x-as vol. vochtgehalte (%).

Het meten van de waterretentiecurve gebeurt door het vochtgehalte te meten bij een bepaalde druk. Hiervoor zijn twee methodes toegepast: methode Sandbox (0-100 cm WK) en Pressure Plate (0,2-15 bar ofwel 200-15000 cm WK). In Tabel A1.2 zijn per methode de meetpunten met bijbehorende pF weergegeven.



**Tabel A1.2** Meetpunten waterretentiecurve met 3 methoden.

	Sandbox				Press plate low				Press plate high			
cm wk	3	10	30	60	100	200	300	1000	3000	7000	15000	
Bar	0,003	0,01	0,03	0,06	0,1	0,2	0,3	1	3	7	15	
pF	0,5	1,0	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	3,0	3,5	3,8	4,2	

Bij de Sandbox methode worden de Kopecky-ringen (100 cc) in een zandbak geplaatst dat gevuld is met Blokzand (porositeit 50%,  $K_{sat}$  100 cm/dag) dat in verbinding staat met een regelbare waterkolom. Na verzadiging van de grondmonsters wordt de waterkolom dusdanig verlaagd dat deze overeenkomt met de gewenste zuigspanning. Door het verplaatsen van de waterkolom naar beneden wordt er een onderdruk gecreëerd. Een onderdruk van 1 m WK komt daarbij overeen met pF 2,0. Een hogere onderdruk is uit praktisch oogpunt lastig te realiseren, zodat voor de bepaling van het overige deel overgegaan wordt op overdruk met behulp van de Pressure Plate-methode. Wanneer het vochtgehalte niet meer verandert na het wijzigen van de waterkolom, worden de grondmonsters gewogen.

Bij de Pressure Plate-methode worden grondmonsters op een membraanplaat gezet, waarna door overdruk het vocht als het ware uit de monsters wordt geperst (in werkelijkheid is het proces iets anders, maar het voert te ver om dat hier uit te leggen). Tot en met een overdruk van 1 bar (=1000 cm WK) worden de Kopecky-ringen geplaatst in een hoge drukpan, die geschikt is voor drukken tot 5 bar. Het monster moet onverstoorde zijn, aangezien tot deze overdruk de aanwezige poriënstructuur invloed heeft op het resultaat. Bij een hogere overdruk dan 1 bar wordt een lage drukpan gebruikt, die geschikt is voor drukken tot 30 bar. Per drukhoogte worden twee kleinere monsters uit het Kopecky-grondmonster geprepareerd. Deze metingen zijn met ongestoorde monsters gedaan, omdat de poriën dan al leeg zijn en dus niet meer aan het retentieproces bijdragen. Het resulterende vocht, dat met cohesie- en adhesiekrachten aan de gronddeeltjes is gebonden, wordt vervolgens uit het monster geperst. Bij elk meetpunt wordt gewacht tot het vochtgehalte niet meer verandert voordat de monsters worden gewogen. Bij deze bepalingen is uitgegaan van ISO11274. De bepaling van de waterretentiecurve is uitgevoerd op 24 grondmonsters.

---

## Bijlage 2 Beoordeling fysische bodemkwaliteit voor verdichting

Voor de beoordeling van de resultaten van metingen worden drempelwaarden aangehouden zoals die in nationaal en Europees onderzoek naar de bodemfysische conditie van de landbouwbodems zijn gepubliceerd (Akker, 2006, Huber, 2008). Dit betreft de dichtheid, indringingsweerstand, poriënvolume en lucht gevulde poriënvolume.

### *Dichtheid*

Voor zandgronden en lichte zavel (kleigehalte < 17,5%) is de drempelwaarde 1.6 g/cm<sup>3</sup> droge bulkdichtheid (volumieke massa van de grond, inclusief de poriën tussen de zandkorrels) als drempelwaarde gehanteerd voor verdichting. Hogere waarden duiden op verdichting (compactie).

### *Poriënvolume*

Hiervoor wordt voor zandgronden en lichte zavel (lutumgehalte < 17,5%) een drempelwaarden van 40% aangehouden, omdat de meeste plantenwortels moeite hebben met de beworteling van bodems met een poriënvolume kleiner dan 40%. Niet alleen de indringingsweerstand is dan te hoog, maar er zijn dan ook problemen met de zuurstofvoorziening naar de wortels. Kleigronden in Nederland hebben bijna altijd een groter poriëngehalte.

### *Luchtgevuld poriëngehalte*

Voor zandgronden en lichte zavel wordt een drempelwaarde aangehouden van minimaal 10% met een bijbehorende vochttoestand van 50 cm waterdruk.

### *Verzadigde waterdoorlatendheid (Ksat)*

Volgens Lebert et al. (2003) is voor een ondergrond een verzadigde waterdoorlatendheid (Ksat) van 10 cm dag<sup>-1</sup> een goede drempelwaarde. Deze drempelwaarde van 10 cm dag<sup>-1</sup> komt in Nederland overeen met de classificatie 'slecht' (Cultuurtechnische Vereniging, 1988).

De verzadigde doorlatendheid van een grond kan worden beschouwd als een van de beste indicatoren voor de fysische kwaliteit van een grond, omdat het een directe relatie heeft met de kwaliteit van de structuur en de aanwezigheid van continue macroporiën. Het grootste deel van de afname van de poriën bij verdichting gaat ten koste van de macroporiën. Door de vervorming van de grond tijdens verdichting neemt de continuïteit van de macroporiën af. Zowel de afname van het volume aan macroporiën als de onderbreking van de continuïteit van de macroporiën resulteert in een sterke afname van de verzadigde waterdoorlatendheid en van de diffusie van zuurstof in de grond.

De verzadigde doorlatendheid is relatief eenvoudig te meten en is een belangrijke eigenschap in de berekening en modellering van onder andere infiltratie van water, oppervlakkige afstroming, erosie, transport van nutriënten en stoffen.

---

# Bijlage 3 Meetresultaten en modellering

## Vruchtbare Kringloop 2015

Begin 2015 is door STOWA aan Alterra opdracht gegeven tot de uitvoering van bodemonderzoek (kenmerk stowa JG150217002/446.592/MT). Dit betreft het uitvoeren van analyses in het laboratorium van 192 bodemonsters die op percelen van 12 agrarische bedrijven met grasland zijn genomen in het beheersgebied van waterschap Rijn en IJssel. Deze waren genomen door stagiaires van de Hogeschool VHL (Larenstein) in aansluiting op hun project Vruchtbare Kringloop.

Van de monsters zijn de volgende eigenschappen bepaald:

- Bulkdichtheid
- Vochtgehalte
- Gloeiverlies (hiervan afgeleid het organisch stofgehalte)
- Textuur
- Waterretentiecurve (pF curve)

Het drogen, zeven en de voorbehandeling voor de textuurbepaling is uitgevoerd door het chemisch biologisch laboratorium bodem van de WUR (CBLB), evenals de textuuranalyses van 0-50µm. De verdere analyses zijn uitgevoerd door Auke Sietsema, als onderdeel van zijn stage voor de VHL. Daarin is hij begeleid door Alterra (Gerben Bakker en Jan van den Akker).

In deze memo zijn de resultaten van de analyses opgenomen. Deze zijn gecombineerd met metingen die zijn uitgevoerd in het voorafgaande onderzoek van D. Gerristen (Bodemkwaliteitsanalyse op agrarische bedrijven, Velp: Hogeschool VHL 2014). In dat onderzoek is onder begeleiding van het Louis Bolk Instituut de bodemconditie van percelen van de 12 agrarische bedrijven bepaald. Tijdens dat veldwerk zijn ook infiltratiemetingen uitgevoerd en zijn 192 bodemonsters gestoken. Het steken van de eerste serie monsters is daarbij uitgevoerd onder begeleiding van Alterra. In het onderzoek van Auke Sietsema is ook gekeken naar de bodemkwaliteit op onbereden delen van percelen (onder afrasteringsdraad) en zijn ook metingen uitgevoerd naar de indringingsweerstand uitgevoerd met een penetrometer. De metingen met de penetrometer zijn niet direct representatief, omdat ze tijdens te droge omstandigheden zijn uitgevoerd en zijn daarom niet opgenomen in deze memo. In deze bijlage worden achtereenvolgens behandeld:

1. Achtergrond
2. Locatie en type bodemonsters
3. Laboratorium analyses WUR
4. Resultaten veldwerk
5. Modellering watertransport

### **A3.1 Achtergrond**

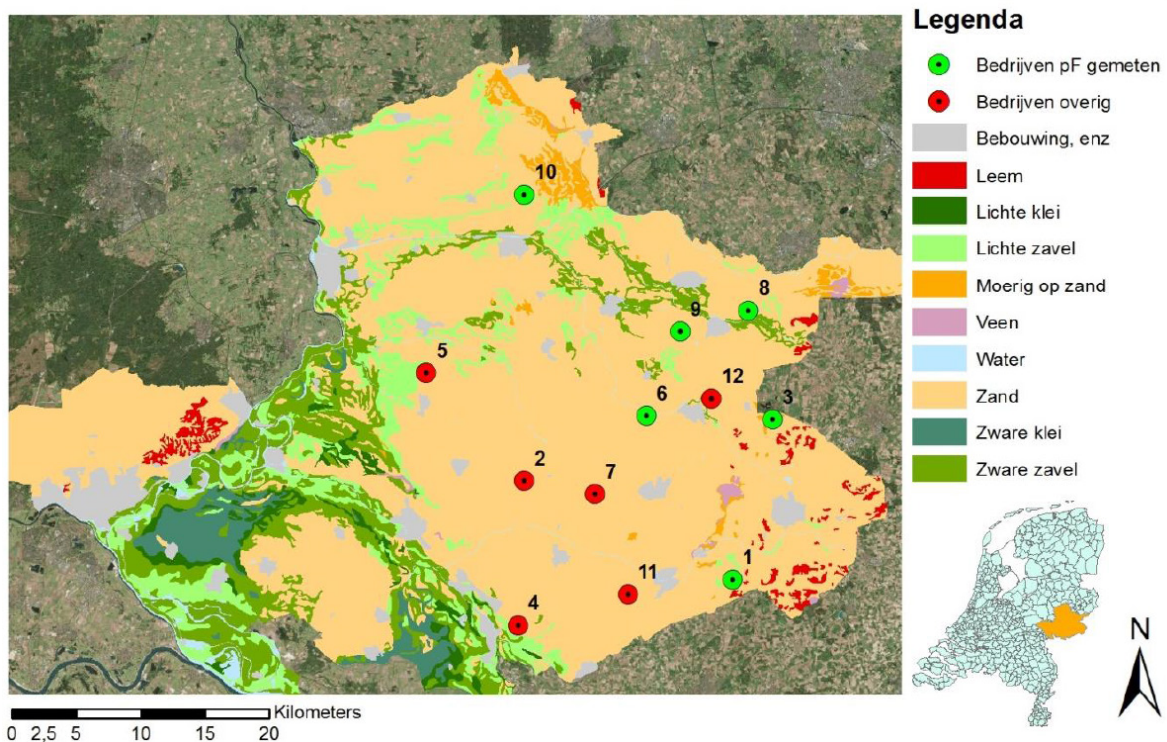
Naar aanleiding van een stageonderzoek die in het kader van het project Vruchtbare Kringloop werd uitgevoerd in 2014, is het initiatief genomen om aanvullend op de bepaling van een bodemconditiescore bodemonsters te nemen. De genomen monsters, 192 in totaal, zijn in een koeling bewaard bij de WUR.

Het doel van deze bemonstering en aansluitende analyse is om inzicht te krijgen in de actuele bodemkwaliteit van verschillende typen graslandpercelen (jong en oud grasland, kopakker, perceelsmidden) en daarbij bodemfysische parameters te verzamelen die nodig zijn om effecten op het watersysteem te kunnen kwantificeren.

Voor deze bijlage is gebruikgemaakt van het stagerapport "Bodemgezondheid in de Vruchtbare kringloop, onderzoek naar ondergrondverdichting van graslandpercelen op zandgronden en lichte zavels in de Achterhoek" van Auke Sietsema (Hogeschool VHL) Arnhem, december 2015) en de daarbij geleverde database.

### A3.2 Locatie en type bodemmonsters

De monsters zijn genomen op percelen van 12 melkveehouders die deelnemen aan het project Vruchtbare Kringloop (kenniscgroep bodem 1). De locaties van deze bedrijven liggen verspreid over de zandgronden in de Achterhoek (zie Figuur A3.1). Per locatie is op een jong (3-5 jaar) en oud (> 5 jaar) graslandperceel onderzoek gedaan.



**Figuur A3.1** Locatie agrarische bedrijven Kenniscgroep Bodem 1 Vruchtbare Kringloop (overgenomen uit Sietzema, juni 2016).

Bij ieder van de 12 melkveehouders zijn in de periode oktober-november 2014 bodemmonsters genomen van een perceel met jong grasland, een perceel met oud grasland, steeds in het midden van die percelen en in de kopakker. Tijdens het veldwerk waar deze monsters zijn genomen, is de bodemconditiescore bepaald, de beworteling en indringingsweerstand.

De Bodemconditiescore geeft op een eenvoudige, goedkope en praktische manier inzicht in de kwaliteit van de bodem. De werkwijze is als volgt: Men steekt een kluit van 20x20x20 cm vanaf het maaiveld uit de bodem en doet op visuele wijze een beoordeling van de gewasbedekking, beworteling, verdichting ondergrond, regenwormen, bodemstructuur, pH, organische stof, kleur van de bodem, plasvorming, scheuren en spoorvorming / vertrapping. De bewortelingsdichtheid is onderzocht door op 10 en 20 cm -mv het aantal graswortels per dm<sup>2</sup> te tellen. Daarnaast is in de profielkuil gekeken tot welke diepte de wortels maximaal reiken.

Voor het steken van de 192 grondmonsters (12 bedrijven, 4 meetlocaties, monsters op 4 diepten) is een proefkuil gegraven van 100x100x50 cm en zijn Kopecky-ringen gebruikt met een inhoud van 100 cm<sup>3</sup> (hoogte 5 cm, doorsnede 5 cm). Er zijn 4 lagen bemonsterd: 0-10 cm -mv, 10-20 cm -mv, 20-30 cm -mv en 35-45cm -mv. Per laag zijn in het midden van de laag drie monsters (A, B en C) genomen, waarbij de ring op de juiste hoogte in de bodem is gedrukt, voorzichtig is uitgegraven en de boven- en onderkant kant vervolgens vlak is afgesneden.

### A3.3 Laboratorium analyses WUR

De analyses van de bodemmonsters die in het laboratorium van de WUR zijn uitgevoerd, zijn weergegeven in Tabel A3.1.

**Tabel A3.1** *Overzicht Lab-analyses WUR 2015 bodemmonsters Vruchtbare Kringloop.*

Bepaling	Aantal bedrijven	Meetlocaties	Dieptes	Aantal monsters
Droge bulkdichtheid & actueel vochtgehalte	12	Jong: kopakker & perceelsmidden Oud: kopakker & perceelsmidden	0-10, 10-20, 20-30, 35-45cm	192
Gloeiverlies	12	Jong: kopakker & perceelsmidden Oud: kopakker & perceelsmidden	0-10, 10-20, 20-30, 35-45cm	192
Textuur	12	Oud: kopakker en perceelsmidden	10-20, 35-45cm	48
Waterretentiecurve	6	Oud: kopakker en perceelsmidden	10-20, 35-45cm	24

### A3.4 Resultaten

Het veldwerk op de 12 bedrijven en de aansluitende laboratoriumanalyses hebben informatie opgeleverd over de bodemconditie, de beworteling, infiltratiecapaciteit, indringingsweerstand, textuur, bulkdichtheid, actueel vochtgehalte, organisch stofgehalte en waterretentiecurve. Deze metingen zijn gedaan op jonge en oude graslandpercelen, op de kopakker, het perceelsmidden en op onbereiden delen (onder afrasteringen e.d.). Tabel A3.2 op de volgende bladzijde geeft een overzicht van de locaties waarop de informatie is verzameld. De volledige set aan meetwaarden zijn opgenomen in een database (Excel). In het navolgende worden de resultaten behandeld met betrekking tot:

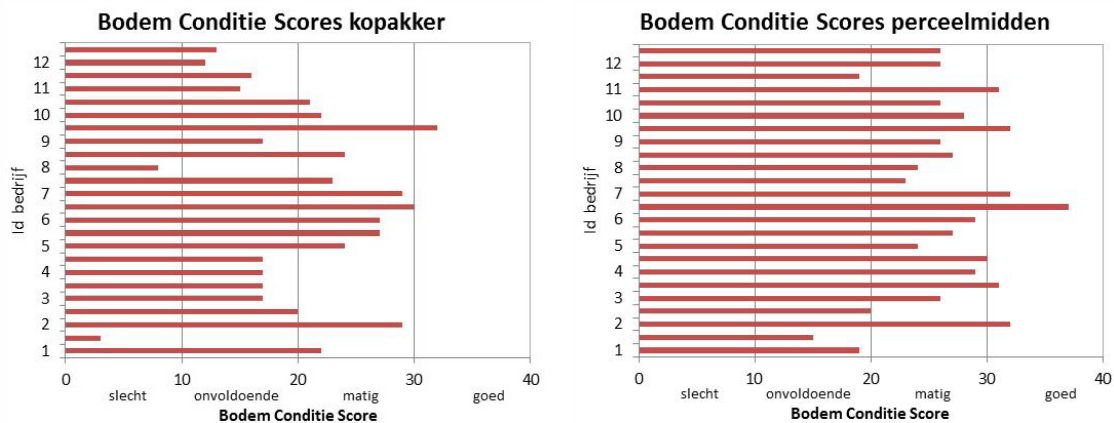
- bodemconditiescore en beworteling
- textuur
- dichtheid
- vochtgehalte
- waterretentiecurve

**Tabel A3.2** Overzicht verrichte metingen bodemkwaliteit Vruchtbare Kringloop.

nr	Agrariër	plek bemonstering grasland perceel	Auke Sietsema							Dirk Sloot				Lageschaar & Gerritsen					
			Droge buidichtheid	Actueel vochtgehalte	Gloei-verlies	Organisch stof (10- 20cm, 35-45cm)	Textuur (10-20cm, 35-45cm)	pF curve (10-20cm, 35-45cm)	Penetrologter najaar	BCS (incl. beworteling)	Infiltratie dubbel ploegzool	Infiltratie enkel ploegzool	Vochtgehalte voor en na	Penetrologter voorjaar	BCS (incl. beworteling)	Infiltratie enkel najaar maai-veld	Penetrologter najaar		
1	B. Lensink	oud kop	x	x	x	x	x	x					x	x	x				
		oud midden	x	x	x	x	x	x					x	x	x				
		jong kop	x	x	x								x	x	x				
		jong midden	x	x	x								x	x	x				
		onbereden	x	x	x		x <sup>1</sup>	x	x	x									
2	G. Wolsink	oud kop	x	x	x	x	x							x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x							x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
3	A. Freriks	oud kop	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
		onbereden	x	x	x		x <sup>1</sup>	x	x	x									
4	D. ten Have	oud kop	x	x	x	x	x						x	x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x							x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
5	Harmsen	oud kop	x	x	x	x	x							x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x							x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
6	te Fruchte	oud kop	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
		onbereden	x	x	x		x <sup>1</sup>	x	x	x									
7	A. ten Have	oud kop	x	x	x	x	x							x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x							x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
8	H. Geessink	oud kop	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
		onbereden	x	x	x		x <sup>1</sup>	x	x	x									
9	H. Stokkers	oud kop	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		oud midden	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x			
		jong kop	x	x	x										x	x	x		
		jong midden	x	x	x										x	x	x		
		onbereden	x	x	x		x <sup>1</sup>	x	x	x									
10	H. Vrieling	oud kop	x	x	x	x	x	x							x	x	x		
		oud midden	x	x	x	x	x	x							x	x	x		
		jong kop	x	x	x											x	x	x	
		jong midden	x	x	x											x	x	x	
		onbereden	x	x	x		x <sup>1</sup>	x	x	x									
11	J. Lensink	oud kop	x	x	x	x	x								x	x	x		
		oud midden	x	x	x	x	x								x	x	x		
		jong kop	x	x	x											x	x	x	
		jong midden	x	x	x											x	x	x	
12	Lageschaar	oud kop	x	x	x	x	x								x	x	x		
		oud midden	x	x	x	x	x								x	x	x		
		jong kop	x	x	x											x	x	x	
		jong midden	x	x	x											x	x	x	

### Bodem Conditiescore

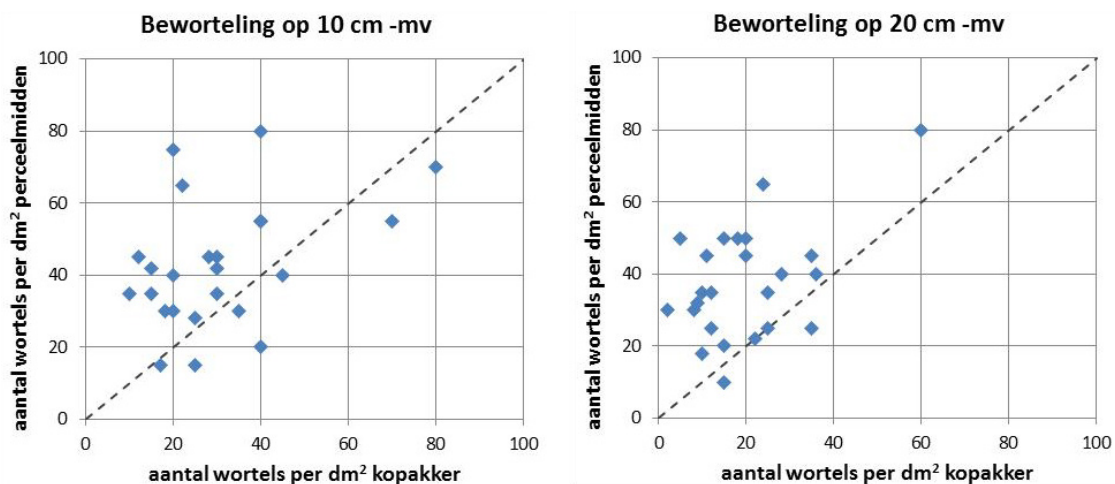
De resultaten van de bodemconditiescore zijn weergegeven in Figuur A3.2. De score is een resultante van de eigenschappen gewasbedekking, beworteling, verdichting ondergrond, regenwormen, bodemstructuur, pH, organische stof, kleur van de bodem, plasvorming, scheuren en spoorvorming / vertrapping. De scores ter plaatse van de kopakker zijn iets minder goed dan in het midden van de percelen. Voor beide geldt dat de conditie meestal als onvoldoende is beoordeeld. Op 6 bedrijven is de score ook bepaald op onbereden delen van percelen van het bedrijf. Een daarvan (nummer 8) was voornamelijk begroeid met bramenstruiken en was meer representatief voor bosgrond. Daarom is deze locatie bij de beschouwing van onbereden landbouwbodems niet meegenomen. De andere locaties waren met gras begroeid onder afrasteringsdraad. De bodems op die onbereden delen zijn als matig tot goed beoordeeld.



**Figuur A3.2** Bodem Conditiescore, links ter plaatse van de kopakkers, rechts de perceelmiddens.

### Beworteling

Een van de onderdelen van de bodemconditiescore is de dichtheid van de beworteling. Dit is bepaald door het aantal wortels per  $\text{dm}^2$  te tellen op een diepte van 10 cm -mv en op een diepte van 20 cm -mv. De resultaten hiervan zijn afzonderlijk van de bodemconditie weergegeven in Figuur A3.3. Hierin is de beworteling zoals bepaald op de kopakker uitgezet tegen de beworteling in het midden van hetzelfde perceel. Van Figuur A3.3 is vrij duidelijk af te lezen dat in het midden van de percelen de beworteling dichter (intensiever) is dan ter plaatse van de kop van de akkers. De maximale diepte van de beworteling is gemiddeld rond de 40 cm. In de perceelsmiddens is dat een paar cm dieper. Op onbereden delen van de percelen reiken de wortels nog iets dieper (49 cm).



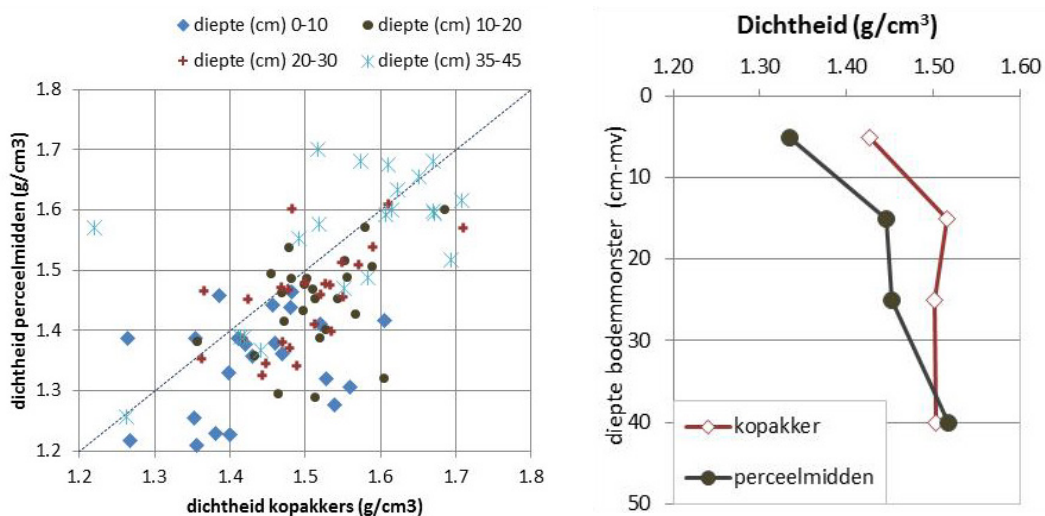
**Figuur A3.3** Vergelijking van de beworteling in de perceelsmiddens met de beworteling in de kopakkers op 10 cm diepte (links) en 20 cm diepte (rechts).

### Textuur

De bemonsterde lagen zijn 10-20 cm en 35-45 cm, bovengrond (toplaag en bouwvoor) en ondergrond (ploegzool). Onder de bovengrond bevindt zich vaak een storende laag vanwege het ploegen, de ploegzool. De ploegzool is een storende/meer verdichte laag in het bodempakket. Van jong grasland zijn deze bodemparameters niet bepaald. Het valt op dat de meeste oude graslanden een hoog organische stofgehalte (>3%), voornamelijk in de bovengrond (10-20 cm -mv), hebben. Organische stof maakt deze bodem elastischer waardoor deze minder kwetsbaar is voor verdichting.

### Dichtheid

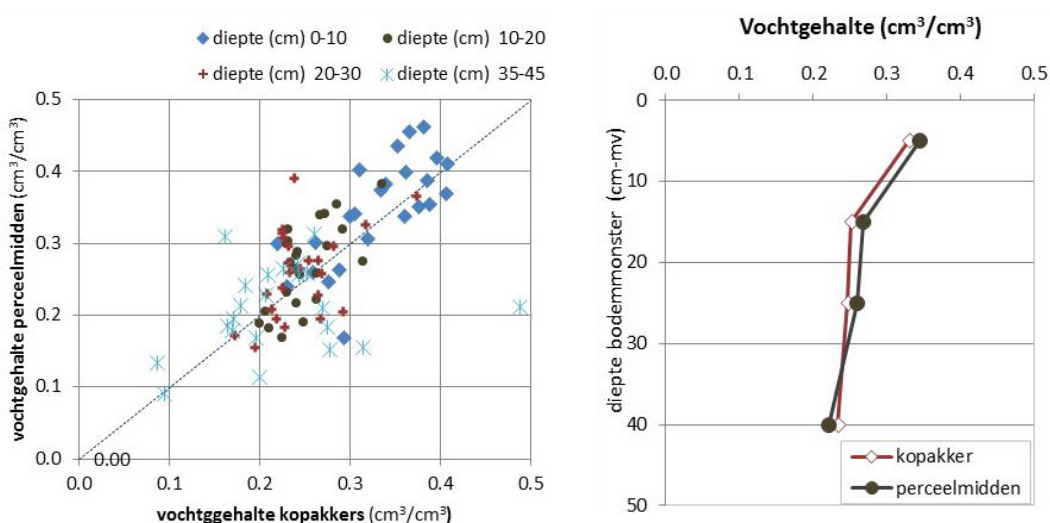
De dichtheden zijn weergegeven in Figuur A3.4. Hierin zijn de dichtheden zoals gemeten op de kopakkers uitgezet tegen de dichtheden in het midden van datzelfde perceel. Rechts is ook het gemiddelde per dieptetraject weergegeven. Duidelijk is dat de dichtheid op de kopakkers vaak groter is dan op de perceelsmiddens op het dieptetraject van 10 tot 30 cm-mv. Op de overige diepten is dat niet zo duidelijk. De dichtheden van de onbereiden delen zijn significant lager (circa 0,1 g/cm<sup>3</sup>). Tussen jong en oud grasland zijn geen duidelijke verschillen waargenomen.



**Figuur A3.4** Dichtheden kopakkers en perceelsmiddens, links voor ieder perceel uitgezet tegenover elkaar, rechts de rekenkundige gemiddeldes per diepteniveau.

### Vochtgehalte

Het actuele vochtgehalte tijdens monsternamen is weergegeven in Figuur A3.5.



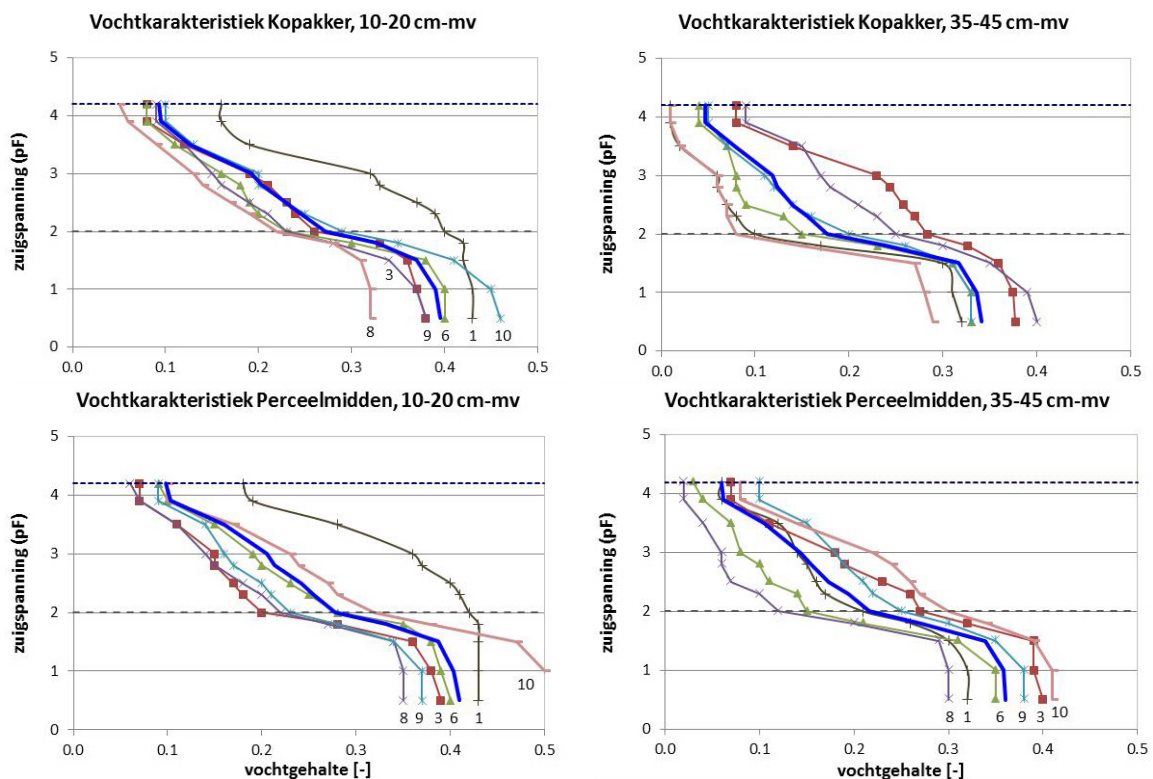
**Figuur A3.5** Vochtgehalten kopakkers en perceelsmiddens, links voor ieder perceel uitgezet tegenover elkaar, rechts de rekenkundige gemiddeldes per diepteniveau.



In Figuur A3.5 zijn de vochtgehalten zoals gemeten op de kopakkers uitgezet tegen de vochtgehalten in het midden van datzelfde perceel. Op de kopakkers is het vochtgehalte iets lager, maar de verschillen tussen beide zijn gering. Tussen jong en oud grasland zijn geen duidelijke verschillen waargenomen.

#### Waterretentiecurve

Voor 6 van de 12 bedrijven (bedrijf, 1, 3, 6, 8, 9 en 10) zijn de bodemonsters op 10-20 en 35-45 cm diepte de waterretentiecurve bepaald. In Figuur A3.6 zijn de grafieken opgenomen met de waarden van het vochtgehalte bij de verschillende zuigspanningen. De grafieken geven apart de meetresultaten voor de 2 diepteniveaus, kopakker en perceelsmidden. Voor die 4 categorieën zijn ook de rekenkundig gemiddelde waterretentiecurven weergegeven. Bij de nadere uitwerking moet worden opgemerkt dat voor enkele bepalingen het vochtgehalte bij pF 4,2 net ietsje hoger is gemeten dan voor hetzelfde monster bij pF 3,9. Omdat dit fysisch gezien niet mogelijk is (en dus een meetafwijking), is in de grafieken de meetwaarde bij pF 4,2 voor die monsters gelijk gesteld aan de meting van pF 3,9.



**Figuur A3.6** Waterretentiecurven van de monsters van de 6 bedrijven (1, 3, 6, 8, 9 en 10) per diepteniveau op de kopakker en perceelsmidden. De blauwe (dikkere) lijn geeft per categorie het gemiddeld vochtgehalte.

Op beide diepten is te zien dat het beschikbare vocht (tussen pF 2,0 en 4,2) in het midden van het perceel iets groter is dan op de kopakkers. Met de verkregen data zal nog nader onderzoek worden gedaan. Voor de interpretatie wordt hier ook een modellering met SWAP-WOFOST uitgevoerd. Projecten als deze dragen bij aan de opbouw van databases met waardevolle kwantitatieve bodemgegevens. De opbouw van dergelijke databases kunnen bijdragen aan het verkrijgen van beter inzicht in de actuele conditie van landbouwbodems, het analyseren van statistisch verantwoorde trends en, zoals eerder aangegeven, aan het uitvoeren van modelstudies om effecten op het watersysteem te kunnen ondersteunen met gemeten data.

## A4.2 Modelling watertransport

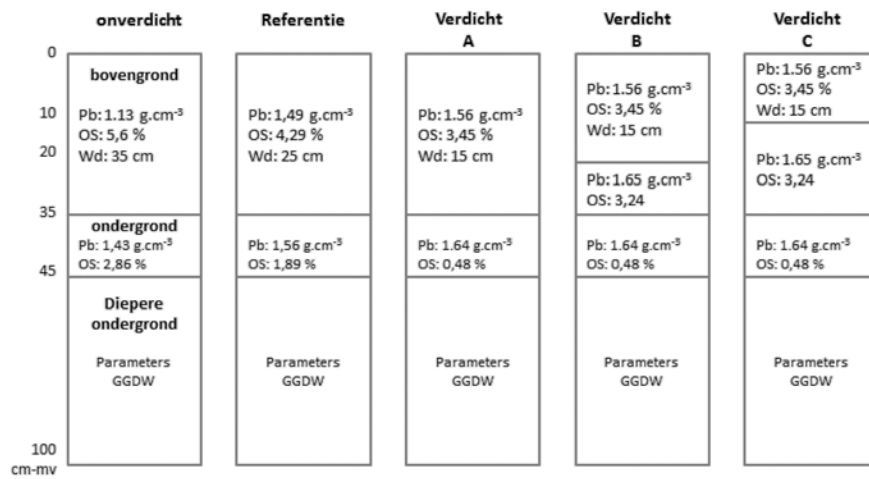
De beschreven meetgegevens zijn benut als input voor de modellering van de vochthuishouding op perceelniveau. Deze modellering is uitgevoerd door Auke Sietzema onder intensieve begeleiding van Rob Hendriks (Alterra).

In Schipper et al. (2015) is uitgebreid beschreven hoe de modellering van de vochthuishouding op perceelniveau is uitgevoerd. Met dezelfde opzet en dezelfde SWAP-WOFOST-versie (3.2.59) is de modellering voor de deelstudie uitgevoerd. Een belangrijk verschil is dat voor de studie van Schipper et al. (2015) de bodemfysische rekenparameters die representatief zijn voor een verdichte en verbeterde bodems gebaseerd waren op aannames van een deskundige (Jan v.d. Akker, Alterra), terwijl voor de onderhavige deelstudie de parameters voor waterretentie, dichtheden en beworteling zijn ontleend aan de eerder beschreven metingen. Omdat de doorlatendheidsrelaties niet zijn gemeten, zijn hiervoor dezelfde waarden aangehouden als in de modelstudie van Schipper et al. (2015). Net als in de studie van Schipper et al. (2015) is SWAP-WOFOST 30 jaar doorgerekend op uurbasis. Op basis van de veldmetingen is een bodemprofiel gekozen met een bovengrond van 0 tot 35 cm -mv en een humeuze ondergrond van 35 tot 45 cm -mv. De modelparameters voor de diepere ondergrond, vanaf 45 cm -mv tot 100 cm -mv, zijn overgenomen uit Schipper et al. (2015). Voor het landgebruik is blijvend grasland verondersteld.

**Tabel A3.3** Bodemfysische parameters voor de modellering van bodemvocht, verdamping en oppervlakkige afstroming van de onderzoekslocaties in Vruchtbare Kringloop.

	Diepte	$\theta_{res}$	$\theta_{res}$	$\alpha$	N	Ksat	$\lambda$
<b>Podzolgrond</b>							
<b>Onverdicht</b>							
Bovengrond	0-30	0.045	0.53	0.021	1.43	109	-0.55
Ondergrond	35-45	0.03	0.42	0.0165	1.4	109	-0.55
<b>Referentie</b>							
Bovengrond	0-30	0.04	0.41	0.014	1.4	34	-0.999
Ondergrond	35-45	0.015	0.355	0.022	1.53	34	-1.0
<b>Verdicht, variant A</b>							
Bovengrond, onverdicht	0-30	0.025	0.36	0.018	1.42	34	-0.999
Ondergrond	35-45	0.015	0.305	0.013	2.0	2.3	-1.0
<b>Verdicht, variant B1</b>							
Bovengrond, onverdicht	0-20	0.025	0.36	0.018	1.42	34	-0.999
Bovengrond	20-30	0.02	0.33	0.011	1.55	2.3	-1.0
Ondergrond	35-45	0.015	0.305	0.013	2.0	2.3	-1.0
<b>Verdicht, variant C</b>							
Bovengrond, onverdicht	0-10	0.025	0.36	0.018	1.42	34	-0.999
Bovengrond	10-20	0.02	0.33	0.011	1.55	2.3	-1.0
Ondergrond	35-45	0.015	0.305	0.013	2.0	2.3	-1.0
Diepere ondergrond	> 45	0.01	0.379	0.022	2.215	29	0.134
<b>Enkeerdgrond</b>							
Bovengrond, onverdicht A	0-10	0.045	0.393	0.022	1.38	109	-0.55
Bovengrond, onverdicht B	10-35	0.03	0.375	0.022	1.33	34	-0.999
Ondergrond onverdicht	35-100	0.045	0.393	0.022	1.38	109	-0.55
Diepere ondergrond	>100	0.01	0.379	0.022	2.215	29	0.134

Voor de podzolgronden zijn 3 varianten onderscheiden: de meest verdichte, meest onverdichte en een gemiddeld (referentie) bodemprofiel. De parameters voor deze varianten zijn afgeleid uit de eerdergenoemde metingen. De meest onverdichte op basis van de bodemfysische relaties van de perceelrand, de meest verdichte op basis van het meest verdichte profiel op de kopakker en de referentie op basis van de bodemprofielen die op de perceelsmiddens zijn gemeten. De varianten voor een verdicht bodemprofiel verschillen ten aanzien van de aangenomen diepte en dikte van de verdichte laag en de diepte van de beworteling. De berekende profielen zijn schematisch weergegeven in Figuur A3.7.



**Figuur A3.7** Rekenvarianten doorgerekende veldpodzolgronden. Voor de boven- en ondergrond zijn de veronderstelde bulkdichtheid (Pb), het organisch stofgehalte (OS) en de worteldiepte (Wd) weergegeven.

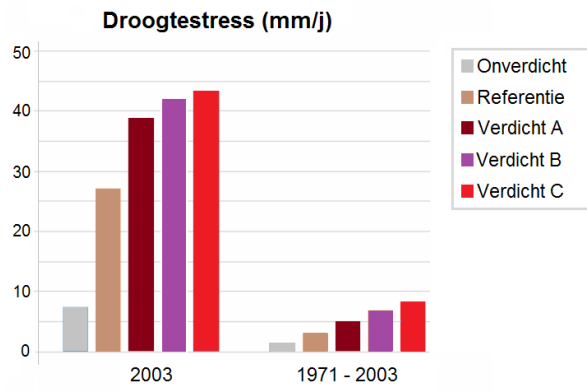
De referentie heeft ten opzichte van de onbereiden perceeldelen een iets hogere dichtheid, lager stofgehalte en geringere worteldiepte. De verdichte rekenvarianten onderscheiden zich in de diepte van de verdichting. Deze begint bij variant A waar de ondergrond begint (30 cm -mv). Bij variant B en C begint de verdichting al in de bovengrond.

De modelparameters van de varianten en bijbehorende berekende afvoerpieken naar de sloot zijn samengevat in Tabel A3.4. Analoog aan de studie van Schipper et al. (2015) is voor het bepalen van de piekafvoeren bij een herhalingstijd van 2 en 10 jaar uitgegaan van de Gumbellverdeling van de berekende afvoeren. Uit de modellering volgt dat de verdichting een significante invloed heeft op de afvoerpieken: 2,5 maal zo grote afvoer in de zomer en 7 maal zo grote afvoer in de winter. In de winter is het verschil in mm piekafvoer tussen de onverdichte en verdichte bodems het grootst. Hierbij moet worden bedacht dat de afvoer in de zomersituatie in absolute zin kleiner is dan in de winter, maar dat deze wel in een veel kortere tijd moet worden afgevoerd. Voor de onverdichte bodem wordt nauwelijks oppervlakkige afstroming en daarmee piekafvoeren berekend (< 5 mm). Voor de verdichte bodems is de infiltratiecapaciteit lager en wordt daardoor vaker oppervlakkige afstroming en daarmee hogere piekafvoeren berekend, tot ruim 22 mm. Hoe ondieper de verdichte laag aanwezig is, hoe meer de oppervlakkige afstroming en daarmee de piekafvoeren naar de sloot toeneemt.

**Tabel A3.4** Modelresultaten afvoerpieken zomer en winter bodemprofielen Vruchtbare Kringloop.

Variant	Zomer 4-uurs afvoerpieken		Winter 24-uurs afvoerpieken	
	T=2 jaar	T=10 jaar	T=2 jaar	T=10 jaar
Onverdicht	1,4	4,8	0,5	2,8
Referentie	2,8	8,1	0,9	3,3
Verdicht variant A	3,2	9,4	5	5,2
Verdicht variant B	3,8	10,5	7,5	20,8
Verdicht variant C	4,3	12	9	22,4

De modelresultaten van de modellering van de droogtestress, berekend als de vermindering van de gewasverdamping, zijn weergegeven in Figuur A3.8. Deze is berekend in een extreem droog jaar (2003) en het gemiddelde over de periode 1971–2003. Voor de verdichte bodems wordt in het extreem droge jaar 2003 een significant grotere verdampingsreductie berekend dan de referentie (circa 40 mm ten opzichte van 27 mm). Opvallend is dat voor de onverdichte bodem maar 7 mm verdampingsreductie wordt berekend. Gerekend over het langjarig gemiddelde is de verdampingsreductie voor de meest ongunstige bodem minder dan 10 mm en zijn de verschillen tussen de varianten enkele millimeters.



**Figuur A3.8** Modelresultaten droogtestress 2003 en 1971-2003 bodemprofielen Vruchtbare Kringloop.

## Bijlage 4 Rekenregels Assouline

Schlüter et al. (2012) beschouwden een situatie zonder en met een verdichte laag (ploegzool) waarbij de hydraulische eigenschappen van de verdichte laag werden afgeleid uit die van de niet-verdichte laag gebaseerd op de theorieën van Assouline (2006a,b). In deze procedure worden de parameters voor de verdichte laag berekend uit die van de onverdichte laag via een correctie gebaseerd op de verandering in de droge bulkdichtheid. Als basis in deze analyse wordt uitgegaan van de gedachte dat verdichting leidt tot een selectieve afname in porositeit en een verschuiving van de poriëngrootte verdeling naar kleinere poriënstralen (Or and Ghezzehei, 2002).

Voor de waterretentiecurve, in formules:

$$\theta_{r,c} = \theta_r \frac{\rho_c}{\rho} \quad [A-1]$$

$$\theta_{s,c} = \theta_s \frac{\rho_s - \rho_c}{\rho_s - \rho} \quad [A-2]$$

$$n_c = n \quad [A-3]$$

$$m_c = 1 - 1/n_c \quad [A-4]$$

$$\alpha_c = \alpha \left( \frac{\rho_c}{\rho} \right)^{-3.82} \quad [A-5]$$

De parameter  $n$  blijft onveranderd na verdichting. Dit is het geval indien de variantie van de poriëngrootte verdeling evenveel verandert als het gemiddelde van die verdeling (de variatiecoëfficiënt van de verdeling voor en na verdichting blijft gelijk).

Voor de doorlatendheidsrelatie, in het bijzonder voor de doorlatendheid bij verzadiging  $K_s$ , zijn meerdere modellen afgeleid (zie o.a. in Assouline, 2005; 2006). Schlüter et al. (2012) zeggen dat deze in principe gebruikt zouden kunnen worden. Echter, zij hebben zelf gekozen om  $K_s$  2 ordes in grootte kleiner te maken in het geval van verdichting. Wel gaf Assouline (2005; 2006) aan dat er een zeer sterke relatie bestaat tussen de variatiecoëfficiënt van de poriëngrootteverdeling en de vormparameter  $\lambda$ . Indien, zoals hierboven, we veronderstellen dat de variatiecoëfficiënt van de verdeling voor en na verdichting gelijk blijft, dan geldt dat ook voor  $\lambda$ .

$$\lambda_c = \lambda \quad [A-6]$$

Assouline (2006b) beschouwt vier mogelijke aanpassingen voor  $K_s$ . De eerste aanpassing is die van Or et al. (2000; gebaseerd op het Kozeny-Carman model), waarbij hier is verondersteld dat  $\theta_s$  gelijk is aan de porositeit:

$$K_{s,c} = K_s \frac{\theta_{s,c}^3 (1 - \theta_s)^2}{\theta_s^3 (1 - \theta_{s,c})^2} \quad [A-7]$$

De tweede is een aanpassing gebaseerd op Laliberte et al. (1966). Deze is oorspronkelijk afgeleid voor een Brooks and Corey model waarbij we hier de verhouding van de Brooks-Corey parameter die de luchtintreewaarde voorstelt hebben vervagen door de (omgekeerde) verhouding van de  $\alpha$ -parameters uit de Mualem-Van Genuchten-relaties (met gebruik van  $\theta_s$  is gelijk aan porositeit, en [A-6])

$$K_{s,c} = K_s \left( \frac{\theta_{sc} - \theta_{rc}}{\theta_s - \theta_r} \right) \left( \frac{\alpha_c}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\lambda_c (\lambda + 2)}{\lambda (\lambda_c + 2)} \right] = K_s \left( \frac{\theta_{sc} - \theta_{rc}}{\theta_s - \theta_r} \right) \left( \frac{\alpha_c}{\alpha} \right)^2 \quad [A-8]$$

De derde is het concept van Mualem and Assouline (1989). Deze is oorspronkelijk afgeleid voor een Brooks and Corey model waarbij we hier de verhouding van de Brooks-Corey parameter die de luchtintreewaarde voorstelt hebben vervagen door de (omgekeerde) verhouding van de  $\alpha$ -parameters uit de Mualem-Van Genuchten relaties (met gebruik van  $\theta_s$  is gelijk aan porositeit, en [A-6])

$$K_{s,c} = K_s \left( \frac{\theta_{sc} - \theta_{rc}}{\theta_s - \theta_r} \right)^{2.5} \left( \frac{\alpha_c}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\lambda_c(\lambda + 2)}{\lambda(\lambda_c + 2)} \right]^2 = K_s \left( \frac{\theta_{sc} - \theta_{rc}}{\theta_s - \theta_r} \right)^{2.5} \left( \frac{\alpha_c}{\alpha} \right)^2 \quad [A-9]$$

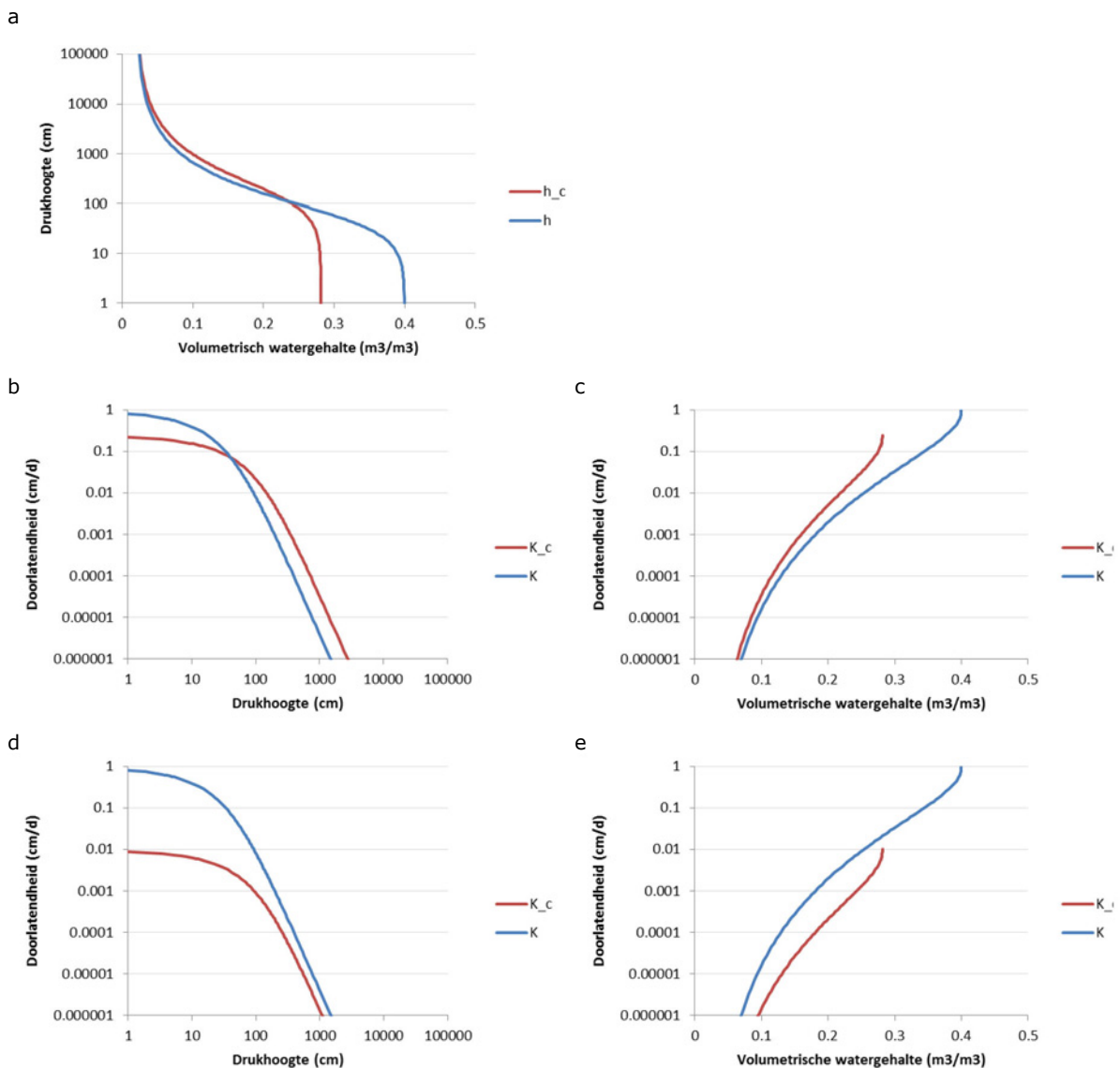
Het vierde model is besproken in Assouline (2006b) en luidt:

$$K_{s,c} = K_s \left( \frac{\theta_{sc} - \theta_{rc}}{\theta_s - \theta_r} \right)^3 \left( \frac{\rho_c}{\rho} \right)^{\delta-7} \quad [A-10]$$

Waarbij  $K_{s,c}$  een functie is van  $\theta$  en de droge bulkdichtheid en een parameter  $\delta$ . Voor  $\delta = 5$  geldt dat [A-10] gelijk is aan [A-7]. Assouline (2006b) concludeert dat voor  $\delta = 4$  de overeenkomst tussen gemeten en berekende  $K_{s,c}$  het beste is.

Tabel A4.1 (zie ook grafisch in Figuur A4.1) laat zien in welke mate de parameters van het Mualem-Van Genuchten-model ([1] en [2]; zie hoofdtekst) veranderen indien de beschouwde grond wordt verdicht van 1.3 naar 1.7 g cm<sup>-3</sup>, zoals berekend uit vergelijking [A-1]-[A-10].

Omgekeerd kan ook: het losmaken van de bovengrond (bijv. zaaibed bereiding) leidt tot een lagere droge droge bulkdichtheid. Dit zou met dezelfde pedotransferfuncties behandeld kunnen worden. Echter, Schlüter et al. (2012) geven de voorkeur aan een bimodale aanpak volgens het concept van Durner (1994).



**Figuur A4.1** a) De waterretentiecurve en b)+c) de doorlatendheidsrelatie voor niet-verdichte (blauw) en verdichte (rood;\_c) grond volgens de parameters uit Tabel 2. In d) en e) is een voorbeeld voor  $K$  gegeven indien (arbitrair; bijv. toegepast door Schlüter et al., 2015)  $K_{s,c}/K_s = 0.01$ .

**Tabel A4.1** Voorbeeld verandering Mualem-Van Genuchten-parameters voor een verdichte bodemlaag berekend volgens [A-1]-[A-10].

		Niet-verdicht	Verdicht	$K_{s,c}$			
				[A-7]	[A-8]	[A-9]	[A-10]; $\delta=4$
$\rho_d$	(g cm <sup>-3</sup> )	1.3	1.7				
$\theta_r$	(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0.02	0.0262				
$\theta_s$	(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0.40	0.2815				
$a$	(cm <sup>-1</sup> )	0.02	0.007178				
$n$		1.6	1.6				
$m$	(= 1-1/n)	0.375	0.375				
$\lambda$		0.5	0.5				
$K_s$	(cm d <sup>-1</sup> )	1		0.243	0.0865	0.0477	0.156

# Bijlage 5 Rekenregels PENETR

De indringingsweerstand  $PR$  (MPa) wordt berekend volgens (Canarache, 1990; Stenitzer and Murer, 2003):

$$PR = PR_s \left( \frac{2w}{fS} \right)^M \quad [B-1]$$

met

$$PR_s = 0.36(1.0026^C)(BD^{1.27})(BD^{0.0267C}) \quad [B-2]$$

$$M = 0.055(1.047^C)(BD^{7.53}) \quad [B-3]$$

$$S = 100 \frac{1 - BD/2.65}{BD} \quad [B-4]$$

$$f = 0.875 + 0.0032dc \quad [B-5]$$

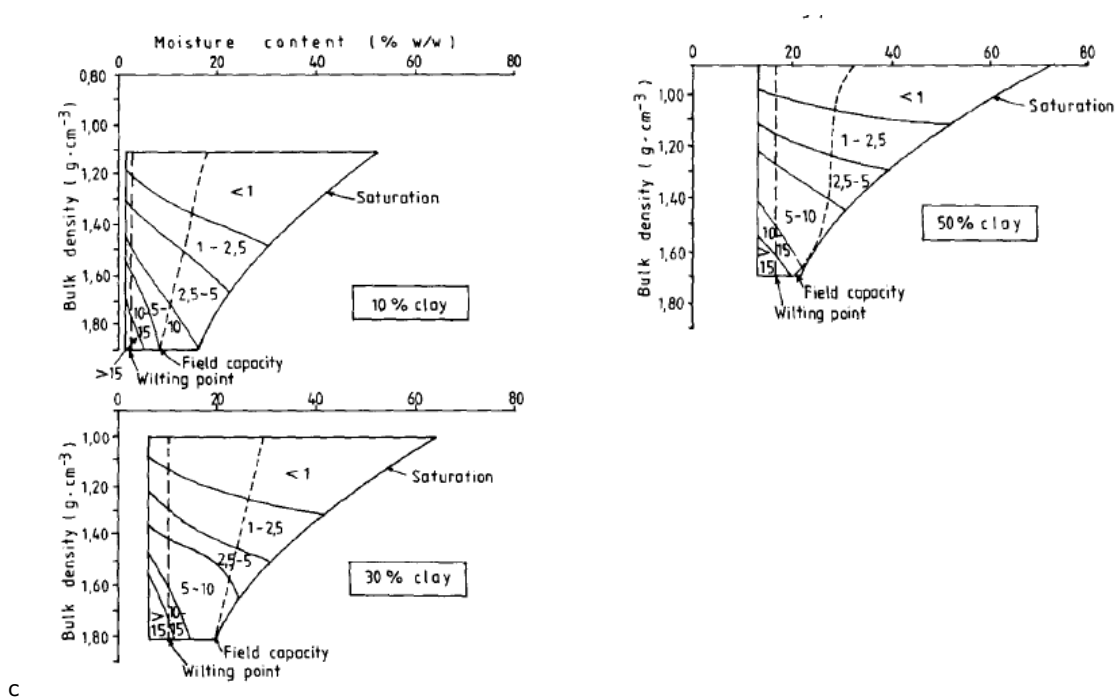
$$dc = 100 \frac{TP_m - TP}{TP} \quad [B-6]$$

$$TP = 100 \left( 1 - \frac{BD}{2.65} \right) \quad [B-7]$$

$$TP_m = 44.9 + 0.163C \quad [B-8]$$

Hierin is  $w$  het gravimetrische watergehalte is (% wt.),  $BD$  is de droge bulkdichtheid ( $\text{g cm}^{-3}$ ), 2.65 is de dichtheid van de vaste fase ( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $C$  is het kleigehalte (% wt.),  $S$  is de verzadigingsgraad (dimensieloos),  $TP$  is de porositeit (%),  $TP_m$  is een minimum vereiste porositeit (%),  $dc$  is de mate van verdichting (%), en  $f$  is een empirische factor.

Figuur A5.1 geeft de berekende indringingsweerstand  $PR$  (MPa) volgens Canarache (1990) als functie van de  $\rho_d$  en  $w$  bij 3 kleigehalten.



**Figuur A5.1** Berekende indringingsweerstand  $PR$  (MPa) volgens Canarache (1990) als functie van de droge bulkdichtheid (verticale as), gravimetrisch watergehalte (horizontale as) bij 3 kleigehalten.



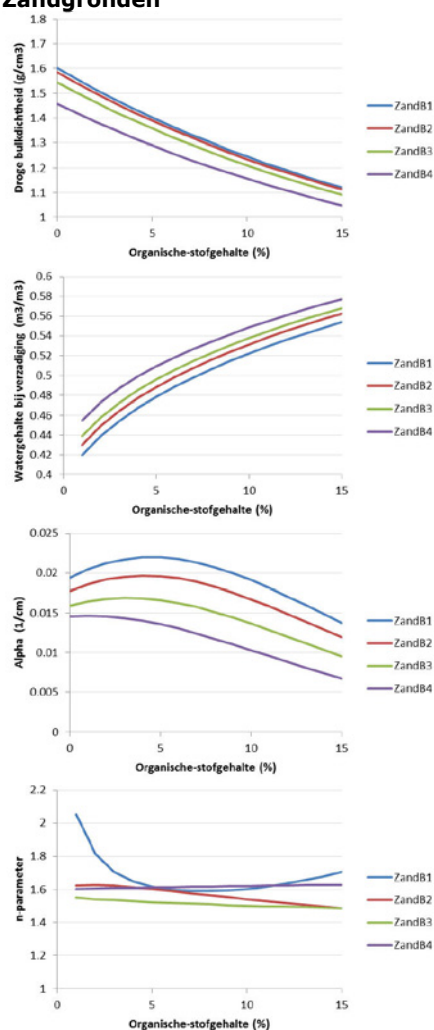
# Bijlage 6 Effect humusgehalte op Mualem-Van Genuchten-parameters

Voor een aantal bouwstenen uit de Staringreeks staan hieronder grafisch weergegeven hoe de Mualem-Van Genuchten-parameters veranderen als functie van het humusgehalte (organische stofgehalte; %), gebruikmakend van de Staringreeks pedotransferfuncties (Wösten et al. 2001). Hierbij is het humusgehalte eerste gebruikt om de dichtheid ( $g\ cm^{-3}$ ) te berekenen en vervolgens zijn de parameters berekend die bij het humusgehalte horen. Per bouwsteen zijn voor het lutumgehalte ( $<2\ \mu m$ ; %), leemgehalte ( $<50\ \mu m$ ; %) en M50 zandfractie ( $\mu m$ ) de gemiddelde waarden gehanteerd zoals gegeven in Wösten et al. (2001). Voor de bouwstenen ZandB5 en ZandB6 konden geen realistische parameters worden berekend.

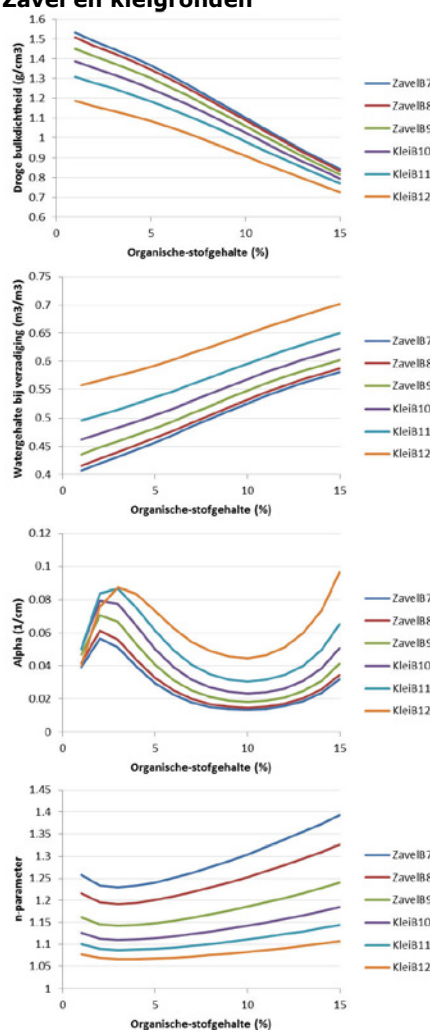
Opmerkingen:

- Voor  $\theta_r$  is geen pedotransferrelatie bekend binnen de Staringreeks.
- De pedotransferrelaties in de Staringreeks zijn onzeker, zoals uitgedrukt in de verklaarde variantie: uitgedrukt in  $r^2$  variërend van 32% (voor  $K_s$  voor zandgronden) tot 95% voor  $\theta_s$  voor zavel- en kleigronden.

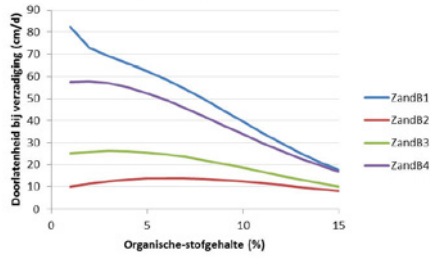
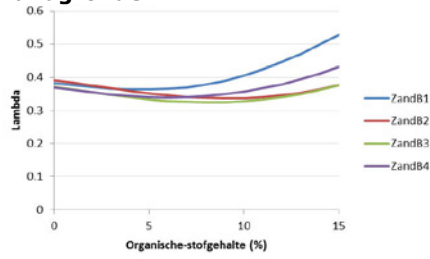
## Zandgronden



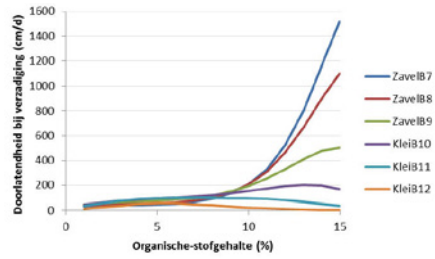
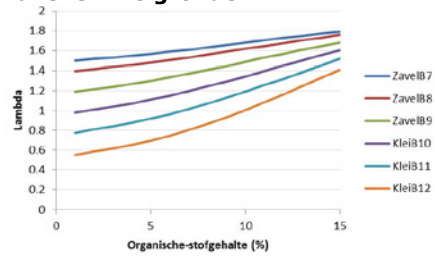
## Zavel en kleigronden



## Zandgronden



## Zavel en kleigronden



**Figuur A6.1** Effect van organische stofgehalte op de waarden van de Mualem-Van Genuchten-parameters voor de bovengronden van de Staringreeks conform pedotransferfuncties daarin beschikbaar. Hierbij is gebruikgemaakt van het feit dat het organische stofgehalte invloed heeft op de droge bulkdichtheid (pedotransferfunctie in Staringreeks).

## Bijlage 7 Gebruiksaanwijzing voor het script R-SWAP-extremes

Het script R-SWAP-extremes is ontwikkeld voor het uitlezen van tijdstapwaarden uit een resultaatbestand van het SWAP-model, het vaststellen van de jaarlijkse extreme zomer- en winterwaarde van een op te geven variabele en het berekenen van de parameters van lijnen die horen bij een fit op basis van de Gumbel-verdeling of een fit op basis van de Generalized Extreme Value verdeling (GEV).

Het programma wordt gedraaid met R. Een voorbeeld van het commando om het programma te kunnen runnen is:

```
set R= "C:\Program Files\R\R-3.3.1\bin\i386\R" --no-restore --no-save
%R% < Tools\R\RunProg.R > Logfile.log --args control.inp
pause
```

Het vergt een installatie van het vrij beschikbare programma R<sup>28</sup>, met een release die niet ouder is dan versie 3.3.1. Op de tweede regel wordt verwezen naar een controle file. Een voorbeeld van een controle file is hieronder gegeven.

```
* Control-file for R-SWAP-extreme
*
*
* --- Timer section ---
TimStart      1981-04-01      * hydrologische jaren!!
TimEnd        2010-03-31

* --- Analyse section ---
BlkSize       24              * Aantal uren
OptDistr      GEV            * GUM (Gumbel) of GEV (Generalized Extreme Values)
NamFilIdx     rekenschema-Martin.csv * bestand met een lijst inc-files (resultaat van SWAP runs op
* uurbasis (alleen de namen in de kolom 'File' zijn van belang)
* Lijst met output variabelen, bij meer dan 1 variabele wordt de
* som per tijdstap bepaald

Table Variables
  Runoff
  Drainage
End Table

Table ReturnPeriod
* Lijst met herhalingstijden voor output
  1
  2
  5
 10
End Table

* --- Output section ---
DirOut        ./Results      * output folder
CrtFig        Yes           * Moet er een figuur gemaakt worden?
AddPnt        Yes           * Visualisatie van de punten (extreme jaarwaarden) in de figuur?
MaxT          100           * Maximale herhalingstijd (x-as),
* opties zijn: 5, 10, 50, 100, 500, 1000, 5000 en 10000
```

<sup>28</sup> <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/R-3.3.2-win.exe>

# Bijlage 8    Aanpassing bodemfysische relaties voor effecten van bodemverdichting in MetaSWAP

In het onderzoek gerapporteerd door Schipper et al. (2015) zijn berekeningen uitgevoerd met AMIGO model voor de Baakse beek. Het MetaSwap model maakt deel uit van AMIGO. De meest voorkomende Staring Reeks bouwstenen voor de diepte van 35–50 cm -mv zijn weergegeven in Tabel A8.1.

**Tabel A8.1** *Bouwstenen van de Staring reeks voor de bodemlaag op 25–35 cm diepte in het stroomgebied van de Baakse beek.*

Bouwsteen	Percentage van het landbouwareaal
B02	7.6
B03	5.8
O01	4.0
O02	28.6
O03	41.3
O09	2.5
O10	2.2

Hiervan zijn voor 4 bouwstenen (B02, O01, O02 en O03) de omhullende curven bepaald waarvoor translatiefactoren zijn afgeleid. Omhullende curven zijn de curven voor verdichting met laagste en laagste waarden voor  $K_{sat}$  en  $\theta_{sat}$ . De translatie is op 3 manier uitgevoerd, waarbij altijd een dubbele translatie nodig was voor zowel de waterretentie en de doorlatendheid als functie van de drukhoogte, anders zijn de curven in het natte traject niet redelijk benaderen.

De translatie van de waterretentie en de doorlatendheid gebeurt altijd met de verhoudingsfactor:  $K_g / K_b$  en  $\theta_g / \theta_b$  waarbij de subscripten g = grenscurve die moet worden benaderd en b = de basis curve die is getransleerd. Voor de translatie van de drukhoogte zijn 3 methoden getest:

- T1:  $H_t = pF_b \hat{p}_t = \log|H_b| \hat{p}_t$  met  $p_t$  is een exponent  
 T2:  $H_t = f_t * pF_b$  met  $f_t$  is een factor  
 T3:  $H_t = f_t * H_b$  met  $f_t$  is een factor

De derde relatie geeft bijna altijd het slechtste resultaat en is daarom niet meer toegepast. Bij het fitten van de translatieparameters van de drukhoogte H is vooral aandacht besteed aan de  $k(h)$ -relatie. De  $\theta(h)$ -relatie is min of meer volgend.

**Tabel A8.2** *Afgeleide translatieparameters voor de ondergrenscurve (verdichting).*

Bouwsteen	f voor k	f voor $\theta$	p voor pF	f voor pF	f voor H
B02	0.15	0.77	1.09	1.1	2.1
O01	0.065	0.82	1.15	1.15	2.6
O02	0.08	0.756	1.15	1.17	2.6
O03	0.115	0.885	1.16	1.17	2.9
Gemiddeld	0.103	0.808	1.14	1.15	2.6

**Tabel A8.3** Afgeleide translatieparameters voor de bovengrenscurve (verbetering).

Bouwsteen	f voor k	f voor $\theta$	p voor pF	f voor pF	f voor H
B02	2.7	1.15	0.97	0.95	0.7
O01	3.8	1.185	0.935	0.91	0.55
O02	4.0	1.097	0.97	0.96	0.7
O03	3.2	1.095	0.97	0.97	0.7
Gemiddeld	3.425	1.132	0.96	0.95	0.7

# Bijlage 9 Belemmeringen en kansen voor de toepassing van reststromen als bodemverbeteraar

<b>Kwaliteit reststromen</b>	
<i>Belemmeringen</i>	<i>Kansen</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weinig vertrouwen in kwaliteit en veiligheid van reststromen m.n. compost (bijv. pathogenen, glas, mineralengehalte). Er moet bij consument al iets veranderen om afval beter te scheiden.</li> <li>• Ook gecertificeerde compost is volgens sommige telers niet altijd veilig en goed genoeg.</li> <li>• Beschikbaarheid van mineralen (m.n. stikstof) uit reststromen (vnl. compost) is minder voorspelbaar dan uit kunstmest.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procescertificering om kwaliteit beter te waarborgen. Informeren over herkomst van compost.</li> <li>• Directe relatie met composteerder, ketenafspraken maken.</li> <li>• Bewustzijn consument vergroten.</li> </ul>

<b>Regelgeving</b>	
<i>Belemmeringen</i>	<i>Kansen</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Krappe gebruiksnormen zorgen voor focus op kunstmest en het niet inzetten van reststromen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebruiksnormen versoepelen voor bodemverbeteraars, bijvoorbeeld:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reststromen met hoog C:N: gehalte bijv. &gt;8</li> <li>- Reststromen met hoog EOS: P gehalte bijv. &gt;35</li> </ul> </li> <li>• P-uitzonderingsregeling voor compost uitbreiden</li> <li>• Extra bemestingsruimte geven voor telers die slimme maatregelen toepassen (bijv. groenbemesters, rijbemesting, afvoer biomassa).</li> </ul>

<b>Financieel</b>	
<i>Belemmeringen</i>	<i>Kansen</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teveel aan dierlijke mest met negatieve marktwaarde belemmert gebruik van compost en andere biotische stromen.</li> <li>• Reststromen worden ingezet voor groene energie, (m.b.v. SDE-subsidie).</li> <li>• Stromen afzetten bij composteerder is duur.</li> <li>• Geen beloning om reststromen in te zetten als bodemverbeteraar.</li> <li>• Financiële positie van boeren zit langetermijndenken in de weg, belemmert nemen van maatregelen (die geld kosten).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banken kunnen een rol spelen; zij hebben immers belang bij behoud van bodemvruchtbaarheid.</li> <li>• Goed bodembeheer stimuleren d.m.v. financiële beloning (bijv. bank geeft korting op lening).</li> <li>• Beide aspecten aanpakken: prikkels voor energie uit reststromen en het niet bestaan van prikkels voor gebruik reststromen t.b.v. bodemvruchtbaarheid.</li> </ul>

<b>Overig</b>	
<i>Belemmeringen</i>	<i>Kansen</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verantwoordelijkheidsgevoel voor grond is niet aanwezig in volatiele grondmarkt (pacht/huur).</li> <li>• Kortetermijndenken en -registreren waar teler aan moet voldoen belemmert opbouw van OS.</li> <li>• Onafhankelijke adviseurs ontbreken, verkopers kunstmest/pesticiden geven ook gebruikadvies.</li> <li>• Meststrooier voor compost is niet altijd aanwezig op akkerbouwbedrijven.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Raffinage (mineraalarme, koolstofrijke stroom).</li> <li>• Groenbemesting niet mee laten tellen voor fosfaatnormen: hier ligt een kans die beter kan worden benut.</li> <li>• Verplichting tot verhogen OS-gehalte in bodem.</li> </ul>

---

# Bijlage 10 Algemene aspecten van handelingsperspectieven

## Wat is het nut van bodemverbetering voor een waterbeheerder?

Ondergrondverdichting en beperkingen van bewortelingsdiepte zijn nadelig voor de trits vasthouden – bergen – afvoeren, waarbij hevige neerslag sneller wordt afgevoerd<sup>29</sup> en het risico op droogte groter is dan in een goede bodem. Oppervlakkige afvoer veroorzaakt door storende lagen in de ondiepe bodem en een ongunstige ligging van het maaiveld uit- en afspoeling van nutriënten naar het oppervlaktewater. Gezien de opgaven voor waterveiligheid, zoetwatervoorziening en de Kaderrichtlijn Water heeft een waterbeheerder er duidelijk belang bij dat ongunstige omstandigheden in de bodem worden verholpen.

Bodemverbetering kan op een praktische manier worden uitgewerkt in een proces waarin waterbeheerder en agrariër samenwerken en draagt bij aan het bewustzijn dat de wateropgaven gezamenlijke opgaven zijn.

## Wat kan een waterbeheerder aan bodemverbetering doen?

Een groot deel van het landoppervlak wordt gebruikt voor agrarische productie en slechts een klein deel is in direct beheer van waterbeheerders. Om bodemverbeterende maatregelen ten gunste te laten komen voor het watersysteem, zijn waterbeheerders in grote mate afhankelijk van de medewerking van agrariërs. Waterbeheerders kunnen:

- kennis van de effecten van bodemverbetering ontwikkelen en uitdragen;
- maatregelen stimuleren en subsidiëren, eventueel in het kader van groenblauwe diensten;
- voorwaarden stellen bij vergunningverlening.

## Wat is het nut van het kwantificeren van effecten voor een waterbeheerder?

Waterbeheerders staan voor de vraag of doelen voor waterveiligheid, zoetwatervoorziening en de Kaderrichtlijn Water gerealiseerd kunnen worden en welke investeringen hiermee gepaard zouden gaan. Bij de afweging is inzicht nodig in de kosten, effecten en kosteneffectiviteit van maatregelen en de onzekerheid en robuustheid van het effect. Niet alle aspecten zijn in gelijke mate te kwantificeren, en besluiten worden vaak ook op andere redenen gebaseerd dan enkel de kosteneffectiviteit. Voor de beoordeling van de disproportionaliteit van maatregelen is wel kwantitatieve informatie nodig van maatregelen en eventuele alternatieve maatregelen.

Daarnaast is een kwantificering van de effecten vaak een hulpmiddel bij het creëren van draagvlak. Het vooruitzicht op een gunstig effect van een maatregel werkt motiverend.

## Op welke wijze kan een waterbeheerder effecten kwantificeren?

Effecten van bodemverbeterende maatregelen kunnen gekwantificeerd worden door interpretatie van de resultaten van bestaande en lopende monitoringsactiviteiten, het uitvoeren van gerichte metingen en het uitvoeren van berekeningen. Voor de nadere duiding van metingen en monitoringsresultaten zijn statistische analyse technieken nodig en daarnaast zijn vaak ook rekenmodellen nodig. Voor een helder systeembegrip en de extrapolatie en voorspelling van effecten wordt vaak gebruikgemaakt van simulatiemodellen.

Uit de resultaten van de in dit rapport beschreven deelstudies blijkt dat:

- metingen met een penetrometer zinvol zijn bij het opsporen van percelen en plekken binnen percelen waar de bodem verdicht is.
- alhoewel metingen van de doorlatendheidsrelatie duur zijn, deze metingen vaak toch nodig zijn voor een goede voorspelling van effecten van bodemverdichting.

---

<sup>29</sup> Hierbij moet wel de kanttekening worden geplaatst dat bij zeer grote extremen (herhalingstijden die in het huidige klimaat groter zijn dan 10 jaar) een goede niet zal voorkomen dat bij extreme neerslag nog water op het maaiveld staat. Bij een extreem droge zomer, zoals in 1976, zal een goede bodemconditie ook voorkomen dat droogteschade optreedt.

---

Welke belemmeringen zouden er kunnen zijn voor een waterbeheerder ten aanzien van het investeren in de bodemconditie en op welke wijze kan hiermee omgegaan worden?

Effecten op piekafvoeren en de waterkwaliteit kunnen (nog) niet goed worden gekwantificeerd. Uit een analyse van succes- en faalfactoren van DAW-projecten blijkt dit een belangrijk aspect te zijn. Daarnaast hebben waterbeheerders geen directe invloed op de handelingsperspectieven van agrariërs. Als alleen in pilots of enkele koplopers de bodems beter worden beheerd, is het effect op de regionale waterhuishouding gering.

Bodemverbeterende maatregelen hebben onder specifieke omstandigheden risico's op onbedoelde en onvoorziene negatieve effecten op het watersysteem. Voorbeelden hiervan zijn een verminderde denitrificatie door een verbeterde aeratie van de bodem met risico's op extra nitraatuitspoeling, risico's op een verminderde grondwateraanvulling door de extra inzet van vanggewassen als maatregel om het organische stofgehalte te verhogen en een risico's op een hogere nitraatuitspoeling als gevolg van de extra mineralisatie door de langjarige aanvoer van compost.

Dergelijke risico's zijn te beheersen door:

- een goede probleemanalyse met maatwerk;
- een aanpak waarbij niet alleen naar losstaande aspecten van de bedrijfsvoering wordt gekeken, maar ook naar het geheel. Bijvoorbeeld: de nawerking van compost en vanggewassen (korte termijn en lange termijn) in rekening brengen bij het opstellen van het bemestingsplan.

Wat is het nut van bodemverbetering voor agrariër?

Bodemverbetering kan leiden tot een hogere productie:

- Een bodem met een goede structuur is beter in staat om hevige neerslag te bufferen (minder natschade, minder verlies aan nutriënten) en is minder gevoelig voor droogte.
- Een bodem met gezond bodemleven is weerbaarder tegen ziekten en plagen dan een bodem met een arm bodemleven.

Bodemverbetering in relatie tot bemesting:

- Door de aanvoer van compost kan in principe de nutriëntentoeiding hoger zijn dan in de vorm van dierlijke mest, omdat de wettelijke werkingscoëfficiënten lager zijn. Er gelden echter wel beperkingen.
- Voor akkerbouwers kan de aanvoer van organische stof door het accepteren van dierlijke mest financieel voordelig zijn.
- Bij de invulling van het 5<sup>de</sup> Actieprogramma Nitraatrichtlijn is ruimte geboden voor equivalente maatregelen. Als wetenschappelijk onderbouwd kan worden dat door een bepaalde maatregel de inzet van extra mest niet leidt tot extra uitspoeling en emissie, kan ruimte geboden worden voor een verruiming van de mestnormen. Mogelijk dat bodemverbeterende maatregelen hiervoor in aanmerking zouden kunnen komen.

Bodemverbetering draagt bij aan het maatschappelijk imago:

- Bodemverbetering wordt in discussies over "license to produce" gezien als een onderdeel van duurzaam ondernemen.

Wat kan een agrariër aan bodemverbetering doen?

Agrariërs kunnen de bodem verbeteren door een aantal maatregelen:

- Berijding en bewerking van de bodem met minder zware machines, verminderde bandenspanning en het vermijden van berijding bij ongunstige weersomstandigheden.
- Aanvoer van organische stof door de keuze van meststoffen, beheer van gewasresten en zo mogelijk extra aanvoer van organische stof.
- Keuze voor dieper wortelende rassen en rassen die vroeger afrijpen, waardoor een vanggewas meer kans heeft om zich beter te ontwikkelen.



---

### Wat is het nut van kwantificeren van effecten voor een agrariër?

Voor afwegingen of investeringen in de bodem en aanpassingen van de bedrijfsstructuur interessant zijn heeft een agrariër het vooruitzicht nodig dat het rendement oplevert. Voor het opstellen van een rendementsverwachting is behalve kwantitatieve informatie over de kosten van de aanpassingen en investeringen, ook informatie nodig over de effecten op de opbrengst, eventueel hogere prijzen voor producten, besparing van kosten en extra subsidiemogelijkheden.

### Op welke wijze kan een agrariër effecten kwantificeren?

Effecten van bodemverbeterende maatregelen die voor de agrariër primair interessant zijn, zijn een hogere opbrengst, een verbeterde opbrengstzekerheid (minder vaak natschade en droogteschade) en de besparing op kosten die samenhangen met een verbeterde bodemweerbaarheid. Dergelijke effecten zijn in de praktijk moeilijk te kwantificeren, omdat veel factoren van invloed zijn op de opbrengst en de productkwaliteit. Kwantificering vraagt om een systematische aanpak met proefveldonderzoek, ondersteund met modellen.

Een indirect effect van bodemverbetering voor de agrariër is dat het kan leiden tot een vermindering van de uit- en afspoeling van nutriënten naar het oppervlaktewater en tot lagere nitraatconcentraties in het bovenste grondwater. Eventuele aanscherpingen van mestnormen die nodig zijn om milieudoelen te bereiken, met financiële consequenties voor de agrariër, kunnen bij gunstige effecten van bodemverbetering misschien worden voorkomen of verminderd. De vermindering van nitraatconcentraties is met eenvoudige middelen zelf te meten door een agrariër, waarbij aanvullende informatie nodig is voor de interpretatie (Vruchtbare Kringloop Achterhoek, meting met teststrip en smartphone). De kwantificering van de uit- en afspoeling van nutriënten naar het oppervlaktewater vraagt om informatie uit experimentele meetopstellingen, aangevuld met schattingsmethoden en rekenmodellen.

### Welke belemmeringen zouden er kunnen zijn voor een agrariër ten aanzien van het investeren in de bodemconditie en op welke wijze kan hiermee omgegaan worden?

Belemmeringen voor agrariërs voor een beter bodembeheer:

- Effecten van een verbeterde bodemstructuur zijn onder normale omstandigheden en in de zeer extreme omstandigheden niet zichtbaar. Daarnaast hebben andere factoren ook een effect op de opbrengst zodat variaties in opbrengst niet direct een gevolg hoeven te zijn van een verbeterde bodem.
- Bodemverbetering door de aanvoer van extra organische stof is een langetermijnmaatregel.
- Verbeterd bodembeheer vraagt om extra kennis en aandacht.
- Bodemverbetering is meestal geen losstaande maatregel, maar vraagt om aanpassing of omschakeling van de bedrijfsstructuur.
- Bij omschakeling naar een structuur met een grotere inzet van organische stof is de afhankelijkheid van de beschikbaarheid door mineralisatie groter. Het grotere risico is moeilijker te managen. Daarnaast is het onzeker of in de toekomst voldoende betaalbare organische stof van goede kwaliteit beschikbaar zal zijn.
- Gebrek aan financiële armslag om de risico's te dragen die met de investeringen gepaard gaan.
- Contractuele verplichtingen ten aanzien van leveringstijdstip van producten
- Gebruik van gronden met kortdurende huur- en leaseovereenkomsten waardoor investeringen niet terugverdiend worden binnen de contracttermijn.
- Gebrek aan continuïteit en garanties voor een lange termijn bedrijfsontwikkeling.

Belemmeringen voor een agrariër zijn te verlagen of op te heffen door:

- Bieden van kennis en tools om inschattingen te maken van consequenties voor saldo en bedrijfszekerheid.
- Helpen om de effecten tastbaar te maken.
- Organisatievormen ontwerpen voor het collectief dragen van risico's.

---

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 2811  
ISSN 1566-7197

STOWA-rapport 2017-020

---

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, 5.000 medewerkers en 10.000 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 2811  
ISSN 1566-7197

STOWA-rapport 2017-020

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, 5.000 medewerkers en 10.000 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.

