



Waarderen van bodemwatermaatregelen

Elisa de Lijster
Jan van de Akker
Anneloes Visser
Bas Allema
Annemieke van der Wal
Wim Dijkman

Waarderen van bodem- watermaatregelen

Auteurs: Elisa de Lijster
Jan van de Akker
Anneloes Visser
Bas Allema
Annemieke van der Wal
Wim Dijkman

© CLM-912, november 2016

CLM Onderzoek en Advies

Postbus:

Postbus 62
4100 AB Culemborg

Bezoekadres:

Gutenbergweg 1
4104 BA Culemborg

T 0345 470 700

F 0345 470 799

www.clm.nl

Inhoud

Samenvatting	4
Bodemorganische stof	4
Rekenregels	5
Compost toedienen	5
Vaste mest	5
Groenbemesters	5
Bouwplan verruiming	6
Integrale afweging	6
Bodemstructuur	6
Rekenregel	6
Maatregelen	6
Waterkwaliteit	7
1 Inleiding	9
1.1 Opgave	9
1.2 Aanpak	9
1.3 Leeswijzer	11
2 Bodemorganische stof	12
2.1 Functioneren van bodemorganische stof	13
2.1.1 Bodemprocessen, bodemleven en C/N-verhouding	13
2.1.2 Voedingsstoffen voor de plant	14
2.1.3 Gewasbeschermingsmiddelen vasthouden	15
2.1.4 Weerbaarheid tegen ziekten en plagen	15
2.1.5 Water vasthouden	16
2.2 Opbouwen van bodemorganische stof	16
2.3 Organische stof en opbrengst	17
2.3.1 Conclusie organische stof en opbrengst	21
2.4 Organische-stofgehalte en waterconservering	21
2.4.1 Conclusie organische-stofgehalte en waterconservering	24
3 Maatregelen om organische-stofgehalte te beïnvloeden	25
3.1 Compost	25
3.1.1 Bodemorganische stof en compost -> opbrengst en waterbergend vermogen	25
3.1.2 Effect op de gewasopbrengst	26
3.1.3 Effect op watervasthoudend vermogen bodem	27
3.1.4 Conclusie compost	27
3.2 Vaste mest	27
3.2.1 Vaste mest en organische stof opbouw	28
3.2.2 Effect gewasopbrengst	28
3.2.3 Effect op waterbergend vermogen	29
3.2.4 Conclusie vaste mest	29

3.3	Groenbemesters	29
	3.3.1 Opbouw bodemorganische stof	30
	3.3.2 Groenbemesters en opbrengst	32
	3.3.3 Groenbemesters en watervasthoudend vermogen	33
	3.3.4 Groenbemesters en waterkwaliteit	33
	3.3.5 Conclusie groenbemesters	34
3.4	Ruimer bouwplan	34
	3.4.1 Opbouw bodemorganische stof	34
	3.4.2 Bouwplan en gewasopbrengst	35
	3.4.3 Effect op waterbergend vermogen	35
	3.4.4 Conclusie bouwplan	36
4	Bodemstructuur	37
4.1	Kenmerken van bodemverdichting	37
4.2	Bodemverdichting in Nederland	38
4.3	Verdichting van de bodem: oorzaak en herstel	39
4.4	Bodemverdichting en organische stof	40
4.5	Bodemverdichting en gewasgroei	41
4.6	Bodemverdichting en waterconservering	42
4.7	Conclusie bodemverdichting	42
5	Maatregelen bodemverdichting	43
5.1	Vaste rijpaden	43
	5.1.1 Opbrengst	43
	5.1.2 Natuurlijke drainage	44
	5.1.3 Emissie broeikasgassen	44
	5.1.4 Conclusie vaste rijpaden	45
5.2	Verlagen wiellast	45
	5.2.1 Conclusie wiellast	45
5.3	Verlagen bandenspanning	46
	5.3.1 Conclusie bandenspanning	46
5.4	Diepwortelende gewassen	46
	5.4.1 Conclusie diepwortelende gewassen	48
	Referenties	49

Samenvatting

Duurzaam bodembeheer is belangrijk voor de opbrengst van de grond voor de agrariërs en voor goed waterbeheer. Het bevordert het watervasthoudend vermogen en door een goede waterdoorlatendheid voorkomt het afspoeling van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen naar het oppervlaktewater. Bodembeheer maatregelen hebben dus een directe relatie met waterbeheer, sterker nog, voor het verbeteren van het waterbeheer is een beter bodembeheer nodig. Om die redenen spreken wij in dit rapport van bodem-watermaatregelen.

Het waarderen van duurzaam bodembeheer voor gewasopbrengst en water vasthouden is de ambitie van deze studie. De gegevens hierover uit de literatuur zijn veelal situatie specifiek verzameld. Aan ons de opdracht om vanuit die veelheid aan verschillende gegevens te proberen om algemene wetmatigheden af te leiden.

Allereerst is van een lijst met bekende bodem-watermaatregelen een snelle scan gedaan of er gemakkelijk en voldoende literatuur over te vinden zou zijn. Dat heeft een prioritaire lijst van maatregelen opgeleverd en daaraan is uitgebreider literatuur onderzoek gedaan. De aard van de literatuur varieerde van eenmalige dan wel langjarige dosis-effect studies tot meta analyses van vele studies over vele jaren. Die combinatie maakt dat het mogelijk is om voor een groep van – uiteindelijk vijf – bodem-watermaatregelen generieke uitspraken te doen. Dat zijn voor bodemorganische stof: (a) toedienen van compost, (b) toedienen van vaste mest, (c) gebruik van groenbemesters en (d) verruimen van het bouwplan. Voor de verbetering van de bodemstructuur is voor (e) systeem van vaste rijpaden voldoende literatuur gevonden. De maatregelen als verminderen van wiellast en bandenspanning hebben een evident gevolg voor opbrengst en watervasthoudend vermogen. Die gevolgen zijn in beperkte mate gekwantificeerd en daardoor kunnen daar niet gemakkelijk generieke uitspraken voor worden gedaan.

Bodemorganische stof

De maatregelen variëren in de snelheid waarmee zij organische stof weten te accumuleren in de bouwvoor. Het kost in ieder geval tijd. Dat laten de resultaten zien. De strategie om de verschillende bodem-watermaatregelen te waarderen en onderling te vergelijken is als volgt opgebouwd.

- Allereerst zijn aan de hand van gedocumenteerde studies, rekenregels ontworpen voor de kwantitatieve relatie tussen toename in organische stof en verhoging van de opbrengst en watervasthoudend vermogen.

- Vervolgens is het effect van de vier maatregelen op het organisch stofgehalte uitgerekend met behulp van de zogenoemde C-module. Deze rekent uit aan de hand van gestandaardiseerde parameters wat de toename aan Effectief Organische Koolstof is voor verschillende strategieën van landgebruik (gewas en bemesting).
- Deze berekende waarden zijn met de rekenregels vertaald naar effect van de betreffende bodemwater maatregel op opbrengst en watervasthoudend vermogen (tabel 0.1).
- Tenslotte is de literatuur van de betreffende maatregel benut om na te gaan of deze waarden overeen komen met de berekende waarden via de C-module.

Rekenregels

- 1% stijging van bodem organische stof verhoogt de opbrengst van – in ieder geval – rooigewassen met 10%. Voor granen en grassen is dat minder en minder eenduidig. Daar gaan we uit van 2%.
- 1% stijging van bodem organische stof in de bouwvoor (0-30 cm) leidt tot een toename in watervasthoudend vermogen van resp. 6,8 mm op zandgronden en 9,3 mm op kleigronden.

Compost toedienen

Het toedienen van compost interacteert met de toediening van nutriënten. Dat maakt het moeilijk om het effect van organische stof-aanvoer door compost op zichzelf te waarderen. Bij de berekeningen zijn wij uitgegaan van groencompost, een type compost met relatief weinig nutriënten en een immobiliserend vermogen van nutriënten.

Compost kan in 10 jaar tijd het organisch stofgehalte met meer dan 1% laten stijgen. In de praktijk moet er dan wel een snelwerkende meststof bij om de gewasgroei te faciliteren. Afhankelijk van de samenstelling van de organische stof (C/N ratio) wordt een deel van de stikstof in de snelwerkende mest geïmmobiliseerd in de organische stof om pas later geleidelijk weer beschikbaar te komen. Die compost kan, zeker als er veel bodemleven in ontstaat, belangrijk bijdragen aan het watervasthoudend vermogen van de bodem.

Vaste mest

De gangbare praktijk van bemesten in Nederland is de toepassing van drijfmest. Mede door het overschot is dat relatief goedkoop beschikbaar. Voor de bodem wordt bepleit dat de – duurdere - vaste mest beter is voor de organische stof opbouw. De vergelijking tussen deze twee mestsoorten (vaste mest en rundvee drijfmest) laat zien dat het vermogen van deze meststoffen om bij te dragen aan bodem organische stof opbouw niet wezenlijk verschilt. En toch zijn de opbrengsten bij toediening van vaste mest veelal hoger bij vergelijkbare gehalten aan toegevoegde nutriënten. Daarvoor zijn twee redenen aan te wijzen: vaste mest voedt sterker het bodemleven en de nutriënten in vaste mest komen meer geleidelijk beschikbaar en beter afgestemd op de behoefte van het gewas. Daardoor is ook het watervasthoudend vermogen van bodems verrijkt met vaste mest hoger.

Groenbemesters

Daarvan zijn er verschillende typen: (a) grasachtigen met een hoog effectief op organisch stofgehalte, (b) bladrijke die minder organische stof toevoegen en (c) vlinderbloemigen die eveneens minder toevoegen. De resultaten zijn uiteenlopend en volgen niet geheel deze classificering. In combinatie met voldoende mest ontlopen de grasachtigen en de bladachtigen elkaar niet veel als het gaat om de organische stof opbouw. De vlinderbloemigen kunnen een hoger effect sorteren (bijna 2 keer dat van rundvee drijfmest). Deze verhoogde organisch stofgehalten kunnen lineair worden doorvertaald naar verhoogde opbrengst en watervasthoudend vermogen volgens de rekenregels. Dat geldt niet voor de vlinderbloemigen, blijkt uit de reflectie van de literatuur. De opbrengst na gebruik van

vlinderbloemigen groenbemesters is hoger dan je zou verwachten op basis van hun verhoogde bijdrage aan organische stof. Vlinderbloemigen leveren niet alleen organische stof, maar ook extra stikstof voor het gewas.

Bouwplan verruiming

Bij verruiming van het bouwplan is het effect op de organische stof opbouw afhankelijk van de samenstelling van dat bouwplan. Het effect van graan op de organische stof opbouw - en dus op opbrengst en watervasthoudend vermogen - is niet zo groot. Met name rode klaver is opnieuw degene die het sterkst het organisch stofgehalte (en daarmee een extra hoge opbrengst) weet te verhogen.

Integrale afweging

De agrariër die strategisch bezig is met de organische stof opbouw van de bodem, maakt een integrale afweging tussen deze (en andere) maatregelen. Het zal een mix zijn, waarbij financiële afwegingen op korte termijn soms sturend moeten zijn. Op basis van deze resultaten investeren groencompost en rode klaver het meest in de bodem. Tegelijkertijd vraagt een hoge investering in de bodem organische stof ook om extra toevoer van nutriënten en dat wordt beperkt door wet- en regelgeving. Die is gericht op nutriëntenbeheer (vanwege de Kader Richtlijn Water) en niet op duurzaam – lange termijn - bodembeheer.

Bodemstructuur

In de landbouw is op dit moment de bodemverdichting mogelijk een groter aandachtsgebied bij ondernemers dan de hoeveelheid organische stof. Deze zijn overigens afhankelijk van elkaar. En met name het bodemleven – gevoed door dynamische organische stof - is belangrijk voor het tegengaan van verdichting.

Rekenregel

De studies die zijn gerefereerd lenen zich er niet voor om een eenduidige relatie te leggen tussen een constante parameter – in dit geval de grondspanning - en afname in productie en watervasthoudend vermogen. In meerdere studies worden vergelijkingen gemaakt tussen verdicht en minder verdicht en de resulterende opbrengst, waarbij de mate van verdichting moeilijk te standaardiseren is zoals dat bij organische stof wel kon.

De conclusie die te trekken is uit deze verschillende type verdichtingsstudies is dat verdichting zorgt voor gemiddeld **10% minder opbrengst**. De variatie hierin is groot door de rol van het weer. In een verdichte bodem kunnen gewassen minder goed wortelen en als er dan een droge of heel natte periode in het seizoen zit, kan de derving oplopen tot 40%. In 2016 was dit goed te zien aan de maïsopbrengst. Ook de kwaliteit van bijvoorbeeld aardappelen kan teruglopen: meer misvormde aardappelen.

Maatregelen

Van de maatregelen die zijn verkend, zijn de resultaten van het toepassen van vaste rijpaden het meest uitgebreid en eenduidig. Door de vaste rijpaden is er weliswaar een klein deel van het oppervlak dat goed wordt verdicht, maar dat weegt ruimschoots op tegen de positieve effecten op de opbrengst op de plaatsen waar niet wordt verdicht. Het effect ervan ligt rond de 10% opbrengstverhoging.

Verlaging van de wiellast – de veroorzaker van verdichting van de ondergrond - vermindert de verdichting en verhoogt geleidelijk de opbrengst (lang na-ijl effect van hoge wiellast). De huidige

wiellasten zijn hoog en schade is er per definitie. Meer kansen biedt verlaging van de bandenspanning – veroorzaker van verdichting van de bovengrond – die leidt tot een lagere gronddruk, maar wel over een breder areaal. Zolang daardoor de kritische grondspanning niet wordt overschreden heeft dat minder effect op de opbrengst.

Op dit moment gaat veel aandacht uit naar de maatregel van verbouw van diepwortelende gewassen als maatregel om verdichting van de ondergrond te voorkomen, dan wel in combinatie met diepspitten of –woelen, de verdichting op te heffen. Deze maatregel raakt ook aan die van versterken van de organische stof, zoals rode klaver en luzerne. Ook andere gewassen (sorghum, hennepvezel) kunnen hier nieuwe perspectieven bieden.

Het kwantitatief waarderen van deze maatregelen is met de bestaande kennis niet eenduidig te doen. Dat komt mede door de vele verschillende doelstellingen die met deze maatregelen worden gerealiseerd die zich niet eenvoudig laten optellen.

Waterkwaliteit

Het kwantitatief waarderen van deze maatregelen op hun effect op verbeteren van waterkwaliteit is niet te doen. De belangrijkste conclusies zijn:

- De organische stof in de bodem is – aantoonbaar – in staat om gewasbeschermingsmiddelen te binden en daarmee zorgt meer organische stof voor het vasthouden en beter benutten van deze middelen en dus een lagere emissie naar grond- en oppervlaktewater.
- De maatregelen voor dynamische organische stof (met een actief bodemleven) en terugdringen van bodemverdichting zijn van groot belang om de oppervlakkige *afspoeling* van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen te voorkomen. Een verbeterd watervasthoudend vermogen gaat gepaard met een hogere infiltratiesnelheid, waardoor er meer water en opgeloste stoffen daarin wordt vastgehouden en weer benut voor het gewas.

De *uitspoeling* van nutriënten via de bodem naar het oppervlaktewater is ook te beïnvloeden met de bodem-watermaatregelen. Vaste mest waarvan nutriënten geleidelijk vrijkomen en groenbemesters die nutriënten vastleggen in de winter om in de zomer af te geven zijn goede voorbeelden daarvan.

Tabel 0.1. Ontwikkeling van organischestofgehalte van de bodem, de opbrengst en het watervasthoudend vermogen van verschillende bodem-watermaatregelen. Dit is berekend – met de C-module - voor een bouwplan van aardappelen, bieten en tarwe en een uitgangssituatie van 2% organische stof.

Compost maatregelen	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	klei	zand
100% Rundveedrijfmest	0,43%	4,33%	0,23%	2,33%	4,03	1,59
50% groencompost / 50% rundveedrijfmest	0,80%	8,00%	0,53%	5,33%	7,44	3,63
100% groencompost / kunstmest	1,17%	11,67%	0,83%	8,33%	10,85	5,67
Vaste mest maatregelen	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	klei	zand
Uitsluitend rundvee drijfmest	0,43%	4,33%	0,23%	2,33%	4,03	1,59
Vaste mest (50%) / rundveedrijfmest (50%)	0,50%	5,00%	0,27%	2,67%	4,65	1,81
100% Vaste mest rundvee	0,53%	5,33%	0,30%	3,00%	4,96	2,04
Groenbemester maatregel	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	klei	zand
Bladrammenas						
Bladrammenas (of gele mosterd)	0,50%	5,00%	0,27%	2,67%	4,65	1,81
Idem met rundveedrijfmest (170 kg N/ha)	0,67%	6,67%	0,40%	4,00%	6,20	2,72
idem met vaste mest (170 kg N/ha)	0,77%	7,67%	0,47%	4,67%	7,13	3,17
Rode klaver						
Rode klaver	0,60%	6,00%	0,33%	3,33%	5,58	2,27
Idem met rundveedrijfmest (170 kg N/ha)	0,77%	7,67%	0,47%	4,67%	7,13	3,17
idem met vaste mest (170 kg N/ha)	0,87%	8,67%	0,53%	5,33%	8,06	3,63
Engels raaigras						
Engels raaigras	0,53%	5,33%	0,30%	3,00%	4,96	2,04
Idem met rundveedrijfmest (170 kg N/ha)	0,73%	7,33%	0,43%	4,33%	6,82	2,95
idem met vaste mest (170 kg N/ha)	0,83%	8,33%	0,50%	5,00%	7,75	3,40
Luzerne						
Luzerne	0,57%	5,67%	0,33%	3,33%	5,27	2,27
Luzerne en rode klaver						
Luzerne en rode klaver	0,90%	9,00%	0,57%	5,67%	8,37	3,85
Bouwplan maatregel	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	klei	zand
3 jarig aardappel, suikerbiet, tarwe						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,43%	4,33%	0,23%	2,33%	4,03	1,59
Zonder rundveedrijfmest	0,27%	2,67%	0,10%	1,00%	2,48	0,68
4 jarig met luzerne						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,40%	4,00%	0,20%	2,00%	3,72	1,36
Zonder rundveedrijfmest	0,23%	2,33%	0,10%	1,00%	2,17	0,68
4 jarig met luzerne en rode klaver						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,73%	7,33%	0,43%	4,33%	6,82	2,95
Zonder rundveedrijfmest	0,57%	5,67%	0,30%	3,00%	5,27	2,04
4 jarig met 50% tarwe						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,50%	5,00%	0,27%	2,67%	4,65	1,81
Zonder rundveedrijfmest	0,33%	3,33%	0,17%	1,67%	3,10	1,13
4 jarig met tarwe en rode klaver						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,83%	8,33%	0,50%	5,00%	7,75	3,40
Zonder rundveedrijfmest	0,63%	6,33%	0,37%	3,67%	5,89	2,49

1

Inleiding

1.1 Opgave

Een duurzaam beheer en gebruik van de bodem is een belangrijke basis voor een rendabele landbouwproductie. Het zorgt voor het vasthouden en benutten van water, voedingsstoffen en gewasbeschermingsmiddelen. Het belang voor de omgeving is evident: een goede bodemkwaliteit leidt tot overbrugging van een periode met neerslagtekort, het bergen van het overvloedige water en daardoor het tegengaan van afspoeling. Kortom: goed bodembeheer is in het voordeel van de boer, en van de waterkwaliteit en waterberging; het dient dus een privaat én een publiek belang.

Als goed bodembeheer de productie ten goede komt, dringt de vraag zich op onder welke voorwaarden agrariërs dat consequent toepassen en wat hen eventueel belemmert. Welke rol kan de overheid spelen als mede baathebber? Of omgekeerd: hoe kunnen ondernemers en overheden geactiveerd worden om de bodems goed te (laten) beheren? Een hulpmiddel in de afweging kan zijn dat ondernemer en overheid meer inzicht hebben in de effecten van maatregelen: de kosten en de baten. Dat is waar deze literatuurstudie zich op richt:

Inzicht geven in de kwantitatieve effecten van enkele relevante bodem-watermaatregelen op de bodemkwaliteit, uitgedrukt in 1) de gewasopbrengst, en 2) het waterbergend vermogen en waar mogelijk waterkwaliteit.

1.2 Aanpak

Als eerste stap hebben wij een lijst met relevante bodem-watermaatregelen opgesteld. Maatregelen die positief bijdragen aan de gewasopbrengst en het waterbergend vermogen werden hiervoor geselecteerd. Dat resulteerde in een long list. Van deze maatregelen hebben we aan de hand van een literatuurscan bepaald hoe kansrijk zij zijn om uit te werken naar kwantitatieve data. De resultaten daarvan zijn weergegeven in tabel 1.1, op de volgende pagina.

Tabel 1.1. Overzicht van resultaten snelle literatuur scan naar bodembeheer maatregelen in relatie tot opbrengst, waterconservering en waterkwaliteit.

Maatregel	Doel					
	Opbrengst/ droge stof		Waterkwantiteit		Waterkwaliteit	
	relatie?	onderzoek	relatie?	onderzoek	relatie?	onderzoek
ORGANISCHE STOF / BODEMVRUCHTBAARHEID						
Gebruik compost	+	ja	+	ja		
Gebruik vaste mest	+	ja	+	ja		
Maaimeststoffen	+	weinig	+	weinig		
Vangewassen/ Groenbemesters als volggewas	+	?	+	indirect		
Luzerne/ vlinderbloemigen	+	weinig	+	indirect		
Bouwplan verruimen (>1:3) met gras/graan	+/-	ja	?	nee		
Gewas (bieten) doorzaaien in groenbemester	+/-	?	?	nee		
Bouwland groen houden in winter	+	?	+/-	ja		
Stro verhakselen en inwerken	+	?	+, via os	+/- indirect		
NKG	+/-	ja	+/-	weinig		
BODEMSTRUCTUUR						
Vaste rijpaden	+/-	ja	?	erg weinig		
(Diep)spitten/woelen/ploegen?	+/-	+/-	+/-	ja		
Wieldruk verlagen	+	ja	+	ja		
Bandenspanning < 1bar/ Drukwisselsysteem	+	?	+/-	weinig, indirect		
Dubbelluchtsysteem	+	?	+/-	weinig, indirect		
Rupsbanden	+	?	+	voldoende		
Sleepslangbemesting	+	?	?	nauwelijks		

Als tweede stap is samen met de stuurgroep ¹ een selectie gemaakt van deze bodem-watermaatregelen op basis van de beschikbare kwantitatieve kennis die deze maatregelen relateert aan grondsoort, gewasopbrengst en het waterbergend vermogen van de bodem (tabel 1.1). De volgende maatregelen zijn hieruit voortgekomen:

1. Toedienen van compost
2. Toedienen van vaste mest
3. Verruimen van bouwplan
4. Toevoegen van groenbemesters
5. Gebruik van vaste rijpaden
6. Verlagen van de wiellast
7. Verlagen van de bandendruk

Deze bodem-watermaatregelen hebben allemaal een effect op de bodemkwaliteit die positief doorwerkt op 1. de gewasopbrengst (voordeel boer) en op 2. het waterbergend vermogen van de bodem (voordeel waterschap en boer).

Als derde stap zijn de effecten van deze maatregelen op opbrengst en water-conserverend vermogen geanalyseerd en gekwantificeerd. De eerste vier (1-4) maatregelen voegen organische stof aan de bodem toe. Naast een literatuurstudie is in deze derde stap gebruik gemaakt van de C-module om de organische stof balans met inzet van een van de vier maatregelen uit te rekenen. De C-module is een

¹ Deze stuurgroep bestaat uit de opdrachtgevers van dit project: Waterschap Aa en Maas, De Dommel, Brabantse Delta, het Landbouwinnovatieplatform (LIP), Provincie Noord-Brabant en Provincie Zeeland.

rekentool gebaseerd op langjarige veldproeven bij Rothamsted, UK (Coleman en Jenkinson, 1996). Dit model rekent uit hoeveel organische stof in de bodem opgeslagen kan worden bij een bepaald type bouwplan gegeven een specifieke grondsoort, type bodembewerking en aanvoer van organisch materiaal in de vorm van type mest, compost en/of gebruik van groenbemesters. Op deze manier kan de toegevoegde waarde van een specifieke maatregel – bijv. het toevoegen van compost – inzichtelijk gemaakt worden voor een type bouwplan dat aansluit bij de praktijk van de boer en dus handelingsperspectieven biedt. De laatste drie (5-7) maatregelen werken door op de bodemstructuur en gaan bodemverdichting tegen. De kwantitatieve effecten van deze landbouwmaatregelen op de gewasopbrengst en het waterbergend vermogen zijn geanalyseerd met behulp van een literatuurstudie. Tenslotte zijn de resultaten verwerkt in deze rapportage en samengevat in waarderingskaarten bodem-watermaatregelen.

1.3 Leeswijzer

- **Hoofdstuk 2 Bodemorganische stof**
geeft eerst een algemeen overzicht van bestaande literatuur over het effect van het toevoegen van bepaald type organisch materiaal in de bodem op het bodemleven, voedingsstoffen voor de plant, vasthouden van gewasbeschermingsmiddelen en weerbaarheid van de bodem tegen ziekten en plagen. Omdat bodemorganische stof een belangrijk effect heeft op het functioneren van de bodem, en dus op de gewasopbrengst en het waterbergend vermogen, gaan we in hoofdstuk 2 verder in op de relatie tussen bodemkwaliteit en bodemorganische stof.
- **Hoofdstuk 3 Maatregelen**
die bijdragen aan opbouw bodemorganische stof analyseert het effect van de vier bodem-watermaatregelen, compost, vaste mest, groenbemesters en verruiming bouwplan, op de gewasopbrengst en het waterbergend vermogen van de bodem. Hierbij worden rekenregels opgesteld die hun kwantitatieve effect weergeven.
- **Hoofdstuk 4 Bodemstructuur**
gaat in op de bodemprocessen van verdichting en infiltratie en de effecten daarvan op de gewasopbrengst, waterkwaliteit en het waterbergende vermogen van de bodem.
- **Hoofdstuk 5 Maatregelen die bijdragen aan de bodemstructuur**
analyseert de relatie tussen de vier bodem-watermaatregelen, vaste rijdpaden, verlagen wiellast, verlagen bandenspanning en diepwortelende gewassen, en de gewasopbrengst en het waterbergend vermogen met behulp van een literatuurstudie.
- **Hoofdstuk 6 Communicatiestrategie**
gaat in op welke manieren waterschappen, provincies en boeren kunnen sturen op duurzaam bodembeheer en wat daarbij de prikkels zijn.
- **Hoofdstuk 7**
presenteert daarbij acht hanteerbare **waardenkaarten** van de bodembeheer maatregelen die ingezet kunnen worden voor communicatie doeleinden.

2

Bodemorganische stof

Het opbouwen van bodemorganische stof draagt in belangrijke mate bij aan de vruchtbaarheid van de bodem. Bodemorganische stof ontstaat door afbraak van gewasresten en ander organisch materiaal door bodemorganismen. Organische stof bestaat uit organische deeltjes die koolstof (C), waterstof (H), zuurstof (O), stikstof (N), zwavel (S), fosfor (P) en micronutriënten bevatten.

Organische stof functioneert als bron van nutriënten zoals N, P en S en draagt positief bij aan biologische en fysische bodemkenmerken. Water wordt beter vastgehouden en het activeert het microbiële bodemleven dat kan leiden tot een lagere ziektedruk. Daarnaast fungeert bodemorganische stof als een belangrijke bron (source) en opslagplaats (sink) van koolstof. Koolstof voedt het bodemleven, en kan opgeslagen worden in microbiële biomassa en recalcitrant (moeilijk afbreekbare) organische stof (sink). Daarnaast kan CO₂ vrijkomen door afbraak van organische stof, en is de bodem dus een “source” van koolstofdioxide.

Bodemorganische stof heeft zowel invloed op de bodem-fysische eigenschappen (erosiegevoeligheid, gevoeligheid voor verslemping, vochtvasthoudend vermogen, structuur) als op de biologische en chemische eigenschappen (CEC, mineralisatie, bodemleven). Dit hoofdstuk behandelt het effect van bodemorganische stof op de biologische en chemische kenmerken van de bodem. De volgende paragrafen komen aan bod:

- Paragraaf 2.1. gaat in op de *dynamiek van bodemorganische stof*: welke bodemprocessen vinden plaats, waarom is de C/N verhouding belangrijk, wat is de werking van organische stof op voedingsstoffen, vasthouden van gewasbeschermingsmiddelen, water retentie en ziektedruk.
- Paragraaf 2.2 gaat in op de *opbouw van bodemorganische stof*, wat is er voor nodig om het organische-stofgehalte op peil te houden.
- Paragraaf 2.3. gaat in op de *functie van bodemorganische stof in relatie tot gewasopbrengst*. De gegevens komen uit meerdere bronnen van literatuuronderzoek.
- Paragraaf 2.4. gaat in op de *functie van bodemorganische stof in relatie tot het vasthouden van water in de bodem*, en wat dit betekent voor de waterbergingspotentie.
- Paragraaf 2.5. gaat in op *vier maatregelen* die de landbouw kan nemen: compost, vaste mest, groenbemesters en verruiming van bouwplan. Deze maatregelen voegen organische stof toe aan de bodem en werken dus in op de gewasopbrengst en het watervasthoudend vermogen van de bodem.

2.1 Functioneren van bodemorganische stof

2.1.1

Bodemprocessen, bodemleven en C/N-verhouding

Het bodemleven breekt organisch materiaal af in stabiele organische stof, nutriënten en CO₂. Daarbij spelen twee bodemprocessen een belangrijke rol:

- Het afbraakproces, ofwel *mineralisatie*, waarbij het bodemleven organisch materiaal omzet naar minerale nutriënten en CO₂ en deze beschikbaar maken voor de plant;
- Het vormingsproces, ofwel *humificatie*, waarbij een deel van het materiaal omgezet wordt naar de stabilere fractie organische stof die moeilijker afbreekbaar is.

De snelheid van bovenstaande processen wordt onder andere bepaald door de afbreekbaarheid van het organisch materiaal. Deze afbreekbaarheid hangt samen met de koolstofinhoud van het organische materiaal (de verhouding tussen C en N) en van de aanwezigheid en activiteit van het bodemleven.

De C/N verhouding van het microbiële bodemleven en bodemorganische stof bepaalt of stikstof tijdens het afbraakproces wordt geïmmobiliseerd (ingebouwd) in microbiële biomassa, of wordt gemineraliseerd (vrijgegeven) in de bodem (Mooshammer et al. 2014). De beschikbaarheid van nutriënten in de bodem wordt bepaald door de activiteit van micro-organismen, de samenstelling van bodemorganische stof en de aanvoer van het type organisch materiaal. Naarmate het aangevoerde organische materiaal een C/N verhouding heeft die beter overeenkomt met de C/N verhouding van het microbiële bodemleven, ontstaat er een optimale gewasopbrengst. Organisch materiaal met een C/N verhouding afgestemd op het bodemleven stimuleert dit bodemleven en een optimale nutriëntenkringloop, zonder dat er concurrentie voor stikstof ontstaat tussen planten en micro-organismen. Kunstmest zal tot op een zeker niveau ook leiden tot een hogere gewasopbrengst, maar stimuleert het bodemleven en dus de nutriënten kringloop niet omdat er geen koolstof gift is. Op de langere termijn is het dus noodzakelijk om een koolstof gift te geven, bijvoorbeeld in de vorm van vaste mest, om het bodemleven en dus de nutriëntenkringloop in stand te houden. In een lange-termijn veldproef met een vruchtwisseling van 4 jaar met wintertarwe, suikerbiet, gerst en aardappelen, leidde 20 jaar organische bemesting tot een 30% hoger bodemorganische-stofgehalte, een 30% hogere stikstofmineralisatie, meer aantallen bacterie-etende protozoa en nematoden vergeleken met kunstmest. De stikstofverliezen namen met 40% af, waardoor 35% minder minerale mest kon worden gebruikt (Bloem et al., 1994). Deze proef laat zien dat stikstof uit de organische stof efficiënter benut kan worden door toename in de activiteit van het bodemleven.

Materiaal met een hoge C/N verhouding en moeilijker afbreekbare koolstofverbindingen, zoals lignine en cellulose, breken over het algemeen langzaam af. Dit zijn langzaam werkende meststoffen die over de tijd geleidelijk voedingsstoffen vrij maken voor het gewas, bijv. compost en vaste mest. Er wordt ook wel gesproken over organisch materiaal met een hoge humificatie coëfficiënt, d.w.z. dat er veel effectieve organische koolstof (EOC) op de totale koolstofinhoud van het toegevoegde materiaal beschikbaar blijft. Een jaar na toediening is er dan nog effectief organische stof in de bodem aanwezig en maakt deel uit van de bodemorganische stof. Over de tijd neemt de afbraaksnelheid van bodemorganische stof af omdat er meer stabiele organische fracties gevormd worden die niet meer beschikbaar zijn voor afbraakprocessen (Hendriks, 2011). Zo bevatten esgronden veel, maar oude organische stof, en hebben een relatief lage mineralisatie snelheid vergeleken met graslanden waar voortdurend gewas- en wortelresten aan worden toegevoegd (Smit en Kuikman, 2005). Snelwerkende meststoffen bestaan over het algemeen uit organisch materiaal met een lage C/N verhouding en bevat

makkelijk afbreekbare verbindingen, zoals gier en drijfmest. De afbreeksnelheid is hoog, er is geen stabiele koolstofinhoud, en er vindt daardoor weinig opbouw plaats in de bodemorganische stof.

Tabel 2.1: Snel- en langzaam werkende meststoffen en hun bijdragen aan bodemorganische stof en gewasopbrengst.

Meststof	Humificatie coëfficiënt	C/N verhouding	Afbraaksnelheid	Bijdrage aan:
<i>Snel werkend</i>	<i>Laag (weinig EOC)</i>	<i>Laag (weinig C)</i>	<i>Snel</i>	<i>Snel beschikbare nutriënten voor gewas</i>
<i>Langzaam werkend</i>	<i>Hoog (veel EOC)</i>	<i>Hoog (veel C)</i>	<i>Langzaam</i>	<i>Stabiele organische stof opbouw bodem</i>

2.1.2

Voedingsstoffen voor de plant

De hoeveelheid stikstof die vrijkomt voor het gewas hangt af van de C/N verhouding van het organisch materiaal en de C/N verhouding van bodemmicro-organismen. Bij organisch materiaal met een hoge C/N verhouding zal er relatief minder N beschikbaar zijn voor opname door het gewas (op korte termijn). Dat is het geval bij een C/N verhouding hoger dan 30 zoals het geval bij bijv. compost. Er is in totaal minder N beschikbaar, en planten moeten concurreren met micro-organismen voor opname van N. Dat betekent dat alleen toedienen van meststoffen met een hoge C/N verhouding kan leiden tot een lage beschikbaarheid van N voor het gewas. In dat geval is het een beperkende factor voor de actuele opbrengst. Bemesten met alleen compost of groenbemesters is daarom onvoldoende. Voor de bemestingsstrategie wordt een combinatie van langzaam werkende en snelwerkende meststoffen geadviseerd, zodat er voldoende voedingsstoffen beschikbaar zijn voor de plant en tegelijkertijd de organische stof opgebouwd of op peil gehouden wordt (Zanen et al 2008). Ook kan een meststof met een hoge C/N verhouding helpen om N vast te houden in de winter (tijdens de afwezigheid van plantenwortels), zodat deze minder snel uitspoelt naar grond- en oppervlaktewater. Een goede methode is bijv. om compost na de groenbemester toe te dienen. De bodem verbeterende functie van compost wordt op deze manier benut, en de N wordt door de hoge C/N verhouding en de activiteit van micro-organismen opgevangen in de bodem, waardoor deze in de winter minder snel uitspoelt. Het voordeel van het vasthouden van N in de vorm van stabiele bodemorganische stof, is dat er op de langere termijn een hogere N-nalevering aan het gewas is. Bij meerjarige toediening van traag werkende compost bouwt de mineralisatie uit de giften van de afzonderlijke jaren namelijk op en stijgt de mineralisatiesnelheid (in kg N /ha/tijd) van de bodem. Bij meerjarige toediening van drijfmest stijgt het mineralisatieniveau van de bodem eveneens, maar komt het lager uit dan bij gebruik van compost. Dit verschil wordt toegeschreven aan het verschil in aanvoer van organisch gebonden stikstof (Reubens, et al, 2010). Voor langdurige bodemvruchtbaarheid en het opvangen en tegengaan van stikstofuitspoeling, is het dus van belang te werken met organische meststoffen met een hoog C/N gehalte zoals compost, vaste mest en groenbemesters.

Behalve dat de bodemorganische stof als een buffer voor mineralen fungeert, vergroot de organische stof ook de kationen uitwisselingscapaciteit (cation exchange capacity, CEC). Daardoor kunnen allerlei micronutriënten beter worden vastgehouden: organische stof heeft een negatieve lading, waardoor het positief geladen deeltjes als calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), kalium (K^+), natrium (Na^+), aluminium (Al^{3+}), ijzer (Fe^{2+} en Fe^{3+}) bindt, vasthoudt en uitwisselt met het bodemvocht (Reubens et al., 2010, Zwart et al, 2013). Deze werking van organische stof is belangrijker voor zandgronden dan voor kleigronden omdat klei- en leemdeeltjes van zichzelf negatief geladen zijn. Dus is de kationen uitwisselingscapaciteit van deze gronden van nature hoger.

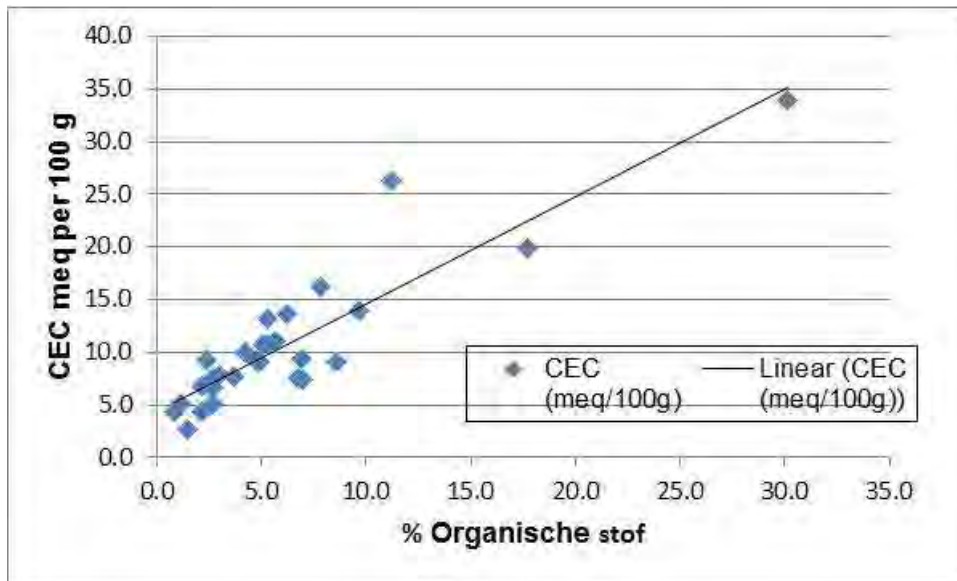


Fig. 2.1. De relatie tussen het OS gehalte en CEC in zandgronden gebaseerd op proefgegevens praktijkbedrijven Agrobiokon project (Zwart et al 2013)

2.1.3

Gewasbeschermingsmiddelen vasthouden

Het organisch stofgehalte van de bodem heeft ook een sterke invloed op gewasbeschermingsmiddelen die in de bodem terecht komen. De mate van binding c.q. uitspoeling van middelen wordt vooral bepaald door de stof-specifieke binding aan organisch materiaal (Kom) en de afbraaksnelheid (DT50), in combinatie met het organisch stofgehalte. RIVM en Alterra hebben het model PEARL ontwikkeld om voor gewasbeschermingsmiddelen de mate van uitspoeling te berekenen, met behulp van deze factoren (Leistra e.a. 2001, Tiktak e.a. 2003). In de toelatingsbeoordeling van gewasbeschermingsmiddelen door het Ctgb (College voor de Toelating van Gewasbeschermingsmiddelen en Biociden) wordt de uitspoeling naar het grondwater berekend via PEARL. CLM hanteert deze gegevens in de Milieumeetlat voor bestrijdingsmiddelen (CLM 2016) om gebruikers inzicht te geven in het risico van uitspoeling van alle toegelaten middelen naar het grondwater, bij verschillende organisch stofgehalten. Voor veel gewasbeschermingsmiddelen is bij organisch stofgehalten boven 6% de uitspoeling beperkt, ook voor middelen die uitspoelingsgevoelig zijn. Onder 3% is het risico op uitspoeling voor uitspoelingsgevoelige middelen vaak hoog. De eerdergenoemde CEC heeft eveneens een functie in de retentie van gewasbeschermingsmiddelen. Okada et al (2016) laat in een recente studie zien dat adsorptie van herbiciden correleerde met de CEC, die weer afhankelijk is van organisch stofgehalte van de bodem. Ook kan de toevoeging van organisch materiaal, in de vorm van bijvoorbeeld mest, koffieprut of verteerd hout, een bijdrage leveren aan het vasthouden van verschillende herbiciden (Fenoll et al., 2014). Zij constateerden dat in bodems waar dit organisch materiaal aan is toegevoegd, meer herbiciden uitspoelden.

2.1.4

Weerbaarheid tegen ziekten en plagen

Het bodemleven breekt organisch materiaal met een hoge C/N verhouding af in stabiele bodemorganische stof. De activiteit van het bodemleven kan een biologisch antagonisme veroorzaken dat een ziekte onderdrukkend effect heeft: een gevarieerd en actief bodemleven kan ziekteorganismen hinderen in hun groei en activiteit (Garbeva et al., 2004). De microbiële activiteit kan bijv. door gebruik van groenbemesters omhoog gaan waardoor dit kan leiden tot afname van plantenziektes.

2.1.5

Water vasthouden

Een toename van de bodemorganische stof verhoogt de kruimelstructuur en zorgt voor grotere stabiliteit tussen bodemdeeltjes (aggregaten), omdat bodemdeeltjes meer aaneen klitten. Niet alleen neemt zo de stabiliteit van de bodem toe, ook worden er nieuwe poriën gemaakt door het bodemleven dat van invloed is op de lucht- en waterhuishouding van de bodem. Hierdoor kan een bodem meer water vasthouden. Op klei- en zavelgronden draagt de bodemorganische stof bij aan een betere lucht- en waterhuishouding. Op zandgronden zorgt de bodemorganische stof voor meer beschikbaarheid in vocht, en is de bodem minder droogtegevoelig (Reubens et al., 2010).

2.2

Opbouwen van bodemorganische stof

Het organische-stofgehalte van de bodem is veranderlijk. In landbouwgronden verdwijnt bodemorganische stof via afbraak door bodemorganismen en er komt nieuwe bij via de aanvoer van organisch materiaal in de vorm van mest, compost, gewasresten, groenbemesters, e.d. Het verschil tussen aanvoer en afbraak bepaalt of het bodem organische-stofgehalte in balans is. Als de afbraak hoger is dan de aanvoer, daalt het organische-stofgehalte en omgekeerd.

Over het algemeen genomen breekt de bodemorganische stof af met 1% tot 4% per jaar. Hoeveel bodemorganische stof afgebroken wordt, hangt af van de hoeveelheid, soort organisch stof die eerder opgevoerd is, bodembewerking, de pH waarde, vochtgehalte van de bodem en de activiteit van het bodemleven. Gemiddeld gaat men uit van 2% afbraak per jaar (www.kennisakker.nl, Hendriks, 2011). Om de organische stof op peil te houden zal de gemiddelde effectief organische stof aanvoer van organisch materiaal gelijk moeten zijn aan de hoeveelheid bodem organische stof die jaarlijks wordt afgebroken. Als vuistregel gaat men uit van een gemiddelde afbraak op bouwland van 1500 tot 2000 kg bodemorganische stof/ha per jaar.

Meststoffen die snel en veel koolstof verliezen dragen het minste bij aan de organische stofopbouw in de bodem. Tabel 2.2 laat de resultaten van een proef door het project ‘Mest als kans’ zien (Bokhorst & ter Berg 2001). Kippenmest draagt weinig bij aan de koolstofopbouw – na 4 weken is al een 25% koolstof verloren gegaan – en compost draagt sterk bij aan de organische stofopbouw in de bodem – 3% koolstofverlies na 4 weken.

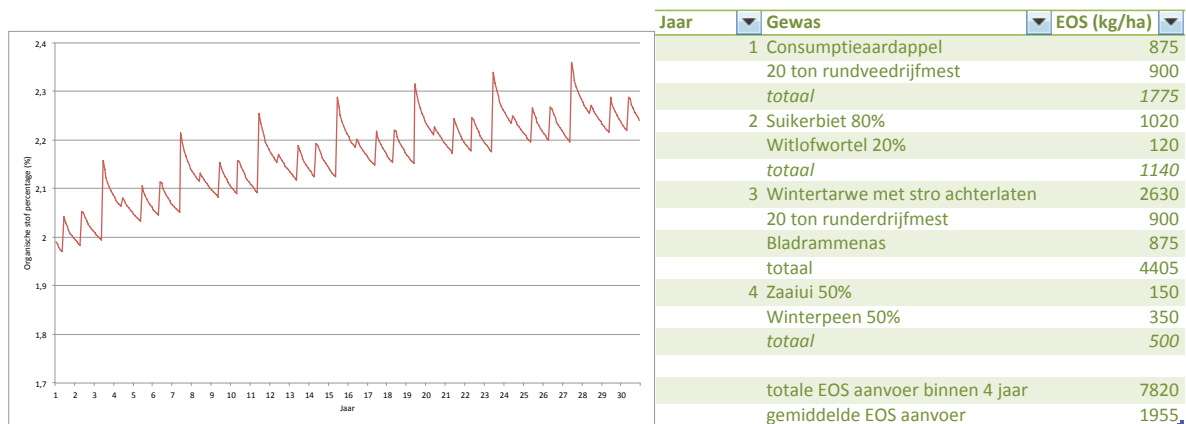
Tabel 2.2: Koolstofopbouw van verschillende mestsoorten (Bokhorst & ter Berg, 2001).

Mestsoort	% koolstofverlies na 4 weken in de grond	
Strorijke kippenmest vers	24	beperkte opbouw organische stof
Strorijke kippenmest gecomposteerd	16	
Geitenmest vers	16	
Geitenmest gecomposteerd	6	
Runderpotstalmest vers	15	
Runderpotstalmest gecomposteerd	8	
GFT	3	
Groencompost	3	
Boomschorscompost	2	sterke opbouw organische stof

Een ideaal organisch stofgehalte voor optimale mineralenbenutting is moeilijk vast te stellen. Bokhorst en Ter Berg (2001) geven een globale indicatie van 3% aan voor zowel zand- als zavelgronden. Loveland en Webb (2003) geven aan dat beneden de 3,4% organische stof (2% organische koolstof) de toplaag van de bodem de structurele stabiliteit verliest en deze gevoelig wordt voor erosie en verwoestijning. Om uitspoeling tegen te gaan en functionele biodiversiteit, bodemstructuur en waterbuffering te bevorderen wordt uitgegaan van een minimum van 3,4% organische stof (TCB, 2005). In Smit en Kuikman (2005) wordt voor zandgronden een streefgetal van 4% voor zandgronden genoemd om stuifgevoeligheid te beperken. Volgens Zwart et al.(2015) is het belangrijker om ervoor te zorgen dat het organische-stofgehalte in balans is. Kennis van aan- en afvoer is hierbij van belang.

Om het organische-stofgehalte te handhaven zal de gemiddelde EOS aanvoer per ha per jaar gelijk moeten zijn aan de jaarlijkse afbraak van de bodemorganische stof, oftewel ongeveer 2000 kg/ha per jaar. Tabel 2.3 rekt een voorbeeld uit van bemestingsmaatregelen met rundveedrijfmest, wintertarwe, en bladrammenas voor een standaardbouwplan. De getallen die hier gebruikt zijn komen van Kennisakker (2016). In dit voorbeeld blijft het organisch stofgehalte in balans dankzij de investering in het derde jaar van het bouwplan. Het opbouwen van de bodemorganische stof duurt lang. In de C-module is voor dit bouwplan en deze bemestingsstrategie de opbouw van de bodemorganische stof uitgerekend bij een startgehalte van 2% bodemorganische stof op kalkarme zandgrond. Daaruit komt naar voren dat het bodemorganische-stofgehalte binnen 30 jaar gestegen is naar 2,4%.

Tabel 2.3: Opbouw van bodemorganische stof met verschillende bemestingsmaatregelen volgens de C-module (C-module ontworpen door CLM, op verzoek beschikbaar)



2.3 Organische stof en opbrengst

Onderzoeken uit verschillende Europese landen (Körschens et al. 2013) laten zien dat er verschillende resultaten zijn die verband leggen tussen bodemorganische stof en gewasopbrengst.

In het onderzoek naar de relatie van bodemorganische stof met de gewasopbrengst is het vaak stikstof die mede de verhoogde gewasopbrengst veroorzaakt. Daardoor is het moeilijk om het extra N-effect van organische stof los te koppelen van de overige effecten van organische stof (waterconservering, ziektevering, retentie gewasbeschermingsmiddelen, e.d.) op de opbrengst.

In een Engels onderzoek van Johnston et al. (2009) is in langjarige veldproeven onderzocht wat het effect is van verschillende organische stofgiften op de opbrengst van verschillende gewassen. In dit onderzoek verdubbelt de graanproductie bijna in afhankelijkheid van het type organische stof: gras/klaver – vast mest – onderploegen van stro in aflopende vorm van betekenis. De aardappelopgost reageert overeenkomstig met opbrengsten die al snel 25 – 30% hoger kunnen zijn.

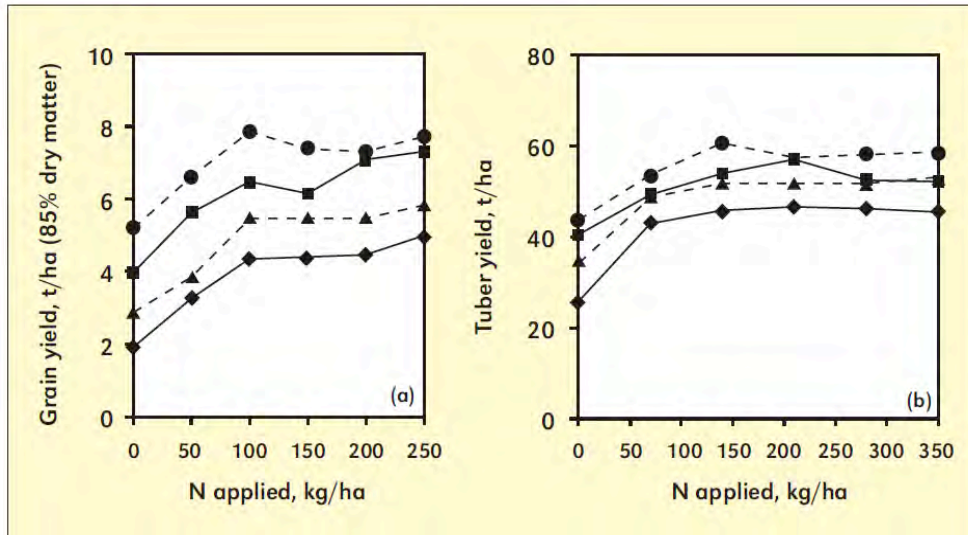


Figure 3. Yield response to N rate for winter wheat in 1987/88 (a) and potatoes in 1988/89 (b) after periods of various organic treatments (see text). Treatment and % SOM: No organic amendment, 0.65% SOM (◆); incorporating straw, 0.85% SOM (▲); adding FYM, 1.06% SOM (■); incorporating a grass/clover ley, 0.90% SOM (●).

Fig. 2.2: Gewasopbrengst na toediening van verschillende mestsoorten (Johnston et al., 2009)

Een vergelijkbaar resultaat leveren de veldexperimenten in Woburn (van 1965 – 1971 en 1981 – 1986) (Johnston et al., 2009). De hoogste opbrengsten werden behaald bij aardappels en granen op bodems met de hoogste organische-stofgehaltes. Het onderwerken van gras/klaver in de bodem bracht de hoogste opbrengsten (gemiddeld +3,5 ton bij granen en +18 ton bij aardappel), gevolgd door toevoegen van vaste mest (gemiddeld +2,4 ton bij granen en +10 ton bij aardappel) vergeleken bij alleen toevoeging van kunstmest (minerale N) (zie tabel 2.3 op de volgende pagina).

Het positieve effect van het onderwerken van gras/klaver in de bodem op de gewasopbrengst heeft te maken met o.a. de relatieve lage C:N ratio (10:1) in klaver. Door mineralisatie van de klaverresten, komt stikstof geleidelijk vrij gedurende een langere periode. Stro heeft een hoge C:N verhouding (100:1), en voor de afbraak van stro wordt minerale N uit de bodemorganische stof gehaald door micro-organismen. Door toevoeging van stro wordt stikstof dus juist vastgelegd in bodemorganische stof, en is het dus niet direct beschikbaar voor de plant. Dit verklaart waarom de gewasopbrengst minder toenam dan bij inwerken van gras/klaver en toevoeging van vaste mest (C:N ratio ~ 15:1). Ondanks de hoge C:N ratio van stro, draagt het toch bij aan toename in de gewasopbrengst vergeleken met alleen kunstmest. Stro mag dan in eerste instantie een netto vrager van stikstof zijn, de ingebouwde stikstof komt wel geleidelijk vrij en kan daardoor beter inspelen op de vraag van het gewas

gedurende het seizoen en andere functies van bodemorganische stof uitoefenen (waterconservering bijvoorbeeld).

Tabel 2.3: Gewasopbrengst na toepassing van verschillende bemestingsmethoden (Johnston et al. 2009)

Opbrengsten granen	Ton/ha N = 100	Ton/ha N = 250	Extra t.o.v. N=100 Mineraal	Extra t.o.v. N=250 Mineraal
Bemestingsmethode				
Gras klaver (7,5 ton/ ha)	7,8	7,8	+3,7	+3,3
Vaste mest (50 ton/ha)	6,3	7,0	+2,2	+2,5
Stro inwerken (7,5 ton/ha)	5,0	5,5	+1,1	+1
Alleen kunstmest	4,1	4,5	0	0

Opbrengsten aardappel	Ton/ha N = 150	Ton/ha N = 350	Extra t.o.v. N=150 Mineraal	Extra t.o.v. N=350 Mineraal
Bemestingsmethode				
Gras klaver (7,5 ton/ ha)	60	59	+18	+18
Vaste mest (50 ton/ha)	52	51	+10	+10
Stro inwerken (7,5 ton/ha)	48	51	+6	+10
Alleen kunstmest	42	41	0	0

In een andere proef in Woburn werd vastgesteld dat op een zandige bodem de suikerbieten en de aardappel opbrengsten ook significant hoger waren op bodems met een hoger organisch stofgehalte, zelfs ten opzichte van plots die alleen behandeld waren met kunstmest (Tabel 2.4). Uit beide proeven kunnen we concluderen dat een hoger bodemorganische-stofgehalte door vaste mest resulteert in een hogere opbrengst bij aardappelen en suikerbieten, oftewel bij rooivruchten heeft vaste mest een duidelijke meerwaarde.

Tabel 2.4: Gewasopbrengst na toepassing van verschillende bemestingsmethoden (Johnston et al. 2009)

Gewas	N =144 kg/ha	N =216 kg/ha	Toename ton/ha N=144	Toename ton/ha N=216
Aardappels	Ton/ha	Ton/ha		
Kunstmest	30	36	0	0
Vaste mest	44	44	+14	+ 8
Suikerbiet				
Kunstmest	39,0	45,6	0	0
Vaste mest	48,6	49,6	+9,6	+4
Voorjaarsgraan				
Kunstmest	4,92		0	
Vaste mest	5,08		+ 0,16	
Voorjaarsgerst				
Kunstmest	4,12		0	
Vaste mest	3,79		- 0,33	

In een langjarige veldproef op Woburn (1973 - 1980) zijn aardappels en granen geteeld op twee niveaus van bodemorganische stof (tabel 2.5). De organische stof werd verhoogd door het toevoegen van turf om zo het effect van mineralen uit te sluiten. Volgens Johnston en Brookes (1979) zijn de opbrengsten van aardappels en voorjaarsgranen altijd hoger op gronden met meer organische stof in de bodem. Echter, de opbrengsten van wintergranen lijken onafhankelijk van het bodemorganische-stofgehalte. Voor aardappels geldt dat bij een N gehalte van 200 kg N / ha, op een bodem met 1,27% meer C in de bodem, oftewel een stijging van 2% bodem organische stof, 9 ton extra aardappels oplevert. Voor granen geldt dat bij een stijging van 2% in bodemorganische stof zorgt voor 0,12 ton extra gewasopbrengst van voorjaarsgerst en 0,04 ton extra gewasopbrengst van voorjaarstarwe. Dat lijkt niet veel, en vergelijkbaar met de Nederlandse situatie die op 8 à 9 ton normale opbrengst per ha zit is het de vraag of een dergelijke stijging nog realistisch is.

Tabel 2.5: Gewasopbrengst op twee niveaus van bodemorganische stof (Johnston en Brookes, 1979)

Gewasopbrengst (ton/ha)	N 100 kg/ha	N 200 kg / ha	Toename N 100	Toename N 200
Aardappels				
0,76 %C bodem		41,7		0
2,03 %C bodem		50,7		+ 9 ton
Voorjaarsgerst				
0,76 %C bodem	6,73		0	
1,95 %C bodem	6,85		+0,12 ton	
Voorjaarstarwe				
0,76 %C bodem	8,05		0	
1,95 %C bodem	8,09		+0,04	
Wintergerst				
0,76 %C bodem	7,32		0	
1,95 %C bodem	7,00		-0,32	

Een meta-analyse van een twintigtal lange termijn experimenten verspreid over Europa en waar toediening van vaste mest is vergeleken met toediening van kunstmest laat eveneens een verschil in respons zien tussen aardappel (gemiddeld effect van 9% meer opbrengst) en granen (gemiddeld effect van 3% meer opbrengst) bij een verhoging van het organisch stofgehalte van minder dan 1% (Körschens et al. 2013).

Veel van deze experimenten bestaan uit een vergelijking van toediening van vaste mest versus kunstmest. Het gaat om experimenten die soms al enige decennia oud zijn en waarbij er veel vraag was naar vergelijking van effecten van beide mestsoorten. Gelet op de hoogte van de opbrengsten van de geselecteerde studies, kunnen deze resultaten worden geëxtrapoleerd naar de huidige akkerbouw in Nederland. Nog niet gepubliceerde data van proefbedrijf Vredepeel in Noord Brabant laten vergelijkbare effecten zien.

Er zijn geen twee veldexperimenten vergelijkbaar in het vastleggen van de relatie organische stof en opbrengst. Naast de bron van organische stof speelt ook de bouwplanhistorie er een belangrijke rol in. Dat laat onverlet dat er wel grote lijnen zijn te trekken.

Het waargenomen effect (toename in opbrengst) kan worden toegeschreven aan het meer geleidelijk vrijkomen van mineralen uit organische mest dan uit kunstmest en daarbij meer in balans zijn met de behoeften van het gewas. Dat lukt minder goed met kunstmest. Daarnaast geeft kunstmest geen

koolstofgift, en voedt het dus niet het bodemleven. Dit heeft als gevolg dat het bodemleven minder gestimuleerd wordt. Hierdoor worden de bodemprocessen minder goed benut, en komen er dus minder mineralen vrij uit de al aanwezige bodemorganische stof. Het positieve effect van bodemorganische stof op de gewasopbrengst is ook toe te schrijven aan de andere faciliterende werkingen van bodemorganische stof, zoals waterconservering en wering van ziekten en plagen. Toevoegen van organische stof heeft op de graanoogst niet een beduidend effect. Die conclusie wordt getrokken aan de hand van verschillende experimenten met continue graan. De verschillen tussen granen en aardappels heeft mogelijk te maken met de verschillen in behoeftes van de verschillende soorten gewassen. Graan heeft bijvoorbeeld minder fosfaat en stikstof nodig dan aardappels. Een toename in bodemorganische stof, en dus ook in N en P, zal daarom eerder een grotere positieve invloed hebben op die gewassoorten die meer N en P nodig hebben. Daarnaast kan een verschil in ziektedruk tussen gewassen een mogelijke verklaring zijn. Een toename van organische stof stimuleert het bodemleven, en kan zo ziektes onderdrukken. Mogelijk hebben aardappels daar nog meer baat bij dan granen. Interacties tussen deze twee mogelijke verklaringen (verschillen in gewasbehoeften en ziektedruk) zijn ook denkbaar. Het exacte mechanisme is echter nog niet bekend.

De vraag is of een stijging van 1% organische stof in de akkerbouw een realistische ambitie is (Conijn en Lesschen 2015). Analyse van verandering in het percentage organische stof in Zuidelijk Flevoland - een gebied met voornamelijk akkerbouw - laat zien dat in 10 jaar tijd daar een toename van 0,5% (4,4% -> 4,9%) is gerealiseerd (gegevens Eurofins 2004 – 2014).

De voorgestelde rekenregels zijn wellicht aan de conservatieve kant. Er zijn studies die hoger uitkomen. Vaak ontbreekt het bij studies aan een referentie naar andere studies en het verklaren van verschillen, overeenkomsten en mechanismen. De hier voorgestelde rekenregels geven een redelijk gemiddelde weer en zullen worden toegepast bij het interpreteren van bodembeheer maatregelen die in hoofdstuk 2.5 worden besproken.

2.3.1

Conclusie organische stof en opbrengst

Op grond van deze gegevens uit de literatuur trekken wij de volgende algemene conclusies:

- Verhoging van organische stof heeft een positief effect op de opbrengst.
- De positieve invloed van bodemorganische stof op de gewasopbrengst is manifester bij rooigewassen dan bij granen.
- Als **rekenregel** hanteren wij dat 1% verhoging van de organische stof leidt tot 10 % verhoging van de opbrengst van rooigewassen (b.v. aardappelen) en 2 % voor granen e.d. (granen e.d.).

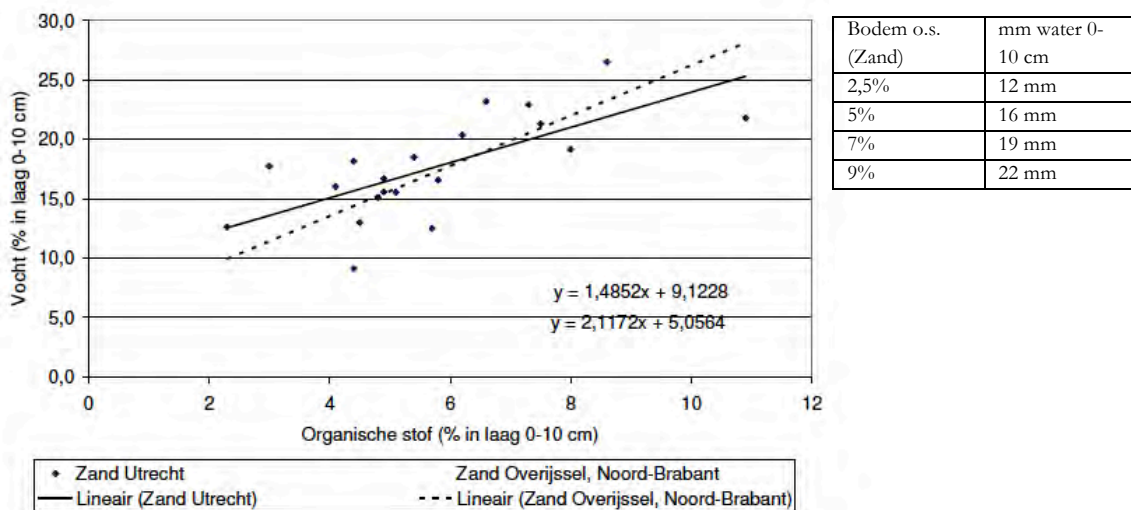
2.4

Organische-stofgehalte en waterconservering

De bodem is een natuurlijke buffer van water in natte en droge perioden. Een belangrijke factor voor deze buffering is de bodemorganische stof. Organische stof bepaalt het waterbergend- en het vochtvasthoudend vermogen van de bodem via respectievelijk poriënvolume en sponswerking.

De positieve invloed van bodemorganische stof op het poriënvolume is te danken aan diverse gerelateerde effecten:

1. Een toename van het bodemorganisch stofgehalte verhoogt de kruimelstructuur en zorgt voor grotere stabiliteit tussen de bodemdeeltjes (aggregaten), omdat bodemdeeltjes meer aaneen klitten dankzij een stimulering van het bodemleven, waardoor afbraakproducten van de organische stof de bodemdeeltjes kunnen binden.
2. Daarnaast draagt organische stof indirect bij aan de stabiliteit door het stimuleren van activiteiten door het bodemleven (vertering, graven van gangen, mechanische binding van deeltjes door schimmeldraden). Door de activiteiten van micro- en macro-organismen worden nieuwe poriën gevormd van verschillend formaat. Dit bevordert de lucht- en waterhuishouding (drainage en doorlatendheid) van de bodem.
3. Een direct effect van organische stof op de waterhuishouding is de sponswerking. Van Eekeren en Bokhorst (2010) hebben een relatie kunnen leggen tussen het percentage organische stof en vochtgehalte in de bodem. Zie figuur 2.3 Hoe hoger het organische-stofgehalte in de bodem, hoe meer vocht vast gehouden kan worden.



Figuur 2.3 Relatie tussen organische-stofgehalte in de laag 0-10 cm en het vochtpercentage in de laag 0-10 cm in Utrecht en een onderzoek in Overijssel en Noord-Brabant (van Eekeren en Bokhorst,, 2010).

Om inzicht te krijgen in een meer generiek effect van bodemorganische stof op het waterbergend- en vochtvasthoudend vermogen (vuistregel) zijn diverse onderzoeksresultaten geanalyseerd uit de periode 1994 – 2015:

- Volgens een literatuurstudie door STOWA houdt 1% bodemorganische stof 4-6 mm extra water vast in de bouwvoor (STOWA 2015)
- Een studie van Janssen (1991) laat zien dat 0,3-0,7% extra organische stof in de bodem, 1-9 tot 3-21 mm extra water in de bouwvoor vasthoudt.
- Op zandgrond zorgt 0,5-3% extra organische stof voor een verdubbeling in de hoeveelheid water die geborgen kan worden (Hudson, 1994)

- Elke stijging van 1% organische stof in de laag 0-10 cm, betekent 1,5% meer vocht in de laag 0-10 cm (Hudson, 1994)
- Van Eekeren en Bokhorst (2010) stellen dat 1% organische stof gelijk staat aan 1,3 mm en 13 m³ water/ha in de eerste laag van 0-10 cm.
- Bij een jaarlijkse toepassing van compost van 45 ton/ha steeg het beschikbare vocht van 25,1 naar 28,9% (cm³/cm³) (Deproost en Elsen, 2003)
- Logsdon en Malone (2015) laten zien dat bodem met compost 0,617 m³/m³ water vast kan houden dan bodem zonder compost 0,422 m³/m³.
- Murphy (2015) laat zien dat het plant beschikbare water in de laag (0-10 cm) met 25% toeneemt als de organische stof met 2% toeneemt. We hebben het dan over ca. 4 mm, dus 2 mm/1% OS. Die relatie is afgeleid van de negatieve relatie tussen bulkdichtheid en organische stof.

Het belangrijkste verschil tussen deze studies is het type onderzoek (modelstudie of veldwerk) en de grondsoort (groveweg klei of zand). Het verschil in de resultaten tussen veldwerk en modelstudie is klein. Het verschil in grondsoort is iets groter. We hebben de resultaten van de diverse onderzoeken omgerekend naar het effect van een stijging van het organische-stofgehalte met 1% in de bouwvoor op het vochtvasthoudend vermogen in mm. Gemiddeld kan bij 1% meer organische stof 2,1 mm meer water in de laag 0-10 cm geborgen/vastgehouden worden, in de totale bouwvoor (0-30 cm) gemiddeld 7,0 mm. Splitsen we de resultaten uit naar zandgrond en klei/zavelgrond dan kan in de laag 0-10 cm respectievelijk 2,3 mm en 2,9 mm geborgen/vastgehouden worden. In de bouwvoor is het verschil in grondsoort groter: op zand is het 6,8 mm en op klei/zavel 9,3 mm.

Wat betekenen deze hoeveelheden voor de praktijk van het waterschap en van de boer? Het KNMI spreekt van een natte dag bij >10 mm neerslag per dag. Bij zware regen in de zomer gaat het om >50 mm per dag. 1% meer organische stof in de bouwvoor waardoor ca 7,0 mm extra water in de bodem terecht kan, is in verhouding tot zware regen van kleine betekenis. Schipper et al. (STOWA 2015) concluderen dat bodemverbetering, waaronder het verhogen van het organische-stofgehalte, weinig effect heeft op het bergen van extreme buien. Het waterbergend vermogen van bodems bij een gemiddelde grondwaterstand ligt al snel een factor 6-10 hoger dan die 7 mm en daarmee ligt de bijdrage aan het bergend vermogen van 1% organische stof tussen de 10 en 20%.

Niet al het water in het bodemprofiel is bereikbaar voor de plant. Daardoor is de bijdrage van de verhoogde waterberging van organische stof aan de waterbeschikbaarheid voor de plant belangrijker. Dat vertaalt zich in een aanzienlijke verlaging van het aantal dagen waterstress bij een verhoogde bergingscapaciteit. We hebben het dan al snel over een vermindering van de waterstress van 25-75%, afhankelijk van grondsoort.

2.4.1

Conclusie organische-stofgehalte en waterconservering

Op grond van deze gegevens uit de literatuur trekken wij de volgende algemene conclusies:

- Verhoging van organische-stofgehalte leidt tot vasthouden van meer water in het profiel.
- Als **rekenregel** wordt gehanteerd dat 1% extra organische stof in de bodem bijdraagt aan extra waterberging op zandgrond van 6,8 mm water en op kleigrond 9,3 mm.
- Die toename vermindert de oppervlakkige afspoeling van water en draagt daarmee belangrijk bij aan verminderen van risico's op afspoeling van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen en verbetert de waterkwaliteit.
- Verhoging van organische-stofgehalte vermindert de droogtestress van gewassen en beregening kan substantieel worden uitgesteld.
- Verhoging van organische-stofgehalte draagt beperkt bij aan de opvang van extreme buien van soms 50 of 100 mm in een of enkele dagen. De bijdrage aan klimaatadaptatie is daarmee beperkt.

3

Maatregelen om organische-stofgehalte te beïnvloeden

3.1 Compost

Compost bestaat uit stabiele organische componenten (humus), minerale componenten en bodemorganismen. De organische componenten kunnen allerlei oorsprongen hebben: GFT afval, houtsnippers, maaisel van bermen en slootkanten, niet verteerbaar gras, etc. Doordat tijdens het composteringsproces de temperatuur doorgaans oploopt tot 60-70 °C verliest het merendeel van de onkruidzaden en plant pathogene organismen zijn kiemkracht. Compost heeft een relatieve hoge C/N verhouding en het bodemleven breekt het geleidelijk af in stabiele organische fracties, die bijdragen aan de bodemorganische stof. Tegelijkertijd komen geleidelijk voedingsstoffen voor de plant beschikbaar.

3.1.1

Bodemorganische stof en compost -> opbrengst en waterbergend vermogen

Compost kan een belangrijke bijdrage leveren aan het op peil houden van het organische-stofgehalte in de bodem. Afhankelijk van de oorsprong van de organische stof (GFT versus groencompost) telt het verschillend mee in de meststoffenwet. Bij GFT compost moet 50% van de aangevoerde P en 10% van de aangevoerde N worden meegeteld voor de Meststoffenwet. Groencompost bevat slechts een derde van de hoeveelheid P in vergelijking met GFT compost. Er zijn praktijken waarbij groencompost buiten de Meststoffenwet kan worden gehouden en dus extra aantrekkelijk is om in te zetten voor verhoging van organische stof.

Om het effect van verschillende type meststoffen op de opbouw van bodemorganische stof te onderzoeken is een berekening gemaakt met de volgende invoergegevens:

- Bouwplan: suikerbieten, aardappel, wintertarwe en waarbij de gewasresten worden ondergeploegd;
- Drie type meststoffen, jaarlijks:
 - Uitsluitend drijfmest (160 kg N/ha)
 - 50% groencompost (17 ton, 150 kg N/ha) en 50% drijfmest (80 kg N/ha)
 - 100% groencompost (35 ton, 299 kg N/ha)

De berekeningen zijn gemaakt met behulp van de zogenoemde C-module (zie H 1). In deze module wordt doorgerekend wat de opbouw van organische stof is in de bodem. Dat is afhankelijk van de

Effectieve Organische koolstof (EOC, zie paragraaf 2.1) die gewas en bemesting realiseert. Het resultaat na 10 jaar bij twee grondsoorten en uitgaande van een startpositie van 2% organische stof is opgenomen in tabel 3.1. Met het toevoegen van 35 ton/ha groencompost is binnen 30 jaar een opbouw van +3,5% mogelijk op kalkarme kleigrond en +2,5% bij kalkarme zandgrond.

Tabel 3.1 Verwachte verandering van het bodem organische-stofgehalte na **10 jaar** bij toediening van **groencompost** (35 ton/ha of gedeeltelijk 17 ton/ha) en de daaraan gekoppelde opbrengstverhoging en watervasthoudend vermogen. Bouwplan: een 3-jarige rotatie met suikerbiet, consumptieaardappel en wintertarwe op klei- en zandgrond (gewasresten (incl. stro) ondergeploegd). Uitgangssituatie: 2% organische stof. Berekening met behulp van de C-module.

Compost maatregelen	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	klei	zand
100% Rundveedrijfmest	0,43%	4,33%	0,23%	2,33%	4,03	1,59
50% groencompost / 50% rundveedrijfmest	0,80%	8,00%	0,53%	5,33%	7,44	3,63
100% groencompost / kunstmest	1,17%	11,67%	0,83%	8,33%	10,85	5,67

Organische stof opbouw van de bodem met alleen compost als bemestingsstrategie gaat relatief snel t.o.v. alleen rundveedrijfmest. Echter, met alleen compost komt er onvoldoende snel N beschikbaar voor de gewasopbrengst vanwege het hoge C/N gehalte van compost. Daarom wordt vaak een combinatie van gevarieerde meststoffen geadviseerd, oftewel 50% groencompost en 50% rundveedrijfmest. In bovenstaande tabel is met de aantallen rekening gehouden met de fosfaat- en stikstofnormen van de mestwetgeving.

3.1.2

Effect op de gewasopbrengst

Bij het schatten van het effect van groencompost op de opbrengst (via organische stof) is in de zogenoemde C-module gebruik gemaakt van een modelberekening die is gebaseerd op veldgetallen (humificatie coëfficiënt van gewasresten bijvoorbeeld). Deze resultaten worden vergeleken met resultaten van veldproeven die zijn gerapporteerd (dosis – effect relaties). Onderstaande studies geven deze relaties weer:

- D’Hose (2012) stelt dat bij jaarlijkse compostgiften van 0 tot 50 m³ in gewasrotatie van aardappel, snijmaïs, bieten en spruitkool bij verschillende N-niveaus uit kunstmest er na 4 jaar een opbrengststijging is van 7% tot 10% dat in latere jaren nog lijkt te stijgen (tot ruim 13% in aardappel en spruitkool)
- Floot et al. (2008) zien bij een jaarlijkse toepassing van compost in een bouwplancyclus van zomertarwe, suikerbieten, zaaiuien en pootaardappelen bij een bemestingsniveau volgens stikstofadvies een opbrengststijging van 1 tot 6%.
- Bij een stikstofadvies van 40 kg N/ha geeft compost een opbrengststijging van 4 tot 8% ten opzichte van geen compost (Floot et al., 2008).
- De Wit (2013) laat zien dat gebruik van GFT compost in combinatie met drijfmest en aanvullend kunstmest op een gemiddeld akkerbouwbedrijf in Zuid Nederland resulteert in een positief saldo van gemiddeld €55/ha ten opzichte van de basissituatie waarin de maximaal toegelaten hoeveelheid drijfmest en kunstmest wordt gebruikt.

Bovenstaande onderzoeken laten zich moeilijk vergelijken onderling en met de uitgevoerde berekeningen over 10 jaar voor het bouwplan suikerbiet – aardappel – wintertarwe. Uitgangssituatie,

hoeveelheden toegediende compost en andere mest, gewas, e.d. zijn steeds verschillend. Het voordeel van de modelberekeningen is dat een stijging van het organisch stofgehalte kan worden berekend vanuit zelf gekozen uitgangssituaties. De resultaten van de modelberekeningen zijn zeker niet overschat in vergelijking met genoemde studies. Daarom stellen we voor om de resultaten van de modelstudie te gebruiken als vuistregel voor effecten van organische stof op de gewasopbrengst.

3.1.3

Effect op watervasthoudend vermogen bodem

Het waterbergend vermogen van de bodem is meer dan 2 keer zo hoog bij toepassen van groencompost in vergelijking met rundveedrijfmest. Dit is afgeleid van de te verwachten stijging in organisch stofgehalte van de bodem. De betekenis hiervan is dat het gewas langer water kan putten uit het profiel en minder snel verdroogt.

3.1.4

Conclusie compost

- In vergelijking met rundveedrijfmest realiseert groencompost een bijna 3 keer zo hoog organisch stofgehalte in de bodem. Echter, zonder toevoeging van een snelwerkende meststof vertraagt het de groei, omdat alle N wordt opgenomen door de compost.
- De doorvertaling ervan naar opbrengst hangt daarom af van de snelwerkende mest die is toegevoegd. De relatief grote variatie in gerapporteerde opbrengstverschillen door compost laten zich onder andere verklaren door de variatie in beschikbaarheid van snelwerkende meststoffen.
- Het waterconserverend vermogen van de bodem relatief snel toeneemt.

3.2

Vaste mest

Vaste mest is dierlijke mest gemengd met stro. Kenmerkend is de tijdelijke immobilisatie van mineralen (uit dierlijke mest) door een grote massa bacteriën die de mineralen inbouwen en die daarna weer geleidelijk vrijkomen. Deze vorm van bemesting leidt tot een grote toename in bodemleven (schimmels, bacteriën, protozoa, nematoden, regenwormen etc.) en een stijging van de pH. Dit zijn condities die de decompositie van de vaste mest bevorderen.

De samenstelling van de mest is afhankelijk van het dieet van de dieren waarvan de mest afkomstig is. Zo leidt een eiwitarm dieet tot een hogere C/N verhouding van de mest. En dat draagt weer bij aan de opbouw van bodemorganische stof.

Door de verhoogde hoeveelheid en activiteit van het bodemleven ontstaat een betere bodemstructuur waardoor de infiltratiesnelheid van water hoger is, evenals het watervasthoudend vermogen. Vaste mest heeft een vergelijkbare werking en effect op bodemkwaliteit als compost, zij het dat het veelal rijker is aan mineralen en daarmee een actief bodemleven bevordert (van Eekeren et al., 2003).

3.2.1

Vaste mest en organische stof opbouw

Een modelmatige berekening met (opnieuw) de C-module voor een klassiek bouwplan (suikerbiet, aardappel, wintertarwe) laat zien wat de relatieve bijdrage is van vaste mest op de organische stof opbouw (Tabel 3.2). Er is uitgegaan van toepassing van de maximale hoeveelheid N (170 kg). In verband met de snelle beschikbaarheid van N zijn daar drie variabelen in mestgift op losgelaten: snelle en langzame beschikbaarheid en een mengvorm (benadering is vergelijkbaar met die bij compost).

Tabel 3.2 Verwachte verandering van het bodem organische-stofgehalte na **10 jaar** bij toediening van **vaste mest** (ter waarde van 170 kg N/ha) en de daaraan gekoppelde opbrengstverhoging en watervasthoudend vermogen. Bouwplan: een 3-jarige rotatie met suikerbiet, consumptieaardappel en wintertarwe op klei- en zandgrond (gewasresten (incl. stro) ondergeploegd). Uitgangssituatie: 2% organische stof. Berekening met behulp van de C-module.

Vaste mest maatregelen	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	klei	zand
Uitsluitend rundvee drijfmest	0,43%	4,33%	0,23%	2,33%	4,03	1,59
Vaste mest (50%) / rundveedrijfmest (50%)	0,50%	5,00%	0,27%	2,67%	4,65	1,81
100% Vaste mest rundvee	0,53%	5,33%	0,30%	3,00%	4,96	2,04

De variatie in toename van bodemorganische stof tussen de drie “behandelingen” is niet zo groot. Er is gewerkt met de input van rundveedrijfmest met een hoger (factor 3) Effectief Organisch Koolstof (EOC) gehalte dan varkensdrijfmest. Deze berekening van het effect van vaste mest op het organisch stofgehalte komt overeen met de meta analyse (wereldwijd) die Maillard & Agnes (2014) hebben gedaan. Deze is gebaseerd op 42 studies, die 49 locaties over de hele wereld omvatten. Bodems die vaste mest kregen toegediend, hadden een significant hoger organisch stofgehalte dan bodems die alleen kunstmest of geen mest kregen. De relatieve toename in organisch stofgehalte in 20 jaar tijd werd geschat op 1.26 % ± 0.14 (95% CI). De berekeningen met de C-module laten een stijging zien van gemiddeld 1,05% bij vaste mest over 20 jaar.

3.2.2

Effect gewasopbrengst

De verhoogde organische stof door vaste mest kan worden geëxtrapoleerd naar verhoogde opbrengst (zie de basis rekenregels 2.3). Op basis van modelberekeningen met de C-module is er een toename in organische stof van 0,5% in tien jaar, en een daaraan gekoppelde stijging van de opbrengst van aardappelen van 5%. De rekenregels zijn deels gebaseerd op de studies genoemd in hoofdstuk 2.3 (Johnston et al., Coleman 2009). Gebaseerd op die rekenregels (toename organische stof -> toename productie) mogen de opbrengsten gebaseerd op drijfmestgiften niet substantieel verschillen van die van vaste mest (tabel 3.2). In de praktijk zijn er verschillende ervaringen. Vanden Nest et al. (2014) constateren een grote variatie in opbrengstverschillen bij vaste mest versus rundveedrijfmest afhankelijk van het type gewas. Zij werkten in een 8 jarig experiment met een rotatie met daarin 5 verschillende gewassen. Gemiddeld is het verschil 8% in opbrengst tussen vaste mest en drijfmest en dat varieert van 0% bij kool en aardappelen tot 20% bij mais en gras. Graan is in deze studie niet meegenomen. Opmerkelijk is het ontbreken van verschil tussen drijfmest en vaste mest voor de opbrengst van rooivruchten, terwijl het koolstof gehalte van vaste mest wel hoger was.

Zavattaro et al. (2016) concludeerden dat vaste mest een hogere opbrengst geeft dan bij toediening van drijfmest (ca. 4% met ook variatie tussen gewassen). Zij koppelen dat expliciet aan de efficiëntie van het gebruik van de toegediende N van vaste mest. Deze studie beslaat meerdere jaren en onderzocht combinaties van mais met gras. Daarnaast kan het actievere bodemleven bij vaste mest een rol spelen (betere waterconservering).

3.2.3

Effect op waterbergend vermogen

Gekoppeld aan het geringe verschil in de opbouw van organische stof, is er ook een gering verschil in watervasthoudend vermogen tussen vaste mest en rundvee drijfmest.

Vaste mest en watervasthoudend vermogen is ook bestudeerd door Rasool et al. (2008) zij zien een hoger watervasthoudend vermogen van enkele % bij vaste mest in proeven waar die is vergeleken met kunstmest in de teelt van maïs. Deze verschillen zijn uiteraard te verwachten. Theoretisch is er ook een verschil te verwachten tussen drijfmest en vaste mest, omdat vaste mest het bodemleven sterker voedt.

3.2.4

Conclusie vaste mest

- De verschillen in organische-stofopbouw tussen vaste mest en rundveedrijfmest zijn niet groot en als zodanig zijn er geringe opbrengstverschillen te verwachten.
- Toch worden in studies significante verschillen waargenomen voor sommige gewassen. Deze zijn wellicht te herleiden tot een efficiënter gebruik van de beschikbare stikstof bij vaste mest (slow release).

3.3

Groenbemesters

Een groenbemester is een gewas dat geteeld wordt voor het in stand houden of verbeteren van fysische, chemische en biologische eigenschappen van de bodem. Er wordt ook wel gesproken over volggewassen of vanggewassen als het gewassen zijn die na of onder de hoofdteelt worden ingezaaid. De vanggewassen hebben als doel om nutriënten (m.n. nitraat) op te nemen uit de bodem in de winter en te voorkomen dat die uitspoelen naar het grondwater. Verschillende studies (Lewan, 1994; Torstensson & Arronsson, 2000) hebben aangetoond dat ondergewerkte groenbemesters, zoals Italiaans raaigras of Engels raaigras, effectief zijn in het voorkomen van nitraat uitspoeling in intensieve landbouwsystemen bij nattere omstandigheden. Vanggewassen worden verplicht geteeld in Nederland onder maïs op zand.

Groenbemesters kunnen verschillende functies hebben: ziektebestrijding, organische stof opbouw, buffering tegen uitdrogen en erosie en het verbeteren van de bodem structuur. Welke functie zij hebben wordt mede bepaald door de plaats die zij krijgen in het bouwplan van de agrariër.

3.3.1

Opbouw bodemorganische stof

Door de wortelontwikkeling en het onderwerken van de groenbemesters wordt organisch materiaal ingebracht in de bodem. Het effect op de organische stofopbouw in de bodem is afhankelijk van de soort groenbemesters. Veel groenbemesters hebben een lage C/N verhouding en brengen een beperkte hoeveelheid gemakkelijk afbreekbaar materiaal in de bodem, waardoor de hoeveelheid EOC die door de meeste groenbemesters wordt geleverd relatief beperkt is. Groenbemesters als luzerne en Engels raaigras hebben een positief effect op de bodemstructuur door hun intensieve wortelsysteem en anderen zoals gele mosterd en bladrammenas juist op ziektebestrijding van bijvoorbeeld aaltjes en op beperking van nitraat-uitspoeling.

Grofweg kunnen 3 groepen groenbemesters onderscheiden worden:

- Grasachtigen: hoge N nalevering, goede beworteling, hoge EOC (hoge C/N)
- Bladrijken, zoals bladrammenas, gele mosterd: snelle N beschikbaarheid, beperkte EOC (lage C/N), verlagen van de ziektedruk
- Vlinderbloemigen: N fixerend vermogen, snelle beschikbaarheid van N, omvangrijk wortelstelsel, beperkte EOC, lage C/N (<20) (Blanco-Canqui et al., 2015)

Uit een meta-analyse van 37 studies (Poeplau & Don, 2015) blijkt dat groenbemesters over het algemeen bijdragen in het ophogen van de bodemorganische stof. Gebaseerd op het zogenoemde Rothamsted model concludeerden de onderzoekers dat groenbemesters bijdragen aan koolstof opslag in de bodem (zie fig. 3.1). Groenbemesters met een hoge C/N verhouding en een intensief, uitgebreid wortelsysteem dragen het meeste bij aan de opbouw van bodemorganische stof.

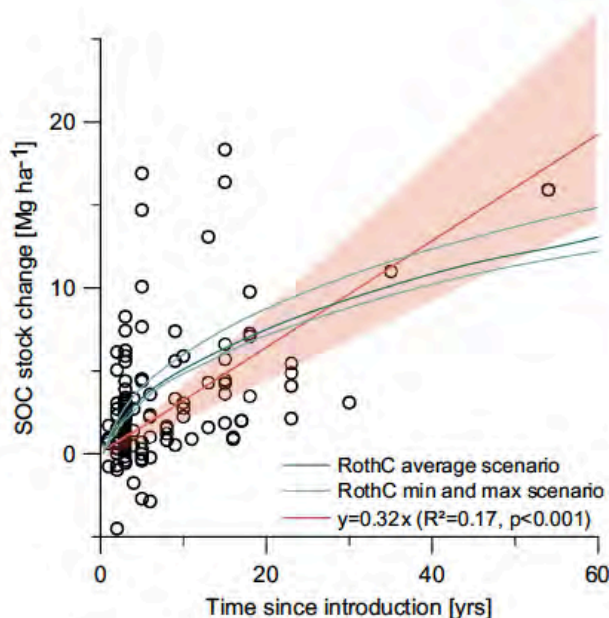


Fig. 2. SOC stock change after cover crop introduction as a function of time with linear regression (with 95% confidence interval) and the RothC simulated average cropland (with min and max scenario).

Fig. 3.1 Bodemorganische koolstofopbouw na toepassing van groenbemesters, data gebaseerd op modelberekeningen van het RothC model (Poeplau & Don, 2015).

Ook Blanco-Canqui et. Al. (2015) constateren dat groenbemesters geschikt zijn om koolstof op te slaan in de bodem. Zij schatten dat op 0.1–1 Mg/ha per jaar, afhankelijk van de lengte van de teelt, de biomassa productie en het startgehalte van de bodemorganische stof.

Om inzicht te krijgen in de bijdrage van de verschillende type groenbemesters aan het bodemorganische-stofgehalte, is met behulp van de C-module berekend wat in potentie de invloed is van verschillende groenbemesters op de organische stof opbouw. Er is gekozen voor een aantal veelgebruikte groenbemesters, verspreid over de drie genoemde groepen: rode klaver (lage EOC), bladrammenas (lage EOC), gele mosterd (lage EOC), Engels raaigras (hoge EOC) en luzerne (lage EOC). Deze zijn geplaatst in het eerder gebruikte klassieke bouwplan van aardappel, suikerbiet en tarwe. In sommige gevallen zijn er mogelijkheden voor toepassing van organische mest aan toegevoegd. Dat is niet gedaan voor luzerne, omdat dat gewas meetelt voor de mestwetgeving (160 N) en het niet realistisch is om die te begeleiden met organische mest in welke vorm dan ook.

Tabel 3.3 Verwachte verandering van het bodem organisch stofgehalte na **10 jaar** bij toediening van verschillende **groenbemesters** en de daaraan gekoppelde opbrengstverhoging en watervasthoudend vermogen. Bouwplan: een 3-jarige rotatie met suikerbiet, consumptieaardappel en wintertarwe op klei- en zandgrond (gewasresten (incl. stro) ondergeploegd). Uitgangssituatie: 2% organische stof. Berekening met behulp van de C-module.

Groenbemester maatregel	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivuchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivuchten	klei	zand
Bladrammenas						
Bladrammenas (of gele mosterd)	0,50%	5,00%	0,27%	2,67%	4,65	1,81
Idem met rundveedrijfmest (170 kg N/ha)	0,67%	6,67%	0,40%	4,00%	6,20	2,72
idem met vaste mest (170 kg N/ha)	0,77%	7,67%	0,47%	4,67%	7,13	3,17
Rode klaver						
Rode klaver	0,60%	6,00%	0,33%	3,33%	5,58	2,27
Idem met rundveedrijfmest (170 kg N/ha)	0,77%	7,67%	0,47%	4,67%	7,13	3,17
idem met vaste mest (170 kg N/ha)	0,87%	8,67%	0,53%	5,33%	8,06	3,63
Engels raaigras						
Engels raaigras	0,53%	5,33%	0,30%	3,00%	4,96	2,04
Idem met rundveedrijfmest (170 kg N/ha)	0,73%	7,33%	0,43%	4,33%	6,82	2,95
idem met vaste mest (170 kg N/ha)	0,83%	8,33%	0,50%	5,00%	7,75	3,40
Luzerne						
Luzerne	0,57%	5,67%	0,33%	3,33%	5,27	2,27
Luzerne en rode klaver						
Luzerne en rode klaver	0,90%	9,00%	0,57%	5,67%	8,37	3,85

Vergeleken met de uitgangssituatie levert de combinatie luzerne en rode klaver de grootste bijdrage aan het organisch stofgehalte. Als deze combinatie zou worden begeleid met mineraal P en K, mag worden verwacht dat de organisch stof opbrengst hoger uitkomt. Immers voor de stikstofvoorziening zorgen de vlinderbloemigen zelf en P en K voedt hen extra.

Dit is een modelmatige exercitie en laat de relatieve bijdragen zien van groenbemesters aan de opbouw van bodemorganische stof. De combinatie klaver/luzerne komt in de praktijk niet 30 jaar aaneengesloten voor. Dat geldt overigens ook voor de andere groenbemesters, dit in verband met de ziekte druk. Juist de variatie levert een meerwaarde.

3.3.2

Groenbemesters en opbrengst

Rode klaver en Engels raaigras laten na onderwerken een relatief een hoge EOC (1100-1200 kg/ha) achter. Dat betekent dat het volgende gewas een competitie voor stikstof moet aangaan met de micro-organismen die organische stof afbreken. Dat kan leiden tot een tijdelijke dip in de opbrengst van het volggewas. Een snelwerkende meststof kan die dip voorkomen.

Gaudin et. Al. (2015) constateren dat de opbrengst van sojaboon en maïs (in rotatie) langdurig voordeel heeft wanneer het wordt gecombineerd met teelt van tarwe als groenbemester, dan wel in combinatie met rode klaver en/of alfalfa als groenbemester. Het gaat om orde van groottes van 5-15%. Larkin et. Al. (2010) constateerden in een studie naar ziekteverendheid van groenbemesters een additioneel positief effect van groenbemesters op de opbrengst (4%).

Poeplau et. Al. (2015) lieten zien dat raaigras als groenbemester in eerste instantie geen effect heeft op de opbrengst van het hoofdgewas. Wellicht is dat toe te schrijven aan de competitie om stikstof met bodemmicro-organismen.

Tabel 3.4: Relatie tussen gebruik van groenbemesters en gewasopbrengst (meta analyse door Blanco-Canqui et al., 2015).

Studie	Regenval	Groenbemester			Opbrengst Verschil (%)
		niet	wel	type	
Balkcom and Reeves (2005)	1560	5,2	6,9	Hennep	33%
		5,7	6,9	Hennep	21%
		6,3	6,9	Hennep	10%
Decker et al. (1994)	1192	7,7	8,7	Wikke	13%
		7,7	8,9	Erwt	16%
		7,7	8,1	Klaver	5%
		7,7	7,2	Tarwe	-6%
Ewing et al. (1991)	1190	6	5,5	Rode klaver	-8%
		3,6	2,7	Rode klaver	-25%
Mitchell and Teel (1977)	1150	4,4	4,7	Haver	7%
		4,4	5,6	Haver + Wikke	27%
		4,4	5,5	Haver + Klaver	25%
		4,4	4,5	Rogge	2%
		4,4	5,7	Rogge + Wikke	30%
Maughan et al. (2009)	1030	4,4	5,3	Rogge + Klaver	20%
		10,8	11,5	Haver + Rogge	6%
Decker et al. (1994)	1064	6,3	8,9	Wikke	41%
		6,3	8,4	Erwt	33%
		6,3	8,7	Klaver	38%
		6,3	6,9	Tarwe	10%
Duiker and Curran (2005)	1006	9,7	10,02	Rogge	3%
Henry et al (2010)	859	6,2	7,3	Rode klaver	18%
		7,3	7,9	Rode klaver	8%
Gemiddeld					14%

Blanco-Canqui et al. (2015) hebben een meta analyse gedaan voor groenbemesters (Tabel 3.4). Het zijn studies die in verschillende klimaatzones zijn gedaan en waar de effecten maximaal 4 jaar zijn gevolgd. Het levert een gevarieerd beeld op in de relatie tussen groenbemester en opbrengst. Op basis van significante verschillen tussen opbrengsten concluderen de onderzoekers dat er in acht studies een

positief effect is, in zes studies is er geen effect en in drie studies is er een negatief effect van groenbemesters op de gewasopbrengst. De gemiddelde verschillen wijzen op 14% verschil tussen wel een geen groenbemester. Het lijkt erop dat waar leguminosen zijn gebruikt als groenbemester het verschil in opbrengst vrijwel steeds groter is in vergelijking met niet-leguminosen (m.u.v. Ewing et al., 1991). Meerdere factoren zijn verklarend voor de verschillen zoals de hoeveelheid neerslag, soort groenbemesters, plek in het teeltplan, groeiseizoen, grondbewerking, en het aantal jaar teelt van groenbemester. Vooral de waterbeschikbaarheid is een belangrijke factor. Hoe vochtiger, hoe minder concurrentie de groenbemester heeft met het hoofdgewas.

Deze verschillen in opbrengst – op korte termijn – zijn hoger dan de voorspelde verschillen in opbrengst die voortkomen uit de modelmatige benadering via de C-module (tabel 3.3). Aangezien de verschillen in Blanco-Canqui et al. (2015) grotendeels zijn terug te voeren op het gebruik van leguminosen, constateren wij dat de opbrengstverhoging die wordt voorspeld bij gebruik van klaver en luzerne onderschat worden door gebruik van de C-module. De rekenregels gaan uitsluitend uit van koolstof opbouw (organische stof) in relatie tot vergroting opbrengst. Overigens zijn de beide geteste leguminosen ook in deze module het meest succesvol. Uiteindelijk moet het effect van leguminosen als groenbemester op de opbrengst hoger moet worden ingeschat. Hoeveel hoger? De tabel van Blanco-Canqui et al. (2015) geeft een indicatie (maar let op de verschillen) en opgemerkt moet worden dat de meeste studies in andere klimaten zijn gedaan dan de Nederlandse.

3.3.3

Groenbemesters en watervasthoudend vermogen

Groenbemesters verbeteren de bodemstructuur, met name die met een intensieve wortelontwikkeling, zoals luzerne of gras. Tegelijkertijd zorgt het voor een betere aggregaatstabiliteit. Dankzij de effecten van beworteling, organische stof opbouw, bodemstructuur en porositeit, wordt de permeabiliteit en het waterbergend vermogen van de bodem vergroot. Zelfs nadat de wortels zijn afgestorven maken de wortelkanalen waterafvoer mogelijk. Het effect hiervan is afhankelijk van de gekozen groenbemester o.a. de doorworteling en de C/N verhouding.

De invloed van groenbemesters op de waterhuishouding is meegenomen in de meta-analyse van Blanco-Canqui et al. (2015). Bij het langjarig toepassen van groenbemesters tendeert de waterinfiltratie naar een verdubbeling. Groenbemesters verbeteren de waterinfiltratiecapaciteit via hun positieve effect op stabielere aggregaten. Bodemaggregaten zijn 1,2 tot 2 keer zo groot met groenbemesters dan zonder groenbemesters (Blanco-Canqui et al., 2015). In zeven van de 11 studies (met o.a. gerst, raaigras, hennep, wikke, klaver) kwam naar voren dat door de groenbemesters de bodem meer water kan vasthouden in de aggregaten.

3.3.4

Groenbemesters en waterkwaliteit

In de meta-analyse van Blanco-Canqui (2015) is eveneens de rol van groenbemesters voor af- en uitspoeling van agro-chemicaliën (nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen) meegenomen. Daarin worden enkele studies meegenomen uit de Verenigde Staten in gebieden met een helling van 5% of meer. Die laten zien dat groenbemesters een meer dan substantiële bijdrage leveren aan het tegengaan van af- en uitspoeling. Daarvoor zijn in hellingrijke gebieden in Nederland inmiddels ook maatregelen genomen (Zuid Limburg). Op alle zandgronden is inmiddels het telen van een vanggewas na maïs verplicht om de uitspoeling van nitraat tegen te gaan. Daar is nog meer op te winnen door bijvoorbeeld het vanggewas al tijdens de teelt in te zaaien.

3.3.5

Conclusie groenbemesters

- Groenbemesters kunnen belangrijk bijdragen aan verhoging bodemorganische stof, een factor 1,5 tot 2, in vergelijking met rundveedrijfmest. In het laatste geval gaat het om de combinatie van rode klaver en luzerne.
- De vertaling van de verhoogde bodemorganische stof naar een proportionele hogere opbrengst gaat niet vanzelf op. In sommige gevallen neemt de opbrengst minder snel toe, in anderen juist sneller. Dat laatste is vaak het geval bij leguminosen.
- Groenbemesters kunnen in de winter belangrijk bijdragen aan tegengaan van afspoeling en dus de waterkwaliteit bevorderen.
- Langjarig toepassen van groenbemesters vergroot het waterbergend vermogen van de bodem, dankzij toename in de bodemorganische stof. Sommige gewassen/groenbemesters (rietzwenkgras, bladrammenas, gele mosterd, rode klaver, luzerne) wortelen diep en zijn dus in staat om de bodemstructuur te verbeteren. Het kwantitatieve effect hiervan op het waterbergend vermogen is niet eenvoudig vast te stellen en er is geen literatuur op gevonden. Groenbemesters groeien gedeeltelijk in de winter en in die periode is er in ieder geval een gerede kans op afspoeling van nutriënten en daarmee helpen groenbemesters om de waterkwaliteit goed te houden.

3.4

Ruimer bouwplan

Het strategisch kiezen van het bouwplan kan bijdragen aan de opbouw van bodemorganisch stof. Dit staat in de praktijk bekend als het verruimen van het bouwplan, waarbij minder rooivruchten worden geteeld dan in intensieve bouwplannen met relatief veel rooivruchten. Ook met intensieve bouwplannen kan het bodemorganisch stofgehalte worden versterkt, mits voldoende organische mest en compost wordt toegepast.

3.4.1

Opbouw bodemorganische stof

Door het bouwplan te verruimen wordt – door het relatief grotere aandeel rustgewassen - extra effectieve organische stof toegevoegd en dit maakt dat het bodemorganische-stofgehalte stijgt. Er zijn enkele bouwplannen geanalyseerd met de C-module om het (theoretische) effect te bepalen volgens de rekenregels op opbrengst en waterhuishouding. Er is gekozen voor de volgende bouwplannen (tabel 3.5):

- Klassiek bouwplan (1:3) met aardappel, suikerbiet en tarwe (33% rustgewas). Dit bouwplan is steeds gebruikt als referentie. Bij de ruimere bouwplannen gaat het om het vergroten van het aandeel rustgewas (van 33% -> 50%), waarbij gebruik wordt gemaakt van verschillende combinaties:
- Zelfde bouwplan, maar dan een vierde gewas, luzerne;
- Idem en dan met luzerne en rode klaver als mix in het vierde jaar;
- Zelfde bouwplan en dan met een extra jaar tarwe in het vierde jaar.
- Zelfde bouwplan en dan met een jaar tarwe en jaar rode klaver.

Alle bouwplannen zijn toegepast met en zonder toepassing van rundveedrijfmest.

Tabel 3.5 Verwachte verandering van het bodem organisch stofgehalte na **10 jaar** bij een variatie aan **bouwplannen** en de daaraan gekoppelde opbrengstverhoging en watervasthoudend vermogen. Gewasresten (incl. stro) worden ondergeploegd. Uitgangssituatie: 2% organische stof. Berekening met behulp van de C-module.

Bouwplan maatregel	klei		zand		extra mm waterberging	
	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	extra organische stof	extra opbrengst rooivruchten	klei	zand
3 jarig aardappel, suikerbiet, tarwe						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,43%	4,33%	0,23%	2,33%	4,03	1,59
Zonder rundveedrijfmest	0,27%	2,67%	0,10%	1,00%	2,48	0,68
4 jarig met luzerne						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,40%	4,00%	0,20%	2,00%	3,72	1,36
Zonder rundveedrijfmest	0,23%	2,33%	0,10%	1,00%	2,17	0,68
4 jarig met luzerne en rode klaver						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,73%	7,33%	0,43%	4,33%	6,82	2,95
Zonder rundveedrijfmest	0,57%	5,67%	0,30%	3,00%	5,27	2,04
4 jarig met 50% tarwe						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,50%	5,00%	0,27%	2,67%	4,65	1,81
Zonder rundveedrijfmest	0,33%	3,33%	0,17%	1,67%	3,10	1,13
4 jarig met tarwe en rode klaver						
Met rundveedrijfmest (170N/ha)	0,83%	8,33%	0,50%	5,00%	7,75	3,40
Zonder rundveedrijfmest	0,63%	6,33%	0,37%	3,67%	5,89	2,49

De resultaten liggen in het verlengde van die van de groenbemesters: meer leguminosen (luzerne, rode klaver heeft meer effect op het bodemorganisch stofgehalte dan meer granen (tarwe) in het bouwplan.

3.4.2

Bouwplan en gewasopbrengst

Het is bekend dat verschillende bouwplannen substantieel bijdragen aan de variatie in opbrengst. Het mechanisme erachter is nog niet altijd opgehelderd (Bennett et al., 2012). In ieder geval speelt ziekteonderdrukking daarin een belangrijke rol. Tegelijkertijd zijn er in toenemende mate signalen dat soort-specifieke schimmel- en bacteriegemeenschappen in de bodem invloed hebben op nabije- (intercropping) of volg-gewassen (rotatie). Deze invloed kan positief of negatief zijn op de groei van het gewas. De substantieel hogere gewasopbrengsten in gewasrotaties (tot 20%) treden veelal op als in die rotaties rustgewassen, en specifiek leguminosen, zijn opgenomen (zie ook groenbemesters). Dat is dan niet alleen een resultaat van verhoging van de bodemorganische stof, maar ook van een extra stikstof bron die geleidelijk beschikbaar kan komen voor het gewas.

3.4.3

Effect op waterbergend vermogen

De hoogste stijging in bodemorganische stof komt door een combinatie van tarwe en rode klaver. Deze grond kan, gebaseerd op de rekenregel uit paragraaf 2.3, op zand en kleigronden respectievelijk 3,4 mm tot 7,75 mm meer water vasthouden in de bouwvoor (0-30 cm) na 10 jaar. De essentie is dat door een ruime gewasrotatie de bodemstructuur verbetert (Ball et al., 2005). De mate waarin dat gebeurt, is afhankelijk van het gewas dat in de rotatie zit. Elk gewas heeft een eigen specifieke bijdrage aan het Effectieve Organisch Koolstof (EOC) gehalte in de bodem. Deze verschillende vormen van koolstof input hebben verschillende effecten op de formatie van bodemaggregaten (Jastrow et al., 1996). De bodemstructuur kan gedefinieerd worden als de ruimtelijke indeling van bodemdeeltjes, aggregaten en poriën. Deze kenmerken bepalen hoe snel gas en water door

de bodem kan bewegen. Omdat een ruime gewasrotatie invloed heeft op de bodemstructuur, heeft deze maatregel ook indirect effect op het waterbergend vermogen van de bodem.

3.4.4

Conclusie bouwplan

- Een ruimer bouwplan met rustgewassen leidt op zichzelf nog niet tot substantieel hogere bodemorganisch stof gehalten, terwijl de opbrengsten wel hoger kunnen liggen.
- De samenstelling van het ruimere bouwplan is meer bepalend en dan laat met name rode klaver zien dat die extra bodemorganische stof aanvoert.
- De conclusies van de groenbemesters laten zien dat in dat geval er ook een extra impuls wordt gegeven aan de hoogte van de opbrengst.

4

Bodemstructuur

De bodemstructuur krijgt de laatste jaren meer aandacht in de landbouw. De aanleiding is dat boeren in de praktijk problemen ervaren en er onderzoek naar wordt gedaan. Plassen blijven op het land staan en “vergeleken met 20 jaar geleden is een dubbel aantal pk’s nodig om een schaar door het land te trekken” (pers. med. Arnold Michielsen, Dronten). Er is dus sprake van verdichting, zowel van de bovengrond als van de ondergrond en beide kennen een verschillend mechanisme waarlangs het ontstaat en waarlangs het weer ongedaan kan worden gemaakt.

De structuur van de bodem wordt bepaald door de samenhang van de bodemdeeltjes. Hoe beter deze samenhang, hoe meer water geborgen kan worden, hoe beter planten kunnen doorwortelen, en hoe minder water afspoelt naar het oppervlaktewater. Verschillende factoren bepalen de bodemstructuur, zoals het organische-stofgehalte, de activiteit van het bodemleven, de bewerkingen op het land en het bijbehorende type bouwplan.

De bodemstructuur verslechtert door bewerkingen op het land onder natte condities, zware wiellast en hoge bandenspanning, die de druk op de bodem verhogen waardoor deze verdicht. Problemen met verdichting komen overal ter wereld voor, maar zijn het meest frequent op plaatsen waar land- of bosbouw wordt bedreven en zware machines worden ingezet.

Verdichting van de bovengrond is gemakkelijker op te heffen dan die in de ondergrond. De bovengrond wordt bewerkt en daar kan gemakkelijker organisch materiaal aan worden toegevoegd, waardoor het bodemleven kan worden gestimuleerd. Ondergrondverdichting daarentegen is deels onomkeerbaar, en dus blijvend.

Het voorkomen van verdichting is belangrijk om de bewortelbaarheid en het waterconserverend vermogen, c.q. de natuurlijke drainage van de bodem te handhaven en te stimuleren. Beiden dragen direct bij aan het verhogen van de productiviteit van het gewas.

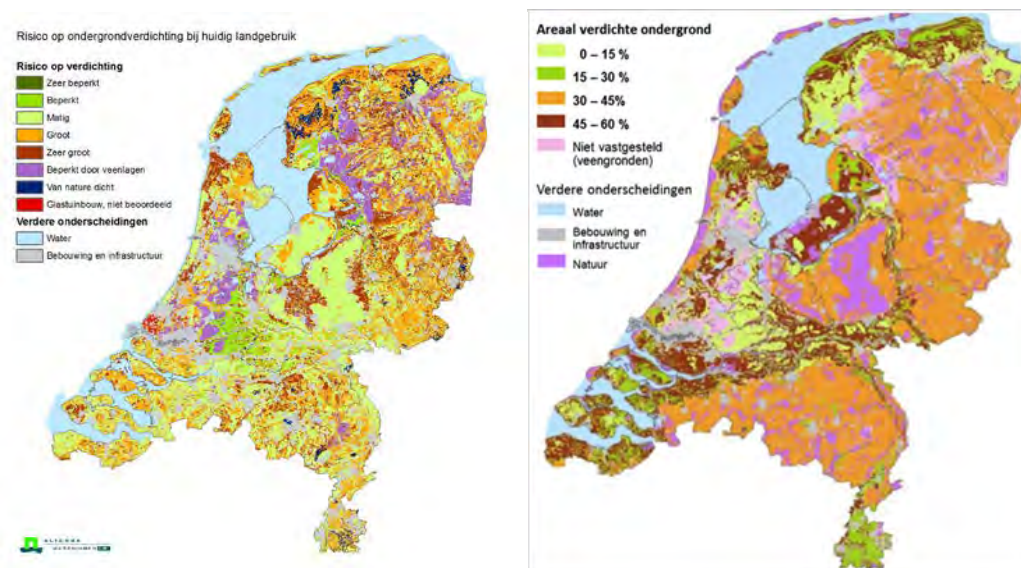
4.1 Kenmerken van bodemverdichting

Het mechanisme van bodemverdichting is dat de bodemstructuur onder druk bederft, d.w.z. dat de poriën worden dichtgedrukt, waardoor de bulkdichtheid toeneemt (kg/l) en de infiltratiesnelheid van water (mm/min) terugloopt. Er zijn tegenkrachten die de porositeit van de bodem weer kan versterken. Dat kan vorst zijn, krimp, zwel, plantenwortels en bodemleven. Ook de chemische samenstelling kan een bijdrage leveren; een hoog CEC (kleigrond) en een hoog bodemorganische-stofgehalte zorgen voor een betere bodemstructuur.

De basis voor de bodemstructuur is de vorm en stabiliteit van de aggregaten. Naarmate deze meer afgerond zijn en niet blokkig, prismatisch of plaatvormig, is de bodem luchtiger. Die aggregaat stabiliteit is afhankelijk van de juiste verhouding en verbinding tussen minerale delen en organische stof aangevuld met Calcium. Aggregaten worden samengeperst door een grote druk van machines. De tegenkrachten van verdichting mogen we eerder in de bovengrond verwachten dan in de ondergrond (namelijk vanaf de ploegzool). De ondergrondverdichting is dus onherroepelijker. Anders dan de bovengrond wordt de ondergrond niet jaarlijks losgemaakt omdat de kosten hoog zijn en goede (droge) omstandigheden voor het losmaken van de ondergrond zeldzaam zijn. Bovendien is een losgemaakte ondergrond erg kwetsbaar voor herverdichting, waarbij een dichtere ondergrond met slechtere structuur en bodemfysische eigenschappen ontstaat dan bij de oorspronkelijke verdichte laag het geval was. Het natuurlijk herstelvermogen van de ondergrond is lager dan van de bovengrond omdat fysische herstelmechanismen zoals vorstwerking, uitdroging en zwel en biologische herstelprocessen door bodemleven en beworteling met de diepte sterk afnemen. Vooral bij zandgronden en lichte zavel waar krimp door uitdroging geen rol speelt, is ondergrondverdichting een cumulatief proces, dat op de lange duur resulteert in een homogeen verdichte ondergrond.

4.2 Bodemverdichting in Nederland

Een onderzoek naar het risico op ondergrondverdichting bij het huidige landgebruik met het daarbij gebruikte landbouwmachinepark laat zien dat dit risico groot is en dat alleen het ingeschatte natuurlijk herstel het risico nog beperkt (van den Akker et al., 2012, Fig. 4.1, links). Naar aanleiding van dit onderzoek is een globale inventarisatie uitgevoerd naar de dichtheid van de ploegzool (de laag direct onder de bouwvoor). Deze inventarisatie liet zien dat ongeveer 45% van alle Nederlandse ondergronden is verdicht (van den Akker & Hendriks, 2015, van den Akker et al. 2014, Fig. 4.1, rechts). Bij dit percentage moet niet worden gedacht dat een landbouwperceel voor 45% van zijn oppervlakte is verdicht. Meestal is de ondergrond van een perceel vrij gelijkmatig verdicht, waarbij de kopeinden extra zijn verdicht door het intensievere landbouwverkeer. De inventarisatie laat zien dat ondergrondverdichting in Nederland één van de meest voorkomende vormen van bodemdegradatie is.



Figuur 4.1. Berekening van respectievelijk het risico op ondergrondverdichting (links) en een schatting van de actuele verdichting van de ondergrond (rechts). Uit respectievelijk van den Akker et al. (2013) en van den Akker et al. (2015)

4.3 Verdichting van de bodem: oorzaak en herstel

De verdichting van de bodem wordt toegeschreven aan de zwaardere machines die worden gebruikt in de landbouw in combinatie met het werken op het land onder natte omstandigheden. Dure machines moeten maximaal uren draaien bij loonwerkers en boeren en dan ontbreekt de tijd om goed weer af te wachten. De bieten die aan het eind van het jaar worden geoogst, brengen meer op en dat op een moment dat de kans op structuurbederf het grootst is.

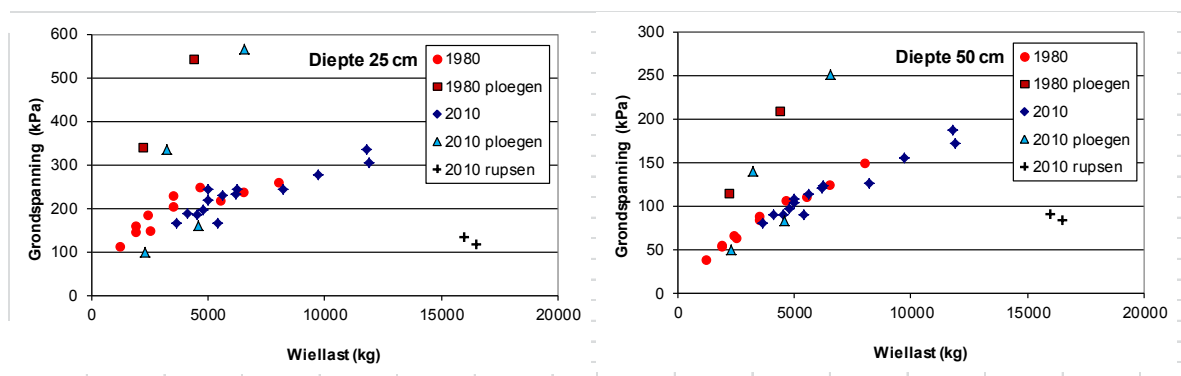
Speciale aandacht verdient de ploegzool: waar boven- en ondergrondverdichting zich onderscheiden. Het zijn de tractorbanden die tijdens het ploegen deze zool veroorzaken. Daar ligt de scheiding tussen dat wat jaarlijks (akkerbouw) wordt losgemaakt en dat waar dat niet gebeurt.

Andere factoren die de structuur niet ten goede komen zijn klimaatsverandering en specifiek de verminderde vorst frequenties. Dat laatste geldt vooral voor de bovengrond. Een langere vorstperiode verbetert de structuur van de bovengrond door uitzetten en daarna weer krimpen.

Het organisch stofgehalte is gemiddeld genomen niet dalend in Nederland. Agrariërs – en zeker ook veel akkerbouwers – investeren daar volop in. Voor het functioneren van de organische stof als structuurversterker moet het wel een levendige organische stof zijn. Het bodemleven, de verschillende soorten organismen die bodemorganische stof afbreken, vraagt steeds meer aandacht, zeker bij intensief grondgebruik. En eenmaal compact, gaan regenwormen dat niet weer opheffen (Van de Akker et al 2012).

Compactie wordt uitgedrukt in termen van *bodemsterkte*. Dit geeft de weerstand weer tegen de penetratie van de wortel in de bodem. De wiellast van een machine oefent een *grondspanning* uit op de bodem. Die spanning mag *een kritische sterkte van de bodem* niet overschrijden. Die sterkte en dus de kritische grondspanning is grondsoort-specifiek en verschilt ook voor verschillende dieptes. Die sterkte wordt bepaald met grondmechanische proeven en is een functie van textuur, organische stof, bulkdichtheid, e.d. Als de wiellast de kritische grondspanning overschrijdt, verdicht de bodem onherroepelijk.

In veel gevallen wordt nu de kritische grondspanning (uitgedrukt in kPa) op 25 cm diepte en in een aantal gevallen op 50 cm diepte overschreden (op zandgronden is die 150 en op kleigronden max 280 kPa, fig. 4.2). De gemiddelde wiellast is in 30 jaar verdubbeld, waardoor de grondspanning ook toeneemt. Bij rupswielen worden die grondspanningen teruggedrongen.



Figuur 4.2. Effect van wiellast op de grondspanningen op een diepte van 25 en 50 cm in 1980 en 2010. De twee wiellasten boven de 15000 kg zijn van rubber rupswielen (uit: Vermeulen et al., 2013, berekend met het model SOCOMO).

In nattere gronden kan naast verdichting de zogenoemde verkneding ontstaan: doorgaande macroporiën die de verdichting hebben overleefd, worden alsnog samengedrukt dan wel onderbroken. Whalley et al. (2012) laten zien dat door verdichting alléén de verzadigde doorlatendheid van een zware kleigrond met een factor 50 afneemt. Door de grond bovendien nog te vervormen, neemt de verzadigde doorlatendheid nog eens met meer dan een factor 10 af.

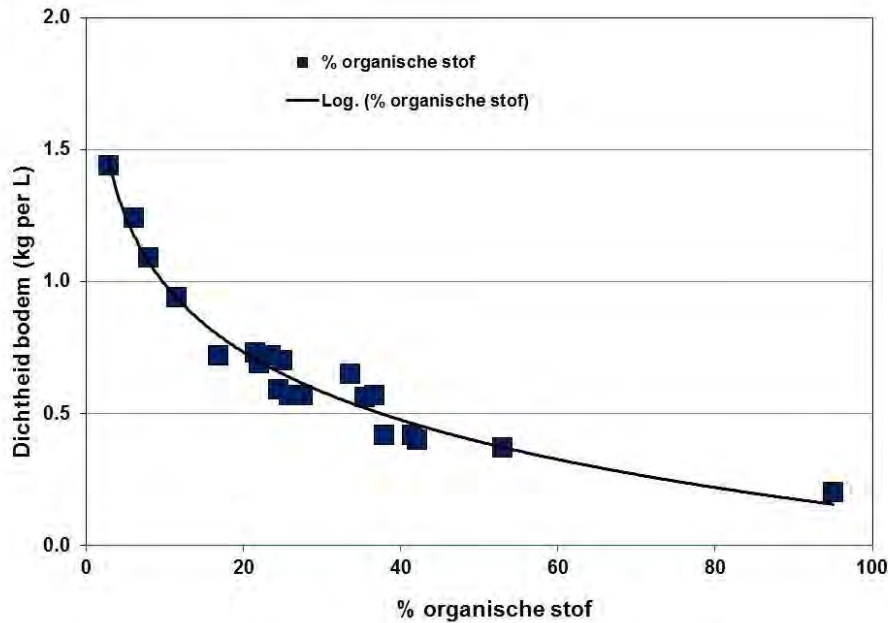
Het natuurlijk herstel van de verdichte ondergrond verloopt heel langzaam. Afgemeten aan het productieverlies duurde in experimenten met gecontroleerde verdichting de nawerking nog minimaal 15 jaar (Håkansson et al., 1987; Håkansson en Reeder, 1994; Alakukku, 2000). Schjønning et al. (2015) laten zien dat – in het Finse klimaat – de gecontroleerde en eenmalige ondergrondverdichting na 30 jaar nog zichtbaar is in de structuur van de ondergrond. Dat betekent dat er een grote behoefte is aan enerzijds maatregelen om (verdere) verdichting van de bodem te voorkomen, en anderzijds om verdichte ondergrond actief los te maken. In hoofdstuk 5 worden enkele maatregelen gedetailleerder genoemd, die leiden tot voorkomen van de ondergrondverdichting: vaste rijpaden, verlagen van de wiellast, verlagen van de bandenspanning en gebruik van een diepwortelende teelt. Met de laatste maatregel – die ook al in hoofdstuk 3 is genoemd - wordt tevens een strategie ingebracht die kan leiden tot verminderen van de bestaande verdichting. De maatregelen uit hoofdstuk 3 spelen allemaal een rol in het voorkomen van de verdichting van boven- en ondergrond: organische stof heeft namelijk een direct effect op de structuur van de bovengrond.

4.4 Bodemverdichting en organische stof

Een hoger organische-stofgehalte zorgt voor stabielere aggregaten (Leroy, 2008, Leroy et al., 2008, Kluge en Bolduan, 2001) doordat bodemdeeltjes meer aaneen klitten. Dit gebeurt door rechtstreekse binding met klei- en humusmoleculen of indirect via activering van het bodemleven (meer gangen, macro-poriën, etc.). Leroy et al. (2008) laat zien dat aggregaten stabiel zijn bij de toepassing van compost en een combinatie van drijfmest met compost. Doordat compost het bodemleven voedt en activeert en hierdoor meer organische stof in de bodem komt, draagt het toedienen van compost bij aan een betere bodemstructuur. Drijfmest toedienen is onvoldoende, aangezien deze een verzurende werking heeft, en dat heeft weer een negatief effect op de regenwormpopulatie en dus op de bodemstructuur (Curry, 2004). Het gunstige effect van organische bemesting waaronder compost op het bodemleven en daaropvolgend de bodemstructuur werd ook bevestigd door een Zwitserse langjarige proef (Mader et al., 2002). Zwart et al. (2013) meten een negatief verband tussen het organische-stofgehalte van de bodem en de bulkdichtheid van de bodem (figuur 4.3 op de volgende pagina).

De rol van organische stof op de bodemstructuur verschilt per bodemtype:

- Bij *kleigrond* zorgt organische stof voor een betere lucht- en waterhuishouding en bewerkbaarheid.
- Bij *zand* zorgt organische stof voor meer beschikbaar vocht, een mindere droogtegevoeligheid, een beter vasthouden van voedingsstoffen, en het binden van de zanddeeltjes.
- Bij *zavel* (grof zand met 8-25 % lutum) zorgt organische stof voor een betere lucht- en waterhuishouding en een verminderde slempgevoeligheid.



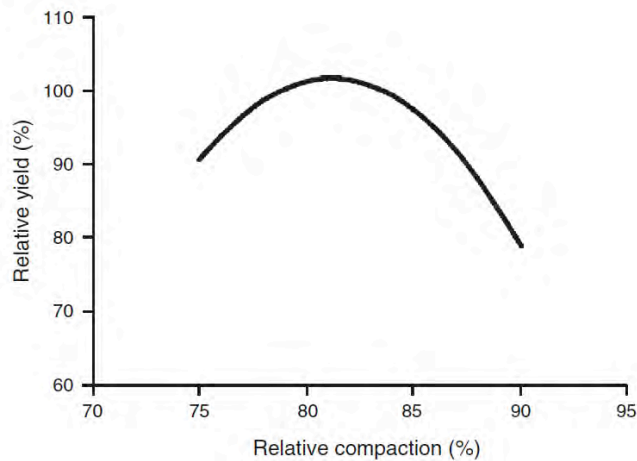
Figuur 4.3. Relatie tussen % organische stof en de bulkdichtheid van de bodem. Data zijn ontleend aan proeven met zetmeelaardappelen in de Veenkoloniën tussen 1978 en 1982 (Zwart et al, 2013)

4.5 Bodemverdichting en gewasgroei

Een verdichte ondergrond verstoort de gewasgroei. Een aantal plantenwortels moet in de ondergrond kunnen doordringen om in droge perioden water aan te voeren. Daarbij nemen zij uit de bovengrond geloopte voedingsstoffen mee terug en ontwikkelen zij nieuwe macro-poriën (kanalen) voor watertransport en conservering.

Uit een analyse van een – via Unitip - selecte groep telers bleken deze een 20% hogere opbrengst te hebben dan het gemiddelde en dit was terug te voeren op verschillen in de verzadigde waterdoorlatendheid van de ondergrond (Hanse et al, 2011). Deze verschillen werden gerealiseerd door een lagere bandenspanning (5.3). Een door verdichting gedwongen ondiepe beworteling kan in drogere tijden leiden tot wel 40% opbrengst reductie zoals Loon en Bouma (1978) bij aardappelen lieten zien. Aardappelen vervormen bovendien gemakkelijker bij bodemverdichting, waardoor dus ook de kwaliteit er onder kan leiden (Stalham et al., 2007).

Alblas et al. (1994) schatten de opbrengstreductie door verdichting voor mais gemiddeld op ruim 7% op basis van een experiment dat op vier verschillende zandgronden is uitgevoerd: twee met een hoge en twee met een lage grondwaterstand. De bewortelingsdiepte verminderde substantieel bij experimentele verdichting en dat ging gepaard met een aanzienlijke opbrengst reductie tot ruim 30%. In het geval van een hogere organisch stofgehalte in boven én ondergrond (8%) trad dat effect in veel geringere mate op en dat laat zich verklaren door het betere watervasthoudende vermogen van de bovengrond.



Figuur 4.4. Relatie tussen bodemverdichting en opbrengst (zie tekst hiernaast)

Carter (1990) in Drewry et al. (2008) ontwierp een relatie tussen de relatieve dichtheid en productie van zomertarwe en zomergerst (figuur 4.4). De relatieve compactie is de gemeten bulkdichtheid gedeeld door de maximale bulkdichtheid. Het laat zien dat er een bepaald optimum is (100% opbrengst) en dat daaronder (grotere verdichting) neemt de productiviteit af. Data laten zien dat de productie van erwten bij een compactie van 20% onder het optimum, de productie al met 25% terugloopt. Ook andere studies laten een lineaire relatie zien tussen bulkdichtheid en productie voor bijvoorbeeld maïs (Drewry et al. (2008). Anderson et al. (2013)

constateerden een reductie in opbrengst van tarwe van 8-9% door verdichting).

4.6 Bodemverdichting en waterconservering

Bodemverdichting gaat gepaard met een afname van het aandeel macroporiën en een toename van het aandeel microporiën. De infiltratie snelheid wordt lager en daarmee neemt de kans toe dat het verticale transport van regenwater verschuift naar het horizontale, zowel *in* de bodem als *op* de bodem (run-off). Dit treedt meer op naarmate de bodem meer verdicht is. Daardoor gaan meer agrochemicaliën (nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen) verloren naar het oppervlaktewater. Ook de ondergrond heeft hierin zijn functie: transport van water naar dieper gelegen bodemlagen om de voorraad aan te vullen en om tegelijkertijd de naar beneden gespoelde nutriënten weer omhoog te transporteren naar de plantenwortels.

4.7 Conclusie bodemverdichting

- Bodemverdichting komt voor in de bovengrond en ondergrond. Die in de bovengrond is gemakkelijker te herstellen dan die in de ondergrond.
- Het risico op onomkeerbare bodemverdichting is op zandgronden groter dan op kleigronden.
- Levende organische stof is belangrijk voor voorkomen van bodemverdichting in de bovengrond;
- Bodemverdichting leidt al snel tot een vermindering van de opbrengst van 10% (ondergrens). Ook de kwaliteit van de gewassen kan teruglopen. De mate van opbrengst reductie is onder meer afhankelijk van de optredende droogte stress.
- De infiltratie snelheid neemt af bij verdichting en daardoor kan een grotere run-off ontstaan.

5

Maatregelen bodemverdichting

Bij maatregelen gaat het in eerste instantie om de vraag hoe bodemverdichting kan worden voorkomen en in tweede instantie hoe verdichte bodems weer blijvend los gemaakt kunnen worden. Met name dat “blijvende” is belangrijk. Het herstel vermogen is gering zoals in hoofdstuk 4 is weergegeven.

Een belangrijke voorwaarde om bodemverdichting te voorkomen is *een goede drainage* van de grond. Droge grond is sterker en minder gevoelig voor verdichting. Zo lang de ondergrond zuurstofloos is functioneren de biologische processen onvoldoende en kunnen de wortels zich onvoldoende door de bodem verspreiden.

Specifieke maatregelen om bodemverdichting tegen te gaan, zijn bijvoorbeeld:

- Zorgen voor voldoende organische stof in de bodem en een organische stof waar leven in zit (zie hoofdstuk 2 en 3);
- Het introduceren van vaste rijpaden (*controlled traffic*), waardoor slechts een beperkt deel verdicht en de rest vrijwel helemaal niet. Zie hoofdstuk 5.1
- Vermindering van de wiellast, zie hoofdstuk 5.2
- Vermindering van de bandenspanning, zie hoofdstuk 5.3
- Teelt van diepwortelende gewassen, zie hoofdstuk 5.4

Deze maatregelen worden nu achtereenvolgens gedetailleerder besproken en aangegeven in hoeverre er inzicht is in de opbrengstverbetering die de maatregel met zich meebrengt. De verbetering in waterbergend vermogen wordt verder niet uitgewerkt, omdat daar maar zeer beperkte en specialistische kennis over bestaat die op dit moment niet kan worden vertaald naar de praktijk.

5.1 Vaste rijpaden

5.1.1 Opbrengst

In het onderzoek van Vermeulen et al. (2007) bleek de opbrengst van de tuinbouwgewassen bij vaste rijpaden bij twee van de vier gewassen hoger uit te vallen: bij spinazie en erwt. Bij wortel en ui trad dat verschil niet op. Antille et al. (2016) laten zien dat in Australië graanopbrengsten met 10-15% toenemen wanneer vaste rijpaden worden toegepast. Lamers et al. (1986) rapporteren over een 8 jaar durend experiment met vaste rijpaden en maten tot 10% opbrengst stijging bij met name rooigewassen. Vermeulen & Klooster (1992) laten een soortgelijk resultaat zien. Tullberg et al. (2007) ziet een 5 - 10% stijging van graanproductie bij een systeem met vaste rijpaden. Chamen et al (2015) laat zien in welke mate de productie van verschillende gewassen wordt beïnvloed door (willekeurig) berijden van het land, zie figuur 5.1 op de volgende pagina. Vermijden van verdichting blijkt gemiddeld meer dan 10%

extra opbrengst op te leveren. Gasso et al. 2013 berekenen een toename in productie van bieten, aardappelen en uien van 4-14% en van tarwe van 10%.

5.1.2

Natuurlijke drainage

Vermeulen et al. (2007) rapporteren over een veldproef met tuinbouwgewassen waarbij wel en niet vaste rijpaden zijn toegepast. In het perceel met de vaste rijpaden is de bodem minder verdicht. Dat verschil is al snel 20%. Deze verminderde verdichting uitgedrukt in een hoger aandeel lucht-gevulde poriën worden ook in andere experimenten gerapporteerd: in Vermeulen & Klooster (1992) en Vermeulen en Mosquera (2009) tot 30% en Hansa et al. (2011). Tulberg et al. (2007) laat een 10% hogere infiltratiesnelheid zien bij vaste rijpaden.

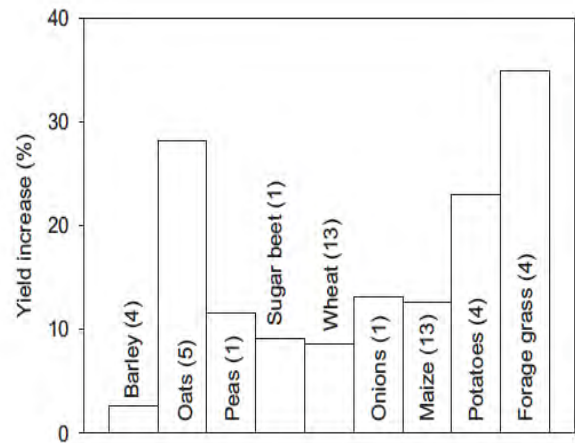


Fig. 5.1. Verhoogde opbrengst van verschillende gewassen wanneer deze niet worden belast met wioldruk; n= aantal studies. (Chamen e.a. 2015)

5.1.3

Emissie broeikasgassen

In het onderzoek van Vermeulen et al. (2007) is gemeten aan emissies van lachgas (N₂O) en methaan (CH₄). Systemen van vaste rijpaden hebben een lagere emissie van beide gassen van meer dan 20%. Bij methaan gaat het om een netto opname. Deze verlaagde emissies zijn direct terug te voeren tot verlaagde anaerobe situaties in de bodem en dus verlaagde anaerobe afbraak van koolstof en nitraat. Ook andere voordelen van een lossere bovengrond bij vaste rijpaden worden frequent gerapporteerd, zoals het lagere gebruik van brandstof en de geringere afspoeling (run off) van agro chemicaliën. Het onderzoek aan vaste rijpaden in Nederland heeft een hoogtepunt gekend in de laatste twee decennia van de vorige eeuw. Australië doet actueler onderzoek hiernaar. Inmiddels, 20 jaar later, zijn de machines nog zwaarder geworden, met wellicht meer aandacht voor brede en zachte banden (zie figuur 5.2). De resultaten uit de gerefereerde studies zullen effecten van vaste rijpaden in de huidige landbouw eerder onder- dan overschatten.

	Wielast (kg)		Bandenspanning (bar)		Grondspanning 25 cm diep (kPa)		Grondspanning 50 cm diep (kPa)	
	1980	2010	1980	2010	1980	2010	1980	2010
Ploegen (klei)	4.350	6.530	2,7	2,7	542	565	209	251
Maaldorsen	5.480	11.770	1,6	2,6	218	335	110	187
Bietenroelen (banden)	6.500	11.900	1,7	2,4	237	304	125	172
Bietenroelen (rupsen)	-	16.000	-	1,00	-	133	-	89

Fig. 5.2. Ontwikkeling bandenspanning en wioldruk in 30 jaar tijd (Vermeulen, et al, 2013)

5.1.4

Conclusie vaste rijpaden

- Consequent toepassen van een systeem van vaste rijpaden heeft een positief effect van minimaal 10% op de gewasopbrengst. Tegelijkertijd verbetert de benutting van het beschikbare water voor het gewas met zeker 10% en zijn er tal van andere voordelen zoals verminderde uitstoot van broeikasgassen (20%), effectievere inzet van nutriënten, verminderd gebruik van brandstof en een verlaagde afspoeling van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen.

5.2

Verlagen wiellast

De druk die een as op de *ondergrond* uitoefent is een functie van het gewicht van de machine in relatie tot het aantal en de breedte, c.q. spanning van de banden. Voor de grootste landbouwbanden zal de wiellast bij bandenspanning van 0,8 en 1,0 bar neerkomen op maximaal 5 – 6 ton. Recent onderzoek naar het effect van de eenmalige zware wielbelasting in de jaren '80 op de bodemstructuur in de ondergrond, laat zien dat deze na 29 jaar nog steeds duidelijk zichtbaar is (zie figuur 5.3 hiernaast).



Fig. 5.3. CT scan macro poriën van de bodem (kleigrond) van ongestoorde bodem (links) en (29 jaar geleden) belaste bodem met 50 kN (Schjønning et al., 2015).

Experimenten met eenmalige wielbelastingen van 50 kN (asdruk van 10 ton) en 90 kN in respectievelijk West Europa (waaronder Nederland) en Noord Amerika laten zien dat de reductie in opbrengst na 5 jaar nog steeds 5% is en na 10 jaar nog 2,5% (Håkansson et al., 1987, Håkansson en Reeder, 1994). Opvolgende belastingen waren steeds 25 kN. Voorhees (2000) rapporteert over experimenten in Minnesota (USA) met wielbelastingen van 90 kN die een permanente verlaging van de mais opbrengst van 6% en in Quebec (Canada) 12% met zich meebrengen. Alakukku (2000) constateert dat die opbrengstderving in Finland op de klei vooral in natte jaren optreedt. In de huidige Nederlandse landbouw komen wiellasten van 90 kN regelmatig voor bij emissiearme mestaanwending en bij de oogst, zodat opbrengstverliezen van die orde door ondergrondverdichting aannemelijk zijn.

5.2.1

Conclusie wiellast

- De hoge wiellast van het huidige machinepark brengt een reductie in opbrengst van minimaal 10% met zich mee. Dit effect zal nog lang na ijlen als nu die wiellast zou worden verlaagd.

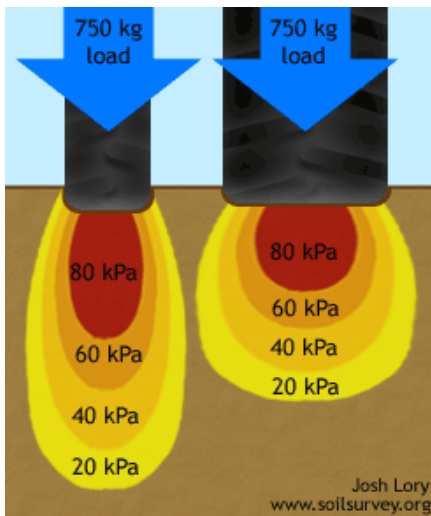


Fig. 5.4. Invloed van bandbreedte op grondspanning

5.3 Verlagen bandenspanning

Verlagen bodemdruk

Waar de wioldruk de meeste invloed heeft op de verdichting van de *ondergrond*, heeft de bandenspanning dat voor de *bovengrond*. Beide krachten zijn complementair aan elkaar. Een maatregel om bodemverdichting te voorkomen en/of te beperken is om de bandenspanning systematisch te beperken tot 80-100 kPa (0,8-1,0 bar) in het algemeen, en tot 40 kPa in het voorjaar door bredere banden te gebruiken met lage bandenspanningen (Perdok & Terpstra, 1983; Perdok & Arts, 1986), zie ook figuur 5.4 hiernaast. In het voorjaar, als de grond natter is, zal de maximale bandenspanning laag moeten zijn om structuurschade te voorkomen. Advies is een bandenspanning van 40 kPa met maximale wiellasten van 5–6 ton (Vermeulen en Perdok, 1994). Een

instrument om die bandenspanning te bepalen is het model Terranimo.

(http://www.soilcompaction.eu/Menu/01_Home/Home.aspx).

Bij toepassing van lage bandenspanning in een lagedruk berijdingssysteem trad tot 6% opbrengstvermindering op (Vermeulen et al., 1992).

5.3.1

Conclusie bandenspanning

- Vermindering van de bandenspanning verlaagt de druk op de bodem en vergroot het areaal waarop die druk wordt uitgeoefend. Het is een alternatief voor vaste rijpaden.

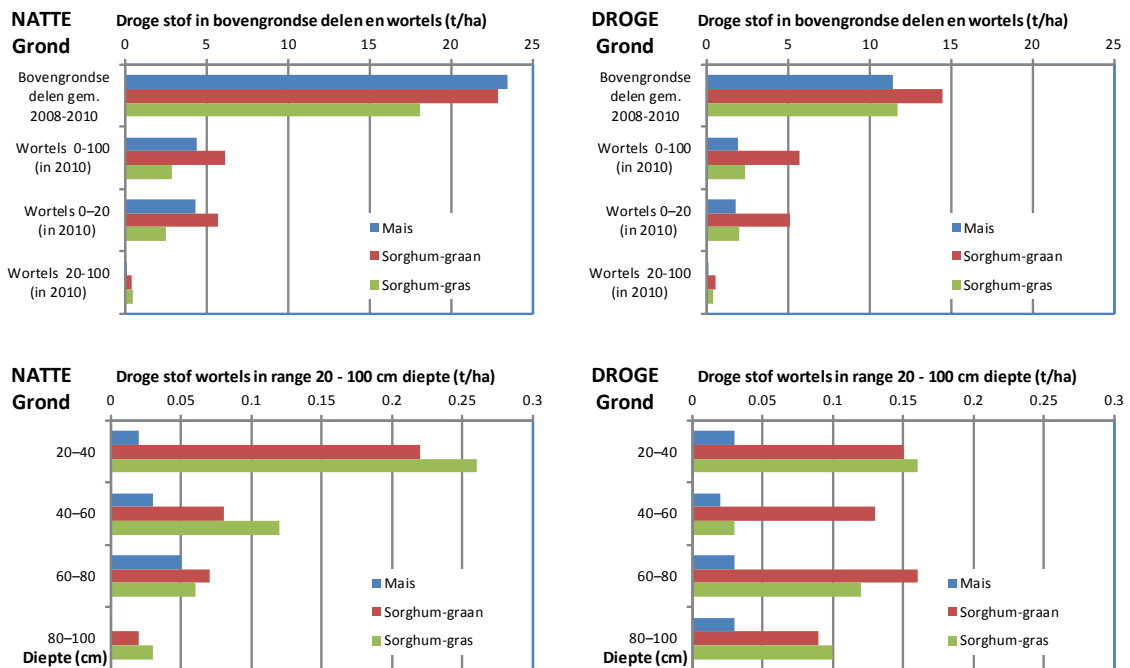
5.4

Diepwortelende gewassen

De vorige 3 maatregelen beogen om verdichting te voorkomen. Is de bodem eenmaal verdicht dan zijn er enkele mogelijkheden om dat terug te draaien en diepwortelende gewassen is er een die dan direct in het oog springt. Vooral bij lichte gronden (zand en licht zavel) is dan het indringend vermogen essentieel, omdat deze lichte gronden bij uitdrogen niet krimpen en daardoor ook geen krimp-scheuren vertonen die de ondergrond toegankelijk maken voor beworteling, bodemleven en water. Naast een betere bodemstructuur, en bodemorganisch stofgehalte, kunnen sommige groenbemesters ook bodemverdichting opheffen en de kwetsbaarheid voor bodemverdichting verminderen (Blanco-Canqui et al., 2015). Dat geldt vooral voor groenbemesters met diepe penwortels, zoals brassicas (radijs) en luzerne (Cresswell & Kirkegaard, 1995). Chen en Weil (2010) vonden dat radijs, koolzaad en rogge onder niet-kerende omstandigheden de bodemlagen van 0-50 cm kunnen losmaken. Op grasland kan als alternatief voor Engels raigras, dat een beperkte bewortelingsdiepte heeft, worden gekozen voor

het veel dieper wortelende rietzwenkgras, dat inmiddels enkele varianten kent die goed verteerbaar zijn en meegevoerd zouden kunnen worden. Een gewas dat nog niet echt is ingevoerd in Nederland, maar waar nieuwe varianten een goed perspectief bieden voor Nederlandse omstandigheden, is sorghum. Uit oriënterend onderzoek blijkt dat het in Nederland qua opbrengst en kwaliteit een goed alternatief vormt voor snijmaïs (de Wit en Van Eekeren, 2015). Dit van oorsprong Afrikaanse gras- en graangewas is diep wortelend en heeft een zeer groot indringend vermogen. Amerikaanse onderzoekers zien het als een uitstekende structuurverbeteraar van verdichte gronden (Clark, 2007). Een proef in Duitsland, nabij Braunschweig, op een lemige zandgrond met een sterk verdichte laag op 60 cm diepte waarin maïs wordt vergeleken met een graan- en een grasvariant van sorghum, laat zien dat er goede kansen zijn voor sorghum (zie figuur 5.5) als bodem verbeterend alternatief voor maïs en wellicht andere gewassen. Naast een veel betere en diepere beworteling dan maïs laat het bovendien veel meer wortelresten, dus organische stof, achter in de bodem (Schittenhelm and Schroetter, 2014). Dit experiment laat zien dat het diepwortelende gewas Sorghum in combinatie met graan wat droge stof productie betreft niet onder doet voor maïs.

Vezelhennep is een gewas dat eveneens diep wortelt en kan worden geteeld zonder gewasbeschermingsmiddelen en meststoffen. Het product begint gaandeweg een markt te ontwikkelen (kleding, papierindustrie, composieten, vloerbedekking, strooisel, e.d.).



Figuur 5.5. Vergelijking droge stof productie snijmaïs, sorghum-graen en sorghum-gras bovengronds en ondergronds op verschillende diepten

5.4.1

Conclusie diepwortelende gewassen

- Diepwortelende gewassen kunnen de verdichting in de ondergrond verminderen doordat zij meer wortels (c.q. organische stof) in de ondergrond brengen al dan niet geholpen door diepspitten.
- Dit komt de natuurlijke drainage van de ondergrond ten goede. Over hoeveelheden is geen literatuur gevonden.
- De opbrengst van diepwortelende gewassen en de toepassing ervan is minder renderend dan van bijvoorbeeld rooigewassen. De rendementen moeten worden samengenomen, omdat diepwortelende gewassen gunstige productievoorwaarden scheppen voor de volgende meer intensieve gewassen.

Referenties

- Alakukku, L. 2000. Response of annual crops to subsoil compaction in a field experiment on clay soil lasting 17 years. *Advances in GeoEcology*, 32: 205-208.
- Alblas, J., Wanink, F., Van den Akker, J., & Van der Werf, H. M. G. 1994. Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of silage maize in the Netherlands. *Soil and Tillage Research*, 29: 157-165.
- Akker, J.J.H. van den, F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke, T. Schouten, 2012. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2409
- Andersen, M.N., Munkholm, L.J., Nielsen, A.L., 2013. Soil compaction limits root development, radiation-use efficiency and yield of three winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*
- Antille, D. L., Bennett, J. M., & Jensen, T. A. 2016. Soil compaction and controlled traffic considerations in Australian cotton-farming systems. *Crop and Pasture Science*, 67: 1-28.
- Ball, B. C., Bingham, I., Rees, R. M., Watson, C. A., & Litterick, A. 2005. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 85: 557-577.
- Bennett, A. J., Bending, G. D., Chandler, D., Hilton, S., & Mills, P. 2012. Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations. *Biological Reviews*, 87: 52-71.
- Blanco-Canqui, H., Shaver, T. M., Lindquist, J. L., Shapiro, C. A., Elmore, R. W., Francis, C. A., & Hergert, G. W. 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107: 2449-2474.
- Bloem, J., Lebbink, G., Zwart, K. B., Bouwman, L.A., Burgers, S., De Vos, J.A., De Ruiter, P.C. 1994. Dynamics of Microorganisms, Microherbivores and Nitrogen Mineralization in Winter-Wheat Fields under Conventional and Integrated Management. *Agriculture Ecosystems & Environment* 51:129-143.
- Bokhorst, J.G., C. ter Berg. 2001. Handboek Mest en Compost. Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- Chamen, W.C.T., Moxey, A., Towers, W., Balana, B., Hallett, P.D., 2015. Mitigating arable compaction: a review and analysis of available cost benefit data. *Soil and Tillage Research* 146: 10-25
- Chen, G., & Weil, R. R. 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331: 31-43.
- Clark, 2007 (editor). Managing cover crops profitably —3rd edition. Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) program handbook series ; bk. 9. Published under cooperative agreements with the National Institute of Food and Agriculture, USDA, the University of Maryland and the University of Vermont. ISBN 978-1-888626-12-4

- Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1996. RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 237-246.
- Conijn, J.G., Lesschen, J.P. 2015. Soil organic matter in the Netherlands Report Plant Research International: 619
- Cresswell, H. P., & Kirkegaard, J. A. 1995. Subsoil amelioration by plant-roots—the process and the evidence. *Soil Research*, 33: 221-239.
- Curry, J. P. 2004. Factors affecting the abundance of earthworms in soils. *Earthworm ecology*, 91-113.
- Deproost P. & Elsen F. 2003. Monitoring van GFT-toepassingseffecten op de fysische bodemkwaliteiten. Bodemkundige Dienst van België, Heverlee, België. 16 p.
- D'Hose, T., M. Cougnon, A. De Vliegheer, K. Willekens, E. Van Bockstaele, & D. Reheul, 2012. Farm compost application: effects on crop performance. *Compost Science & Utilization*, 20: pp. 49-56.
- Drewry, J. J., Cameron, K. C., & Buchan, G. D. 2008. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. *Soil Research*, 46: 237-256.
- Eekeren, N. van, Heers, E., Smeding, F. 2003. Leven onder de graszode. LBI rapport LV 52.
- Fenoll, J., Garrido, I., Hellín, P., Flores, P., Vela, N., & Navarro, S. 2014. Use of different organic wastes in reducing the potential leaching of propanil, isoxaben, cadusafos and pencyuron through the soil. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 49: 601-608.
- Floot, H.W.G., Paauw, J.G.M., Dekker, P.H.M. 2008. De invloed van compostsoorten op opbrengst, ziekteverendheid en kwaliteit van gewassen : onderzoek uitgevoerd op proefboerderij Kollumerwaard van 2003 t/m 2007. PPO 3251036000 - 39 p.
- Garbeva, P., van Veen, J. A., & van Elsas, J. D. 2004. Assessment of the diversity, and antagonism towards *Rhizoctonia solani* AG3, of *Pseudomonas* species in soil from different agricultural regimes. *FEMS Microbiology Ecology*, 47: 51-64.
- Gasso, V., Sorensen, C.A.G., Oudshoorn, F.W., Green, O., 2013. Controlled traffic farming: a review of the environmental impacts. *European Journal of Agronomy* 48:66-73
- Gaudin, A. C., Janovicek, K., Deen, B., & Hooker, D. C. 2015. Wheat improves nitrogen use efficiency of maize and soybean-based cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 210: 1-10.
- Håkansson, I., Voorhees, W. B., Elonen, P., Raghavan, G. S. V., Lowery, B., Van Wijk, A. L. M., ... & Riley, H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil and tillage research*, 10: 259-268.
- Håkansson, I., & Reeder, R. C. (1994). Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29: 277-304.

- Hanse, B., Vermeulen, G. D., Tijink, F. G. J., Koch, H. J., & Märlander, B. 2011. Analysis of soil characteristics, soil management and sugar yield on top and averagely managed farms growing sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in the Netherlands. *Soil and Tillage Research*, 117: 61-68.
- Hendriks, C. M. A. 2011. Organische stof; opbouw, afbraak en invloed van management. *Bodem 21.1* : 16-18.
- Hudson, B. D. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49: 189-194.
- Janssen, B.H., P. van der Sluis & H.R. Ukkerman, 1991. Organische stof. In: W.P.Locher & H. de Bakker (eds.) *Bodemkunde van Nederland deel 1.*, Malmberg, Den Bosch. p.109-128.
- Jastrow, J. D., Miller, R. M., & Boutton, T. W. 1996. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, 6: 801-807.
- Johnston, A. E., & Brookes, P. C. 1979. Yields of, and P, K, Ca, Mg uptakes by, crops grown in an experiment testing the effects of adding peat to a sandy loam soil at Woburn, 1963-77. Report.
- Johnston, A. Edward, Paul R. Poulton, and Kevin Coleman. 2009. Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in agronomy* 101: 1-57.
- Körschens, M., Albert, E., Armbruster, M., Barkusky, D., Baumecker, M., Behle-Schalk, L. et al. 2013. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59, 1017-1040.
- Kluge, R. and R. Nd Bolduan 2001. Several years application of compost – effects on physical and microbiological properties of soil. *Applying Compost Benefits and Needs. Seminar Proceedings, Brussels, 22-23 Nov., 2001:225-228.*
- Lamers, J.G., Perdok, U.D., Lumkes, L.M. & J.J. Klooster, 1986. Controlled traffic farming systems in The Netherland. *Soil and Tillage Research* 8:65–76.
- Larkin, R. P., Griffin, T. S., & Honeycutt, C. W. 2010. Rotation and cover crop effects on soilborne potato diseases, tuber yield, and soil microbial communities. *Plant Disease*, 94: 1491-1502.
- Leistra, M., A.M.A. van der Linden, J.J.T.I.Boesten, A. Tiktak and F. van den Berg. 2001. *PEARL model for pesticide behaviour and emissions in soil-plant systems. Description of processes.* Alterra report 13, RIVM report 711401009, Alterra, Wageningen, 107 pp.
- Leroy, B. 2008. Soil food web, C and N transformations and soil structure: interactions and feedback mechanisms as a function of the quality of exogenous organic matter (Doctoral dissertation, Ghent University).
- Leroy, B. L. M., Herath, H. M. S. K., Sleutel, S., De Neve, S., Gabriels, D., Reheul, D., & Moens, M. 2008. The quality of exogenous organic matter: short-term effects on soil physical properties and soil organic matter fractions. *Soil use and management*, 24: 139-147.

- Lewan, E. 1994. Effects of a catch crop on leaching of nitrogen from a sandy soil: Simulations and measurements. *Plant and Soil*, 166: 137-152.
- Logsdon S.D., Malone, R.W. 2015. Surface Compost Effect on Hydrology: In-Situ and Soil Cores. *Compost Science & Utilization*, 23: 30-36.
- Loon, C. D. van, & Bouma, J. 1978. A case study on the effect of soil compaction on potato growth in a loamy sand soil, 2: potato plant responses. *Netherlands Journal of Agricultural Science*.
- Loveland, P., & Webb, J. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research*, 70: 1-18.
- Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296: 1694-1697.
- Maillard, É., & Angers, D. A. 2014. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 20: 666-679.
- Mooshammer, M., Wanek, W., Hämmerle, I., Fuchslueger, L., Hofhansl, F., Knoltsch, A., Schnecker, J., Takriti, M., Watzka, M., Wild, B., Keiblinger, K., Zechmeister-Boltenstern, S., Richter, A. 2014. Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon: nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. *Nature communications*, 5.
- Murphy B. W. 2015. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research* 53: 605–635.
- Nest, T. van den, Vandecasteele, B., Ruyschaert, G., Coughon, M., Merckx, R., & Reheul, D. 2014. Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and P leaching in a long term trial on a silt loam soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197: 309-317.
- Okada, Elena, José Luis Costa, and Francisco Bedmar. 2016. Adsorption and mobility of glyphosate in different soils under no-till and conventional tillage. *Geoderma* 263 78-85.
- Perdok, U., & Arts, W. 1986. *Het landbouw bandenboek*.
- Perdok, I. U. D., & Terpstra, J. 1983. *Berijdbaarheid van landbouwgrond, Bandspanning en grondverdichting*. Landbouwmechanisatie.
- Poeplau, C., & Don, A. 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200: 33-41.
- Rasool, R., Kukal, S. S., & Hira, G. S. 2008. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize–wheat system. *Soil and Tillage Research*, 101: 31-36.
- Reubens B., D’Haene K., D’Hose T., Ruyschaert G. 2010. *Bodemkwaliteit en landbouw: een literatuurstudie*. Activiteit 1 van het Interregproject BodemBreed. Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek (ILVO), Merelbeke-Lemberge, België. 203 p

Schittenhelm, S., & Schroetter, S. 2014. Comparison of Drought Tolerance of Maize, Sweet Sorghum and Sorghum-Sudangrass Hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200: 46-53.

Schjønning, P., van den Akker, J. J., Keller, T., Greve, M. H., Lamandé, M., Simojoki, A., ... & Breuning-Madsen, H. 2015. Chapter Five-Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective. *Advances in Agronomy*, 133: 183-237.

Smit, A., Kuikman, P. 2005. Organische stof: onbemind of onbekend? Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1126.

Stalham, M.A., Allen, E.J., Rosenfeld, A.B., Herry, F.X., 2007. Effects of soil compaction in potato (*Solanum tuberosum*) crops. *Journal of Agricultural Science*

STOWA. 2015. Goede grond voor een duurzaam watersysteem. STOWA rapport 19.

TCB (2005). Advies Duurzamer bodemgebruik in de landbouw. TCB A36(2005). Technische Commissie Bodembescherming, Den Haag

Tiktak, A., A.M.A. van der Linden and J.J.T.I. Boesten. 2003. *The GeoPEARL model. Model description, applications and manual* RIVM Report 716601007/2003, RIVM, Bilthoven, 79 pp.

Torstensson, G., & Aronsson, H. 2000. Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop systems in Sweden. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 56: 139-152.

Tullberg, J. N., Yule, D. F., & McGarry, D. 2007. Controlled traffic farming—from research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Research*, 97: 272-281.

Van Eekeren, N., Bokhorst, J. 2010. Bodemkwaliteit en klimaatadaptatie onder grasland op het Utrechtse zand. LBI rapport 031.

Vermeulen, G. D., & Klooster, J. J. 1992. The potential of a low ground pressure traffic system to reduce soil compaction on a clayey loam soil. *Soil and Tillage Research*, 24: 337-358.

Vermeulen, G. D., Mosquera, J., Van Der Wel, C., Van Der Klooster, A., & Steenhuizen, J. W. 2007. Potential of controlled traffic farming with automatic guidance on an organic farm in the Netherlands. *Precision agriculture*, 7: 473-481.

Vermeulen, G. D., & Mosquera, J. 2009. Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. *Soil and Tillage Research*, 102: 126-134.

Vermeulen, G. D., & Perdok, U. D. 1994. Benefits of low ground pressure tyre equipment. *Soil compaction in crop production*, 11: 447-478.

Vermeulen, G.D., Verwijs, B.R., van den Akker, J.J.H. 2013. Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. Rapport / Plant Research International 501.

Voorhees, W. B. 2000. Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. *Advances in GeoEcology*, 32: 331-338.

Whalley, W. R., Matthews, G. P., & Ferraris, S. 2012. The effect of compaction and shear deformation of saturated soil on hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 125: 23-29.

Wit, J. de, 2015a. Bedrijfseconomische effecten van verhoging van het organisch stofgehalte: compostgebruik in de akkerbouw. LBI rapport 2013-005 LdB

Wit, J. de, van Eekeren, N. 2015b. Sorghum in Nederland - Resultaten van diverse experimenten in 2015. LBI rapport 055

Zanen, M., C.J. Koopmans, J.G. Bokhorst, C. ter Berg. 2008. Bijzondere Bemesting: Kansrijke strategieën voor duurzaam bodemmanagement. Rapport LD13. Louis Bolk Instituut, Driebergen.

Zavattaro, L., Assandri, D., & Grignani, C. 2016. Achieving legislation requirements with different nitrogen fertilization strategies: Results from a long term experiment. *European Journal of Agronomy*, 77: 199-208.

Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., van der Burgt, G. 2013. Tien vragen en antwoorden over organische stof. Kennisdocument - Alterra, HLB, BLGG, LBI

CLM Onderzoek en Advies

Postadres

Postbus 62
4100 AB Culemborg

Bezoekadres

Gutenbergweg 1
4104 BA Culemborg

T 0345 470 700
F 0345 470 799

www.clm.nl