

Bodems en agro-ecologie: is koolstof de heilige graal?



Een hernieuwde kijk op bodem

Hoe kijken we naar bodems in de landbouw? Alle planten die ons voedselsysteem voortbrengt bevatten voedingsstoffen. Die moeten ergens vandaan komen, niets ontstaat zomaar. Over het algemeen wordt aangenomen dat de voedingsstoffen uit de bodem komen. De bodem voedt de planten, het lijkt een evidentie. Maar dat geldt alvast niet voor het belangrijkste element in planten, namelijk koolstof, want dat halen planten uit de atmosfeer, onder de vorm van CO₂, het bekendste broeikasgas.

Ecosystemen op onze planeet nemen CO₂ op, maar stoten ook CO₂ uit. Het opnemen van CO₂ gebeurt voornamelijk via de **fotosynthese** door planten. Het uitstoten gebeurt bij ademhaling van planten en verteringsprocessen van micro-organismen. Omdat $\frac{2}{3}$ van de landmassa zich op het noordelijk halfrond bevindt, krijg je elk jaar bij de start van de lente - wanneer de fotosynthese na een winterslaap opnieuw hervat - de hoogste CO₂ concentratie in de atmosfeer en na de start van de herfst de laagste¹. Je kan het zien als een jaarlijkse op en neer gaande groene long. Hoe meer vegetatie dus, hoe groter die schommeling.

Helaas neemt de CO₂ concentratie sinds 100 jaar netto toe. In 2021 is er meer dan 410 ppm (deeltjes per miljoen) CO₂ in de atmosfeer. Het globale klimaat warmt daardoor op. Als we geen opwarming willen, moet er een kwart van de hoeveelheid uit de atmosfeer gehaald worden, ongeveer **100 ppm** dus, gesteld dat er niets meer bijkomt. Onze beleidsmakers zijn 'overeengekomen' dat de opwarming tot 1,5° beperkt moet blijven.

Klimaatopwarming door fossiele brandstoffen of verandering in landgebruik?

Waarom loopt de hoeveelheid koolstof in de atmosfeer op? De bekendste reden van de opwarming is ons gebruik van fossiele brandstoffen. Een veel minder bekende reden is de verandering van landgebruik. Dat houdt in het omvormen van oa. bos, savanne, grasland en steppes tot landbouwland of verstedelijkte oppervlakte. Het is belangrijk om te weten wat de historische bijdrage was van enerzijds fossiele brandstoffen en anderzijds van verandering in landgebruik aan het overschot CO₂ in de atmosfeer.

Vroeger onderzoek schatte de bijdrage van veranderingen in landgebruik hoger (320 gigaton koolstof [Gt C]) in dan die van de verbranding van fossiele brandstoffen (292 Gt C)². Bij veranderingen in landgebruik zit je met verschillende plaatsen waaruit koolstof kan verdwijnen: zowel bovengronds (in vegetatie) als ondergronds (in bodems). Bij ontbossing gaat vooral koolstof in de vegetatie verloren. Bij omvorming van grasland naar akkers gaat vooral bodemkoolstof verloren. Globaal werd ingeschat dat het merendeel ($\frac{3}{4}$) van het koolstofverlies te maken had met ontbossing en slechts $\frac{1}{4}$ met verlies van koolstof in de bodem. Een recentere schatting³ stelt dat landgebruiksveranderingen historisch minder sterk hebben bijgedragen (235 Gt C) dan verbranding van fossiele brandstoffen (440 Gt C). In de landgebruiksveranderingen zou het aandeel van verlies van bodemkoolstof (116 Gt C), even belangrijk zijn als dat van ontbossing⁴.

Hoeveel koolstof verdween er dan gemiddeld uit een bodem? Dat hangt er van af. Een bos omvormen naar landbouw, doet de bodem 25 ton koolstof per hectare verliezen. Een hectare steppe-, savanne- of graslandbodem brengt bij de switch naar landbouw bijna het dubbel - 45 ton koolstof - in de atmosfeer⁵. Dat laatste komt overeen met de CO₂-uitstoot van 100 personen tijdens het vliegtuigtraject Brussel-New York-Brussel. Het belang van koolstof in onze bodems in relatie tot de klimaatopwarming is dus groot.

Bodemerosie door kenniserosie

Hoe komt het dat we bodemkoolstof zo lang hebben onderschat? Elke boer weet dat de hoeveelheid organische stof een sleutelindicator is voor een gezonde bodem. En organische stof bestaat voor meer dan de helft uit koolstof. Hoe komt het dat koolstofgehaltes sinds de jaren 1960 ook in ons land nog steeds blijven afnemen, vooral op akkerland⁶? Hoe komt het dat 93% van de gangbaar beheerde bodems wereldwijd elk jaar **dunner** worden?⁷ Sommige bodems zijn er zo slecht aan toe dat ze met de huidige generatie landbouwers zullen verdwijnen als het verval niet wordt gestopt. Gelukkig kan het herstel sneller dan we vroeger dachten, maar hoe is het zover kunnen komen?

Daarvoor moeten we terug naar hoe we naar onze bodem kijken. Daar is één en ander historisch scheefgegroeid, wat slechts langzaam rechtgetrokken raakt. We zijn heel erg eng naar bodems beginnen kijken door Justus **von Liebig**. Voor hij in 1840 zijn meest invloedrijke boek⁸ schreef, heerste onder agronomen van die tijd een begrip van plantenvoeding dat sterker aanleunt bij huidige inzichten uit de recente bodembioïologie sinds 1990. Met name dat mineraal-organische interacties belangrijk zijn, en bijvoorbeeld organische fosforverbindingen direct door planten opneembaar zijn. Dat komt aardig overeen met het huidige concept van mixotrofie, namelijk dat planten naast minerale ook veel complexere voedingsstoffen kunnen opnemen, gaande van aminozuren, tot polymeren en zelfs hele micro-organismen⁹. De centrale rol van humus bij het stimuleren van plantengroei werd wetenschappelijk niet betwist en al in 1820 wist men dat planten hun voeding voornamelijk uit de atmosfeer konden halen, daarnaast uit residu's van plantaardige of dierlijke oorsprong en tenslotte ook uit mineralen zoals krijt.

Von Liebig verving die complexe en door de landbouwpraktijk onderbouwde wetenschap door een *magic fix*: hij herleidde plantenvoeding tot toediening van minerale elementen, namelijk N, P en K (stikstof, fosfor en kalium), die de traditionele dierlijke mest konden vervangen. Voor von Liebig telden mineraal-organische interacties niet meer. Zijn theorie - die niet gebaseerd was op experimenten in het veld - werd door wetenschappers en agronomen snel weerlegd en raakte niet door de *peer review*¹⁰. Maar de aantrekkelijkheid van het wondermiddel was er: het effect dat planten veel sneller groeiden was onmiddellijk zichtbaar. Ondanks de scepsis bij wetenschappers en ook bij boeren, was de geest uit de fles. Doordat de wetenschappelijke basis ontbrak voor het wondermiddel kunstmest, wist niemand eigenlijk hoeveel je moest toedienen, dus meer leek beter. De producenten van meststoffen financierden onderzoek in de landbouwchemie en creëerden door middel van kwantificering van nutriënten in meststoffen een aura van wetenschappelijkheid. Die explosie van éézijdig **winstgedreven onderzoek** ging ten koste van onderzoek naar andere veel complexere organische meststoffen, waar grote spelers geen belang bij hadden. Landbouwers begonnen meer vertrouwen te krijgen in al wat gekwantificeerd kon worden, en minder en minder in hun eigen kennis van interactie tussen dierlijke mest, rotaties, en hun lokale bodemeigenschappen. Dat zorgde voor een enorm verlies aan plaatsgebonden kennis. Door die 'kenniserosie' ontstond er geleidelijk een sterk vertekend beeld, waaraan langzamerhand iedereen gewoon raakte¹¹. Maar dat ging niet zonder slag of stoot.

Weinig geweten is dat von Liebig zelf later in zijn leven tot andere inzichten kwam die volledig in tegenspraak waren met zijn eerdere simplificaties. Hij waarschuwde in 1863 in zijn laatste belangrijk boek voor het gevaar dat een te simpele benadering van plantenvoeding slechts tijdelijk kan werken, tot de bodem uitgeput is. Teveel geloof hechten aan een simpele chemische bodemanalyse, hield gevaar in volgens von Liebig. Hij moedigde landbouwers aan om zelf te experimenteren wat best zou werken omdat bodems sterk verschillen. Von Liebig pleit er voor **kringlooplandbouw** en noemt de terugkeer van organische stof naar het veld de sleutel tot het in stand houden van de beschaving. Hij sprak zijn appreciatie uit voor de landbouw in China en Japan, waar menselijke faeces werden gecomposteerd en terug op het land kwamen. Het boek wijst op het belang van dierlijke mest, humus, gewasresten, rotatie en groenbemesters zoals radijzen en klavers om bodemuitputting tegen te gaan¹².

Over kunstmest is hij erg kritisch¹³: *“De graanplanten op velden die zijn bemest met guano of nitraat van soda onderscheiden zich voornamelijk door een diepgroene kleur en door bredere en talrijkere bladeren; maar de oogst komt over het algemeen verre van overeen met de verwachtingen die door dit veelbelovende uiterlijk worden gewekt. Op een veld dat buitengewoon rijk is aan stikstofrijk voedsel, is er een soort extreme groeikracht in de vroege groei zoals die wordt geproduceerd door een kiembed: de bladeren en stengels zijn waterig en zwak, als gevolg van het gebrek aan tijd in hun overhaaste groei om gelijktijdig uit de bodem de noodzakelijke hoeveelheid stoffen op te nemen, zoals kiezelzuur en kalk, die in staat zijn om met hun organen een zekere stevigheid en weerstand over te brengen tegen die externe oorzaken die hun bestaan in gevaar brengen. De stengels krijgen niet de nodige stijfheid en sterkte en zijn altijd vatbaar voor omvallen, vooral op kalkbodems.”*

Kortom, von Liebig zag snelle kunstmest als verzwakker van plantgezondheid. Zo werd de vader van kunstmest een pleitbezorger van alles waar velen vandaag het label ‘goede landbouwpraktijk’ of zelfs ‘agro-ecologie’ op zouden plakken. Enkele decennia later in de jaren 1880 ontdekten wetenschappers de symbiotische relatie van bodemorganismen en planten, zoals mycorrhizaschimmels en Rhizobium-bacteriën.

Ondertussen was het wondermiddel kunstmest aan een opmars begonnen die niet meer te stuiten was. In 1914 begon BASF als groot chemisch bedrijf ammonium te produceren. Tijdens de oorlog investeerde de Duitse overheid echter in de productie van ammonium voor explosieven. Doordat ook de geallieerden de aanvoer van veevoer naar Duitsland hadden stilgelegd, kampten de boeren met enorme tekorten aan meststof. Na de oorlog dreef de overheid in nauwe samenwerking met de chemische industrie de productie van goedkope kunstmest op tot ongeziene hoogtes, met de hoop op een snelle terugkeer van de vroegere opbrengstniveau's, maar die werden niet geëvenaard na de oorlog. Het wondermiddel verloor zo al snel heel wat van zijn glorie. Stevige **interne kritiek** klonk in de jaren 1920 uit de monden van de meest vooraanstaande experts in de agrochemie: “We vinden verkeerde ideeën over de betrouwbaarheid van labomethoden”, “We hebben nooit aandacht gehad voor de pH van de bodem bij de experimenten”, “We moeten duidelijk maken dat we niet in staat zijn te vertellen hoeveel meststof er moet gebruikt worden”. Mede door die crisis, kregen methoden die resoluut kunstmest weigerden een boost, zoals de biodynamische beweging met Rudolph Steiner.

Het vertrouwen van boeren in dierlijke mest bleef dus wel overeind, maar die was veel moeilijker te kwantificeren. Bovendien lag de kennis erover vooral bij boeren en was die vaak non-verbaal en intuïtief en dus nauwelijks breder te verspreiden, laat staan voorwerp van wetenschappelijk onderzoek.¹⁴

De argwaan van veel landbouwers blijft ook vandaag groot ten aanzien van het verhaal van allerhande inputverkopers en dienstverleners. Helaas zijn dat vaak de enige erfbetreders, want de overheid trok zich wereldwijd meer en meer terug uit de landbouwvoorlichting.

Chemische bodemanalyses: goed voor wie?

Uit Duits onderzoek in de jaren 1980 blijkt dat boeren er argwaan behouden ten aanzien van klassieke chemische bodemanalyses. Niet geheel zonder reden. Om dat te begrijpen, kunnen we teruggaan naar het gebrek aan wetenschappelijke validatie bij de oorsprong van die analyses¹⁵. Christine Jones¹⁶, doctor in bodemchemie, stelt dat klassieke bodemtesten zeer weinig relevante informatie geven voor regeneratieve boeren. Agronoom John Kempf is grote fan van plantsapanalyses. Je meet zo welke nutriënten de plant opneemt en je kan ze vergelijken met wat de plant idealiter nodig heeft en daar je eventuele bemesting op afstemmen. Kempf is in staat om bij veel klanten vanaf het eerste jaar al een vermindering in stikstofbemesting te realiseren van 25 tot meer dan 50%, en dat zonder productieverlies. Hij bekijkt nog wel standaardbodemanalyses omdat de klanten dat gewoon zijn, maar ziet **geen correlatie**¹⁷ tussen wat zo'n testen meten in de bodem en wat de plant echt kan opnemen, behalve voor Calcium.

Illustratief voor de institutionele lock-in die het gevolg is van von Liebig's *magic fix* die er geen was, is dat toonaangevende bodemwetenschappers¹⁸ in ons land in 2017 na vergelijkend onderzoek - gefinancierd met overheidsgeld - toegeven dat de huidige testen niet deugen: "De meeste bodemtesten voor beschikbare **fosfor** (P) presteren nogal slecht bij het voorspellen van de reactie van het gewas." De gelijkenis met de uitspraken van de toonaangevende Duitse landbouwchemie-wetenschappers 100 jaar geleden is opvallend. Eerder onderzoek in 2010 toonde al aan dat belangrijke hoeveelheden organisch gebonden fosfor wel kunnen opgenomen worden door planten, maar niet gemeten worden met gangbare bodemtesten¹⁹. De test voor fosfor die heel populair werd na WO II (de Olsen P-test) maakt abstractie van organische fosfor, hoewel het bestaan daarvan al in 1917 wetenschappelijk werd vastgesteld²⁰. Nochtans stapelt fosfor zich in de bodem vooral op onder organische vorm: organische fosfor kan in de toplaag tot meer dan de helft van de totale bodemfosfor uitmaken²¹. Chronische overbemestingsadviezen waren het gevolg. De Amerikaanse onderzoeker Rick Haney is ook verontwaardigd omwille van die 'vergeten kennis' en vraagt zich af "waarom we bodems blijven straffen met meststoffen"²². Hij ontwikkelde zelf een alternatieve bodemtest die op basis van een meting van de bodemrespiratie een inschatting maakt van de bijdrage van het bodemleven aan nutriënten. Zo kunnen boeren besparen op overbemesting. Maar wie heeft er commercieel belang bij om deze test te verfijnen en meer ingang te doen vinden? Ondertussen eutrofiëren ecosystemen verder en worden ook wij mensen gestraft met blauwalgen in het water: verboden te zwemmen. Wetenschappers en landbouwadviseurs hebben de deontologische plicht om de vervallen bril waarmee ze naar fosfor kijken, voorgoed te dumpen. Er zijn genoeg ideeën hoe een nieuwe bril er kan uitzien²³.

Over stikstof, stelt Olivier Husson dat planten - wanneer ze de keuze hebben - organische stikstof (aminozuren, aminosuikers) beter zullen absorberen dan minerale stikstof, omdat ze dan de pH niet moeten veranderen en er enorm veel energie mee uitsparen²⁴. Onderzoek van James White²⁵ bracht dan weer aan het licht dat planten zoals grassen wellicht via de rhizofagie-cyclus nog meer stikstof opnemen dan via mycorrhiza. In die rhizofagie-cyclus cultiveren planten microben die zorgen voor nutriëntenaanvoer en plantengroei.

Een grasplant kon 30% van de **stikstof** voorzien via deze cyclus. Richard Mulvaney toonde met gegevens uit lange termijnproeven aan dat stikstofkunstmest de organische koolstof en zelfs de organische vormen van stikstof in de bodem uitputten²⁶. Over **kalium** toonde hij met zijn collega Khan dat er bijna nooit nood²⁷ is aan kalium, omdat de bodem over enorme reserves kalium beschikt. Ze kwamen erachter dat professor Cyril Hopkins al in 1913 wees op de onuitputtelijkheid van kalium in de meeste bodems.

Symbioses in levende bodems

In 1930 was de achteruitgang van de bodemkwaliteit en de daarmee gepaard gaande erosie een internationale bezorgdheid. De Amerikanen hadden hun *Dust Bowl*: een enorme droogte die gekoppeld met het omploegen van de *native prairie* zonder gewasrotatie - anders gezegd destructieve landbouwpraktijken - de landbouw in de *Midwest* enorm hard trof met ongeziene **stofstormen**. Dat had twee belangrijke gevolgen: massaal veel verlies van de vruchtbaarste bodemtoplaag, maar ook de erkenning van de noodzaak aan betere agronomie door president Roosevelt die in 1935 de Soil Conservation Act ondertekende.

Een andere sleutelfiguur die toen bezorgd was dat de “vernietiging van het kapitaal van de aarde - de bodem” de beschaving in gevaar bracht, was de Engelse plantkundige Albert **Howard**. Hij was een goed observator van de natuur, en ook van de verschillende manieren waarop er in de wereld aan landbouw werd gedaan. Howard deed onderzoek naar Indiase landbouwmethoden en bracht met veel ontzag in kaart hoe er aan compostering werd gedaan. Die kennis kwam later naar het westen. Naast het verzamelen van verslagen over experimenten met de door hem beschreven compostmethoden voor verschillende gewassen, benadrukte hij het belang van het volgens hem ondergewaardeerde kwalitatief onderzoek. Typerend hiervoor is zijn pleidooi om alle kinderen bij te brengen wat het verschil is tussen voedsel dat op humusrijke grond is geteeld versus voedsel dat met kunstmest werd voortgebracht. Hij hekelde het reductionisme en cijferfetisjisme van het klassiek landbouwonderzoek, dat alle richting kwijt leek en de voor hem twee belangrijkste zaken - bodemvruchtbaarheid en voedselkwaliteit - negeerde.

In Howards' woorden: “*Landbouwonderzoek is misbruikt, om van de landbouwer, niet een betere voedselteler, maar een meer deskundige bandiet te maken*”²⁸. In zijn eigen onderzoek keek hij zowel naar de onderdelen als naar het geheel, en betrok hij de boerende boer, in bewondering voor de praktijkdeskundigheid die hij zag. Hij zette zijn bevindingen uiteen over de rol van humus, over het belang van de “mycorrhizale associatie” - de “levende schimmelbrug tussen de humus en de planten” - alsook over de schadelijke invloed van kunstmest op die associatie in het boek *An Agricultural Testament* (1940). Dat boek geldt nog steeds als één van de basiswerken van de biolandbouw-beweging. Opvallend is dat dus zowel de vader van de moderne landbouwchemie (naar het einde van zijn leven toe) als de vader

van de biolandbouw (Howard) het belangrijk vonden om organische stof terug op het land te brengen om de lange termijn vruchtbaarheid in stand te houden. Beiden keken in bewondering naar de landbouwculturen in Azië die dat principe in de praktijk brachten. In minder bedekte termen dan von Liebig, wees Howard in zijn boek op het verband tussen de “NPK mentaliteit die in het westen het landbouwonderzoek domineert” en de toenemende planten- en dierziekten.

Hoe moeten we vandaag naar dat verband tussen humusverlies en plantenziekten kijken? Wat weten we eigenlijk over de mycorrhizale associatie, die zo centraal stond bij Howard? Van **mycorrhiza** is geweten dat ze met het overgrote deel van alle landplanten positieve associaties kunnen aangaan. Dat is niet toevallig. Mycorrhiza waren essentieel bij bodemvorming en bij de evolutie van planten. Ze zijn in staat om de minerale ondergrond te ontmantelen en toegankelijk te maken. Mycorrhiza spelen een belangrijke rol bij de plantenvoeding: ze zijn verankerd in de wortels en vergroten enorm het worteloppervlak, ze maken fosfor beschikbaar, halen stikstof uit de organische stof, en verhogen de nutriëntendichtheid van planten. Mycorrhiza zijn ook cruciaal in de plantenbescherming: ze stimuleren de fotosynthese en het afweersysteem en helpen de plant in onkruidbeheer, en bij droogte of andere stress²⁹. Verschillende mycorrhiza staan ook met elkaar in verbinding: ze kunnen signalen en ook nutriënten doorgeven tussen planten onderling. Mycorrhiza bestaan uit hele fijne schimmeldraden (hyfen) die de bodemstructuur verbeteren doordat ze de aggregaten samen houden. Dat zorgt voor een kruimelige structuur waar iedere boer van droomt. In zo'n bodem is er een vlotte circulatie van lucht en water. Bodems met goede aggregaatstabiliteit nemen veel makkelijker water op en houden dat ook langer vast. De schimmeldraden moet je zien als een soort lange kokers met in de wanden een zeer moeilijk afbreekbaar eiwit dat als een lijm bodemaggregaten samenhoudt: glomaline. Sara Wright, onderzoeker verbonden aan het United States Department of Agriculture, ontdekte glomaline in 1996 en schatte toen dat een derde van de globale bodemkoolstof zou verscholen zitten in glomaline. De inzichten van Howard zijn vandaag met andere woorden ruimschoots bevestigd en worden voortdurend verder verfijnd. Intussen weten we dat er nog andere plantsymbionten zijn naast mycorrhiza, zoals Rhizobium-bacteriën of Trichoderma-schimmels die ook de wortels van planten binnendringen en vergelijkbare voordelen bieden aan planten³⁰.

Maar wat krijgen symbionten in de plaats voor al die diensten? Het antwoord is éénvoudig: eten! Planten maken tijdens de fotosynthese suikers aan. Die gebruiken ze om bladeren en wortels aan te maken, maar een onderbelicht aspect - zeker in het denkkader van NPK dat de vroege von Liebig achterliet - is dat planten veel suikers, aminozuren en andere stoffen via de wortels afscheiden, de fameuze '**wortellexudaten**'. Recent onderzoek stelt vast dat wortellexudaten 2 tot 13 keer efficiënter zijn bij de vorming van bodemkoolstof dan plantenresten³¹. Volgens Christine Jones kunnen mycorrhiza 40 tot 50% van alle door fotosynthese geproduceerde suikers opnemen. Toch zorgt de associatie er paradoxaal genoeg voor dat de planten 10 tot 20% sneller groeien. Dat de bodem planten voedt, is dus maar een deel van het verhaal, onderschat is dat planten de bodem evenzeer voeden. Volgens bodemecoloog Matthias Rillig lekken planten via de wortels 4 tot 70% van de door fotosynthese vastgelegde koolstof³².

Kristine Nichols doctoreerde op het onderwerp glomaline bij Wright en onderzocht de aanwezigheid van glomaline in verschillende landbouwsystemen. Ze vond dat glomaline een goede indicator is voor een gezond en functioneel bodemleven, dat actief koolstof vastlegt. Voordeel van glomaline is dat het veel stabiel is dan humuszuren. Nichols stelde vast dat boeren in staat zijn met aangepast beheer de mycorrhiza te versterken en dus de hoeveelheid glomaline te verhogen en daarmee de veerkracht van het ecosysteem. Het precieze ontstaan van glomaline is nog niet ontcijferd, en intussen zijn er wellicht betere en meer toegankelijke **indicatoren** van bodemgezondheid, zoals de schimmel-bacterie verhouding of de aaltjesdiversiteit, die je met een microscoop kan (laten) vaststellen³³. Of je kan zelf het aantal regenwormen per spadesteek tellen, of het aantal wormgangen om te zien of je vooruitgang boekt.

Regeneratie door inoculatie

Vandaag weten we veel meer over het bodemleven, meer dan ooit weten we dat we nog enorm veel niet weten. Een belangrijke parallel zal één en ander verduidelijken. Veel vooruitgang is geboekt in de geneeskunde de laatste decennia met het inzicht in de werking van onze darmflora en breder, het belang van micro-organismen voor onze gezondheid. Weinigen zullen nog van hun stoel vallen wanneer ze vernemen dat het aantal bacteriële genen in onze darmflora honderd maal hoger is dan het aantal menselijke genen. Wanneer patiënten last hebben van ziekenhuisbacterie, werken antibiotica soms niet meer. Wetenschappers geloven dat het te maken heeft met de diversiteit van de darmflora, die - vaak door oa. antibioticagebruik - sterk verzwakt. Wat dan zeer goed blijkt te werken, is **faecetransplantatie**. Je kan het zien als een inoculatie van de zieke patiënt met een functionerend ecosysteem: de faeces van iemand met een gezonde darmflora. De praktische details doen er op dit moment niet toe, maar de theorie is dat de nuttige darmflora gedurende honderden duizenden jaren evolutie symbiotische relaties hebben ontwikkeld die ingrijpen op onze stofwisseling, immuunsysteem, spierfuncties en zelfs onze stemming. De micro-organismen in de bodem doen hetzelfde met planten: symbioses ontwikkelen. Alleen is dat proces al honderden miljoenen jaren langer aan de gang. Een beetje nederigheid ten aanzien van zo'n lange traditie van onderzoek en ontwikkeling is dus op zijn plaats.

Wat doet **kunstmest** met mycorrhiza? Recent onderzoek toonde aan dat een minerale NPK-bemesting in bodems in China een verschuiving veroorzaakte in schimmelpopulaties waarbij ziekteveroorzakende schimmels toenamen en symbiotische mycorrhiza afnamen³⁴.

Van wateroplosbare fosfaat (onderdeel van kunstmest) is al zeer lang geweten dat die mycorrhiza tegenwerkt. Problematischer is dat sinds WO II planten standaard werden veredeld onder condities van hoge kunstmestgift, waarbij vooral kunstmestrespons (kilo opbrengst per hoeveelheid mest) van tel was en de mycorrhizale associatie volledig werd verwaarloosd. Leuven's onderzoek op rijst in Bangladesh vergeleek onlangs traditionele rijstvariëteiten met na 1950 veredelde moderne variëteiten met hoge opbrengst. De onderzoekers stelden vast dat de traditionele variëteiten significant hogere mycorrhizadiversiteit hadden. Een gevolg van veredeling onder hoge kunstmestgift?³⁵ Of ligt het aan de invloed van fungiciden, ook vaak standaard gebruikt tijdens de veredeling, waarvan is aangetoond dat ze schadelijk zijn voor mycorrhiza³⁶? Ook problematisch is dat zelfs

herbiciden zoals glyfosaat de werking van mycorrhiza (en regenwormen) afremmen³⁷. Omschakelen naar biologische landbouw vermindert het probleem van de pesticiden, maar dat kan tientallen jaren duren want veel pesticiden blijven zeer lang in het systeem hun schadelijke invloed op het bodemleven, waaronder mycorrhiza, uitoefenen³⁸. De term 'gewasbeschermingsmiddelen' die de gifindustrie hanteert, is vaak ronduit misleidend.

Te mijden is **ploegen**, want de ploeg breekt aggregaten open en vernietigt dus ook de schimmeldraden die de aggregaten samenhouden. In de aggregaten zelf komt zo de minder stabiele organische stof blootliggen en dan kan die oxideren. Vooral de combinatie met stikstofmest op die opengebroken aggregaten zorgt dat bacteriën de humus opbranden. Zo zijn we al heel veel bodemkoolstof verloren (zie kaderstuk), en die moeten we opnieuw opbouwen in onze bodems.

Ervor zorgen dat de bodem nooit of nauwelijks **naakt** is en altijd levende planten bevat, is een ander principe. Dat vraagt een uitgekiende teeltrotatie, met een afwisseling tussen mengsels van groenbemesters. Liefst zoveel mogelijk mengteelten, ook voor de hoofdteelten. Volgens Nichols is de landbouw van de toekomst er één met meerjarigen in éénjarigen en éénjarigen in meerjarigen. Agroforestry of boslandbouw is een voorbeeld van het eerste, en *pasture cropping* van het tweede. Bij *pasture cropping* wordt in een meerjarige grasteelt een éénjarige teelt ingezaaid. Een belangrijke reden voor deze continue polycultuur zonder pauzes is dat mycorrhiza niet kunnen floreren wanneer er geen levende plantenwortels zijn in de bodem. Hoe meer en hoe diverser, hoe beter is de regel. Hoe meer biodiversiteit bovengronds, hoe groter de hoeveelheid exudaten die ondergronds vrijgegeven worden, en hoe groter ook de biomassa van schimmels. Hoe groter de relatieve verhouding tussen schimmels en bacteriën, hoe groter ook de opslag van koolstof³⁹. Interessant is ook dat verschillende plantensoorten variëren in wortelstructuur, afhankelijk van hun voedingsstrategie. Sommige planten halen hun voeding zelf uit de bodem en hebben veel lange dunne wortels. Andere planten besteden hun voedselwinning uit aan mycorrhizaschimmels. Die planten hebben een kleiner aantal wortels, maar ze zijn wel dikker en hebben een dikke schors, waarin de mycorrhiza goed kunnen verankeren⁴⁰.

De integratie van **dieren** is ook positief, onder bepaalde voorwaarden. Howard hamerde er al op dat er geen landbouw is zonder dieren, ook voor veel regeneratieve boeren staan dieren in de kijker omwille van de ecosysteefunctie van nutriëntenrecyclage. *Rangeland ecologist* Richard Teague, die hierin baanbrekend onderzoek heeft gedaan bij Texas A&M University, stelde vast dat er een sterk verhoogde verhouding is tussen schimmels en bacteriën bij adaptief roterend begrazen, wat samenhangt met betere waterhuishouding, betere fysische, chemische en biologische bodemkwaliteit, hogere productiviteit⁴¹, minder emissies⁴² en meer koolstofopslag⁴³. De strategie komt erop neer dat herkauwers zeer frequent omgeweid worden, zodat het gras tijd krijgt te herstellen. Het is dus een soort nabootsen van het migratiegedrag van kuddes bizons. De rol van de predator die in natuurlijke omstandigheden zorgt dat de kudde bij elkaar blijft, wordt opgenomen door de ranchers die adaptief - in relatie tot grasgroei, klimaat, bodemomstandigheden - een elektrische draad regelmatig verzetten.

Teague stelde vast dat er een grote discrepantie bestaat tussen onderzoeksresultaten over roterend begrazen enerzijds - die nauwelijks positief effect aantoonde - en anekdotische

ervaringen van ranchers anderzijds, die toename zagen in voederproductie en vleesproductie⁴⁴. Teague wil deze vermeende tegenstrijdigheid overbruggen met een nieuwe kijk op onderzoek, die aanleunt bij het **systemdenken**: *“Terwijl wetenschappelijke methoden op kleine schaal mechanistische kennis hebben voortgebracht over bodems, water, planten, herbivoren en hun interacties, zijn slechts heel weinig beheersgebonden factoren meegenomen in elk experiment. Dat beperkt het ontdekken van positieve of negatieve interactieve gevolgen die belangrijk zijn voor de flexibiliteit in succesvol beheer van boerderijen. Bijgevolg is hun nut erg beperkt voor boeren die complexe landschappen beheren. De regeneratieve manier van denken en onderzoeken is onbekend voor veel boeren en landbouwwetenschappers. Daarom is het nodig dat boeren die met succes regeneratieve principes en praktijken toepassen in functionele boerderijsystemen, anderen onderwijzen hoe regeneratief beheer gebeurt, en welke voordelen dat heeft.”*

Regeneratief boeren komt neer op investeren in een **combinatie** van alle net beschreven principes: verminderde kunstmest en pesticiden, minder diep (of niet meer) ploegen, diverse en permanente bodembedekkende polycultuur, inschakelen van grazers. Ze helpen allemaal om organische stof op te bouwen, hoe meer principes worden toegepast, hoe beter het werkt. Lastig voor wetenschappers die graag alles apart onderzoeken, maar de boerderij is een systeem. Investeren in ecosysteemfuncties - vaak een kennisintensieve aangelegenheid - brengt een proces op gang, waarbij de bodem zichzelf herstelt, naar een situatie met meer veerkracht.

Een verfrissende onderzoeksaanpak die hier mooi op aansluit, is die van Andy Neal van Rothamsted in 2020. Hij bewijst dat de bodem een levend systeem is met eigenschappen van ‘zelf-organisatie’ dat met groeiende planten (en dieren) kan leiden naar een staat met meer veerkracht in tijden van droogte, meer porositeit, betere nutriëntenvoorziening voor planten, meer waterhoudend vermogen, minder broeikasemissies en meer koolstofopslag. De bodem is een **proces** waar fysische, (bio)chemische en biologische eigenschappen samen evolueren⁴⁵. Met ons beheer kunnen we kiezen welke richting het uitgaat. Meer of minder veerkracht. Een combinatie van ploegen, overmatige bemesting, bodemverdichting, monocultuur, met als gevolg minder zuurstof en minder poriën, leidt tot een ecosysteem met meer anaërobe bacteriën die stikstof afbreken tot lachgas. Dus potentiële plantenvoeding verwordt tot een sterk broeikasgas. Zieke bodems verliezen organische stof aan de atmosfeer. De minerale bodembestanddelen zitten er te dicht op elkaar en ze kunnen minder water opnemen en vasthouden. Bij droogte wordt dat fataal.

Bodems regenereren en ecosysteemfuncties herstellen vergt tijd, stelde Neal vast. Maar **regeneratieve landbouwers** stellen dat het proces veel sneller kan. De meeste agronomen en bodemkundigen zien ook wel dat je bodemfuncties kan herstellen met betere landbouwpraktijken. Maar volgens Jon Stika⁴⁶, die een hele carrière bij de Natural Resource Conservation Service heeft gewerkt in de VS, hebben de meeste mensen in de sector nog nooit een gezonde functionerende bodem gezien. Hij stelt dat het referentiekader een disfunctionele bodem is. En dat verklaart de scepsis bij velen over het potentieel van regeneratieve landbouw of agro-ecologie. Het klinkt te mooi om waar te zijn. Het grootste obstakel om bij te leren is dat er andere kennis in de weg zit.

Bijvoorbeeld het idee dat je moet kiezen tussen ofwel productie voor de mens ofwel biodiversiteit. Stel je wilt bossen voor biodiversiteit, maar je hebt ook hout en voedsel nodig. Als je dan de bomen voor houtproductie apart in een productiebos zet, en daarnaast akker- of grasland voor voedselproductie, dan splits je de drie activiteiten op: biodiversiteit, hout- en voedselproductie. Je gaat er dan van uit dat aparte monoculturen het meest opbrengen per hectare, dat heet *landsparing*. Maar wat bij systemen waar je agro-ecologisch intensiveert door verschillende producties te verweven? Goed ontworpen⁴⁷ agroforestrysystemen - strategie van **landsharing** - die houtproductie integreren in akker- of grasland, hebben 30 tot 40% minder plaats nodig dan hout- en voedsel in aparte monoculturen. Dat komt omdat ze het agro-ecosysteem beter benutten dan monoculturen. Met agroforestry kan je dus paradoxaal genoeg aan *landsparing* doen: er komt extra ruimte vrij om bos voor biodiversiteit aan te leggen. In plaats van bodemdegradatie inherent aan monocultuur, zorgt agroforestry bovendien naast voedsel en hout ook voor koolstofopslag en nog veel andere ecosystemendiensten.

Regeneratieve landbouw combineert ecosysteemherstel met landbouwproductie. Richard Teague verwijst naar regeneratieve ranchers in Canada die op 15 jaar niet alleen een vertienvoudiging zagen van de waterinfiltratiesnelheid, maar ook elk jaar een toename in bodemorganische stof van 1%. Dat is ongeveer tien keer sneller dan wat Vlaamse onderzoekers lieten optekenen in De Standaard⁴⁸. Ze gingen dus van 1% tot 15% organische stof. Die waarneming is moeilijk te rijmen met de theorie dat er een plafond zit op de hoeveelheid koolstof die bodems kunnen opslaan. Teague stelt dat iedereen verwijst naar de lange termijn proeven van Rothamsted die aantoonde dat de hoeveelheid koolstof die je kan vastleggen na een bepaalde tijd plafonneert, dit wil zeggen er treedt zogenaamde **koolstofverzadiging** op. Op dat moment zouden bodems 'vol' zitten. Ook klimaatrapporten van het IPCC gaan uit van zo'n koolstofverzadiging. Maar hoe werden de metersdiepe mollisols - prairiebodems met enorme hoeveelheden organische stof - dan gevormd? Teague ontdekte dat er in Rothamsted op een bepaald moment beslist werd - toen de organische stof nog aan het toenemen was - dat de grazende schapen zouden worden vervangen door een maai-beheer. Het maaisel werd teruggebracht op de percelen "om de nutriëntenkringloop te sluiten". Teague weet als ecooloog - niet als agronoom - dat een grazer uit het systeem halen de verbeterde nutriëntenkringloop elimineert, waar herkauwers maar ook mestkevers als sleutelsoort deel van uitmaken. Minder ecosystemefuncties, minder biodiversiteit, minder koolstofopslag⁴⁹.

"Wij versnellen de biologische tijd", klinkt het bij Gabe Brown⁵⁰, één van de pioniers die sterke en snelle toename van organische stof realiseerde door de principes van bodemgezondheid toe te passen in North Dakota. Hij experimenteerde er met de combinatie van ploegloos, diverse groenbemesters, grazen, en reductie van inputs, wat in een kort tijdsbestek grote hoeveelheden koolstof vastlegde. In België is **pionier** Jos Van Reeth van het Land van Ny met regeneratief boeren in staat gebleken om quasi zonder externe inputs mooie opbrengsten te halen en zeer hoge organische stofgehalten. Op minder dan 30 jaar tijd steeg de totale organische koolstof van 2% tot intussen meer dan 17% op sommige percelen.

Eén van de vele agro-ecologische innovaties die hij al uitprobeerde, is de Johnson/Su compost. Onderzoeker David Johnson ontwikkelde deze techniek voor schimmeldominante compost en stelt dat de schimmel-bacterie verhouding, en dus ook de koolstofopslag er gevoelig mee verhoogd kan worden. De compost rijpt een jaar in een low-cost low-tech bioreactor en moet niet gekeerd worden. Hij dient niet als toevoer van organische stof en nutriënten aan de bodem, zoals de meeste composten vandaag de dag worden gebruikt. Hij dient als **inoculum**: je ent een microbiom met een enorm hoge microbiologische diversiteit. Je kan er een waterextract of een compostthee van maken om plantenzaden mee te inoculeren of in de plantsleuf te mengen. Een vergelijkende proef bij een boer in Waals-Brabant oogde veelbelovend: een verdubbeling van de biomassa-productie van de met compostthee behandelde groenbemesterzaden. De boer in kwestie zit in een lerend netwerk van ploegloze boeren met wie hij zijn innovatie zal delen. Van boer tot boer, zoals Richard Teague ook gelooft dat het best werkt.

Het doel van regeneratief boeren is een performante voedselproductie, met een diversiteit aan gezonde planten die met hun krachtige groei de bodem helpen opbouwen. Tijdens dat proces worden cruciale ecosysteemfuncties hersteld zoals waterinfiltratie en biodiversiteit. Koolstofopslag is daarbij een positieve externaliteit, maar niet het doel op zich. De VN trapten begin 2021 het Decennium voor Ecosysteemrestoratie af. Laat ons beginnen met de basis van ons voedselsysteem: de bodem.

Bronnen

- ¹ Oceanen nemen ook massaal veel CO₂ op, maar dat valt buiten het bestek van deze paper. Schommeling is de Keeling curve:
https://scripps.ucsd.edu/bluemoon/co2_400/mlo_full_record.png
- ² Hier worden veranderingen in landgebruik mee bedoeld in de laatste 6000 jaar en gebruik van fossiele brandstoffen na 1750. Bron: Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *BioScience*, 60(9), 708–721. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>
- ³ Lal, R. (2020). Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>
- ⁴ Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G. J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1706103114>
- ⁵ Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24(8), 3285–3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- ⁶ Meersmans, J., Van Wesemael, B., Goidts, E., Van Molle, M., De Baets, S., & De Ridder, F. (2011). Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands, 1960-2006. *Global Change Biology*, 17(1), 466–479. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02183.x>
- Tits M., Elsen A., Deckers S., Bries J., V. H. (2020). *Bodemvruchtbaarheid van de Akkerbouw- en Weilandpercelen in België en Noordelijk Frankrijk (2016-2019)*. Publicatie van de Bodemkundige Dienst van België. 235 pp.
- ⁷ Evans, D. L., Quinton, J. N., Davies, J. A. C., Zhao, J., & Govers, G. (2020). Soil lifespans and how they can be extended by land use and management change. *Environmental Research Letters*, 15(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba2fd>
- ⁸ Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie.
- ⁹ Schmidt, S., Raven, J. A., & Paungfoo-Lonhienne, C. (2013). The mixotrophic nature of photosynthetic plants. *Functional Plant Biology*, 40(5), 425–438. <https://doi.org/10.1071/FP13061>
- ¹⁰ Visser, J. (2019). Opening History: Gaining Perspectives. In *Organic Fertilizers - History, Production and Applications* (pp. 0–21). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86185>
- ¹¹ Uekötter, F. (2014). Why Panaceas Work: Recasting Science, Knowledge, and Fertilizer Interests in German Agriculture. *Agricultural History*, 88(1), 68–86. <https://doi.org/10.3098/ah.2014.88.1.68>
- ¹² Samenvattend uit hoofdstuk 12 van: Montgomery, D.R. (2018). *Growing a revolution: Bringing our soil back to life*. W. W. Norton Company, New York, NY, 320 pp; ISBN-13: 978-0393356090.
- ¹³ von Liebig, J. (1863). *The Natural Laws of Husbandry* (J. Blyth (ed.)). Walton & Maberly, London.
- ¹⁴ Uekötter, F. (2014) zie eerdere noot
- ¹⁵ Visser, J. (2019). zie eerdere noot
- ¹⁶ <http://amazingcarbon.com/>
- ¹⁷ Soil Biology Panel with Dr Elaine Ingham & John Kempf | Climate Farmers <https://www.youtube.com/watch?v=Pk7VRnxql0Q>
- ¹⁸ Nawara, S., Van Dael, T., Merckx, R., Amery, F., Elsen, A., Odeurs, W., Vandendriessche, H., Mcgrath, S., Roisin, C., Jouany, C., Pellerin, S., Denoroy, P., Eichler-Löbermann, B., Börjesson, G., Goos, P., Akkermans, W., & Smolders, E. (2017). A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe.

European Journal of Soil Science, 68(6), 873–885. <https://doi.org/10.1111/ejss.12486>

¹⁹ Steffens, D., Leppin, T., Luschin-Ebengreuth, N., Min Yang, Z., & Schubert, S. (2010). Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(5), 765–771. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000079>

²⁰ Visser, J. (2019). zie eerdere noot

²¹ Sulieman, S., & Mühling, K. H. (2021). Utilization of soil organic phosphorus as a strategic approach for sustainable agriculture. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, jpln.202100057. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100057>

²² <https://e360.yale.edu/features/why-its-time-to-stop-punishing-our-soils-with-fertilizers-and-chemicals>

²³ 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. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>

²⁴ Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil*, 362(1–2), 389–417. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7>

²⁵ White, J., Kingsley, K., Verma, S., & Kowalski, K. (2018). Rhizophagy Cycle: An Oxidative Process in Plants for Nutrient Extraction from Symbiotic Microbes. *Microorganisms*, 6(3), 95. <https://doi.org/10.3390/microorganisms6030095>

²⁶ Mulvaney, R. L., Khan, S. A., & Ellsworth, T. R. (2010). Reply to Additional Comments on “Synthetic Nitrogen Fertilizers Deplete Soil Nitrogen: A Global Dilemma for Sustainable Cereal Production,” by R.L. Mulvaney, S.A. Khan, and T.R. Ellsworth in the *Journal of Environmental Quality* 2009 38:2295-2314. *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1530–1532. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0005le>

²⁷ Khan, S. A., Mulvaney, R. L., & Ellsworth, T. R. (2014). The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 29(1), 3–27. <https://doi.org/10.1017/S1742170513000318>

²⁸ Howard, Albert (1940) An agricultural testament. London.

²⁹ Zhang, S., Lehmann, A., Zheng, W., You, Z., & Rillig, M. C. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: a meta-analysis. *New Phytologist*, 222(1), 543–555. <https://doi.org/10.1111/nph.15570>

³⁰ Harman, G. E., & Uphoff, N. (2019). Symbiotic Root-Endophytic Soil Microbes Improve Crop Productivity and Provide Environmental Benefits. *Scientifica*, 2019, 1–25. <https://doi.org/10.1155/2019/9106395>

³¹ Sokol, N. W., Kuebbing, S. E., Karlsen-Ayala, E., & Bradford, M. A. (2019). Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon. *New Phytologist*, 221(1), 233–246. <https://doi.org/10.1111/nph.15361>

³² Life in the Soil Podcast Episode 3: The Soil Food Web – A Jungle in Tiny Dimensions <https://rilliglab.org/2021/01/15/life-in-the-soil-podcast-3-soil-food-web/>

³³ <https://www.soilfoodweb.com/>

³⁴ Ma, M., Jiang, X., Wang, Q., Ongena, M., Wei, D., Ding, J., Guan, D., Cao, F., Zhao, B., & Li, J. (2018). Responses of fungal community composition to long-term chemical and organic fertilization strategies in Chinese Mollisols. *MicrobiologyOpen*, 7(5), e00597. <https://doi.org/10.1002/mbo3.597>

³⁵ Parvin, S., Van Geel, M., Ali, M. M., Yeasmin, T., Lievens, B., & Honnay, O. (2021). A comparison of the arbuscular mycorrhizal fungal communities among Bangladeshi modern high yielding and traditional rice varieties. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04858-4>

³⁶ Rillig, M. C., Aguilar-Trigueros, C. A., Camenzind, T., Cavagnaro, T. R., Degruene, F., Hohmann, P., Lammel, D. R., Mansour, I., Roy, J., Heijden, M. G. A., & Yang, G. (2019). Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*, 222(3),

1171–1175. <https://doi.org/10.1111/nph.15602>

³⁷ Helander, M., Saloniemi, I., Omacini, M., Druille, M., Salminen, J. P., & Saikkonen, K. (2018). Glyphosate decreases mycorrhizal colonization and affects plant-soil feedback. *Science of the Total Environment*, *642*, 285–291.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.377>

Zaller, J. G., Heigl, F., Ruess, L., & Grabmaier, A. (n.d.). *Glyphosate herbicide affects belowground interactions between earthworms and symbiotic mycorrhizal fungi in a model ecosystem*. <https://doi.org/10.1038/srep05634>

³⁸ Riedo, J., Wettstein, F. E., Rösch, A., Herzog, C., Banerjee, S., Büchi, L., Charles, R., Wächter, D., Martin-Laurent, F., Bucheli, T. D., Walder, F., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Widespread Occurrence of Pesticides in Organically Managed Agricultural Soils—the Ghost of a Conventional Agricultural Past? *Environmental Science & Technology*, *55*, 2919–2928. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405>

³⁹ Eisenhauer, N., Lanoue, A., Strecker, T., Scheu, S., Steinauer, K., Thakur, M. P., & Mommer, L. (2017). Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Scientific Reports*, *7*, 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep44641>

⁴⁰ Bergmann, J., Weigelt, A., Van Der Plas, F., Laughlin, D. C., Kuyper, T. W., Guerrero-Ramirez, N., Valverde-Barrantes, O. J., Bruelheide, H., Freschet, G. T., Iversen, C. M., Kattge, J., McCormack, M. L., Meier, I. C., Rillig, M. C., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., Van Ruijven, J., York, L. M., & Mommer, L. (2020). The fungal collaboration gradient dominates the root economics space in plants. In *Sci. Adv* (Vol. 6). <http://advances.sciencemag.org/>

⁴¹ Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Haile, N., DeLaune, P. B., & Conover, D. M. (2011). Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *141*(3–4), 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.009>

⁴² Dowhower, S. L., Teague, W. R., Casey, K. D., & Daniel, R. (2020). Soil greenhouse gas emissions as impacted by soil moisture and temperature under continuous and holistic planned grazing in native tallgrass prairie. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *287*(October 2019), 106647. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106647>

⁴³ Teague, W. R., Apfelbaum, S., Lal, R., Kreuter, U. P., Rowntree, J., Davies, C. A., Conser, R., Rasmussen, M., Hatfeld, J., Wang, T., Wang, F., & Byck, P. (2016). The role of ruminants in reducing agriculture’s carbon footprint in North America. *Journal of Soil and Water Conservation*, *71*(2), 156–164. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.2.156>

⁴⁴ Teague, R., Provenza, F., Kreuter, U., Steffens, T., & Barnes, M. (2013). Multi-paddock grazing on rangelands: Why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience? *Journal of Environmental Management*, *128*(July), 699–717. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.064>

⁴⁵ Neal, A. L., Bacq-Labreuil, A., Zhang, X., Clark, I. M., Coleman, K., Mooney, S. J., Ritz, K., & Crawford, J. W. (2020). Soil as an extended composite phenotype of the microbial metagenome. *Scientific Reports*, *10*(1), 10649. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67631-0>

⁴⁶ <http://regenerativeagriculturepodcast.com/episode-66-jon-stika>

⁴⁷ Lawson, G., Dupraz, C., & Watté, J. (2018). Can silvoarable systems maintain yield, resilience, and diversity in the face of changing environments? In *Agroecosystem Diversity: Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality* (pp. 145–168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00009-1>

⁴⁸ “Betaal de boer om CO2 in zijn grond te steken”, De Standaard, 17 februari 2021.

⁴⁹ <https://rodaleinstitute.org/blog/cattle-are-part-of-the-climate-solution/>

⁵⁰ In de op Netflix te bekijken documentaire “Kiss the Ground”.