



LANG LEVE DE BODEM!

Het beste moment om een boom te planten is 20 jaar geleden. Het één na beste moment is nu.

Dr. Judith E. van de Mortel

Lang Leve de Bodem!

Het beste moment om een boom te planten is 20 jaar geleden. Het één na beste moment is nu.

Inaugurele rede uitgesproken op 9 mei 2019 door Dr. J.E. (Judith) van de Mortel bij de benoeming tot lector “Gezonde plant op een vitale en duurzame bodem” aan HAS Hogeschool Venlo

Kunstwerk: “Acryl op canvas gemaakt door Bruce Ball en Tom Henry (Ball *et al.*, 2018)”.
Spreuk: “Chinees spreekwoord van Confucius die rond 500 v Chr. leefde”.



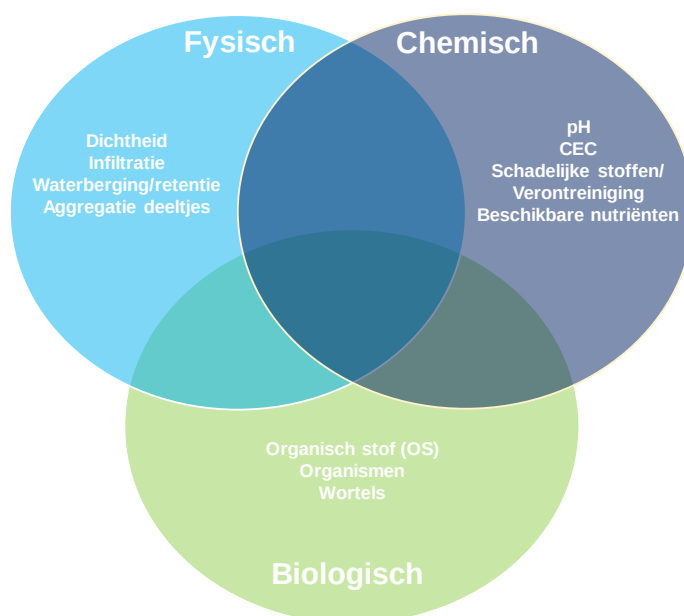
Inhoudsopgave

1. Vitale bodem.....	3
2. De plant aan zet!.....	6
2.1 Organische stof op pijl.....	6
2.2 Bovengrondse biodiversiteit verbetert vitaliteit bodem.....	12
3. De bodem in(ter)actie!	17
3.1 Beschikbaarheid van nutriënten in de bodem.	18
3.3 De weg naar ondergrondse veredeling	20
4. Microben aan het werk!	21
4.1 Manipulatie hormoon signalering.....	22
4.2 De bodem doet het zelf - bodemweerbaarheid	24
4.3 Beschikbaarheid voedingsstoffen verhogen	25
4.4 Microben als bodemverbeteraars en plantversterkers	26
4.5 Microben meetbaar maken	28
5. Tech als middel.....	32
5.1 Precisielandbouw	32
5.1.1 Sensoren	33
5.1.2 Drone technologie.....	33
5.1.3 Autonome agrarische voertuigen	34
6. Kennis en educatie als doel	36
6.1 Het lectoraat “Een gezonde plant op een vitale duurzame bodem”	36
6.2 Bewustwording en bewustzijn creëren van grond tot mond	39
6.3 Kenniscoördinatie, kennismanagement en kennisdoorstroming	41
7. Hoe nu verder?	44
7.1 Interactie bodem en klimaat	44
7.2 Interactie bodem en duurzamere productie van gezonde voeding	45
7.3 Interactie bodem en beleid	46
8. Tot slot.....	50
9. Literatuur	52



1. Vitale bodem

Een vitale bodem is de basis voor ecologische stabiliteit en daarmee voor duurzame gewasproductie (Brussaard *et al.*, 2016). De vitaliteit van een bodem wordt bepaald door de kwaliteit en gezondheid van de bodem. Bodemkwaliteit kan worden omschreven als de geschiktheid van een bepaald soort bodem, om (1) te functioneren binnen zijn capaciteit en binnen natuurlijke of beheerde ecosysteemgrenzen, (2) om de productiviteit van planten en dieren te handhaven, (3) de water- en luchtkwaliteit te handhaven of te verbeteren en (4) de gezondheid en bewoning van mensen te ondersteunen (Karlen *et al.*, 1997; Arshad & Martin, 2002; Laishram *et al.*, 2012). In ogenschouw genomen dat de bodem een eindige en levende hulpbron is, kan bodemgezondheid gedefinieerd worden als het blijvende vermogen van de bodem om te functioneren als een vitaal leefsysteem, binnen grenzen van ecosystemen en landgebruik, om (1) de biologische productiviteit te behouden, (2) de kwaliteit van lucht en water te behouden of te verbeteren en (3) de gezondheid van planten, dieren en mensen te bevorderen (Doran & Parkin, 1994; Doran *et al.*, 1996; Doran and Zeiss, 2000; Laishram *et al.*, 2012). De bodemgezondheid wordt primair bepaald door de biologische processen in de bodem. Bodemkwaliteit wordt gekenmerkt door fysische, chemische en biologische processen, die allemaal op elkaar inwerken (Figuur 1). Bodemtextuur, een fysische meting van het percentage zand, zilt en klei, en bodemstructuur, de vorming van individuele bodemdeeltjes (zand, zilt, klei) tot aggregaten of klonten, bepalen samen de fysische bodemkwaliteit. De chemische bodemkwaliteit wordt bepaald door de aanwezigheid van (1) macro-elementen (Ca, K, Mg, N, Na, P, S), (2) micro-elementen (B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Si, Zn,) (3) de zuurgraad van de bodem (pH), (4) het zoutgehalte (EC) en (5) de kationenuitwisselingscapaciteit (Cation Exchange Capacity (CEC)). De biologische bodemkwaliteit wordt bepaald door beworteling, organische stof en de ondergrondse biodiversiteit. Als de fysische, chemische en biologische processen optimaal op elkaar inwerken spreken we van een "vitale bodem".



Figuur 1: De drie bodem parameters; fysisch, chemisch en biologisch. Deze parameters geven de bodemkwaliteit weer.



De eigenschappen van een vitale bodem zijn (Moebius-Clune *et al.*, 2016):

1) **Goede structuur;** Het algehele fysieke karakter van de bodem in de context van zijn geschiktheid voor gewasproductie. Bodem met goede structuur is kruimelig, donker met organische stof en heeft geen grote en harde kluiten.

2) **Voldoende diepte;** De mate van het bodemprofiel waardoor wortels kunnen groeien om water en voedingsstoffen te vinden. Een bodem met een geringe diepte als

gevolg van een verdichtingslaag of erosie in het verleden is meer vatbaar voor schade bij extreme weerswisselingen, waardoor het gewas vatbaar is voor overstromingen, ziekteverwekkers of droogtestress.

3) **Goede waterberging en goede afwatering;** Tijdens hevige regen heeft een gezonde bodem grote, stabiele poriën om water op te nemen. Deze grote poriën geleiden water naar de middelgrote en kleine poriën waar het zal worden opgeslagen voor later gebruik. De hoeveelheid middelgrote en kleine poriën in een gezonde bodem zorgen voor een verhoogde wateropslag voor planten tijdens droge perioden. Tijdens langdurige regenperioden zullen de grote poriën nog steeds door de zwaartekracht leeg raken en verse lucht naar binnen laten komen om planten en bodemorganismen te laten gedijen.

4) **Voldoende aanbod, maar geen overmaat aan voedingsstoffen;** Een adequate en toegankelijke toevoer van voedingsstoffen is noodzakelijk voor een optimale plantengroei en voor het handhaven van een uitgebalanceerde cyclus van voedingsstoffen in het systeem. Een teveel aan voedingsstoffen kan leiden tot uitloging en mogelijke grondwaterverontreiniging, hoge afvoer van voedingsstoffen en broeikasgasverliezen, evenals toxiciteit voor planten en microbiële gemeenschappen.

5) **Kleine populatie van plantpathogenen en insectenplagen;** In landbouwproductiesystemen kunnen plantpathogenen en plagen ziekten en schade aan het gewas veroorzaken. In een gezonde bodem is de populatie van deze organismen laag of minder actief. Dit kan het gevolg zijn van hyperparasitisme of van directe concurrentie van andere bodemorganismen voor voedingsstoffen of leefomgeving.

Bovendien zijn gezonde planten beter in staat zich te verdedigen tegen een verscheidenheid aan plagen (enigszins analoog aan het menselijke immuunsysteem).

6) **Grote populatie nuttige organismen;** Bodemorganismen zijn belangrijk voor het functioneren van de bodem. Ze helpen in de circulatie van voedingsstoffen, het ontbinden van organisch materiaal, het onderhouden van de bodemstructuur, het biologisch onderdrukken van ziekten

Basisregels bodembeheer

- ✓ Monitoren bodemkwaliteit op de korte én lange termijn.
- ✓ Naast voedselkwaliteit ook richten op andere ecosysteemdiensten.
- ✓ De bodem is een levend ecosysteem en geen levenloos substraat.
- ✓ Beheren als ecosysteem i.p.v. beheersen.
- ✓ De bodem zoveel mogelijk het werk zelf laten doen in plaats van de bodem te bewerken.
- ✓ Teruggeven aan de bodem wat weggenomen is.

(Brussaard *et al.*, 2016, p. 25)



en plagen. Een gezonde bodem heeft een grote en diverse populatie van nuttige organismen waardoor bovengenoemde functies kunnen worden uitgevoerd om zo bij te dragen aan het behoud van een gezonde bodemtoestand.

- 7) **Lage onkruiddruk;** Onkruiddruk is een belangrijke beperking in de productie van gewassen. Onkruid concurreert met gewassen voor water en voedingsstoffen die essentieel zijn voor plantengroei. Onkruid kan zonlicht blokkeren, de standplaats verstoren, hinder geven in oogsten en teeltactiviteiten en ziekte veroorzakende pathogenen en ongedierte herbergen.
- 8) **Vrij van chemicaliën en gifstoffen die het gewas kunnen schaden;** Gezonde bodems zijn ofwel vrij van overmatige hoeveelheden schadelijke chemicaliën en toxines, of kunnen dergelijke chemicaliën ontgiften of binden. Hierdoor worden deze schadelijke stoffen niet beschikbaar voor opname door de plant, vanwege de rijkdom van de bodem in stabiele organische materie en verschillende microbiële gemeenschappen.
- 9) **Bestand tegen degradatie;** Een gezonde, goed geaggregeerde bodem vol met een diverse gemeenschappen van levende organismen is beter bestand tegen ongunstige gebeurtenissen zoals erosie door wind en regen, overtollige regenval, extreme droogte, voertuigverdichting, uitbraak van ziekten en andere potentiële afbraakprocessen.
- 10) **Veerkracht bij ongunstige omstandigheden;** Een gezonde bodem herstelt sneller na een negatieve gebeurtenis, zoals oogsten onder natte bodemomstandigheden, of als landbeperkingen de geplande rotaties beperken of wijzigen.

Om deze eigenschappen optimaal te krijgen, dient de agrarische ondernemer een gereedschapskist aan maatregelen te hanteren. Allereerst dient de ondernemer de basisregels voor goed bodembeheer in ogenschouw te nemen (Brussaard *et al.*, 2016, zie kader Basisregels bodembeheer). Behoud of verbetering van de bodemkwaliteit is meestal geen kwestie van één of enkele maatregelen, maar bestaat uit een aanpak waarbij verschillende technieken en methoden op elkaar zijn afgestemd (Brussaard *et al.*, 2016). Belangrijke gereedschappen voor de agrarische ondernemer zijn bemesting, beheer van organische stof, grondbewerking, mechanisatie, gewasdiversiteit in tijd en ruimte, het telen van groenbemesters, gewas- en raskeuze, inzet van gewasbeschermingsmiddelen en irrigatie (Brussaard *et al.*, 2016). Verbeteren van de bodemkwaliteit kan dan ook meestal niet met één simpele maatregel. Het vraagt om een integrale aanpak vanuit verschillende disciplines. Om tot een optimale geïntegreerde aanpak te komen, worden de verschillende disciplines in dit document afzonderlijk besproken waarna deze tot een geïntegreerd ontwerp worden samengevoegd.



2. De plant aan zet!

Eén van de strategieën om de bodemkwaliteit en gezondheid te verbeteren is de gewas- en raskeuze goed af te stemmen op de agrarische percelen. Gewassen en gewasresten kunnen namelijk de kwaliteit van de bodem beïnvloeden. In onderstaande paragrafen wordt toegelicht hoe de plant de bodem kan voeden.

2.1 Organische stof op pijn

Bodem organisch materiaal is de fractie van de grond welke bestaat uit plantaardig- of dierlijk weefsel in verschillende stadia van afbraak (decompositie). Organisch stof is de spil van de chemische, fysische en biologisch bodemvruchtbaarheid (zie kader Functies organische stof) en bestaat uit drie verschillende componenten; (1) plantresten en levende microbiële biomassa, (2) actief bodemorganisch materiaal wat ook wel detritus wordt genoemd en (3) stabiel organisch materiaal, vaak aangeduid als humus.

Organische stof krijgt veel aandacht omdat er wordt gezegd dat het organische

stofniveau in onze bodems achteruitgaat. Het verhogen van het organische stofgehalte op landbouwpercelen is inmiddels ook beleidsmatig geland. Zo schrijft Minister Schouten (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV)) in haar visie over kringlooplandbouw: “Een bodem die veel organische stof bevat, kan veel beter water opnemen en is beter bestand tegen droogte. Ook kan zo’n bodem meer stikstof en mineralen vasthouden, hij biedt een rijker bodemleven en draagt bij aan gezonde gewassen.” (Schouten, 2018., p.22). De Bodemstrategie van de Technische Commissie Bodem (2016) benoemt strategieën voor o.a. beheer van organische stof op landbouwpercelen (TCB, 2016). Ook in het concept-Klimaatakkoord (Nijpels, 2018) staan verwijzingen naar het belang van meer organische stof in de bodem. Onderzoek heeft echter uitgewezen dat er geen dalende of stijgende trends te zien zijn op landelijk niveau (van den Akker, 2012; Eurofins Agro, 2017). Lokaal kan er wel sprake zijn van toe- of afname van het organische stof gehalte in de bodem, bijvoorbeeld als een grasland wordt omgezet tot bouwland en andersom (Smit *et al.*, 2007). De samenstelling en kwaliteit van het aanwezige organische stof in de bodem verandert wel trendmatig (Eurofins Agro, 2017). In algemene zin kan er dus geen optimaal gehalte aan organische stof worden vastgesteld. Wel kan worden gesteld dat ten minste instandhouding van het aanwezige organische stofniveau raadzaam is

Functies organische stof

- ✓ Verbeteren van het vochtvasthoudende vermogen.
- ✓ Bijdrage aan de kationenuitwisselingscapaciteit (CEC) waardoor kationen (b.v. nutriënten) uitwisselbaar aan de grond gebonden worden.
- ✓ Koolstofvastlegging.
- ✓ Verbetering van de structuur en structuurstabiliteit.
- ✓ Voeden van het bodemleven, waardoor de bodem weerbaarder wordt tegen ziekten en plagen.
- ✓ Leveren van nutriënten door mineralisatie.

(Eurofins Agro, 2017)



(Staps, 2018). Toename van het organische stofgehalte van de grond kan in veel gevallen gunstig uitpakken en is goed mogelijk, maar vraagt tijd (Staps, 2018). Kleibodems hebben over het algemeen een goede natuurlijke bodemvruchtbaarheid. Zandgronden zijn voor de nutriëntenlevering sterk afhankelijk van organische stof. In deze gronden wordt de beschikbaarheid van nutriënten in belangrijke mate bepaald door interacties van het bodemleven met de organische stof in de bodem.

Anderzijds kunnen de nutriënten, die uit organische stof vrijkomen, grond- en oppervlaktewater belasten en zorgt de afbraak van organische stof ook voor de uitstoot van lachgas en methaan, waardoor het broeikasgaseffect wordt versterkt (Conijn & Lesschen, 2015). De natuurlijke afbraak van organische stof stoot wereldwijd 10x meer CO₂ uit dan het verbranden van fossiele brandstoffen, maar dit wordt weer gecompenseerd door de vegetatie die een vergelijkbare hoeveelheid uit de atmosfeer opneemt en vastlegt.

Een organische stofbalans kan een handig hulpmiddel zijn om inzicht te krijgen in de aan- en afvoer van organische stof en de verandering in de hoeveelheid organische stof in de bodem (Hanegraaf, 2010; zie kader

Organische stofbalans opstellen). Of de aanvoer van organische stof voldoende is om de afbraak te compenseren, is te berekenen aan de hand van de aan- en afvoer van organische stof op het eigen bedrijf. Er zijn diverse rekentools beschikbaar om inzicht te krijgen in de mogelijkheden om organische stof in de bodem op te bouwen op basis van praktijkmaatregelen als bouwplan en bemestingsstrategie (Klimaatlat (www.klimaatlat.nl), organische stof rekentool van NMI (www.nmi-agro.nl), Cool Farm Tool (www.coolfarmtool.org), NDICEA (www.ndicea.nl)).

Organische stofbalans opstellen

Stap 1: Bepaal de totale aanvoer van effectieve organische stof met gewasresten, groenbemesters en organische mest gedurende één rotatie.

Stap 2: Bepaal de afvoer van organische stof. Volgens de vuistregel wordt jaarlijks 2 tot 4 procent van de organische stof in de bouwvoor afgebroken. Dit komt overeen met ongeveer 1400 tot 2800 kg organische stof. Het percentage afbraak wisselt, afhankelijk van de hoeveelheid en de soort organische stof die in het recente verleden op het perceel is aangevoerd.

Stap 3: Bereken het verschil tussen de aanvoer en afvoer van effectieve organische stof. Als de balans op nul uitkomt, blijft de toestand van de bodem gelijk. Is de balans negatief, dan teert de bodem op zijn voorraden in.

In de praktijk kan de afbraak variëren tussen 1,6 – 3,6 %. Als vuistregel kan 2 % worden gehanteerd.

(Hanegraaf, 2010; Zwart *et al.*, 2013; Staps, 2018)



De volgende teeltmaatregelen werken positief op het behouden en verhogen van het organische stofgehalte in de bodem (Eurofins Agro , 2017):

- ✓ **Gewasrotatie:** Met een jaarlijks terugkerende intensieve teelt, zoals rooivruchten of maïs, gaat de organische stof voorraad in de bodem achteruit. Dit komt door intensieve grondbewerking, en doordat er weinig toevoer van organische stof via gewasresten is. Door het jaarlijks afwisselen van gewassoorten wordt dat voorkomen. Met name een groter aandeel granen en grassen in het bouwplan zullen het organische stofgehalte doen stijgen. Graan in het bouwplan zorgt voor een toevoeging van organische stof: het relatief grote wortelstelsel levert na de oogst een behoorlijke hoeveelheid organische stof. Door het stro achter te laten vindt extra toevoer van organische stof plaats. Afwisseling met gras(klaver) of een groenbemester die niet wordt geoogst maar volledig wordt ondergewerkt zorgt niet alleen voor het vasthouden van nutriënten in de bodem, maar levert ook organische stof (Tabel 1; Staps, 2018). Ook het verbouwen van gewassen met een lang groeiseizoen gecombineerd met de verbouw van vlinderbloemigen (leguminosen) kunnen de kwaliteit van de organische stof verbeteren (Eurofins Agro, 2017).
- ✓ **Gewasresten:** Gewasresten zijn de materialen die op het veld achterblijven nadat het gewas is geoogst. Het gaat hierbij om stengels, stoppels, bladeren, wortels en kaf. Deze gewasresten dienen maximaal in de bodem worden gebracht. Een kanttekening is wel dat mogelijk priming optreedt wat betekend dat het vers plantaardig materiaal de afbraak van de stabielere organische fractie aanjaagt (Fontaine *et al.*, 2003). Belangrijke factoren voor een hoge organische stofaanvoer van het bouwplan zijn een hoog aandeel gewassen met veel organische stof in gewasresten (o.a. graan). Bladverliezende planten en gewassen en het plaatsen van hagen dragen jaarlijks via bladafval ook bij aan organische stofopbouw in de bodem. Wanneer het snoeiafval van vaste planten of houtige gewassen op het perceel blijft, vindt extra aanvoer van organische stof in de bodem plaats. Het versnipperen van het snoeiafval zorgt voor een snellere omzetting naar organische stof die bijdraagt aan de bodemkwaliteit. Bij de oogst van vaste planten of houtige gewassen kunnen achtergebleven wortelresten, vallend blad en eventueel snoeiafval ook een bijdrage leveren. Daar staat tegenover dat bij oogst van planten inclusief kluit er grond en dus organische stof wordt afgevoerd. Die organische stof is niet verloren want hij komt ergens anders terecht, maar voor het betreffende perceel is het wel een verliespost (Staps, 2018).
- ✓ **Diepe en intensieve beworteling:** De wortels van bepaalde gewassen worden uiteindelijk omgezet in organische stof. Goede beworteling is dan ook belangrijk voor het opbouwen van bodem organische stof. Diepe en intensieve beworteling heeft nog meer voordelen. Zo zorgt intensievere beworteling voor een hogere nutriëntenbenutting. Bovendien bepaalt de diepte van de beworteling uit welke bodemlaag water kan worden opgenomen. Een gewas met een diep wortelstelsel is daardoor beter bestand tegen droogte. Daarnaast dragen wortels bij aan de bodemstructuur, dienen ze als voeding voor het bodemleven en dragen ze bij aan de beheersing



van onkruid (van Eekeren *et al.*, 2011). Het sturen op meer wortels is dus van groot belang. Beworteling van gewassen kan beïnvloed worden door soorten- en rassenkeuze (Staps, 2018).

- ✓ **Aanvoer van mest en compost:** Aanvoer van mest en compost verhoogt effectief het organische stofgehalte omdat het minder snel afbreekt dan verse gewas- en wortelresten. Niet elke mestsoort is hetzelfde: drijfmest wordt bijvoorbeeld veel sneller afgebroken dan potstalmest. In Tabel 1 staat een overzicht van de effectieve organische stof die gegeven wordt met verschillende composten en meststoffen (Hanegraaf, 2010; Staps, 2018). Ook zal de aanvoer van mest en compost vaak de noodzaak verminderen om kunstmest toe te dienen (Eurofins Agro, 2017).

Tabel 1. Aanvoer van effectieve organische stof bij gebruik van verschillende composten en meststoffen, in kg/ton product. De effectieve organische stof is de hoeveelheid organische stof die nog over is na één jaar (uit: Hanegraaf, 2010 en bijgesteld aan de hand van het Handboek bodem en bemesting op het web. Staps, 2018).

Mest of compost		Aanvoer van effectieve organische stof
Dunne mest	Rundvee	33
	Vleesvarkens	20
	Zeugen	12
	Kippen	31
Vaste mest	Rundvee	77
	Kippen (strooisel)	143
	Vleeskuikens	183
Compost	Champost	106
	Groencompost	161
	GFT-compost	218

Zowel compost als Bokashi zijn aan te merken als organische mest. Maar het wezenlijke verschil is dat compost al is omgevormd richting humus terwijl Bokashi is geconserveerd en vervolgens dient als voedsel voor het bodemleven. Bokashi ontstaat door omzetting van organisch materiaal in een anaeroob inkuilproces. In deze zuurstofloze kuil wordt vers organisch materiaal gemengd met micro-organismen, kleimineralen en zeeschelpenkalk. Als gefermenteerd organisch materiaal kan Bokashi een geschikte organische meststof vormen, vergelijkbaar met vers materiaal zoals groenbemesters. Waar elementen van compost direct geschikt kunnen zijn voor gewasgroei, zal Bokashi eerst via het bodemleven omgezet moeten worden. Bokashi werkt daarmee indirect, maar kan op de langere termijn wel bijdragen aan een verhoogd organische stofgehalte door humusopbouw (Staps, 2018). Meer vergelijkend onderzoek naar bijvoorbeeld de effecten van de toediening van verschillende soorten compost of Bokashi is gewenst om meer duidelijkheid te verkrijgen over de effecten op organische stofniveau in de bodem (Staps, 2018).

- ✓ **Bodembedekking en vanggewassen:** Het voorkomen van braaklegging in de zomer en winter door jaarrond verbouw van gewassen verhoogt de inbreng van organische stof en vermindert



bodemerosie en uitspoeling van nutriënten. Wanneer land namelijk braak ligt, breekt bodem organische stof sneller af dan wanneer er een gewas op het land staat (Staps, 2018). Het bedekt houden van het land, in combinatie met een periode zonder grondbewerking, zorgt ervoor dat de organische stof in de bodem minder snel afbreekt dan bij zwarte braak, waarbij soms grondbewerkingen worden uitgevoerd. Bovendien wordt bij zwarte braak een mogelijkheid gemist om koolstof uit de lucht vast te leggen in gewassen (Staps, 2018).

- ✓ **Groenbemester/stikstofvanggewas/maaimeststof telen:** Een groenbemester of vanggewas wordt meestal gezaaid om uitspoeling en daarmee verlies van nutriënten in de herfst te voorkomen. Ook vanuit het oogpunt van organische stof beheer is het gunstig om een groenbemester of vanggewas te telen en winterbraak te vermijden. Zo'n gewas zorgt namelijk voor vastlegging van koolstof op het eigen bedrijf – een verschil met het invoeren van elders vastgelegde koolstof zoals compost. Doordat het gewas ondergeploegd wordt, wordt de vastgelegde organische stof aan de bodem toegevoegd. Een deel daarvan zal snel weer afbreken, maar toch wordt er ook effectieve organische stof aan de bodem toegevoegd, welke veel langzamer afbreekt. In Tabel 2 staan indicaties van de hoeveelheid organische stof en effectieve organische stof die aan de bodem wordt toegevoegd bij het inwerken van verschillende groenbemers zoals raaigras, rode- en witte klaver, bladrammenas, gele monsterd en wikke (Hanegraaf, 2010; Staps, 2018). Voor het succes van een groenbemester of vanggewas is de timing cruciaal: hoe eerder het gewas gezaaid wordt in de nazomer of vroege herfst, hoe beter. Een groenbemester die pas na 1 oktober de grond in gaat, zal in het najaar weinig meer groeien. Een dergelijke groenbemester is alleen zinnig wanneer het volgende voorjaar nog benut wordt voor groei. Een groenbemester of vanggewas kan als compost (bijv. Bokashi) ook worden uitgereden of ingewerkt op een ander perceel dan op het perceel waar het gegroeid heeft (Rietberg en Ter Berg, 2012).

Tabel 2. Aanvoer van organische stof en effectieve organische stof na het onderwerken van verschillende groenbemers. Hoeveelheden zijn in kg per ha, bij een gemiddelde gewasgroei. De effectieve organische stof is de hoeveelheid organische stof die nog over is na één jaar. Voor de meeste groenbemers wordt 30% aangehouden (zomerkoolzaad: 25%) (uit: Hanegraaf, 2010; Staps, 2018).

Gewas	Aanvoer van organische stof	Effectieve organische stof
Raaigras	2550	612
Rode klaver	3800	432
Witte klaver	2700	783
Bladrammenas	3000	900
Gele monsterd	3800	850
Wikke	3000	645

- ✓ **Inbreng nieuwe teelten:** Teelten zoals sorghum, *Miscanthus x giganteus* (olifantsgras), en vezelhennep hebben weinig water en voedingsstoffen nodig. Er zijn een aantal voordelen van deze teelten, o.a. op de gebieden droogtegevoeligheid/veel neerslag, stikstofbenutting, vorming van organische stofgehalte in bodem, bodemverdichtingen, vatbaarheid voor plagen/ziekten en



minder kans op erosie. Deze voordelen moeten nog wel getoetst worden in de praktijk bij éénmalige teelt, bij teelt van twee of meer gewassen en als tussenteelt ter onderbreking van continue teelt om ook zeker te zijn van deze voordelen voor de bodemkwaliteit.

- ✓ **Conservering landbouw:** Conservering van de landbouw bestaat uit het minimaliseren van grondbewerking, permanente bodembedekking en diversiteit in gewassen. Minimale- en uiteindelijk geen grondbewerking door de overstap van frequent ploegen naar vormen van niet kerende grondbewerking (NKG). Niet kerende grondbewerking kan op allerlei manieren worden toegepast, er kan worden gekozen voor verschillende machines met combinaties van oppervlakkige- en diepe bodembewerking, onkruidbestrijding of zaaibedbereiding (Bernaerts *et al.*, 2008; van der Weide *et al.*, 2008; de Jong, 2011). NKG wordt in biologische teelten al veel langer toegepast. Ook bij NKG, gaat de aangroei van het organische stofgehalte traag (Tabel 3; Schouten *et al.*, 2018). In combinatie met tussengewassen/groenbemesters, het bedekt houden van de bodem, en het onderwerken van gewasresten, is een meetbare verbetering te behalen (Schouten *et al.*, 2018). Het effect van NKG op processen in de bodem is het eerst te zien in de omvang en activiteiten van het bodemleven (Schouten *et al.*, 2018). Bodemleven is hier als 'early indicator' te beschouwen, voor de veranderingen in de kwaliteit en opbouw van de organische stof (Schouten *et al.*, 2018). Conservering van de landbouw lijkt een positief effect te hebben op de fysische aspecten van de bodem en de opslag van koolstof (C) in de bodem. Een nadeel van verhoogde C-opslag in de bodem kan verhoogde stikstofoxide (N_2O ; lachgas) -emissie zijn, waardoor het "koeleffect" van CO_2 -afname wordt gecompenseerd (Tian *et al.*, 2016). Variabele effecten van NKG/minimale grondbewerking op de N_2O -emissies zijn gemeld (van Kessel *et al.*, 2013), variërend van afgenomen tot verhoogde N_2O -emissies, vooral kort na het overschakelen van kerende grondbewerking naar NKG (Six *et al.*, 2002; Rochette, 2008)

Tabel 3. Veelbelovende maatregelen om het organische stofgehalte te verhogen en hun belangrijkste kenmerken op de korte (0 -5 jaar), midden (5 – 10 jaar) en lange (> 10 jaar) termijn (Eurofins Agro, 2017).

Maatregel	Effect op het organische stofgehalte de bodem op verschillende tijdschalen		
	0-5 jaar	5-10 jaar	>10 jaar
Optimalisatie van gewasrotatie	● ●	● ●	● ●
Achter laten van gewasresten	● ●	● ●	● ●
Aanvoer van mest en compost	● ● ●	● ●	●
Voorkomen van braaklegging	●	● ●	● ● ●
Verminderen van intensiteit en frequentie van bodembewerking	●	● ●	● ● ●



De vijf maatregelen staan samengevat in Tabel 3. Zowel het voorkomen van braaklegging als het reduceren van grondbewerking vergen tijd om te resulteren in een toename van het organische stofgehalte. De aanvoer van mest en compost lijkt op korte termijn het grootste effect op het organische stof niveau te hebben. De samenstelling en afbraaksnelheid van organisch materiaal zoals gewasresten, vaste mest, dunne mest of compost is zeer verschillend.

2.2 Bovengrondse biodiversiteit verbetert vitaliteit bodem

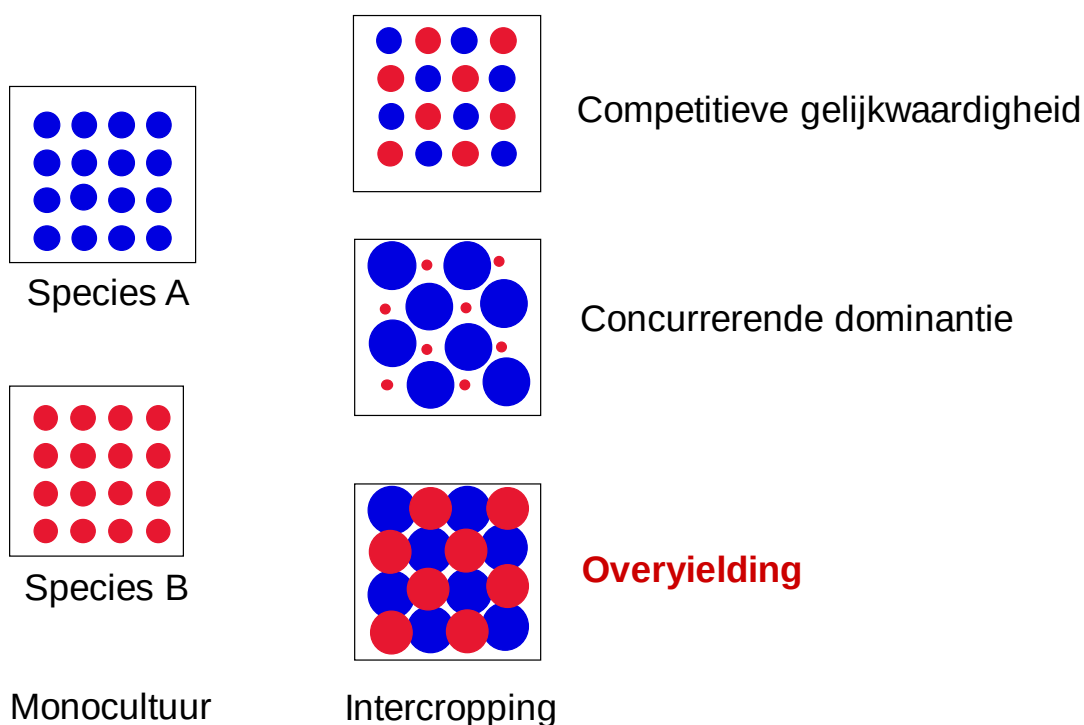
Biodiversiteit kan worden omschreven als de rijkdom en diversiteit van al het leven op aarde (Erisman *et al.*, 2016). Er zijn zeer sterke aanwijzingen dat in agrarische gebieden de biodiversiteit van het bodemleven, het aantal akkerkruiden, het aantal weide- en akkervogels en insecten sterk zijn afgenomen de laatste jaren (Erisman *et al.*, 2016). De bovengrondse biodiversiteit op landbouwpercelen kan worden verhoogd door gebruik te maken van *mengteelt* en *boslandbouw*. *Mengteelt* is een oude praktijk, welke weinig gebruikt wordt in de 'moderne landbouw' omdat deze nog steeds gedomineerd wordt door grote gebieden met monocultuur, grondstoffen en hoogrenderende gewassen (Brooker *et al.*, 2015). *Mengteelt* en *boslandbouw* kunnen echter een middel zijn om enkele van de belangrijkste problemen in verband met de moderne landbouw aan te pakken, zoals bijv. een matige opbrengst, plaag- en pathogenenaccumulatie, bodemaantasting en achteruitgang van het milieu, en aldus bij te dragen tot duurzame en productieve landbouw (Brooker *et al.*, 2015). *Mengteelt*-systemen omvatten twee of meer gewassoorten of genotypen die samen groeien en een tijd lang samenleven. Dit laatste criterium onderscheidt *mengteelt* van gemengde *monocropping* en rotatiecultuur (Brooker *et al.*, 2015). *Mengteelt* wordt vooral in landen met een hoge voedselvoorzieningslandbouw en lage landbouwkundige mechanisatie toegepast en wordt vaak uitgevoerd door agrarische ondernemers die op kleine percelen werken met een lage input van bemesting, hoge arbeid en lage opbrengst (Brooker *et al.*, 2015). Onder deze omstandigheden kan *mengteelt* hogere opbrengsten per eenheid input ondersteunen, verzekeren tegen mislukking van gewassen en marktfluctuaties, voldoen aan voedselveerkeuren en/of culturele eisen, de bodemkwaliteit beschermen en verbeteren en het inkomen verhogen (Brooker *et al.*, 2015). *Mengteelt* kan worden onderverdeeld in teelten waarbij (1) gelijktijdig twee of meer gewassen groeien zonder of met een beperkte afzonderlijke indeling, (2) *relay mengteelt* waarbij een tweede gewas geplant wordt voordat het eerste gewas volwassen is en (3) *strokenteelt* waarbij twee of meer gewassen tegelijk worden gegroeid in stroken (Figuur 2). Een teelt wordt nog duurzamer als er ook houtige gewassen worden geteeld, het zgn. *boslandbouw*. In bomen en struiken zijn bijvoorbeeld nuttige biologische bestrijders aanwezig waardoor agrarische ondernemers minder chemische bestrijdingsmiddelen hoeven te gebruiken. Ook zorgt *boslandbouw* voor een aantrekkelijker landschap en een verhoging van de biodiversiteit. Daarnaast kunnen ecologische hulpbronnen beter benut worden en zorgen bomen voor extra CO₂-opslag.





*Figuur 2. Voorbeelden van mengteelt in (a) mengteelt van een voedergewas; (b) gemengde relay mengteelt van rode klaver (*Trifolium pratense* L.) in wintertarwe (*Triticum aestivum* L.); en (c) strokenteelt van maïs (*Zea mays* L.) en graangewas (*Secale cereale* L.) (Bybee-Finley & Ryan, 2018).*

Verhoogde gewasproductiviteit is een van de belangrijkste en meest geciteerde voordelen van *mengteelt*. *Overyielding* treedt op wanneer de productiviteit van de gewassen wordt verhoogd ten opzichte van het gemiddelde van elke component die in een monocultuur wordt gekweekt (Figuur 3; Cardinale *et al.*, 2007; Bybee-Finley & Ryan, 2018). Mengteelt is dus één van de mogelijke manieren om de gewasproductiviteit te verhogen en wordt vaak gedreven door het delen van bronnen. Concurrerende dominantie is wanneer de productiviteit van één gewas wordt verhoogd ten opzichte van de hoogst productieve soort die in monocultuur wordt gekweekt (Figuur 3; Cardinale *et al.*, 2007; Bybee-Finley & Ryan, 2018). Dit komt minder vaak voor en is meestal het resultaat van facilitering, in plaats van het eenvoudig delen van bronnen. Naast een hogere productiviteit zijn er nog andere voordelen die *mengteelt* kan bieden, waaronder opbrengststabiliteit, het verminderen van plagen en bodemgezondheid (Bybee-Finley & Ryan, 2018).

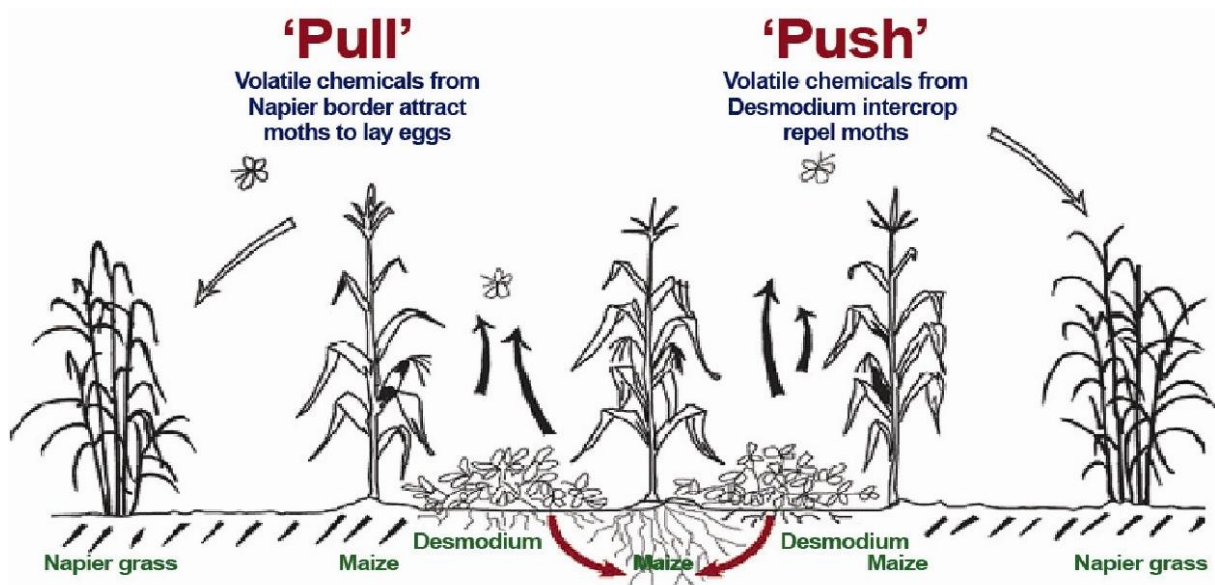


Figuur 3. Principe van mengteelt wat kan leiden tot competitieve gelijkwaardigheid, concurrerende dominantie of overyielding van de gewassen. De dikte van de cirkel geeft de hoeveelheid geproduceerde biomassa weer (Cardinale et al., 2007).

Van *mengteelt* is aangetoond dat het risico op mislukking van gewassen wordt verminderd door de opbrengststabiliteit in de tijd en over locaties te verhogen (Bybee-Finley & Ryan, 2018). Er is aangetoond dat het risico van onkruid, insecten en ziekten wordt verminderd, een voordeel dat gedeeltelijk de verhoogde opbrengst en opbrengststabiliteit verklaart. *Mengteelten* kunnen meestal effectiever gebruik maken van beschikbare bronnen (bijv. licht, water, voedingsstoffen) dan wanneer gewassen afzonderlijk worden gekweekt, waardoor de hoeveelheid hulpbronnen die beschikbaar zijn voor onkruid worden verminderd. Het helpt dus tevens bij het onderdrukken van onkruid, omdat de gewassen veel ruimte in beslag nemen waardoor het onkruid niet zou kunnen groeien. Sommige onkruiden vinden het ook moeilijk om naast sommige gewassen te groeien. Het samengroeien van twee gewassen naast elkaar kan van groot voordeel zijn, vooral als hun interacties de conditie van één of beide planten vergroten. Bijvoorbeeld, planten die waarschijnlijk in de wind gaan kantelen, kunnen structurele steun krijgen van het andere gewas. Daarnaast kunnen sommige planten ook schaduw bieden aan lichtgevoelige gewassen zoals bijv. het groeien van mais, bonen en pompoen in één perceel. *Mengteelten* kunnen de schade door plagen en ziekten verminderen door: (1) het aantal gevoelige gastheren te verminderen (verdundingseffect), (2) het effect van resistente planten die werken als een fysieke barrière tegen vatbare planten (barrière-effect), (3) resistentie induceren, (4) de snelheid van het aanpassen van de plaag verminderen door middel van disruptieve selectie en (5) compensatie van één soort die slecht presteert (Zhan et al., 2014; Borg et al., 2017; Bybee-Finley & Ryan, 2018; Mommer et al., 2018).

Gewassen die plagen wegvangen uit de buurt van hoofdgewassen, maar ook gewassen die plagen afstoten, kunnen voor een betere plaagbestrijding worden gebruikt. Eén van de bekendste voorbeelden waarbij afvangende en afstotende gewassen samen worden gebruikt, is het *push-pull*-systeem dat wordt gebruikt voor het beheren van maïsstengelboorders (*Busseola fusca* Fuller.) en onkruid zoals *Striga* spp. (Figuur 4; Pickett et al., 2014). De strokenteeltmethode omvat maïs (de cash crop), een "pull" gewas, zoals Napier gras (*Pennisetum purpureum* Schumach.) welke vluchtige stoffen gebruikt om maïsstengelboorders aan te trekken, en een "duw" -gewas zoals de peulvrucht *Desmodium* spp. geplant tussen rijen om maïsstengelboorders af te weren van de maïs (Figuur 4; Pickett et al., 2014). De *Desmodium* spp. veroorzaakt ook een fatale kiemingsreactie van het parasitaire onkruid *Striga* spp., waardoor onkruidichtheid en competitie wordt verminderd met het graan (Figuur 4; Pickett et al., 2014). Een overzichtsartikel van Khan et al. in 2011 verklaarde dat het push-pull-systeem maïsopbrengsten verhoogde op kleine boerenbedrijven in Oost-Afrika van onder 1 tot meer dan 3,5 ton per hectare (Bybee-Finley & Ryan, 2018). Het push-pull systeem zou in Nederland ook ingezet kunnen worden in strokenteelt voor plaagbestrijding, hier is alleen nog meer onderzoek voor nodig.





Figuur 4. Principe van het push-pull systeem (Pickett et al., 2014)

Naast de voordelen van gewasopbrengst, kan *mengteelt* de gezondheid van de bodem verbeteren en stikstofverliezen verminderen (Sanderson et al., 2013; Lemaire et al., 2014; Bybee-Finley & Ryan, 2018). Verhoogde diversiteit van gewassen heeft aangetoond dat de microbiële diversiteit in de bodem toeneemt, waardoor de opname van voedingsstoffen door planten effectiever wordt en de effecten van plantpathogenen in de bodem verminderen (Vukicevich et al., 2016; Bybee-Finley & Ryan, 2018; Mommer et al., 2018).

Mengteelt kan bijdragen aan verduurzaming van de landbouw en speelt een belangrijke rol bij het verhogen van de productiviteit, stabiliteit en andere ecosysteemdiensten (Bybee-Finley & Ryan, 2018). De multifunctionaliteit van dit concept en het herstellen van ecosysteemdiensten vragen om toenemende diversiteit van gewassen. Op de korte termijn kan de meest rechtlijnige aanpak simpelweg nieuwe combinaties van gewassen testen om gebruik te maken van nuttige mechanismen die al zijn geïdentificeerd, bijvoorbeeld nieuwe combinaties van granen en peulvruchten. Realistische verwachtingen van de jaarlijkse teeltsystemen, doordacht onderzoek en uitgebreide rapportages zijn sleutelstrategieën om de *mengteelt*-acceptatie te vergroten en de kennis te bundelen. Tevens zal de complexiteit van het beheer tot een minimum moeten worden beperkt om de wijdverbreide toepassing van *mengteelt* te stimuleren. Snelle verbeteringen zijn ook mogelijk door de ontwikkeling van nieuwe agronomische werkwijzen, waaronder de mechanisatie van *mengteelt*-systemen en verbeterd nutriëntenbeheer, maar opnieuw kunnen dergelijke inspanningen worden voortgezet met behulp van bestaande kennis en experimentele benaderingen. Op een langere termijn is het nodig dat de efficiëntie van resourcegebruik door dit soort gewassen door middel van plantenveredeling toeneemt. Veredelingsprogramma's moeten echter expliciet rekening houden met meerdere kenmerken die gemengde teelten ten goede zouden komen en niet alleen de kenmerken waarvan bekend is dat ze de opbrengst van monoculturen verhogen. Gewasdiversiteit kan dus op verschillende manieren in een systeem toegepast worden, zoals bijvoorbeeld met vruchtwisseling in tijd en ruimte, gewasmengsels,



rassenmengsels of strokenteelt. Wat de effecten zijn van de gewasdiversiteit op onder andere bodemkwaliteit, bemesting, biodiversiteit, ziekte- en plagendruk en opbrengst dient nog verder onderzocht te worden.

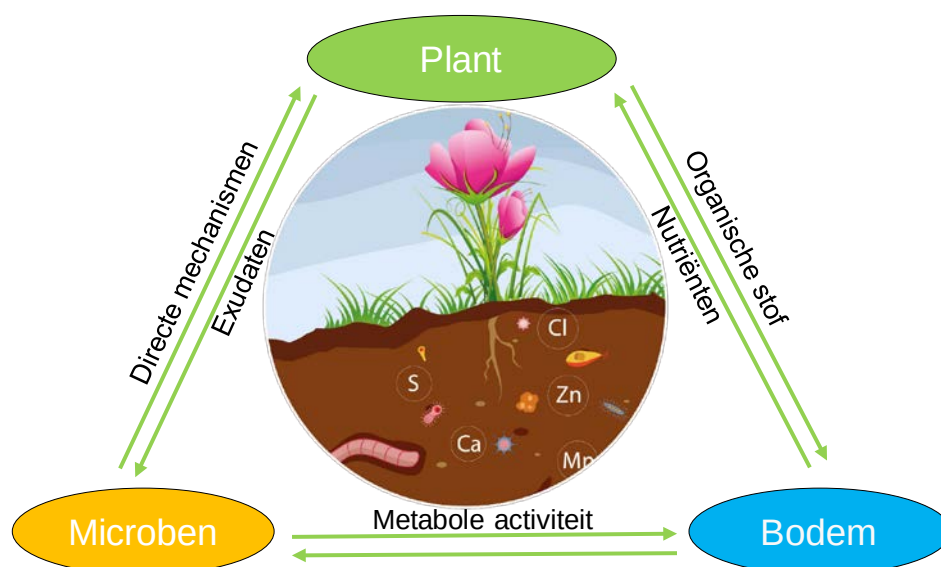


3. De bodem in(ter)actie!

Onder “bodem” wordt verstaan de bovenste laag van de aardkorst. Het is een natuurlijke substantie samengesteld uit verweerde steendeeltjes (mineralen), organische stof, water en lucht. Een typisch monster van minerale bodem bestaat uit 45% mineralen, 25% water, 25% lucht en 5% organisch materiaal - deze verhoudingen kunnen echter variëren.

De productie van gewassen hangt af van de structuur en textuur van de bodem en de beschikbaarheid van water en minerale voedingsstoffen. Hogere opbrengsten kunnen mogelijk worden gemaakt door een grotere focus op de interactie tussen de wortel van de plant en de bodem (Figuur 5). Wortel-bodem interacties bestrijken een breed scala aan fysische, chemische en biologische processen. De rhizosfeer is de naam die wordt gegeven aan de dunne zone van bodem die direct rond de wortel ligt en die op chemische, fysische of biologische manier wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de wortel. Het concept van de rhizosfeer wordt hier benadrukt, alleen de wortelpunten hebben namelijk contact met de bodem en het overige deel van het wortelsysteem van de plant heeft geen contact met enig ander deel van de bodem.

Bodemeigenschappen die van invloed zijn op de plantengroei zijn droogte, verdichting, tekort aan voedingsstoffen, minerale toxiciteit, zoutgehalte en onderdompeling. Plantwortels reageren zowel in de ruimte als in de tijd op de bodemomgeving door stressvolle bodemomgevingen te vermijden en zich te verspreiden in gunstigere omgevingen. We zien dat gewassen kunnen worden gekweekt voor specifieke architecturale en biochemische eigenschappen van wortels die grondverkenning en winning van hulpbronnen mogelijk maken, waardoor hogere oogstopbrengsten mogelijk zijn. Deze wortelkenmerken beïnvloeden de fysische en chemische eigenschappen van de bodem en kunnen worden gebruikt om de bodem voor latere gewassen te verbeteren (White *et al.*, 2013). Beargumenteerd kan worden dat het optimaliseren van de wisselwerking tussen de wortel en de bodem een voorwaarde is voor toekomstige voedselzekerheid.



Figuur 5. De interactie tussen plant, bodem en microben.



3.1 Beschikbaarheid van nutriënten in de bodem.

Twee groepen voedingsstoffen zijn essentieel voor planten: macronutriënten en micronutriënten (Marschner, 1995). Macronutriënten zijn de bouwstenen van cruciale cellulaire componenten zoals eiwitten en nucleïnezuuren. Zoals de naam al doet vermoeden, zijn macronutriënten in grote hoeveelheden vereist. Stikstof (N), fosfor (P), magnesium (Mg) en kalium (K) zijn enkele van de belangrijkste macronutriënten. Koolstof, waterstof en zuurstof worden ook beschouwd als macronutriënten omdat ze in grote hoeveelheden nodig zijn om de grotere organische moleculen van de cel te bouwen; ze vertegenwoordigen echter de niet-minerale klasse van macronutriënten. Micronutriënten, waaronder ijzer (Fe), zink (Zn), mangaan (Mn) en koper (Cu), zijn in zeer kleine hoeveelheden vereist. Micronutriënten zijn vaak nodig als cofactoren voor enzymactiviteit.

Minerale voedingsstoffen worden meestal via plantenwortels uit de bodem verkregen, maar veel factoren kunnen de efficiëntie van de opname van nutriënten beïnvloeden. Ten eerste kunnen de chemie en samenstelling van bepaalde bodems het voor planten moeilijker maken om voedingsstoffen te absorberen. De voedingsstoffen zijn mogelijk niet beschikbaar in bepaalde bodems of kunnen aanwezig zijn in vormen die de planten niet kunnen gebruiken. Bodemeigenschappen zoals watergehalte, pH en verdichting kunnen deze problemen verergeren. Nutriënten kunnen gebonden zijn aan het klei-humuscomplex. Daar vindt uitwisseling van nutriënten plaats o.a. door gewassen. De maat die de uitwisseling van nutriënten weergeeft is de CEC. Bij een hoge CEC kunnen meer nutriënten gebonden worden en is het risico op het uitspoelen van nutriënten naar diepere bodemlagen of het grondwater lager dan bij een lage CEC (www.vruchtbarebodem.nl).

Daarnaast liggen nutriënten opgeslagen in organisch materiaal. Als organisch materiaal, dat voldoende nutriënten bevat, wordt afgebroken, komen nutriënten vrij. Door het optimaliseren van de pH door bijvoorbeeld te bekalken wordt het bodemleven gestimuleerd, breekt er meer organische stof af en kunnen nutriënten beschikbaar komen voor de plant. Ook de vochttoestand is bepalend voor het vrijkomen en transporteren van nutriënten naar de plant (www.vruchtbarebodem.nl).

Naast de natuurlijke processen die de beschikbaarheid van nutriënten bepalen is bemesting door de boer van doorslaggevend belang om de tekorten op te heffen. Bemesting is alleen nodig als nalevering in de bodem vanuit het bodemadsorptie-complex en vanuit de opgeloste complexe verbindingen achterblijft bij de opname (Udo de Haes *et al.*, 2012). Stikstof en fosfaat waren van oudsher bijna overal schaars, dus de natuurlijke nalevering was in feite altijd onvoldoende. Boeren waren daarom dus ook voortdurend bezig om de bodemvruchtbaarheid op peil te houden, door gebruik te maken van dierlijke mest, menselijke feces, visafval, as, roet, heideplaggen, enz (Udo de Haes *et al.*, 2012). In deze organische meststoffen zijn namelijk zowel macro- als micronutriënten aanwezig (Udo de Haes *et al.*, 2012). Vanaf het midden van de 19e eeuw kwam hierin een omslag door het gebruik van kunstmest. Eerst kwamen P en nitraat (NO_3^-) via guano en chilisalpeter beschikbaar, later volgden P en K uit mijnen en N uit de lucht, langs chemische weg vastgelegd in ammoniak (NH_3).

Dat heeft geleid tot een spectaculaire toename van opbrengsten. Zo vormde de minerale fosfaatbemesting één van de voorwaarden waardoor de wereldbevolking kon toenemen van 1 mld. tot de huidige 7 mld. mensen. Deze eenzijdige aandacht voor NPK, soms ook samen met kalk, is de algemeen gangbare bemestingsstrategie volledig gaan beheersen. Maar een dergelijke



standaardtoepassing van kunstmest heeft een aantal ernstige nadelen voor de landbouw en de wereldvoedselvoorziening. In de eerste plaats heeft bemesting met kunstmest alleen zin als de betreffende nutriënten een beperkende factor zijn voor de gewasgroei. Als hiermee geen rekening wordt gehouden, leidt dit tot verspilling van de meststoffen. In de tweede plaats is er - op mondiaal niveau - weinig aandacht voor het probleem van de “verminderende meeropbrengst”; d.w.z. dat er bij toenemende bemesting met een beperkend nutriënt sprake is een afnemende meeropbrengst van het gewas. Vanaf een bepaalde dosis kan de opbrengst zelfs teruglopen. Dat is zowel een vorm van verspilling als van contraproductief gebruik. In de derde plaats is er weinig aandacht voor interacties met andere nutriënten (Udo de Haes *et al.*, 2012). Toevoeging van teveel P remt de opname van Fe, Zn en Cu door het gewas (Udo de Haes *et al.*, 2012). En om de complexiteit van de bodemprocessen aan te geven: omgekeerd remt toevoeging van teveel Zn de opname van P, Mn, Fe en Cu. De evenwichten zijn verder afhankelijk van de verhoudingen tussen verschillende kationen in de bodem, zoals met name Ca, Mg en K (Udo de Haes *et al.*, 2012). De kern hier is echter dat toevoeging van te veel P kan leiden tot een afname van de gewasproductie door een geïnduceerd gebrek aan micronutriënten. Dat is een sterke maar niettemin wijdverbreide vorm van contraproductief gebruik.

Het is bekend dat planten verschillende responsen laten zien op verschillende specifieke tekorten aan voedingsstoffen en de responsen kunnen per soort verschillen. De meest voorkomende veranderingen zijn remming van primaire wortelgroei (vaak geassocieerd met P-deficiëntie), toename in laterale wortelgroei en -dichtheid (vaak geassocieerd met N-, P-, Fe- en S-deficiëntie) en toename van wortelhaargroei en -dichtheid (vaak geassocieerd met P- en Fe-deficiëntie) (Fransen *et al.*, 1998; Hodge, 2004; Visser *et al.*, 2008; Udo de Haes *et al.*, 2012; in 't Zandt *et al.*, 2015).

Tevens is het produceren van kunstmest een energie-intensief proces afhankelijk van fossiele brandstoffen dat zo de opwarming van de aarde en uitputting van natuurlijke hulpbronnen verergert. Bovendien nemen bekende reserves aan fosfaatgesteenten snel af en wordt voorspeld dat ze binnen enkele decennia zijn uitgeput (Jacoby *et al.*, 2017). Vanwege de omvang en de ernst van deze door bemesting veroorzaakte problemen, is een huidige onderzoeksprioriteit voor de landbouw om alternatieve methoden te ontwikkelen voor het ondersteunen van plantenvoeding met aanzienlijk lagere inputs van minerale meststoffen (Jacoby *et al.*, 2017). Eén van die mogelijkheden is om minerale meststoffen te vervangen door organische inputs en door planten te voorzien van specifieke wortelgeassocieerde microben welke ervoor kunnen zorgen dat organisch gebonden nutriënten worden gedepolymeriseerd en gemineraliseerd. De logica van dit idee is dat biologische inputs duurzamer kunnen worden verkregen dan minerale meststoffen, omdat ontelbare agrarische, industriële en gemeentelijke processen enorme volumes aan nutriëntenrijk "afval" produceren die momenteel worden verwijderd, en waar mogelijk gecomposteerd en toegepast kunnen worden als meststoffen. Een andere factor is dat organisch gebonden voedingsstoffen stabiel zijn in de bodem vergeleken met minerale meststoffen en daarom minder gevoelig zijn voor uitspoeling en vervluchtiging (Cordell & White, 2014; Jacoby *et al.*, 2017). Organische meststoffen worden al gebruikt in biologische landbouwsystemen, maar er is momenteel weinig inzicht in de keuze van plantcultivars en microbiële inoculanten. Dit gebrek aan inzicht ontstaat door twee grote kennislacunes: (1) het is onduidelijk welke strategieën planten gebruiken om gunstige microben te rekruteren en hoeveel genetische variatie bestaat voor deze



eigenschap; en (2) er is onvoldoende kennis van welke specifieke microben de beste partners zijn voor het stimuleren van de opname van plantenvoeding uit organische bronnen van N, P en S (Bender *et al.*, 2016; Reganold & Wachter, 2016; Jacoby *et al.*, 2017).

3.3 De weg naar ondergrondse veredeling

Een toenemende wereldbevolking vereist van landbouwproductiesystemen en rassen dat deze productief kunnen blijven in grillige weerspatronen en in staat zijn om efficiënter nutriënten op te nemen uit de bodem (Reid & Green, 2012). Veredelingsprogramma's zijn traditioneel gericht op bovengrondse delen van de plant (ruwvoer, graan en zaadproductie) voor de productie van voedsel, veevoer en vezels. Veredelaars streven naar het ontwikkelen van verbeterde rassen die een verscheidenheid aan abiotische stressomstandigheden zoals droogte of overstroming kunnen verdragen. Deze benaderingen omvatten een selectie van individuen met verbeterde plantengroei karakteristieken zoals opbrengst of biomassa, zaadproductie, bladoppervlakte, het aantal uitlopers en ziekteresistentie. Strategieën om "wortelveredeling" te implementeren, vereist de identificatie van de ondergrondse worteleigenschappen die een plant in staat stellen om op efficiëntere wijze water en voedingsstoffen onder verschillende milieuomstandigheden te gebruiken. Meerdere studies hebben koppelingen geïdentificeerd tussen wortelkenmerken en gewasproductiviteit, waaronder prestaties onder droogte en graanopbrengst (Kell, 2011; Paez-Garcia *et al.*, 2015). Het begrijpen van de wortelfenomenen en de interactie tussen de wortel en microorganismen welke resulteren in hogere opbrengsten en verhoogde stresstolerantie zouden tastbare doelen kunnen opleveren voor veredelaars om individuen te selecteren met de ideale wortelfenotypen om als ouders te gebruiken voor het ontwikkelen van nieuwe rassen (Reid & Green, 2012). Het succes van veredelingsprogramma's gericht op het aanpassen van worteleigenschappen is afhankelijk van het specifieke kenmerk dat wordt geselecteerd in verschillende gewassen, de erfelijkheid van het kenmerk, het vermogen om nauwkeurig en efficiënt de wortels van meerdere genotypes te fenotyperen, het specifieke landbouwsysteem dat wordt gebruikt (rijgewassen vs. of weiden) en de bodemeigenschappen (Reid & Green, 2012; Paez-Garcia *et al.*, 2015). De landbouw wil en moet duurzamer worden door minder afhankelijk te zijn van eindige grondstoffen zoals fosfaat en stikstofrijke kunstmest, wat veel energie kost om het te maken. Een toekomstige landbouw heeft daarom gewassen nodig die 'flexibel' zijn; planten die zelf veerkrachtig genoeg zijn en kunnen reageren op wisselende bodem of weersomstandigheden.



4. Microben aan het werk!

In de bodem wemelt het van het leven. Dit leven is representatief voor de biologische bodemvruchtbaarheid. Bodemfauna is de verzamelnaam voor een enorme vormenrijkdom aan soorten, die in afmetingen variëren van minder dan een millimeter tot meer dan een meter (Tabel 4; Brussaard *et al.*, 2016). Wat deze soorten met elkaar gemeen hebben is dat hun levenscyclus, of het overgrote deel ervan, zich in de bodem afspeelt (Tabel 4; Brussaard *et al.*, 2016). Daarnaast loopt het aantal soorten nog op door de niet met het oog waarneembare exemplaren zoals bacteriën, schimmels en virussen. Het totale gewicht van micro-organismen (microben) in de grond onder een hectare gematigd grasland kan meer dan vijf ton zijn (vergelijkbaar met een middelgrote olifant) en overschrijdt vaak de bovengrondse biomassa. Deze microben dragen bij aan een breed scala van ecosystemendiensten in de bodem waaronder nutriëntenhuishouding, het reguleren van plantengemeenschappen, het verminderen van vervuiling en helpen de bodemstructuur te stabiliseren. Microben vertegenwoordigen tevens een biotechnologische hulpbron, met veel soorten bacteriën en schimmels die bronnen van antibiotica en andere geneesmiddelen opleveren. De bodem is ook een bron voor ziekteverwekkende bacteriën zoals *Erwinia*- en *Ralstonia*-soorten. Er zijn ook veel bodemgebonden schimmels die schadelijk zijn voor landbouwgewassen zoals *Fusarium*, *Verticilium* en *Rhizoctonia*. Daarnaast is er een groep waterschimmels (öomyceten) zoals *Pythium*, *Aphanomyces* en *Phytophthora*-soorten die grote problemen veroorzaken in bepaalde landbouwgewassen. Tevens hebben we dan ook de groep plantparasitaire aaltjes nog en het lijkt of de bodem één grote bron van ellende is voor onze landbouwgewassen. Gelukkig is slechts een uiterst klein deel van de microben in de bodem schadelijk voor het gewas. Helaas is het vaak wel de minderheid die het grootste effect heeft op het gewas. Het begrijpen van deze organismen en hun behoeften, en hoe ze het functioneren van de bodem beïnvloeden, kan ons helpen de gezondheid van de bodem te verbeteren en daarmee de weerbaarheid van bodem en plant te verhogen. Microben bevinden zich in de rhizosfeer van de plant, we noemen dit ook wel het rhizosfeermicrobioom. Leden van het rhizosfeermicrobioom bezitten een aantal gunstige eigenschappen zoals het bijdragen aan de verwerving van nutriënten, verhoogde stress-tolerantie, bescherming tegen pathogenen in de bodem en immuunregulatie van de gastheer. Door deze eigenschappen kunnen microben de groei en de gezondheid van een plant stimuleren. Er zijn drie mechanismen te onderscheiden: (1) door het manipuleren van de hormonale signalering van planten (Verbon & Liberman, 2016); (2) door afstoten of wegconcurreren van pathogene microbiële stammen (Mendes *et al.*, 2013); en (3) door het verhogen van de beschikbaarheid van bodem gebonden voedingsstoffen (van der Heijden *et al.*, 2008).



Tabel 4: Schatting van het aantal soorten bodemdieren in Nederland (Brussaard et al., 2016)

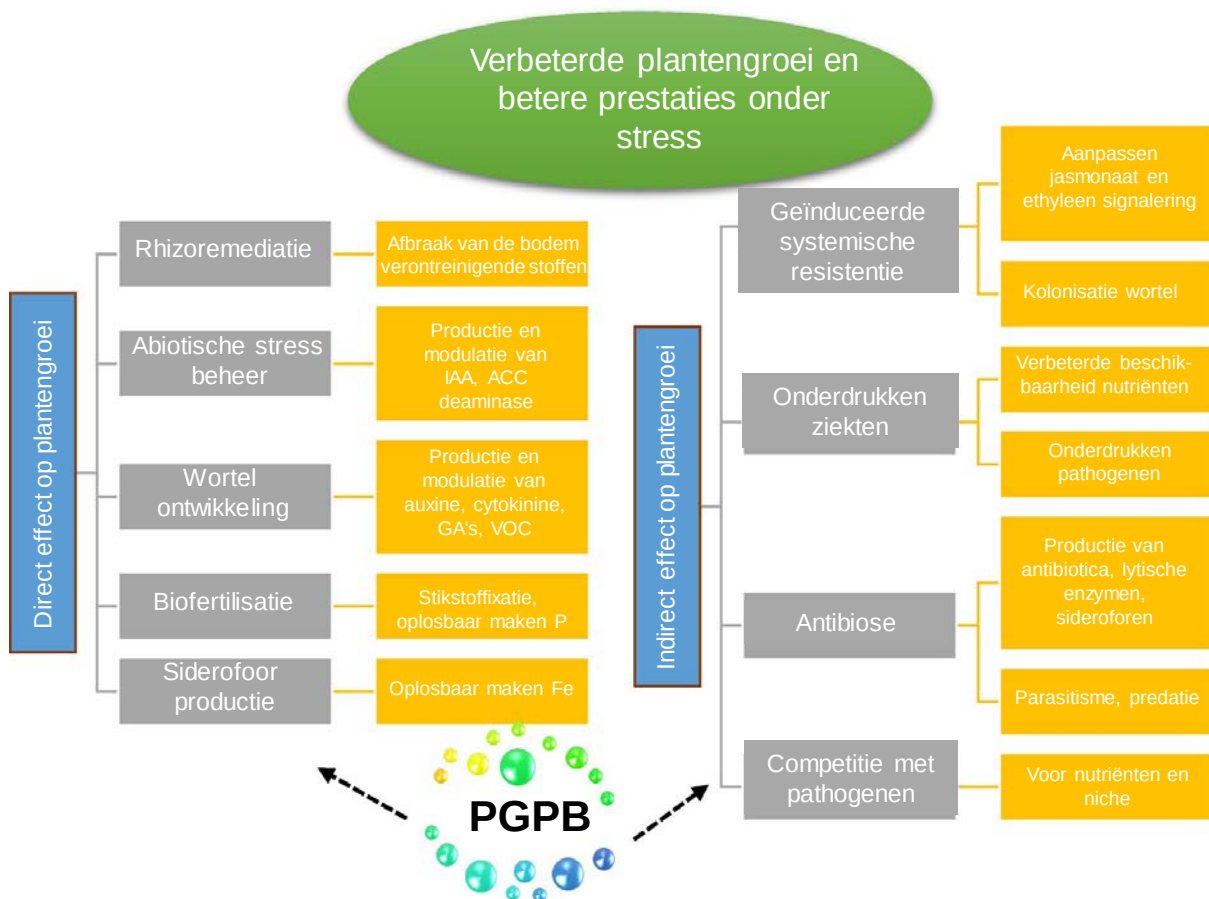
Diergroep	Aantal soorten in Nederland	Aantal soorten in bodem of gebonden aan de bodem	Als % van het totaal aantal soorten	Opmerking
Wormen				
Regenwormen	24	24	100%	
Potwormen	7	7	100%	
Slakken				
Naakt- en huisjesslakken	342	116	34%	Alleen longslakken.
Spinachtigen				
Spinnen	669	167	25%	
Hooiwagens	37	19	52%	
Pseudoscorpionen	23	13	57%	
Mijten	1.132	453	40%	Voornamelijk mosmijten en roofmijten.
Duizendpootachtigen				
Duizendpoten	41	39	95%	
Miljoenpoten	51	50	98%	
Weinigpotigen	9	9	100%	
Wortelduizendpoten	15	15	100%	
Kreeftachtigen				
Vlokreeften	180	5	3%	
Pissebedden	86	39	45%	
Zespotigen				
Springstaarten	344	330	96%	
Beentasters	3	3	100%	
Tweestaarten	10	10	100%	
Insecten				
Rotsspringers	5	5	100%	
Sprinkhanen	46	34	74%	
Kakkerlakken	8	4	50%	
Oorwormen	6	6	100%	
Tripsen	284	10	4%	De meeste Nederlandse soorten verpoppen en overwinteren in de bodem.
Wantsen, cicaden, bladluizen	1.718	147	9%	Vooraf wantsen.
Kevers	4.528	1.950	43%	
Gaasvliegen	73	3	4%	Alleen mierenleeuwen.
Kokerjuffers	180	1	0.6%	
Vlinders	2.206	83	4%	Nog eens 434 vlinders overwinteren en verpoppen in de bodem.
Schorpioenvliegen	6	6	100%	Alleen de nymfen leven in de bodem.
Vliegen en muggen	4.967	2.033	41%	Alleen de larven en de poppen leven in de bodem.
Vliesvleugeligen	5.463	665	12%	Voornamelijk angeldragers (86% van de soorten), nog eens 530 soorten overwinteren en verpoppen in de bodem (bladwespen).
Gewervelden				
Amfibieën	20	0	0%	16 soorten overwinteren in de bodem.
Reptielen	9	8	87%	
Vogels	203	19	9%	Broedend én fouragerend op of in de bodem.
Zoogdieren	116	31	27%	In de bodem levend of graaft een hol.
Totaal	22.811	6.304	28%	

4.1 Manipulatie hormoon signalering

Plantengroeibevorderende bacteriën (Plant Growth Promoting Bacteria, PGPB) werden voor het eerst gedefinieerd door Kloepper & Schroth (1978) als organismen die, na te zijn geënt op zaden, met succes plantenwortels konden koloniseren en de plantengroei positief konden verbeteren. Tot op heden zijn er meer dan twee dozijn geslachten van niet-pathogene rhizobacteriën geïdentificeerd. In veel gevallen kan worden aangetoond dat deze bacteriën direct op de plant werken in afwezigheid van wortelpathogenen door de afgifte van plantengroei-bevorderende verbindingen (bijvoorbeeld



fytohormonen zoals auxinen of cytokininen) en verbetering in opname van nutriënten (bijvoorbeeld door het produceren van sideroforen voor versnellende Fe-beschikbaarheid) (Figuur 6). Plantengroeibevordering kan ook indirect plaatsvinden door controle van pathogenen (biocontrole) via synthese van antibiotica of via secundaire metaboliet-gemedieerde geïnduceerde systemische resistentie (ISR) (Figuur 6) (van Loon *et al.*, 1998; van Loon, 2007). Goed bestudeerde voorbeelden van geïnduceerde resistentie omvatten systemisch verworven resistentie (SAR) en geïnduceerde systemische resistentie (ISR) (Choi *et al.*, 2011; Pieterse *et al.*, 2012). Zowel de SAR- als ISR-functie functioneert systemisch door de hele plant (Choi *et al.*, 2011; Pieterse *et al.*, 2012). Terwijl SAR wordt geactiveerd door necrotiserende pathogenen, wordt ISR geactiveerd door geselecteerde niet-pathogene plant groeibevorderende rhizobacteriën (PGPR; van der Ent *et al.*, 2009). De systemische resistentiereactie geïnduceerd in planten door deze niet-pathogene rhizobacteriën wordt in veel gevallen gereguleerd door de fytohormonen jasmonzuur (JA) en ethyleen (ET). Sommige rhizobacteriën induceren echter geen systemische resistentie via de JA/ET-route maar via de salicylzuur (SA) -route (van de Mortel *et al.*, 2012). De SA-afhankelijke signaleringsroute resulteert in lokale en systemische stijgingen van endogeen gesynthetiseerde SA.



Figuur 6. Een illustratie van de plantengroei bevorderende activiteiten door PGPR (aangepast van Lugtenberg & Kamilova, 2009 en Majeed *et al.*, 2018). IAA: indol-3-azijnzuur, ACC: 1-aminocyclopropan-1-carboxylaat deaminase, Gas: gibberellinen, VOC: vluchtige organische verbindingen.



4.2 De bodem doet het zelf - bodemweerbaarheid

De weerstand van de bodem tegen ziekten en plagen zorgt ervoor dat een gewas niet direct ziek wordt zodra er een ziekteverwekker in de bodem opduikt. Bodemweerbaarheid ontstaat door de biologische activiteit in de bodem, maar ook de chemische en fysische gesteldheid van de bodem spelen een rol. Weerstand van de bodem tegen ziekten en plagen wordt ook wel ziekteverdringendheid (*soil suppressiveness*) genoemd en is het verschijnsel waarbij de ontwikkeling van ziekten minimaal is, zelfs in de aanwezigheid van een virulent pathogeen en een vatbare gastheer (Baker & Cook, 1974; Cook & Baker, 1983; Mazzola, 2002; Schlatter *et al.*, 2017). Het bestaan van ziekteverdringende bodems is al meer dan 100 jaar bekend en de mechanismen waarmee ziektesuppressie tot stand wordt gebracht, wordt al bijna vier decennia bestudeerd (Baker & Cook, 1974; Cook & Baker, 1983; Mazzola, 2002; Schlatter *et al.*, 2017). Door een samenspel van biotische en abiotische factoren blijft zelfs bij aanwezigheid van schadeverwekkers de opbrengstderiving op ziekteverdringende bodems beperkt (Mazzola, 2002). Er wordt verondersteld dat natuurlijke (biodiverse) bodems een algemene (of 'natuurlijke') weerstand tegen bodempathogenen kennen. Een grote biodiversiteit van bodemflora en -fauna die de voortplanting van bodempathogenen afremt, zou een mogelijke verklaring zijn. Er zijn twee vormen van ziekteverdringendheid: (1) algemene ziekteverdringendheid en (2) specifieke ziekteverdringendheid (Mazzola, 2002). Algemene ziekteverdringendheid komt voort uit de diversiteit en activiteit van het bodemleven (Mazzola, 2002; Cook, 2014; Schlatter *et al.*, 2017). Door onderlinge concurrentie om ruimte en voedingsstoffen wordt uitbreiding van schadelijke organismen afgeremd en is de omvang van een aantasting geringer dan in een steriele grond (Mazzola, 2002). Voor algemene ziekteverdringendheid is geen specifiek organisme aan te wijzen dat ten grondslag ligt aan de verminderde schadegevoeligheid, maar spelen meerdere factoren een rol (Mazzola, 2002; Schlatter *et al.*, 2017). Bij specifieke ziekteverdringendheid gaat het om een beperkt aantal antagonisten ("een gunstig organisme") dat in staat is één of een aantal schadeverwekkers in een bepaald gewas in toom te houden bijvoorbeeld via predatie of door het uitscheiden van antibiotica. Deze specifieke ziekteverdringendheid is in principe zowel stuurbaar als overdraagbaar, mits we het mechanisme van dit beperkt aantal antagonisten in de complexe omgeving begrijpen (Weller *et al.*, 2002; Schlatter *et al.*, 2017). Een voorbeeld van ziekteverdringende bodems in de Nederlandse vollegrond is bijv. de continue teelt van bloemkool welke de infectie van *Rhizoctonia solani* onderdrukt doordat er een opbouw van antagonisten optreedt gedurende de tijd (Postma & Schilder, 2005). De natuurlijke onderdrukking van zo'n ziekteverwekkende bodemschimmels wordt dus vooral bepaald door de activiteit en de samenstelling van de microben in de bodem. Deze activiteiten zijn goed te sturen door goed bodembeheer met organische meststoffen, zoals groenbemesters of compost (Cook, 2014; Schlatter *et al.*, 2017). De timing van het bemesten is dan wel belangrijk wat betekent dat de microben in de bodem de makkelijk afbreekbare onderdelen van de meststoffen al op hebben op het tijdstip dat de gewassen gezaaid of gepoot worden (Brussaard *et al.*, 2016). Op hetzelfde moment scheiden de jonge planten ook voedingsstoffen uit via de wortels voor de microben waardoor de bodem vol zit met microben die geen schade doen aan het gewas. De ziekteverwekkers krijgen op dat moment minder kans om een infectieproces op gang te brengen. Naast het toevoegen van organische meststoffen kan een agrarische ondernemer of veredelaar ook kiezen voor planten die de weerbaarheid van de bodem verhogen door de zogenoemde wortellexudaten (Brussaard *et al.*, 2016). Wortellexudaten bevatten



componenten die worden gebruikt in strategieën voor ondergrondse communicatie, zoals flavonoïden, strigolactonen of terpenoïden (Bais *et al.*, 2006; Venturi & Fuqua, 2013; Jacoby *et al.*, 2017; Massalha *et al.*, 2017). Bepaalde wortel-exudaten worden door de plant uitgescheiden waardoor bijvoorbeeld ziekte-onderdrukkende microben worden gestimuleerd. We hebben hier nog wel veel te leren waarbij vooral gebruik gemaakt zou kunnen worden van de wilde verwanten van bepaalde gewassen (Brussaard *et al.*, 2016).

4.3 Beschikbaarheid voedingsstoffen verhogen

De observatie dat het opnemen van vlinderbloemigen bij vruchtwisselingen resulteert in betere opbrengsten van niet-vlinderbloemigen gaat vele eeuwen terug tot de Romeinen en Grieken. Het duurde echter tot 1888 voordat Hellriegel & Wilfarth definitief bewezen dat de oorzaak van de verbeterde opbrengst was gelegen in de omzetting van stikstofgas (N_2 (g)) uit de atmosfeer in ammoniak, een vorm die door de plant kan worden gebruikt. Dit wordt veroorzaakt door *rhizobium*-bacteriën (*Rhizobium leguminosarum*) gehuisvest in knobbeltjes op de wortels van vlinderbloemige planten (Hirsch, *et al.*, 2001). Deze ontdekking inspireerde Lorenz Hiltner (1904), die zijn carrière wijdde aan het onderzoeken en ontwikkelen van rhizobiale inoculanten, om de landbouwproductiviteit te verbeteren, wat uiteindelijk leidde tot zijn ontwikkeling van het rhizosfeer concept. De wisselwerking tussen *rhizobia* en peulvruchten is sinds die tijd uitgebreid bestudeerd en heeft verschillende facetten van de interactie toegelicht. Wat we hebben geleerd, is dat de dialoog tussen de rhizobiumbacterie en de plant eerst begint met een chemisch signaal (flavonoïde) dat vrijkomt wanneer de plant onder N uitgehongerde omstandigheden verkeert. Het flavonoïdensignaal induceert nodulatiegenen (nod genen) in de rhizobia die coderen voor enzymen, die bekend staat als een Nod-factor, welke nodig is om een chemische reactie (lipochitooligosaccharide) te produceren voor de plant. De Nod-factoren initiëren een cascade van ontwikkelingsprocessen in de plantenwortel die de invasie van de bacteriën en de vorming van de knolletjes mogelijk maken waarin de bacteriën uiteindelijk worden gehuisvest (Jones *et al.*, 2007). De structuur van de Nod-factoren is grotendeels soort specifiek en is één van de redenen voor de waargenomen gastheerspecificiteit tussen *rhizobia* en hun plantpartners (Oldroyd & Downie, 2008). Deze specificiteit is vrij verbazingwekkend, aangezien één gram aarde (ongeveer de grootte van een rozijn) meer dan 10^9 bacteriën bevat met wel 10.000 verschillende soorten, waarvan een minuscule hoeveelheid het vermogen heeft ontwikkeld om symbiotisch samen te leven met planten.

Behalve symbiotische relaties met bacteriën, kunnen planten ook een symbiotische relatie aangaan met schimmels. De huidige schattingen van de frequentie van plant-mycorrhiza-associaties suggereren dat ongeveer 80% van alle planten een soort van mycorrhiza-symbiose hebben en veel studies geven aan dat deze relaties miljoenen jaren oud zijn (McNear, 2013). Mycorrhiza schimmels helpen planten bij het verkrijgen van water, fosfor en micronutriënten (bijv. Zn en Cu) uit de grond en ontvangen in ruil daarvoor voedsel (koolstof in de vorm van suiker) van de plant. Er zijn twee categorieën mycorrhiza-associaties te benoemen nl., ectomycorrhiza en endomycorrhiza, die gedifferentieerd zijn door hoe ze fysiek met de plant in verbinding staan (Brundrett, 2004). De ectomycorrhiza (EM) komen vooral voor in de wortels van houtachtige planten (d.w.z. bomen) en vormen een dichte bedekking van hyfen (schede of mantel) over de wortelpunt van waaruit hyfen groeien tot de intercellulaire ruimten die een net vormen (Hartig



net) van hyfen rond de wortelcortexcellen, maar doordringen de celwanden niet. Daarentegen groeien de endomycorrhiza-schimmelhyfen wel in de cortex van de wortel en komen ze in de cellen die een waaivormige, sterk vertakte structuur vormen die bekend staat als een arbuscul en gescheiden blijft van het cytoplasma door het plasmamembraan van de plant (Harrison, 2005). De endomycorrhiza kan verder worden verdeeld in de wijdverspreide arbusculaire mycorrhiza (AM) en de gespecialiseerde orchidee en ericoïde mycorrhiza's die, zoals de naam impliceert, orchideeën en ericoïde (bijvoorbeeld cranberry) plantensoorten kunnen koloniseren. De AM-schimmelassociaties zijn de meest voorkomende van alle mycorrhiza-associaties. In beide gevallen verhogen de gevormde structuren dus het contactgebied tussen de schimmel en de plant waardoor de overdracht van voedingsstoffen naar de plant en koolstof naar de schimmel plaatsvindt. In tegenstelling tot de ectomycorrhiza, zijn de arbusculaire endomycorrhiza of vesiculaire arbusculaire mycorrhiza (VA-mycorrhiza of VAM) volledig afhankelijk van de plant voor hun koolstof en wanneer associaties voorkomen, kunnen zowel endomycorrhiza als ectomycorrhiza 4-40% van de totale fotosynthetisch gefixeerde koolstof die de plant produceert opeisen (Smith & Read, 2008). Om voedingsstoffen voor de plant te vangen, breiden zowel de ecto- als endomycorrhiza hyfen uit in de grond, wat resulteert in een 10-voudige toename van het effectieve worteloppervlak en een 2-3-voudige toename in de opname van fosfor (en andere voedingsstoffen) per eenheid wortellengte in vergelijking met niet-mycorrhiza-planten. Het is niet alleen de hoeveelheid hyfen die helpt bij de verwerving van voedingsstoffen, maar ook hun kleine diameter ($<10\text{ }\mu\text{m}$) waarmee ze toegang hebben tot kleine poriën in de bodem en scheuren die de plantwortel anders niet zou kunnen bereiken. Het netwerk van schimmelhyfen afkomstig van de plantenwortels heeft ook een enorme invloed op de bodemkwaliteit. De mycorrhizahyfen bevorderen de vorming en stabiliteit van bodemaggregaten via biologische, fysische en biochemische mechanismen die bodemerosie verminderen en bodembeluchting en waterinfiltratie verhogen, wat samen de productiviteit van de plant verbetert (Rillig & Mummey, 2006). Interessant is dat het dichte, met elkaar verweven netwerk van schimmelhyfen een "gemeenschappelijk mycorrhizaal netwerk" (CMN) vormt, waarin hyfen van mycorrhiza die twee of meer planten infecteren met elkaar zijn verbonden. Via de CMN is aangetoond dat planten voedingsstoffen delen en de interacties tussen planten mediëren die niet onmiddellijk dezelfde ruimte delen (Simard *et al.*, 1997; Selosse *et al.*, 2006; Simard *et al.*, 2012). Er is aangetoond dat de diversiteit van deze interacties en de mycorrhiza-schimmel die daarin voorkomt, van grote invloed zijn op de plantendiversiteit, de ecosysteemfunctie en stabiliteit en dus van groot belang in duurzaam bodembeheer (Finlay, 2008).

4.4 Microben als bodemverbeteraars en plantversterkers

Voor het verbeteren van de natuurlijke weerbaarheid van de bodem en de plant kunnen bodemverbeteraars of biostimulanten worden gebruikt. In Nederland zijn diverse typen bodemverbeteraars en biostimulanten in omloop. Bodemverbeteraars worden aan de bodem toegediend om de fysische en chemische eigenschappen, de bodemstructuur en de bodem biologische activiteit te handhaven of te verbeteren. Enkele van de bodemverbeteraars bevatten relatief veel organische stof. De meest algemeen bekende bodemverbeteraar is compost. Maar compost is er in zoveel soorten en vormen dat het niet eenvoudig is om goede van slechte compost te onderscheiden (Termorshuizen *et al.*, 2006).



Biostimulantia voor planten, of biostimulerende middelen in de landbouw, omvatten verschillende stoffen en micro-organismen die de groei van planten bevorderen. Biostimulanten bevatten substanties en/of micro-organismen waarvan de functie het stimuleren van de plantenvoedingsprocessen onafhankelijk van het nutriëntengehalte van het product is met als enig doel om de efficiëntie van het nutriëntengebruik, de tolerantie voor abiotische stress en gewaskwaliteit te verbeteren. Biostimulanten hebben geen directe actie tegen plaagorganismen en vallen daarom niet onder het regelgevend kader van pesticiden.

Vanwege de groeiende bezorgdheid over het gebruik van chemische meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen en de afnemende beschikbaarheid van bestrijdingsmiddelen, bieden biostimulanten en bodemverbeteraars natuurlijk uitstekende kansen als potentiële biopesticiden. Er zijn dan ook verschillende mogelijkheden voor het gebruik van nuttige microben in de landbouw voor het verbeteren van stikstof, fosfor en andere voedingsstoffen in de bodem en het beschermen van gewassen tegen pathogene besmetting en abiotische stress zoals al aangegeven in paragraaf 4.1, 4.2 en 4.3. Kerngebieden in de landbouw waar PGPB's al worden gebruikt als alternatieve agentia voor gevaarlijke agrochemicaliën zijn nutriëntentekort, te zoute, of met zware metalen verontreinigde bodems en gebieden waar de beschikbaarheid van de belangrijkste macrovoedingsstoffen een punt van zorg blijft voor de groei van planten. Op dezelfde manier is het toepassen van verschillende PGPB's, om onkruid en fytopathogenen te onderdrukken, een aantrekkelijk hulpmiddel als biocontrole middel. In verschillende studies is geschetst dat bepaalde PGPB-stammen potentiële capaciteit hebben diverse organische verbindingen aan de bodem toe te voegen, naast hun actieve rol in het oplosbaar maken van fosfor, stikstof en andere macro- en micronutriënten (Alori *et al.* 2017; Bagyalakshmi *et al.*, 2017; Sharma *et al.* 2017; Zaidi *et al.* 2017a, b; Liu *et al.* 2018). De toevoeging van organische verbindingen aan de bodem en het oplosbaar maken van essentiële voedingsstoffen zoals bijv. ijzer door PGPB's verhogen aanzienlijk het potentieel van planten om voedingsstoffen binnen te krijgen die leiden tot verhoogde groei en productiviteit.

Het gaat bij biostimulanten en bodemverbeteraars niet alleen om microben maar om een groot aantal en breed scala aan producten. Grote groepen van producten zijn gebaseerd op zeewier- en algenextracten, humuszuren, biomeststoffen (biofertilizers, hier gedefinieerd als producten op basis van organismen, bv. *Rhizobium* en *Mycorrhizaschimmels*), eiwitten, aminozuren, chitine en compost (en andere organische bulkmaterialen) (Termorshuizen, 2018). Vaak gaat het dan ook nog eens om mengsels van deze inhoudsstoffen (Termorshuizen, 2018). De claims van veel van deze producten zijn omvangrijk. Vaak geven dit soort producten een positief effect op de groei en ontwikkeling van de plant, toepassing is tevens mogelijk op veel of op de meeste gewassen, zowel boven- als ondergronds en dit laatste dan meestal ook nog onafhankelijk van de grondsoort. Veel van deze claims zijn alleen niet onderbouwd. Op dit moment is er geen regelgeving omtrent de registratie van biostimulanten en bodemverbeteraars. De EU wil wel graag dat het gebruik van biostimulanten en bodemverbeteraars ook gereguleerd wordt en dus is men bezig met regelgeving omtrent deze producten. Want ook biostimulanten moeten doen wat beloofd wordt. Hoe die claims kunnen worden vastgesteld, is een punt waarover op dit moment nog geen concrete ideeën bestaan. Moeten gecertificeerde instellingen de werkzaamheid gaan bevestigen (dat kost veel geld), of is een beroep op dat de werking in principe is



vastgesteld (bijvoorbeeld in labproeven met *Arabidopsis*) voldoende? Of moeten we het de telers maar gewoon laten uitproberen, en is een check op mens- en milieuveiligheid voldoende? Dit zijn op dit moment nog punten van aandacht omtrent biostimulanten en bodemverbeteraars (Termorshuizen, 2018).

4.5 Microben meetbaar maken

Het begrijpen van de dynamische rol van microbiële gemeenschappen in een snel veranderende omgeving is een belangrijke en op dit moment niet te beantwoorden uitdaging. Van een aantal microben weten we welke effecten deze hebben op de plant maar er zijn nog geen data beschikbaar van alle interacties en zelfs als dat wel zo was dan zijn deze plant-microben interacties zo dynamisch dat het moeilijk blijft om hier een goed model voor op te stellen (Reid & Green, 2012). De vragen die dus op dit moment nog onbeantwoord blijven zijn: (1) Hoe veerkrachtig zijn microbiële gemeenschappen in het licht van zo'n snelle wereldwijde verandering? (2) Kunnen microbiële gemeenschappen, hoe veelzijdig ze ook zijn, helpen om belangrijke elementaire cycli te bufferen en reguleren, die nu snelle verschuivingen ondergaan zoals bijv. in het geval van koolstof? (3) Kunnen veranderingen in microbiële gemeenschappen dienen als sensoren en systemen voor vroegtijdige alarmering van omgevingsstoringen? (4) In hoeverre kunnen we microbiële gemeenschappen 'managen' om de effecten van menselijke activiteiten op natuurlijke elementaire kringlopen verstandig en doelbewust te moduleren? Nooit eerder hadden dergelijke vragen zo'n hoge urgentie. Gegeven dat microbiële gemeenschappen diepgaande geochemische en broeikasgascycli beïnvloeden, is het relevant om te vragen hoe goed we microbiële gemeenschappen eigenlijk begrijpen. In het verleden was het moeilijk om microben in hun eigen omgeving te bestuderen; microbiologen bestudeerden afzonderlijke soorten één voor één in het laboratorium. Het blijkt nu dat veel microben in de natuur functioneren als multicellulaire, vaak multi-species, entiteiten, soms zelfs fysiek (zoals in biofilms) en metabolisch verbonden (Dupré & O'Malley, 2009).

Zelfs in de 19e eeuw geloofden sommige wetenschappers nog dat microben spontaan werden gegenereerd uit niet-levende materie of uit andere organismen. Het was moeilijk om vast te stellen dat zulke kleine entiteiten, organismen waren die tot definieerbare, vaste soorten behoorden. Het vaststellen van soorten was vooral belangrijk in theorieën over ziekteveroorzaking; vaste soorten waren essentieel als een enkele bacteriesoort verantwoordelijk zou worden gehouden voor een enkele infectieziekte. Landbouwers en botanici hadden lang vermoed dat één of ander ongezien organisme geassocieerd was met plantenziekte; in 1726, bijvoorbeeld, zagen boeren de overeenkomst tussen berberisnootroest en tarweroest wat leidde tot het verbieden van struiken door de koloniale wetgever van Connecticut (Campbell *et al.* 1999; National Research Council, 2007). Meer dan een eeuw later demonstreerde de Duitse botanicus Anton de Bary de correlatie tussen de levenscyclus van *Phytophthora infestans* (*P. infestans*) en de ziektecyclus van de aardappelziekte. In een reeks experimenten, uitgevoerd in de late jaren 1850 en vroege jaren 1860, bouwde hij voort op het vorige werk van J. Speerschneider en Marie-Anne Libert en stelde vast dat *P. infestans* inderdaad de oorzaak van de aardappelziekte was (National Research Council, 2007; Matta, 2007). Aantonen dat micro-organismen niet spontaan werden gegenereerd en uit verschillende soorten bestonden, was ook van fundamenteel belang voor de bacteriologie. Robert Koch publiceerde zijn beschrijving van de



levenscyclus van *Bacillus anthracis* (de oorzaak van anthrax) in 1876 en publiceerde vervolgens een reeks artikelen waarin hij een experimentele methode vaststelde voor het bevestigen van de specifieke oorzaken van verschillende infectieziekten. In een artikel uit 1884 over tuberculose schetste hij zijn vier 'postulaten' voor het bewijs van microbiële veroorzaking: een organisme moet worden gevonden in alle gevallen van de ziekte, maar niet in gezonde gastheren, het organisme moet worden geïsoleerd van de gastheer en worden gekweekt in pure cultuur, de herintroductie van het organisme uit dergelijke culturen moet ziekte veroorzaken bij gezonde gastheren en het organisme moet weer isoleerbaar zijn van dergelijke geïnfecteerde gastheren (Brock & Koch, 1999; Munch, 2003). Die rigoureuze aanpak, met name de nadruk op pure culturen (een cultuur die organismen van slechts één type bevat) bepaalde de normen voor de microbiologie als geheel.

Tegen het midden van de 20e eeuw, werden zelfs met "omgevingsmicroben" (de overgrote meerderheid van onschadelijke en nuttige bacteriën, archaea en microbiële eukaryoten), zuivere culturen een gouden standaard voor experimenten en de basis van bijna alle recente kennis van medische bacteriologie, biochemie en moleculaire biologie. In het zuivere cultuurparadigma betekent de aanwezigheid van meerdere soorten in hetzelfde kweekmedium, 'besmetting' en soorten waarvan de groei metabolische producten van andere soorten vereist, zijn onmogelijk te detecteren, te bestuderen of zelfs maar te noemen. Het is niet verrassend dat microben die goed groeien als enkele cellen gesuspenseerd in een vloeibaar medium en die gemakkelijk afzonderlijke kolonies op Petri-platen kunnen vormen, het model werden voor een groot deel van de moderne biologie. Inderdaad, veel microbiologen keken naar de "planktonische" staat als de natuurlijke conditie van microben. Complexe gemeenschappen en slijmerige biofilms waren op de één of andere manier een afwijking en onwaardig voor serieuze wetenschappelijke aandacht. Tegenwoordig is het duidelijk dat veel microben leven in gemeenschappen waarvan leden op complexe manieren een interactie aangaan en communiceren (Reid & Greene, 2012; Selosse *et al.*, 2015). Microbiële gemeenschappen werken vaak samen via het medium (water of bodem) waarin ze groeien, waarbij voedingsstoffen, biochemische producten en chemische signalen worden uitgewisseld zonder direct cel-cel contact. Sommigen groeien op oppervlakken (op zwevende deeltjes, op de wanden van pijpen, op tanden) waar ze in fysiek contact zijn met anderen van hun eigen soort en met andere soorten. Biofilms, aggregaten van microbiële cellen ingebed in een extracellulaire polysacharide matrix, vertonen een grote verscheidenheid aan complexe structuren. De samenstelling van dergelijke gemeenschappen is allesbehalve toevallig. Veel microben zijn geëvolueerd om samen te groeien in oppervlaktegemeenschappen en veel van hun collectieve activiteiten, van vitaal belang voor de biosfeer of zelfs schadelijk voor de menselijke gezondheid, weerspiegelen de fysieke structuur en arbeidsverdeling binnen de gemeenschappen.

De studie van microben in de kweek zal altijd belangrijk blijven, maar het geeft te weinig informatie om ons te laten leren over de specifieke interacties in een ecosysteem. Het begrijpen van microbiële gemeenschappen vereist dat de traditionele technieken van zuivere cultuur worden aangevuld met nieuwe benaderingen.

Een benadering die in belangrijke mate heeft bijgedragen aan het begrip van alle organismen is genomica - leren over de evolutie en het vermogen van organismen door de volgorde van hun DNA te ontcijferen. Genomica heeft ook de kennis binnen microbiologie bevorderd, maar, net als een zuivere



cultuur, is traditionele genomica beperkt in haar vermogen om de dynamiek van microbiële gemeenschappen op te helderen.

Geschat wordt dat slechts 0,1 - 1,0% van de levende bacteriën die in de bodem aanwezig zijn, onder standaardomstandigheden kan worden gekweekt. Gegeven het bewijs dat veel micro-organismen zich niet laten cultiveren, zijn cultuuronafhankelijke methoden voor het identificeren en opsommen van microben in de omgeving de laatste decennia een steeds grotere rol gaan spelen. Overheersend onder hen is ribosomaal RNA (rRNA) fylogtering, een krachtige techniek - ontwikkeld door Pace en zijn collega's (Pace, 1997). Deze methode is gebaseerd op de enorme database van rRNA-gen sequenties (meer dan 200.000) die zijn verzameld met het oog op de reconstructie van de universele Tree of Life. Door de sequentie van de rRNA-genen van een organisme te bepalen, kan men het plaatsen op de juiste tak van de Tree of Life en daaruit afleiden dat zijn biologie en ecologie waarschijnlijk vergelijkbaar zijn met die van zijn naaste verwanten, de dichtstbijzijnde takken aan de boom. Een organisme hoeft niet kweekbaar te zijn om het fylotype te bepalen.

Het zuivere cultuurparadigma heeft zich niet alleen beperkt tot wat microbiologen hebben bestudeerd; het heeft ook beperkt hoe ze denken over microben. Microben zijn bestudeerd als soevereine entiteiten en alleen onderzocht op hun reacties op de eenvoudige chemicaliën die kunnen worden toegevoegd aan hun media. We weten weinig over hun gedrag als partners in de strategische allianties die metabole consortia zijn. De onzichtbare leden van een microbiële gemeenschap kunnen enorme verschillen in hun biochemische activiteiten en interacties hebben en dan niet alleen tussen soorten, maar ook binnen soorten. Fylogtering geeft betrouwbare informatie over "Wie is daar?" Maar vanwege genomische diversiteit binnen de soort, geeft het onvolmaakte inschattingen over "Wat doen ze?". Metagenomische methoden, zoals het sequencen van een genoom of metatranscriptomics, geven het antwoord op de tweede vraag. Uiteindelijk kan het mogelijk zijn om ecosystemen zelfs te zien als biologische entiteiten met hun eigen genetische karakteristieken om zo de beschouwing van individuele soorten te omzeilen. Vervolgens kunnen zowel 'Wie is daar?' en 'Wat doen ze?' worden vervangen door 'Wat wordt er door de community gedaan?' Hoe sneller, goedkoper en toegankelijker deze technieken worden, hoe gemakkelijker het zal zijn om patronen in de microbiomen van verschillende planten in meerdere omgevingen te onderscheiden. Op dit moment zijn de metagenomische methoden nog te duur voor de agrarische sector om routinematig toe te passen.

Voor het meten van de microbiële biomassa (totaal, Mic-C, Mic-N), de bacterie biomassa en de schimmelbiomassa zijn op dit moment drie technieken beschikbaar, namelijk de Phospholipid Fatty Acid (PLFA) techniek, de Rusch-test en Denaturerende Gradiënt Gel Elektroforese (DGGE). Met PLFA worden de fosfolipide vetzuren aanwezig in een bodemmonster geanalyseerd d.m.v. gaschromatografie. Fosfolipide vetzuren zijn aanwezig in alle membranen van levende wezens en bepaalde vetzuren zijn specifiek voor bepaalde functionele microbiële groepen in het bodemvoedselweb. We kunnen de resultaten opdelen in zes groepen organismen (niet specifieke bacteriën, gram-positieve bacteriën, gram-negatieve bacteriën, schimmels, actinomyceten en VA-mycorrhiza schimmels) die bepaald worden door 20 vetzuren.

Met de Rusch-test wordt de hoeveelheid en kwaliteit van het leven in de bodem bepaald door het aantal bacteriën in een bodemextract onder de microscoop te tellen (Rusch, 1968; vanHoof, 2014; Willekens



& Debode, 2015). Sinds 2008 maakt Peter VanHoof gebruik van de Rusch-test en heeft hier tevens metingen van pH, redoxpotentiaal en elektrische geleidbaarheid aan toegevoegd om een beter beeld te krijgen over de bodemkwaliteit.

Met DGGE wordt de genetische diversiteit van een specifieke microbiële groep in de bodem (bv. de bacteriën) bepaald. Hierbij wordt een stukje DNA vermeerderd dat exclusief voorkomt binnen deze specifieke microbiële groep. De genetische samenstelling van dit DNA wordt dan in kaart gebracht in de vorm van een bandenpatroon. Het aantal banden is een weerspiegeling van de diversiteit en de intensiteit van een band is een maat voor de relatieve aanwezigheid van een microbiële subgroep. Met deze techniek kunnen enkel de meest voorkomende subgroepen in de gemeenschap worden weergegeven. In een CCBT project werden deze drie microbiologische bepalingsmethoden met elkaar vergeleken om een eenvoudige indicator voor bodemleven te vinden (Willekens & Debode, 2015). Uit de resultaten kon worden geconcludeerd dat het met de Rusch-test niet mogelijk bleek te zijn om verschillen tussen bodembehandelingen vast te stellen in proefopzetten (Willekens & Debode, 2015). De test bleek echter wel geschikt te zijn voor een snelle eerste screening van bodemkwaliteit van praktijkpercelen. De PLFA methode was wel in staat verschillen tussen bodembehandelingen te detecteren en is een goede indicator voor bodemkwaliteit, maar dit is een gespecialiseerde techniek en dus geen snelle indicator (Willekens & Debode, 2015). Tevens was er een correlatie te zien tussen de resultaten van zowel de Rusch-test als de PLFA-methode en chemische indicatoren voor bodemkwaliteit zoals totale organische koolstofgehalte (TOC), heet water extraheerbare koolstofgehalte (HWC) en totale stikstofgehalte (N_{tot}) (Willekens & Debode, 2015). De DGGE-techniek bleek een minder geschikte methode volgens Willekens & Debode (2015). Dankzij dit soort studies waarbij naar correlaties wordt gezocht tussen de fysische, chemische en biologische parameters gaan we in de toekomst ook steeds meer begrijpen van het bodemleven.



5. Tech als middel

Efficiëntie en productiviteit zullen de komende jaren toenemen als 'precisielandbouw' groter wordt en boerderijen meer verbonden raken (Beulens *et al.*, 2015). Naar schatting zullen in 2020 meer dan 75 miljoen Internet of Things (IoT)-apparaten in de landbouw worden gebruikt: de gemiddelde boerderij zal dagelijks 4,1 miljoen gegevenspunten genereren in 2050, tegen 190.000 in 2014 (De Clercq *et al.*, 2018).

Maar hoewel het groeiende aantal aangesloten apparaten een grote kans biedt voor voedselproducenten, voegt het ook complexiteit toe. De oplossing ligt in het gebruik maken van cognitieve technologieën die helpen begrijpen, leren, redeneren, interageren en de efficiëntie verhogen. Sommige technologieën gaan verder dan andere. Maar de innovaties houden veel belofte in. Hier zijn enkele belangrijke game-changers voor de landbouw (De Clercq *et al.*, 2018):

- Internet of Things (IoT): Digitale transformatie verstoort de landbouwwereld. IoT-technologieën maken correlaties van gestructureerde en ongestructureerde gegevens mogelijk, om inzicht te verschaffen in voedselproductie. IoT-platforms zoals Watson van IBM zijn machine learning aan het toepassen om data te testen of te delen en om managementsystemen om te zetten in echte Artificial Intelligence (AI)-systemen.
- Automatisering van vaardigheden en personeel: tegen 2050 verwacht de VN dat tweederde van de wereldbevolking in stedelijke gebieden zal wonen, waardoor het aantal arbeidskrachten op het platteland zal afnemen. Er zijn nieuwe technologieën nodig om de werklust voor landbouwers te verlichten: activiteiten zullen op afstand worden uitgevoerd, processen zullen worden geautomatiseerd, risico's worden geïdentificeerd en problemen worden opgelost. In de toekomst zullen de vaardigheden van een agrarische ondernemer steeds meer een mix van technologie en biologische vaardigheden zijn in plaats van pure landbouw.
- Data gedreven landbouw: door het analyseren en correleren van informatie over het weer, soorten zaden, bodemkwaliteit, ziekteverschijnselen, historische gegevens, markttrends en prijzen, zullen boeren weloverwogen beslissingen nemen.
- Chatbots: momenteel worden AI-aangedreven chatbots (virtuele assistenten) gebruikt in de sectoren retail, reizen, media en verzekeringen. Maar de landbouw zou deze technologie ook kunnen gebruiken door agrarische ondernemers te helpen met antwoorden en aanbevelingen over specifieke problemen.

5.1 Precisielandbouw

Precisielandbouw (PL) is een bedrijfsmanagementconcept waarin gewassen en dieren op het juiste moment en in de juiste mate de juiste behandeling krijgen op de kleinste mogelijke schaal (Kempenaar, 2018). Met precisielandbouw wordt zowel de economische als ook de ecologische en maatschappelijke duurzaamheid van landbouw vergroot. PL wordt ook wel Smart farming of Digital farming genoemd. PL wordt alleen nog niet ten volle benut op agrarische bedrijven. Plaatsbepalingstechnologie is sinds ongeveer 2010 in Nederland wel al een gemeengoed geworden op akkerbouwbedrijven en bij



loonwerkers (ook wel PL1.0 genoemd) (Kempenaar, 2018). Vanaf 2016, kunnen op basis van digitale kaarten met de ruimtelijke variatie in gewas of bodem, taakkaarten worden gemaakt voor variabel doseren (PL2.0). Deze taakkaarten gaan vooral over optimalisatie van operationeel management, zoals plaats specifiek doseren van bemesting of bestrijdingsmiddelen (Kempenaar, 2018). De taakkaart is vaak gebaseerd op één kaartlaag (bijv. een satellietbeeld). De volgende stap in PL ligt bij slim datagebruik over teelten en bedrijven heen om nieuwe kennis te genereren en om betere strategische en tactische beslissingen te nemen (Kempenaar, 2018). Het combineren van dronetechnologie met data uit sensoren kan uiteindelijk resulteren in een “Internet of Soils” waarbij correlaties van gestructureerde en ongestructureerde gegevens inzicht verschaffen in de kwaliteit en gezondheid van bodem en gewas.

5.1.1 Sensoren

De mogelijkheden tot het gebruik van instrumenten zoals sensoren zijn voortdurend in ontwikkeling, met het doel om meer en meer complexe verschijnselen te beschrijven. In eerste instantie was het aanpassen van standaardtechnologieën voor fenotyperingstoepassingen de belangrijkste trend. Sensoren kunnen namelijk allerlei planteigenschappen meten, zoals bijv. gewasopbrengst, opbrengststabiliteit, middelopname en gebruiksefficiëntie (bijvoorbeeld water en stikstof), kwaliteit (of chemische samenstelling) van het geoogste product, of resistentie tegen abiotische of biotische stress (Roitsch *et al.*, 2019). Op dit moment worden al deze eigenschappen vooral nog visueel of met de reguliere meetmethoden uitgevoerd en zijn diverse nieuwe technieken in ontwikkeling zoals (1) Light Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging (LIDAR). Dit is een technologie die de afstand tot een object of oppervlak bepaalt door middel van het gebruik van laserpulsen, (2) hyperspectrale beeldvorming waarbij hoge resolutie camera's en scanners worden gebruikt die zichtbaar zijn in nabij infrarood zijn (VNIR 400-1.000 nm), kortegolf-infrarood (SWIR: 1.000-2.500 nm) en verder (bijvoorbeeld langegolf-infrarood-LWIR: 8-15 µm) (Roitsch *et al.*, 2019). Ook zijn er methoden op basis van chlorofylfluorescentie, zoals relatief goedkope handheld-instrumenten, of Laser-Induced Fluorescence Transient (LIFT) en zon-geïnduceerde fluorescentie (SIF) methoden (Kolber *et al.*, 2005; Raesch *et al.*, 2014; ; Kuhlert *et al.*, 2016; Pinto *et al.*, 2016; Roitsch *et al.*, 2019). Deze technologieën zijn volop in ontwikkeling en bieden mogelijkheden voor preciselandbouw.

5.1.2 Drone technologie

Drones zijn geen nieuwe technologie. Eén van de meest veelbelovende gebieden voor drones is de landbouw, waar ze het potentieel hebben om grote uitdagingen aan te pakken. Deze technologie geeft de landbouw een hightech make-over. Er zijn verschillende manieren waarop drones tijdens de gehele gewascyclus kunnen worden ingezet (De Clercq *et al.*, 2018):

- 1) Bodem- en veldanalyse: door nauwkeurige 3D-kaarten te produceren voor vroege bodemanalyse, kunnen drones een rol spelen bij het plannen van zaadaanplant en het verzamelen van gegevens voor het beheer van irrigatie- en nutriëtniveaus.
- 2) Planten: startups hebben drone-planting-systemen ontwikkeld die de plantkosten met 85% verlagen. Deze systemen schieten peulen met zaden en voedingsstoffen in de grond, waardoor alle voedingsstoffen worden geleverd die nodig zijn voor het verbouwen van gewassen.



- 3) Spuiten van de teelt: Drones kunnen de bodem scannen, spuiten in real time voor een gelijkmatige dekking. Het resultaat: sproeien vanuit de lucht is vijf keer sneller met drones dan traditionele machines (De Clercq *et al.*, 2018).
- 4) Monitoren van het gewas: inefficiënte gewasmonitoring is een enorm obstakel. Met drones kunnen tijdreeksanimaties de ontwikkeling van een gewas laten zien en productie-inefficiënties onthullen, waardoor een beter beheer mogelijk is.
- 5) Irrigatie: Sensordrones kunnen identificeren welke delen van een perceel droog zijn of moeten worden verbeterd.
- 6) Gezondheidsbeoordeling: door een gewas te scannen met zowel zichtbaar als nabij-infrarood licht, kunnen drone-gedragen apparaten veranderingen in planten helpen volgen en hun gezondheid aangeven - en agrarische ondernemers waarschuwen voor ziekte.

Onbemande luchtvoertuigen kunnen op een dag bestaan uit autonome zwermen drones, die gegevens verzamelen en taken uitvoeren (Floreano & Wood, 2015; De Clercq *et al.*, 2018). Het grootste obstakel om dat werkelijkheid te laten worden, zijn sensoren die in staat zijn om hoogwaardige gegevens te verzamelen- en software voor het decoderen van nummers om deze hightech droom werkelijkheid te laten worden (De Clercq *et al.*, 2018).

5.1.3 Autonome agrarische voertuigen

Kenmerkend voor de akkerbouw is dat de gewassen in monocultuur en in rijen zijn aangeplant. Dit is ontstaan in de tijd dat we nog met os en trekpaard over de akkers trokken (Beulens *et al.*, 2015). De trekker zoals we die nu op het land aantreffen, is daar de evolutionaire opvolger van. De akkers én de tractoren zijn in de loop der jaren steeds groter geworden. Grote tractoren kunnen een enorm areaal bewerken en zijn bovendien toegerust met een groot aantal functies, zodat de akkerbouwer zo veel mogelijk handelingen tegelijkertijd kan uitvoeren. Dat is belangrijk, want menselijke arbeid is verreweg de duurste productiefactor in de agrofoodsector (Beulens *et al.*, 2015). De vraag is echter of het huidige monosysteem wel het best denkbare akkerbouwsysteem is voor duurzaam bodembeheer, zoals ook al aangegeven in paragraaf 2.2. Kijken we naar de kwaliteit van het ecosysteem, dan luidt het antwoord op die vraag: 'nee'. Een systeem als *mengteelt* biedt hier grote voordelen. Zo is het goed voor de bodemgesteldheid en zijn er in potentie grotere opbrengsten te behalen dan wanneer elk gewas afzonderlijk wordt verbouwd. Ook leidt *mengteelt* ertoe dat er door de diversiteit minder schadelijke insecten en mijten worden aangetrokken en het ene gewas plagen bij het andere gewas weghaalt. *Mengteelt* kan een doorbraak krijgen zodra er kleinere robots op de markt komen die hun omgeving precies waarnemen en nauwkeurig en snel verschillende taken in het veld kunnen uitvoeren, afhankelijk van de specifieke omstandigheden per plant (Beulens *et al.*, 2015). Kleinere systemen zijn bovendien minder zwaar en leiden tot minder druk op de bodem en dus minder ondergrondverdichting. Ondergrondverdichting is tegenwoordig een groot probleem als gevolg van het gebruik van zware machines, intensieve teelten, korte vruchtwisselingen en intensieve begrazing (van den Akker & Hendriks, 2015). Ondergrondverdichting leidt tot de vernietiging van bodemaggregaten en vermindert



de porositeit van de bodem, wat cruciaal is voor de infiltratie van water en de effectieve groei van plantenwortels.

Hebben we het hier dan over het einde van monocultuur en rijenaanplant? In de ultieme vorm kunnen we ons zelfs kleine karretjes met sensoren en werktuigen voorstellen die zo licht zijn dat ze gewoon over de planten kunnen rijden. Rijen zijn dan helemaal niet meer nodig en gewassen kunnen in willekeurige patronen door elkaar worden geplant (Beulens *et al.*, 2015). Is het eenmaal zo ver, dan zijn we in staat de landbouw opnieuw uit te vinden en aan te passen aan de behoeften van de toekomst (Beulens *et al.*, 2015). Er zijn al prototypen van robots die typen onkruid, zoals ridderzuring, herkennen en verwijderen van het veld (van Straten *et al.*, 2006). Dit is interessant voor biologische boeren of voor boeren die de overstap naar biologische landbouw overwegen. Voor hen is het probleem van onkruid vaak nog een beletsel dit niet te doen.

Zelfs het telen in rijen kan dan ter discussie komen te staan. Een mogelijk alternatief is “*pizza patch cultivation*”, een systeem waarin meerdere gewassen in een ‘pizzapunt’ worden verbouwd en waarbij de specifieke condities in het veld bepalend zijn voor de keuze voor een bepaald gewas op een bepaalde locatie (Beulens *et al.*, 2015). Dan nemen kleine, intelligente robots de plek in van peperdure, grote machines die feilloos tussen de gewassen laveren om daar verschillende metingen en teelthandelingen verrichten. Een vergelijkbaar voorbeeld vinden we al in de aardappelteelt. Daar worden individuele planten bij verminderde inkomende zonnestraling (bijvoorbeeld door bomenrijen langs een perceel) soms op iets grotere afstand van elkaar gezet. Doordat pootmachines tot op de centimeter variabel kunnen werken, is de teelt zo heel specifiek te maken (Beulens *et al.*, 2015).



6. Kennis en educatie als doel

Het vakgebied van de bodemkunde is in de afgelopen jaren binnen veel HBO en MBO onderwijsinstellingen een ondergeschoven kindje geworden. De inhoudelijke experts zijn grotendeels afgevoerd en het vakgebied is van lieverlee ondergebracht als onderdeel van een module binnen een curriculum waardoor het minder tot z'n recht komt. Vanuit het bedrijfsleven komen dan ook geluiden dat afgestudeerde studenten tegenwoordig tekort schieten in hun bodemkundige kennis en is er de roep om verbetering. Tevens wordt er vanuit de praktijk, sinds de lancering van de visie van LNV, naast het vak "bodemkunde", ook gevraagd naar studenten met kennis over "plant-bodem interacties", "precisielandbouw", "natuur inclusieve landbouw" en "kringlooplandbouw". Deze kennis moet veelal nog ontwikkeld worden en vervolgens gaan leiden tot nieuwe onderdelen binnen een curriculum of zelfs tot een module of specialisatie "Soil Innovator". Dat is ook één van de redenen dat het lectoraat "Gezonde plant op een vitale en duurzame bodem" is gestart bij HAS Hogeschool. De taken van een lectoraat zijn: (1) het versterken van de externe oriëntatie door de beroepspraktijk naar binnen te halen bij de onderwijsinstelling, (2) onderwijsvernieuwing mede gebaseerd op de behoeften van het werkveld, (3) professionalisering van docenten en (4) versterking van kennisontwikkeling en kenniscirculatie in de zin van wisselwerking tussen wetenschap en beroepspraktijk. Het lectoraat "Gezonde plant op een vitale en duurzame bodem" gaat hier de aankomende vier jaar (2018-2022) mee aan de slag.

6.1 Het lectoraat "Een gezonde plant op een vitale duurzame bodem"

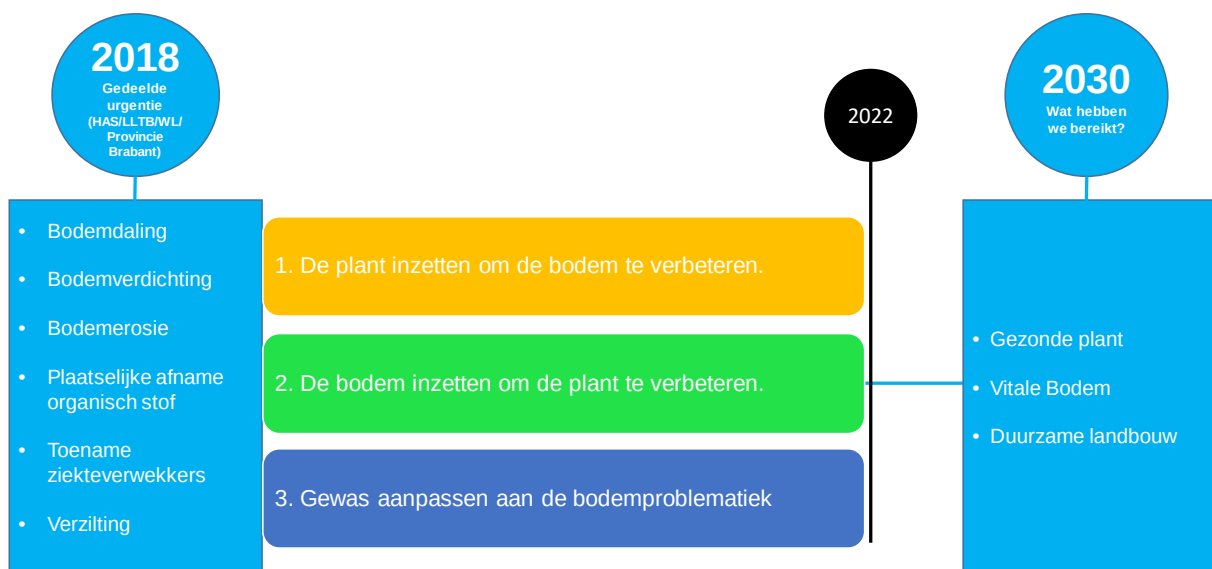
Het bodemleven in en rondom planten speelt een essentiële rol in de groei, de gezondheid en het natuurlijke afweersysteem van planten. Plant-microbe interacties zijn zeer complex en lastig te voorspellen door de invloed van een veelvoud aan (veranderlijke) biotische omgevingsfactoren. Kennis over de rol en invloed van specifieke microben in plantgezondheid en -groei is daarom veelal beperkt tot resultaten uit laboratoriumstudies met relatief makkelijk te controleren en te interpreteren modelsystemen. De vertaalslag naar toepasbaarheid in het veld wordt hierdoor bemoeilijkt en blijft veelal uit. Het verkrijgen van toepasbare inzichten in de rol en invloed van het bodemleven in de groei en de gezondheid van relevante gewassen, met de mogelijkheid tot sturing in de praktijk, vereist een multidisciplinaire aanpak. Deze aanpak verenigt verschillende wetenschappelijke expertises met bedrijven die het onderzoek actief ondersteunen en een vertaling naar toepassing mogelijk maken. De complexe relatie tussen de bodem en de plant wordt nog vaak gezien als een "*black box*". Onderzoek heeft uitgewezen dat de bodemsituatie veel invloed heeft op wat er bovengronds gebeurt. Structuur, vochtbalans, nutriënten en bodemleven zijn voorbeelden van invloedrijke parameters die een rol spelen in de zogenaamde "*black box*".



Inhoudelijk focust het lectoraat op het verhogen van de prestaties van het gewas door op een duurzame manier de bodem te verbeteren, wat resulteert in:

- ✓ Verbeteren waterbergend vermogen van de bodem
- ✓ Meer CO₂ opslag in de bodem
- ✓ Verbeteren bodemvruchtbaarheid
- ✓ Verbeteren bodemweerbaarheid
- ✓ Kunstmestvrij telen
- ✓ Verminderen gebruik gewasbeschermingsmiddelen
- ✓ Meer boven- en ondergrondse biodiversiteit
- ✓ Betere kwaliteit van het bodem en oppervlaktewater
- ✓ Duurzamere voedselproductie

Deze doelen geven ons de rol om in samenwerking met de subsidiërende partijen, Limburgse Land- en Tuinbouw Bond (LLTB), Waterschap Limburg (WL) en Provincie Noord-Brabant, te fungeren als schakel tussen wetenschap en praktijk op het gebied van plant-bodem interacties. Om toe te kunnen werken naar de “Kringloop Landbouw 2030” wordt de koppeling van dit thema met natuurinclusieve landbouw (NIL) en precisielandbouw (PL) hierbij een vereiste. PL-methoden kunnen de kwantiteit en kwaliteit van landbouwoutput verhogen terwijl minder input wordt gebruikt (water, energie, meststoffen, pesticiden, enz.). Het doel van NIL en PL is om kosten te besparen, de impact op het milieu te verminderen en beter voedsel te produceren. Tevens gaat deze aanpak leiden tot verbetering van biodiversiteit én het verhogen van de belevingswaarde van het agrarisch landschap.



Figuur 7. De ambitie van het lectoraat “Gezonde plant op een vitale en duurzame bodem” waarbij het gezamenlijke startpunt (2018), een gezamenlijke ambitie (2030), en het realiseren van die ambitie via concrete routes (2018-2030), wordt weergegeven.



Het lectoraat omvat drie onderzoekslijnen welke een bijdrage gaan leveren aan duurzaam bodembeheer en het verbeteren van de kwaliteit van het bodem- en oppervlaktewater (Figuur 7):

1) De plant inzetten om de bodem te verbeteren.

- ✓ Toegepast onderzoek om de kennis over vruchtwisseling te vergroten.
- ✓ Praktische toepasbaarheid van mengteelt testen.
- ✓ Toegepast onderzoek uitvoeren door de bodem te voeden met organisch materiaal/ reststromen.
- ✓ Toepassen van gewassen met een positieve invloed op de bodem (nieuwe teelten).

2) De bodem inzetten om de plant te verbeteren.

- ✓ Praktische toepasbaarheid van bodembioLOGIE om plantweerbaarheid in gewassen te verhogen voor het terugdringen van het gebruik van bestrijdingsmiddelen.
- ✓ Biotoetsen met plantversterkers, biologische bestrijdingsmiddelen, of compost.
- ✓ Toegepast onderzoek om te achterhalen hoe bodembioLOGIE ingezet kan worden voor nieuwe bemestingsstrategieën.
- ✓ Praktische toepassing van bodemtransplantaties bestuderen (Wubs *et al.*, 2016).
- ✓ Praktijkgericht onderzoek naar het bepalen van bodemparameters gericht op een vitale bodem.

3) Gewas aanpassen aan de bodemproblematiek.

- ✓ Praktische toepasbaarheid van bodembioLOGIE in tolerantie van het gewas tegen verschillende bodemproblemen (verzuring, verzilting, vernatting, verdichting en/of watertekort, uitputting nutriënten, verlies bodemdiversiteit, afdichting, verontreiniging en overbemesting (eutrofiëring)) onderzoeken.
- ✓ Veredeling; Binnen de veredeling moet de focus niet alleen liggen op het verbeteren van de eetbare delen van het gewas maar er zal een verschuiving plaats moeten vinden naar de ondergrondse eigenschappen van het gewas zoals beworteling om zo de weerbaarheid van een gewas te verhogen tegen allerlei bodemproblemen (droogte, verdichting, uitputting nutriënten, etc.) (Brussaard *et al.*, 2016).

De onderzoekslijnen worden a.d.h.v. stimuleringsprojecten concreet gemaakt en deze stimuleringsprojecten worden gedurende de looptijd van het lectoraat ontwikkeld. Binnen het lectoraat is er een samenwerking opgezet met LLTB, WL en Provincie Noord-Brabant. De LLTB, WL en Provincie Noord-Brabant investeren zo in duurzaam bodem- en waterbeheer. De Provincie Noord-Brabant draagt zo tevens bij aan een versnelling van de realisatie van het uitvoeringsplan 'Vitale Bodem Noord-Brabant'. LLTB wil vooral ook met en voor hun leden investeren in het ontwikkelen van nieuwe kennis en hierdoor bewustwording creëren omtrent duurzaam bodem- en waterbeheer. Wat WL betreft dienen de werkzaamheden van het lectoraat uitdrukkelijk bij te dragen aan het realiseren van de noodzakelijke transitie van de landbouw/akkerbouw naar een duurzame bedrijfsvoering, ook naar de omgeving toe.



6.2 Bewustwording en bewustzijn creëren van grond tot mond

Een gezonde, vruchtbare bodem is het hart van de voedselzekerheid. De bodem is essentieel in het menselijk welzijn, deze voorziet namelijk in een compleet scala van ecosysteemdiensten (Tabel 5; EASAC 2018). De ecosysteemdiensten dragen bij aan het welzijn en de gezondheid van ons als mens en dier door te voorzien in essentiële nutriënten en water, bieden ondersteuning en verankering voor planten en voedselvoorziening, spelen een cruciale rol in de mondiale koolstofbalans en de hydrologische cyclus en voorziet in het verstrekken van genetische bronnen en culturele en historische diensten (Tabel 5; EASAC, 2018). Deze functies verdienen bescherming vanwege hun sociaaleconomisch en ecologisch belang. Echter, rekening houdend met de publieke vraag naar gezond voedsel van op de bodem geteelde gewassen, lijkt het passend om bodems in een veel bredere context te plaatsen nl. in voedselveiligheid, dier- en volksgezondheid en het vermogen van de bodem om een bepaald gewas te produceren .

Tabel 5: Ecosysteemdiensten geleverd door de bodem en de bijbehorende bodemfuncties die deze diensten ondersteunen (ITPS, 2015; EASAC, 2018).

Ecosysteemdienst	Bodem functie
Ondersteunende diensten: Diensten die nodig zijn voor de productie van alle andere ecosysteemdiensten; hun impact op mensen is vaak indirect of treedt op gedurende een zeer lange tijd	
Bodemvorming	• Verwerking van primaire mineralen en vrijmaking van voedingsstoffen • Transformatie en accumulatie van organisch materiaal • Vormen van structuren (aggregaten, horizonten) voor gas- en waterstroming en wortelgroei • Vormen van geladen oppervlakken voor ion retentie en -uitwisseling
Primaire productie	• Medium voor zaadontkieming en wortelgroei • Voedingsstoffen en water voor planten
Nutriëntentransport	• Omzetten van organische materialen door bodemorganismen • Retentie en afgifte van voedingsstoffen op geladen oppervlakken
Regulerende diensten: voordelen verkregen uit de regulering van ecosysteemprocessen	
Regulatie waterkwaliteit	• Filteren en bufferen van stoffen in grondwater • Omzetten van verontreinigingen
Regulatie watervoorziening	• Regulatie van waterinfiltratie in bodem en waterstroom in de bodem • Afvoer van overtollig water uit de bodem en in het grond- en oppervlaktewater

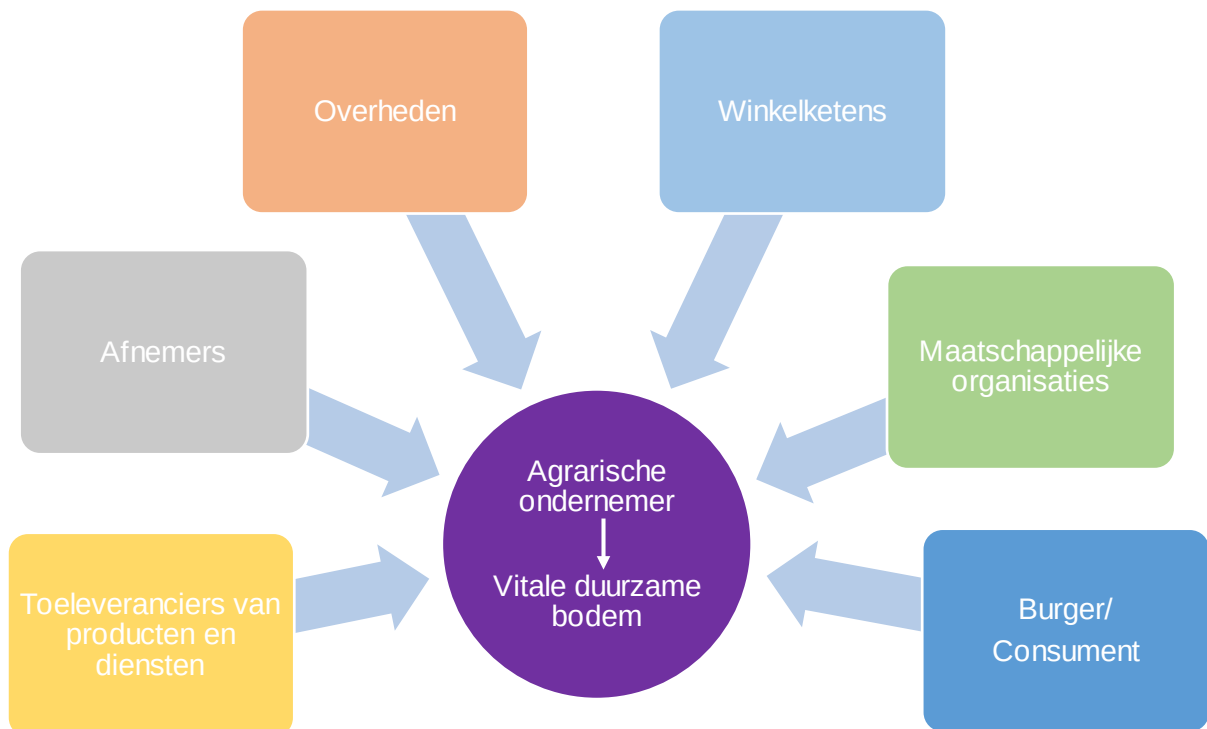


Regulatie klimaat	• Regulering van CO₂-, N₂O- en CH₄-emissies
Regulatie erosie	• Behoud van de bodem op het landoppervlak
Voorzienende diensten ('goederen') die zijn verkregen uit ecosystemen die van direct nut zijn voor mensen	
Voorzien in voedsel	• Verstrekken van water, voedingsstoffen en fysieke ondersteuning voor de groei van planten voor menselijke en dierlijke consumptie
Voorzien in water	• Retentie en zuivering van water
Vezel en brandstoftoevoer	• Het leveren van water, voedingsstoffen en fysieke ondersteuning voor de groei van planten voor bio-energie en vezels
Grondstofvoorziening van ruwe aarde	• Ter beschikking stellen van bovengrond, aggregaten, turf enz.
Oppervlaktestabiliteit	• Ondersteuning van menselijke habitat en bijbehorende infrastructuur
Refugium	• Leveren van leefgebied voor bodemdieren, vogels enz.
Genetische bronnen	• Bron van uniek biologisch materiaal
Culturele diensten: niet-materiële voordelen die mensen verkrijgen van ecosystemen door spirituele verrijking, esthetische ervaringen, erfgoedbehoud en recreatie	
Esthetisch en spiritueel	• Behoud van natuurlijke en culturele landschapsdiversiteit • Bron van pigmenten en kleurstoffen
Erfgoed	• Behoud van archeologische archieven

De eerste stap naar duurzaam bodembeheer is daarom bewustwording en bewustzijn creëren in de gehele keten van producent tot consument (Figuur 8). Dit kan niet zonder een transitie binnen de agrarische sector. De meeste agrarische ondernemers zullen in de nabije toekomst nog veel keuzes voor duurzaamheid moeten maken. Deze keuzes worden beïnvloed door het bedrijfskundig en maatschappelijk krachtenveld waarin de agrarische bedrijfsvoering zich bevindt. De contacten met bedrijfsadviseurs, loonbedrijven, telersverenigingen, geldverstrekkers, leveranciers van meststoffen, gewasbeschermingsmiddelen en zaden bepalen in belangrijke mate de keuzen die de ondernemer maakt in zijn bedrijfsvoering. Vooral afnemers, zoals de suikerindustrie, bierbrouwers, veevoersbedrijven, hebben grote invloed op de productiewijzen van hun leveranciers. Transitie in de landbouw wordt in gang gezet door de milieubeweging, bezorgde consumenten, multinationals als Heineken, Cosun, Coca Cola en de afnemers van de agrarische producten waaronder Friesland Campina, coöperaties als CSV COVAS en Nedato, banken en andere geldverstrekkers en niet in de laatste plaats de supermarkten. Een omslag in de agrofood-keten en in het bijzonder het verduurzamen van het gebruik van de bodem, vergt vele jaren. De vraag die hier dan ook ligt is hoe door



bewustwording en bewustzijn gedragsverandering wordt gecreëerd bij agrarische ondernemers en hun omgeving? Vanuit de ketenpartijen kunnen grote groepen agrarische ondernemers worden bereikt. Maar ook de kennisinstellingen, samenwerkingsverbanden en netwerken binnen de agrarische sector kunnen hier een substantiële bijdrage aan leveren.



Figuur 8: De deelnemers in de keten van een agrarische ondernemer.

6.3 Kenniscoördinatie, kennismanagement en kennisdoorstroming

Een lerende regio is een regio waarin kenniscreatie en het leren van elkaar de motor zijn van duurzame ontwikkeling waarin sectoren worden geïntegreerd (Gilbert *et al.*, 2008; Fontein & Kranendonk, 2010). Daarbinnen is het doel te komen tot een gezamenlijke aanpak van een complex vraagstuk op regionaal niveau door interactie en kennisuitwisseling tussen participanten uit verschillende domeinen, waarbij ook de bèta-gamma-integratie aan de orde is, doordat duurzame ontwikkeling een integratie van *people*, *planet*, *profit* veronderstelt en die tussen wetenschap en regionale praktijk (Gilbert *et al.*, 2008; Fontein & Kranendonk, 2010).

Het concept 'lerende regio' is afkomstig vanuit de Economische Geografie en komt dan ook veelvuldig terug en om te komen tot een optimale kennisuitwisseling is een inspirerende omgeving cruciaal (Gilbert *et al.*, 2008; Fontein & Kranendonk, 2010). Eveneens is ruimtelijke nabijheid van onderzoeksinstituten en ondernemingen belangrijk. In lerende regio's zien we eveneens dat economische activiteiten zich clusteren. In diverse studies is onderzoek gedaan naar het belang van clustering van economische activiteiten voor de regionale ontwikkeling (Gilbert *et al.*, 2008; Fontein & Kranendonk, 2010).

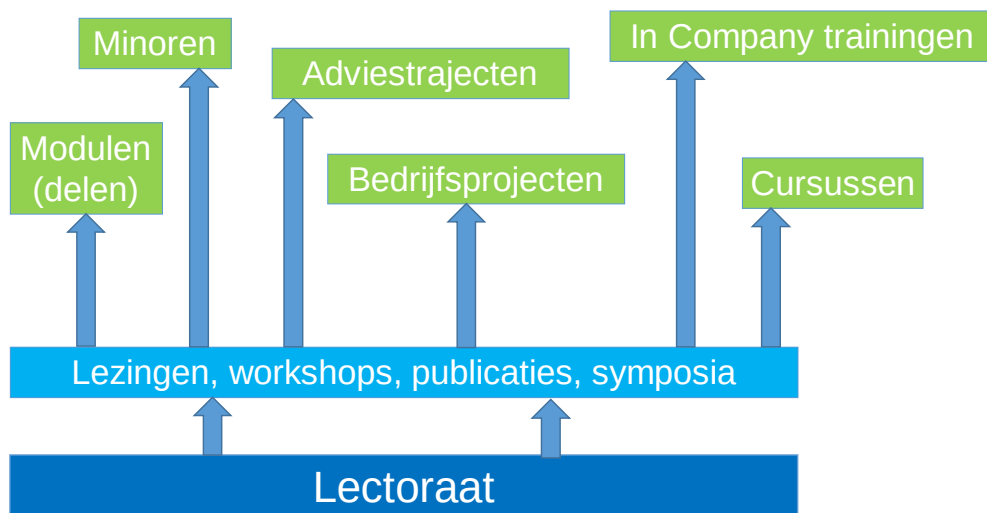


Gilbert *et al.* (2008) hebben de relatie tussen clusters, kennistransfer, nieuwe innovaties en groeiprestaties van regio's onderzocht. Het onderzoek maakt duidelijk dat bedrijven succesvoller innoveren wanneer zij veel contact hebben met nabij gelegen bedrijven die eveneens innovatieactiviteiten ondernemen. Hierdoor vindt er namelijk kennisuitwisseling plaats. Een andere conclusie is dat ruimtelijke clustering de prestaties van bedrijven beïnvloedt omdat bedrijven door competitie wel innovatief moeten blijven om de concurrentie aan te kunnen gaan. Ook geven zij aan dat *face-to-face* contact heel belangrijk is in een kennisregio.

Er zijn heel veel initiatieven binnen Nederland, in de diverse provincies, maar ook daarbuiten omtrent het creëren van een vitale duurzame bodem. Tussen deze initiatieven wordt de opgedane kennis niet altijd gecommuniceerd en daardoor is het ook niet duidelijk hoe ver de ontwikkelingen zijn op het gebied van het creëren van een vitale duurzame bodem. Om dit te voorkomen wordt er in samenwerking met de Provincie Noord-Brabant, LLTB en WL een kenniscentrum opgezet waarbij het bundelen van (veelal versnipperd aanwezige) kennis, het delen en overdragen van kennis en aanleren van vaardigheden over verduurzaming van de bodem aan studenten, agrariërs en verwante beroepsgroepen en burgers/consumenten centraal staat.

Dit kenniscentrum heeft als doel om alle gegenereerde kennis zo efficiënt mogelijk op te halen en te verspreiden. De kennis zal enerzijds via websites, berichten, artikelen, presentaties etc. opgehaald en verspreid worden (Figuur 9). Anderzijds zal er veel aandacht besteed worden aan het aanbod van vraag gestuurde kennis. De bovengenoemde ketenpartijen zijn sterk betrokken bij de doorwerking van opgedane kennis binnen het lectoraat "Gezonde plant op een vitale en duurzame bodem" waarbij ook Provincie Noord-Brabant, LLTB en WL een rol hebben als het gaat om het bereiken van ondernemers, ketenpartijen en burgers/consumenten. Veel kansen liggen er in de rol van bemiddelaar voor bovengenoemde partijen. Het bij elkaar brengen van partijen en het faciliteren van afspraken staan in dit kenniscentrum centraal. Deze complexiteit vraagt om innovatieve processen waarin de verschillende betrokkenen meningen, wetenschappelijke kennis, identiteit en ambities uitwisselen, waarmee vervolgens een gezamenlijke invulling aan duurzame ontwikkeling wordt gegeven. Zonder innovaties in hoe gebiedsprocessen gevoerd kunnen worden, zal het niet lukken om de transitie naar een duurzame bodem te maken. De kennis, verworven vanuit de praktijk, kan vervolgens weer ingezet worden in vernieuwing van onderwijs op het gebied van duurzaam bodembeheer voor de studenten maar ook voor het bedrijfsleven in de vorm van *in company* trainingen, cursussen, adviestrajecten en bedrijfsprojecten (Figuur 9).





Figuur 9: Doorwerking van kennis naar onderwijs.



7. Hoe nu verder?

Zoals in hoofdstuk 6 al aangegeven, speelt de bodem een belangrijke rol in ons dagelijks bestaan. Zo heeft de bodem een belangrijke rol in de regulatie van het klimaat. Tevens heeft de bodem een rol in het voldoende gezond en duurzaam produceren van voedsel en is de bodem afhankelijk van ons wet- en regelgevingssysteem.

7.1 Interactie bodem en klimaat

Frankrijk heeft tijdens de klimaatconferentie van 2015 in Parijs, landen opgeroepen om het organische stofgehalte in de bodem met 0,4% te verhogen. Een wereldwijde stijging van het organische stofgehalte met 0,4% in de bovenste 40 cm van de bodem zou kunnen compenseren voor de totale hoeveelheid broeikasgassen welke wereldwijd werden uitgestoten in 2016 (Stocker *et al.*, 2013). Dit initiatief wordt ook wel het “4 promille initiatief” genoemd.

In het klimaatakkoord staan ambities geformuleerd voor de gehele land- en tuinbouw op het gebied van bodem en bemesting. De lachgasemissies moeten met 0,2 Mton CO₂-eq. worden gereduceerd en de koolstofvastlegging in de bodem moet met 0,5 Mton CO₂-eq. per jaar worden verhoogd (Nijpels, 2018). De akkerbouw omvat ongeveer 1/3 van het landbouwareaal in Nederland wat dus betekent dat de akkerbouw zich moet richten om in 2030 iets minder dan 0,1 Mton CO₂-eq. aan lachgasemissie te hebben gereduceerd en ongeveer 0,2 Mton CO₂-eq. per jaar aan koolstof moet worden opgeslagen in de bodem (Nijpels, 2018).

De jaarlijkse bijdrage van organische plantaardig materiaal in de bodem is een belangrijke component in de opbouw van organische stof in de bodem (Lesschen *et al.*, 2012). Daarin is het kwantificeren van de organische koolstof (C)-input, afgeleid van plantenwortels in de bodem, nodig om een uitspraak te kunnen doen over de C vastlegging in de bodem (Lesschen *et al.*, 2012). Wortels spelen een belangrijke rol in C- en N-cycli en hebben waarschijnlijk een relatief grotere invloed op bodem-C en bodem-N dan de bovengrondse biomassa (Lesschen *et al.*, 2012). De hoeveelheden C afkomstig van wortels of wortelmasa variëren afhankelijk van milieucondities, managementsystemen, ras, en de fysische, chemische en biologische eigenschappen van de bodem (Lesschen *et al.*, 2012). Wortelontwikkeling is erg gevoelig voor variaties in het toedienen en de verdeling van anorganische nutriënten en water, waardoor de wortelmasa aanzienlijk kan variëren. Echter, afscheidingsproducten van de wortel, zoals slijm, dode cellen van groeiende wortels, en afgesloten wortelpunten dragen aanzienlijk bij aan de groei van bodemorganische koolstof ('Soil Organic Carbon' (SOC)). Deze bijdrage vergroot de microbiële activiteit en beïnvloedt de N-mineralisatie in de bodem, maar is echter moeilijk te meten met conventionele methoden (Lesschen *et al.*, 2012). Verlies van organisch koolstof in de bodem vermindert de cohesie van gronddeeltjes en de aggregaatstabiliteit en verhoogt het risico van bodemerosie door water en wind (Lesschen *et al.*, 2012). De fysieke afbraak als gevolg van de daling van organisch koolstof wordt gecombineerd met verdichting en korstvorming om de infiltratie van water te verminderen en afvoer (en erosie) te verhogen (Lesschen *et al.*, 2012). Ook voor het vastleggen van C in de bodem komen dus de verschillende strategieën om de bodem duurzamer te beheren, zoals organische stof op pijl houden en de microben activeren, weer aan bod. Het tegemoetkomen aan de mondiale uitdagingen van klimaatverandering en bevolkingsgroei met een beter begrip en beheersing van



rhizosfeerprocessen zal een van de belangrijkste vragen zijn in de aankomende jaren waarvoor een divers, interdisciplinair geschoold personeelsbestand nodig zal zijn.

Andere potentiële effecten van de klimaatsverandering op de bodem zijn een toename van windsnelheden wat leidt tot erosie van zanderige bodems met een slechte begroeiing, een verhoogde frequentie en intensiteit van zware regenval waardoor aardverschuivingen toenemen en het risico van bodemverdichting toeneemt. Ook kan het opwarmen van de aarde er toe leiden dat de opbrengst van gewassen wordt verhoogd (met een positief effect op de wortelbiomassa). Aan de andere kant kan de voorspelde toename in neerslag het verlies aan voedingsstoffen door uitspoeling weer verhogen. Er zijn verschillende opties om te reageren op de bovenstaande bedreigingen. In deze context zijn klimaatadaptatie- en mitigerende maatregelen voor de bodem dan ook onlosmakelijk met elkaar verbonden: het vergroten van de organische C draagt bij aan het verbeteren van de bodemstructuur en een groter waterhoudend vermogen, het voorkomen van erosie en het herstellen van aangetast land. Al deze factoren leveren een positieve bijdrage aan de multifunctionaliteit van bodemecosystemen. Verder zijn bodems bronnen van andere broeikasgassen, met name lachgas en methaan, en kunnen hun emissies worden verminderd door goed bodembeheer (bijv. door toevoeging van bepaalde soorten organisch materiaal zoals compost of mest (Lesschen *et al.*, 2012). Advies voor goed bodembeheer en het verbeteren van de veerkracht van bodems voor klimaatverandering moet echter worden aangepast voor verschillende gebieden en bodemsoorten. Lokale benaderingen zijn dus cruciaal, gezien de enorme verscheidenheid aan landschappen en bodemgesteldheid in Nederland.

7.2 Interactie bodem en duurzamere productie van gezonde voeding

Discussies over voedselkwaliteit omvatten beweringen dat huidige voedselgewassen minder voedzaam of minder gezond zijn dan in het verleden. Inderdaad, sommige beoordelingen en meta-analyses hebben aangetoond dat er een verband is tussen micronutriënten en verminderde incidentie van specifieke menselijke ziekten (EASAC, 2018). Er wordt gemeld dat de huidige gewassen minder micronutriënten bevatten dan vroeger en dat dit van invloed kan zijn op zowel de gezondheid van mens en dier. Het lijkt erop dat huidige gewasvariëteiten die zijn veredeld voor het produceren van hogere opbrengsten, in dit proces verdunde concentraties aan micronutriënten kunnen hebben (Davis, 2009; Meldrum *et al.*, 2018). Nu is het wel zo dat op dit moment de normen voor de concentraties aan nutriënten in gewassen nog niet zijn vastgelegd (Schönfeldt & Pretorius, 2011; Meldrum *et al.*, 2018). De biologische bodemsamenstelling kan ook van invloed zijn op de hoeveelheden secundaire metabolieten in de plant, waaronder aminozuren en verbindingen die de afweer van planten tegen plaaginsecten en ziekteverwekkers beïnvloeden. Er wordt voorgesteld dat 'gezonde' bodems de voedselkwaliteit kunnen verhogen. Het concept van gezonde bodems voor gezonde voeding moet echter verder worden vastgesteld. Daarnaast zal de ruimtelijke diversiteit van landgebruik en natuurlijke elementen zoals bloemstroken in akkerranden de beschikbaarheid van natuurlijke vijanden van bovengrondse plagen beïnvloeden. Bodemkenmerken, gewasdiversiteit en natuurlijke habitatelementen in agrarische landschappen kunnen daarom allemaal de gezondheid van planten en uiteindelijk gezond voedsel bevorderen. Omdat er een terugkoppeling is tussen bodem en planten, die



de gezondheidstoestand van de teeltsystemen versterkt, kunnen gezonde planten ook weer de bodem ten goede komen.

Natuurinclusieve landbouw zoekt naar een verweving van voedselproductie en natuurlijk kapitaal, en wel op zo'n manier dat beide, landbouw en natuur, er sterker uitkomen: een landbouw die meer gebruik maakt van ecosysteemdiensten en daardoor robuuster en duurzamer wordt en tevens dat de natuur meer zorg krijgt van boeren en meer divers en duurzamer is. In plaats van tegenstellingen te benadrukken moeten voor natuurinclusieve landbouw overeenkomsten gevonden worden. Dit kan door systeemdenken: landbouw en natuur worden beide opgevat als een (agro-) ecosysteem waar de duurzaamheidsopgave centraal staat. De agro-ecologie biedt hierbij aanknopingspunten doordat het streeft naar optimalisatie van ecologische processen voor voedselproductie.

Natuurinclusieve landbouw en kringlooplandbouw kunnen eerder opgevat worden als een ontwikkeling dan als statisch begrip. De transitie tot natuurinclusieve, precisie- en kringlooplandbouw is nodig om agrarische bedrijven robuust te krijgen voor de toekomst, de biodiversiteit van het boerenland te verbeteren, de milieubelasting te verminderen en de belevingswaarde van het agrarisch landschap te vergroten. Zo'n transitie verloopt volgens verschillende fasen die weer anders kunnen zijn voor iedere sector of bedrijf. Om te komen tot natuurinclusieve, kringloop- en precisielandbouw is het belangrijk de knelpunten te detecteren die realisatie in de weg staan. Door ruimte te bieden aan experimenten, zoals in dit document besproken, kan vanuit een dergelijke niche de transitie verder plaatsvinden waarbij het belangrijk is dat er economisch duurzame verdienmodellen worden ontwikkeld en er aandacht is voor leerprocessen. De steun hiervoor kan gevonden worden zowel binnen de landbouwsector zelf als binnen de samenleving. Vanzelfsprekend speelt onderwijs hierin een belangrijke rol.

7.3 Interactie bodem en beleid

Het bodembeleid is in beweging. Zowel nationaal als internationaal staat bodembeleid al heel wat jaren op de agenda. Het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) zet dit jaar met de kamerbrief Bodemstrategie heldere beleidslijnen uit. In de in 2018 gepresenteerde landbouwvisie, door het Ministerie van LNV, wordt gesproken over een transitie richting kringlooplandbouw. Het is alleen mogelijk de kringlopen in de landbouw te sluiten als de bodem duurzaam wordt beheerd.

De transitie naar een duurzame bodem betekent niet alleen verandering in landbouwactiviteiten, maar vooral ook een ingrijpende wijziging in het beleid. Processen van beleidsverandering vragen vaak 10-tallen jaren. Bestaand beleid is namelijk vaak geïnstitutionaliseerd en vastgelegd in wetten en financieringsregimes. Er is tevens sprake van complexe samenwerkingsrelaties tussen overheden, maatschappelijke organisaties en bedrijven. In die samenwerkingsrelaties bestaan specifieke waarden en normen, opvatting over de aanpak van problemen en visies over oplossingen en beleidsprioriteiten. Nieuwe opvattingen die leiden tot beleidsveranderingen stuiten dus ook snel op verzet (Oenema, 2003). Beleidsveranderingen zijn dan ook kansrijker als impulsen uit de omgeving ontstaan, bijv. vanuit de publieke opinie, vanuit sociaaleconomische omstandigheden, vanuit veranderende politieke voorkeuren en vanuit andere beleidsterreinen. Vanuit de politiek is dus de transitie naar duurzaam bodembeheer gemaakt. Ook uit de "Actieagenda Duurzaam Agrarisch Bodembeheer" blijkt dat agrarische ondernemers heel veel mogelijkheden en kansen zien om aan een duurzame bodem te werken. Alleen



zien zij ook nog behoorlijk veel belemmeringen die hen hiervan weerhouden (Potters *et al.*, 2018). Eén hiervan is zeker de wet- en regelgeving. Het pacht- en mestbeleid zijn hier belangrijke spelers in. Het pachtbeleid is de afgelopen vijf jaar veelvuldig in verband gebracht met duurzaam bodembeheer in positieve en negatieve zin. De huidige regelgeving stuurt aan op kortdurende pachtovereenkomsten (zes jaar of korter) waardoor dit niet bevorderlijk is voor investeringen van de boer in het beheer van de bodem en voor de wijze waarop boeren de grond gebruiken. De discussies over herziening van het pachtbeleid zaten muurvast maar 22 maart jl. heeft de minister van LNV een brief geschreven aan de voorzitter van de tweede kamer aangaande herziening van deze wet. In deze brief citeert de minister van LNV het volgende:

“Mijn belangrijkste wens is om de maximale termijn van kortdurende liberale pacht te schrappen en daarmee een nieuwe vorm van langdurige pacht te introduceren en deze tot de nieuwe standaard te maken. Bij deze nieuwe vorm van langlopende pacht wil ik dat pachters en verpachters vrij, of alvast vrijer, zijn om de prijzen onderling overeen te komen. De belangrijkste reden om langlopende pacht met een vrij(er)e prijs te introduceren is omdat het dan voor verpachters aantrekkelijker wordt om langlopende overeenkomsten te sluiten en boeren weer toegang krijgen tot langdurige pacht die continuïteit biedt. Dit om boeren de prikkel te geven om in hun bedrijf en de bodem te investeren.”

Naast dat de contractduur van pacht zou moeten worden aangepast, zijn er nog andere instrumentele prikkels die zouden kunnen leiden tot verandering in het pachtbeleid (Grashof-Bokdam *et al.*, 2018). Vanuit natuur- en milieuorganisaties en overheden wordt de roep luider om pacht nadrukkelijker te verbinden met pachtvoorwaarden die duurzaam bodembeheer stimuleren. Certificering als sluitstuk van educatie en als vertrekpunt om al dan niet te kunnen pachten, bouwt sociale druk op naar de agrarische ondernemer (Grashof-Bokdam *et al.*, 2018). Er is al een cursusprogramma “Natuurbeheer en ondernemerschap” beschikbaar waardoor, na deze te hebben gevolgd, agrarische ondernemers de kans biedt om grond te pachten in natuurgebieden van Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten. Deze cursus wil de samenwerking bevorderen tussen terreinbeherende organisaties en agrarische ondernemers en is opgezet door HAS Hogeschool, Aeres Hogeschool Dronten, stichting VanGroeneWaarde, Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten.

Een technische voorziening die aan pacht verbonden kan worden zijn de bodemanalyses met bijbehorende certificering en advies. Op dit moment zijn er al verpachtende partijen zoals natuurorganisaties, ASR en overheden die grond verpachten met duurzaamheidseisen, zoals een Label duurzaam bodembeheer (CLM) of een bodempaspoort (ZLTO) als certificaat.

Naast het pachtbeleid hebben we ook nog het mestbeleid. Voor het verkrijgen van een duurzame bodem is het toevoegen van organische stof aan de bodem essentieel. Agrariërs maken zich zorgen over afname van organische stofgehalte in de bodem door maatregelen in de Meststoffenwet. De aanscherping van de gebruiksnormen voor fosfaat en stikstof in dierlijke mest kan de aanvoer juist beperken. In de praktijk neemt het gebruik van dierlijke mest echter nauwelijks af omdat er zoveel mest beschikbaar is (Grashof-Bokdam *et al.*, 2018). Naast dat duurzaam bodembeheer onder druk staat door



de Meststoffenwet, staat ook de verbetering van de waterkwaliteit op gespannen voet bij agrarische ondernemers, want er moet immers worden voldaan aan de Kaderrichtlijn Water (KRW; <http://www.rivm.nl/kaderrichtlijn-water-krw>). De kwaliteit van ons oppervlaktewater staat namelijk al meerdere jaren flink onder druk. Eutrofiering van het oppervlaktewater heeft daarbij ernstige gevolgen gehad voor het waterleven als ook voor de drinkwaterkwaliteit. Deze problemen hebben in Nederland, mede richting gegeven door Europese verordeningen zoals de KRW, voor een uitgebreid pakket van maatregelen geleid die deze eutrofiering van het bodem- en oppervlaktewater moest verminderen. Het instellen van stikstofgebruiksnormen, fosfaatgebruiksnormen, groenbemesterverplichtingen na maïs en beperkingen voor het scheuren van grasland zijn belangrijke voorbeelden van deze maatregelen. Hoewel deze maatregelen al voor een behoorlijke verbetering hebben gezorgd, zijn er nog steeds stappen te maken om uitspoeling van nutriënten in ons bodem- en oppervlaktewater tegen te gaan.

Uit een studie van Grashof-Bokdam en anderen (2018) blijkt dan ook dat agrarische ondernemers de regels uit het mestbeleid complex en moeilijk uit te voeren en te handhaven vinden. De regels zijn vooral gericht op mestgebruik, -opslag en -vervoer. Ook is de regelgeving omtrent het mestbeleid generiek, maar wel gedetailleerd, dit om meer flexibiliteit te creëren. Het tegenovergestelde is juist het geval, het mestbeleid wordt als knellend ervaren (Grashof-Bokdam *et al.*, 2018). Vanuit de agrarische sector zou men graag een eenvoudiger meststelsel hebben waarbij er minder regellast zou zijn (Grashof-Bokdam *et al.*, 2018). Het mestbeleid is ook nog eens meer gericht op mineralen en minder op organische stof. Al zijn er in het huidige mestbeleid wel de eerste bewegingen in de richting van organische stofaanvoer bijv. regelgeving omtrent groenbemesters, waarbij dan anders omgegaan mag worden met de fosfaatsnorm (Grashof-Bokdam *et al.*, 2018). De fosfaatproductie in dierlijke mest lag in 2017, sinds drie jaar tijd, weer onder de door de EU vastgestelde fosfaatplafond (Grashof-Bokdam, 2018). Nederland behoort daarom dus ook tot de Europese landen die meer mest mogen uitrijden dan volgens de Europese norm is toegestaan. Dit wordt ook wel derogatie genoemd en is herzien in 2018. De verbetering van de waterkwaliteit en het niet overschrijden van het fosfaatplafond zijn voorwaarden voor de derogatie. Tevens heeft het veevoerconvenant, ervoor gezorgd dat de communicatie omtrent het sturen of fosfaatefficiëntie op gang is gekomen. Binnen dit convenant zijn afspraken gemaakt over aanwending van fosfor in veevoer. De potentiële prikkels welke zouden kunnen leiden tot het zich kunnen houden aan het mestbeleid zijn volgens Grashof-Bokdam *et al.* (2018) dat dit convenant misschien wel aangescherpt kan worden en omgezet kan worden in regelgeving voor veevoeder. Om de broeikasgassen en meststoffen uit de veehouderij omlaag te krijgen, heeft Nederland vanaf 1 januari 2018 drie veranderingen in de mestwetgeving doorgevoerd nl.; (1) het zesde actieprogramma Nitraatrichtlijn. Hier wordt ingezet op het gebruik van bodemverbeterende meststoffen met hoog organische stofgehalte zoals gft-compost, groencompost en storrijke mest, (2) de Wet grondgebonden groei melkveehouderij en (3) fosfaatrechten. Deze veranderingen in de mestwetgeving zouden moeten leiden tot bodemverbeterende maatregelen op landbouwbedrijven. Ook zijn de economische prikkels om het mestprobleem te verminderen onvoldoende. Rond het verwerken van mest dienen tools en innovaties te worden ontwikkeld die het mestprobleem deels kunnen reduceren en wellicht kunnen deze tools en innovaties worden ingezet als bodemverbeterende meststof.



Ook op het gebied van duurzame gewasbescherming zijn stappen gezet. Er is in Nederland een breed gedragen ambitie om de gewasbescherming verder te verduurzamen. De 'Toekomstvisie gewasbescherming 2030, naar weerbare planten en teeltsystemen' van het

Bestuurlijk Platform Duurzame Gewasbescherming bouwt voort op de visie 'Landbouw, Natuur en Voedsel: Waardevol en Verbonden' en versterkt rijksbeleid, zoals onder andere vastgelegd in de Kaderrichtlijn Water (Schouten, 2018; Schouten, 2019). Deze gemeenschappelijke visie, van belangrijke stakeholders en de Rijksoverheid, is gericht op een duurzaam telen van land- en tuinbouwproducten voor mens, dier en milieu met economisch perspectief. De focus in deze visie ligt specifiek op duurzame gewasbescherming waarbij drie strategische doelen zijn uitgewerkt:

1. Plant- en teeltsystemen zijn weerbaar;
2. Land- en tuinbouw en natuur zijn met elkaar verbonden;
3. Nagenoeg zonder emissies naar het milieu en nagenoeg zonder residuen op producten.



8. Tot slot

Ik wil hier nog graag een toekomstvisie met u delen:

De agrarische ondernemer in 2030 werkt met data gemeten door drones, sensoren en robots, zo monitort hij zijn bodem en gewassen (Figuur 10). Hij gebruikt mengteelten, gewasresten, compost, bodembedekking en groenbemester (vanggewassen) om het organische stof gehalte in de bodem optimaal te houden. Dierlijke mest wordt omgezet in allerlei bruikbare organische meststoffen en deze meststoffen worden met precisietechnieken toegediend.

In de gewasrotatie neemt hij ook teelten mee zoals Sorghum, Miscanthus en Vezelhennep omdat de agrarische ondernemer dan ook in tijden van droogte of veel neerslag nog steeds een inkomen heeft. Ook geven deze teelten veel terug aan de bodem zoals vorming van organische stofgehalte in bodem, gaan bodemverdichtingen tegen, zijn minder vatbaar voor plagen/ziekten en er is minder kans op erosie van de bodem. Mengteelten zijn een vast gebruik geworden. Er vindt weinig tot geen gewasrotatie meer plaats want teelten worden vooral in rijen met andere teelten op de percelen geplaatst. Sommige agrarische ondernemers denken er al zelfs over na om “pizza patch” teelt in te gaan zetten. Ook is agrobosbouw een gangbare manier van telen geworden. Het bewerken van de bodem is teeltafhankelijk geworden. Door het gebruik van mengteelten is verdichting, groei van onkruiden en het onderwerken van gewasresten niet meer nodig.

De veredelingssector heeft veredelingsprogramma's opgezet die gericht zijn op het ontwikkelen van verbeterde rassen (de zgn. “flexibele gewassen”) die een verscheidenheid aan abiotische stress omstandigheden zoals droogte of overstroming kunnen verdragen (Figuur 10). De eerste aardappelrassen zijn inmiddels al op de markt. Het microbiom van deze aardappelrassen bestaat uit evolutionair geoptimaliseerde microbiële gemeenschappen waardoor deze gewassen groeien in armere grond of onder de minder voorspelbare klimatologische omstandigheden. Biostimulanten en bodemverbeteraars worden ingezet ter vervanging van allerlei meststoffen, herbiciden en pesticiden. Op beleidsniveau zijn er belangrijke zaken verandert: Het pacht- en mestbeleid zijn aangepast en duurzaam bodembeheer is de spil van deze beleidsplannen geworden.

In het klimaatakkoord van 2018 stond dat we in 2030 ongeveer 0,2 Mton CO₂-eq. per jaar aan koolstof moeten hebben opgeslagen in de bodem. Nou dat is gelukt. Verder zijn bodems bronnen van broeikasgassen, met name lachgas en methaan en zijn hun emissies ook verminderd door goed bodembeheer. Advies voor goed bodembeheer en het verbeteren van de veerkracht van bodems voor klimaatverandering moet echter nog worden aangepast voor verschillende gebieden en bodemsoorten. Lokale benaderingen zijn dus cruciaal, gezien de enorme verscheidenheid aan landschappen en bodemgesteldheid in Nederland.

Natuur inclusieve kringloop- en precisielandbouw is een feit op agrarische bedrijven. Agrarische bedrijven zijn robuust voor de toekomst, de biodiversiteit van het boerenland is verbeterd, de milieubelasting is vermindert en de belevingswaarde van het agrarisch landschap is vergroot. Wel hebben we richting 2050 nog wat te doen als het gaat om dit ook voort te zetten. Agrarische



ondernemers moeten hun kennis blijven delen en niet bang zijn om te innoveren. Laten we vooral voortzetten waar we nu aan gewerkt hebben en de bodem lang laten leven.



Figuur 10. Een gemiddeld agrarisch bedrijf in Nederland in 2030.

De meeste agrarische ondernemers maken zich op dit moment, in 2019, zorgen over de bodemkwaliteit en bodemgezondheid. De vragen die agrarische ondernemers hebben zijn: Hoe kunnen we bodemdegradatie aanpakken? Wat weten we al en wat nog niet? Wat betekent dit voor het mijn bedrijfsvoering? In deze rede heb ik een aantal mogelijke oplossingen aangedragen voor deze vraagstukken en is wat mij betreft het tegemoetkomen aan de mondiale uitdagingen van klimaatverandering en bevolkingsgroei met een beter begrip en beheersing van rhizosfeer processen één van de belangrijkste uitdagingen waarvoor een divers, interdisciplinair geschoold personeelsbestand nodig zal zijn. Dan rest nu nog de vraag; “EN HOE GAAT U HIERMEE AAN DE SLAG?”



9. Literatuur

- Akker, J.J.H. van den, de Vries, F., Vermeulen, G.D., Hack-ten Broeke, M.J.D., Schouten, T. 2012. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen UR, Alterra, Alterra-Rapport 2409.
- Akker, J.J.H. van den, & Hendriks, R. 2015. Hoe erg is ondergrondverdichting in de landbouw? Bodem 3, p. 42-44.
- Alori, E.T., Glick, B.R., Babalola, O.O. 2017. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology* 8:971.
- Arshad, M.A. & Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 153-160.
- Bagyalakshmi, B., Ponmurugan, P., Balamurugan, A. 2017. Potassium solubilization, plant growth promoting substances by potassium solubilizing bacteria (KSB) from southern Indian tea plantation soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 12:116–124.
- Bais, H.P., Weir, T.L., Perry, L.G., Gilroy, S., Vivanco, J. M. 2006. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual review of plant biology* 57:233–266.
- Baker, K.F. & Cook, R.J. 1974. *Biological Control of Plant Pathogens*. Freeman, San Francisco, CA.
- Ball, B.C., Hargreaves, P.R., Watson, C.A. 2018. A framework of connections between soil and people can help improve sustainability of the food system and soil functions. *Ambio* 47(3):269-283.
- Bender, S.F., Wagg, C., Heijden, M.G.A van der. 2016. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in ecology & evolution* 31: 440–452.
- Bernaerts, S., Muijtjens, S., Iperen, C. van. 2008. BioKennis Bericht #15. Akkerbouw en Vollegroonds Groente. Niet kerende grondbewerking (NKG). Wageningen UR, Louis Bolk Instituut, DLV Plant. 4.
- Beulens, A., Henten, E van., IJsselmuiden, J., Jongebloed, P., Kampers, F., Kooistra, L., Kootstra, G., Maas, J., Meijer, D., van den Nieuwenhuizen, J., Pekkeriet, E., Zedde R van der. 2015. De agrofoodsector heeft robots hard nodig. White paper, Wageningen UR pp. 17.
- Borg, J., Kiær, L.P., Lecarpentier, C., Goldringer, I., Gauffreteau, A., Saint-Jean, S., Barot, S., Enjalbert, J. 2017. Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research* 221: 298–313.
- Brock, T. & Koch, R. 1999. *A life in medicine and bacteriology*. ASM Press: Washington DC. U.S.A.
- Brooker, R.W., Bennett, A.E., Cong, W.F., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., Hawes, C., Iannetta, P.P., Jones, H.G., Karley, A.J., Li, L., McKenzie, B.M., Pakeman, R.J., Paterson, E., Schöb, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C.A., Zhang, C., Zhang, F., Zhang, J., White, P.J. 2015. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist* 206(1):107-117.
- Brundrett, M. 2004. Diversity and classification of mycorrhizal associations. *Biological Reviews* 79:473-495.



- Brussaard, L., Govers, F.P.M., Buiter, R.M. 2016. Leve(n)de bodem! Biowetenschappen en maatschappij, cahier 3. Stichting Biowetenschappen en Maatschappij, Laan van Nieuw Oost-Indië 334, 2593 CE Den Haag, The Netherlands.
- Bybee-Finley K.A. & Ryan M.R. 2018. Advancing intercropping research and practices in industrialized agricultural landscapes. *Agriculture* 8(6):80.
- Campbell, C.L., Peterson, P.D, Griffith C.S. 1999. The formative years of plant pathology in the United States. Minneapolis, MN: American Phytopathological Society Press.
- Cardinale, B.J., Wright, J.P., Cadotte, M.W., Carroll, I.T., Hector, A., Srivastava, D.S., Loreau, M., Weis, J.J. 2007. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(46):18123-8.
- Choi, J., Choi, D., Lee, S., Ryu, C-M, Hwang, I. 2011. Cytokinins and plant immunity: old foes or new friends? *Trends in Plant Science* 16:388–394.
- Conijn, J.G. & Lesschen J.P. 2015. Soil organic matter in the Netherlands; Quantification of stocks and flows in the top soil. Wageningen, the foundation Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek. Research Institute Praktijkonderzoek Plant & Omgeving / Plant Research International, Wageningen UR (University & Research), PRI report 619 / Alterra report 2663.
- Cook, R.J. & Baker, K.F. 1983. The nature and practice of biological control of plant pathogens. American Phytopathological Society, St. Paul, MN.
- Cook, R.J. 2014. Plant health management: Pathogen suppressive soils. Pages 441-455 in: *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Cordell, D. & White, S. 2014. Life's bottleneck: sustaining the world's phosphorus for a food secure future, in *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 39, eds A. Gadgil and D. M. Liverman (Palo Alto, CA: Annual Reviews) 161–188.
- Davis, D.R. 2009. Declining fruit and vegetable nutrient composition: What is the evidence? *HortScience* 44:15–19.
- De Clercq M., Vats A., Biel A. 2018. Agriculture 4.0 – The Future Of Farming Technology - Oliver Wyman. <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2018/feb/agriculture-4-0--the-future-of-farming-technology.html>.
- Doran, J.W. & Parkin, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. Pages 3-21, In: Doran, J.W.; Coleman, D.C; Bezdieck, D.F; and Stewart, B.A. (Editors), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, SSSASpecial Publication No. 35. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Doran, J.W., Sarantonio, M., Leibig, M. 1996. Soil health and sustainability. *Advances in Agronomy* 56:1-54.
- Doran, J.W. & Zeiss, M.R. 2000. Soil health and sustainability; managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15:2-11.
- Dupré, J. & O'Malley, M.A. 2009. Varieties of living things: Life at the intersection of lineage and metabolism. *Philosophy and Theory in Biology* 1:e003.
- EASAC. 2018. Opportunities for soil sustainability in Europe. Policy Report 36.



- Eekeren, N.J.M. van, Deru, J.G.C., Boer, H. de, Philipsen, B. 2011. Terug naar de graswortel. Een betere nutriëntenbenutting door een intensievere en diepere beworteling. Rapport 2011-023 LbD. Louis Bolk Instituut, Driebergen, 32 p.
- Ent, S. van der, Wees, S.C. van, Pieterse, C.M. 2009 Jasmonate signaling in plant interactions with resistance-inducing beneficial microbes. *Phytochemistry* 70: 1581–1588.
- Erisman, J.W., Eekeren, N.J.M. van, Wit, J. de, Koopmans, C.J., Cuijpers, W.J.M., Oerlemans, N., Koks, B.J. 2016. Agriculture and biodiversity: a better balance benefits both. *AIMS Agriculture and Food* 1(2):157-174.
- Eurofins. 2017. Kwaliteit organische stof inzichtelijk gemaakt. http://eurofinsagro.com/nl-nl/kwaliteit_organische_stof_inzichtelijk.
- Finlay, R.D. 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany* 59(5):1115–1126.
- Floreano, D. & Wood, R.J. 2015. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature* 521(7553):460-466.
- Fontaine, S., Mariotti, A., Abbadie, L. 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology & Biochemistry* 35:837-843.
- Fontein, R.J., Kranendonk, R.P. 2010. Venture Lab: de motor voor regionale innovaties, Welke kansen bieden ze voor Greenport Venlo? Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 400268.
- Fransen, B., Kroon, H. de, Berendse, F. 1998. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different nutrient availability. *Oecologia* 115:351–358.
- Gilbert, A.G., McDougall, P.P., Audretsch D.B. 2008. Clusters, knowledge spillovers and new venture performance: An empirical examination. *Journal of business venturing* 23:405 – 422.
- Grashof-Bokdam, C., Pleijte, M., Potters, J., Vijn, M. 2018. Prikkels voor duurzaam bodembeheer in de Nederlandse landbouw. Wageningen Environmental Research Rapport 2910 ISSN 1566-7197.
- Hanegraaf, M. 2010. De organische stofbalans: nuttig instrument voor bouw- en grasland. NMI, 6 p. op: [http://www.nmiagro.nl/sites/nmi/nl/nmi.nsf/dx/Werkblad%20Organische%20stof%20balans.pdf/\\$file/Werkblad%20Organische%20stof%20balans.pdf](http://www.nmiagro.nl/sites/nmi/nl/nmi.nsf/dx/Werkblad%20Organische%20stof%20balans.pdf/$file/Werkblad%20Organische%20stof%20balans.pdf).
- Harrison, M.J. 2005. Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Annual Review Of Microbiology* 59:19-24.
- Heijden, M.G.A. van der, Bardgett, R.D., Straalen, N.M. van. 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 11:296–310.
- Hellriegel, H. & Wilfarth, H. (1888) Untersuchungen über die stickstoffnahrung der Grammeen und Legummosen. Beilageheft zu der Zeitschrift des Vereins Rubenzucker-Industrie Deutschen Reiches 1-234.
- Hiltner, L. 1904. Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiete der Bodenbakteriologie unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. *Arb DLG* 98:59–78.



- Hirsch, A.M., Lum, M.R., Downie, J.A. 2001. What makes the rhizobia-legume symbiosis so special? *Plant Physiology* 127:1484-1492.
- Hodge, A. 2004. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist* 162:9–24.
- in 't Zandt, D., Le Marié, C., Kirchgessner, N., Visser, E.J., Hund, A. 2015. High-resolution quantification of root dynamics in split-nutrient rhizoslides reveals rapid and strong proliferation of maize roots in response to local high nitrogen. *Journal of Experimental Botany* 66(18):5507-5517.
- ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources - Main Report. Food and Agricultural Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils Rome.
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., Kopriva, S. 2017. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition-current knowledge and future directions. *Frontiers in Plant Science* 8:1617.
- Jones, K.M., Kobayashi, J., Davies, B.W., Taga, M.E., Walker, G.C. 2007. How rhizobial symbionts invade plants: the Sinorhizobium-Medicago model. *Nature Reviews Microbiology* 5(8):619-633.
- Jong, S. de. 2011. Stoppelbewerking in een systeem met niet kerende grondbewerking. Werking en geschiktheid van machines voor niet kerende grondbewerking. Hogeschool HAS den Bosch. Projectstage DLV Plant.
<http://www.nietkerendegrondbewerking.nl/downloads/Boerenexperiment3.pdf>.
- Karlen, D., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61:4–10.
- Kell, D.B. 2011. Breeding crop plants with deep roots: Their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Annals of Botany* 108(3):407-418.
- Kempenaar, C. 2018 Op naar precisielandbouw 4.0. Geraadpleegd op <https://www.thepotatovaleynl/projecten-1/precisielandbouw-4.0>.
- Kessel, C. van, Venterea, R., Six, J., Adviento-Borbe, M.A., Linquist, B., Groenigen, K.J. van. 2013. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global Change Biology* 19(1):33–44.
- Khan, Z., Midega, C., Pittchar, J., Pickett, J., Bruce, T. 2011. Push-pull technology: A conservation agriculture approach for integrated management of insect pests, weeds and soil health in Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability* 9:162–170.
- Kloepper, J.W. & Schroth, M.N. 1978. Plant growth promoting bacteria on radishes. Pages 879-882 in: Proc. IVth Int. Conf. Plant Pathogenic Bacteria Vol 2; Angers, France.
- Kolber, Z., Klimov, D., Ananyev, G., Rascher, U., Berry, J., Osmond, B. 2005. Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient (LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation, *Photosynthesis Research* 84:121–129.
- Kuhlger, S., Austic, G., Zegarac, R., Osei-Bonsu, I., Hoh, D., Chilvers, M.I., Roth, M.G., Bi, K., TerAvest, D., Weebadde, P. 2016. MultispeQ Beta: a tool for large-scale plant phenotyping connected to the open PhotosynQ network, *R. Soc. Open Sci.* 3: 160592.



- Laishram, J., Saxena, K.G., Maikhuri, R.K., Rao, K.S. 2012. Soil quality and soil health: A review. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 38(1):19-37.
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., de Faccio Carvalho, P.C., Dedieu, B. 2014. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 190:4–8.
- Lesschen, J.P., Heesmans, H.I.M., Mol-Dijkstra, J.P., Doorn, A.M. van, Verkaik, E., Wyngaert, I.J.J. van den, Kuikman, P.J. 2012. Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur. Wageningen Alterra-rapport 2396 – 61.
- Loon, L.C. van, Bakker, P.A., Pieterse, C.M. 1998. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annual Review of Phytopathology* 36:453–483.
- Loon, L.C van. 2007. Plant responses to plant growth-promoting bacteria. *European Journal of Plant Pathology* 119:243–254.
- Liu, K., McInroy, J.A., Hu, C.H., Kloepper, J.W. 2018. Mixtures of plant growth-promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple plant diseases and plant-growth promotion in the presence of pathogens. *Plant Disease* 102:67–72.
- Lugtenberg, B. & Kamilova, F. 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Reviews of Microbiology* 63:541–556.
- Majeed, A, Muhammad, Z, Ahmad, H. 2018. Plant growth promoting bacteria: role in soil improvement, abiotic and biotic stress management of crops. *Plant Cell Reports* 37(12):1599-1609.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London. pp.889.
- Massalha, H., Korenblum, E., Tholl, D., Aharoni, A. 2017. Small molecules below-ground: the role of specialized metabolites in the rhizosphere. *Plant Journal* 90:788–807.
- Matta, C. 2007. The science of small things: The botanical context of German bacteriology, 1840-1910. Ph.D. dissertation. University of Wisconsin.
- Mazzola, M. 2002. Mechanisms of natural soil suppressiveness to soilborne diseases. *Antonie van Leeuwenhoek* 81:557–564.
- McNear Jr., D.H. 2013. The Rhizosphere - Roots, Soil and Everything In Between. *Nature Education Knowledge* 4(3):1.
- Meldrum, G., Padulosi, S., Locketti, G., Robitaille, R., Diulgheroff, S. 2018. Issues and prospects for the sustainable use and conservation of cultivated vegetable diversity for more nutrition-sensitive agriculture. *Agriculture* 8:112.
- Mendes, R., Garbeva, P., Raaijmakers, J.M. 2013. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews* 37:634–663.
- Moebius-Clune, B.N., Moebius-Clune, D.J., Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., Ristow, A.J., Es, H.M. van, Thies, J.E., Shayler, H.A., McBride, M.B., Kurtz, K.S.M., Wolfe, D.W., Abawi, G.S. 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY.
- Mommer, L., Cotton, T.E.A., Raaijmakers, J.M., Termorshuizen, A.J., Ruijven, J. van, Hendriks, M., Rijssel, S.Q. van, Mortel, J.E. van de, Paauw, J.W. van der, Schijlen, E.G.W.M., Smit-Tiekstra A.E., Berendse, F., Kroon, H. de, Dumbrell, A.J. 2018. Lost in diversity: the



interactions between soil-borne fungi, biodiversity and plant productivity. *New Phytologist* 218(2):542-553.

- Mortel, J.E. van, Vos, R. de, Dekkers, E., Guillod, L., Pineda, A., Loon, J. van, Dicke, M., Raaijmakers, J.M. 2012. Metabolic and transcriptomic changes induced in *Arabidopsis* by the rhizobacterium *Pseudomonas fluorescens* SS101. *Plant Physiology* 160(4): 2173-2188.
- Munch, R. 2003. Review. On the shoulders of giants. *Robert Koch. Microbes and Infection* 5:69–74.
- National Research Council. 2007. *The New Science of Metagenomics: Revealing the Secrets of Our Microbial Planet*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11902>.
- Next Soil Services. <https://www.vruchtbarebodem.nl/nl/>. Geraadpleegd op 21 mei 2019.
- Nijpels, E., 2018. *Ontwerp van het Klimaatakkoord*. Sociaal-Economische Raad, Den Haag, pp. 222.
- Oenema, O. 2003. *Bodem en duurzame landbouw*. Technische Commissie Bodembescherming, Stichting Natuurmedia, Den Haag (in Dutch).
- Oldroyd, G.E.D. & Downie, J.A. 2008. Coordinating nodule morphogenesis with rhizobial infection in legumes. *Annual Review of Plant Biology* 59: 519-546.
- Pace, N.R. 1997. A molecular view of microbial diversity and the biosphere. *Science* 276 (5313): 734-740.
- Paez-Garcia, A., Motes, C.M., Scheible, W.R., Chen, R., Blancaflor, E.B., Monteros, M.J. 2015. Root traits and phenotyping strategies for plant improvement. *Plants* 15;4(2): 334-355.
- Pickett, J.A., Woodcock, C.M., Midega, C.A.O., Khan, Z.R. 2014. Push–pull farming systems. *Current Opinion in Biotechnology* 26:125–132.
- Pinto, F., Damm, A., Schickling, A., Panigada, C., Cogliati, S., Müller-Linow, M., Balvora, A., Rascher, U. 2016. Sun-induced chlorophyll fluorescence from high-resolution imaging spectroscopy data to quantify spatio-temporal patterns of photosynthetic function in crop canopies, *Plant, Cell & Environment* 39:1500–1512.
- Pieterse, C.M., Does, D. van der, Zamioudis, C, Leon-Reyes, A, Wees, SC van. 2012. Hormonal modulation of plant immunity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology* 28: 28.1–28.33.
- Postma, J. & Schilder, M.T. 2005. Bodemweerbaarheid tegen *Rhizoctonia solani* AG 2-1 in bloemkool. *Gewasbescherming* 36: 208-211.
- Potters, J., Vijn, M., Grashof-Bokdam, C., Pleijte, M. 2018. Naar een actieagenda voor duurzaam agrarisch bodembeheer. Wageningen Research <http://edepot.wur.nl/464320> ID - 544629.
- Raesch, A., Muller, O., Pieruschka, R., Rascher, U. 2014. Field observations with laser-induced fluorescence transient (LIFT) method in barley and sugar beet, *Agriculture* 4: 159.
- Reganold, J. P. & Wachter, J. M. 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants* 2:15221.



- Reid, A. & Greene, S.E. 2012. How microbes can help to feed the world. Report on an American Academy of Microbiology, 1752 N Street, NW, Washington, DC 20036 USA.
- Rietberg, P.I. & Ter Berg, C. 2012. BioKennisbericht Groene maaimeststoffen. Louis Bolk Instituut, DLV Plant, 5 p.
- Rillig, M.C. & Mummey, D.L. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* 171:41-53.
- Rochette, P. 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research* 101(1-2):97-100.
- Roitsch, T., Cabrera-Bosquet, L., Fournier, A., Ghamkhar, K., Jiménez-Berni, J., Pinto, F., Ober, E.S. 2019. Review: New sensors and data-driven approaches-A path to next generation phenomics. *Plant science : an international journal of experimental plant biology* 282:2-10.
- Rusch, H.P. 1968. Bodemvruchtbaarheid: een zaak van biologisch denken. Vertaald door Peter VanHoof. Eerste druk 2014, Organic Forest Polska, Peter VanHoof, Jantar, Polen.
- Sanderson, M.A., Archer, D., Hendrickson, J., Kronberg, S., Liebig, M., Nichols, K., Schmer, M., Tanaka, D., Aguilar, J. 2013. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop-livestock systems. *Renewable Agriculture and Food Systems* 28:129-144.
- Schlatter, D., Kinkel, L., Thomashow, L., Weller, D., Paulitz, T. 2017. Disease Suppressive Soils: New Insights from the Soil Microbiome. *Phytopathology* 107(11):1284-1297.
- Schönfeldt, H.C., Pretorius, B. 2011. The nutrient content of five traditional South African dark green leafy vegetables—A preliminary study. *Journal of Food Composition and Analysis* 24: 1141-1146.
- Schouten, C. 2018. Landbouw, natuur en voedsel: waardevol en verbonden - Nederland als koploper in kringlooplandbouw (pp. 37). Den Haag: Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.
- Schouten, T., Bloem, J., Goede, R. de, Eekeren, N. van, Deru, J., Zanen, M., Sukkel, W., Balen, D. van, Korthals, G., Rutgers, M. 2018. Niet-kerende grondbewerking goed voor de bodembiodiversiteit? Bodem nummer 3. Geraadpleegd op <http://www.louisbolk.org/downloads/3340.pdf>.
- Schouten, C. 2019. Toekomstvisie gewasbescherming 2030, naar weerbare planten en teeltsystemen (pp. 6). Den Haag: Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. Rapport 16 april 2019.
- Selosse, M.A., Richard, F., He, X., Simard, S.W. 2006. Mycorrhizal networks" des liaisons dangereuses. *Trends in Ecology & Evolution* 21(11):621-628.
- Selosse, M.A., Strullu-Derrien, C., Martin, F.M., Kamoun, S., Kenrick, P. 2015. Plants, fungi and oomycetes: a 400-million year affair that shapes the biosphere. *New Phytologist* 206(2):501-506.
- Sharma, I.P., Chandra, S., Kumar, N., Chandra, D. 2017. PGPR: heart of soil and their role in soil fertility. In: *Agriculturally important microbes for sustainable agriculture*. Springer, Singapore, pp 51-67.
- Simard, S.W., Perry, D.A., Jones, M.D., Myrold, D.D., Durall, D.M., Molina, R. 1997. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature* 388(6642): 579-582.



- Simard, S.W., Beiler, K.J., Bingham, M.A., Deslippe, J.R., Philip, L.J., Teste, F.P. 2012. Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling. *Fungal biology reviews* 26: 39-60.
- Six, J., Feller, C., Dene, K., Ogle, S., De Moraes Sa, J.C., Albrecht, A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils—Effects of no-tillage. *Agronomie* 22(7–8):755–775.
- Smith, S.E. & Read, D.J. 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. 3rd edn. Academic Press, London.
- Smit, A., Beek, C. L. van, Hoogland, T. 2007. Risicogebieden voor organische stof - Ontwerp van een methodologie voor het aanwijzen van 'risk areas' t.b.v. de EU Kaderrichtlijn bodem (pp. 51). Wageningen: Wageningen UR.
- Staps, S. 2018. Handleiding goed koolstofbeheer. Louis Bolk Project Koolstofboeren. Publicatienummer 2017-038 LbP (pp. 30).
- Straten, G. van, Bakker, T., Asselt, C.J. van. 2006. Robotisering in de landbouw: autonome agrarische voertuigen. *Agro Informatica* 19 3. - ISSN 0925-4455 - p. 10 - 13.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- TCB. 2016. Advies Toestand en dynamiek van organische stof in Nederlandse landbouwbodems. Technische Commissie Bodem (J. v. Wensem (Ed.)), rapport TCB A110, pp. 25. Den Haag.
- Termorshuizen, A.J., Rijn, E. van, Gaag, D. J. van der, Alabouvette, C., Chen, Y., Lagerlöf, J., Malandrakis, A. A., Paplomatas, E. J., Rämert, B., Ryckeboer, J. 2006. Suppressiveness of 18 composts against 7 pathosystems: variability in pathogen response. *Soil Biology and Biochemistry* 38(8): 2461–2477.
- Termorshuizen, A.J. 2018. Biostimulanten een overzicht. *Gewasbescherming* jaargang 49-nummer 2 <http://edepot.wur.nl/456113>.
- Tian, H., Lu, C., Ciais, P., Michalak, A.M., Canadell, J.G., Saikawa, E., Huntzinger, D.N., Gurney, K.R., Sitch, S., Zhang, B., Yang, J., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, G., Dlugokencky, E., Friedlingstein, P., Melillo, J., Pan, S., Poulter, B., Prinn, R., Saunois, M., Schwalm, C.R., Wofsy, S.C. 2016. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. *Nature* 531(7593):225–228.
- Udo de Haes, H.A., Voortman, R.L., Bastein, T., Bussink, D.W., Rougoor, C.W., Weijden W.J. van der. 2012. Schaarste van micronutriënten in bodem, voedsel en minerale voorraden. Platform Landbouw, Innovatie & Samenleving, Utrecht 45 p.
- Venturi, V. & Fuqua, C. 2013. Chemical signaling between plants and plant-pathogenic bacteria. *Annual Review of Phytopathology* 51:17–37.
- Verbon, E.H. & Liberman, L.M. 2016. Beneficial microbes affect endogenous mechanisms controlling root development. *Trends in Plant Science* 21:218–229.
- Visser, E.J.W., Bögemann, G.M., Smeets, M., Bruin, S. de, Kroon, H. de, Bouma, T.J. 2008. Evidence that ethylene signalling is not involved in selective root placement by tobacco plants in response to nutrient-rich soil patches. *New Phytologist* 177:457–465.



- Vukicevich, E., Lowery, T., Bowen, P., Urbez-Torres, J.R., Hart, M. 2016. Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36:48.
- Weide, R.Y. van der, Alebeek, F.A.N. van, Broek, R.C.F.M van den. 2008. En de boer, hij ploegde niet meer? : literatuurstudie naar effecten van niet kerende grondbewerking versus ploegen. Rapport Praktijkonderzoek Plant en Omgeving BV. Lelystad.
- Weller, D.M., Raaijmakers, J.M., Gardener, B.B., Thomashow, L.S. 2002. Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology* 40: 309-348.
- White, P.J., George, T.S., Gregory, P.J., Bengough, A.G., Hallett, P.D., McKenzie, B.M. 2013. Matching roots to their environment. *Annals of Botany*. 112(2):207-222.
- Willekens K. & Debode J., 2016. Bodemmicrobiologie als indicator voor bodemkwaliteit? Geraadpleegd op <http://www.ccbt.be/sites/default/files/files/vv%20bodembioologie%202014%202015.pdf>.
- Wubs, E.R.J., Putten, W.H. van der, Bosch, M., Bezemer, T.M. 2016. Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. *Nature Plants* 2:16107.
- Zaidi, A., Khan, M.S., Ahmad, E., Saif, S., Rizvi, A. 2017^a. Growth stimulation, nutrient quality and management of vegetable diseases using plant growth-promoting rhizobacteria. In: *Probiotics in agroecosystem*. Springer, Singapore, pp 313–328.
- Zaidi, A., Khan, M.S., Saif, S., Rizvi, A., Ahmed, B., Shahid, M. 2017^b. Role of nitrogen-fixing plant growth-promoting rhizobacteria in sustainable production of vegetables: current perspective. In: *Microbial strategies for vegetable production*. Springer, Cham, pp 49–79.
- Zhan, J., Thrall, P.H., Burdon, J.J. 2014. Achieving sustainable plant disease management through evolutionary principles. *Trends in Plant Science* 19(9):570-575.
- Zwart, K, Wolfs, A., Kikkert, A., Termorshuizen, A., Burgt, G-J. van der. 2013. De organische stof balans met de te verwachten stikstoflevering per teeltrotatie : opzet en gebruikswijze van een rekenmodule. Opzet en gebruikswijze van een rekenmodule. HLB, Wijster. The Netherlands, p. 17.

