

BODEMBREED INTERREG

DEEL 1: Duurzaam bodembeheer & Functionele Agrobiodiversiteit in de bodem

DEEL 2: Bodemleven

Onderdeel: Werkgroep

Document: Rapport / Literatuurstudie

Tijdstip:

Versie: 1

Status:

Opgesteld door: Marleen Zanen, Paul Belder, Willemijn Cuijpers en Merijn Bos

Deze publicatie werd met de meeste zorg en nauwkeurigheid opgesteld. Ondanks de geleverde inspanningen kan dit echter niet garanderen dat de ter beschikking gestelde informatie steeds volledig, juist, nauwkeurig of bijgewerkt is.

De gebruiker van deze publicatie ziet af van elke klacht tegen het Louis Bolk Instituut, zijn medewerkers of de partners van het Interregproject BodemBreed, van welke aard ook, met betrekking tot het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.

In geen geval zullen het Louis Bolk Instituut, zijn medewerkers of de partners van het Interregproject BodemBreed aansprakelijk gesteld kunnen worden voor eventuele nadelige gevolgen die voortvloeien uit het gebruik van de via deze publicatie beschikbaar gestelde informatie.

Auteursrechten: Deze publicatie werd gerealiseerd in het kader van het Interregproject Bodembreed. Deze is exclusief en volledig eigendom van alle partners van BodemBreed. Alle partners van het project BodemBreed hebben het recht om deze publicatie zonder meerprijs te gebruiken voor hun eigen publicaties, mits bronvermelding. Dit recht is onbeperkt in de tijd.



Provincie Vlaams-Brabant, Provincie Belgisch-Limburg, Provincie Nederlands-Limburg, Vlaamse Overheid (Albon), Waterschap Roer en Overmaas, Boerenbond, Iltb, Arvalis, PIBO-Campus, PPO, Hooibeekhoeve.

Mede gefinancierd door:



Inhoud

Voorwoord	5
Boerensamenvatting	7
Samenvatting	11
Summary	13
DEEL 1 DUURZAAM BODEMBEHEER & FUNCTIONELE AGROBIODIVERSITEIT IN DE BODEM	15
1 Inleiding	17
1.1 Duurzaam bodembeheer	17
1.2 Bodemkwaliteit	18
1.3 Bodembiodiversiteit	18
1.4 Wat leeft er in de bodem	19
2 Bodemleven: wat doet het en hoe wordt het beïnvloed?	21
2.1 De bodem als habitat voor bodemleven	21
2.2 Het bodemvoedselweb	21
2.3 Functies van het bodemleven	23
3 Bodembedreigingen	29
3.1 Soorten bodembedreigingen	29
3.2 Organische stof	29
3.3 Bodemverdichting	30
4 Meten en beoordelen van biologische bodemkwaliteit	33
4.1 Meten van bodemleven	33
4.2 Microflora en -fauna	33
4.3 Mesofauna	36
4.4 Macrofauna	36
4.5 Bodemprofiel beoordeling	37
5 Conclusies en aanbevelingen	41
Conclusies:	41
Aanbevelingen:	41
Do's en don'ts voor een duurzamer bodembeheer door de akkerbouwer:	41
6 Literatuur	43

DEEL 2 BODEMLEVEN	47
1 Bacteriën	49
1.1 Algemeen	49
1.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb	51
1.3 Ecosysteemfuncties	52
1.4 Aantallen en diversiteit	55
2 Schimmels	57
2.1 Algemeen	57
2.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb	59
2.3 Ecosysteemfuncties	60
2.4 Aantallen en diversiteit	62
3 Protozoën	63
3.1 Algemeen	63
3.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb	64
3.3 Ecosysteemfuncties	65
3.4 Aantallen en diversiteit	65
4 Nematoden	66
4.1 Algemeen	66
4.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb	66
4.3 Ecosysteemfuncties	68
4.4 Aantallen en diversiteit	69
5 Potwormen	71
5.1 Algemeen	71
5.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb	72
5.3 Ecosysteemfuncties	73
5.4 Aantallen en diversiteit	74
6 Regenwormen	75
6.1 Algemeen	75
6.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb	76
6.3 Ecosysteemfuncties	77
6.4 Aantallen en diversiteit	78
7 Literatuur	81

Voorwoord

Deze studie is onderdeel van het Interregproject “Bodembreed” (2009-2011) een initiatief van de partners van het vroegere Interregproject “Erosiebestrijding”.

“Bodembreed” richt zich op het verduurzamen van het landbouwkundig bodemgebruik in een deel van Vlaanderen en in Nederlands Limburg door het versterken van de kennis en inzichten van de bodem als samenhangend geheel. Het project is vooral gericht op de implementatie van praktische maatregelen om de kwaliteit van landbouwbodems op peil te houden of te verbeteren.

Eén van de activiteiten (activiteit 4) binnen “Bodembreed” is kennisopbouw van het thema duurzaam bodembeheer en functionele agrobiodiversiteit. Om te onderzoeken wat de rol en betekenis van duurzaam bodembeheer en functionele agrobiodiversiteit kan zijn binnen de akkerbouw in Vlaanderen en Nederlands Limburg is in fase 1 een literatuurstudie uitgevoerd. Dit rapport is daarvan het resultaat. In de tweede fase wordt een indicatorset onderbouwd die gebruikt kan worden om op perceelsniveau bodembiodiversiteit te kunnen meten en om de veranderingen als gevolg van toegepaste maatregelen te kunnen beoordelen. In een derde fase wordt deze indicatorset vervolgens getoetst in proef- en praktijkbedrijven waar vergelijkingen aangelegd zijn van regulier ploegen en niet-kerende grondwerking met als doel om de indicatorset te gebruiken in de effectbeoordeling van niet-kerende grondbewerking op bodemkwaliteit en bodemleven.

Deze studie is opgebouwd uit twee delen: DEEL 1 omvat een beknopt en praktijkgericht overzicht van duurzaam bodembeheer en bodembiodiversiteit op basis van bestaande literatuur en beschikbare kennis. De nadruk is gelegd op de effecten van het organische stofgehalte en bodemverdichting en daaraan gekoppelde maatregelen op het gebied van bemesting en bodembewerking. Weinig tot geen aandacht is geschonken aan erosie (daarvoor wordt verwezen naar Interregproject Bodembreed), verzuring, verzilting en aardverschuivingen omdat deze bedreigingen voor Vlaanderen en Nederlands Limburg minder relevant zijn. DEEL 2 van de literatuurstudie omvat achtergrond informatie over de belangrijkste groepen bodemorganismen, hun leefwijze, plek in het voedselweb, rol bij ecosystemfuncties, aantallen en diversiteit.

Boerensamenvatting

Aanleiding tot dit onderzoek: Een goede opbrengst en kwaliteit van uw gewassen begint bij de kwaliteit van uw landbouwgrond. Voor optimale groei heeft iedere plant voldoende water, zuurstof en voedingsstoffen nodig. Een “goede” bodem levert deze drie benodigdheden op tijd en in de juiste hoeveelheid, is goed doorwortelbaar, erodeert niet of nauwelijks en heeft voldoende draagkracht om met machines te berijden. Een gezond gewas is minder vatbaar voor ziekten en plagen en in een “goede” bodem hebben schadelijke bodemorganismen minder kans om te overleven.

In het Vlaams-Nederlandse project Bodembreed zijn twee belangrijke bedreigingen voor de kwaliteit van bodems gesignaleerd:

- teruggang in koolstofgehalte
- bodemverdichting

In deze literatuurstudie worden de kansen besproken om de bodemkwaliteit van löss/leembodems te verbeteren. In principe zijn er drie instrumenten waarmee grondgebruikers de bodem kunnen beïnvloeden: bewerking, bemesting en gewaskeuze. Naast de beïnvloeding door de landbouwer speelt het van nature aanwezige bodemleven een essentiële rol om een goede bodemkwaliteit te bereiken. Een actief en gezond bodemleven heeft een positieve invloed op bodemstructuur, beschikbaarheid van voedingsstoffen, natuurlijke wering van ziekten en plagen en maakt dat gronden minder gevoelig zijn voor extreme weersomstandigheden

Teruggang in koolstofgehalte: Voldoende koolstof in landbouwgronden is zeer belangrijk.

Organische stof – waar de koolstof zo'n 57% deel van uitmaakt - draagt bij aan een goede bodemstructuur, is een bron van voedingsstoffen voor planten en is voedsel voor het bodemleven. De manier van bewerking heeft invloed op de afbraaksnelheid van koolstof in de bodem. Intensief ploegen kan soms de afbraaksnelheid verhogen doordat er zuurstof in de grond wordt gebracht. Door te kiezen voor mestsoorten met een hoog gehalte aan effectieve organische stof zoals dierlijke (vaste) mest en compost kunt u de aanvoer van koolstof vergroten. Via groenbedekkers en gewassen met veel wortels zoals granen of door het achterlaten van oogstresten zoals stro kan ook extra koolstof aangevoerd worden.

Problemen met bodemverdichting: Verdichte lagen zorgen voor een slechte doorwortelbaarheid van gewassen en remmen transport van voedingsstoffen, water en zuurstof. Daardoor worden gewassen gevoeliger voor droogte, ziekten en plagen. Bodemverdichting heeft twee belangrijke oorzaken. Ten eerste is er de mechanische verdichting door het berijden van het land onder natte omstandigheden en/of met te hoge bandenspanning. Een tweede oorzaak is interne verslemping, een fysisch-chemisch proces waarbij een te laag organisch stofgehalte leidt tot het verkitten van kleideeltjes waardoor bodems “hard als beton” kunnen worden.

Bodemverdichting is goed te vermijden, maar veel moeilijker op te heffen. Door niet te intensief te ploegen, gebruik van brede banden met een lage spanning en zoveel mogelijk land te bewerken en berijden onder droge omstandigheden kan mechanische bodemverdichting worden vermeden. Interne verslemping wordt vaak veroorzaakt door een laag koolstofgehalte. Aanvoer van extra organische stof is dus ook goed tegen interne verslemping. Opheffen van zowel mechanische

verdichting als interne verslemping vereist een actief bodemleven dat harde lagen kan doorbreken en bodemdeeltjes kan mengen. Sommige regenwormen zoals diepgravers graven verticale gangen en kunnen daardoor verdichte lagen doorbreken. Ploegen heeft een negatieve invloed op regenwormen. Om het bodemleven te stimuleren moet het gevoed worden door organische mest zoals dierlijke mest en compost. Om mechanische bodemverdichting op te heffen is het ook raadzaam om rooivruchten af te wisselen met diepe en intensief wortelende gewassen zoals granen en groenbedekkers. Kiest u voor niet-kerende grondbewerking, zaai dan een diep wortelend gewas in na het lostrekken van de verdichte laag zodat de losgetrokken bodem direct doorworteld wordt. Die doorworteling voorkomt het terugvallen van de bodem en bovendien volgt het bodemleven de beworteling. De activiteit van het bodemleven kan zo ook in diepere lagen bijdragen aan het opheffen van bodemverdichting.

Waarnemen en meten: Het meten van de bodemkwaliteit is nog steeds onderwerp van discussie en wetenschappelijk onderzoek. In dit verslag worden een aantal indicatoren voor biologische bodemkwaliteit besproken. Voor u als agrariër loont het echter om zo nu en dan eens een kuil te graven en te zien hoe de structuur van uw grond is en hoe de wortels van uw gewassen groeien in de verschillende lagen van de grond.

Rol van het bodemleven: Aantallen en diversiteit aan soorten bodemorganismen zijn enorm. In een theelepel grond bevinden zich miljoenen bacteriën en schimmels. Om de rol van het bodemleven voor bodemkwaliteit te bespreken wordt vaak verwezen naar het begrip functionele agro-biodiversiteit. Functionele agro-biodiversiteit is de groep van organismen die een nuttige bijdrage kunnen leveren aan een duurzaam gebruik van de bodem door de mens. Van een zestal groepen bodemorganismen wordt hieronder de belangrijkste rol in de bodem (ook wel ecosysteemdiensten) genoemd.

Bacteriën: Verschillende soorten bacteriën breken organisch materiaal af, leggen nutriënten vast, binden atmosferische stikstof, zetten ammonium om in nitraatstikstof, vormen stabiele aggregaten, beschermen tegen erosie, verhogen de ziekteverendheid en vormen (anaerobe) afbraakproducten die pathogene organismen kunnen verzwakken of doden.

Schimmels: Schimmels zorgen voor afbraak van soms complexe organische verbindingen in de bodem, vormen stabiele aggregaten, scheiden organische zuren uit waardoor sommige nutriënten beter beschikbaar worden voor de plant, verhogen de opname van fosfor en water door associatie van planten met mycorrhiza, verhogen de ziekteverendheid door concurrentie of predatie en beschermen tegen pathogene schimmels door associaties met mycorrhiza.

Protozoën: Protozoën maken nutriënten beschikbaar voor de plant door het 'grazen' op andere micro-organismen.

Nematoden: De belangrijkste functie van nematoden (ook wel aaltjes genoemd) is het begrazen van schimmels en bacteriën waarbij stikstof en fosfor vrijkomt. Schimmeletende nematoden spelen een belangrijke rol in de ziekteverendheid van een bodem.

Potwormen: Potwormen spelen een sleutelrol in de primaire en secundaire afbraak van organisch materiaal en zijn sterk regulerend in de processen van C- en N-mineralisatie. Daarnaast spelen potwormen een belangrijke rol in de bodemstructuurvorming door het vergroten van de continuïteit van het poriënstelsel en door de vorming van stabiele aggregaten.

Regenwormen: De belangrijkste functie van regenwormen is het bevorderen van bodemstructuur, beluchting en vochtregulerend vermogen door het graven van gangen. Door afbraak van organisch materiaal en het eten van grond waardoor stabiele humus ontstaat, bevorderen regenwormen de bodemvruchtbaarheid.

Samenvatting

Deze literatuurstudie is het resultaat van de eerste fase van het project “Functionele agrobiodiversiteit in de bodem” in het kader van Bodembreed. In deze studie wordt een overzicht gegeven van wat we verstaan onder bodemkwaliteit en de rol van bodemleven daarin. Aan de hand van bedreigingen voor bodemkwaliteit wordt gekeken naar de rol die de landbouwpraktijk speelt in het tegengaan van deze bedreigingen en wederom de rol van bodemleven daarin. In de tweede fase wordt een bodembiologische indicatorset geselecteerd om bodemkwaliteit en bodemfuncties te beoordelen. In de derde fase wordt deze indicatorset in het veld getest aan de hand van de landbouwkundige maatregel “niet-kerende grondbewerking” op leemgronden.

In Europa is zo'n 16% van de bodems onderhevig aan een of meer vormen van degradatie. De belangrijkste twee bodembedreigingen binnen de regio van het Interreg Bodembreed project zijn afname van het bodem organisch stofgehalte en bodemverdichting. Vanuit de praktijk is aangegeven dat een aantal bodemgerelateerde problemen dienen te worden aangepakt: i) water- en modderoverlast, ii) uitspoeling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater, iii) suboptimale benutting van meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen en iv) effect van klimaatverandering op ecosystemen en biodiversiteit. Binnen het project Bodembreed is in deze literatuurstudie gekeken naar de rol van het bodemleven voor bodemkwaliteit in de landbouw. De focus is daarbij komen te liggen op functionele agro-biodiversiteit, oftewel de verscheidenheid van organismen die een nuttige bijdrage leveren aan een duurzame exploitatie van de bodem door de mens.

De bodem is een zeer belangrijke natuurlijke hulpbron en onvoorzichtig omgaan met de bodem bedreigt het benutten ervan door toekomstige generaties. Vanuit de praktijk wordt aangegeven dat een goede bodemkwaliteit vooral wordt bepaald door het organisch stofgehalte en de kwaliteit ervan. Het bodem organisch stofgehalte bepaalt voor een belangrijk deel het watervasthoudend vermogen en de draagkracht van de bodem. Daarnaast is bodem organische stof voedsel voor het bodemleven. Het is vooral aan de activiteit van het bodemleven te danken dat bodems nutriënten leveren en ziekteverend zijn. Daarnaast is het bodemleven voor een belangrijke mate verantwoordelijk voor de poriënstructuur van de bodem waardoor planten gemakkelijker kunnen wortelen en water, voedingsstoffen, zuurstof en afvalstoffen getransporteerd kunnen worden in en uit de bodem. Alle organismen in de grond zijn via het zogenaamde bodemvoedselweb aan elkaar gerelateerd.

Een teruggang van het bodem organisch stofgehalte remt de activiteit van het bodemleven en beïnvloedt dus de bodemkwaliteit. Een gebrek aan bodemleven en activiteit van bodemleven kan er aan bijdragen dat bodems gevoeliger zijn voor verdichting of dat verdichting niet of nauwelijks op te heffen is. Verdichting kan veroorzaakt worden door het berijden van land met te hoge bandenspanning of onder te natte omstandigheden, maar ook door de achteruitgang van het organisch stofgehalte in leemhoudende gronden (interne verslemping).

Via bodembewerking, bemesting en gewaskeuze heeft een boer instrumenten in handen om tegen beide bedreigingen iets te doen. Niet-kerende grondbewerking kan bijdragen aan een stabielere

opbouw van het organische stofgehalte en spaart bodemleven. Bij bemesting moet vooral gedacht worden aan organische mest (dierlijke mest, compost) waarmee zo veel mogelijk organische stof aangevoerd wordt, wat het bodemleven voedt en bijdraagt aan de opbouw van het bodem organische stof. Het belangrijkste aspect in de gewaskeuze is een ruime afwisseling van rooi- en diepwortelende maaigewassen. De oogst van aardappelen en bieten is vaak risicovol gezien het vaak natte weer in het najaar in combinatie met zware machines resulterend in een verstoring van de bouwvoor. De teelt van diep en intensief wortelende maaigewassen zoals granen zorgen voor een soort "rustfase" voor de bodem.

Bodemleven kan op verschillende manieren gemeten worden. Voor microflora en -fauna is de hot-water extractable carbon een relatief eenvoudige methode om het labiele deel van de totale organische stof te bepalen. Daarnaast zijn de potentiële C en N mineralisatie methoden om de microbiële activiteit te bepalen. Voor het analyseren van nematoden wordt vaak de Oostenbrink methode toegepast. Springstaarten en mijten worden vaak in een Tullgrenapparaat geëxtraheerd, in alcohol opgevangen en overgebracht op objectglazen in 10% melkzuur alvorens determinatie plaatsvindt. Potwormen worden volgens een gemodificeerde natte extractie methode geëxtraheerd uit een grondmonster en vervolgens gedetermineerd onder een microscoop. Regenwormen worden uit een hoeveelheid grond van 20 x 20 x 20 cm geteld en gedetermineerd. Een bodemprofielbeoordeling kan meer inzicht geven in de algehele conditie van de bodem. Deze kan het beste gedaan worden als het gewas volledig ontwikkeld is. Bij een profielkuilbeoordeling worden structurelementen, beworteling en poriën gescoord. Nadeel van deze methode is dat er nogal wat ervaring nodig is om tot een goede beoordeling te komen.

Tenslotte worden een zestal belangrijke groepen bodemorganismen (bacteriën, schimmels, protozoën, nematoden, potwormen en regenwormen) beschreven. Nadruk in de beschrijving ligt op hun specifieke rol in het bodemvoedselweb.

Summary

This literature overview is the result of the first phase of the project “functional agrobiodiversity in the soil” within the “Bodembreed” (*soil-wide*) framework. In this study an overview is presented of our understanding of soil quality and the role of soil biota. Using the threats to soil quality, the role of the soil users and the soil biota in combating these threats is being explored. In the second phase a set of soil biological indicators will be selected to assess soil quality and soil features. In the third phase the set of indicators will be tested in the field on loamy soils using the agricultural measure of “minimum tillage”.

In Europe some 16% of soils are subject to one or more forms of degradation. The two most important soil threats within the region of the Interreg project are decrease of soil organic matter content and soil compaction. From practice a number of soil related problems were indicated that need to be addressed: i) water and mud flooding, ii) leaching of nutrients to ground and surface water, iii) suboptimal use of nutrients and pesticides, and iv) effect of climate change on ecosystems and biodiversity. Within the project Bodembreed, this literature study evaluated the role of soil biota for soil quality in agriculture. The focus of this study was functional agrobiodiversity, or the diversity of organisms with a useful contribution to a more sustainable exploitation of the soil by humans. The soil is a very important natural resource and careless soil management threatens the use by future generations. Practitioners have indicated that good soil quality is predominantly determined by the soil organic matter content. Soil organic matter content determines to a large extent water holding capacity and carrying capacity of the soil. Next, soil organic matter is the nourishment for the soil biota. The soil owes its nutrient supplying capacity and disease suppressiveness mostly to the activity of the soil biota. Besides soil biota are also to a large extent responsible for the pore structure in the soil by which plants can root more easily and water, nutrients, oxygen and waste can be transported in and out of the soil. All organisms in the soil are interrelated with one another through the soil food web.

A decline in the soil organic matter content reduces the activity of the soil biota and thus affects soil quality. A lack of soil biota and activity of the soil biota can contribute to susceptibility of soils to compaction or to inability to overcome soil compaction. Compaction can be caused by riding on the land with too high tire pressure or under too wet circumstances, but also due to decline of the soil organic matter content in loamy soils (internal slacking).

By type of soil cultivation, fertiliser management and crop choice, a farmer has instruments to combat both threats. Minimum soil tillage can contribute to a more stable increase of the soil organic matter content and saves soil biota. Fertiliser management may involve use of organic amendments (manure, compost) involving more organic matter, which feeds the soil biota and contributes to an increase in the soil organic matter content. With regards to crop type, the most important is to alternate a crop that is dug up with a crop that roots deeply and is mowed. The harvest of potatoes and beets is often risky because often wet weather prevails in the autumn and in combination with

heavy machinery results in disturbance of the tillage depth. Cultivation of deep and intensively rooting 'mow crops' such as cereals provide a kind of "rest phase" for the soil.

Soil biota can be determined in different ways. For micro-flora and micro-fauna the hot-water extractable carbon is a relatively easy method to determine the labile part of the total organic matter. Beside the potential C and N mineralisation are methods to determine microbial activity. To analyse nematodes, the Oostenbrink method is often used. Springtails and mites are often extracted in a Tullgren device, collected in alcohol and transported on slides in 10% lactic acid before being determined. Enchytraeidae are being extracted according to a wet extraction method from a soil sample and consequently determined under a microscope. Earthworms are being counted and determined from a 20 x 20 x 20 cm soil volume. A soil profile assessment can provide more insight into the overall soil condition. It is best done when the crop has developed completely. In a soil profile assessment, structural elements, rooting and porosity are to be determined. Disadvantage of this method is the required experience to come to a meaningful assessment.

Finally six important groups of soil biota (bacteria, fungi, protozoa, nematodes, enchytraeidae, and earthworms) are described. Emphasis in the description is put on their specific role in the soil food web.

DEEL 1

*DUURZAAM BODEMBEHEER &
FUNCTIONELE AGROBIODIVERSITEIT
IN DE BODEM*

1 Inleiding

Aan het Louis Bolk instituut is gevraagd een overzichtelijke beschrijving te maken van relevante kennis over bodemleven dat een functionele rol kan spelen bij een meer duurzaam beheer van de bodem. Binnen de Interreg regio zijn een aantal bodemgerelateerde problemen waarvoor een oplossing wordt gezocht via duurzamer bodembeheer. Deze problemen zijn:

- water- en modderoverlast
- uitspoeling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater
- suboptimale benutting meststoffen en gewasbeschermingsmiddelen
- effect van klimaatverandering op ecosystemen en biodiversiteit

De focus van deze literatuurstudie ligt bij de zogenaamde functionele agro-biodiversiteit. Functionele agro-biodiversiteit is de groep van organismen die een nuttige bijdrage kunnen leveren aan de duurzame exploitatie van de bodem door de mens. Welke bodembeheersmaatregelen hebben invloed op de functionele agro-biodiversiteit in de bodem? Welke maatregelen kan de landbouwer nemen om de biodiversiteit van zijn percelen uit te bouwen of te versterken.

Het doel van deze literatuurstudie is een overzicht te geven van de organismen die belangrijke diensten leveren aan het duurzame productiepotentiëel van de bodem, gestructureerd in functionele groepen, als ook een overzicht van de omstandigheden waarin deze organismen het best gedijen. Getracht is om het overzicht praktisch, toegankelijk en inspirerend tot handelen te laten zijn.

1.1 Duurzaam bodembeheer

Beleidskader De bodem heeft een belangrijke invloed op de gezondheid van de mens via voedselproductie, voedselveiligheid en –gezondheid, het effect op water- en luchtkwaliteit, klimaatverandering en biodiversiteit. Omgekeerd beïnvloeden wij de bodem door de manier van beheer via landgebruik, bodembewerking, bemesting, inzet van gewasbeschermingsmiddelen, etc. Volgens de Europese Commissie is 16% van de bodems in Europa onderhevig aan één of andere vorm van degradatie (EU, 2006). Er worden zes belangrijke bedreigingen genoemd: (i) bodemerosie, (ii) afname van het bodem organisch stofgehalte, (iii) bodemverdichting, (iv) verzilting, (v) grondverschuivingen en (vi) verzuring. Bodemdegradatie vormt daarmee een van de meest prangende milieuproblemen van dit moment, samen met klimaatverandering, aantasting van de ozonlaag en de afname van biodiversiteit. Hoewel de bodem in theorie hernieuwbaar is, verlopen processen die met bodemvorming te maken hebben erg langzaam en gedegradeerde bodems hebben vaak lange tijd nodig om te herstellen. Onvoorzichtig omgaan met de bodem bedreigt het benutten ervan door toekomstige generaties. Het behouden, herstellen en verbeteren van de bodemkwaliteit is dus van zeer groot belang voor de duurzaamheid van ecosystemen in het algemeen en van agro-ecosystemen in het bijzonder (EC, 2002).

Praktijkkader Duurzaam bodembeheer wordt door agrarische ondernemers gedefinieerd als “de bodem zo gebruiken en beheren dat die ook op lange termijn van goede kwaliteit blijft voor de teelt”.

Praktijkervaring leert dat een goede bodemkwaliteit vooral wordt bepaald door het bodem organisch stofgehalte en de kwaliteit van die organische stof die beide effect hebben op de levering van nutriënten, bodemstructuur, ontwatering, vochtleverend vermogen, draagkracht en aanwezigheid van bodemleven. Een goed beheer is erop gericht dat deze zaken in orde zijn. Bouwplan, bewerking en bemesting zijn de drie belangrijkste sturingsinstrumenten om duurzaam bodembeheer vorm te geven (Tabel 1). Binnen het bouwplan kan gestuurd worden door de vruchtopvolging waaronder het afwisselen van rooi- en maaivruchten en de teelt van groenbedekkers. Bij bodembewerking gaat het om keuzes op het gebied van mechanisatie, ploegdiepte, bandenspanning en timing. En bij bemesting gaat het om keuzes op het gebied van type meststof, moment en methode van toediening en over de inzet van compost.

Tabel 1: Sturingsinstrument voor duurzaam bodembeheer

Duurzaam bodembeheer		
Bouwplan	Bewerking	Bemesting
Rooi- /maaivruchten	Mechanisatie	Type meststof
Vruchtopvolging	Ploegdiepte	Hoeveelheid
Groenbedekkers	Bandenspanning	Mesttoediening
	Timing	Compost

1.2 Bodemkwaliteit

Bodemkwaliteit (*soil quality*) staat voor de capaciteit van een bodem om plantaardige en dierlijke productie, water- en luchtkwaliteit, alsmede volksgezondheid en -welzijn te waarborgen. Bodemkwaliteit is het resultaat van de integratie van chemische, fysische en biologische eigenschappen (Karlen et al., 2001). In de literatuur zijn veel definities voor bodemkwaliteit te vinden, maar kort gezegd betekent bodemkwaliteit “hoe goed een bodem datgene doet wat wij willen dat hij doet” (Janvier et al., 2007). Anders dan bij lucht- en waterkwaliteit is bodemkwaliteit niet absoluut te definiëren, omdat de gewenste kwaliteit afhankelijk is van het type landgebruik en de functies die daaraan verbonden zijn (Doran et al., 1996). Afhankelijk van de functies kunnen de belangrijkste criteria om bodemkwaliteit te beoordelen nogal verschillen, variërend van draagkracht tot waterbergend vermogen, CO₂ vastlegging of nutriëntenleverend vermogen, maar ook wering van ziekten en plagen. Bij het optimaal functioneren speelt het bodemleven een belangrijke rol.

1.3 Bodembiodiversiteit

Een algemeen aanvaarde definitie van biodiversiteit wordt gebruikt sinds de eerste VN Biodiversiteitsconventie (Rio De Janeiro, 1992): “*Biologische diversiteit (kort: biodiversiteit) is het begrip dat gegeven wordt aan de diversiteit van leven op aarde en de natuurlijke patronen die het vormt. (...) Biodiversiteit omvat ook genetische verschillen tussen elke soort. (...) En nog een ander aspect van biodiversiteit is de diversiteit van ecosystemen*” (CBD, 1992). Aldus wordt er een

continuïteit aanvaard in de biologische diversiteit van gen via soort tot ecosysteem. Politiek en maatschappelijk krijgt de soortendiversiteit de grootste aandacht.

Bodembiodiversiteit kan worden gedefinieerd als “*de variatie aan alle levende organismen in de bodem*”. Vanuit een menselijk standpunt is vooral de vraag interessant welke rol biodiversiteit speelt bij de verschillende functies die de bodem aan de maatschappij levert. Functionele agrobodembiodiversiteit (kortweg: FAB) van de bodem wordt dan ook omschreven als ‘die componenten van biodiversiteit die ecologische diensten verschaffen (productieondersteunende organismen en processen), ofwel die groep van organismen die een nuttige bijdrage kunnen leveren aan de duurzame exploitatie van de bodem door de mens’.

1.4 Wat leeft er in de bodem

Het bodemecosysteem is een zeer dynamisch, heterogeen en complex geheel. Bodemchemische, fysische en biologische aspecten kunnen daarbij niet los van elkaar worden gezien wat tot dusver vaak wel gebeurt. Daarnaast spelen ontstaansgeschiedenis en externe invloeden zoals bodemgebruik en beheer een belangrijke rol bij de samenstelling van het bodemleven. Iedere bodem is wat dat betreft uniek. Tabel 2 geeft een idee van de aantallen en groepen bodemleven, verdeeld op basis van grootte, die men kan aantreffen onder 1 voetstap op een gezonde landbouwgrond. De meeste van deze bodemorganismen leven in de micro- en macroporiën van de bodem. Het volume van minerale bodems kan voor wel 50% uit poriën bestaan in kleigrond en neemt af met een toenemende hoeveelheid silt en zand.

Tabel 2: Het bodemleven onder één voetstap op een gezonde landbouwgrond.

Groep	Aantal	Biomassa (gram per vierkante meter)
Microfauna/flora		
Bacteriën	10 – 1000 biljoen	100 - 700
Schimmels	10 miljard – 10 biljoen	100 - 500
Protozoën	100 miljoen – 10 miljard	6 - 30
Nematoden	100 duizend – 10 miljoen	5 - 50
Mesofauna		
Mijten	2.100 – 41.000	0.2 – 4
Springstaartjes	2.100 - 41.000	0.2 - 4
Macrofauna		
Insectenlarven	Tot 50	< 4.5
Regenwormen	Tot 50	30 - 200

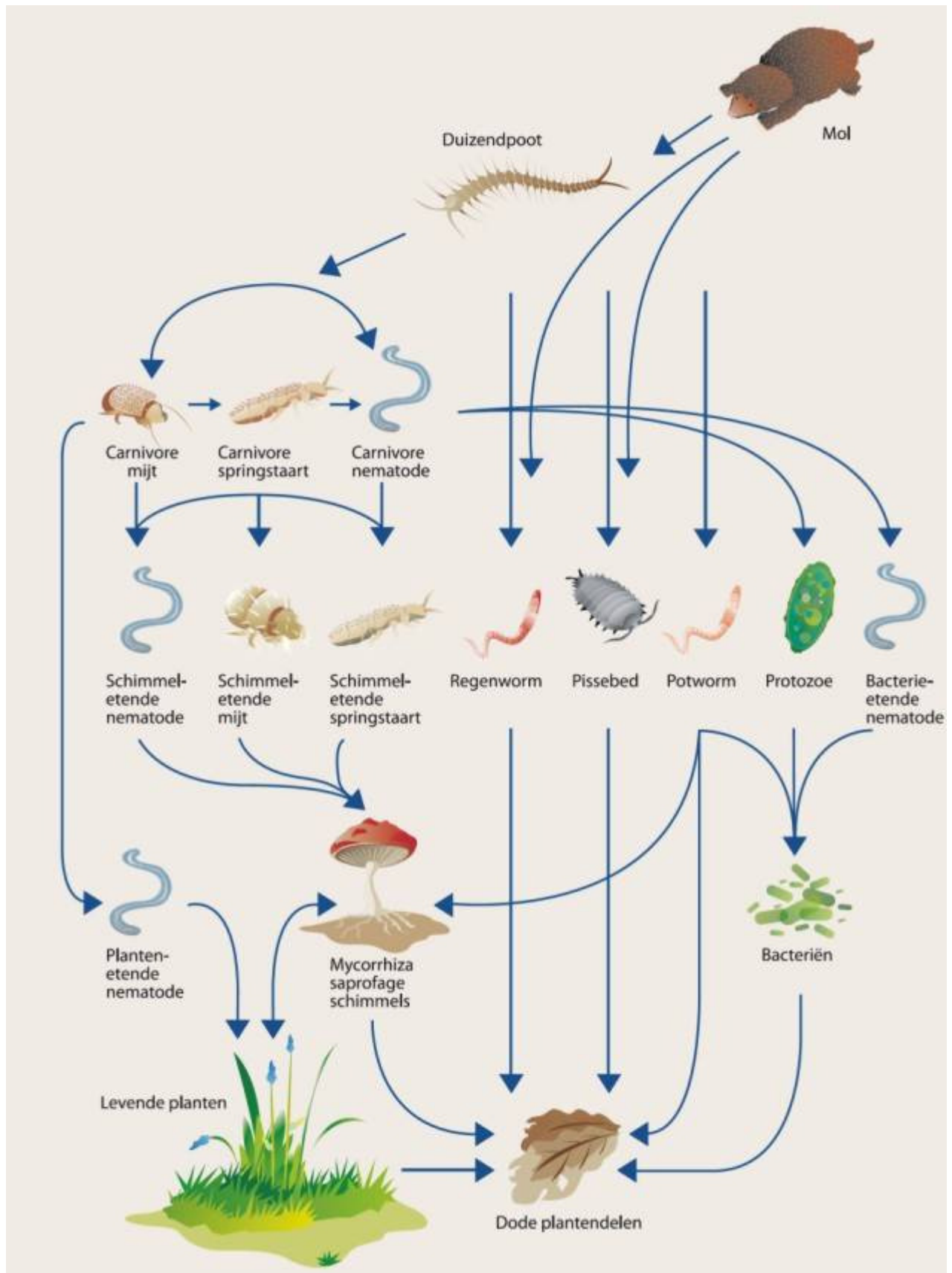
2 Bodemleven: wat doet het en hoe wordt het beïnvloed?

2.1 De bodem als habitat voor bodemleven

Voor het overleven van de meeste organismen in de bodem zijn ruimte, voedsel, water en zuurstof van cruciaal belang. Sommige organismen zoals regenwormen creëren hun eigen gangen. Andere organismen zoals nematoden zijn afhankelijk van al aanwezige poriën om in te leven. Het bodemleven is niet regelmatig verdeeld over de bodem maar concentreert zich vooral rond wortels (de rhizosfeer), in microporiën in aggregaten, in gangen van regenwormen en rondom dood organisch materiaal. Wat voedsel betreft zijn energie en eiwit essentieel om te overleven. Energie is vooral aanwezig in koolstofrijke (C) verbindingen en eiwitten zijn vooral aanwezig in stikstofrijke (N) verbindingen. Verschillende organismen hebben verschillende behoefte aan C en N. Bacteriën worden gestimuleerd door stikstofrijk materiaal terwijl schimmels juist goed gedijen bij veel koolstofrijk materiaal. Naast voedsel zijn water en zuurstof voor de meeste organismen onmisbaar. Water heeft grote invloed op de activiteit van veel organismen. Bij droogte trekken regenwormen zich bijvoorbeeld terug en gaan in een ruststadium. Ook protozoën reageren sterk op het vochtgehalte in de bodem. Onder zuurstofloze (anaerobe) condities loopt de activiteit van het bodemleven en daarmee een aantal belangrijke bodemprocessen sterk terug met alle gevolgen voor de gewasgroei van dien.

2.2 Het bodemvoedselweb

Alle organismen in de bodem zijn op verschillende manieren aan elkaar gerelateerd. Die onderlinge samenhang heet een voedselweb. Net als boven de grond is het onder de grond een kwestie van eten en gegeten worden. Grofweg heeft het bodemvoedselweb een tragsgewijze opbouw (Figuur 1). Bacteriën en schimmels vormen vaak een eerste stap bij de afbraak van organisch materiaal. Protozoën, schimmel- en bacterie-etende nematoden, potwormen en schimmeletende mijten en springstaarten zetten de volgende stap. Vervolgens worden deze organismen gegeten door carnivore nematoden, mijten en springstaarten. Duizendpoten, mollen en muizen zijn de laatste ondergrondse trap. Regenwormen, pissebedden, potwormen en plantenetende nematoden eten (ook) rechtstreeks organisch materiaal. Een goed functionerend bodemvoedselweb vervult verschillende functies.



Figuur 1: Vereenvoudigde weergave van het voedselweb in de bodem. Bron: R. de Goede (2005).

2.3 *Functies van het bodemleven*

Het complexe en dynamische voedselweb van leven in de bodem levert voor de landbouw, en daarmee voor de samenleving, “ecosysteemdiensten” (Costanza et al., 1997). Een aantal voor de landbouw belangrijke ecosysteemdiensten worden hieronder kort beschreven.

2.3.1 *Nutriëntenretentie en -levering (mineralenkringloop)*

Alle nutriëntenkringlopen lopen voor tenminste een deel via de bodem, waar bodemleven de processen van retentie en levering faciliteert (Gardi en Jeffery, 2009). De mate waarin bodems nutriënten leveren en vasthouden bepaalt de bodemvruchtbaarheid en staat in direct verband met het functioneren van het bodemleven. Bodemleven is cruciaal voor zowel de opbouw van organisch materiaal als de afbraak daarvan. Bacteriën zijn verantwoordelijk voor processen als stikstoffixatie en mineralisatie, terwijl het hele bodemvoedselweb meewerkt aan de afbraak van organische materialen via processen van fragmentatie en biochemische afbraak waarbij de mineralen weer beschikbaar komen voor het gewas (Neher 2001; Ernst en Emmerling 2009; Van Eekeren et al., 2009).

Het effect van kerende grondbewerkingen, zoals ploegen en spitten van de bouwvoor, wordt als belangrijke negatieve factor genoemd voor het meeste bodemleven (Altieri, 1999) en leidt tot versnelde afbraak van bodemorganische stof. Niet-kerende grondbewerking houdt de natuurlijke laagvorming van de bodem in stand en voert daardoor minder druk uit op het bodemleven, met name regenwormen (Ernst en Emmerling, 2009) die een sleutelrol spelen in de afbraak van plantenresten (figuur 2). Daarnaast wordt de natuurlijke mineralenkringloop in bodems negatief beïnvloed door het gebruik van kunstmeststoffen, wat volgens (Mäder et al., 2002) de belangrijkste reden is voor een sterke achteruitgang van gangbaar beheerde gronden ten opzichte van biologisch beheerde gronden. Kunstmest bestaat uit snelwerkende, minerale stoffen die direct beschikbaar zijn voor het gewas maar veel minder gunstig uitpakken voor het bodemleven. Door voornamelijk dierlijke en plantaardige meststoffen in te zetten wordt het bodemleven ingeschakeld en het bodem organisch stofgehalte opgebouwd.

Een belangrijk onderdeel van het bodemleven voor nutriëntenlevering vormen de in symbiose met plantenwortels levende mycorrhiza. Door de mycorrhiza's wordt het volume bodem waaruit de plant nutriënten kan opnemen vergroot en sommige mycorrhiza's zijn essentieel voor de opname van bepaalde nutriënten doordat ze enzymen uitscheiden die mineralen vrijmaken uit organische stof (Marshner en Dell, 1994).



Figuur 2: Nutriënten worden in bodems vastgehouden in de vorm van organische stof, zoals humuszuren, plantenresten en ander bodemleven. Al die organische stoffen worden verteerd door het bodemleven in het bodemvoedselweb, waarbij nutriënten vrijkomen voor gewassen. Zonder bodemleven komen nutriënten dus niet vrij uit dierlijke mest en compost.

2.3.2 Koolstofvastlegging

Vanwege de relatie met het klimaat heeft de koolstofkringloop de laatste jaren steeds meer aandacht gekregen. Bodems spelen een belangrijke uitwisselrol in de koolstofkringloop. Afhankelijk van beheer en bodemtype kan de bouwvoor van akkerbouwgronden 1-4 ton koolstof per hectare bevatten. Planten leggen koolstof vast door opname van CO₂ waarna het direct of indirect (bijvoorbeeld via herbivoren dieren) weer in de bodem terecht komt. Bij de vertering van organische materialen door bijvoorbeeld regenwormen, mijten en springstaarten blijven altijd producten over die niet op de korte termijn verteerbaar zijn. Deze stoffen vormen het bodem organisch stofgehalte wat voornamelijk bestaat uit humusverbindingen. Het complex van organische stof in bodems heeft een belangrijk stabiliserend effect op bodemstructuur, watervasthoudendheid, bodemleven en nutriëntenlevering. Bodem organische stof neemt sneller af als de bodem intensiever bewerkt wordt (Van Veen en Kuikman 1990, van Groeningen et al., 2010), of wanneer minder organisch bemest wordt en meer kunstmest gebruikt wordt (Mäder et al., 2002).

2.3.3 Bodemstructuur

2.3.3.1 Vermijden van erosie

Een voor de landbouw goede bodemstructuur is luchtig, vertoont geen verdichte lagen en erodeert niet, waardoor het een optimale basis vormt voor bodemleven en doorworteling. De bodemstructuur wordt zowel beïnvloed door horizontale en verticale beweging van grond door hoofdzakelijk regenwormen als door aggregaatvorming. Bodemaggregaten ontstaan door biologische activiteit en zijn met het blote oog te zien als de kruimelvormige structuur in kluiten. Schimmels vormen hyfen en bacteriën en regenwormen scheiden mucus uit die samen met bodem organische stof, plantenwortels en bodemdeeltjes aan elkaar “plakken” tot aggregaten (Six et al., 2004). Bodems waarin de aggregaatsdynamiek goed functioneert, zijn het minst gevoelig voor wind- en watererosie (Siegrist et al., 1998). Bovendien stabiliseren bodemaggregaten het bodem organisch stofgehalte doordat daarin de organische stof “beschermd” wordt tegen bodemleven (Van Veen en Kuikman 1990).

Een maat voor de luchtigheid van zand- en lössgronden is de dichtheid (gemeten als gram/cm³). Omdat organische stof een lagere dichtheid heeft dan minerale bodemdeeltjes, verlaagt het gehalte aan bodem organische stof de dichtheid (Van Eekeren en Bokhorst, 2009). Het aandeel kruimelvormige structurelementen in een kluit grond is eveneens een geschikte en snelle methode om de bodemstructuur te beoordelen. Bij kerende grondbewerking (ploegen, spitten) ontstaat op den duur een verharde laag net onder de bewerkingsdiepte (de “ploegzool”, Hamza en Anderson, 2005). Met een penetrometer of een dunne prikstok kan nagegaan worden of er sprake is van een verdichte ploegzool. Deze verdichte laag kan zeer hardnekkig zijn en tot plasvorming en verstoorde doorworteling van het gewas leiden. Regenwormen die diepe, verticale gangen graven kunnen een rol spelen in het doorbreken van verdichte lagen. In Noordwest-Europese landbouwgronden is de pendelaar (*Lumbricus terrestris*) de meest algemene diepgravende regenworm. Echter, kerende grondbewerking heeft een sterk negatief effect op regenwormen in het bijzonder de pendelaar. Niet-kerende grondbewerking echter, heeft een positief effect op regenwormen doordat een meer natuurlijke gelaagdheid van de bodem in stand wordt gehouden, vooral wat betreft de verticale verdeling van organische stof (Ernst en Emmerling, 2009). Internationaal zijn goede resultaten geboekt om met niet-kerende grondbewerking op de lange termijn een goede bodemstructuur te krijgen (Mäder et al., 2002 en figuur 3).



Figuur 3: Links: Sommige soorten regenwormen kunnen door verdichte lagen graven, waarna plantenwortels dieper kunnen wortelen. Rechts: Bodemleven volgt doorworteling. Afgestorven delen worden verteerd en vermengd met bodemdeeltjes. Daardoor ontstaat een luchtige, kruimelige structuur met veel poriën.

2.3.3.2 Watervasthoudendheid

Watervasthoudendheid van bodems is afhankelijk van bodemstructuur, wat weer het resultaat is van fysieke, chemische en biologische processen (zie boven). Watervasthoudendheid maakt bodems minder droogtegevoelig. Bodem organische stof bindt vocht, en draagt dus bij aan de watervasthoudendheid. Een goede luchtige bodemstructuur in bodemaggregaten en via macroporiën draagt bovendien bij aan een optimale waterdoorlaatbaarheid, waardoor water niet via de oppervlakte afspoelt. Op droogtegevoelige (zand)gronden vergroten mycorrhiza's het doorwortelbare bodemvolume waardoor meer bodemvocht bereikbaar is voor het gewas (Augé, 2001).

2.3.4 Weerstand en veerkracht

De mate waarin het functioneren van een ecosysteem beïnvloed wordt door verstoring is een maat voor *weerstand*. De snelheid waarmee een ecosysteem herstelt van een verstoring is een maat voor *veerkracht* (Gardi en Jeffery, 2009; figuur 4). Een verstoring kan zowel van natuurlijke (bijv. wind, regen) als kunstmatige (bijv. ploegen, pesticidengebruik) aard zijn. De mate waarin een bodem weerstand biedt tegen fysieke krachten (water, wind, zware machines) is meetbaar met methoden die bijvoorbeeld aggregaatstabiliteit meten (Siegrist et al., 1998) of permeabiliteit met een zogenaamde penetrometer (Ehlers et al., 1983). Voor veerkracht is er tot op heden geen objectieve, systematische methodiek (Seybold et al., 1999). Mogelijke indicatoren zijn bijvoorbeeld de hoeveelheid (micro)bodemaggregaten, bodembiodiversiteit en de activiteit van het bodemleven. Maatregelen die bijdragen aan weerstand en veerkracht zijn enerzijds gericht op het voorkomen van verstoring en anderzijds op het stimuleren van veel, divers en actief bodemleven. Maatregelen die verstoring minimaliseren zijn bijvoorbeeld niet-kerende grondbewerking, lagere bandenspanning, en het minimaliseren van snelwerkende agro-chemicaliën (pesticiden, kunstmest). Maatregelen die bodemleven stimuleren zijn bijvoorbeeld het gebruik van organische mest, inwerken van gewasresten en gebruik van groenbedekkers.



Figuur 4: Een late oogst van rooigewassen (aardappel, bieten) met zware machines onder natte omstandigheden betekent een zware klap voor akkergrond doordat de bouwvoor verstoord wordt. Een goed functionerend bodemvoedselweb kan de veerkracht vergroten om van dergelijke verstoringen te herstellen.

2.3.5 Ziektewerendheid

Ziektewerendheid van de grond is het verschijnsel dat een pathogeen of parasiet veel minder schade (aan de planten) aanricht dan op grond van de gemeten populatiedichtheid verwacht mag worden (Janvier et al., 2007). Door een samenspel van biotische en abiotische factoren blijft zelfs bij aanwezigheid van schadeverwekkers de opbrengstderving op ziektewerende bodems beperkt. 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.

We onderscheiden twee typen ziektewerendheid: algemene ziektewerendheid en specifieke ziektewerendheid. Algemene ziektewerendheid komt voort uit de diversiteit en activiteit van het bodemleven. 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. Voor algemene ziektewerendheid is geen specifiek organisme aan te wijzen dat ten grondslag ligt aan de verminderde schadegevoeligheid, maar spelen meerdere factoren een rol. Bij specifieke ziektewerendheid gaat het om een beperkt aantal antagonisten (tegenstrevers) die in staat zijn één (of een aantal) schadeverwekker(s) in een bepaald gewas in toom te houden bijvoorbeeld via predatie of door het uitscheiden van antibiotica. Deze specifieke ziektewerendheid is in principe zowel stuurbaar als overdraagbaar, mits we het mechanisme van dit beperkt aantal antagonisten in de complexe omgeving begrijpen (Weller, 2002).

De invloed van bodemleven op de algemene ziektewerendheid van landbouwgronden is het beste te meten met zogenaamde biotoetsen (figuur 5). In een biotoets wordt een gewas in potten of containers geteeld met daarin een landbouwgrond. De helft van de grond wordt geïnfecteerd met een bodemziekte, de andere helft niet (en vaak wordt ook weer de helft gesteriliseerd en de helft niet waardoor er 4 behandelingscombinaties zijn). Vervolgens wordt gekeken hoe snel en hoe ernstig de

planten ziek worden. In een biotoets met aardbeiplanten die geplant waren in grond welke besmet was met wortelkroonrot (Figuur 5) bleken 4 bodemparameters de ziekteverendheid te verhogen:

- bodem organisch koolstofgehalte (hoe hoger hoe beter)
- grondontsmetting: hoe langer geleden hoe beter
- structuur (beter meer weerbaar)
- nematoden taxa (hoe meer hoe beter)



*Figuur 5: Een biotoets met aardbeiplanten besmet met wortelkroonrot (*Phytophthora cactorum*). De grond links is gesteriliseerd, de grond rechts niet. De algemene ziekteverendheid is in de niet-gesteriliseerde grond het grootst. Factoren die de ziekteverendheid van de grond verhoogden waren het C gehalte van de grond*

3 Bodembedreigingen

3.1 Soorten bodembedreigingen

Verreweg de belangrijkste twee bedreigingen voor bodemkwaliteit in de gebieden van Bodembreed zijn i) een mogelijke afname van het bodem organisch stofgehalte en ii) bodemverdichting (zie overzicht 6, bedreigingen EU-breed in hfst 1.1).

Voor beide bedreigingen worden maatregelen aangereikt om de bodemkwaliteit te handhaven of te verbeteren.

3.2 Organische stof

Bodem organische stof – met gemiddeld koolstof (C) gehalte van 57% – bepaalt voor een belangrijk deel biologische, fysische, en chemische bodemeigenschappen. Organische stof is een bron van voedsel voor het bodemleven en via mineralisatie is het ook een bron van nutriënten voor gewassen. Door activiteit van het bodemleven ontstaan gangen en poriën waardoor water, nutriënten en zuurstof kan worden getransporteerd. Door restproducten van microbieel leven ontstaan stabiele bodemaggregaten die zorgen voor een stabiele en poreuze bodemstructuur. Organische stof heeft dus - vooral door toedoen van het bodemleven - grote invloed op de waterretentie en –infiltratie. Als primaire voedselbron voor het bodemleven is organische stof een sleutelfactor voor alle ecosysteemdiensten die de bodem levert (Faber et al., 2009). Rutgers et al. (2009) geven een overzicht van de gevolgen van een lager bodem organisch stofgehalte voor het bodemleven. Overigens zijn veldstudies met organische stofgradiënten schaars. Ook ontbreekt het aan voldoende kennis over de relaties tussen de verschillende organische stof fracties (stabiele t.o.v. labiele en verse organische stof) en de biodiversiteit in de bodem (Rutgers et al, 2009).

Maatregelen: Voor organische stof in de bodem zijn alleen globale streefwaarden afgeleid (Tabel 3) maar er zijn geen normen. Uit de praktijk is echter bekend dat sommige bodems met een laag organisch stofgehalte weinig risico lopen voor verdere daling, terwijl andere bodems met een gemiddeld gehalte juist een groot risico lopen. Wel is het aan te bevelen om het bodem organisch stofgehalte op perceelsniveau nauwlettend te volgen. Daarnaast geldt het opstellen van een organische stofbalans op perceelsniveau als een effectieve en relatief eenvoudige maatregel om inzicht te krijgen in de balans tussen aan- en afvoer van organische stof. Een rekenmodule als de koolstofsimulator kan hierbij behulpzaam zijn (LNE, 2010).

Tabel 3: Streefwaarden voor het bodem organisch stofgehalte (%) bij akkerbouw op verschillende grondsoorten

Grondsoort	Streefwaarde	Referentie
Algemeen	2,0 en 3,4	Loveland en Webb (2003); Römken en Oenema (2004)
zand	2,5 tot 3,5	Dienst Landbouwvoorlichting (DLV)
klei	2,0 tot 2,5	Dienst Landbouwvoorlichting (DLV)

De belangrijkste oorzaken voor een daling van het organische stofgehalte in de bodem zijn ongunstige gewasrotaties, te weinig aanvoer van organische bemesting of gewasresten en te intensieve grondbewerking.

In het algemeen geldt dat hoe intensiever de grond bewerkt wordt des te sneller de organische stof afbreekt. Niet-kerende grondbewerking zorgt voor een verhoogd organisch stofgehalte in de toplaag en een iets lager maar stabiel organisch stofgehalte onder de toplaag. Ondieper en minder ploegen leidt tot een lagere afbraaksnelheid van bodem organische stof.

Verschillende gewassen laten verschillende hoeveelheden organisch stof achter tijdens en na de teelt. Ook de diepte en intensiteit van de beworteling is vaak verschillend met granen die veel dieper en intensiever wortelen dan rooigewassen als aardappelen of bieten. Naast de hoofdgewassen kan door middel van groenbedekkers extra organische stof worden toegevoegd aan de grond. Bij groenbedekkers moet wel goed worden gekeken naar de aaltjeswerking die per gewas verschillend is.

Bij bemesting kan de teler kiezen voor meststoffen die meer of minder organische stof bevatten. Zo bevat compost per ton zo'n 150 kg organische stof die 1 jaar na toediening nog niet is verteerd, vaste rundermest zo'n 70 kg en varkensdrijfmest zo'n 30 kg. Kunstmest daarentegen bevat geen organische stof. Vooral N kunstmest stimuleert afbraak van recent toegevoegd organisch materiaal. Het effect van grondontsmetting op de bodem organische stofdynamiek op lange termijn is nog vrijwel onbekend. Op korte termijn zorgt grondontsmetting voor het stilleggen van het bodemleven waardoor er (zeer) tijdelijk geen afbraak van organische stof in de grond plaatsvindt. Ook het effect van gewasbeschermingsmiddelen op de organische stofdynamiek in de grond is nauwelijks bekend.

3.3 Bodemverdichting

Een tweede belangrijke bedreiging voor een goede bodem is bodemverdichting. Een goed poriëngehalte van een grond is belangrijk voor een goede bodemstructuur. Poriën kunnen gevuld zijn met lucht of water en zijn de aanvoerlijnen van water, zuurstof en nutriënten en de afvoerkanalen van CO₂ en andere afvalproducten van de bodem. Een goede structuur vormt een basis voor een goede gewasgroei.

Bodemverdichting kan net als bij als bij het tegengaan van organische stofdaling worden aangepakt via wijze van grondbewerking, gewaskeuze en manier van bemesting.

Bodemverdichting van landbouwgronden wordt veelal veroorzaakt door:

- Berijden van percelen onder te natte omstandigheden, vooral als zware landbouwvoertuigen worden ingezet bijv. bij het oogsten.
- Te hoge bandenspanning waardoor de druk op de bodem te hoog wordt.
- Intensief ploegen waardoor het bodemleven m.n. wormen gehinderd worden en waardoor minder nieuwe wormgangen worden gemaakt.

- Interne verslemping, vooral in leemhoudende bodems. Door een te laag organisch stofgehalte kitten kleideeltjes aan elkaar waardoor er een sterk verharde laag ontstaat.
- Te weinig intensief wortelende maaigewassen in de vruchtwisseling.

Bij gewaskeuze kan worden bekeken of er meer diepwortelende gewassen in het bouwplan kunnen worden opgenomen, vooral als er een verdichte laag is dicht bij het oppervlak die moet worden opgeheven. Bij bemesten kan door het voeden van het bodemleven een verbeterde structuur ontstaan. Voedsel voor bodemleven kan worden aangereikt via organische bemesting of achterlaten van stro- en gewasresten. Eigenlijk geldt voor alle maatregelen tegen organische stofdaling en bodemverdichting dat ze inwerken op zowel fysische, chemische als biologische bodemkwaliteit.

4 *Meten en beoordelen van biologische bodemkwaliteit*

Bodemkwaliteit (*soil quality*) wordt beschouwd als het geïntegreerde geheel van biologische, chemische en fysische eigenschappen en processen in een bodem (Reubens et al., 2010). Biologische bodemkwaliteit komt grotendeels neer op functionele agrobiodiversiteit. De gewone diversiteit van alle levende organismen in de bodem - te kwantificeren via de taxonomie - zou de waarde ervan sterk onderschatten. De algemeen geldende hypothese is dat een gezonde bodem een hoge functionele biodiversiteit heeft en dat het verlies van functionele bodembiodiversiteit een bedreiging vormt voor veel functies van de bodem waaronder de productiefunctie. Het meten van bodembiodiversiteit is dus belangrijk om uitspraken te kunnen doen over de gezondheidstoestand en kwaliteit van de bodem.

4.1 *Metten van bodemleven*

De diversiteit van bodemleven kan gemeten worden als soortenrijkdom (*species richness*), het totaal aantal soorten in een ecosysteem of monster en de verdeling van soorten binnen een gemeenschap (*species diversity*). *Diversity* wordt altijd uitgedrukt als een uit dichtheid en soortenrijkdom berekend getal (index). Voorbeelden daarvan zijn Shannon-Weaver's H, Simpson's D en Fischer's alpha. Voor functionele agrobiodiversiteit zijn functies belangrijker dan aantallen soorten en zijn andere meetmethoden van toepassing dan de hierboven genoemde methoden. Voor een aantal groepen moet wel eerst de soortsaamenstelling bepaald worden om de functies te bepalen (regenwormen, potwormen, nematoden), maar voor de grote groepen bacteriën en schimmels wordt gewerkt met hoeveelheid (biomassa) en activiteit. Hieronder volgt een overzicht.

4.2 *Microflora en -fauna*

4.2.1 *Microbiële biomassa*

Betekenis De microbiële biomassa heeft een korte omzettijd (0,2–6 jaar) en geeft een snelle indicatie van een toekomstige toe- of afname van het OS-gehalte en de beschikbare nutriënten. Een nadeel van deze parameter is dat hij sterk afhankelijk is van abiotische factoren zoals vocht, pH, temperatuur, toediening meststoffen.

Analyse en indicatie Met hot-water extractable carbon (HWC) is het labiele deel van de totale organische C waaronder microbieel C en gemakkelijk metaboliseerbare C en N bronnen te bepalen. Afname van HWC kan een vroege indicator zijn van afname van bodem organische stof. Een achteruitgang van HWC is een indicator voor de afname van organisch gebonden labiele nutriënten, microbiële biomassa en mogelijke verslechtering van bodemstructuur (Gaublomme et al. 2006; Ghani et al. 2003).

'Bacterial colony counting' (CFU). CFU tellingen geven informatie over het aantal cultiveerbare bacteriën in een bodemmonster. Hoewel slechts een klein deel van de totale populatie wordt geteld, is het een redelijke indicator voor bacteriedichtheid.

Bij de chloroform fumigatie incubatie (CFI) en chloroform fumigatie extractie (CFE) methoden worden de micro-organismen in de grond gedood. Na toevoeging van grond uit de oorspronkelijke bodem wordt de omvang van de gedode biomassa bepaald door meting van de CO₂ uitstoot over een bepaalde incubatie periode (CFI) of door extractie (CFE) van extraheerbaar koolstof afkomstig van de gedode biomassa. De CO₂ na fumigatie is afkomstig van kiemende sporen van microben die gebruikmaken van de koolstof afkomstig uit gedode biomassa.

Analyse van de fosfolipide vetzuren (phospholipid fatty acid, PLFA) geeft informatie over biomassa in de bodem, de schimmel-bacterie verhouding, biodiversiteit, maar ook het voorkomen van sleutelorganismen. Afzonderlijke PLFAs kunnen gerelateerd worden aan een microbiële gemeenschapsamenstelling. De methode geeft een moleculaire "vingerafdruk" van de relatieve PLFA samenstelling van de aanwezige microbiële gemeenschap (dus ook schimmels en protozoën). De methode is gevoelig, reproduceerbaar en geeft in-situ informatie, maar kost veel tijd. Volgens Pennanen (2001) is de methode gedetailleerder dan de veelgebruikte BIOLOGTM methode.

De substrate induced respiration (SIR) is een meting van de basale ademhaling en biomassa in de bodem. SIR meet de geïnduceerde verandering in bodemademhaling na toevoeging van een eenvoudig af te breken substraat (bv glucose). Door gebruik te maken van een conversiefactor is de microbiële biomassa te berekenen. Een hoge CO₂ productie en verandering in bodemademhaling wijst op een hoge microbiële biomassa en daarmee mogelijk een gezondere bodem met een hogere weerbaarheid.

4.2.2 Microbiële diversiteit en activiteit

Betekenis Microbiële activiteit is, zeker op landbouwgronden, vaak een betere (gevoeligere) indicator dan microbiële biomassa (Reubens et al., 2010). De mate van activiteit geeft een indicatie van de werkelijke opbouw/afbraak van OS en de beschikbaarheid van nutriënten. Het bepalen van de microbiële diversiteit geeft informatie over het functioneren van ecosysteemdiensten. Hoe groter de functionele diversiteit, hoe meer koolstofbronnen beschikbaar zijn en hoe stabiel het bodemecosysteem.

Analyse en indicatie Bij potentiële C-mineralisatie wordt het zuurstofverbruik (of CO₂-productie) gemeten als gevolg van biologische oxidatie van organische stof door aerobe micro-organismen. De bodemademhaling is positief gecorreleerd met het organische stofgehalte en vaak met de microbiële biomassa en microbiële activiteit. De methode vereist over het algemeen relatief lange incubaties, zeker in gronden waarin geen grote hoeveelheden gemakkelijk afbreekbare organische verbindingen zitten. Het meten van de CO₂ productie is relatief gevoelig, eenvoudig en goedkoop. De ademhaling hangt sterk af van temperatuur, vocht, nutriënten en bodemstructuur. Voorbereiden en standaardisatie van de monsters vóór het inzetten van de metingen is erg belangrijk.

'Metabolic quotient' (qCO_2). Het meten van de bodemademhaling alleen geeft vaak onvoldoende inzicht in het functioneren van bodemmicro-organismen. De specifieke ademhalingsnelheid (qCO_2) is de snelheid van microbiële ademhaling per eenheid microbiële biomassa en wordt uitgedrukt als de ratio tussen bodemrespiratie en microbiële koolstof. Omdat bodemrespiratie = CO_2 efflux = bodem CO_2 productie kan transport van CO_2 naar de atmosfeer bepaald worden via de soda lime methode (Gaublomme et al. 2006). Volgens Gaublomme et al. (2006) kan HWC worden ingezet als een 'proxy' voor microbiële koolstof. De ademhalingsnelheid neemt af in oudere gronden en wordt verhoogd wanneer het bodemecosysteem onder stress staat.

Bij potentiële N-mineralisatie wordt de hoeveelheid stikstof gemeten die vrijkomt door microbiële activiteit. Stikstof (N) is een belangrijk bestanddeel van alle vormen van leven en bij het verteren van organische stof komt veel N vrij.

De potentiële N-mineralisatie wordt bepaald door grond te incuberen onder aerobe of anaerobe omstandigheden. De toename in minerale N tussen twee tijdstippen wordt gebruikt om de stikstof mineralisatiesnelheden te berekenen. De aerobe potentiële stikstofmineralisatie benadert de veldsituatie het best, hoewel de structuur van de grond wel anders is dan in een veldsituatie. De anaerobe incubatie heeft als voordeel boven de aerobe dat er onder waterverzadigde omstandigheden weinig immobilisatie van stikstof optreedt en de stikstof als ammonium vrijkomt en gemakkelijk te meten is.

4.2.3 Nematoden

Betekenis Nematoden maken nutriënten beschikbaar, reguleren het aantal bacteriën en schimmels en spelen een rol bij ziektevering. Nematoden komen in alle bodems voor. Van de 1200 soorten die in Nederlandse bodems aanwezig zijn, is een relatief klein deel (ongeveer 50 soorten) potentieel schadelijk voor landbouwgewassen.

Analyse en indicatie Verdeling over trofische (functionele) groepen: Met de Oostenbrink-methode wordt een hoeveelheid grond in suspensie gebracht waardoor de nematoden van de gronddeeltjes worden losgespoeld. Vervolgens wordt de suspensie gezeefd om fijne lutum en organische deeltjes te verwijderen. Tot slot vindt scheiding van levende dieren en resterende gronddeeltjes plaats m.b.v. een wattenfilter. De nematoden kruipen hier actief doorheen en worden verzameld in een kleine hoeveelheid water. Het totale aantal nematoden in 100 g grond (abundantie) wordt geschat door 2 x 10% van de geëxtraheerde dieren te tellen. Vervolgens worden preparaten gemaakt om ca. 150 nematoden onder een lichtmicroscop te identificeren. Aan de hand van de voornaamste voedselbron worden functionele groepen onderscheiden: bacterie-etters, schimmeleters, algeneters, herbivoren, omnivoren en carnivoren.

Verdeling van K- en R-strategen: K-strategen zijn de langzame voortplanters, oftewel "persisters". Deze zijn vaak gevoeliger voor snelle veranderingen in de omgeving. R-strategen daarentegen zijn snelle voortplanters, ook wel "colonizers" genoemd. Op basis daarvan kunnen nematoden ingedeeld worden in zogenaamde "colonizer-persister" groepen van CP1 (de snelle voortplanters) tot en met

CP5 (de langzame voortplanters). Uit die samenstelling wordt de zogenaamde Maturity Index (MI) berekend, die een indicator is voor de mate van verstoring van het bodemvoedselweb (Bongers, 1990), zie ook hoofdstuk 2 over indicatoren FAB onder "kwantitatieve metingen in bodemlaboratoria".

4.3 Mesofauna

4.3.1 Springstaarten en mijten

Betekenis Mijten en springstaarten maken nutriënten beschikbaar, reguleren schimmel- en bacteriepopulaties en verbeteren de bodemstructuur door humus- en aggregaatforming. Mijten en springstaarten komen in vrijwel elke bodem voor. Aantallen variëren van 40-120 duizend individuen per vierkante meter (Rutgers et al., 2007). In Nederland komen minstens 600 soorten voor. Het Nederlandse Rijksinstituut voor Milieuhygiëne (RIVM) vond een trend in toename van aantal en soorten van biologische- naar intensieve bedrijven.

Analyse en indicatie Springstaarten en mijten worden in een Tullgrenapparaat uit ongestoorde steekmonsters geëxtraheerd door geleidelijke uitdroging van bovenaf. De aan de onderkant in alcohol opgevangen microarthropoden worden vervolgens overgebracht op objectglazen met 10% melkzuur en na opheldering tot op soortniveau gedetermineerd. Deze soorten zijn in te delen in groepen naar voedselgilde of naar overlevingsstrategie.

4.3.2 Potwormen

Betekenis Potwormen zorgen voor de afbraak van organisch materiaal en verbeteren de bodemstructuur door het graven van gangen en de vorming van bodemaggregaten. De meeste soorten potwormen bevinden zich vooral in de bovenste 15 cm van de bouwvoor. Potwormen komen in vrijwel elke bodem voor en hun dichtheid varieert van enkele honderden tot een paar miljoen per vierkante meter. In Nederland komen ruim 50 soorten voor. Potwormen nemen in aantal af als de grondbewerkingsintensiteit toeneemt.

Analyse en indicatie Potwormen worden volgens een gemodificeerde natte extractiemethode (Didden en Römbke, 2001) geëxtraheerd uit een grondmonster. De potwormen worden geteld, opgemeten en eventueel gedetermineerd m.b.v. een lichtmicroscop. Er kunnen twee functionele groepen worden onderscheiden: 1) soorten van het geslacht *Fridericia* (binding aan vers strooisel en hebben een R-strategie) en 2) overige soorten (binding aan ouder organisch materiaal en hebben een K-strategie).

4.4 Macrofauna

4.4.1 Regenwormen

Betekenis Regenwormen zorgen voor de afbraak van organisch materiaal en verbeteren de bodemstructuur door het graven van gangen en de vorming van bodemaggregaten. De meeste

soorten bevinden zich vooral in de bovenste 15 cm van de bouwvoor. Cijfers van regenwormenaantallen variëren van 0-1000 per vierkante meter. In Nederland zijn ongeveer 25 soorten bekend; slechts enkele zijn zeer algemeen.

Analyse en indicatie Regenwormen worden met de hand uit een hoeveelheid grond (20x20x20 cm) gezocht, geteld, gewogen en gedetermineerd. Volgens een veelgebruikte Franse indeling kunnen hier drie functionele groepen onderscheiden worden: Epigé's (epigeïsche soorten, voorkomend in strooisellaag, R-strategie), Endogé's (endogeïsche soorten, leven in de bodem, tussen R- en K-strategie) en Anéciques (anecische soorten, grote soorten, K-strategie).

4.5 Bodemprofiel beoordeling

Een effectieve manier om inzicht te krijgen in de algehele conditie van de bodem is het graven van een profielkuil en het beoordelen van kluiten uit een perceel (Koopmans et al., 2005). Via deze visuele beoordeling kunnen indicatoren zoals bodemstructuur, beworteling en activiteit van het bodemleven in samenhang worden beoordeeld. Het grote voordeel van een profielkuil is dat de waarnemingen snel en eenvoudig kunnen worden uitgevoerd en de resultaten meteen beschikbaar zijn. Nadeel van de methode is dat er nogal wat ervaring nodig is om tot een goede beoordeling te komen.

Het beoordelen van een bodemprofiel kan het hele jaar gedaan worden maar de beste tijd is als er een volledig ontwikkeld gewas te zien is bij een redelijke vochttoestand om zodoende de beworteling goed te kunnen beoordelen. Binnen een streek, bedrijf en perceel kunnen aanzienlijke verschillen optreden in grondsoorten en bodemprofielen. Het is daarom van belang om de locatie van de kuil zodanig te kiezen dat deze representatief is voor het perceel. In het algemeen is één kuil voldoende als deze goed wordt gekozen. Bij specifieke vragen of knelpunten geeft het beoordelen van twee kuilen meer inzicht in de verschillen (bijvoorbeeld één kuil op een perceel met een hakvrucht en één kuil op een perceel met een graan). Enkele andere tips bij het graven van een profielkuil zijn:

- kies een locatie die minimaal 10 m uit de akkerrand ligt
- vermijd niet-representatieve plekken en rijsporen
- let goed op de gewasgroei
- neem spade, meetlat en mesje mee

Een profielkuil kan het beste minimaal 40 cm diep worden gegraven en 50 bij 50 cm meten.

De bodemstructuur kan het best worden beoordeeld door vanuit de profielwand kluiten te steken. Leg deze kluiten ondersteund op de grond of bijv. een kratje. Bepaal daarna of er verschillende lagen te onderscheiden zijn en meet de dikte van deze lagen. Beoordeel in elke laag of er sprake is van ongestoorde wortelgroei en of deze wortelgroei gering, matig of intensief is. De kluiten dienen vervolgens beoordeeld te worden op kruimels, afgerondblokkige en scherpblokkige structurelementen en de activiteit van het bodemleven (zie tabel 4). Streefwaarden voor bouwland zijn voor de laag van 0-25 cm dat tenminste 25% van de grond uit kruimels dient te bestaan en er

geen scherpblokkige elementen aanwezig zijn. Voor 25-50 cm mag ten hoogste 75% bestaan uit scherpblokkige elementen.

Kruimels zijn tussen de 0,3 en 1,0 cm groot. Wortels kunnen gemakkelijk in en tussen kruimels doorgroeien. Afgeronde structuurelementen zijn blokjes grond van 1 tot 10 cm groot waarvan de hoeken rond zijn. Bij doorbreken heeft het breukvlak vaak een andere glans of kleur dan de buitenkant. Bij enige druk kunnen ze uiteenvallen in kruimels. Afgeronde structuurelementen hebben voldoende gangen en zijn altijd goed doorwortelbaar. Een uitzondering vormen organisch stofrijke gronden welke na bewerking voor de wortels ondoordringbare afgeronde structuurelementen bevatten.

Scherpblokkige structuurelementen zijn hoekig en compact en de wanden zijn glad. Scherpblokkige structuurelementen zijn in het algemeen niet doorwortelbaar. Zandgronden met een weinig stabiele structuur kunnen na bodembewerking echter goed doorwortelbaar zijn en tijdens het groeiseizoen verdichten tot Scherpblokkige elementen. Bij kleigronden zie je wortels vaak nog langs krimpscheuren de diepere lagen bereiken.

Tabel 4: Beoordelingsschema bij profielkuilbeoordeling voor beworteling, structuur, bodemlevenactiviteit en kleur- en gewasresten

Thema	Beoordeling
Beworteling	
Minimaal	Minimale beworteling kan op problemen duiden
Matig	Vorm, type en diepte kan een indicatie zijn voor problemen
Intensief	Intensieve doorworteling is meestal gunstig voor gewas en bodem
Structuur	
Kruimels	Gunstig
Afgerondblokkig	Gunstig
Scherpblokkig	Ongunstig, indien dit de wortelgroei, waterberging en vertering van mest belemmert
Bodemlevenactiviteit	
Poriën	Gunstig, duidt op activiteit van het bodemleven en voldoende zuurstof
Wormengangen	Gunstig, duidt op activiteit van wormen of goede doorworteling
Homogenisatie	Gunstig indien niet te sterk, duidt op goede activiteit
Wormen	Gunstig, vooral voor de afbraak van organische resten, structuur en toegankelijkheid van de bodem voor lucht en wortels
Kleur en gewasresten	
Blauw	Ongunstig, duidt op anaerobe (zuurstofloze) condities bij de vertering van organische mest of gewasresten, vertering stinkt
Bruin	Gunstig, duidt op organische stof gunstig voor de vertering van gewasresten
Rood, gelig, roest	Duidt op invloed van water, waterfluctuaties
Gewasresten	Veel (stro)resten duiden op een minder actief bodemleven (minder afbraak)

Naast zichtbaar bodemleven zoals regenwormen is het meeste bodemleven onzichtbaar met het blote oog. Veel bodemleven bevindt zich rond resten van organische bemesting en gewasresten. Is er geen aanwijzing op activiteit rondom deze resten dan duidt dit op ongunstige condities voor bodemleven en vrijmaken van voedingsstoffen uit deze resten. Over het algemeen heeft een goede bodem homogeen gekleurde lagen die vloeiend in elkaar overgaan. Een kleurspel van uitgesproken kleuren is een sterke aanwijzing dat er iets schort aan de waterhuishouding of structuur. Een blauwe kleur bijvoorbeeld wijst op zuurstofloze condities die wortelgroei belemmeren.



5 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies:

- Bodem organische stof stuurt voor een belangrijk deel de fysische, chemische en biologische bodemkwaliteit.
- Het bodemleven via allerlei interacties met organische stof en de bodemdeeltjes bepaalt voor een belangrijk deel de bodemkwaliteit.
- de drie belangrijkste sturingsinstrumenten voor duurzaam bodembeheer zijn bewerking, bemesting en gewaskeuze.
- er zijn een flink aantal meetmethoden om de activiteit van het bodemleven te meten om een idee te krijgen van de bodemkwaliteit.

Aanbevelingen:

- Maak een inventarisatie van de Vlaamse kennis en laboratoria op gebied van bodemanalyses en adviezen over een duurzamer bodemgebruik.
- Het Nederlandse kennisnetwerk rondom Bodembioologische indicatoren – de zgn. BoBi werkgroep - kan een voorbeeld zijn voor een kennisplatform rond bodembioologie.
- Bouw een kennisbasis op van referentiewaarden van belangrijke indicatoren voor een goede biologische bodemkwaliteit.

Do's en don'ts voor een duurzamer bodembeheer door de akkerbouwer:

Do's:

- profielkuilbeoordelingen (evt. met expert) voor worteling, bodemlevenactiviteit en structuur
- bereken de organische stofbalans op uw percelen en reken uit wat de aanvoer van organische stof dient te zijn om minimaal in balans te blijven.
- na een diepe grondbewerking een diep wortelend gewas inzaaien.
- afwisselen van diep, intensief wortelende gewassen en rooigewassen.
- toepassen groenbedekkers.
- beperken van kerende grondbewerking i.v.m. verstoren wormengangen, gebruik lage bandenspanning.
- zorg voor voldoende aanvoer van voedsel voor het bodemleven door organische bemesting te geven.

Don'ts:

- weinig/geen organische bemesting of groenbedekkers toepassen en/of gewasresten achterlaten.
- Land berijden met zware machines tijdens natte perioden.
- Land berijden met een te hoge bandenspanning.
- Geen acht slaan op duidelijke signalen als blauwverkleuring in de bodem, slechte worteling of gewasstand.

6 Literatuur

Altieri MA 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 19–31.

Augé RM 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11:3–42.

Bongers T 1990. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83: 14-19.

Convention of Biological Diversity (CBD), 1992. United Nations.

Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, van den Belt M 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature* 387: 253-260.

Didden W, Römbke J 2001. Enchytraeids as indicator organisms for chemical stress in terrestrial ecosystems. *Ecotox. Environ. Saf.* 50: 25-43.

Doran JW, Sarrantino M, Liebig MA 1996. Soil health and sustainability. In: Sparks DL (Ed) *Advances in Agronomy* 56. Academic Press San Diego CA pp 1-54

EC – Europese Commissie. 2002. Naar een thematische strategie inzake bodembescherming. Mededeling van de commissie aan de Raad, het Europese Parlement, het Economische en Sociaal Comité en het Comité van de Regio's. COM (2002) 179 definitief. 41p.

Eekeren N van, Bokhorst J 2009. Beoordeling bodemkwaliteit zandgrond - Een inventarisatie van bodemindicatoren voor de veehouderij. *Zorg voor Zand Rapport nr. 7*.

Eekeren N van, De Boer H, Bloem J, Schouten T, Rutgers M, De Goede R, Brussaard L 2009. Soil biological quality of grassland fertilized with adjusted cattle manure slurries in comparison with organic and inorganic fertilizers. *Biol. Fertil. Soils* 45:595-608

Ehlers W, Köpke U, Hesse F, Böhm W 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research* 3: 261-275.

Ernst G, Emmerling C 2009. Impact of five different tillage systems on soil organic carbon content and the density, biomass, and community composition of earthworms after a ten year period. *European Journal of Soil Biology* 45 (2009) 247–251.

ELO 2010. *Soil biodiversity and agriculture*. 56pp.

EU 2006. Proposal for a directive of the European parliament and of the council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC.COM(2006)232.

Faber JH, Jagers op Akkerhuis GAJM, Bloem J, Lahr J, Diemont WH, Braat LC 2009. Ecosysteemdiensten en transitie in bodemgebruik; Maatregelen ter verbetering van biologische bodemkwaliteit. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1813. 150 pg.

Gardi C, Jeffery S 2009. Soil Biodiversity. European Commission – Joint Research Centre. Italy.

Gaublomme E, De Vos B, Cools N 2006. An indicator for Microbial Biodiversity in Forest Soils. INBO. R.2006.40 Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Ghani A, Dexter M, Perrott KW 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impact of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 35: 1231-1243.

Groenigen KJ van, Bloem J, Bååth E, Boeckx P, Rousk J, Bode S, Forristal D, Jones MB 2010. Abundance, production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Soil Biology & Biochemistry* 42: 48–55.

Hamza MA, Anderson WK 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82: 121-145.

Janvier C, Villeneuve F, Alabouvette C, Edel-Hermann V, Mateille T, Steinberg C. 2007. Soil health through soil disease suppression: Which strategy from descriptors to indicators? *Soil Biology & Biochemistry* 39: 1-23.

Karlen DL, Andrews SS, Doran JW 2001. Soil Quality: current concepts and applications. *Advances of Agronomy*. 74:1-40.

Koopmans CJ, Zanen M, Ter Berg C 2008. De kuil: bodembeoordeling aan de hand van een kuil. Louis Bolk instituut. 16 pp

LNE 2010. Koolstofsimulator Adviesstelsel voor het koolstofbeheer in akkergronden; handleiding. Dep Leefmilieu, natuur en energie, Brussel. <http://www.lne.be/themas/bodem/organische-stof/gratis-exemplaar-koolstofsimulator>

Loveland P, Webb J 2003. Is there a critical level of organic matter in agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research* 70: 1-18.

Mäder P, Fliebbach A, Dubois D, Gunst L, Fried P, Niggli U 2002. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science* 296, 1694-1697.

Marschner H, Dell B 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil* 159: 89-102.

Neher DA 2001. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology* 33:161–168.

Pennanen T 2001. Microbial communities in boreal coniferous forest humus exposed to heavy metals and changes in soil pH – a summary of the use of phospholipids fatty acids, Biolog® and ³H-thymidine incorporation methods in field studies. *Geoderma* 100, issues 1-2: 91-126.

Reubens B, D'Haene K, D'Hose T, Ruyschaert G 2010. Bodemkwaliteit en landbouw: een literatuurstudie. Activiteit 1 van het Interregproject Bodembreed. Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek (ILVO), Merelbeke-Lemberge, België. 203 p.

Römken PFAM, Oenema O 2004. De Nederlandse bodem in beeld. *Bodem* 14(2): 53-55.

Rutgers M, Jagers op Akkerhuis GAJM, Bloem J, Schouten AJ, Breure AM 2009. Prioritaire gebieden in de Kaderrichtlijn Bodem. RIVM rapport 607370001I2009. pg 64.

Seybold CA, Herrick JE, Brejda JJ 1999. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Science* 164: 224-234.

Siegrist S, Schaub D, Pfiffner L, Mäder P 1998. Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 69: 253-264.

Six J, Bossuyt H, Degryze S, Deneef K 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research* 79: 7-31.

Veen JA van, Kuikman PJ 1990. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry* 11: 213-233.

DEEL 2

BODEMLEVEN

1 Bacteriën

Belangrijkste functies van bacteriën

Afbraak van organisch materiaal, vastleggen van nutriënten, binding van atmosferische stikstof, omzetting van ammonium- in nitraatstikstof, vorming van stabiele aggregaten, bescherming tegen erosie, verhogen van ziekteverendheid, vorming van (anaërobe) afbraakproducten die pathogene organismen kunnen verzwakken of doden.

1.1 Algemeen

Uiterlijk en afmetingen Bacteriën zijn eencellige organismen zonder celkern ('prokaryoten'). De afwezigheid van een celkern (met daarin al het genetische materiaal bij elkaar) maakt ze tot een duidelijk afgebakende groep. De verschillende soorten bacteriën zijn echter lastiger te onderscheiden: ze zijn namelijk in staat om onderling genetisch materiaal uit te wisselen. De grens tussen de ene en de andere soort is daardoor soms moeilijk te trekken. Bacteriën groeien tot een bepaalde grootte en delen vervolgens in dochtercellen. Om een bacterie te kunnen waarnemen is een microscoop nodig: de meeste bacteriën zijn 0,5 tot 5 micrometer (μm ofwel $1/1000$ mm) lang. Ondanks hun geringe afmeting maken zij door hun grote aantallen onder Europese omstandigheden het grootste gedeelte van het bodemleven uit. In een theelepel productieve grond kunnen zich tussen de 100 miljoen en 1 miljard bacteriën bevinden. We weten echter nog maar weinig af van de bacteriën in de bodem. De meeste soorten zijn niet gekarakteriseerd en naar schatting is maar zo'n 10% te vermenigvuldigen onder lab-omstandigheden. Het meeste onderzoek aan bacteriën gebeurt dan ook op moleculair niveau.

Aërobe bacteriën Voedingsstoffen zijn vaak de beperkende factor voor bacterie-activiteit. Zodra er genoeg voedsel voorhanden is, kunnen bacteriën zich zeer snel vermeerderen. Het toevoegen van tarwestro aan de bodem kan bijvoorbeeld binnen twee dagen de hoeveelheid bacteriën met een factor >1000 laten toenemen (Ekelund et al., 2002). Deze zeer snelle vermeerdering treedt ook op bij het toepassen van organische bemesting of het onderwerken van gewasresten. Als er niet genoeg voedsel aanwezig is, gaan bacteriën over in een rusttoestand. In het bodemprofiel vinden we de grootste diversiteit en de hoogste aantallen bacteriën in de bovenste laag (0-5 cm). Bacteriën in de bovenste bodemlaag (0-5 cm) hebben volgens Engels onderzoek in grasland de grootste capaciteit om verschillende voedingsbronnen af te breken (90% van de aangeboden voedingsbronnen). In de onderste laag van de bouwvoor (15-20 cm) kunnen bacteriën nog maar 9% van de aangeboden voedingsbronnen afbreken. Er is ook een sterke variatie door de seizoenswerking. In de zomermaanden (juli) is er een sterke daling van de activiteit in de bovenste bodemlagen (0-10 cm). De laag eronder (15-20 cm) is veel stabiel qua activiteit (Griffiths et al., 2003). In natuurlijke bosgronden zijn in het voor- en najaar (april en oktober) de aantallen en activiteit van bacteriën het hoogste (Vardavakis, 1989), met een piek in oktober nadat de bomen hun blad verliezen. In de wintermaanden is de activiteit van bacteriën in natuurlijke bosgronden het laagst. In landbouwgronden bestaat een vergelijkbaar patroon, door de aanvoer van gewasresten en (op

sommige gronden) de toepassing van organische mest in het najaar. Vooral in het gebied dichtbij de plantenwortels (de rhizosfeer), en in de buurt van organische stof, zijn bacterie-aantallen hoog. De activiteit van micro-organismen in de rhizosfeer kan wel 50x zo hoog zijn als in de rest van de bodem. Bacteriën verplaatsen zich via dunne waterfilmpjes, die op de aan elkaar gekitte bodemdeeltjes zitten (de aggregaten) en via met water gevulde poriën. De aanwezigheid en activiteit van bacteriën is ook afhankelijk van de pH van de bodem. De meeste bodembacteriën functioneren goed bij een pH tussen 6.3 en 6.8.

Anaërobe bacteriën Onder sommige omstandigheden treden er verschuivingen op in de soortensamenstelling van de bodembacteriën. Bij langdurig zuurstofloze omstandigheden in de bodem, gaan anaërobe bacteriën domineren, die geen zuurstof nodig hebben voor hun groei. Anaërobe bacteriën hebben een bredere pH tolerantie en vermeerderen zich beter bij een lagere pH. Zuurstofloze omstandigheden ontstaan bij een sterke bodemverdichting en een slechte afwatering, bij het onder water zetten van de bodem (inundatie), en bij biologische grondontsmetting. Hierbij wordt de grond een aantal weken afgedekt met luchtdichte folie, terwijl er veel organisch materiaal is ondergewerkt en de grond goed vochtig is gemaakt. Onder deze omstandigheden worden de afbraakprocessen in de bodem die normaal door aërobe bacteriën worden uitgevoerd, overgenomen door anaërobe bacteriën. Hierbij ontstaan ook andere afbraakstoffen dan onder 'normale' omstandigheden, zoals H_2S (de 'rotte-eieren-lucht') en ammoniak (NH_3). Deze afbraakstoffen kunnen ervoor zorgen dat bijvoorbeeld sporen van pathogene bodemschimmels of plant-pathogene nematoden verzwakt worden of het loodje leggen. In het algemeen is er echter weinig bekend over het effect van dit soort maatregelen op het positief werkende bodemleven. Na afloop van de zuurstofloze periode herstelt de activiteit van het bodemleven zich meestal snel, maar het effect op het totale aantal soorten (de bodem biodiversiteit) is niet bekend. Anaërobe bacteriën zoals *Pseudomonas denitrificans* zorgen in een zuurstofloze bodem voor denitrificatie: de omzetting van nitraat en ammoniumstikstof in gasvormige stikstof, zoals N_2 , N_2O en NO . Wanneer er veel stikstof in de bodem aanwezig is in de vorm van nitraat en ammonium, kan dit proces tot grote verliezen in de bodem leiden.



Figuur 1-1: Blauwverkleuring door activiteit van anaerobe bacteriën (foto M. Zanen).

Actinomyceten De actinomyceten vormen een bijzondere orde binnen de bacteriën. Ze vormen draadvormige structuren, die op hyphen lijken. Toch zijn het geen schimmels: ze bevatten geen celkern en hun celwand bevat geen cellulose of chitine zoals de celwand van schimmels. Actinobacteriën zijn verantwoordelijk voor de typische 'aarde-geur' van een gezonde bodem. Hoe dieper in de bodem, hoe groter het aantal actinomyceten wordt ten opzichte van de totale microbiële populatie. Actinomyceten kunnen zelfs in het moedermateriaal van de bodem, de C-horizont voorkomen. Actinomyceten kunnen slecht tegen zure omstandigheden, de meest gunstige pH waarden liggen tussen 6.5 en 8.0. Veel onderzoek naar actinomyceten in de bodem zoals bijvoorbeeld naar *Nocardia* sp., is gericht op het vinden van nieuwe antimicrobiële stoffen. De productie van antibiotica is ook van belang voor de bodemgezondheid: het is een belangrijk mechanisme waarmee de bodem ziekteverend wordt tegen pathogene bodemschimmels. Sommige actinomyceten zijn ook rechtstreekse parasieten van levende schimmeldraden en rustsporen. Een andere bekende uit de actinomyceten orde is het geslacht *Frankia*. De *Frankiae* zijn bekend vanwege hun stikstofbinding en de symbiose die ze aangaan met verschillende bomen, waarbij ze wortelknolletjes vormen. Uit recent onderzoek is gebleken dat niet alleen *Frankiae*, maar ook bepaalde *Streptomyces* soorten in de bodem stikstof kunnen fixeren (Crawford et al., 1993).

1.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb

Eenvoudige organische verbindingen Bacteriën zijn verantwoordelijk voor de afbraak van simpele organische verbindingen, zoals de stofjes die door wortels uitgescheiden worden: suikers, eiwitten en aminozuren. Ze domineren dan ook vaak het gebied rond de wortels, de rhizosfeer. De taakverdeling is meestal zo, dat bacteriën de eenvoudige stoffen afbreken, terwijl schimmels de ingewikkelde stoffen aanpakken. Er zijn echter ook omstandigheden, bijvoorbeeld bij een lage pH van de bodem, waarbij de schimmels gaan concurreren met de bacteriën bij de afbraak van simpele organische verbindingen.

Afbraak van cellulose en chitine Cellulose is de belangrijkste component in de celwand van planten. In het algemeen worden ingewikkelde moleculen zoals cellulose vooral door schimmels afgebroken, maar een aantal bacteriën uit de actinomyceten orde (zoals *Streptomyces* sp.) kunnen ook moeilijker afbreekbare stoffen, zoals cellulose, zetmeel en chitine afbreken. Dit laatste is interessant omdat de celwand van schimmels chitine bevat. Een praktische toepassing hiervan is de toevoeging van chitine aan de bodem. Hierdoor neemt het aantal actinomyceten in de bodem toe, waardoor ook de celwand van pathogene schimmels wordt aangetast. Op deze manier kan bijvoorbeeld de aantasting van aardappel met schurft (*Streptomyces scabies*) worden verminderd.

Concurrentie met schimmels Schimmels en bacteriën concurreren met elkaar op verschillende manieren. Bacteriën, zoals de actinomyceten, produceren bijvoorbeeld antibiotica die tegen schimmels gericht zijn. Soms scheiden ze enzymen of vluchtige stoffen uit die de schimmels direct aantasten. Sommige actinomyceten kunnen ook direct parasiteren op schimmels, en zelfs op ruststadia van schimmels zoals microsclerotien. Bacteriën kunnen ook op een efficiënte manier belangrijke nutriënten uit de bodem wegvangen, bijvoorbeeld ijzer (met behulp van speciale

verbindingen: siderophoren), waardoor dit niet meer voor de schimmels beschikbaar is. De schimmels kunnen daardoor niet meer bij het ijzer komen, waardoor de overlevingskans van de schimmels kleiner wordt. Dit is een bekende strategie waardoor bodembacteriën zorgen dat de grond ziekteverwekkend kan worden tegen pathogene schimmels. Schimmels hebben op hun beurt weer een arsenaal aan methoden ontwikkeld om zich te weer te stellen tegen bacteriën. Sommige schimmels kunnen de antibiotica weer onschadelijk maken (ontgiften), of produceren stoffen met antibacteriële eigenschappen.

Door wie worden ze gegeten? Bacteriën worden gegeten door een groot aantal verschillende 'grazers' hoger in het voedselweb. Hiertoe behoren bacterie-etende protozoën (eencelligen), raderdiertjes, bacterie-etende nematoden (bijvoorbeeld uit de orde van de *Rhabditidae*), bacterie-etende mijten en potwormen. Deze grazers kunnen soms elkaars plek in het voedselweb vervangen. Wanneer er in de bodem veel bacterie-etende protozoën voorkomen, zijn er minder bacterie-etende nematoden en omgekeerd. Veel van de grazers van bodembacteriën zorgen er uiteindelijk voor dat de voedingsstoffen voor de planten beschikbaar komen. Bacteriën hebben bij hun groei relatief veel stikstof (N) opgenomen en minder koolstof (C). Wanneer de bacterie gegeten wordt door een organisme hoger in het voedselweb, komt stikstof in de vorm van ammonium (NH_4) vrij. Deze stikstof wordt vervolgens door denitrificerende bacteriën weer omgezet in nitraat (NO_3). Beide stikstofbronnen zijn belangrijk voor de plantengroei, maar veel planten hebben een voorkeur voor opname van nitraat boven die van ammonium.

1.3 Ecosysteemfuncties

Nutriëntenretentie & koolstofvastlegging Uit de bovenstaande beschrijving volgen een aantal functies die bacteriën vervullen. Eén sleutelrol van bacteriën is het vasthouden en leveren van nutriënten. Tussen de bacteriën zijn heterotrofe en autotrofe bacteriën te vinden: Heterotrofe bacteriën moeten organische voedingsstoffen opnemen om te kunnen overleven. Binnen de groep heterotrofe bacteriën kan onderscheid gemaakt worden tussen parasieten en saprofyten. Als een heterotrofe bacterie zijn voedingsstoffen uit een levend organisme haalt en dit organisme er nadeel van heeft, noemt men de bacterie een pathogeen, ziekteverwekker of parasiet. Als de bacterie zijn voedsel uit dood materiaal haalt zoals organische verbindingen in de bodem, wordt het een saprofyt genoemd (sapro = verrot). Terwijl schimmels vaak de eerste stap in het afbraakproces van moeilijke organische verbindingen zetten, zorgen bacteriën ervoor dat de vervolgstappen uitgevoerd worden en de simpelere verbindingen ook afgebroken worden. Autotrofe bacteriën zijn zelf in staat om organische stoffen te produceren. Ze zijn in te delen naar de energiebron: foto-autotrofe bacteriën zoals cyanobacteriën halen door middel van fotosynthese hun energie uit zonlicht. Chemoautotrofe bacteriën halen hun energie uit bepaalde stoffen uit hun omgeving. Een voorbeeld van chemo-autotrofe bacteriën zijn nitrificerende bacteriën die ammonium omzetten in nitraat. Deze omzetting is heel belangrijk voor het beschikbaar komen van nitraat voor de plantengroei. Een andere heel belangrijke groep chemo-autotrofe bacteriën zijn bacteriën die al

dan niet in symbiose met planten, stikstof uit de lucht kunnen binden. Deze groep is zeer belangrijk voor de landbouw, omdat de stikstofbinding door groenbemesters uit de Leguminosen familie volledig van deze groep bacteriën afhankelijk is.



Figuur 1-2: Rhizobium bacterie bindt stikstof vanuit wortelknolletjes

Bodemstructuur en erosie Door de productie van slijmstoffen zorgen bodembacteriën ervoor dat bodemdeeltjes aan elkaar gaan katten, en daardoor stabiele kluitjes (aggregaten) vormen. Dit maakt de bodem minder gevoelig voor in elkaar klinken (compactie) bij het berijden met zware landbouwmachines, minder gevoelig voor erosie, en het vergroot het waterbergend en waterinfiltrerend vermogen van de grond. Cyanobacteriën spelen in de bodem een aparte rol, doordat ze in droge gronden een soort biologische korst op de bodem vormen. Die biologische korsten zijn in droge gebieden belangrijk bij de bescherming van de bovenste bodemlaag tegen watererosie.

Ziektewerendheid Bacteriën spelen ook een heel belangrijke rol bij het ontstaan van ziekteverweendheid in de bodem. Hierbij gaat het met name om ziekteverweendheid tegen plant-pathogene schimmels. Vooral bacteriën uit de orde van de actinomyceten zijn hierin belangrijk. Actinomyceten gebruiken hiervoor verschillende mechanismen, variërend van het produceren van antibiotica, tot het efficiënt wegvangen van micro-nutriënten, waardoor de schimmels er geen gebruik van kunnen maken. In het geval van zuurstofloze omstandigheden in de bodem, kunnen anaërobe bacteriën zorgen voor afbraakproducten van organische stof die pathogene organismen (nematoden of persistente sporen van ziekteverwekkende schimmels) kunnen verzwakken of doden.

Tabel 1-1: Specifieke voorbeelden van functies van bacteriën in de bodem

Eco-systeem-dienst	Onderliggende processen en functies	Specifieke voorbeelden van invloed van bacteriën
Nutriëntenretentie en -levering	Stikstofbinding door associaties van bacteriën met vlinderbloemige planten (Leguminosen)	<i>Rhizobium</i> sp.
	Stikstofbinding door vrijlevende bacteriën in de bodem	<i>Azotobacter</i> sp.
	Stikstofbinding door associaties van bacteriën (actinomyceten) met bomen door de vorming van wortelknolletjes	<i>Frankia</i> sp.
	Vastlegging van atmosferische stikstof in symbiose met eukaryote organismen, waaronder planten	Cyanobacteriën zoals <i>Nostoc</i> sp. in symbiose met de watervaren <i>Azolla</i>
	Afbraak van wortellexudaten, zoals eiwitten, vrije aminozuren en suikers, en stimulering van de productie van wortellexudaten door planten	Rhizosfeer bacteriën zoals <i>Pseudomonas</i> sp. en <i>Bacillus</i> sp.
	Afbraak van ingewikkelde organische verbindingen zoals cellulose en chitine onder aërobe omstandigheden	Bacteriën uit de actinomyceten orde
	Afbraak van cellulose onder zuurstofloze omstandigheden	Anaërobe bacteriën zoals <i>Clostridium</i> sp.
	Omzetting van ammoniumstikstof (NH_4^+) in nitraatstikstof (NO_3^-)	Nitrificerende bacteriën
Koolstof vastlegging	Vastlegging van CO_2 door fotosynthese (met behulp van zonlicht), onder relatief droge omstandigheden, in het bovenste biologische 'korstje' van de bodem	Cyanobacteriën
	Vastlegging van CO_2 uit de lucht door autotrofe bacteriën	Nitrificerende bacteriën
Structuur en erosie bescherming	Biologische korstvorming op droge bodems, door een netwerk van draadvormige structuren van cyanobacteriën, waardoor de bodem beschermd is tegen water-erosie	Cyanobacteriën zoals de draden vormende <i>Scytonema</i> sp. (Belnap, 2006)
Waterretentie en -infiltratie	Verhoogde waterinfiltratie door aggregaatvorming en de vorming van stabiele microporiën aan het bodemoppervlak, door productie van koolstofverbindingen	Cyanobacteriën zoals de draden vormende <i>Scytonema</i> sp. (Belnap, 2006)
Ziekteverendheid	Concurrentie met ziekteverwekkende schimmels om micro-nutriënten zoals ijzer	Actinomyceten
	Productie van antibiotica tegen (plant-pathogene) schimmels	Actinomyceten zoals <i>Streptomyces</i> sp., andere bodembacteriën zoals <i>Bacillus</i> sp.
	Productie van gasvormige afbraakproducten bij afbraak van organisch materiaal onder zuurstofloze omstandigheden, waardoor plant-pathogene bodem organismen niet overleven	Anaërobe bacteriën
	Afbraak van chitine, een belangrijke stof waaruit de celwand van schimmels (inclusief de pathogene schimmels) is opgebouwd	Actinomyceten zoals <i>Streptomyces</i> sp.
	Ontstaan van 'fungistase' in bodems: schimmelsporen kunnen niet kiemen, door de aanwezigheid van andere micro-organismen in de bodem (De Boer et al., 2003)	De aanwezigheid van <i>Pseudomonas</i> sp. verhindert het kiemen van schimmelsporen

1.4 Aantallen en diversiteit

Er zijn grote verschillen in bacteriële biomassa, activiteit en diversiteit als gevolg van type landgebruik en bodem. In Tabel 1-2 staan referentiewaarden van bodembacteriën voor een aantal voor Vlaanderen en Nederlands Limburg relevante combinaties van bodemtype en landgebruik. De laagste bacteriële biomassa werd gevonden in akkerbouwsystemen op klei, met een referentiewaarde van 51 µg C/g droge grond (Rutgers et al., 2007). De hoogste bacteriële biomassa werd gevonden in melkveehouderijsystemen op klei en lössgronden, waar de bacteriële biomassa wel een factor 10 hoger kon zijn. De laagste bacteriële activiteit werd gevonden op melkveehouderij op zand, met een referentiewaarde van 77 pmol/g.h voor de snelheid van thymidine inbouw. De referentiewaarden voor melkveehouderij op klei lagen een factor 5 tot 6 hoger, met 436 pmol/g.h. thymidine inbouw. Opvallend is dat de bacteriële biomassa bij melkveehouderij op löss (620) en klei (634 µg C/g droge grond) even groot is, maar dat de activiteit van de bacteriën in lössgronden een factor 4 lager lag. De diversiteit aan bacteriën voor de verschillende systemen is vrijwel overal gelijk en referentiewaarden variëren van 56 tot 68 DNA banden.

Tabel 1-2: Referentiewaarden en gemiddelden van overige bedrijven voor bacteriële parameters, voor verschillende combinaties van landgebruik en bodemtype. Data van Wijnandsrade zijn bemonsterd uit de bodemlaag van 0-15 cm, overige data zijn bemonsterd in 0-10 cm (Rutgers et al., 2007).

Parameter	Eenheid	Akkerbouw op zand		Melkveehouderij op zand		Akkerbouw op löss	Melkveehouderij op löss	
		Referentie (n=6)	Gemiddeld (n=28)	Referentie (n=6)	Gemiddeld (n=81)	Wijnandsrade (n=8)	Referentie (n=3)	Gemiddeld (n=8)
Bacteriële biomassa	µg C/g droge grond	81	88	132	146	45	620	476
Bacteriële activiteit (Thymidine inbouw)	pmol/g.h	105	59	77	65	32	108	78
Bacteriële diversiteit	aantal DNA banden	68	68	57	51	*	59	58

2 Schimmels

Belangrijkste functies van schimmels

Afbraak van (ingewikkelde) organische verbindingen in de bodem, vorming van stabiele bodemdeeltjes (aggregaten), uitscheiding van organische zuren, waardoor sommige nutriënten beter beschikbaar worden voor de plant, verhoogde opname van P en water door associatie van planten met mycorrhiza, verhoging van de ziekteverendheid door concurrentie of predatie, bescherming tegen pathogene schimmels door associaties met mycorrhiza.

2.1 Algemeen

Uiterlijk en afmetingen Paddenstoelen zijn ongetwijfeld de meest bekende soort schimmels. Ze vormen echter maar een relatief kleine groep binnen het totale schimmelrijk. Schimmels zijn organismen die in hun cel een celkern hebben (eukaryoten), waarin het genetisch materiaal zit opgesloten. De schimmels omvatten een enorme diversiteit aan soorten, met verschillend uiterlijk, levenscycli en overlevingsstrategieën. Van de naar schatting 1.5 miljoen soorten zijn zo'n 100.000 schimmels door taxonomen beschreven. Schimmels kunnen ééncellig zijn, zoals in de vorm van gisten, of uitgroeien tot meercellige, langgerekte draden, de hyphen. Schimmeldraden zijn 2-10 μm (1/1000 mm) in diameter en kunnen verschillende centimeters lang zijn. Een vierkante meter grond onder grasland kan makkelijk verschillende kilometers aan schimmeldraden bevatten. Nieuwe hyphen ontstaan door vertakking. Het netwerk van hyphen wordt mycelium genoemd. Met de hyphen kunnen schimmels door droge plekken in de bodem heengroeien, terwijl ze tegelijkertijd via hun draden water uit vochtige plekken opnemen. De voortplanting van schimmels kan zowel asexueel als sexueel plaatsvinden. Asexuele voortplanting gebeurt door vorming van vegetatieve sporen (conidiën). Dit is een voortplantingsstrategie die voor een snelle populatiegroei kan zorgen.



Figuur 2-1: De vruchtlichamen van het Elfenbankje (Trametes sp.) komen voor op dood hout, en worden gekenmerkt door kale, donkere zones die worden afgewisseld door lichtere fluwelige of viltige zones (foto W.Cuijpers).

Schimmel activiteit Schimmels kunnen in de bodem aanwezig zijn in een actieve vorm, waarbij ze groeien en schimmeldraden (hyphen) vormen. Wanneer de omstandigheden ongunstig worden, gaan schimmels over in een inactieve vorm, zoals rustsporen. Sporen kunnen soms tientallen jaren lang in de grond overleven, doordat het genetisch materiaal ingepakt zit in verschillende lagen van moeilijk afbreekbaar organische verbindingen: myeline. Wanneer het om plant-pathogene schimmels gaat, kan het om die reden heel lastig zijn om de sporen weer uit de bodem kwijt te raken. Verschillende soorten schimmels maken verschillende typen rustsporen, zoals (micro)sclerotiën (*Sclerotia minor*, *Sclerotia sclerotiorum*, *Verticillium dahliae*, *Rhizoctonia solani*) of chlamydosporen (*Fusarium oxysporum*). Micro- en macro-conidiën zijn sporen van *Fusarium oxysporum* die veel minder goed in de grond kunnen overleven. Schimmels kunnen in rust gaan om verschillende redenen. Een belangrijke reden is voedselgebrek. Gekoppeld hieraan is een belangrijk mechanisme van ziekteverendheid, namelijk 'fungistase'. Fungistase is de onmogelijkheid van sporen om te kiemen, door de aanwezigheid van andere micro-organismen. Dit kan komen doordat er te weinig nutriënten in de omgeving aanwezig zijn. Een andere reden voor schimmels om in rusttoestand te gaan is door droogte, bij extreme temperaturen, door zoutstress of door het ontstaan van zuurstofloze omstandigheden. Met uitzondering van een groep schimmels in het maag-darmkanaal van grote grazers (de *Neocallimastigomycota*) zijn alle schimmels aëroob. Dit betekent dat schimmels in de bodem slecht tegen verdichting of waterverzadigde omstandigheden kunnen. Dit principe wordt ook toegepast in management maatregelen waarbij anaërobe condities in de bodem gecreëerd worden, zoals bij inundatie of biologische grondontsmetting. Een nadeel is dat niet alleen de pathogene, maar ook de saprofytische schimmels met dit soort breedwerkende maatregelen getroffen kunnen worden. Overigens zijn niet alleen de anaërobe omstandigheden, maar ook de productie van voor schimmelsporen giftige stoffen zoals ammoniak ervoor verantwoordelijk dat met dit soort maatregelen de overlevingssporen kunnen worden afgedood.

Mycorrhiza Meer dan 80 procent van alle plantensoorten kan een symbiose aangaan met bepaalde soorten schimmels. Deze schimmels, afkomstig uit het phylum van de *Glomeromycota*, vormen zogenaamde arbusculaire mycorrhiza's (AM) met de wortels van de planten. Daarbij groeien de schimmels in en om de plantenwortels. Behalve vesiculair-arbusculaire mycorrhiza's bestaan er ook ecto-mycorrhiza's. Bomen die een symbiose met ecto-mycorrhiza's aangaan, hebben in plaats van haarwortels een sokje van schimmeldraden om de worteluiteinden. Paddenstoelen worden alleen gevormd bij ecto-mycorrhiza's. Voor landbouwgewassen zijn de arbusculaire mycorrhiza's het meest relevant. De meeste mycorrhiza schimmels zijn voor hun energie en koolstof afhankelijk van de symbiose met de plant. Deze schimmels hebben weinig of geen mogelijkheden om op dood organisch materiaal te groeien. Hoewel de meeste plantensoorten een verbinding met mycorrhiza kunnen aangaan, zijn sommige plantensoorten weinig of niet gevoelig voor infectie. Dit zijn bijvoorbeeld planten uit de *Cruciferae* (Kruisbloemigen, bijv. koolgewassen) en *Chenopodiaceae* (Ganzevoetachtigen, bijv. spinazie, rode biet) families. Lupine is ook weinig gevoelig voor infectie door mycorrhiza, maar dit is een uitzondering voor planten uit de sterk mycorrhiza gevoelige Vlinderbloemigen familie.

Plant-pathogene schimmels Een aantal schimmels zijn pathogeen voor planten. Het komt veel voor dat van eenzelfde groep schimmels, bijvoorbeeld *Fusarium* sp., sommige soorten van dood organisch materiaal leven en andere soorten op planten parasiteren. Omdat ze relatief veel op elkaar lijken, concurreren ze vaak met elkaar om ruimte en voedingsstoffen in de bodem. Op die manier zorgen niet-pathogene *Fusarium* soorten in de bodem bijvoorbeeld voor een verhoogde bodemweerbaarheid tegen de plant-pathogene *Fusarium* soorten.

Oömyceten De hierboven beschreven schimmels behoren allemaal tot de 'echte' schimmels: de *Eumycota*. Een groep die officieel niet tot de schimmels behoort, maar in de volksmond vaak wel als schimmel wordt gezien, zijn de oömyceten. Tot de oömyceten behoren een aantal bekende plantpathogene soorten, zoals *Pythium* en *Phytophthora*. Oömyceten worden soms ook 'zwakteschimmels' genoemd, omdat het zwakke concurrenten zijn van andere 'gunstige' bodemschimmels in de grond. Als het organisch materiaal in de bodem al stevig gekoloniseerd is met 'echte' bodemschimmels, maken oömyceten weinig kans. In een dunbevolkte omgeving, bijvoorbeeld in een bodem die net gestoomd of ontsmet is, kunnen oömyceten zich snel vermenigvuldigen. Een belangrijk verschil tussen oömyceten en 'echte' schimmels, is de samenstelling van hun celwand. Oömyceten hebben celwanden die net als planten vooral cellulose (β -1,4-glucaan) bevatten en geen chitine. Ook oömyceten kunnen rustsporen (oösporen) maken, die lang in de grond kunnen overleven. Opbouw van ziekteverendheid tegen oömyceten is gebaseerd op het verhogen van de algemene microbiële activiteit in de bodem door toediening van compost of ruige mest.

2.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb

Complexe organische verbindingen Schimmels kunnen niet, zoals sommige bacteriën, het zonlicht of de omzetting van anorganische stoffen als energiebron gebruiken: ze hebben altijd een organisch substraat nodig. Dit kan dood organisch materiaal zijn (voor strikt 'saprophytische' schimmels) of levend organisch materiaal, bijvoorbeeld in het geval van plant-parasitaire schimmels. Sommige schimmels kunnen ook wisselen van substraat. De saprophytische schimmels spelen in de bodem een essentiële rol bij de afbraak van organische stof en bij het vrijkomen van nutriënten. Een belangrijke organische verbinding is cellulose. Zo'n 30 tot 50 procent van de droge stof uit planten bestaat uit cellulose. De aërobe afbraak van cellulose vindt vooral plaats door schimmels. Doordat de cellulose vaak beschermd wordt door andere complexe moleculen (hemicellulose en houtstof: lignine) is deze voor veel bacteriën onbereikbaar. Slechts een beperkt aantal schimmels is in staat om houtstof af te breken. Het wordt 'witrot' genoemd, vanwege de witte waas die er op rottend hout ontstaat. De meeste witrot-schimmels in de bodem behoren tot de basidiomyceten. Lignine of houtstof is voor hen niet de belangrijkste energiebron. Door het afbreken van de lignine krijgen ze echter wel toegang tot primaire energiebronnen die voor andere micro-organismen niet toegankelijk zijn. De afbraak van lignine is een strict aëroob proces.

Eenvoudige organische verbindingen Schimmels hebben zich in de loop van de evolutie gespecialiseerd in de afbraak van recalcitrante organische verbindingen met een hoge C/N

verhouding, terwijl bacteriën in het algemeen een belangrijke rol spelen in de afbraak van simpele organische substraten. Ondanks dit algemene beeld is er een doorlopende concurrentie tussen bacteriën en schimmels om zowel complexe als eenvoudige substraten. De schimmelsoorten die in staat zijn om snel te groeien, een rijke sporenproductie hebben én ook simpelere organische verbindingen kunnen gebruiken, kunnen ook in de omgeving vlakbij de wortel (de rhizosfeer) een belangrijke rol spelen. De bijdrage van schimmels aan de afbraak van simpele substraten is het hoogste in een zure omgeving en bij een relatief hoge aanvoer van eenvoudige organische verbindingen.

Door wie worden ze gegeten? Schimmels worden door een grote variëteit aan 'grazers' hoger in het voedselweb gegeten. Springstaarten voeden zich met schimmeldraden (hyphen), en zijn samen met schimmelende nematoden de belangrijkste 'grazers' die de grootte van de schimmelpopulaties onder controle houden. Daarnaast worden schimmels ook gegeten door schimmelende mijten en potwormen, die veel microbiële actieve organische stof consumeren. Ook regenwormen verteren schimmels bij het opnemen van organische stof. Het begraaft worden van schimmels kan de groei van schimmels ook juist stimuleren. Behalve door grotere 'grazers', worden schimmels ook in hun overlevingskansen bedreigd door andere micro-organismen: zowel door bacteriën als door andere schimmels. De samenstelling van de celwand van schimmels vormt de belangrijkste bescherming tegen de buitenwereld. In tegenstelling tot de celwand van planten, die vooral uit cellulose bestaat, bevat de celwand van schimmels chitine en suikerketens (het polysaccharide β -1,3-glucaan). Van de bodembacteriën zijn het vooral de actinomyceten die in staat zijn om chitine af te breken. De sporen van schimmels zijn nog veel hardnekkiger in de bodem, doordat er een laagje myeline omheen zit. Myeline is een zeer moeilijk afbreekbare stof. Toch zijn er organismen die het kunnen omzetten. Het is een selectieve groep schimmels die ook zorgt voor de afbraak van hout en houtstof (lignine): de witrotschimmels. Ze scheiden de enzymen voor de afbraak van houtstof buiten hun lichaam uit. Deze enzymen tasten ook het myeline laagje om de sporen aan, waardoor deze verzwakt worden. Een praktische toepassing hiervan vindt plaats in de biologische bestrijding van de pathogene schimmel *Verticillium longisporum* in bloemkool. Hierbij wordt geprobeerd om met behulp van het onderwerken van lignine (houtstof)-rijke gewasresten, de hoeveelheid hardnekkige sporen in de grond terug te dringen.

2.3 Ecosysteemfuncties

Nutriëntenretentie & beschikbaarheid Schimmels zorgen voor het ter beschikking komen van nutriënten door de afbraak van een grote diversiteit aan organisch materiaal. Vooral de complexe organische verbindingen worden vaak door schimmels afgebroken, waarbij nutriënten vrijkomen die door planten kunnen worden opgenomen. Sommige schimmels scheiden organische zuren af in de bodem, waardoor nutriënten zoals fosfor beter beschikbaar worden. Het transport van nutriënten door de bodem gaat door het netwerk van schimmeldraden ook veel sneller dan wanneer ze zich alleen door diffusie zouden verplaatsen.

Bodemstructuur en erosie Schimmels dragen op verschillende manieren bij aan een verbetering van de bodemstructuur. Schimmeldraden groeien door de netwerken aan poriën in de bodem, waardoor bodemdeeltjes aan elkaar blijven katten. Hierdoor ontstaan er stevige kluitjes (de aggregaten) in de bodem, die goed bestand zijn tegen compactie en bijdragen aan bodemstructuurverbetering. Daarnaast scheiden hyphen plakkerige stoffen uit, die ervoor zorgen dat bodemdeeltjes bij elkaar gehouden worden.

Ziektewerendheid Ziektewerendheid van een bodem tegen een bepaalde pathogene schimmel kan soms ontstaan doordat er veel niet-pathogene schimmels van hetzelfde geslacht, bijvoorbeeld *Fusarium*, voorkomen. In de concurrentie om micro-nutriënten zijn de niet-plant-pathogene soorten soms net iets effectiever, waardoor de pathogene schimmels het onderspit delven. Daarnaast bestaan er ook 'hyperparasitaire' schimmels zoals *Drechslerella anthonia* die op nematoden parasiteert. Aan de schimmeldraad groeien lasso's, waarmee de nematoden gevangen worden. Ook zijn er schimmels die op andere schimmels parasiteren. Een voorbeeld is de hyperparasiet *Coniothyrium minitans*, die parasiteert op plantenparasitaire *Sclerotinia* sp. Bescherming tegen ziekten kan ook ontstaan doordat de plant een symbiose aangaat met een mycorrhizaschimmel. Van uien is bijvoorbeeld bekend dat ze door een symbiose met *Glomus* sp. mycorrhiza een betere weerstand hebben tegen *Sclerotium cepivorum* (Torres-Barragán et al., 1996).

Tabel 2-1: Specifieke voorbeelden van functies van schimmels in de bodem

Ecosysteem- dienst	Onderliggende processen en functies	Specifieke voorbeelden van invloed van schimmels
Nutriëntenretentie en -levering	Afbraak van cellulose onder aërobe omstandigheden	*
	Afbraak van houtstof (lignine) onder aërobe omstandigheden	Witrotschimmels (<i>Basidiomycota</i>)
	Vesiculaire-arbusculaire mycorrhiza's vormen een specifieke symbiose met naar schatting meer dan 80% van de planten, en vergroten de opname van nutriënten zoals fosfor	Schimmels uit het phylum van de <i>Glomeromycota</i> , zoals <i>Glomus</i> sp.
	Ectomycorrhiza's vormen een symbiose met bomen, waarbij uitgebreide netwerken aan de buitenkant van de plantenwortel ontstaan, die de opname van nutriënten en water vergroten	Paddenstoelenvormende mycorrhiza zoals Gewoon eekhoornbrood (<i>Boletus edulis</i>) in symbiose met loofbomen (eik, beuk) en naaldbomen
	Door het uitscheiden van organische zuren worden bepaalde nutriënten zoals fosfor beter beschikbaar voor de plant	*
Structuur en erosie- bestrijding	Vorming van stabiele aggregaten door een hyphennetwerk tussen bodemdeeltjes	*
	Uitscheiding van plakkerige stoffen door schimmeldraden, waardoor bodemdeeltjes aan elkaar blijven zitten	*

Ecosysteem- dienst	Onderliggende processen en functies	Specifieke voorbeelden van invloed van schimmels
Waterretentie en -infiltratie	Vorming van stabiele aggregaten door een hyphennetwerk tussen bodemdeeltjes	*
Ziektewerendheid	Hyperparasiterende schimmels kunnen nematoden vangen en verteren, of plant-parasitaire schimmels bestrijden	<i>Drechslerella anthonia</i> als hyperparasiet van nematoden, en <i>Coniothyrium minitans</i> als hyperparasiet van de schimmel <i>Sclerotinia</i>
	Bescherming van de plantenwortel tegen schimmelinfecties, door een netwerk van mycelium van mycorrhiza-schimmels	<i>Glomus</i> sp. mycorrhiza beschermen uien tegen infectie met <i>Sclerotium cepivorum</i>

2.4 Aantallen en diversiteit

Vooral in gronden met veel organische stof kunnen schimmels een groot deel van de ondergrondse biomassa bepalen. In het BoBI project is maar op beperkte schaal informatie verzameld over de biomassa van schimmels in de bodem. Alleen voor de combinaties van melkveehouderij op veen en halfnatuurlijk grasland op zand is de schimmelbiomassa bepaald. Voor melkveehouderij op veen ligt zowel de referentie (n=4) als het gemiddelde (n=15) op 38 µg C/g droge grond. Voor halfnatuurlijk grasland op zand ligt de referentie (n=6) op 23 en het gemiddelde (n=4) op 25 µg C/g droge grond (Rutgers et al., 2007). Aantallen mycorrhiza in de bodem zijn lastig te bepalen. Meestal wordt de hoeveelheid bodemschimmels door middel van uitplaat-methoden bepaald, maar de sporen van mycorrhiza zijn op deze manier lastig te tellen. Bovendien is er geen goed verband tussen het aantal sporen en de infectie van de plantenwortel. Om die reden wordt in landbouwkundig onderzoek vaak het percentage kolonisatie van de plantenwortel bepaald. Afhankelijk van het bodemtype kunnen verschillende mycorrhiza soorten domineren. Veel mycorrhiza soorten zijn niet plant-specifiek: ze kunnen meerdere plantensoorten koloniseren. Dit verhoogt ook hun overlevingsmogelijkheden in de bodem (Harley, 1983).

3 Protozoën

Belangrijkste functies van protozoën

Het beschikbaar maken van nutriënten voor de plant door het 'grazen' op micro-organismen.

3.1 Algemeen

Uiterlijk en afmetingen Protozoën zijn eencellige micro-organismen die een celkern bevatten (eukaryoten). Protozoën zijn een stuk groter dan bacteriën: de meeste soorten zijn circa 10-50 µm groot, maar sommige ciliaten kunnen wel 2 mm groot worden. De protozoën vormen zowel taxonomisch als ecologisch een enorm diverse groep. In de bodem worden vier functionele groepen onderscheiden: de heterotrofe flagellaten (zweephaardiertjes), naakte amoeben, geschaalde amoeben en ciliaten (trilhaardiertjes). In landbouwbodems komen vooral heterotrofe flagellaten en naakte amoeben voor. Hoe groter het soort protozoën, hoe minder er van in de bodem voorkomen (Finlay et al., 2000).

Activiteit van protozoën De activiteit van protozoën is sterk afhankelijk van de aanwezigheid van vocht in de bodem, omdat ze een onbeschermd stukje celmembraan nodig hebben voor hun voedselopname. Hun actieradius in de bodem beperkt zich dan ook tot waterfilms en watergevulde poriën. Kleine poriën kunnen bacteriën tegen grazen door protozoën beschermen. De meeste protozoën in de bodem verkrijgen hun voedsel ofwel door er actief naartoe te bewegen, of door een stroming te veroorzaken waardoor voedseldeeltjes gevangen kunnen worden (Rønn et al., 2002). Uitdroging remt de voedselopname door protozoën en zorgt ervoor dat protozoën inactieve cysten vormen, die een aantal jaren kunnen overleven. De celwand van de cysten van protozoën bestaat uit verschillende lagen, die eiwitten, polysaccharides en chitine bevatten (Calvo et al., 2003). In een droge bodem kunnen alle protozoën overgaan in een inactieve ingekapselde vorm (Bryant et al., 1982). Wanneer de bodem weer vochtig wordt, kunnen ze snel actief worden, maar zelfs onder optimale omstandigheden kan nog een groot gedeelte van de populatie in ingekapselde vorm aanwezig zijn. Er is nog weinig bekend over de factoren die ervoor zorgen dat protozoën inkapselen en weer actief worden (Ekelund et al., 2002).

Flagellaten (zweephaardiertjes) Flagellaten zijn protozoën met één of meer zweepachtige organellen, de flagellen. Flagellaten zijn belangrijke bacterie-grazers in de bodem. Flagellaten concurreren onder andere met bacterie-etende nematoden om voedsel en kunnen wederzijds elkaars populatiegrootte beïnvloeden. Veel van de gewone heterotrofe flagellaten voeden zich met bacteriën die op de oppervlakte van bodemdeeltjes gehecht zitten. Sommige kleine flagellaten voeden zich met bacteriën die zich in het vrije bodemvocht bevinden door ze direct te vangen. Wanneer er grote aantallen flagellaten in de bodem aanwezig zijn, kunnen ze zich aan de veel grotere nematoden vasthechten, en deze daardoor doden. Bij lage aantallen flagellaten worden deze

juist door de nematoden gegeten, waardoor nematoden in dat geval de belangrijkste bacterie-eters in de bodem zijn (Bjørnlund en Rønn, 2008).

Naakte en geschaalde amoeben Amoeben hebben een onregelmatige vorm en bewegen zich voort door middel van uitstulpingen van cytoplasma, de schijnvoetjes (pseudopodia). Ze kruipen naar hun voedsel toe en strekken een paar schijnvoetjes uit rondom hun voedsel. Vervolgens fuseren de voetjes tot een voedselvacuole, waar spijsverteringsenzymen aan worden toegevoegd. Naakte amoeben gebruiken hun hele lichaam voor voortbeweging met schijnvoetjes, geschaalde amoeben gebruiken maar de helft: de andere helft grijpt de 'schaal' vast. Amoeben ademen door hun hele celmembraan, die continu in water ingebed is. Amoeben hebben verschillende voedselbronnen. Sommige amoeben eten bacteriën, anderen eten dood organisch materiaal en sommige soorten eten andere protozoën. Naakte amoeben zijn vaak verbonden aan oppervlakken en voeden zich hoofdzakelijk met aangehechte bacteriën (Rønn et al., 2002). Geschaalde amoeben komen voor in natte bodems zoals veengronden. Ze zijn een goede indicator voor het vochtgehalte en de zuurgraad van bodems. De amoeben vormen een simpele, stevige maar flexibele schaal, door stoffen die ze zelf uitscheiden, of door externe stoffen te laten samenkiten.

Ciliaten (trilhaardiertjes) De ciliaten zijn een groep protozoën met 'cilia': grote aantallen korte, haar-achtige organellen, die gebruikt worden om te zwemmen, kruipen, voeden en voelen en voor vasthechting. Ciliaten zijn in het algemeen grote protozoën, waarvan sommigen wel 2 mm lang kunnen worden. De meeste ciliaten voeden zich met kleinere organismen, zoals bacteriën en algen en met dood organisch materiaal. Ze gebruiken de fijne trilhaartjes als waaier, waardoor het voedsel naar de mondporie stroomt, waar voedselvacuoles worden gevormd. Andere ciliaten hebben geen mondje en voeden zich door absorptie. Daarnaast zijn er ook predatore ciliaten, die zich voeden met andere protozoën, in het bijzonder met andere ciliaten. Ciliaten worden op hun beurt gegeten door predatore nematoden.

3.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb

Bacterie- en schimmeleTERS Protozoën beïnvloeden de microbiële gemeenschap in de bodem doordat ze selectief bacteriën en in mindere mate schimmels en andere protozoën begrazen. Terwijl bacteriën nutriënten vastleggen, zorgen protozoën voor de mineralisatie van nutriënten door het begrazen van bacteriën waarbij overtollige nutriënten uitgescheiden worden. De structuur van de bacterie populatie wordt ook beïnvloed door het grazen van protozoën. In het algemeen is het grazen door flagellaten en ciliaten grootte-afhankelijk, waarbij vooral de middelgrote bacteriën gevoelig zijn voor predatie, terwijl de kleine cellen en grote draadachtige bacteriën (Actinomyceten) gedeeltelijk resistent zijn tegen begrazing. Onderzoek met behulp van DGGE en BIOLOG methodes laat zien dat Actinomyceten door grazende flagellaten en amoeben werden gestimuleerd, terwijl gram-negatieve bacteriën in aantallen afnamen (Rønn et al, 2002). Dit is interessant vanwege het belang van (gram-positieve) Actinomyceten voor de ziekteverendheid van de bodem.

Door wie worden ze gegeten? Protozoën vormen op hun beurt voedsel voor nematoden, beerdierpjes, mijten en regenwormen (Ekelund et al., 2002)

3.3 *Ecosysteemfuncties*

Nutriëntenbeschikbaarheid Van de drie behandelde ecosysteemdiensten spelen protozoën ongetwijfeld de belangrijkste rol bij de nutriëntenbeschikbaarheid. Door de vertering van met name bacteriën, komen uiteindelijk de nutriënten ter beschikking van de plant. De bacteriën bevatten meer stikstof dan protozoën in hun dieet nodig hebben, waardoor er netto stikstof voor de plant beschikbaar komt. De overmaat aan stikstof wordt uitgescheiden in de vorm van ammonium (NH_4^+). Omdat veel bacteriën en protozoën zich in de rhizosfeer bevinden, komt hier ook veel stikstof in de vorm van ammonium vrij. De stikstofmineralisatie door protozoën in verschillende landbouwgronden varieert van 10 tot 150 kg N per ha per jaar (Bloem et al., 1997). Op dezelfde manier kunnen protozoën een rol spelen bij de mineralisatie van fosfor.

Ziektewerendheid Er is weinig literatuur over de relatie tussen protozoën en ziekteverendheid in de bodem. In het algemeen zijn protozoën bacterie-etters en mogelijk heeft het selectieve grazen een positief effect op de hoeveelheid Actinomyceten in de bodem. Van veel Actinomyceten is bekend dat zij kunnen bijdragen aan de ziekteverendheid. Mogelijk spelen schimmel-etende amoeben een rol in ziekteverendheid. Een ziekteverende bodem tegen Halmdoder (*Gaeumannomyces graminis*) in tarwe bleek verschillende soorten schimmel-etende amoeben te bevatten, die zich konden voeden met gepigmenteerde (gemelaniseerde) schimmeldraden. De ziekteverende bodems bevatten meer schimmel-etende amoeben dan de niet-ziekteverende bodems (Chakraborty and Warcup, 1983). Ook in andere bodems onder granen werden schimmel-etende amoeben gevonden, die parasiteerden op de hyphen van de plant-pathogene schimmel *Cochliobolus sativus* (*Helminthosporium sativum*), de veroorzaker van voetrot in gerst (Duczek, 1986).

Bodemstructuurvorming en erosiebestrijding Voor zover bekend hebben protozoën geen directe rol in de bodemstructuurvorming en erosiebestrijding.

3.4 *Aantallen en diversiteit*

Er zijn 30000 bekende soorten protozoën waarvan sommige in aquatische systemen en andere in de bodem voorkomen. Het aantal protozoën in de bodem is zeer variabel en hangt van veel verschillende factoren af. Een lage bodemvruchtbaarheid kan leiden tot slechts een paar duizend protozoën in een theelepel grond, terwijl in een theelepel vruchtbare grond wel meer dan een miljoen protozoën kunnen voorkomen. Bodemvocht bepaalt in belangrijke mate welke protozoën aanwezig zijn en welke actief zijn.

4 Nematoden

Belangrijkste functies van nematoden

De belangrijkste functie van nematoden is het begrazen van schimmels en bacteriën waarbij stikstof en fosfor vrijkomt. Schimmeletende nematoden spelen een belangrijke rol in de ziekteverendheid van een bodem.

4.1 Algemeen

Wanneer in de landbouw aan nematoden gedacht wordt, gaat het in het algemeen over plant-pathogene nematoden. Behalve de schadelijke soorten nematoden, leven er in de bodem echter ook grote aantallen nuttige nematoden. Afhankelijk van het soort nematode kunnen ze bijdragen aan verschillende ecosysteemfuncties. Nematoden zijn relatief grote bodemorganismen, hoewel ze meestal niet met het blote oog zichtbaar zijn. Hun lengte is meestal niet langer dan een paar millimeter en ze hebben het uiterlijk van een miniatuur-paling, vandaar de naam 'aaltje'. Nematoden zijn afhankelijk van bodemvocht. Ze bevinden zich vooral in waterfilms rondom de bodemdeeltjes en in watergevulde poriën. De poriëngrootte in de bodem is voor zand- en kleigronden verschillend. Dit zorgt ervoor dat ook de soorten nematoden op deze gronden anders van samenstelling zijn. Daarnaast wordt het soort nematoden vooral bepaald door het voedselaanbod.

4.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb

Trofische groepen De niet-plant pathogene aaltjes worden vaak ingedeeld in verschillende typen voedseleters: de zogenaamde trofische groepen. In landbouwgronden komen vaak grote aantallen bacterie-etende aaltjes voor. Dit zijn aaltjessoorten (bijvoorbeeld *Rhabditidae*) die zich snel voortplanten (in 3-5 dagen tijd), en die ook snel kunnen reageren op een veranderend voedselaanbod. Als er bijvoorbeeld gewasresten, groenbemesters of organische mest in de bodem ingewerkt worden, kunnen ze zich vaak snel vermenigvuldigen. Dit komt doordat het onderwerken van het materiaal een enorme voedselbron voor met name bacteriën is. Naast bacterie-etters, komen er ook verschillende soorten schimmeletende aaltjes in de bodem voor. Vaak komen deze in veel lagere aantallen voor en met minder verschillende soorten. Schimmeletende aaltjes 'grazen' behalve op 'gewone' schimmels die bijvoorbeeld plantenresten afbreken, ook op schimmels die juist plantenziekten veroorzaken. Van een aantal schimmeletende aaltjes is bekend dat ze in hun dieet een voorkeur hebben voor de plant-pathogene schimmels. Dit betekent dat ze een functie in de bodem kunnen vervullen bij het onderdrukken van die plant-pathogene schimmels. Soms is het onderscheid tussen de verschillende groepen aaltjes minder duidelijk. Onder andere *Tylenchidae* aaltjes worden soms tot de schimmeleters gerekend en soms tot de plant-parasitaire 'wortelprickers'. Aan de bovenkant van het voedselweb staan de top-predators, de rovers, of 'carnivore' nematoden. Deze leven van andere nematoden en protozoën. De 'carnivore' nematoden zijn vaak in heel kleine aantallen aanwezig. Deze soorten reageren ook langzamer op veranderingen in hun omgeving, en hebben ook een langere hersteltijd. Wanneer de omgeving erg verstoord wordt, bijvoorbeeld doordat

de grond gestoomd wordt, duurt het veel langer voordat ze weer in het ecosysteem teruggekeerd zijn. Tenslotte zijn er nog omnivore nematoden. Deze kunnen zowel van protozoën als van schimmels, bacteriën en van andere nematoden leven. Afhankelijk van het aanbod passen ze hun voedingspatroon aan.

Overlevingsstrategie Behalve naar voedselstrategie, worden de niet-plant-pathogene nematoden ook vaak ingedeeld naar overlevingsstrategie. Hierbij wordt globaal onderscheid gemaakt in twee strategieën: die van de 'kolonisten' ('colonizers') en die van de 'overlevers' ('persisters'). In een pionier-omgeving met weinig concurrentie en veel verstoringen, is het belangrijk om een snelle voortplantingsstrategie te hebben die relatief weinig energie kost. Het is niet nodig om heel goed te kunnen concurreren om voedsel door specialisatie. Dit is de strategie van de 'kolonisten'. 'Overlevers' hebben een andere strategie. Ze moeten juist goed kunnen concurreren, hebben een langzamere groei en voortplanting en doen het goed in een omgeving die meer richting een 'climax' stadium gaat. De verhouding tussen die twee groepen nematoden wordt vaak gebruikt om de ontwikkelingsfase van het ecosysteem te karakteriseren. Bij nematoden heeft dat tot een 'meetwaarde' of 'indicator' geleid: de zogenaamde Maturity Index (Bongers, 1990). Hoe hogere de 'Maturity Index', hoe stabiel het systeem.

Negatieve aspecten Het meest bekend zijn de negatieve effecten van plant-pathogene aaltjes. Bij plant-pathogene aaltjes moet er onderscheid gemaakt worden tussen aaltjes die direct schade kunnen opleveren in het gewas en de zogenaamde waardplantstatus van het gewas. De waardplantstatus bepaalt of het aaltje zich kan vermeerderen op het gewas of dat het gedurende de teelt van het gewas juist geen voedselaanbod heeft. Bij het beheersen van plant-pathogene aaltjes moet de hele vruchtwisseling inclusief groenbemesters onder de loep worden genomen. Hieronder wordt als voorbeeld alleen maïs besproken. In maïs kan bijvoorbeeld het wortelknobbelaaltje *Meloidogyne chitwoodi* een lichte schade in het gewas geven. Meer schade kan veroorzaakt worden door het wortellesie-aaltje *Pratylenchus penetrans*, het stengelaaltje *Ditylenchus dipsaci* en de vrijlevende wortelaaltjes *Trichodorus similis* en *Paratrichodorus teres* (PPO-AGV, 2008). Daarnaast kan maïs een sterke vermeerdering veroorzaken van het graanwortellesie-aaltje *Pratylenchus crenatus*, hoewel dit aaltje geen schade aan de maïs zelf geeft. Omgekeerd is bekend dat *Pratylenchus penetrans* door een aantal groenbemesters (Bladrammenas, Gele mosterd, Facelia, Witte klaver, Rogge) en door Engels Raaigras zich sterk kan vermeerderen. Het soort groenbemesters en de plaats in de vruchtwisseling is dan ook cruciaal voor de ontwikkeling en overlevingskans van plant-pathogene soorten in de bodem.



Figuur 4-1: Aantasting door het worteltesieaaltje *Pratylenchus penetrans* (Foto PPO).

4.3 Ecosysteemfuncties

Nutriëntenbeschikbaarheid Nematoden zijn een zeer diverse en talrijke groep. Ze spelen op een aantal plekken in het bodemvoedselweb een rol en hebben een belangrijke regulerende functie in het bodemecosysteem als geheel. Vooral vrijlevende bacterie- etende nematoden hebben een belangrijke functie in het beschikbaar maken van nutriënten zoals stikstof en fosfor. Wanneer nematoden 'grazen' op bacteriën komen er voedingsstoffen vrij. Een gedeelte van de koolstof en stikstof wordt gebruikt voor onderhoud en groei van de nematoden. Het resterende deel komt vrij als voedingsstof voor de plant.

Ziektewerendheid Behalve voedingsbron voor andere bodembewoners en daarmee van belang voor de algehele gezondheid van de bodem, consumeren nematoden ook ziekteverwekkers. Met name schimmel-etende nematoden kunnen een rol spelen in het ziekteverwende karakter van de bodem. Van een aantal schimmel-etende nematoden, bijvoorbeeld de soorten *Aphelenchus* en *Aphelenchoides* is bekend dat ze grazen op pathogene schimmels zoals *Verticillium*, *Fusarium* of *Pyrenochaeta* (Bongers, 1988). Daarnaast worden nematoden ook (commercieel) ingezet bij de bestrijding van b.v. engerlingen of naaktslakken. Deze zogenaamde entomopathogene nematoden zijn in staat om plaagorganismen te infecteren met een bacterie die het organisme via de productie van toxische stoffen uiteindelijk dood.

Bodemstructuurvorming en erosiebestrijding Van nematoden is bekend dat ze een algemeen regulerende functie hebben in het voedselweb. Door te grazen op andere organismen reguleren ze de grootte van de populaties van andere organismen. Dit kan indirect ook een doorwerking hebben op bijvoorbeeld de bodemstructuur. Een direct effect van nematoden op de bodemstructuurvorming en erosiebestrijding is echter niet te verwachten. Wel kan de nematoden populatie sterk op bodemstructuur reageren. Om te overleven in de bodem en zich te verspreiden hebben nematoden

een bepaalde hoeveelheid vocht nodig. Als de bodem te droog wordt kunnen bepaalde soorten nematoden sterk teruggedrongen worden, hoewel sommige soorten ook enige tijd in droogte-resistente rustvormen kunnen voorkomen.

4.4 Aantallen en diversiteit

Aantallen nematoden in de bodem worden meestal uitgedrukt per 100 gram verse grond. In het algemeen worden er op akkerbouwbedrijven op zand 19-32 verschillende soorten en op melkveehouderij op löss zo'n 26-32 verschillende soorten nematoden aangetroffen (Rutgers et al., 2007). In totaal komen er in Nederland naar schatting 900 soorten voor.

Tabel 4-1: Streefrichting nematoden parameters voor akkerbouw op zand, akkerbouw op löss en melkveehouderij op löss (Rutgers et al., 2007).

Parameter	Eenheid	Akkerbouw op zand		Melkveehouderij op zand		Akkerbouw op löss	Melkveehouderij op löss	
		Referentie (n=6)	Gemiddeld (n=28)	Referentie (n=6)	Gemiddeld (n=81)	Wijnandsrade (n=8)	Referentie (n=3)	Gemiddeld (n=8)
Nematoden dichtheid	n/100 gram verse grond	4240	3605	5990	4850	2886	4817	4045
Nematoden diversiteit	Aantal taxa	29	26	31	34	*	27	29

5 Potwormen

Belangrijkste functies van potwormen

Potwormen spelen een sleutelrol in de primaire en secundaire afbraak van organisch materiaal en zijn sterk regulerend in de processen van C- en N-mineralisatie. Daarnaast spelen potwormen een belangrijke rol in de bodemstructuurvorming door het vergroten van de continuïteit van het poriënstelsel en door de vorming van stabiele aggregaten.

5.1 Algemeen

Potwormen (*Enchytraeidae*) behoren net als de regenwormen tot het phylum van de *Annelida* en de klasse van de *Oligochaeta*. Wereldwijd zijn er ongeveer 900 soorten beschreven. In Nederland komen ruim 50 soorten voor (Rutgers et al., 2007). Tot de eerste helft van de vorige eeuw werden deze wormen in de bodembioïologie grotendeels genegeerd, maar op dit moment neemt de taxonomische en ecologische kennis over potwormen snel toe. Potwormen kunnen een lengte bereiken van 2 tot 40 mm, en behoren vanwege hun slanke diameter tot de mesofauna (0.2-2 mm). Meestal zijn ze kleurloos en ze bestaan uit een veelvoud aan segmenten, met – net als regenwormen – een ring- of zadelvormige verdikking met klieren (het clitellum) op ongeveer eenderde van hun lichaam. Ze zijn hermafrodit (met mannelijke en vrouwelijke geslachtsorganen) en planten zich meestal sexueel voort, hoewel ze zich in sommige gevallen ook door parthenogenese (zelfbevruchting) en door asexuele voortplanting (fragmentatie) kunnen vermenigvuldigen. Potwormen hebben altijd een vochtige huid, die ze voor hun ademhaling gebruiken (Jänsch et al., 1995). Hun huid wordt door een secundaire waterfilm bedekt, waarmee ze in contact zijn met het bodemvocht. Om te kunnen overleven zijn ze aangewezen op minimum vochtgehalten in de bodem. Ze zijn tamelijk tolerant wat betreft temperatuur en de meeste soorten geven de voorkeur aan temperaturen tussen de 5 en 28 °C. Een aantal potwormen kunnen ook onder heel zure omstandigheden overleven en nemen dan de rol van regenwormen over.



Figuur 5-1: Doorzichtige potworm op een bodemkluit midden in beeld, in vergelijking met een regenworm linksonder in beeld (foto J. Bokhorst).

Potwormen verschillen in voorkeur voor type bodem, vegetatie en bodemlaag. Op basis van hun voedselvoorkeur of functie in het ecosysteem kunnen potwormen ingedeeld worden in verschillende trofische of functionele groepen. Zoals ook bij nematoden gebruikelijk is, kunnen potwormen in plaats van op soortsniveau ook op het niveau van genus worden ingedeeld in ecologische groepen. Dat heeft als voordeel dat de identificatie van individuen tot op genus niveau relatief eenvoudig is, zelfs voor niet-specialisten. In grove dennenbossen komen in Nederland voornamelijk drie soorten potwormen voor: *Cognettia sphagnetorum*, *Marionina clavata* en *Achaeta eiseni*. De soorten vertonen een duidelijke verticale gelaagdheid, waarbij *Cognettia* in de strooisellaag voorkomt, *Achaeta* in de diepere bodemlagen en *Marionina* ertussenin (Didden en de Fluiter, 1998). Voor een indeling van potwormen in BoBI zijn ook drie functionele groepen gebruikt: (1) *Fridericia*, (2) *Marionina* en (3) *Enchytraeus* (Didden en Römcke, 2001; Van Eekeren, 2010). De meeste *Fridericia* soorten zijn beperkt tot matig zure tot neutrale bodems en hebben vers strooisel als voedsel. De *Marionina* groep verteert verder afgebroken organisch materiaal en de *Enchytraeus* groep heeft ouder organisch materiaal en minerale deeltjes als voedsel. Verder worden de *Enchytraeus* soorten ook meestal gekarakteriseerd als organismen met een r-strategie. Organismen met een r-strategie zijn snelle voortplanters en goede kolonisten die zich snel in een dynamische omgeving kunnen vestigen. *Enchytraeus* soorten profiteren van een hoge input aan gemakkelijk toegankelijk organisch materiaal, door een snelle populatie-opbouw, wat nog verder versneld wordt door de mogelijkheid om zich door fragmentatie te vermenigvuldigen (Römcke et al., 2007). Lagerlof et al. (1989) onderzochten het voorkomen van potwormen in 4 verschillende gewassen en concludeerden dat de verticale verdeling van potwormen in de bodem de bewortelingsprofielen van de verschillende gewassen reflecteerde.

5.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb

Potwormen voeden zich gewoonlijk met licht tot sterk verteerde resten van planten en micro-organismen (bacteriën en schimmels). Naar schatting bestaat zo'n 80 procent van hun dieet uit micro-organismen en zo'n 20 procent uit dood organisch materiaal. De schimmelbiomassa is een belangrijke voedselbron voor potwormen in zure bodems. Naast schimmels kunnen potwormen ook draadvormige bacteriën (actinomyceten) consumeren (Didden, 1991; Jaffee et al., 1997). Het begrazen van de schimmels door potwormen kan de groei en respiratie van schimmels stimuleren, maar onderdrukt de schimmelgroei als de aantallen potwormen te groot worden (Hedlund en Augustsson, 1995). Van sommige soorten is bekend dat ze zich voeden met voornamelijk onverteerd strooisel (Jänsch et al., 1995). Verschillende soorten potwormen hebben ook verschillende hoeveelheden enzymen in hun maag-darmkanaal, waaruit blijkt of ze bijvoorbeeld wel of geen materiaal van plantaardige oorsprong kunnen verteren (Dash et al., 1981).

Potwormen worden door veel verschillende predatoren gegeten, zoals duizendpoten, nematoden, mijten en loopkevers. Waarschijnlijk vormen predatore mijten de belangrijkste groep belagers. Daarnaast kunnen potwormen ook geïnfecteerd raken met virussen, bacteriën, schimmels of protozoën.

5.3 Ecosysteemfuncties

Nutriëntenbeschikbaarheid Potwormen zijn een sleutelgroep binnen de organismen die zorgen voor de primaire en secundaire afbraak van organisch materiaal. Ze zijn sterk regulerend in processen zoals de afbraak van organische stof en C- en N-mineralisatie. Van Eekeren (2010) vond op grasland dat potwormen een belangrijke indicator waren die de respons van de N opbrengst van grasland na bemesting met (minerale) stikstof konden verklaren. Mogelijk zijn hoge aantallen potwormen een goede indicator voor een gebalanceerde afbraak van organisch materiaal in de bodem, waardoor er ook een betere benutting van (minerale) stikstof als reactie op bemesting ontstaat. Lagerlof et al. (1989) maakten een schatting van het aandeel van potwormen op de respiratie in landbouwbodems onder 4 verschillende gewassen en schatten deze op 1.2-2.6 g C/m²/jr, en op 0.5-1.6% van de totale bodemrespiratie. De consumptie van C (16-34 g ds/m²/jr) komt overeen met 3-12% van de organische stof input in de bodem.

Ziektewerendheid Hoewel bekend is dat potwormen naast de microflora op dood organisch materiaal, ook schimmels en draadvormige bacteriën (actinomyceten) consumeren, is er weinig bekend over het effect van potwormen op pathogene bodemschimmels of schimmels die antagonistisch werken tegen plant-pathogene schimmels of nematoden. In een experiment van Jaffee et al. (1997) consumeerde de soort *Enchytraeus crypticus* de nematofage schimmel *Hirsutiella rhossiliensis* en de nematoden-vangende schimmels *Monacrosporium gephyropagum*, *Arthrobotrys thauomasia* en *A. haptotyla* in de vorm van gepelleteerde schimmelhyphen. De potwormen aantallen in de bodem namen snel toe na het toevoegen van schimmelkorrels aan de bodem, waaruit geconcludeerd kan worden dat de potwormen de schimmelkorrels niet alleen opnemen maar ook verteren. Jaffee et al. (1997) concludeerden voorzichtig dat de potwormen waarschijnlijk interfereren met het ziekte-onderdrukkende effect van deze nematoden-etende schimmels op *Meloidogyne javanica*. Omdat de schimmelkorrels echter ook geblenderde schimmeldraden bevatten, kan het zijn dat de potwormen zich met beschadigde in plaats van intacte hyphen gevoed hebben.

Bodemstructuurvorming en erosiebestrijding Didden (1990) concludeert dat potwormen een significante bijdrage kunnen leveren aan de ontwikkeling van de bodemstructuur in landbouwsystemen. De invloed van actief graven van gangen is waarschijnlijk van minder belang, omdat potwormen relatief kleine hoeveelheden grond transporteren. Ze zorgen echter wel voor een grotere continuïteit van de poriën, een groter volume van de poriën, door hun lichaamsomvang, en een grotere hoeveelheid aggregaten door hun uitwerpselen. Hierdoor verbetert de doorwortelbaarheid van de bodem, de beluchting en vermindert de slempgevoeligheid. Door de activiteit van potwormen ontstaat er in de bovengrond een fijne kruimelstructuur. De effecten zijn sterker als de potwormen geconcentreerd in de bovenste bodemlaag zitten. Verschillende onderzoeken naar de relatie tussen grondbewerking en potwormen laten zien dat potwormen juist meer in de bovenste laag van de bodem zitten in het geval van minimale of niet-kerende grondbewerking. De (verticale) verdeling van potwormen in het bodemprofiel wordt sterk beïnvloed door het vochtgehalte. Bij dalende vochtgehalten kunnen potwormen snel migreren naar diepere bodemlagen. Didden (1991) vergeleek de verdeling van de populatie potwormen in minimale en gangbare grondbewerking. Na gangbare grondbewerking was er een gelijkmatigere verdeling van

potwormen over het bodemprofiel (0-40 cm), terwijl na minimale grondbewerking er meer potwormen in de bovenste laag voorkwamen. Van Vliet et al. (1995) zag meer potwormen in de bovenste 5 cm van het bodemprofiel bij minimale grondbewerking (no-tillage), terwijl bij gangbare grondbewerking de potwormen gelijkverdeelde waren over de bovenste 15 cm. Door het verschil in grondbewerking veranderde de vochtinhouding van de bodem, het organische stofgehalte en de bulkdichtheid. Bij minimale grondbewerking werd de bulkdichtheid in de bovenste 5 cm lager, terwijl het organische stofgehalte er hoger was (Van Vliet et al., 1997). Parmelee et al. (1990) vonden in 7-8 jarige proeven met een vergelijking van gangbare grondbewerking (ploegen tot 15 cm in combinatie met spitten of frezen) en minimale grondbewerking (no-till) 50-60% grotere dichtheid en biomassa van potwormen in plots met minimale grondbewerking. Ook Röhrig et al. (1998) vonden in veldproeven dat bij compactie van de bodem de aantallen potwormen verminderden en dat de verticale verdeling door de bodem verstoord werd.

5.4 Aantallen en diversiteit

Potwormen kunnen in hoge aantallen in de bodem voorkomen, en het aantal soorten kan variëren van 1 tot 30 verschillende soorten per plek. In veel bodems ligt het gemiddelde jaarlijkse aantal potwormen tussen 20.000 en 60.000 individuen/m². Er zijn echter sterke fluctuaties tussen de seizoenen en aantallen kunnen variëren van een paar duizend tot 100.000 of meer (Jänsch et al., 1995). De verhouding tussen volwassenen en juvenielen is belangrijk om een goed beeld van de populatie te krijgen. Van Vliet et al. (1997) vonden in het voorjaar aantallen van 70.000-100.000 potwormen/m², met populaties die vrijwel volledig uit juvenielen bestonden, terwijl de gebruikelijke range van hun metingen tussen de 10.000 en 40.000 potwormen/m² lag. Omdat de huid van potwormen waterdoorlatend is en geen speciale bescherming heeft tegen uitdroging, komen ze vooral voor op vochtige plekken of zitten ze in de drogere bodems in vochtige microhabitats. Hun aantallen nemen toe als het vochtgehalte hoger wordt, maar is ook afhankelijk van temperatuur en organische stofgehalte. De soortendiversiteit is het hoogste onder licht zure tot neutrale bodemomstandigheden, maar er lijkt geen sterk verband tussen pH en aantallen potwormen. In het BoBI project is zowel de dichtheid als de diversiteit aan potwormen bepaald. De hoogste dichtheden komen voor op melkveehouderij op klei, met een referentie van zo'n 78.000 potwormen/m² en een gemiddelde van 65.000. Ook op melkveehouderij op löss liggen de gemiddelden zeer hoog. In het algemeen worden er per bedrijf tussen de 4 en de 12 verschillende soorten gevonden.

Tabel 5-1: Dichtheid en diversiteit aan potwormen op verschillende combinaties van bodemtype en landgebruik

Parameter	Eenheid	Akkerbouw op zand		Melkveehouderij op zand		Akkerbouw op löss	Melkveehouderij op löss	
		Referentie (n=6)	Gemiddeld (n=28)	Referentie (n=6)	Gemiddeld (n=81)	Wijnandsrade (n=8)	Referentie (n=3)	Gemiddeld (n=8)
Potwormen dichtheid	n/m ²	32505	20126	20700	24800	13970	46850	62360
Potwormen diversiteit	Aantal taxa	8.7	7.9	8.5	8.2	*	7.3	6.9

6 Regenwormen

Belangrijkste functies van regenwormen

De belangrijkste functie van regenwormen is het bevorderen van bodemstructuur, beluchting en vochtregulerend vermogen door het graven van gangen. Door afbraak van organisch materiaal en het eten van grond waardoor stabiele humus ontstaat, bevorderen regenwormen de bodemvruchtbaarheid.

6.1 Algemeen

Regenwormen behoren tot het phylum van de *Annelida* en de klasse van de *Oligochaeta*. De *Oligochaeta* zijn tweeslachtig (hermafrodit), maar niet zelf-bevruchtend. De eitjes van regenwormen worden omhuld door een cocon. Afzetting vindt het hele jaar door plaats met een piek van mei tot juli. Bij droge omstandigheden worden de cocons tot 15 cm diep afgezet, bij natheid juist oppervlakkiger. Afhankelijk van temperatuur duurt het 1 tot 2 maanden voor de cocons uitkomen. Afhankelijk van temperatuur en vocht duurt het 3 tot 6 maanden voor een worm volwassen is. In potentie kunnen regenwormen 4 tot 8 jaar oud worden, maar in akkers overleven ze meestal niet langer dan een paar maanden. Bij extreme omstandigheden zoals droogte of voedselgebrek trekken wormen zich terug in diepere bodemlagen of worden tijdelijk inactief (diapauze). Ze stoppen met eten, maken een holletje in de grond en rollen zich daar op totdat de omstandigheden weer gunstig zijn. Een aantal soorten (*Allolobophora longa* en *A. nocturna*) gaat standaard in diapauze tijdens de zomermaanden (Edwards en Bohlen, 1996). In Europa zijn de twee belangrijkste families van regenwormen de *Megascolecidae* en de *Lumbricidae*. De familie van de *Lumbricidae* is bijzonder succesvol in het koloniseren van nieuwe bodems en domineert in landbouwgronden vrijwel altijd de andere families. In totaal zijn er zo'n 220 soorten binnen de familie van de *Lumbricidae*: een relatief laag aantal in vergelijking met andere families regenwormen. In Europa is de grens van het ijs tijdens de laatste ijstijd bepalend voor het aantal soorten dat er per land voorkomt (Edwards en Bohlen, 1996). In Nederland zijn ongeveer 25 soorten bekend, waarvan enkele algemeen voorkomen en anderen maar zelden worden waargenomen (Rutgers et al., 2007).

Op grond van hun voedselkeuze, gedrag en voorkomen in de bodem kunnen regenwormen worden ingedeeld in drie ecologische of functionele groepen. Deze groepen zijn:

- Strooiselbewoners, 'rode' wormen of 'epigeïsche' soorten
- Bodembewonders, 'grauwe' wormen of 'endogeïsche' soorten
- Pendelaars, of 'anecische' soorten

Strooiselbewoners leven in de bovenste laag van de bodem, vooral in de zode van grasland. Ze hebben een rode kleur en zijn zeer beweeglijk. Strooiselbewoners breken organisch materiaal zoals plantenresten en mest af tot voedingsstoffen voor de plant. De meest voorkomende strooiselbewoner is *Lumbricus rubellus*. Bodembewonders zijn grijs van kleur en minder beweeglijk dan strooiselbewoners. Het zijn wormen met een goed regeneratievermogen (na verwonding) en een vrij

snelle populatiegroei en dus vooral geschikt voor het woelige bestaan in akkers. Grauwe wormen gaan in diapauze bij droogte. Ze eten zich een weg door de grond en verbeteren daarmee de bodemstructuur. In Nederland is *Aporrectodea calliginosa* de meest voorkomende grauwe worm. Pendelaars zijn grote, beweeglijke wormen met vaak een platte staart. Ze leven in verticale gangen tot wel 3 meter diep. 's Nachts kunnen ze zich aan de oppervlakte over grote afstanden (>10 m) verplaatsen. Pendelaars trekken grof organische materiaal hun gang in naar diepere grondlagen. Pendelaars dragen met hun verticale gangen vooral bij aan een goede bodemstructuur, beluchting en waterinfiltratie. *Lumbricus terrestris* en *Aporrectodea longa* zijn de meest voorkomende soorten.



Figuur 6-1: v.l.n.r.: rode worm en strooiselbewoner *Lumbricus rubellus*, grauwe worm en bodembewoner *Aporrectodea calliginosa* en pendelaar *Lumbricus terrestris* (foto's LBI).

6.2 Eten en gegeten worden: plek in het voedselweb

Regenwormen hebben een ecologische sleutelrol en hun activiteit komt het hele voedselweb ten goede. Tussen regenwormen en micro-organismen bestaan verschillende soorten relaties. Regenwormen zijn afhankelijk van micro-organismen als belangrijkste voedingsbron (Edwards and Bohlen, 1996), terwijl ze micro-organismen stimuleren door het fragmenteren van organische stof. Regenwormen transporteren micro-organismen door de bodem door opname in hun maag-darmkanaal en aanhechting aan hun lichaam. Micro-organismen in het maag-darmkanaal van regenwormen zijn voor het grootste gedeelte gelijk aan de omringende bodem en het is waarschijnlijk dat regenwormen geen eigen darmflora hebben. Wel produceren regenwormen zelf de enzymen die noodzakelijk zijn voor de afbraak van plantaardige organische stof, zoals cellulose, of de afbraak van schimmelcellen, zoals chitinase. In het maag-darmkanaal van regenwormen neemt de concentratie aan micro-organismen exponentieel toe van het begin naar het eind. In hun maag-darmkanaal scheiden regenwormen ook slijmachtige stoffen uit, die een goede voedingsbron vormen voor de micro-organismen. De uitwerpselen van regenwormen bevatten hierdoor veel grotere populaties aan micro-organismen dan de omringende bodem. Een aantal micro-organismen wordt selectief gestimuleerd gedurende passage door het maag-darmkanaal, waaronder de draadvormige bacteriën (actinomyceten) *Nocardia* en *Streptomyces*. Omdat het ook zo kan zijn dat sommige micro-organismen in de bodem onderdrukt worden en alleen in het maag-darmkanaal van regenwormen in grote hoeveelheden aanwezig zijn, is het discutabel of regenwormen wel of geen eigen darmflora hebben. In het algemeen lijkt het erop dat de aantallen soorten bacteriën en schimmels afnemen tijdens passage door het maag-darmkanaal. Sporen en schimmeldraden van een aantal donker

gepigmenteerde schimmels lijken resistent te zijn tegen de enzymen in het maag-darmkanaal. Actinomyceten die zich in het maag-darmkanaal van regenwormen bevinden, produceren antibiotica, die op hun beurt de groei van schimmels en van gram-positieve bacteriën remmen (Edwards and Bohlen, 1996). Het gangstelsel van regenwormen levert een belangrijke schuilplaats voor nuttige roofinsecten zoals loopkevers. Voor veel gewervelde dieren, zoals mollen, meeuwen en muizen vormen regenwormen een belangrijk deel van de dagelijkse maaltijd.

6.3 Ecosysteemfuncties

Nutriëntenbeschikbaarheid Vooral strooiselbewoners en pendelaars leveren een belangrijke bijdrage aan de afbraak van organisch materiaal en bevorderen de verdeling ervan in de bouwvoor. Door uitwerpselen, slijmproductie en de dood van regenwormen komen nutriënten beschikbaar voor de plant. *L. terrestris* kan ervoor zorgen dat de hoeveelheid beschikbaar fosfaat toeneemt, *L. rubellus* kan ervoor zorgen dat deze afneemt. De uitwerpselen van regenwormen bevatten meer micro-organismen en direct voor de plant opneembare nutriënten dan de bodem. Ze bevatten ook enzymen zoals cellulase en chitinase die nodig zijn voor de afbraak van organisch stof. In de literatuur lopen de schattingen over de hoeveelheid uitwerpselen per worm per jaar uiteen van 5 tot 100 ton per hectare (Edwards en Bohlen, 1996).

Ziektewerendheid Regenwormen hebben een positief effect op bodemstructuur en waterhuishouding en maken bodem en plant daardoor indirect minder vatbaar voor ziekten en plagen. Uit fruitboomgaarden is bekend dat met name *L. terrestris* de kans op schurftinfecties kan verkleinen door geïnfecteerde bladeren de grond in te trekken en op die manier het aantal ascosporen bovengronds verkleint. Regenwormen kunnen echter ook fungeren als vectoren voor plant-pathogenen zoals *Pythium* en *Fusarium*, maar daarover is nog weinig bekend.

Bodemstructuurvorming en erosiebestrijding Regenwormen kunnen de bodemstructuur verbeteren door incorporatie van plantenresten in de bodem en omwoelen van de grond. De porositeit neemt toe en er ontstaat een goede aggregaatstructuur en –stabiliteit. Daardoor kan het gewas een goed wortelstelsel ontwikkelen, wat weer leidt tot meer nutriëntenopname en grotere weerstand tegen ziekten. Ook de waterhuishouding van de bodem verbetert, zowel de infiltratie bij overvloedige neerslag als de nalevering in tijden van droogte.



Figuur 6-2: Boven: resultaat van een actief bodemleven met veel wormenactiviteit: een kruimelige, porierijke structuur met intensieve beworteling. Onder: langs de wand van een wormengang wordt mucus afgezet, een vruchtbaar materiaal dat plantenwortels aantrekt. Wortels maken dankbaar gebruik van de gemakkelijke weg naar de ondergrond (foto's M. Zanen).

6.4 Aantallen en diversiteit

Het voorkomen van regenwormen en de diversiteit hangt nauw samen met het (voormalig) landgebruik. Zo werd oud grasland in Engeland gedomineerd door *A. nocturna*, maar ploegen en herinzaaien na 2 jaar akkerbouw leidde tot grote aantallen van *A. rosea* (Evans and Guild, 1948). Ook gewaskeuze speelt een belangrijke rol. Onder granen komen meer regenwormen voor dan b.v. na aardappels. Ook het gebruik van dierlijke mest heeft een gunstig effect op het aantal regenwormen (Paoletti, 1999; Zanen et al., 2008).

In de 10 verschillende combinaties van landgebruik en bodemtype in het BoBI project, komen de hoogste aantallen regenwormen voor op melkveehouderij bedrijven (grasland) op klei. De referentiewaarden van de meest 'gezonde' bedrijven in de dataset (n=8) is 743 wormen per m² met een gemiddelde van 8.3 taxa/bedrijf. Het gemiddelde van de overige bedrijven in de dataset (n=42) ligt op 474 wormen/m² en 7.2 taxa/bedrijf. Op zandgronden komen de laagste aantallen

regenwormen voor, en lössgronden liggen ertussen in (zie *Tabel 6-1*). De gemiddelde aantallen komen overeen met de aantallen zoals gerapporteerd door Paoletti (1999) op basis van 350 locaties.

Tabel 6-1: Aantallen en diversiteit aan regenwormen bij verschillende combinaties van landgebruik en bodemtype. De referentiewaarden betreffen de gemiddelde waarden van de meest 'gezonde' bedrijven in de dataset, terwijl de 'gemiddelden' de gemiddelde waarde van de overige bedrijven betreft (Rutgers et al., 2007).

Parameter	Eenheid	Akkerbouw op zand		Melkveehouderij op löss		Melkveehouderij op zand	
		Referentie (n=6)	Gemiddelde (n=28)	Referentie (n=3)	Gemiddelde (n=8)	Referentie (n=6)	Gemiddelde (n=81)
Regenwormen dichtheid	aantal/m ²	77	30	336	283	64	163
Regenwormen diversiteit	aantal taxa	2,8	1,8	7.0	5.5	4.8	4.6

7 Literatuur

- Belnap J 2006. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 20: 3159-3178.
- Bjørnlund L, Rønn R 2008. 'David and Goliath' of the soil food web – Flagellates that kill nematodes. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(8): 2032-2039.
- Bloem J, de Ruiter PC, Bouwman LA 1997. Food webs and nutrient cycling in agro-ecosystems. In: *Modern Soil Microbiology*. Elsas, JD van, JT Trevors, E. Wellington (eds.) Marcel Dekker Inc., New York: 245-278.
- Boer W de, Verheggen P, Klein Gunnewiek PJA, Kowalchuk GA, Veen JA van 2003. Microbial community composition affects soil fungistasis. *Applied and Environmental Microbiology* 69: 835-844.
- Boer W de, Folman LB, Summerbell RC, Boddy L 2005. Living in a fungal world: impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews* 29: 795–811.
- Bongers T 1988. *De Nematoden van Nederland*. Natuurhistorische Bibliotheek van KNNV, nr. 46. Pirola, Schoorl.
- Bongers T 1990. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83: 14-19.
- Bryant RJ, Woods LE, Coleman DC, Fairbanks BC, McClellan JF, Cole CV 1982. Interactions of bacterial and amoebal populations in soil microcosm with fluctuating moisture content. *Applied and Environmental Microbiology*, 43(4): 747-752.
- Calvo P, Fernandez-Aliseda MC, Garrido J, Torres A. 2003. Ultrastructure, Encystment and Cyst Wall Composition of the Resting Cyst of the Peritrich Ciliate *Opisthionecta henneguyi*. *The Journal of Eukaryotic Microbiology*, 50(1): 49-56.
- Chakraborty S, Warcup JH 1983. Soil amoebae and saprophytic survival of *Gaeumannomyces graminis tritici* in a suppressive pasture soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 15(2): 181-185.
- Crawford DL, Lynch JM, Whipps JM, Ousley MA 1993. Isolation and Characterization of Actinomycete Antagonists of a Fungal Root Pathogen. *Applied and Environmental Microbiology* 59(11): 3899-3905.
- Dash MC, Nanda B, Mishra PC 1981. Digestive Enzymes in Three Species of Enchytraeidae (Oligochaeta). *Oikos* 36(3): 316-318.
- Didden WAM 1991. Involvement of Enchytraeidae (Oligochaeta) in soil structure evolution in agricultural fields. *Biology and Fertility of Soils* 9: 152-158.
- Didden WAM 1991. Population ecology and functioning of Enchytraeidae in some arable farming systems. Ph.D. Dissertation, Agricultural University Wageningen, The Netherlands, 117 pp.

- Duczek LJ 1986. Populations in Saskatchewan soils of spore-perforating amoebae and an amoeba (*Thecamoeba granifera* s.sp.minor) which feeds on hyphae of *Cochliobolus*. *Plant and Soil*, 92(2): 295-298.
- Edwards CA, Bohlen PJ 1996. *Biology and Ecology of Earthworms*. Third Edition. Chapman & Hall, London, pp 426.
- Eekeren N van 2010. *Grassland management, soil biota and ecosystem services in sandy soils*. Thesis, Wageningen University, The Netherlands, 264 pp.
- Ekelund F, Rønn R 1994. Notes on protozoa in agricultural soil with emphasis on heterotrophic flagellates and naked amoebae and their ecology. *FEMS Microbiology Review*, 15(4): 321-353.
- Ekelund F, Frederiksen HB, Rønn R 2002. Population dynamics of active and total ciliate populations in arable soil amended with wheat. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(3): 1096-1101.
- Evans AC, Guild WJML. 1948. Studies on the relationships between earthworms and soil fertility. V. Field populations. *Annual of Applied Biology* 35(4): 485-493.
- Finlay BJ, Black HIJ, Brown S, Clarke KJ, Esteban GF, Hindle RM, Olmo JL, Rollett A, Vickerman K 2000. Estimating the Growth Potential of the Soil Protozoan Community. *Protist* 151(1): 69-80.
- Foissner W 1999. Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative samples. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74(1-3): 95-112.
- Griffiths RI, Whiteley AS, O'Donnell AG, Bailey MJ 2003. Influence of depth and sampling time on a bacterial community structure in an upland grassland soil. *FEMS Microbiology Ecology* 43: 35-43.
- Harley JL 1983. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press Inc. London.
- Hedlund K, Augustsson A 1995. Effects of enchytraeid grazing on fungal growth and respiration. *Soil biology and biochemistry*, 27(7): 905-909.
- Jaffee BA, Muldoon AE, Didden WAM 1997. Enchytraeids and nematophagous fungi in soil microcosms. *Biology and Fertility of Soils* 25: 382-388.
- Jänsch S, Römcke J, Didden WAM 1995. The use of enchytraeids in ecological soil classification and assessment concepts. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 62(2): 266-277.
- Lagerlof J, Andren O, Paustian K 1989. Dynamics and contribution to carbon flows of Enchytraeidae (*Oligochaeta*) under four cropping systems. *Journal of Applied Ecology* 26(1): 183-199.
- Paoletti MG 1999. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 137-155.
- Parmelee RW, Beare MH, Cheng W, Hendrix PF, Rider SJ, Crossley Jr. DA, Coleman DC 1990. Earthworms and enchytraeids in conventional and no-tillage agroecosystems: A biocide approach to assess their role in organic matter breakdown. *Biology and Fertility of Soils* 10: 1-10.
- Pfiffner L, Mäder P 1997. Effects of Biodynamic, Organic and Conventional Production Systems on Earthworm Populations. *Entomological Research in Organic Agriculture*, pp. 3-10.

PPO-AGV 2008. Aaltjeswaardplantenschema.

Röhrig R, Langmaack M, Schrader S, Larink O 1998. Tillage systems and soil compaction – their impact on abundance and vertical distribution of Enchytraeidae. *Soil and Tillage Research* 46(1-2): 117-127.

Römbke J, Collado R, Schmelz RM 2007. Abundance, distribution, and indicator potential of enchytraeid genera (Enchytraeidae, Clitellata) in secondary forests and pastures of the Mata Atlântica (Paraná, Brazil). *Acta Hydrobiologica Sinica* 31: 139-151.

Rønn R, McCaig AE, Griffiths BS, Prosser JI 2002. Impact of protozoan grazing on bacterial community structure in soil microcosms. *Applied and Environmental microbiology* 68(12): 6094-6105.

Rutgers M, Mulder C, Schouten AJ 2007. Typering van bodemecosystemen in Nederland met tien referenties voor biologische bodemkwaliteit. Rapport 607604008/2007, RIVM, Bilthoven. p. 96.

Torres-Barragán A, Zavaleta-Mejía E, González-Chávez C, Ferrera-Cerrato R 1996. The use of arbuscular mycorrhizae to control onion white rot (*Sclerotium cepivorum* Berk.) under field conditions. *Mycorrhiza* 6: 253–257.

Vardavakis E 1989. Seasonal fluctuations of aerobic cellulolytic bacteria, and cellulase and respiratory activities in a soil profile under a forest. *Plant and Soil* 115: 145-150.

Vliet PCJ van, Beare MH, Coleman D 1995. Population dynamics and functional roles of Enchytraeidae (Oligochaeta) in hardwood forest and agricultural ecosystems. *Plant and Soil* 170: 199-207.

Zanen M, Bokhorst JG, ter Berg C, Koopmans CJ 2008. Investeren tot in de bodem – Evaluatie van het proefveld Mest Als Kans. Louis Bolk Instituut. Driebergen. Pp 38.