



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Een indicatorsysteem voor
ecosysteemdiensten van de bodem**
Life support functions revisited

RIVM Rapport 2014-0145
M. Rutgers et al.



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Een indicatorsysteem voor ecosysteemdiensten van de bodem

Life support functions revisited

RIVM Rapport 2014-0145

Colofon

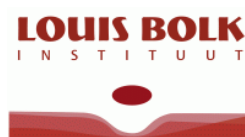
© RIVM 2014

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

Michiel Rutgers, RIVM
Ton Schouten, RIVM
Jaap Bloem, Alterra, Wageningen
Eke Buis, RIVM
Wim Dimmers, Alterra, Wageningen
Nick van Eekeren, Louis Bolk Instituut, Driebergen
Ron G.M. de Goede, Wageningen Universiteit
Gerard A.J.M. Jagers op Akkerhuis, Alterra, Wageningen
Harm Keidel, LIOS, Zeewolde
Gerard Korthals, Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, Lelystad
Christian Mulder, RIVM
Esther J.W. Wattel-Koekkoek, RIVM

Contact:

Michiel Rutgers
michiel.rutgers@rivm.nl



Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, directie Duurzaamheid, in het kader van project M/607406/10 Bodembiodiversiteit en ecosystemendiensten

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Een indicatorsysteem voor de ecosysteemdiensten van de bodem: Life support functions revisited

De bodem levert dankzij een omvangrijk en divers bodemleven vele 'ecosysteemdiensten' aan de mens, zoals het natuurlijk vermogen om water te zuiveren, infecties en plagen te onderdrukken, het vermogen om gewassen te verbouwen, het klimaat te reguleren, enzovoort. Een goede staat van deze diensten is daarom cruciaal voor een aangenaam leefklimaat en het voortbestaan van de mens. Met behulp van indicatoren kan worden gemeten hoe de 'ecosysteemdiensten' van de bodem ervoor staan.

Sinds 1997 is een veelheid aan indicatoren gebruikt in het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB). Het RIVM heeft met partners geanalyseerd welke van deze indicatoren bruikbaar zijn om ecosysteemdiensten te meten en welke nog aanvullend nodig zijn. De analyse is gemaakt met twaalf externe deskundigen in de bodemkunde, de bodemecologie, en het agrarische bodemadvies. De nieuwe set met indicatoren is *state of the art*, en is in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) opgesteld.

Een set indicatoren bestaat uit biologische, chemische en fysische bodemindicatoren en uit systeemgerichte indicatoren (die bijvoorbeeld informatie over het bodemmanagement bevatten, zoals het type mest en hoe wordt geploegd). Meer dan de helft van de chemische en biologische bodemindicatoren die eerder in het LMB zijn gebruikt, zijn nog steeds bruikbaar. Er zijn echter ook fysische en systeemgerichte indicatoren nodig om ecosysteemdiensten optimaal te kunnen beoordelen.

De indicatoren zijn ook bruikbaar om aan te geven of de beleidsdoelen in de Biodiversiteitsstrategie van de EU voor 2020 worden gerealiseerd (geen netto verlies van biodiversiteit). Deze doelen worden uitgedrukt in het zogeheten Natuurlijk Kapitaal: alle natuurlijke elementen die in staat zijn om ecosysteemdiensten te leveren. Op basis van informatie over het Natuurlijk Kapitaal van de Nederlandse bodem kunnen afwegingen worden gemaakt voor een duurzamer (lokaal) bodembeheer en gebiedsinrichting, zodat de ecosysteemdiensten van de bodem optimaal worden benut.

Trefwoorden: Ecosysteemdiensten, Natuurlijk kapitaal, Bodembiodiversiteit, Bodembioologische indicator (Bobi), Indicator, Proxy, Monitoring, Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit

Abstract

An indicator system for soil ecosystem services: life support functions revisited

Soil ecosystem services can be measured with a comprehensive set of indicators. A typical set is composed of soil biological and abiotic indicators and system-oriented indicators. A number of the biological and chemical indicators have been used in the National Soil Quality Monitoring Network. For a reliable assessment of soil ecosystem services the indicator set has to contain structure and system-oriented indicators as well. This report is the result of a multi-criteria analysis for the evaluation of the usefulness of indicators, which was performed by twelve professionals in soil science, soil ecology and agricultural consultancy.

The indicators can also be used for the measurement of the Natural Capital of soils and for the development of practical indicator sets to support local soil and landscape management. This will ultimately lead to a more optimal use of soil ecosystem services.

Keywords:

Ecosystem Services, Natural capital, Soil biodiversity, Biological indicator for Soil Quality (BiSQ), Indicator, Proxy, Monitoring, National Soil Quality Monitoring Network

Voorwoord

Ecosysteemdiensten, oftewel het nut van ecosystemen voor de mens, belichamen aspecten van de leefomgeving die voor het milieubeleid en het bodembeheer van cruciaal belang zijn. Ecosysteemdiensten zijn een hulpmiddel om een kwantitatieve invulling te geven aan de antropocentrische opvatting over de relatie tussen de mens en zijn leefomgeving. Om dit uit te werken voor het milieubeleid en het bodembeheer zijn er indicatoren en maatlaten (graadmeters) voor ecosysteemdiensten nodig.

In 1997 heeft het RIVM met medewerking van deskundigen in de bodemecologie een rapport gepubliceerd met een beschrijving van het Bodembologisch indicatorsysteem (Bobi) voor de Life Support Functies (LSF) van de bodem (Schouten et al. 1997). Dit indicatorsysteem is met enkele kleine aanpassingen in twee vijfjarige meetrondes van het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB) succesvol toegepast.

Dit rapport beschrijft in detail de zoektocht naar een indicatorsysteem voor de ecosysteemdiensten van de bodem. Tevens werden bestaande indicatoren voor de bodembiodiversiteit geëvalueerd. Vele betrokken collega's, intern en extern, hebben met hun expertise in de bodemkunde, bodemecologie en het agrarische bodemadvies aan het onderzoek bijgedragen via deelname aan workshops en discussies over het onderwerp. We zijn de volgende personen hier zeer erkentelijk voor: Prof. H. Siepel (Radboud Universiteit Nijmegen), Prof. L. Brussaard (Wageningen Universiteit), Prof. M.P. Berg (Vrije Universiteit Amsterdam), Prof. A.M. Breure (RIVM, Radboud Universiteit Nijmegen), Prof. W. van der Putten (Nederlands Instituut voor Ecologie, Wageningen Universiteit), Dr. M.P.W. Sonneveld† (Wageningen Universiteit), Prof. O. Oenema (Alterra, Wageningen Universiteit) en Prof. P.C. de Ruiter (Wageningen Universiteit).

De instrumenten en methoden die bij dit onderzoek zijn toegepast werden mede ontwikkeld in het EU-project Ecofinders. We zijn de volgende personen dankbaar voor hun bijdragen aan de ontwikkeling van de multicriteria-instrumenten: Prof. B.S. Griffiths (SRUC, Edinburgh), Dr. R. Creamer (TEAGASC, Ireland), Dr. D. Stone (TEAGASC, Ireland) en Dr. C. Gardi (JRC, Ispra, Italy).

Dankzij alle bijdragen ligt er een voorstel voor een *state of the art* indicatorsysteem voor de ecosysteemdiensten van de bodem. Onderdelen van dit indicatorsysteem zijn ook geschikt om de bodembiodiversiteit te meten, zodat het resultaat van de inspanningen om het biodiversiteitsverlies een halt toe te roepen gevolgd kan worden.

Inhoud

Managementsamenvatting – 11

1 Inleiding – 15

- 1.1 Achtergrond – 15
- 1.2 Ecosysteemdiensten en bodembiodiversiteit hanteerbaar maken – 19
- 1.3 Meten van bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten – 22
- 1.4 Doel van het onderzoek en leeswijzer – 27

2 Bestaande indicatoren en indicatorsystemen – 29

- 2.1 Bodembioologische indicator 1997-2012 – 29
- 2.2 Andere sets bodemindicatoren – 37

3 Aanpak en methodiek – 39

- 3.1 Inleiding – 39
- 3.2 Eerste workshop (bodemecologie) – 40
- 3.3 Tweede workshop (bodemkunde en bodemecologie) – 40
- 3.4 Multicriteria-analyse (MCA) – 41

4 Resultaten – 45

- 4.1 Eerste workshop (bodemecologie) d.d. 9 september 2011 – 45
- 4.2 Tweede workshop (bodemkunde) d.d. 9 december 2011 – 48
- 4.3 Eerste stap van de MCA – 50
- 4.4 Tweede stap in de MCA – 53
- 4.5 Derde stap in de MCA: rangordening van indicatoren – 61
- 4.6 Evaluatie van de MCA en de workshops – 68

5 Toepassing van indicatoren in een bodemmeetnet – 79

- 5.1 Selectie van indicatoren voor een bodemmeetnet – 79
- 5.2 Indicatoren voor de beoordeling van ecosysteemdiensten van de bodem – 80
- 5.3 Indicatoren voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit – 82

6 Proxy's voor ecosysteemdiensten – 83

7 Duurzaam bodembeheer en ruimtelijke inrichting – 85

- 7.1 Maatschappelijke betekenis van bodeminformatie – 85
- 7.2 Beperkte middelen, maximale kennisbasis – 90

Literatuur – 93

Bijlage 1. Ecosysteemdiensten van de bodem – 101

Bijlage 2. Verslag van de workshop op 9 september 2011 – 105

Bijlage 3. Verslag van de workshop op 14 december 2011 – 113

Bijlage 4. Indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten – 117

Bijlage 5. Gedeaggregeerde indicatoren in de derde stap van de multicriteria-analyse – 119

Bijlage 6. Criteria voor de multicriteria-analyse inclusief klassegrenzen—123

Bijlage 7. Indicatoren voor een landelijk bodemmeetnet—125

Managementsamenvatting

Doel van het rapport

Dit onderzoek werd uitgevoerd om vast te stellen welke indicatoren nodig zijn om ecosystemendiensten en de toestand van het Natuurlijk Kapitaal van de bodem te bepalen. Informatie over het Natuurlijk Kapitaal van de bodem is nodig om enerzijds te voldoen aan internationale afspraken om het Natuurlijk Kapitaal op een nationaal niveau in beeld te brengen, en anderzijds om bodemgebruikers informatie te leveren, zodat deze optimaal kunnen profiteren van de ecosystemendiensten die duurzaam beheerd Natuurlijk Kapitaal voortbrengt. Verder geeft het rapport adviezen om de benodigde bodeminformatie via indicatoren en meetprogramma's te organiseren.

Achtergronden

De bodem in Nederland vertegenwoordigt een belangrijk deel van het Natuurlijk Kapitaal. Dankzij de bodem realiseren we een omvangrijke agrarische productie, winnen we grote hoeveelheden drinkwater met een goede kwaliteit, laten we gevarieerde natuur tot ontwikkeling komen, en houden we droge voeten ten tijde van wateroverlast door klimaatverandering. Dit is een greep uit aspecten waardoor we de bodem ook wel de 'groene motor van het milieu' noemen.

Om twee redenen is het nodig om de toestand en de kwaliteit van het Natuurlijk Kapitaal van de bodem te bepalen:

1. Diverse maatschappelijke actoren maken gebruik van het Natuurlijk Kapitaal via de ecosystemendiensten van de bodem, zonder dat de (maatschappelijke) kosten en baten die ermee gemoeid zijn, worden verrekend. Omdat geen of onvoldoende afstemming plaatsvindt tussen de verschillende gebruikers, worden bodems eenzijdig en niet optimaal benut, staat het Natuurlijk Kapitaal van de bodem onder druk en worden kansen gemist.
2. De betekenis van het Natuurlijk Kapitaal voor de maatschappij wordt nog onvoldoende onderkend. Door toenemende welvaart en een groeiende wereldbevolking worden we steeds afhankelijker van de bodem voor onder meer voldoende voedsel en schoon drinkwater. Een gezonde en goed functionerende bodem is derhalve waardevol en cruciaal voor ons voortbestaan.

In diverse nationale en internationale beleidskaders is er aandacht voor dit onderwerp. Na het verschijnen van de Millennium Ecosystem Assessment (MEA 2005) is op mondiaal (Convention on Biological Diversity; www.cbd.int) en Europees niveau (EU-biodiversiteitsstrategie; COM 2011) als doelstelling vastgelegd dat het verlies aan biodiversiteit per 2020 gestopt moet zijn (*no net loss*) en per saldo 15% van de gedegenerende ecosystemen hersteld moet worden. In Nederland is dit belegd in de 'Uitvoeringsagenda Natuurlijk Kapitaal voor behoud en duurzaam gebruik van de biodiversiteit' die op 22 juni 2013 aan de Tweede Kamer is aangeboden. Naar voorbeeld van het Verenigd Koninkrijk gaat Nederland een 'National Ecosystem Assessment' uitvoeren. Het resultaat daarvan, informatie over het functioneren van de ecosystemen en de diensten die zij ons (potentieel) leveren, wordt bijeengebracht in de Atlas Natuurlijk Kapitaal (ANK). Overheden kunnen de informatie gebruiken om te komen tot duurzaam bodembeheer en om afwegingen te maken voor de inrichting van gebieden met als oogmerk een optimale benutting van het Natuurlijk Kapitaal.

Om de informatie over het Natuurlijk Kapitaal van de bodem aan bedrijven, burgers en overheid te kunnen leveren zijn actuele gegevens nodig. Deze

worden verzameld met indicatoren die bepaalde kenmerken van de bodem en leefomgeving meten. Op het nationale niveau worden diverse bodemindicatoren toegepast in landelijke meetnetten (TCB 2007). Hiermee wordt een overzicht verkregen van de toestand van de bodem op een landelijke schaal. Om het handelingsperspectief op een kleinere ruimtelijke schaal te onderbouwen met valide gegevens worden bij voorkeur minder, maar wel voor een deel dezelfde indicatoren toegepast in een gebieds-, bedrijfs- of perceelsgerichte context, om het effect van specifieke maatregelen te duiden.

Omdat bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten (de onderdelen van het Natuurlijk Kapitaal van de bodem) containerbegrippen zijn die niet rechtstreeks gemeten kunnen worden, zijn er proxy's of proxy-indicatoren nodig. Met proxy's worden de kenmerken van de bodem bewerkt tot handzame en praktische informatie over de toestand van het Natuurlijk Kapitaal en voor het bepalen van de effectiviteit van maatregelen in het kader van duurzaam bodembeheer en gebiedsinrichting.

Dit onderzoek: selectie van geschikte indicatoren

Dit rapport beschrijft een onderzoek om te bepalen welke indicatoren geschikt zijn om de bodemgegevens te leveren voor de bepaling van de toestand van het Natuurlijk Kapitaal. In twee workshops met experts in de bodemecologie en bodemkunde zijn de bodemonderzoeksprogramma's (onderzoeksprogramma 'Bodembiodiversiteit' van IenM/RIVM en delen van het EZ/DLO-onderzoeksprogramma 'Bodem') geëvalueerd en zijn de nieuwe ontwikkelingen bediscussieerd. Vervolgens zijn alle bestaande en nieuwe indicatoren gegroepeerd in chemische, fysische en biologische indicatoren en (samengestelde) systeemindicatoren en beoordeeld aan de hand van de volgende criteria:

1. vermogen om het Natuurlijk Kapitaal (bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten) te kwantificeren;
2. gevoeligheid van de indicator (sterkte signaal en signaal-ruisverhouding);
3. prijs-prestatieverhouding;
4. praktische acceptatie, standaardisatie en mogelijkheden voor routinematige toepassing in een meetnet;
5. ruime mogelijkheden voor uitvoering door deskundig personeel in bestaande laboratoria.

Twaalf deskundigen met een achtergrond in de bodemkunde, bodemecologie (inclusief microbiologie en bodemfauna) en het agrarisch bodemadvies – de auteurs van dit rapport – hebben alle indicatoren beoordeeld. De informatie werd verzameld met behulp van digitale vragenformulieren waar per potentiële indicator de verlangde informatie op een schaal van 0 (slechte score; relatief ongeschikte indicator) tot 5 (goede score, relatief geschikte indicator) gescoord werd. Om een totaalbeeld uit de resultaten samen te stellen werd de informatie verwerkt met behulp van een multicriteria-analyse (MCA).

Deze analyse leverde de volgende resultaten op hoofdlijnen op:

1. Eén indicator? Er bestaat niet één unieke indicator die de informatie levert over alle kenmerken die belangrijk zijn om het Natuurlijk Kapitaal van de bodem te bepalen. Er zijn meerdere ecosysteemdiensten en die vragen allemaal om een specifieke invulling waarin bepaalde kenmerken van de bodem een plek hebben. Een adequate set met indicatoren voor een of meer ecosysteemdiensten bestaat dus uit meerdere, vooraf zorgvuldig geselecteerde, indicatoren.

2. Verschillende typen indicatoren: volgens de deelnemers zijn alle geëvalueerde groepen van indicatoren geschikt voor de bepaling van onderdelen die samen de toestand van het Natuurlijk Kapitaal uitmaken. Abiotische bodemindicatoren (zoals de zuurgraad, de indringweerstand en de bodemstructuur), biologische bodemindicatoren (zoals bacteriebiomassa en aantal regenwormen) en systeemindicatoren (zoals vruchtwisseling en bodembewerking) zijn allemaal van belang en bruikbaar voor de bepaling van de toestand van het Natuurlijk Kapitaal. De conclusie is dat een gebalanceerde set indicatoren voor de berekening van de verschillende facetten van het Natuurlijk Kapitaal bij voorkeur bestaat uit indicatoren uit de verschillende groepen. Zo'n brede set indicatoren verkleint op een efficiënte wijze de modelonzekerheid die altijd aanwezig is bij de bepaling van de (complexe) toestand van het Natuurlijk Kapitaal in een beperkt aantal kentallen.
3. Ecosysteemdiensten versus bodembiodiversiteit: er zijn goede mogelijkheden om zowel de bodembiodiversiteit als de ecosysteemdiensten te bepalen op basis van de kenmerken van de bodem. Afhankelijk van de gewenste informatie zal er een specifieke set indicatoren moeten worden ingezet. De informatie van de verschillende kenmerken kan met behulp van een multicriteria-analyse worden gebruikt om de bodembiodiversiteit of de ecosysteemdiensten van de bodem te bepalen. Dit is de mening van vele deskundigen, onafhankelijk van hun achtergrond.
4. Organische stof: als indicator scoort het organische stofgehalte *overall* genomen goed, ondanks het feit dat de indicator relatief ongevoelig is. Organische stof als kenmerk van de bodem is de bron van koolstof en energie voor het bodemleven en een sleutelfactor voor de bodembiodiversiteit en vele ecosysteemdiensten, maar het reageert traag op veranderingen in het bodembeheer. Een uitgebalanceerde set indicatoren voor het Natuurlijk Kapitaal van de bodem bevat daarom ook andere chemische, fysische en biologische bodemindicatoren, én systeemindicatoren.
5. Nieuwe technieken: moleculair-biologische technieken (bijvoorbeeld DNA-technieken) dragen een grote belofte in zich, maar zijn momenteel nog niet voldoende ver in hun ontwikkeling voor routinematige toepassing in een meetnet. Remote-sensingtechnieken ontwikkelen zich snel, maar de informatie is nog niet eenduidig vertaalbaar naar het Natuurlijk Kapitaal van de bodem.
6. Proxy's voor het Natuurlijk Kapitaal en ecosysteemdiensten: de twaalf deskundigen hebben geschat hoe goed een specifieke indicator toegepast kan worden om bepaalde ecosysteemdiensten van de bodem te kwantificeren. Deze inschattingen zijn ook bruikbaar als startpunt voor het ontwerpen van proxy's voor deze ecosysteemdiensten.

Conclusie en aanbeveling

Door een aantal van de als 'goed' beoordeelde indicatoren uit elk van de drie categorieën toe te passen in een landelijk meetnet wordt een breed en representatief beeld verkregen van de verschillende facetten van het Natuurlijk Kapitaal van de bodem. De inspanning die voor het verkrijgen en het bijhouden van een representatief beeld nodig is, is vergelijkbaar met de vroegere meetinspanning in het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Ongeveer hetzelfde aantal locaties en ongeveer hetzelfde aantal indicatoren zijn nodig voor een representatief beeld met een landelijke dekking van ongeveer 70%.

Veel indicatoren die bij dit onderzoek een goede beoordeling hebben gekregen, zijn in het verleden bij monitoring van de bodem toegepast en hebben waardevolle gegevens opgeleverd die voor de bepaling van de toestand van

het Natuurlijk Kapitaal gebruikt kunnen worden. Bij voortzetting blijven de oude gegevens waardevol voor het vaststellen van de toestand en de trends, en zijn lacunes (ontbrekende locaties of metingen) met een beperkt budget snel opgevuld. Voor optimaal en efficiënt gebruik van beperkte aantallen bodemgegevens wordt aanbevolen om waar mogelijk dezelfde indicatoren toe te passen en om meerdere sets gegevens bij elkaar te brengen in één (meta)datasysteem of 'informatiehuis'. Voor bodem is de informatie momenteel nog verbrokkeld en beperkt beschikbaar bij diverse onderzoeksinstellingen en soms slechts via (oude) projectdossiers.

De indicatoren die in dit rapport beschreven zijn, kunnen gebruikt worden om:

- De toestand van het Natuurlijk Kapitaal in Nederland te bepalen. Een toekomstige toepassing is de invulling van de Atlas Natuurlijk Kapitaal voor het compartiment bodem, die in het kader van de 'Uitvoeringsagenda Natuurlijk Kapitaal voor behoud en duurzaam gebruik van de biodiversiteit' (EZ 2013) wordt opgesteld.
- Inzake bodembeheer en gebiedsinrichting goede afwegingen te kunnen (laten) maken door stakeholders, die door hun gebruik van de ecosysteemdiensten van de bodem afhankelijk zijn van het Natuurlijk Kapitaal.
- Het effect van maatregelen op een kleinere schaal (gebied, bedrijf of perceel) te bepalen om het handelingsperspectief voor de bodembeheerder te sturen en te onderbouwen. Hieraan kunnen tevens afrekensystemen voor de kosten en de baten worden voorzien van kwantitatieve informatie.
- De verduurzaming van de landbouw, en dus ook de 'vergroening van het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid (GLB)' van de EU te ondersteunen.
- Op het landelijke niveau toe te passen als referentie voor natuurlijke variatie en voor een bepaling van een goede of slechte toestand.

De uitkomst van dit onderzoek kan gebruikt worden voor de programmering vanaf 2015 van de 'kennisvragen' van het ministerie van IenM en EZ die sturend zijn voor het RIVM-onderzoek, het onderzoek bij andere kennisinstituten (bijvoorbeeld DLO-instituten), universiteiten en KNAW-instituten.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

“In het kader van het ontwikkelen van graadmeters (indicatoren en maatlaten: red.) voor milieuverkenningen is er behoefte aan een gestandaardiseerde en algemeen geaccepteerde methode om de toestand van soorten en ecosystemen eenduidig te beschrijven.”

Dit schreven Alkemade en Schouten (1995) in hun eerste rapport over het meten van de bodembiodiversiteit in Nederland. Twee jaar later publiceerden Schouten et al. (1997) de zogenoemde Bodembioïologische indicator (Bobi) in het rapport 'Een indicatorsysteem voor life support functies van de bodem in relatie tot biodiversiteit.' De beleidsmatige belangstelling voor de bodembiodiversiteit kwam voort uit het Strategisch Plan van Aanpak voor het biodiversiteitsbeleid (SPA 1995). Nu, in 2013, is het citaat weer actueel. Recent zijn de zogenoemde ecosysteemdiensten beleidsmatig in de belangstelling gekomen. Hiervoor zijn wederom indicatoren en graadmeters nodig: *Life Support Functions revisited*.

De vraag is of er niet al een keur aan graadmeters voorhanden is. De verkenningen en de balansen van het Planbureau van de Leefomgeving hebben een stevige staat van dienst (RIVM 1989, PBL 2012). Al enige tijd roert ook de internationale gemeenschap zich, zoals blijkt uit de rapporten over de 'State and outlook of the European Environment' (EEA 2010) en de Millennium Ecosystem Assessment (MEA 2005). De initiatieven 'The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB)' en de 'National Ecosystem Assessment (NEA)' staan momenteel in de belangstelling als uitvloeisel van de MEA. Het Verenigd Koninkrijk, Spanje en Portugal hebben al NEA's opgeleverd, met zeer verschillende diepgang en actualiteit. Nederland en Polen zijn ermee bezig. Graadmeters voor ecosysteemdiensten van de bodem zijn alleen indirect een onderdeel van deze initiatieven.

1.1.1 Bodembeleid en ecosysteemdiensten

Het bodembeleid en -beheer hebben zich tot nu toe vooral thematisch ontwikkeld, waarbij de focus werd gericht op de factoren van het menselijk handelen die de bodemkwaliteit (negatief) beïnvloeden. De opdeling in de jaren tachtig en negentig van de vorige eeuw volgens de zogenoemde V-thema's (verontreiniging, verzuring, vermesting, verstoring, et cetera) is hier de uitdrukking van. De focus in het bodembeleid op afzonderlijke thema's is te verklaren, doordat de bodem een tamelijk traag en onzichtbaar milieu-compartiment is; als de problemen zichtbaar opdoemen, zijn de gevolgen rampzalig en meestal niet meer omkeerbaar. De focus op de oorzaken, gestratificeerd volgens de V-thema's, helpt dus om op tijd te kunnen ingrijpen als het mis dreigt te gaan. Op deze wijze kan het milieubeleid zich sneller en effectiever richten op het wegnemen van de oorzaken van bekende bodembedreigingen. In de Europese strategie voor de bescherming van de bodem is dit uitgewerkt in een voorstel om bodembeleid te ontwikkelen op negen concrete bodembedreigingen (Tekstkader 1; COM 2006).

Tekstkader 1. In Europa geïdentificeerde bodembedreigingen (COM 2006)

De bodem staat bloot aan een reeks aantastingsprocessen en bedreigingen. Deze omvatten:

- erosie;
- verlies van organische stof;
- plaatselijke en diffuse bodemverontreiniging;
- bodemafdekking;
- bodemverdichting;
- afname van de biodiversiteit in de bodem;
- verzilting;
- overstromingen en aardverschuivingen.

Een combinatie van een aantal van deze bedreigingen kan in episodisch of chronisch droge gebieden uiteindelijk leiden tot woestijnvorming. Verzuring als thema werd in een later stadium aan het rijtje bedreigingen toegevoegd.

In de Bodembeleidsbrief (VROM 2003) werd een transitie aangekondigd. Het TCB-advies (TCB 2003) over ecologische grondslagen voor het bodembeheer ondersteunde deze transitie. Het bodembeleid werd in twee sporen onderverdeeld: een 'klassiek' spoor gericht op de bedreigingen voor de bodemkwaliteit die het gevolg zijn van het menselijk handelen, en een nieuw aanvullend spoor gericht op het optimaliseren van het gebruik en benutting van de leefomgeving, onder de voorwaarde dat de bodem duurzaam beheerd wordt. Het nieuwe spoor geeft uitdrukking aan de behoefte van mensen om het milieu, inclusief de bodem, te benutten, via de ecosysteemdiensten die het Natuurlijk Kapitaal levert. In dat spoor is de opvatting over bodemkwaliteit geëvolueerd: van een focus op beschermen, naar een focus op benutten. In de Bodembeleidsbrief (VROM 2003) is dit als volgt verwoord:

"Het ecologisch functioneren zal worden beoordeeld op basis van chemische, fysische en biologische parameters. De bodem wordt niet langer beschouwd als een statisch compartiment maar als een dynamisch ecosysteem. Het vermogen van de bodem om nu en in de toekomst zo goed mogelijk maatschappelijke diensten te leveren is vertrekpunt."

De Technische commissie bodem heeft onlangs een advies opgesteld over de praktische betekenis van ecosysteemdiensten voor het bodembeleid en het bodembeheer (Tekstkader 2; TCB 2012).

Tekstkader 2. Excerpt uit de samenvatting van Advies beter besluiten met ecosysteemdiensten (TCB 2012)

“Een te intensief gebruik van de bodem of een verkeerde combinatie van bodemeigenschappen en gewenste ecosysteemdiensten kan leiden tot achteruitgang van het ecosysteem en verminderde levering van ecosysteemdiensten. Een bodemecosysteem is redelijk te verduurzamen door sturing op een aantal basiscomponenten, zoals het bodemleven, vruchtbaarheid, water, buffer- en reactorfunctie, structuur, doorluchting, verontreiniging en afdekken.

Inmiddels wordt er door de overheid gezocht naar manieren om meer concreet via het ecosysteemdienstenconcept invulling te geven aan duurzamer gebruik van natuurlijke hulpbronnen, waaronder de bodem. Dit moet worden gezien tegen een achtergrond van een aantal maatschappelijke ontwikkelingen. Enerzijds wordt verdergaande overheidsbemoeienis door diverse maatschappelijke partijen en de overheid zelf als ongewenst ervaren. Anderzijds zijn de overheidsmiddelen voor natuur- en milieubeleid ingekrompen, wat noopt tot het zoeken naar andere vormen van overheidsturing. De overheid lijkt tegen deze achtergrond te kiezen voor een sturingsfilosofie die uitgaat van de energie in de samenleving.

Ecosystemen leveren ecosysteemdiensten voor mensen, dieren en planten. We hebben alle ecosysteemdiensten nodig, maar niet alle ecosysteemdiensten kunnen en hoeven overal en tegelijkertijd geleverd te worden. Duurzaam gebruik van ecosystemen kan worden gezien als een gebruik dat de levering van zoveel mogelijk gewenste ecosysteemdiensten nu en in de toekomst mogelijk maakt. Het gaat om het behoud en het ontwikkelen van vitale ecosystemen die nu en in de toekomst in onze behoeften en die van planten en dieren kunnen voorzien.

Het belang van een hoogwaardige bodem en ondergrond als voorwaarde voor tal van ecosysteemdiensten wordt buiten de bodemsector zelf nog beperkt onderkend. Voor velen blijft de bodem een weinig zichtbare, onaantrekkelijke bruine massa. De noodzaak van lange termijn onderhoud en zorg voor de bodem wordt gemakkelijk over het hoofd gezien, omdat de bodem vooral ondersteunende en intermediaire ecosysteemdiensten levert. Deze zijn weinig zichtbaar, lastig te waarderen en vallen buiten beeld als het gaat om economisch waarderen.

De TCB concludeert dat er kennis en praktische methoden beschikbaar zijn om het ecosysteemdienstenconcept in te zetten voor verduurzaming van de maatschappij en te komen tot groene groei. Het concept biedt grip op de omgang met natuurlijke hulpbronnen en geeft beter inzicht in de belanghebbenden bij het nemen van beslissingen die natuurlijke hulpbronnen raken. Het concept kan leiden tot synergie tussen tot nu toe gescheiden beleids-, beheer- en onderzoeksvelden.

Het toepassen van het ecosysteemdienstenconcept kan bijdragen aan duurzamer gebruik van ecosystemen. Door de complexe samenhang tussen ecosysteemdiensten en de onlosmakelijke verbinding tussen ecosystemen en bodem leidt de toepassing van het ecosysteemdienstenconcept dan ook tot verduurzamen van het bodemgebruik en -beheer. Andersom geldt dit ook; duurzaam bodemgebruik is een voorwaarde om tot vitale ecosystemen te komen die duurzaam ecosysteemdiensten leveren.

De rijksoverheid heeft een faciliterende en kaderstellende rol om decentrale overheden en eindgebruikers te helpen om het ecosysteemdienstenconcept optimaal toe te passen. Het gaat hierbij om het verankeren van het concept in de kennisinfrastructuur, voorlichting aan decentrale overheden en eindgebruikers en het geven van prikkels om deze partijen in de gewenste richting te beïnvloeden. De TCB beveelt dit voort te zetten en te verbreden. In het kader van de ambities voor groene groei en de duurzaamheidsagenda beveelt de TCB aan om te stimuleren dat er een breder en

evenwichtiger beeld ontstaat van natuurlijke hulpbronnen en de veranderingen daarin, in combinatie met maatschappelijke en economische ontwikkelingen.

Omdat de bodem vooral ondersteunende ecosysteemdiensten levert die minder zichtbaar zijn en hoofdzakelijk via andere meer in het oog springende ecosysteemdiensten te waarderen zijn, vindt de TCB "dat het basisbeschermingsniveau dat de Wet Bodembescherming levert in stand moet blijven, ook als deze wet opgaat in de Omgevingswet."

Op inhoudelijk gebied vindt er ook verdieping van het begrip milieukwaliteit plaats, dankzij stimulering van het bodemecologisch onderzoek via diverse onderzoeksprogramma's zoals het 7^e kaderprogramma van de EU en de NWO-programma's Biodiversiteit en Biodiversiteit Werkt. Ecosysteemdiensten zijn ook bij deze onderzoeksprogramma's het centrale thema.

Ecosysteemdiensten zijn gedefinieerd als de diensten die ecosystemen leveren aan de mens. Het essentiële element van dit concept is de koppeling tussen het ecosysteem en een benoembaar nut (product, dienst, proces) voor de mens. De bodem is een belangrijke drager van vele ecosysteemdiensten. De bodem wordt ook wel de 'groene motor van het milieu' genoemd (Rutgers en Dirven-van Breemen 2012); je ziet er weinig van, maar de bijdrage van de bodem aan ecosysteemdiensten is fenomenaal. In Nederland is de bodem het meest in gebruik als landbouwbodem (ongeveer 65% van het totale landoppervlak). Een traditioneel belangrijke ecosysteemdienst van de landbouwbodem is bodemvruchtbaarheid. In combinatie met geschikte klimatologische condities kan hiermee veel voedsel van een goede kwaliteit gerealiseerd worden. De groene functies (natuur en overig groen) en het bedekte oppervlak (wonen, werken en infrastructuur) nemen ieder ongeveer 15% van het oppervlak in Nederland in beslag. Belangrijke ecosysteemdiensten hierbij zijn respectievelijk de mogelijkheid tot recreëren door het bieden van ruimte, rust en verblijf-mogelijkheden, inspiratie en de draagfunctie voor leidingen, transport-verbindingen, bouwwerken en overige infrastructuur.

Naast deze door de gebruiksfunctie bepaalde en gewenste ecosysteemdiensten levert de bodem tal van aanvullende ecosysteemdiensten, waarvan het belang substantieel is, maar nog onvoldoende op waarde wordt geschat. Voorbeelden hiervan zijn het zelfreinigende vermogen van de bodem waardoor grond- en oppervlaktewater schoon blijven, klimaatfuncties zodat we een aangenaam lokaal en mondiaal klimaat hebben met kooldioxide- en zuurstofconcentraties binnen nauwe marges, en de biodiversiteit die ervoor zal zorgen dat we op termijn allerlei nieuwe medicijnen kunnen ontwikkelen op basis van nog onontgonnen genetische variatie. Dit is slechts een greep uit de vele ecosysteemdiensten die de bodem levert.

Intensief gebruik van onze ecosystemen voor landbouw, wonen, werken en infrastructuur zet het Natuurlijk Kapitaal onder druk. De bodem- en waterkwaliteit zijn naar Europese maatstaven niet goed (TCB 2012). Daarnaast vormt de toenemende drukte in de ondergrond een groeiend aandachtspunt. Hierdoor worden bepaalde ecosysteemdiensten niet optimaal benut en vindt afwenteling plaats naar elders en later en staat de biodiversiteit van de bodem onder druk.

1.1.2 *Biodiversiteitsbeleid*

In het biodiversiteitsbeleid is het terugdringen van de afname van biodiversiteit een doel (EZ 2013). Nederland sluit aan bij het Europese milieubeleid inzake de biodiversiteit en heeft het biodiversiteitsverdrag geratificeerd (COM 2011). Een van de hoofddoelen is als volgt geformuleerd:

“Het biodiversiteitsverlies en de achteruitgang van ecosysteemdiensten in de EU uiterlijk in 2020 tot staan brengen en zo veel mogelijk ongedaan maken, en tevens de bijdrage van de Europese Unie tot het verhoeden van het wereldwijde biodiversiteitsverlies opvoeren.”

Een belangrijk onderdeel van de biodiversiteitsstrategie zijn zes prioritaire doelstellingen en begeleidende acties om de bedreigingen voor de biodiversiteit sterk te verminderen. Tot de acties behoren:

- volledige uitvoering van de bestaande natuurbeschermingswetgeving en het netwerk van natuurreservaten om te zorgen voor belangrijke verbeteringen van de instandhouding van habitats en soorten;
- waar mogelijk verbetering en herstel van de ecosystemen en ecosysteemdiensten, met name door het verhoogde gebruik van groene infrastructuur;
- zorg voor de duurzaamheid van land- en bosbouwactiviteiten;
- bescherming en beveiliging van de EU-visbestanden;
- beheersing van invasieve soorten, die een groeiende oorzaak zijn van biodiversiteitsverlies in de EU;
- het opvoeren van de EU-bijdrage aan gezamenlijke mondiale maatregelen om biodiversiteitsverlies af te wenden.

Een van de eisen die aan de uitvoering gesteld worden is een adequate monitoring van de biodiversiteit in Nederland, om het effect van het milieubeleid te kunnen evalueren.

1.2 **Ecosysteemdiensten en bodembiodiversiteit hanteerbaar maken**

Bodemkwaliteit, bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten zijn containerbegrippen die een nadere specificatie nodig hebben om effectief te kunnen worden toegepast bij het wetenschappelijke onderzoek, bij het milieubeleid en -beheer, en in de praktijk.

1.2.1 *Bodemkwaliteit*

De Wet bodembescherming (Wbb) is relatief snel ingevoerd om het probleem van bodemverontreiniging het hoofd te bieden. Bodemkwaliteit is via de Wbb hoofdzakelijk operationeel gemaakt via de concentraties van bodemverontreinigende stoffen, het volume van de lokale verontreiniging en de omvang van verontreinigde locatie. Een stelsel van normen wordt toegepast om te bepalen of de bodemkwaliteit voldoet aan de eisen voor schone, licht verontreinigende of ernstig verontreinigde grond. De term bodemkwaliteit in relatie tot bodemverontreiniging of andere bedreigingen (V-thema's) wordt hier verder niet uitgewerkt, maar zie bijvoorbeeld het themanummer van het tijdschrift Bodem over de Wbb (Bodem 2012).

Andere (milieu- en natuur)beleidskaders hebben vaak ook een indirecte beschermende werking voor de bodem, bijvoorbeeld via de mestwetgeving, de beperkingen op het gebruik van bestrijdingsmiddelen, het bouwstoffenbesluit en de aankoop van terreinen (vaak in gebruik voor landbouw) ten behoeve van de uitbreiding van de Ecologische Hoofdstructuur.

1.2.2 *Bodembiodiversiteit*

Biodiversiteit wordt klassiek gedefinieerd als de graad van verscheidenheid aan levensvormen (soorten en genen) binnen een gegeven ecosysteem of ander begrensd systeem. In het wetenschappelijke onderzoek zijn diverse maatlatten en indicatoren ontwikkeld om biodiversiteit voor beleid en wetenschap te kwantificeren (bijv. Bongers 1990, Yeates 2003, Mulder et al. 2012, Vonk et al. 2013, Heink en Kowarik 2010, Pavoine en Bonsall 2011, Vačkář et al. 2012). Er bestaat geen unieke en universeel toepasbare maat voor de biodiversiteit. Afhankelijk van de context kunnen verschillende maatlatten en indicatoren los van elkaar worden toegepast, binnen de hierboven geformuleerde klassieke definitie voor biodiversiteit. Het gaat dan om maatlatten voor de rijkdom en verdeling van soorten, de verscheidenheid aan soorten binnen bepaalde taxonomische grenzen en buiten deze begrensde levensgemeenschappen.

Voor de bodembiodiversiteit schieten klassieke definities te kort. Dit heeft enerzijds te maken met het feit dat in de beleidsmatige context bodembiodiversiteit vooral geassocieerd wordt met het functioneren van de levende bodem, onder andere omdat bodemorganismen niet geassocieerd worden met uitsterven van dieren en omdat agro-ecosystemen en natuurterreinen meestal los van elkaar worden ingericht en beheerd. Anderzijds is er consensus in de wetenschappelijke wereld dat een klassieke soortenbenadering te beperkt is om de biodiversiteit van de bodem adequaat te bestuderen. Voor het bodembeleid en -beheer is het niet zinvol om de totale verscheidenheid aan soorten en genen in de bodem te kennen en te meten ($>10^4$ soorten per gram gezonde zwarte grond; bijv. Torsvik et al. 1996).

Om bodembiodiversiteit in het milieubeleid, in het bodembeheer en bij de ruimtelijke inrichting een concrete betekenis te kunnen geven, is daarom een nieuwe afbakening nodig. Het gaat bij bodembiodiversiteit niet alleen om de verscheidenheid van soorten en genen, maar ook om het functioneren van de bodem (Figuur 1), en dus om de processen die in een levende bodem plaatsvinden. Operationalisering van dit geheel vindt plaats binnen de beleidskaders van de Wbb (en in de nabije toekomst de Omgevingswet), de Structuurvisie Ondergrond (STRONG), de Europese bodemstrategie, het nationale en Europese landbouwbeleid en het biodiversiteitsbeleid.

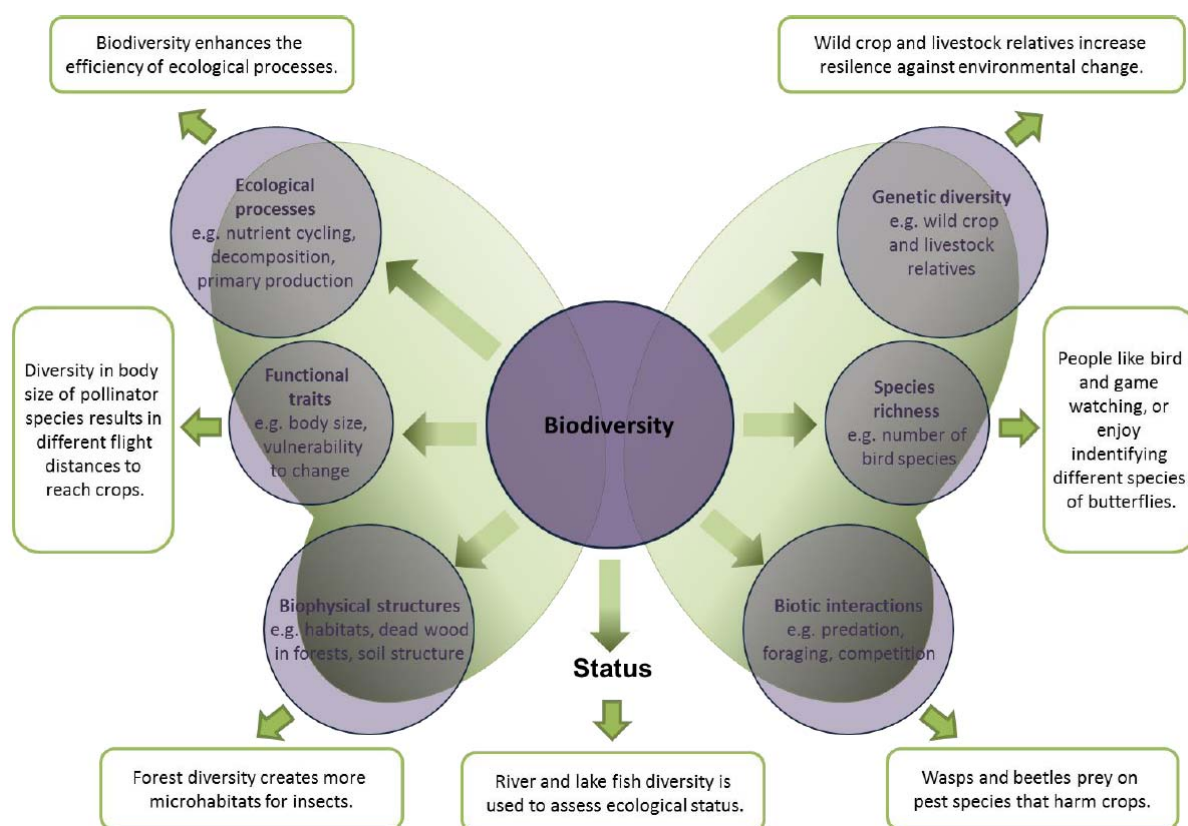
Bodembiodiversiteit heeft binnen deze toegepaste kaders betrekking op de levende aspecten van de bodem (bijvoorbeeld ecologische processen en functies). Het omvat praktisch gezien de volgende hoedanigheden:

1. activiteitskenmerken: de omvang, de activiteit en het volume van het bodemleven, en de aantallen bodemorganismen;
2. structuurkenmerken: de verscheidenheid van soorten, genen en processen die bijdragen aan de complexiteit van het systeem;
3. systeemkenmerken: de (trofische en niet-trofische) relaties tussen organismen, tussen organismen en de omgeving, en de dynamiek en stabiliteit in het systeem, inclusief alle ecologische relevante variaties in ruimte en tijd.

Deze drie hoedanigheden zijn een onderdeel van het 'natuurlijke' (eco)systeem dat in staat is om dankzij het bodemleven vele ecosysteemdiensten te leveren (alternatieve structuren voor onderzoek aan bodembiodiversiteit zijn evengoed mogelijk). Het bodemleven maakt daarom deel uit van het Natuurlijk Kapitaal (Maes et al. 2013). Rutgers et al. (2010) hebben in het kader van de EU-

bodemstrategie het thema bodembiodiversiteit geoperationaliseerd volgens punten 1 en 2 uit bovenstaande structuur.

Behalve de betekenis van bodembiodiversiteit als onderlegger voor ecosystemendiensten kan ze zelf een uitingsvorm van een ecosystemedienst zijn. Hiermee kan invulling gegeven worden aan de waarde die men aan bodembiodiversiteit hecht - via de habitatfunctie - los van de bijdragen aan een gedefinieerde set van ecosystemendiensten. Voorbeelden hiervan zijn de mogelijkheden voor inspiratie en educatie, en de voorraad onontdekte genetische variatie ten behoeve van toekomstige ontwikkeling van biomaterialen en medicijnen.



Figuur 1. De multifunctionele rol van biodiversiteit bij de levering van ecosystemendiensten en bij de beoordeling van de toestand van het Natuurlijk Kapitaal. Hiermee kan het biodiversiteitsbeleid van context voorzien worden, zodat een praktische uitwerking mogelijk is (overgenomen uit Maes et al. 2013). Voor de bodembiodiversiteit kan een vergelijkbaar schema opgesteld worden.

1.2.3 Ecosystemendiensten

Ecosystemendiensten zijn de profijten die mensen hebben van ecosystemen. De bodem kan gezien worden als een onderdeel van een ecosysteem en draagt dus bij aan de levering van ecosystemendiensten. Dit moet in brede zin worden opgevat: de bodem levert goed zichtbare profijten via bijvoorbeeld agrarische productie en recreatie, en minder zichtbare diensten zoals waterberging, koolstofvastlegging, zelfreinigend vermogen, schoon grondwater, zuurstofproductie en verzachting van de gevolgen van klimaatverandering.

Diverse gremia buigen zich over een gestandaardiseerde en adequate terminologie voor ecosysteemdiensten (bijvoorbeeld: MEA 2005, TEEB 2010, CICES 2013, Maes et al. 2013). In sommige discussies wordt onderscheid gemaakt tussen 'intermediaire' en 'finale' ecosysteemdiensten. De finale ecosysteemdiensten worden in die hoedanigheid door de mens gebruikt of 'geconsumeerd'.

De lijsten die hieruit voortkomen, hebben beperkingen in zich als men een of meer ecosysteemdiensten via duurzaam bodembeheer wil optimaliseren (TCB 2003, Dominati et al. 2010, Robinson et al. 2013, Rutgers et al. 2009, 2012c), omdat bodem soms niet volledig bijdraagt aan de levering van een finale ecosysteemdienst. Een voorbeeld is de bijdrage van bodem aan de agrarische productie: bodemvruchtbaarheid is een factor die van belang is voor deze ecosysteemdienst. Daarnaast spelen andere aspecten, zoals de hoeveelheid aangevoerde nutriënten en organische stof via (kunst)mest, bodembewerking, bestrijdingsmiddelengebruik, water en het klimaat. Een ander voorbeeld is weerstand tegen stress en herstelvermogen. Dit is een belangrijk en gewaardeerd integraal kenmerk van een goed functionerende en 'robuuste' bodem, maar draagt slechts bij via de borging van het vermogen om (andere) ecosysteemdiensten te leveren. Omdat dit aspect wel duidelijk door gebruikers gewaardeerd wordt (Rutgers et al. 2012c), past het als herkenbare entiteit in een ecosysteemdienstenbenadering.

In dit rapport is wat de terminologie betreft aangesloten bij de systematiek van Maes et al. (2013) en de Common International Classification of Ecosystem Services (CICES 2013) met specifieke aanpassingen ten behoeve van het compartiment bodem (zie Hoofdstuk 4).

1.3 Meten van bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten

Er zijn momenteel geen eenvoudige (wetenschappelijk én beleidsmatig) geaccepteerde meetinstrumenten beschikbaar die direct de ecosysteemdiensten of de bodembiodiversiteit meten. De bruikbaarheid van bepaalde instrumenten is afhankelijk van de context. Het ontbreken van strikte kaders bij bodembeleid, -beheer en -inrichting zorgt er ook voor dat de informatie over bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten niet waardevrij is, waardoor er een risico is op een zekere mate van vrijblijvendheid.

Het wetenschapsterrein van de toegepaste bodemecologie is nog relatief jong, maar heeft al een schat aan gegevens, kennis en inzichten opgeleverd. Hierdoor liggen de eerste praktische toepassingen in het verschiet, zowel op het gebied van de bescherming van de bodembiodiversiteit als voor de optimale en duurzame benutting van ecosysteemdiensten van de bodem.

1.3.1 Proxy's voor de bodembiodiversiteit

Alle indicatoren die informatie geven over de levende aspecten van de bodem komen praktisch en beleidsmatig in aanmerking om bij te dragen aan de beoordeling van de bodembiodiversiteit, gestructureerd in de drie dimensies zoals in paragraaf 1.2.2 is omschreven, namelijk:

- a. biomassa, abundantie en activiteit;
- b. verscheidenheid en complexiteit;
- c. variatie, dynamiek en stabiliteit.

De uitdaging betreft voor een groot deel de integrale toepassing van deze caleidoscopische informatie in een systeembenadering, waarbij tevens in acht wordt genomen dat:

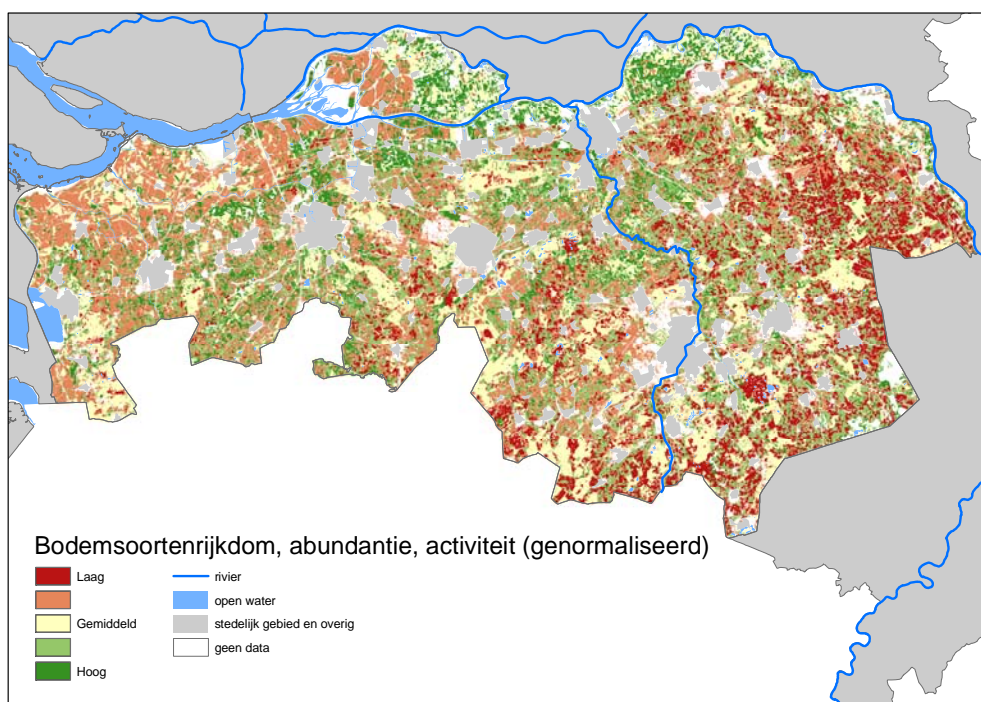
1. er meerdere ruimte- en tijdschalen zijn;
2. in principe alle organismen en processen bijdragen aan het functioneren van het bodemsysteem, maar dat de mate waarin ze dat doen afhankelijk is van de omstandigheden en vaak niet goed vastgesteld of niet vast te stellen is;
3. veel systeeminformatie nog niet toegepast en geduid kan worden door onvoldoende praktische en theoretische kennis. Veel onderliggende verbanden tussen organismen zijn bijvoorbeeld nog onbekend.

Op het eerste gezicht is dit besef misschien ontmoedigend; bodembiodiversiteit is zo complex dat het zinloos lijkt om er met praktische instrumenten mee aan de slag te gaan. Maar je kunt het ook anders zien: de complexiteit motiveert juist en maakt het praktisch hanteerbaar, want het legitimeert een aanpak op hoofdlijnen waarbij keuzes gemaakt worden. Er zijn hierdoor wel alternatieve benaderingen die even goed bruikbaar zijn, maar ze zijn niet noodzakelijkerwijs beter. Met andere woorden, de complexiteit van de bodembiodiversiteit dwingt vanzelf tot continue reflectie en transparantie bij concretisering van het beleid en het bodembeheer.

Er zijn voorbeelden waarbij biodiversiteit concreet is gemaakt. Een daarvan is het natuurbeleid, waarbij gestuurd werd op de aanwezigheid van 'doelsoorten' in een bepaald 'natuurdoeltype' (Bal et al. 2001). Hiermee konden doelen gesteld worden voor het natuurbeleid in Nederland, bijvoorbeeld via de inrichting van de Ecologische Hoofdstructuur. Het nadeel van de focus op het voorkomen van enkele soorten is dat de oorzaken van het niet functioneren uit beeld raken en vaak onbegrepen blijven. Langzamerhand wordt de doelsoortenbenadering aangevuld met een systeembenadering, waarbij de habitat (inclusief bodem) ook meegenomen wordt.

Een integrale en geaccepteerde maat voor de bodembiodiversiteit is er niet; we zijn afhankelijk van zogenoemde proxy-benaderingen (zie de volgende paragraaf voor een nadere uitleg van het begrip proxy), waarbij biodiversiteit gebaseerd wordt op diverse empirische gegevens van verschillende aard.

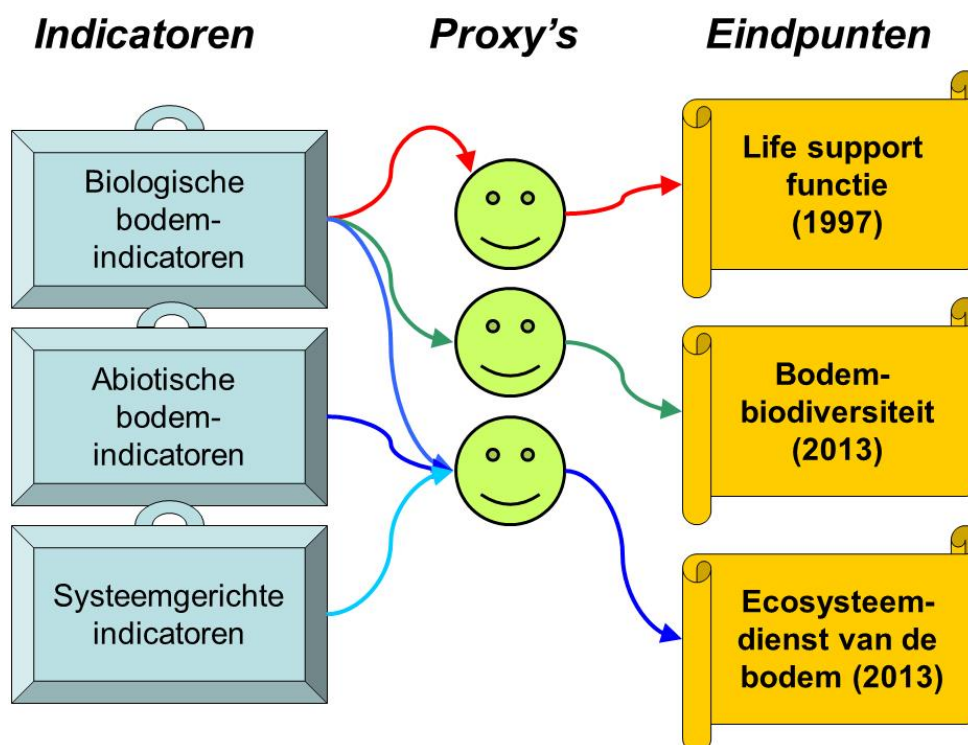
Een voorbeeld is de bodembiodiversiteit in de Provincie Noord Brabant (Figuur 2; Rutgers et al. 2012b). Hierbij werden eerst tien verschillende aspecten van de bodembiodiversiteit apart gekwantificeerd en in kaart gebracht. Na normalisatie van alle parameters werden de tien aspecten geïntegreerd tot één gesommeerde maat voor de 'geïntegreerde bodembiodiversiteit'. Het voorbeeld uit Noord-Brabant laat zien dat het mogelijk is om de complexiteit van de bodembiodiversiteit terug te brengen tot een hanteerbare grootte en op de kaart te zetten.



Figuur 2. Bodembiodiversiteit in de provincie Noord-Brabant. De totale bodembiodiversiteit is afgeleid van tien genormaliseerde kenmerken, namelijk het aantal en de soortenrijkdom van vier groepen bodemorganismen (regenwormen, potwormen, nematoden en mijten-springstaarten) en twee microbiële kenmerken (potentiële C- en N-mineralisatie). De normalisatie is uitgevoerd door de waarde te verminderen met de gemiddelde waarde in de steekproef en het resultaat te delen door de standaardafwijking. Deze kaart is overgenomen uit Rutgers et al. (2012b).

1.3.2 Proxy's voor ecosystemendiensten van de bodem

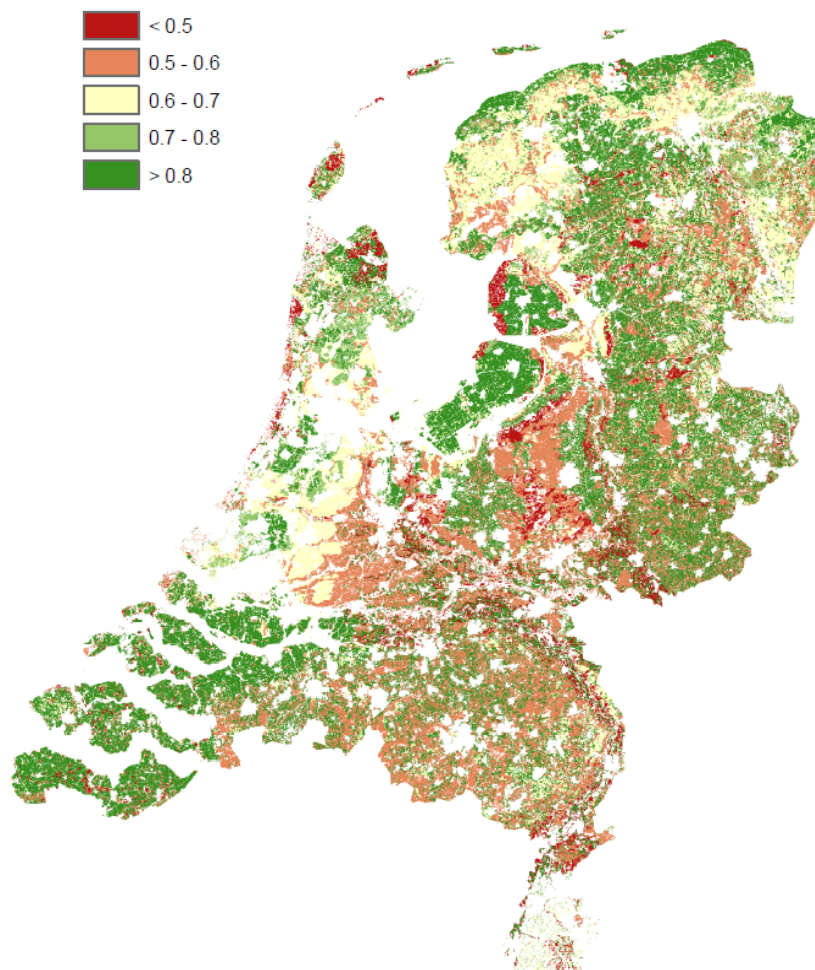
De geaccepteerde aanname is dat ecosystemendiensten beoordeeld kunnen worden in een systeembenadering op basis van chemische, fysische en biologische kenmerken. Er is echter nog geen consensus over de precieze wijze waarop dit dient te gebeuren. Bepaalde bodemkenmerken of samenstel van kenmerken kunnen in verband worden gebracht met een ecosystemedienst, zonder dat de exacte (kwantitatieve) relatie bekend is. Dit samenstel krijgt daarmee de status van een zogenoemde proxy of proxy-indicator (lees: benadering). Proxy's verschillen op subtiële wijze van het begrip indicatoren, doordat het doel van de proxy expliciet is omschreven en op een hoog integratieniveau ligt (Figuur 3). Een proxy voorziet in een constructie om de meetbare of modelleerbare kenmerken van het systeem te verbinden met het geïntegreerde doel: een ecosystemedienst of de bodembiodiversiteit. De gestandaardiseerde methode om nematoden in de bodem in het voorjaar uit bodemmonsters te extraheren en onder de microscoop te analyseren (Schouten et al. 2004, Rutgers et al. 2009) is dus bijvoorbeeld een indicator voor de nematodengemeenschap (het kenmerk) en kan tevens (een onderdeel van) een proxy zijn voor de bodembiodiversiteit of een ecosystemedienst (Markert et al. 2003). Bovenstaand onderscheid tussen indicatoren en proxy's kan helpen om de vaak semantische discussie op het punt van indicatoren te ondersteunen.



Figuur 3. Overzicht van typen indicatoren en de relaties met de eindpunten via de toepassing van proxy's (zie tekst), die in dit en eerder onderzoek (Schouten et al. 1997) verkend zijn. Proxy's zijn de algoritmen om praktische informatie over de eindpunten te genereren. Deze eindpunten betreffen vaak (beleidsmatige en wetenschappelijke) containerbegrippen, die meestal niet rechtstreeks met één indicator te meten zijn. Informatie van abiotische en systeemgerichte indicatoren kan ook toegepast worden bij proxy's voor de bodembiodiversiteit, maar dat is bij het in dit rapport beschreven onderzoek niet nader uitgewerkt.

Het kwantificeren van ecosysteemdiensten met behulp van proxy's is een manier om concrete kenmerken van de leefomgeving te integreren tot relevante informatie voor beleid en praktijk. Met deze informatie kan het beheer van het Natuurlijk Kapitaal transparant en rationeel worden gemaakt, bijvoorbeeld door de ruimtelijke inrichting hierop af te stemmen. De meetbare of modelleerbare kenmerken van de fysieke structuur van het bodem- en watersysteem kunnen hierbij als input voor de verschillende proxy's fungeren. In Figuur 4 is een voorbeeld gegeven van het zelfreinigende vermogen op basis van zes bodemkenmerken (Van Wijnen et al. 2012). Er is consensus over dat voor een integrale analyse van het Natuurlijk Kapitaal informatie nodig is uit een samenstel van chemische, fysieke en biologische kenmerken (VROM 2003).

Voor de compartimenten water en bodem is een dergelijke aanpak relatief nieuw vanwege de tot voor kort dominante focus in het milieubeleid en milieubeheer op de afzonderlijke milieuthema's. De wetenschappelijke onderbouwing van het beleid op afzonderlijk milieuthema's heeft zich goed ontwikkeld, met onderbouwde en praktische instrumenten (bijvoorbeeld Swartjes et al. 2012), maar is beperkt tot bescherming en herstel en heeft geen oog voor een instrumentarium voor een optimaal en duurzaam gebruik van de leefomgeving.

EKX - Zelfreinigend vermogen - Totaal

Figuur 4. Het zelfreinigende vermogen van de bodem in Nederland. Het zelfreinigende vermogen is een onderdeel van het Natuurlijk Kapitaal. De kaart is overgenomen uit Van Wijnen et al. (2012). Het zelfreinigende vermogen is bepaald aan de hand van zes kenmerken van de bodem, namelijk de functionele diversiteit van de microbiële gemeenschap, de potentiële C- en N-mineralisatie, het P-ammonium-lactaat gehalte, de bodem-pH en het organische stofgehalte. Het zelfreinigende vermogen is vergeleken met een referentiesituatie voor een gezonde bodem voor alle te onderscheiden categorieën bodemgebruik en grondsoort (Rutgers et al. 2012c).

Om het Natuurlijk Kapitaal van bodem en water optimaal en duurzaam te benutten, is een benadering onmisbaar waarbij de verschillende opbrengsten (en het verlies aan opbrengsten) integraal worden beoordeeld. Alleen op basis van ecosysteemdiensten kunnen de complexe analyse en afwegingen in het beleid en het bodembeheer transparant en inhoudelijk worden onderbouwd. Ecosysteemdiensten kunnen ook bij een nadere uitwerking en verantwoording van beleid op de aparte V-thema's een rol spelen, maar de bestaande instrumenten voor de bekende V-thema's zijn meestal al van een stevige inhoudelijke basis voorzien (bijvoorbeeld. Swartjes et al. 2012). Wel appelleren ecosysteemdiensten aan rationele en concrete beweegredenen waarop veel milieu- en natuurbeleid impliciet gefundeerd is. In die zin kunnen

ecosysteemdiensten het milieubewustzijn bij beleidsmakers en bodembeheerders, ook in relatie tot de V-thema's, expliciet ondersteunen.

1.4 Doel van het onderzoek en leeswijzer

Schouten et al. (1997) hebben de Bodembioologische indicator (Bobi; zie Hoofdstuk 2.1 voor een beschrijving) ontwikkeld voor de meting van de LSF van de bodem, conform de vragen die vanuit het biodiversiteitsbeleid (SPA 1995) gesteld werden. De Bobi is ontwikkeld voor het maken van een generiek beeld van de LSF in Nederland op basis van veertig meetlocaties per jaar, tweehonderd in totaal, met behulp van de infrastructuur van het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB). Gedurende de laatste twee LMB-meetrondes is Bobi succesvol toegepast; de indicatorenset is robuust gebleken en bevat samen met de LMB-gegevens bruikbare informatie voor kwantificering van de LSF. Zie voor literatuuringangen bijvoorbeeld Brussaard et al. (2004), Breure (2004), Bloem et al. (2006), Rutgers et al. (2009) en Mulder et al. (2003, 2005a, 2005b, 2011). Validerend onderzoek met de Bobi is uitgevoerd op experimentele percelen, om effectief relaties met het bodembeheer te kunnen leggen (bijvoorbeeld Van Eekeren et al. 2008, 2010, Van der Wal et al. 2008, 2009, Cohen en Mulder 2013, en literatuur hierin). De Bobi is gevoelig voor grondsoorten en bodemgebruiksvormen en reageert op bodembedreigingen zoals bodemverontreiniging en de intensiteit van het bodembeheer.

Anno 2014 zijn de inzichten veranderd en is de kennis over het milieu en de bodem toegenomen. Tevens zijn de wensen van het milieubeleid en het bodembeheer en -inrichting betreffende bodeminformatie veranderd. Het gaat er nu om het bodembeheer en de ruimtelijke inrichting op een zodanige wijze te organiseren dat het Natuurlijk Kapitaal van de bodem duurzaam en optimaal benut wordt. Dit houdt in dat de gewenste kwaliteit behouden blijft en beschikbaar is voor meerdere bodemgebruikers, dat er geen onherstelbare schade aan de bodem wordt toegebracht en dat afwenteling naar elders en later binnen acceptabele grenzen blijft of gecompenseerd wordt. Een benadering op basis van ecosysteemdiensten inclusief een indicatorsysteem is hiervoor de geëigende weg (zie Uitvoeringsagenda Natuurlijk Kapitaal; EZ 2013). Voor het biodiversiteitsbeleid zijn tevens indicatoren nodig voor de monitoring van de bodembiodiversiteit.

Doel van het in dit rapport beschreven onderzoek is om een *state of the art* indicatorsysteem te definiëren voor toepassing in een meetnet, waarvan de gegevens bruikbaar zijn om bodembiodiversiteit en de ecosysteemdiensten van de bodem te berekenen. De gegevens die met het indicatorsysteem beschikbaar komen, dienen ook bruikbaar te zijn voor het modelleren van trends. Naast de Bobi-indicatoren dienen er nieuwe biologische indicatoren en chemische en fysische bodemindicatoren te worden geëvalueerd. Ecosysteemdiensten kunnen alleen via een integrale systeemgerichte aanpak beoordeeld worden op basis van chemische, fysische en biologische (en systeemgerichte) kenmerken (VROM 2003). Als bestaande indicatoren uit Bobi en het LMB blijvend geschikt zijn voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit en de ecosysteemdiensten, ontstaat er direct meerwaarde en kan de gegevensreeks uit het verleden ook toegepast worden voor het afleiden van trends.

In Hoofdstuk 2 worden verschillende indicatorsystemen benoemd en beschreven, inclusief de Bodembioologische indicator voor de LSF met de verzameling van meetgegevens op de locaties van het voormalige LMB (Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit).

Hoofdstuk 3 beschrijft de aanpak om via workshops en een multicriteria-analyse (MCA) op een transparante en onderbouwde wijze tot een rangordening van indicatoren voor de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem te komen. Aan deskundigen (professionals) is gevraagd om hun expertise voor dit doel aan te wenden. Voor de MCA zijn vier stappen toegepast, namelijk 1) gewenningsfase, 2) koppelen van indicatoren aan ecosysteemdiensten, 3) evaluatie van indicatoren aan de hand van een set selectiecriteria, en 4) weging van deze criteria en finale rangordening.

In Hoofdstuk 4 worden de resultaten van de twee workshops en van de MCA gepresenteerd. De workshops dienden om de Bobi-indicatoren en het meetnet te evalueren en om nieuwe mogelijkheden te identificeren. Vervolgens werden deskundigenoordelen verzameld en met behulp van een MCA geïntegreerd tot een finale rangordening voor de bruikbaarheid van indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem. In dit hoofdstuk worden ook de workshops en de MCA bediscussieerd en geëvalueerd.

Hoofdstuk 5 gaat in op de selectie van indicatoren voor toepassing in een meetnet, waarbij rekening gehouden werd met enkele aanvullende zaken. Het voorstel is een basis voor toekomstige toepassing in een meetnet, met dien verstande dat efficiënt gebruik gemaakt wordt van bestaande (onderdelen van) meetnetten, zoals het voormalig LMB en analysefaciliteiten bij instituten, en bestaande expertise en inzet van deskundigen met een bewezen staat van dienst, zodat de gegevens en resultaten uit het verleden ook in de toekomst efficiënt benut kunnen worden (zo mogelijk met het voorkomen van trendbreuken).

Hoofdstuk 6 gaat in op de mogelijkheden en beperkingen om ecosysteemdiensten te beoordelen door toepassing van proxy's of proxy-indicatoren voor ecosysteemdiensten. De resultaten van de MA zijn hier wellicht bruikbaar voor, maar dit was geen centrale vraag bij dit onderzoek.

Hoofdstuk 7 plaatst de resultaten in een bredere context van de wens van overheden en burgers om het bodembeheer en de gebiedsinrichting duurzamer te maken. Zijn de indicatoren praktisch genoeg en de gegevens voldoende robuust om bij te dragen aan het raamwerk voor duurzaam bodembeheer?

De Bijlagen bevatten lijsten met ecosysteemdiensten en indicatoren, verslagen van workshops, de instrumenten en de resultaten van de MCA.

2 Bestaande indicatoren en indicatorsystemen

Bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten zijn eindpunten die meestal niet rechtstreeks meetbaar of berekenbaar zijn (zie paragraaf 1.3). Voor ecosysteemdiensten onderhoudt de World Resource Institute (WRI) een lange lijst met indicatoren (www.esindicators.org). Deze lijst is gericht op finale ecosysteemdiensten en bevat vooral systeemgerichte indicatoren. Deze hebben geen specifieke bodemfocus, waardoor ze voor het bodembeheer een geringe betekenis hebben en niet of minder goed via een bodemmeetnet bepaald kunnen worden. Een aparte focus op de bodem is zinvol, omdat het (lokale en regionale) bodembeheer een belangrijke driver is achter de toestand van de bodem. Agrarische productie als finale ecosysteemdienst is bijvoorbeeld de resultante van de bodemvruchtbaarheid (bodemstructuur, natuurlijk nutriëntenleverend vermogen en ziekte- en plaagwering), gewaskeuze, de aanvoer van nutriënten en organische stof (via mest en compost), bodembewerking, gebruik van bestrijdingsmiddelen, en klimatologische condities. De agrarische productie alleen geeft dus beperkte inzage in de mogelijkheden om de duurzaamheid van het bodembeheer te analyseren en te verbeteren. Voor de optimale aansluiting met het doel van dit onderzoek is in het overzicht van bestaande indicatorsystemen alleen naar bodemindicatoren gekeken.

2.1 Bodembiologische indicator 1997-2012

Schouten et al. (1997) ontwikkelden een Bodembiologische indicator (kortweg Bobi) voor kwantificering van de Life Support Functies (LSF) van de bodem. Het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB) voorzag in een uitgelezen kans om de set indicatoren te testen en vervolgens toe te passen. Bobi is met een paar kleine aanpassingen in twee complete meetrondes van het LMB toegepast (Rutgers et al. 2009). In 2012 is het LMB als zelfstandig meetnet opgeheven. Sindsdien staat de infrastructuur in dienst van de toepassing van Bobi. Hieronder volgt een korte samenvatting van de opzet van het LMB en Bobi.

2.1.1 *Opzet van het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit*

Het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB) is in 1993 van start gegaan (Van Duijvenbouden et al. 1995). De doelstellingen van het LMB waren het beschrijven en zo mogelijk verklaren van de chemische bodemkwaliteit van het landelijk gebied (toestand), en van veranderingen in de bodemkwaliteit van het landelijk gebied onder invloed van diffuse belasting (trend). Het LMB omvatte tweehonderd locaties verspreid over Nederland. De locaties waren verdeeld over tien combinaties van grondsoort en bodemgebruik (zie Figuur 5 en Tabel 1). Deze combinaties – ook wel categorieën genoemd – vormen het steekproefkader van het LMB. De reden dat er onderscheid wordt gemaakt op basis van grondsoort en bodemgebruik is dat dit belangrijke verklarende factoren zijn voor variaties in bodemkwaliteit.

Tabel 1. LMB-categorieën

<i>Cat.</i>	<i>Grondgebruik</i>	<i>Bedrijfstype</i>	<i>Grondsoort</i>
I	Grasland/maïs	Melkveehouderij lage veedichtheid	Zand
II	Grasland/maïs	Melkveehouderij hoge veedichtheid	Zand
III	Grasland/maïs	Melkveehouderij met intensieve veehouderij	Zand
IV	Bos (naald/loof)	N.v.t.	Zand
V	Bouwland	Akkerbouw	Zand
VI	Grasland	Melkveehouderij	Veen
VII	Bouwland	Akkerbouw	Zeeklei
VIII	Grasland	Melkveehouderij	Rivierklei
IX	Grasland	Melkveehouderij	Zeeklei
X*	Categorie wisselde per ronde*	Wisselcategorie*	*

* Deze categorie wordt per meetronde anders ingevuld. In de eerste meetronde werden tuinbouw en bloembollenbedrijven op klei en zandgrond bemonsterd. In de tweede meetronde werden diverse bedrijven op lössgrond bemonsterd en in de derde meetronde vollegrondsgroentebedrijven op zand.

Bij de keuze van de categorieën is enerzijds gekeken naar een zo hoog mogelijke dekking voor de bodemkwaliteit in Nederland, en anderzijds gestreefd naar voldoende homogene groepen waarvoor eventuele trends zijn waar te nemen. Verder is, behalve naar het aandeel dat een bepaalde categorie in het totale oppervlak van Nederland heeft, gekeken naar beleidsrelevantie en de verwachting waar hoge belastingen of gehalten zullen voorkomen. Eén categorie betreft natuur (gemengd bos; categorie IV), de negen andere hebben betrekking op agrarisch bodemgebruik.

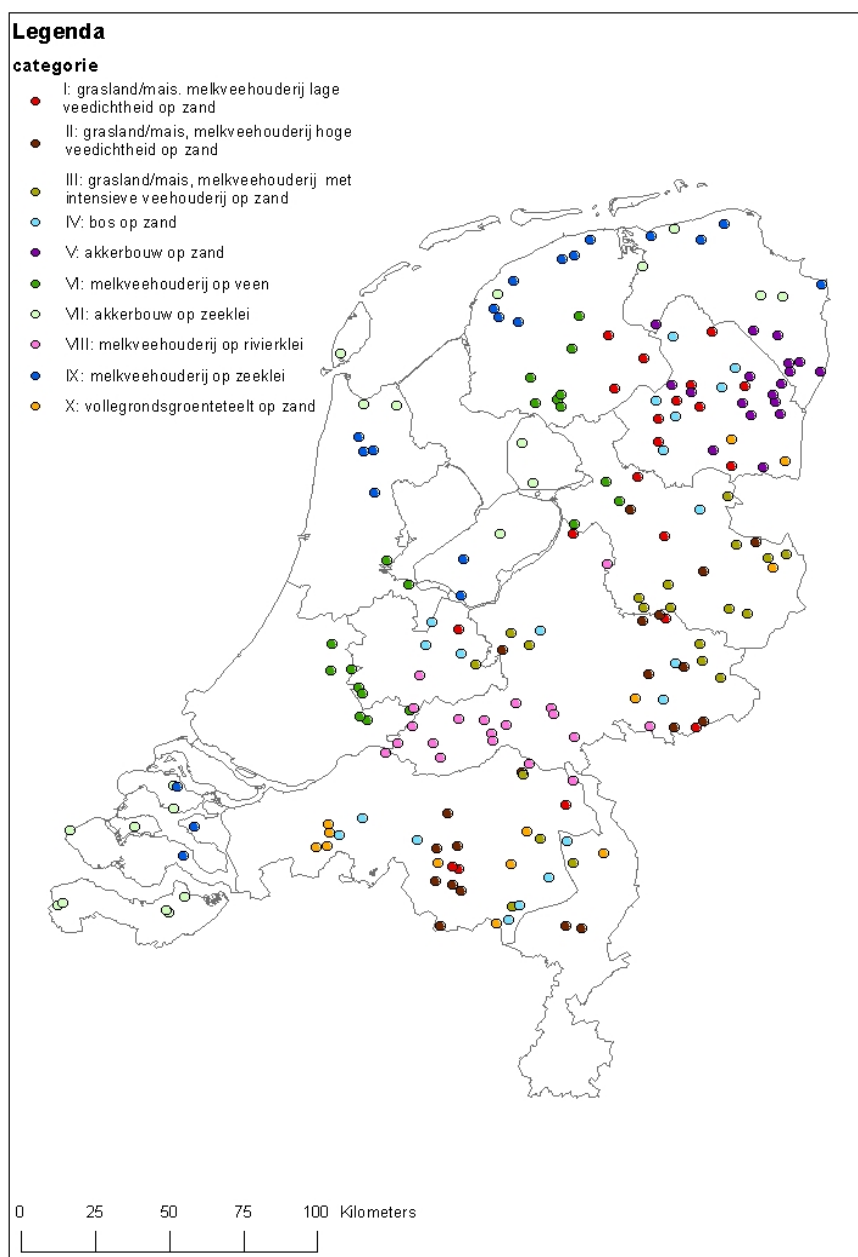
Gedurende de eerste meetronde zijn voor elk van de negen vaste categorieën twintig locaties geselecteerd. De landbouwbedrijven zijn op basis van een gestratificeerde, aselechte steekproef uit het Bedrijven-Informatienet van het Landbouwkundig Economisch Instituut EI (LEI-BIN) geselecteerd. In de tweede en derde meetronde waren de selecties beperkt tot het vervangen van deelnemers die, om uiteenlopende redenen, niet meer konden worden herbemonsterd. Voor een overzicht van de geselecteerde selectiecriteria per categorie wordt verwezen naar Wattel-Koekkoek et al. (2012).

Op basis van de selectiecriteria en landbouwtellingsgegevens in het jaar van bemonsteren kon bepaald worden hoeveel bedrijven en hectares door elke categorie vertegenwoordigd worden. Het vertegenwoordigde areaal, afgezet tegen het totale areaal in Nederland, geeft inzicht in de dekkingspercentages per categorie. De som van deze percentages geeft een indicatie van de totale areaaldekking van het LMB ten tijde van de derde meetronde.

Tabel 2 toont de resultaten. De veertig locaties voor de categorieën I en II vertegenwoordigen samen ruim tienduizend bedrijven en vierhonderdduizend hectares. Op een totaal areaal van ruim 1,9 miljoen hectare bedraagt de dekking voor genoemde categorieën dan 21%. Andere categorieën met een relatief hoge areaaldekking zijn categorieën VII (akkerbouw op zeeklei) met 15% en de categorie III (bos op zand) met 12%. Over alle categorieën opgeteld komt het totale areaal dat binnen de steekproefopzet van het LMB gelegen is, uit op 1429 duizend hectare. Dit is 74% van het Nederlandse onbebouwde areaal.

De locaties zijn in totaal drie maal bemonsterd. De eerste bemonsteringsronde vond plaats van 1993-1997, de tweede van 1999-2003 en de derde ronde van 2006-2010. In Tabel 3 staan de geanalyseerde parameters weergegeven.

Op een deel van de LMB-locaties werd sinds de tweede meetronde naast het chemische onderzoek ook bodembologisch onderzoek gedaan (Breure 2004, Rutgers et al. 2009, Schouten et al. 2001).



Figuur 5. Locaties van de derde ronde van het LMB.

Tabel 2. Areaal en aantal bedrijven dat elke categorie vertegenwoordigt tijdens de derde meetronde met bijbehorend percentage van het totaal.

<i>Meetjaar</i>	<i>Bedrijfstype en grondsoort</i>	<i>aantal landbouwbedrijven waarvoor de bemonsterde bedrijven in een categorie representatief zijn (% van totaal*)</i>		<i>areaal waarvoor de locaties in een categorie representatief zijn (in 1000 ha) (% van totale areaal land in Nederland**)</i>	
2006	Melkveehouderij lage veedichtheid				
	Melkveehouderij hoge veedichtheid, beide op zand	10609	13%	405	21%
2007	Melkveehouderij met intensieve veehouderij op zand	533	1%	12	1%
2007	N.v.t.	nvt	nvt	235	12%
2008	Akkerbouw op zand	1160	2%	81	4%
2008	Melkveehouderij op veen	3695	5%	178	9%
2009	Akkerbouw op zeeklei	4545	6%	279	15%
2009	Melkveehouderij op rivierklei	1223	2%	60	3%
2010	Melkveehouderij op zeeklei	3065	4%	170	9%
2010	Vollegrondsgroente** op zand	311	0%	9	0
Totaal				1429	74%

Bron: Landbouwtelling, CBS/LEI, diverse jaren, in jaar van bemonsteren van betreffende categorie

* Het exacte aantal landbouwbedrijven is per jaar apart vastgesteld via de Landbouwtelling. De percentages in de tabel zijn berekend op basis van het exacte aantal bedrijven in het bemonsteringsjaar. Nederland kende tijdens bovenstaande periode gemiddeld ongeveer 75.000 landbouwbedrijven.

** Ongeveer 1,9 miljoen hectare.

Tabel 3. Stoffen en parameters gemeten in de derde ronde van het LMB.

<i>Bodem</i>	
Bodemkenmerken	Organisch stof, lutum, pH KCl, pH H ₂ O, CEC*, CaCO ₃ *
Diversen	Fe, Mn
Zware metalen	Zn, Cu, Cr, Cd, Pb, Ni, Hg, Ba, Co*, Mo, Sn
Nutriënten	P-AL, Pw, P-totaal
PAK10*	NAP, ANT, PHE, FLU, BAA, CHR, BKF, BAP, BPE, IPY
Organische micro's*	α-HCH, β-HCH, γ-HCH, δ-HCH, HCB, heptachloor, β-heptachloorepoxide, aldrin, dieldrin, endrin, α-endosulfan, β-endosulfan, DDT, DDE, DDD
Triazines*	simazine, atrazine
PCB's*	PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB153, PCB180, PCB138
Overig	Minerale olie*
<i>Grondwater</i>	
Algemene karakteristieken	NPOC (non-purgable organic carbon)
Nutriënten	N-totaal, NO ₃ , NH ₄ , ortho-P, P-totaal en K
Metalen/metalloïden	As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Co*, Mo*, Sn*, Hg
Diversen (o.a. macro-elementen)	Al, Ba, Ca, Cl, Fe, Mg, Mn, Na, SO ₄ , Sr
Veldparameters	NO ₃ , EC en pH

* niet voor alle categorieën bepaald.

2.1.2 Het verzamelen van data

De monsternamen voor Bobi was praktisch en efficiënt verweven met de uitvoering van de tweede en derde ronde van het LMB. Er werd gebruik gemaakt van dezelfde infrastructuur, en de biologische en chemische bemonstering werden gelijktijdig uitgevoerd. Een deel van de analyses (microbiologie, nematoden, processen) werd uitgevoerd aan hetzelfde (bedrijfs)mengmonster voor bodemkenmerken en chemische parameters. Voor de grotere organismen (regenwormen, potwormen, mijten en springstaarten) werden aparte bodemkernen verzameld op zes plots op de locatie.

Het LMB werkt op 'bedrijfsniveau', omdat die ruimtelijke schaal overeenkomt met de schaal waarop het Landbouw Economisch Instituut (LEI) gegevens verzamelt van agrarische bedrijven over onder andere bodembelasting (aanvoer - afvoer). Omdat de locaties via een aselechte gestratificeerde steekproef uit een bekende steekproefpopulatie zijn getrokken, is het mogelijk om op basis van de verzamelde meetgegevens op een beperkt aantal locaties (in het LMB: twintig per categorie), toch een uitspraak te doen over alle soortgelijke bodemgebruik-grondsoortcombinaties in Nederland. Waarnemingen via een bemonstering en analyse per deellocatie (perceel, profielkuil of boring) hebben niet die bredere geldigheid, omdat de steekproefgrootte niet bekend is. Met de LEI-gegevens is het bovendien mogelijk een balans te maken en de belasting van de bodem en het grondwater te berekenen.

Het is vanwege de heterogeniteit van de bodem en variatie in bewerking ongebruikelijk bodembiochemische analyses te doen aan (meng)monsters afkomstig van een oppervlak ter grootte van een agrarisch bedrijf. Het doel van het LMB en Bobi was echter om een landelijk beeld van de bodem te maken, gedifferentieerd naar bodemgebruik-grondsoortcategorieën. Het komt neer op een ecologische bodemtypologie die voor een groot deel bepaald wordt door

het bodemgebruik en de grondsoort. Hiervoor is per bodemgebruikscategorie een steekproef genomen uit een representatief deel daarvan. De LMB-benadering om dit aan de hand van 'complete' agrarische bedrijven te doen is daarom heel praktisch.

Voor een aantal categorieën gaat de 'bedrijvenbenadering' niet op. Dit zijn bijvoorbeeld bosgebieden, heidevelden, natuurlijke graslanden en stadsparken. Ook deze locaties hebben meestal een duidelijke begrenzing, maar zijn een stuk minder homogeen qua begroeiing, beheer en gebruik. In het LMB is er voor gekozen om geen complete boswachterijen in het meetnet op te nemen, maar aan te sluiten bij boslocaties op zand die in het kader van het Trendmeetnet Verzuring al gemonitord werden (Boumans et al. 2013). Daarnaast werd voor Bobi een aantal overige natuurgebieden en stadsparken gemonitord door te monsteren in terreinen met een uniforme aanplant of vegetatie. Deze maakten geen deel uit van het LMB.

Bedrijfs- of locatiemengmonsters werden verzameld met een zogenaamde graszodeboor (Figuur 6A). Dit is een steekbuisje van 10 cm lang en een diameter van 2,3 cm, bevestigd onder een metalen verzamelbeker waar circa vijf à acht kernen in passen. Hiermee kan lopend door het terrein efficiënt een aantal bodemmonstertjes worden gestoken zonder de boor te hoeven legen. Er werden 320 kerntjes gestoken, evenredig verdeeld over de verschillende percelen. Dit leverde een mengmonster van ongeveer 15 kg op. De kernen werden met de hand verkruid en voorzichtig gemengd, totdat er op het oog een homogene massa was ontstaan. Vervolgens werden hier submonsters uit genomen voor chemische, microbiologische en nematodenanalyses.

De overige monsters werden verzameld op zes plots verspreid over de locatie (Figuur 6B en 6C). Hieraan werden analyses uitgevoerd die niet aan mengmonsters gedaan konden worden. Een plot had de omvang van een stuk grond binnen een cirkel van 10 meter. Bodemmonsters voor potwormen en mijten en springstaarten werden gestoken met een deelbare boor van 5,8 cm in diameter. In de boor werden PVC-ringen (2,5 cm hoog) geplaatst, om het monster tijdens transport bijeen te houden, en bij analyse in laagjes op te delen. Regenwormen werden verzameld door op dezelfde zes plots een blok grond (plag) van 20x20x20 cm te steken (Figuur 6C). Elke plag werd in een plastic zak meegenomen naar het laboratorium, waar de regenwormen handmatig werden verzameld en bewaard in een plastic bakje met fixeervloeistof. Bij deze wijze van monsternamen worden sommige dieper levende regenwormen ('pendelaars') niet allemaal gevangen, wat tot een onderschatting van de telling leidt. Tot slot werd op de plot een monster gestoken om de bulkdichtheid van de grond te bepalen en werd de indringweerstand met de 'penetrologger' gemeten.

2.1.3 *De indicatoren in Bobi*

Bij de opzet van het indicatorsysteem Bobi is uitgegaan van een functioneel gerichte invalshoek met de volgende hypothese: de vitale bodemprocessen worden bepaald door het aantal (groepen) van bodemorganismen (hun activiteiten en de onderlinge afhankelijkheid) die aanwezig zijn voor het uitvoeren van een bepaald proces. De vitale bodemprocessen werden toen Life Support Functies (LSF) genoemd. De indicatoren in Bobi zijn in detail beschreven door Schouten et al. (1997, 2004), Rutgers et al. (2007, 2009) en Mulder et al. (2011) en hieronder kort samengevat.



Figuur 6. Monsternametechniek in het landelijk Meetnet Bodemkwaliteit ten behoeve van het chemische en bodembioologische onderzoek.

A. 320 steken werden met een 10cm-guts genomen en in een opvangbeker verzameld en gemengd voor de chemische parameters en de analyse van bacteriën, schimmels en nematoden.

B. Twee keer zes grondkolommen werden genomen voor de analyse van de potwormen en de mijten en springstaarten.

C. Zes plaggen van 20x20x20 cm werden gestoken met een spade voor de analyse van de regenwormen.

Bacteriën en microbiële processen

Bacteriedichtheden en -afmetingen werden bepaald door middel van directe microscopische tellingen met een confocale laser-scanmicroscop en automatische beeldverwerking (Bloem en Breure 2003, Bloem et al. 2006). Hiervoor werden grondpreparaten gemaakt van de mengmonsters. De micro-organismen werden gekleurd met een fluorescerende verbinding. Uit de cijfers over aantallen en de afmetingen van bacteriecellen werden het biovolume en de biomassa berekend. De groeisnelheid van bacteriën werd gemeten aan de hand van de inbouw van radioactief gelabelde stoffen (^3H -thymidine en ^{14}C -leucine) die respectievelijk voor de aanmaak van DNA en eiwitten worden gebruikt.

De potentiële koolstof- en stikstofmineralisatie werden bepaald door grondmonsters te incuberen in luchtdichte potten bij 10°C. Tussen week 1 en week 6 werden de concentraties zuurstof en kooldioxide regelmatig gemeten met een gaschromatograaf. De ademhaling werd berekend uit de verschillen in zuurstofconcentratie tussen week 1 en week 6. De toename in minerale stikstof (NH_4 en NO_3) in de bodem werd gebruikt om mineralisatiesnelheden te berekenen.

De diversiteit in bacteriële omzettingen (afbraakroutes) werd gemeten in multi-well Biolog-platen (Rutgers et al. 2006). Bacteriën werden in suspensie gebracht door grondmonsters in een buffer te blenderen. De bacteriesuspensie werd in een verdunningsreeks in de platen gepipetteerd, waar kleurvorming plaatsvond als gevolg van substraat-omzettingen: in elk putje een unieke omzetting. De kleurvorming werd twee keer per dag gemeten gedurende zeven dagen. Tegelijk met de incubatie in de Biolog-platen werden agarplaten geënt. Na twee en acht dagen werd het aantal kolonies geteld. Deze tellingen vormen een interne standaard voor de berekeningen. Uit de kleurveranderingen werd de functionele 'diversiteit' (de maximale toename in de kleurvorming per toegenomen eenheid in de inoculumconcentratie), de functionele 'capaciteit' (de hoeveelheid grond die nodig is om 50% van alle omzettingsreacties te katalyseren) en een 'fingerprint' berekend.

Nematoden

De nematoden werden via een speciale spoel- en zeefmethode uit de grond gehaald (Römbke et al. 2006). Hiervoor werd 100 gram verse grond gebruikt. Tot slot werden de levende nematoden met behulp van een wattenfilter in een kleine hoeveelheid water geconcentreerd en gevangen. De nematoden kruipen hier gedurende twee dagen actief doorheen. Het totale aantal nematoden in 100 gram verse grond werd geschat door 2 x 10% van de geëxtraheerde dieren te tellen. Na telling werd het monster gefixeerd. Vervolgens werden preparaten gemaakt om circa 150 nematoden onder een lichtmicroscop te identificeren. Op grond van de eigenschappen van nematoden kunnen de soorten onderverdeeld worden in functionele en trofische groepen.

Potwormen

Voor de analyse van de potwormen werden de grondmonsters in schijfjes van 2,5 cm in de PVC-ringen elk afzonderlijk geëxtraheerd volgens een gemodificeerde natte extractiemethode (Didden en Römbke 2001, Römbke et al. 2006). De potwormen werden geteld, opgemeten en gedetermineerd met behulp van een lichtmicroscop. Adulte exemplaren werden tot op soort gedetermineerd, juveniele tot op geslacht. Op basis van de lengte werd het versgewicht berekend met behulp van bestaande regressievergelijkingen. Op grond van de eigenschappen van potwormen kunnen de soorten onderverdeeld worden in drie functionele groepen.

Regenwormen

De regenwormen werden door 'handsorting' uit de grond gehaald, geteld, gewogen en opgeslagen in 70% alcohol. De geconserveerde wormen werden geïdentificeerd: volwassen exemplaren werden tot op soort gedetermineerd, juveniele tot op geslacht. De resultaten van de zes afzonderlijke monsters van elke locatie werden samengevoegd (mengmonster). Op grond van de kenmerken van regenwormen kunnen de soorten onderverdeeld worden in drie functionele groepen.

Microarthropoden

De groep microarthropoden bestaat voornamelijk uit mijten en springstaarten. Mijten hebben acht poten en behoren tot de spinachtigen. Springstaarten zijn primitieve bodembewonende insecten. Mijten en springstaarten werden uit de bodemmonsters gehaald door de PVC-ringen in een Tullgrenapparaat te plaatsen (Römbke et al. 2006). De ring met grond werd vervolgens aan de bovenkant verwarmd waardoor de dieren naar beneden kropen. Ze vielen via een trechter in een flesje met alcohol (fixatief). De gehele extractietijd duurde één week. De verzamelde microarthropoden werden voor onbepaalde tijd bewaard tot het moment van tellen en taxonomische identificatie. Van vier monsters (kernen) werden de soorten geteld en gedetermineerd door ze uit het monster te vissen en in preparaat te brengen. Het vijfde monster werd als reserve bewaard. Per monster werden zeventig individuen geteld en gedetermineerd. Vervolgens werden de soorten gegroepeerd naar elf voedselgildes en twaalf overlevingsstrategieën.

2.1.4

Uitbreidingen ten opzichte van de oorspronkelijke indicatorenset

Schimmels

De totale hoeveelheid schimmeldraden (hyfen) in de grond werd bepaald door de lengte te meten onder een epifluorescentiemicroscop (Bloem en Vos 2004). De lengte werd vervolgens omgerekend naar een hoeveelheid koolstof en de schimmelbiomassa werd uitgedrukt in $\mu\text{g C g}^{-1}$ droge grond. Actieve schimmels

werden onderscheiden door een specifieke kleuring van DNA en RNA met een rode fluorescerende kleurstof (actief groeiende hyfen bevatten veel RNA; bij inactieve schimmels zijn alleen de blauw gekleurde celwanden te zien).

Potentieel mineraliseerbare stikstof

De eerder beschreven 'potentiële N-mineralisatie' werd gemeten onder gestandaardiseerde, maar min of meer natuurlijke omstandigheden, waarbij voornamelijk aërobe micro-organismen actief zijn. Op deze wijze wordt dus het mineralisatieproces gemeten. Daarnaast werd later ook de 'potentieel mineraliseerbare stikstof' gemeten door incubatie van een grondmonster gedurende één week onder water bij 40°C (Keeney en Nelson 1982, Canali en Benedetti 2006). Deze meer kunstmatige omstandigheden zijn optimaal voor een snelle mineralisatie van organische stof door anaërobe bacteriën. Bij gebrek aan zuurstof wordt de vrijkomende NH_4 niet omgezet in NO_3 , en kan er ook geen verlies door denitrificatie optreden. De hoeveelheid minerale stikstof ($\text{NH}_4\text{-N}$) die vrijkomt, is een maat voor de kwaliteit van de organische stof (N-gehalte en afbreekbaarheid) en dus voor de biologische bodemvruchtbaarheid.

Bulkdichtheid, porievolume en indringweerstand

In aansluiting op de monstermethoden van het Bobi-programma, werd de indringweerstand gemeten op zes plots (c.q. percelen) verspreid over een agrarisch bedrijf. Voor de indringweerstand werden op iedere plot vijf sonderingen met een penetrologger van de firma Eijkelkamp gedaan in een cirkel van tien meter: in het totaal dus dertig metingen per bedrijf (Rutgers et al. 2010).

De bulkdichtheid en het porievolume werden alleen in de bovengrond gemeten (tussen 5 en 10 cm diepte). De monsters werden verzameld in roestvrijstalen ringen (hoogte 5 cm; diameter 5,8 cm) met een scherpe rand. Deze metingen geven dus geen indicatie van de mate van verdichting dieper in de bodem.

Wortelbiomassa

De doorworteling van een bodem kan op verschillende manieren worden gemeten. Veel gebruikte methoden zijn: de biomassa (vers/droog) per volume-eenheid, wortellengte per volume grond, en/of de hoeveelheid per oppervlakte op een bepaalde diepte (Deru et al. 2010, Van Eekeren et al. 2011). Voor de eerste twee methoden moeten bodemkernen worden gestoken (bijvoorbeeld met een 'wortelboor' van 8 x 15 cm: diameter x diepte), waarna de wortels met water worden uitgespoeld. Deze werkwijze is tamelijk arbeidsintensief. Er kan nog onderscheid worden gemaakt in al dan niet verkurkte wortels. De verkurkte delen zijn niet actief in de opname van water en voedingsstoffen.

Een minder bewerkelijke manier is het tellen van het aantal wortels in een uitgestoken kluit (plag). Hierbij kan ter plekke (in het veld) het aantal wortels op bijvoorbeeld 10 en 20 cm diepte worden geteld. Het aantal wortels dat een vlak op 10 cm diepte passeert kan variëren, van vrijwel geen tot meer dan 150 per vierkante decimeter. Op 20 cm diepte is deze hoeveelheid globaal gehalveerd. Levende wortels zijn wit en 'sappig', dode wortels zijn bruin en 'uitgedroogd'. Deze kenmerken kunnen worden gebruikt voor een karakterisering van de toestand in een perceel c.q. graszode.

2.2 Andere sets bodemindicatoren

In de literatuur zijn verschillende sets bodemindicatoren beschreven. Deze voorstellen zijn, net als Bobi, niet specifiek gericht op de beoordeling van ecosysteemdiensten van de bodem of de bodembiodiversiteit, maar op

bodemgezondheid als containerbegrip. Enkele belangrijke bijdragen aan de ontwikkelingen worden hieronder samengevat.

Het begrip 'bodemgezondheid' is weliswaar al oud, maar de meetbaarheid bleef lange tijd een discussiepunt. Doran en Zeiss (2000) beschreven de algemene kenmerken waaraan bodembioologische indicatoren dienen te voldoen om succesvol de bodemgezondheid vast te kunnen stellen. Sindsdien vinden vele voorstellen voor indicatorsets hun weg naar de literatuur (overzichten: Turbé et al. 2010, Thoden et al. 2013).

Een beperkte set met slechts drie bodembioologische indicatoren werd voorgesteld voor monitoring in een Europees meetnet in het project ENVASSO (Environmental Assessment of Soil for Monitoring; Bispo et al. 2009). Dit betrof regenwormen, springstaarten (Collembola) en bodemademhaling. Potwormen werden als een alternatief gezien in het geval van het ontbreken van regenwormen op de meetlocatie.

Ritz et al. (2009) hebben voor het Verenigd Koninkrijk een MCA uitgevoerd met 183 biologische bodemindicatoren. Ze rangschikten indicatoren op basis van verschillende objectieve criteria ('logical sieve method') voor toepassing in een nationaal meetnet. In het recent opgestarte EU-project Ecofinders (Lemanceau 2011, Faber et al. 2013) werd dezelfde werkwijze gevolgd en uitgebreid naar heel Europa. Een afgesproken set bodembioologische indicatoren wordt momenteel op vijf langjarige monitoringslocaties en op ongeveer 120 locaties in een Europees meetnet uitgetest.

Thoden et al. (2013) hebben een literatuurstudie uitgevoerd en een onderzoek gedaan naar geschikte bodemindicatoren voor de akkerbouw. Het uitgangspunt was het belang en handelingsperspectief van de agrariër, maar er was ook aandacht voor de milieueffecten van de bedrijfsvoering. De onderzoekers stelden twee sets indicatoren voor, een voor klei en een voor zand.

In de Verenigde Staten (Andrews et al. 2002) en in Nieuw-Zeeland (Sparling en Schipper 2002) zijn de voorstellen voor indicatoren voor de bodemgezondheid verwerkt in praktische (web-based) referentie- en beoordelingssystemen voor de agrariër (zie Thoden et al. 2013). Het systeem in Nieuw-Zeeland bevat geen biologische indicatoren. Het Amerikaanse systeem bevat drie biologische bodemindicatoren, namelijk regenwormendichtheid, bodemrespiratie en enzymactiviteiten. Beide systemen worden nog geëvalueerd en zijn in het ontwikkelingsstadium.

3 Aanpak en methodiek

3.1 Inleiding

Het doel van het hier beschreven onderzoek is te komen tot een voorstel voor een set indicatoren voor toepassing in een landelijk meetnet, op basis van de best beschikbare kennis en ervaring. Toepassing van de indicatoren moet meetgegevens op kunnen leveren die bruikbaar zijn om een representatief beeld samen te stellen van de ecosystemendiensten en het natuurlijk kapitaal van de bodem in Nederland. De selectie van de indicatoren wordt gebaseerd op een rangordening van de relatieve geschiktheid voor beoordeling van een of meer ecosystemendiensten in een landelijk meetnet. De kennis en ervaring met bodembioïologische en andere indicatoren (Schouten et al. 1997, Andrews et al. 2002, Sparling en Schipper 2002, Bloem et al. 2006, Rutgers et al. 2009, Bispo et al. 2009, Lemanceau 2011, Faber et al. 2013, Pulleman et al. 2012, Thoden et al. 2013) wordt gebruikt om de rangordening uit te voeren.

De focus op de levende aspecten van de bodem is geëvolueerd van de LSF van de bodem naar de bodembiodiversiteit en de ecosystemendiensten (ESD) van de bodem. Het indicatorsysteem voor de LSF van de bodem (Schouten et al. 1997) bestond uitsluitend uit biologische bodemindicatoren. Dit werd toen mede gerechtvaardigd vanuit de gedachte dat de levende aspecten van de bodem verantwoordelijk zijn voor de LSF, én het bood een alternatief en aanvulling op de tot op dat moment dominante chemische benadering bij de beoordeling van de bodemkwaliteit in de bodemkunde en in het bodembeleid.

Deze overwegingen leidden tot de volgende gefaseerde aanpak met twee workshops en een MCA om te komen tot een rangordening van bestaande en nieuwe indicatoren voor de bodembiodiversiteit en ecosystemendiensten van de bodem:

1. In de eerste workshop zijn professionals op het gebied van de bodemecologie en bodembiodiversiteit geconsulteerd, waaronder ook de wetenschappers die in 1997 meegedaan hebben aan de ontwikkeling van Bobi (Schouten et al. 1997). De te beantwoorden vraag was of de huidige set bodembioïologische indicatoren nog *up-to-date* is, waar aanpassingen noodzakelijk worden geacht en waar er kansrijke ontwikkelingen te verwachten zijn als gevolg van nieuwe technieken en inzichten.
2. In de tweede workshop zijn professionals in de bodemecologie en bodemkunde geconsulteerd met een aanvullende focus op niet-biologische indicatoren. De te beantwoorden vraag was: welke abiotische bodemindicatoren en andere systeemindicatoren kunnen een bijdrage leveren aan de berekening van de ecosystemendiensten van de bodem, naast de biologische bodemindicatoren? Een van de deelvragen was welke abiotische indicatoren toegepast kunnen worden bij de berekening van bepaalde ecosystemendiensten, en welke indicatoren vooralsnog ontbreken. Dit is ook van belang voor het optimaal gebruik van bestaande gegevens: in het LMB worden abiotische indicatoren toegepast en is bedrijfsinformatie beschikbaar (systeem-informatie).
3. In een MCA werd de relatieve geschiktheid bepaald van diverse, in de workshops geopperde indicatoren voor de beoordeling van de ecosystemendiensten van de bodem. Meerdere bodemprofessionals, auteurs van dit rapport, hebben hieraan bijgedragen. Bij de analyse is een stratificatie

toegepast in drie typen indicatoren, namelijk (i) biologische bodemindicatoren, (ii) abiotische bodemindicatoren, en (iii) zogenoemde systeemindicatoren, waarvan de informatie niet rechtstreeks afkomstig hoeft te zijn uit de bodem of uit bodemmonsters. Alle indicatoren zijn beoordeeld aan de hand van vijf criteria, namelijk (i) meetbaarheid, (ii) prijs-prestatieverhouding, (iii) relevantie voor beoordeling van een of meer ecosysteemdiensten, (iv) onderscheidend vermogen en gevoeligheid voor de eindpunten, en (v) beleidsmatige relevantie, communiceerbaarheid en inpassingsmogelijkheden in een bodemmeetnet.

De drie fases worden hierna in meer detail uitgewerkt.

3.2 Eerste workshop (bodemecologie)

In 1997 is het voorstel gedaan om een set bodembioologische indicatoren toe te passen voor de kwantificering van de LSF in het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (Schouten et al. 1997). LSF en ecosysteemdiensten van de bodem kunnen naar verwachting voor een aanzienlijk deel beoordeeld worden aan de hand van dezelfde bodemkenmerken, aangezien de mens afhankelijk is van goed functionerende ecosystemen. LSF omvatten alle vitale functies van de bodem; ecosysteemdiensten betreffen die functies die een benoembaar nut hebben voor de mens, en daar horen ook LSF bij. Vele Bobi-indicatoren kunnen dus gebruikt worden in proxy's voor ecosysteemdiensten. De vraag is welke wel en welke niet en hoe dan.

Daarnaast is de bodemecologie en zijn bodembioologische indicatoren sinds 1997 verder ontwikkeld. Momenteel wordt in het onderzoek bijvoorbeeld meer gebruik gemaakt van moleculair biologische (DNA) technieken en automatisering (robotica). Ook zijn de inzichten in de rol en het belang van groepen bodemorganismen verder geëvolueerd.

De eerste workshop had als doel om inzicht te krijgen in de moderne bodembioologische indicatoren en een inschatting te maken van de bruikbaarheid van deze indicatoren voor de beoordeling van de ecosysteemdiensten. Voor deze discussie werden bodemecologen uitgenodigd, die in hun onderzoek gebruik maken van bodembioologische informatie. Het resultaat van de discussie diende als input voor de beoordeling van alle biologische bodemindicatoren (Bobi-indicatoren, andere en nieuwe indicatoren).

De volgende bodemecologen hebben een bijdrage geleverd aan de workshop en de discussie:

- Prof. H. Siepel (Radboud Universiteit Nijmegen);
- Prof. L. Brussaard (Wageningen Universiteit);
- Prof. M.P. Berg (Vrije Universiteit Amsterdam);
- Prof. A.M. Breure (Radboud Universiteit Nijmegen en RIVM).

De workshop is gehouden op 7 september 2011. N. de Wit (ministerie van IenM), T. Schouten (RIVM) en M. Rutgers (RIVM) waren aanwezig om de context aan te geven en de vragen namens de opdrachtgever te formuleren.

3.3 Tweede workshop (bodemkunde en bodemecologie)

Ecosysteemdiensten worden in het moderne bodembeleid en bodembeheer beschouwd binnen een systeembenadering, waarbij chemische, fysische en biologische informatie gecombineerd worden toegepast. Bobi bestaat formeel gezien uit een set biologische bodemindicatoren. Daarnaast werden in het LMB

standaard de bodemeigenschappen en een aantal chemische parameters bepaald. In het bodemecologische onderzoek worden de abiotische kenmerken als achtergrond- of hulpgegevens beschouwd. In een systeembenadering is deze hiërarchie niet aanwezig: elke bron van informatie draagt op een eigenstandige wijze bij aan zo'n systeembenadering. Daarom kunnen chemische en fysieke bodemkenmerken elk voor zich een bijdrage leveren aan de kwantificering en beoordeling van ecosysteemdiensten (zie Figuur 3 voor een voorbeeld). Naast de chemische en fysieke bodemindicatoren zijn er ook andersoortige (systeem)kenmerken die een relatie of invloed op de bodem hebben, maar niet rechtstreeks aan de bodem afgelezen kunnen worden, zoals veedichtheid, grondwaterpeil, toepassing van mest en bestrijdingsmiddelen, frequentie en type bodembewerking, et cetera.

De tweede workshop had als doel om niet-biologische (chemische en fysieke) parameters voor de beoordeling van ecosysteemdiensten van de bodem te identificeren. Voor deze discussie werden daarom bodemecologen en bodemkundigen uitgenodigd die voor hun onderzoek dit type indicatoren gebruiken. Het resultaat van de discussie diende als input om een complete set niet-biologische bodemindicatoren te evalueren voor toepassing in een meetnet voor ecosysteemdiensten.

De volgende ecologen en bodemkundigen hebben een bijdrage geleverd aan de tweede workshop en de discussie:

- Prof. W. van der Putten (Nederlands Instituut voor Ecologie);
- Dr.Ir. M.P.W. Sonneveld† (Wageningen Universiteit);
- Prof. O. Oenema (Alterra).

De workshop is gehouden op 14 december 2011. T. Schouten en M. Rutgers (RIVM) waren aanwezig om de context toe te lichten en de vragen van de opdrachtgever te formuleren.

3.4 Multicriteria-analyse (MCA)

In de derde fase is een MCA uitgevoerd om een inschatting te maken van de relatieve geschiktheid van indicatoren voor de meting van bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten in een meetnet (Tekstkader 3). Deze aanpak is ook gevolgd bij andere projecten om indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten te selecteren (Ritz et al. 2009, Faber et al. 2013, Bispo et al. 2009, Rutgers et al. 2005, 2007, 2009, 2012c).

Tekstkader 3. Multicriteria-analyse (MCA)

Multicriteria-analyse (MCA) is een evaluatiemethode om tussen diverse discrete alternatieven een rationele keuze te kunnen maken. Bijvoorbeeld: met MCA kunnen scores op economische, ecologische en sociale criteria bij elkaar worden opgeteld om alternatieve trajecten voor een nieuwe transportroute te rangschikken. De doelen van een MCA zijn het ordenen van gegevens, het transparant maken van beslissingsprocessen en het ondersteunen van beslissers.

MCA wordt zowel bij de overheid als bij de private sector aangewend voor het rationaliseren van keuzes op diverse vlakken, zoals bij milieueffectrapportages. De methode lijkt op maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA), maar bij MCA hoeven de criteria niet te worden uitgedrukt in monetaire eenheden.

De geschiktheid van indicatoren is bepaald aan de hand van verschillende criteria (gemodificeerd naar Doran en Zeiss (2002) en Turbé et al. (2010)):

- Betekenisvol: indicatoren dienen informatie te verschaffen over de toestand van ecosysteemdiensten en/of de bodembiodiversiteit.
- Gevoeligheid en accuraat: de indicator dient voldoende gevoelig te zijn voor het betreffende eindpunt waarover informatie verschaft wordt.
- Praktische meetbaarheid: de indicator dient toegepast te kunnen worden door meerdere milieulaboratoria en personen.
- Kosteneffectiviteit: de indicator dient kostenefficiënt te zijn. Om verantwoord om te gaan met beperkte budgetten hebben indicatoren die veel informatie geven voor relatief weinig geld de voorkeur.
- Relevant voor beleid en praktijk: de indicator is beleidsrelevant, goed communiceerbaar naar verschillende stakeholders, gestandaardiseerd en toepasbaar in een meetnet.

Door potentiële indicatoren te toetsen aan bovenstaande criteria, kan een onderbouwde rangordening verkregen worden van de relatieve geschiktheid van indicatoren voor toepassing in een meetnet met een landelijke dekking.

Informatie over indicatoren voor de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten in relatie tot bovenstaande criteria is vaak niet gemakkelijk en waardevrij beschikbaar. Daarom is per indicator aan verschillende deskundigen (auteurs van dit rapport) gevraagd om de geschiktheid per criterium op een geüniformeerde schaal aan te geven via vier stappen.

3.4.1 *Stap 1. Inschatting van de geschiktheid van geaggregeerde indicatoren voor het beoordelen van de bodembiodiversiteit en alle ecosysteemdiensten*

Het doel van deze stap was om de deelnemers vertrouwd te maken met de gebruikte terminologie en de wijze van scoren en om nog verbeteringen en aanvullingen te kunnen aanbrengen. In paragrafen 1.2.2 en 1.2.3 zijn de operationele definities voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten verwoord. Eventuele hiaten of onduidelijkheden konden zo in een vroeg stadium opgespoord worden. Bij elke MCA is het belangrijk om alle termen en definities helder te hebben voor een optimaal en bruikbaar eindresultaat. Het tweede doel was inzicht te verkrijgen in hoe goed ecosysteemdiensten van de bodem beoordeeld kunnen worden in vergelijking met de beoordeling van de bodembiodiversiteit. Bodembiodiversiteit is wetenschappelijk gezien een bekend concept, terwijl ecosysteemdiensten van de bodem dat nog niet zijn.

De indicatoren zijn onderverdeeld in drie typen, namelijk biologische bodemindicatoren, abiotische bodemindicatoren en overige (systeem) indicatoren. De indicatoren zijn daarnaast per bodemkenmerk geaggregeerd om de lijst niet te lang te maken. De analyse van de nematodengemeenschap wordt als één geaggregeerde indicator beschouwd; het betreft zowel de aantallen als de soortensamenstelling, op basis van klassieke taxonomische identificatiemethoden of moderne DNA-technieken. Aan de hand van de nematodengemeenschap kunnen weer veel afzonderlijke kenmerken bepaald worden, zoals de Maturity Index of de Nematode Channel Ratio (Vonk et al. 2013). Aan alle deelnemers is tenslotte gevraagd of de lijst met indicatoren compleet was. In Bijlage 4 is de lijst met geaggregeerde indicatoren opgenomen.

3.4.2 *Stap 2. Inschatting van de geschiktheid van indicatoren voor de beoordeling van specifieke ecosysteemdiensten*

Het doel van de tweede stap was om de relatieve geschiktheid van indicatoren voor elke ecosysteemdienst afzonderlijk te evalueren. Elke ecosysteemdienst is gekoppeld aan een unieke set bodemkenmerken en systeemattributen. Inzicht in de relatieve bijdrage van elk kenmerk aan specifieke ecosysteemdiensten van de bodem is nodig om een onderbouwde keuze te maken voor de indicatoren die in een meetnet toepasbaar zijn. De informatie kan ook als basis gebruikt worden om adequate proxy's te ontwerpen voor beoordeling van de ecosysteemdiensten van de bodem (zie Hoofdstuk 6).

De lijst met indicatoren werd vrijwel ongewijzigd overgenomen uit stap 1 (paragraaf 3.4.1; Bijlage 4). De lijst met ecosysteemdiensten van de bodem werd specifiek voor het doel van dit onderzoek opnieuw samengesteld uitgaande van bestaande lijsten (zie Hoofdstuk 4). In Bijlage 1 is de beschrijving van elf ecosysteemdiensten van de bodem opgenomen.

Aan de deelnemers van de MCA is gevraagd om de geschiktheid van indicatoren voor beoordeling van elf specifieke ecosysteemdiensten aan te geven op een schaal van 0 (ongeschikt) tot 10 (relatief uitermate geschikt).

3.4.3 *Stap 3. Inschatting van de mate waarin de indicatoren voldoen aan overige criteria*

Naast mogelijkheden voor het betekenisvol beoordelen van bodembiodiversiteit en de verschillende ecosysteemdiensten van de bodem zijn ook andere criteria relevant voor de inschatting van de geschiktheid van indicatoren voor toepassing in een meetnet. Alle geaggregeerde indicatoren zijn gedeaggregeerd tot op het niveau van een technisch protocol voor de analyse van het betreffende kenmerk van de bodem of systeem. Voor de nematoden-gemeenschap (zie paragraaf 3.4.1) zijn bijvoorbeeld drie gedeaggregeerde indicatoren geëvalueerd, namelijk de 'klassieke' tel- en identificatiemethode met de microscoop, een analyse van nematoden-DNA met TRFLP en een analyse van nematoden-DNA op basis van een barcodingtechniek. Voor de bepaling van de bacteriebiomassa in de bodem zijn ook meerdere protocollen beschikbaar. Bijlage 5 bevat een lijst met alle gedeaggregeerde indicatoren.

De overige criteria (zie paragraaf 4.5.1) en bijbehorende scoregrenzen zijn in Bijlage 6 opgenomen. De inschatting van de professionals in deze stap werd niet gescoord op een schaal van 0 tot 10, maar op een kortere schaal van 0 tot 5, om de doorlooptijd in de MCA te vergroten. Elke stap in de MCA moest in een beperkte tijd van ongeveer een halve dag uitgevoerd kunnen worden.

3.4.4 *Stap 4. Weegfactoren van de criteria voor de eindrangschikking van indicatoren*

Om uiteindelijk alle informatie te aggregeren tot een eendimensionale rangordening van de relatieve geschiktheid van indicatoren voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten die toegepast kan worden in een meetnet, dienen alle criteria en eindpunten (ecosysteemdiensten) onderling gewogen te zijn. In overleg met alle deelnemers aan de MCA werden de weegfactoren vastgesteld en werd afgesproken enkele alternatieve wegen nader te evalueren.

3.4.5 *Deelnemers en het verloop van de MCA*

De vier stappen van de MCA hebben plaatsgevonden in de periode van augustus 2012 tot en met maart 2013. Zestien personen werkzaam in de bodemecologie, bodemkunde of het agrarische advies zijn uitgenodigd om mee te doen aan de MCA. Elf personen deden mee aan stap 1, acht personen deden mee aan stap 2 en zeven personen deden mee aan stap 3. Aan alle deelnemers is schriftelijk gevraagd in te stemmen met de voorgestelde weegfactoren in stap 4. Per indicator is gevraagd om het niveau van de expertise aan te geven op een schaal van 0 (geen kennis) tot 5 (ervaring met de indicator op technisch en wetenschappelijk gebied). De deelnemers werden schriftelijk en mondeling geïnstrueerd, tijdens diverse werkoverleggen en telefonische consulten. Het scoren werd op een door de deelnemers zelf gekozen tijdstip, volledig onafhankelijk van andere deelnemers, uitgevoerd.

Alle auteurs van dit rapport hebben bijgedragen aan de MCA: het aangeven van de geschiktheid van diverse indicatoren voor de meting van bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten.

4 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de twee workshops en van de vier stappen van de MCA gepresenteerd.

- De eerste workshop gaf aan dat de meeste bodembiodiversiteitsindicatoren nog steeds *state of the art* zijn en met een beperkte inspanning gebruikt kunnen worden voor de beoordeling van ecosysteemdiensten.
- De conclusie na de tweede workshop was dat abiotische bodemindicatoren noodzakelijk zijn voor de verbreding van het meetinstrumentarium.
- De deelnemers aan de MCA beoordeelden in de eerste stap dat de diverse groepen indicatoren (biologische en abiotische bodemindicatoren en systeemgerichte indicatoren) ongeveer gelijkwaardig presteren voor de meting van de bodembiodiversiteit of de ecosysteemdiensten van de bodem.
- De tweede stap van de MCA leverde per indicator een beoordeling op voor elke ecosysteemdienst afzonderlijk.
- Bij de derde stap van de MCA werden alle criteria voor de toepassing van indicatoren voor ecosysteemdiensten in een meetnet gescoord. In combinatie met de vierde stap bleek dat er praktisch gezien niet één unieke indicator is voor alle facetten van de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten. Met andere woorden, de verschillen tussen de indicatoren zijn niet erg groot. Een praktisch meetinstrument bestaat dus bij voorkeur uit een selectie van geheel verschillende indicatoren. Een belangrijke constatering was dat veel nu in gebruik zijnde indicatoren nog steeds beschouwd kunnen worden als de 'beste keuze' en dat de oude gegevens dus waardevol blijven voor de toekomst.

In de afsluitende zesde paragraaf zijn alle resultaten geanalyseerd en samengevat.

4.1 Eerste workshop (bodemecologie) d.d. 9 september 2011

4.1.1 *Samenvatting van het workshopresultaat*

- De bodembioologische indicatoren uit Bobi voldoen over het algemeen nog en zijn ook geschikt om ecosysteemdiensten te beoordelen.
- Mogelijk zijn aanvullende indicatoren nodig voor enkele specifieke ecosysteemdiensten die niet belichaamd werden in de LSF.
- Er is consensus dat naast de meting van de biologische bodemkenmerken ook chemische en fysische gegevens van de bodem nodig zijn om ecosysteemdiensten optimaal te beoordelen.
- DNA-technieken zijn momenteel nog niet volledig praktijkrijp voor toepassing in een meetnet.

4.1.2 *Inleiding workshop 1*

In Bijlage 2 is een verslag van de workshop opgenomen. Voor de eerste workshop zijn bodemecologen uitgenodigd die in hun werk gegevens over het bodemleven toepassen. Onder de aanwezigen waren ook bodemecologen die in 1997 een bijdrage hebben geleverd aan de ontwikkeling van de Bodembiologische indicator (Bobi; Schouten et al. 1997).

Discussie werd gevoerd over de volgende punten:

1. Is Bobi nog *state of the art* voor monitoring van de bodembiodiversiteit en LSF of zijn aanpassingen dringend nodig?
2. Zijn genoomtechnieken rijp voor toepassing in een meetnet? Welke wel, welke niet?
3. Zijn de abstracte (of hooggeaggregeerde) ecosysteemdiensten van de bodem te ontrafelen in meetbare aspecten van het bodemleven?
4. Is Bobi aan te passen tot een indicatorsysteem dat toegepast kan worden in een meetnet voor ecosysteemdiensten
5. Is de invulling van een meetnet voor ecosysteemdiensten dusdanig anders van aard dat er gekozen moet worden voor een heel andere opzet van het indicatorsysteem of de infrastructuur van het meetnet?

Hieronder staan in het kort de resultaten van de discussie (zie ook Bijlage 2).

4.1.3 *Hoe state of the art is Bobi?*

Bobi is samengesteld op basis van de beschikbare kennis en ervaring met bodembioïologische parameters in 1997 en van de inschatting van de betekenis van die informatie voor de kwantificering van de LSF (Schouten et al. 1997). Sindsdien zijn er een paar aanpassingen gepleegd, zoals de analyse van de schimmelgemeenschap (biomassa en percentage actieve schimmeldraden), de toepassing van DNA-technieken voor de analyse van de diversiteit van de bacteriegemeenschap, en de bepaling van labiele stikstofverbindingen. Sommige bestaande methoden zijn geoptimaliseerd sinds 1997; bij de microarthropodengemeenschap wordt sinds 2002 een nieuwe extractie- en mengmonstermethode toegepast en een vast aantal organismen geteld en geïdentificeerd (Jagers op Akkerhuis et al. 2008).

Op dit moment zijn de meeste bodembioïologische indicatoren in Bobi nog steeds de best beschikbare optie en de investering waard; de prijs-prestatieverhouding van de individuele parameters is goed. Nieuwe monitoringstechnieken en bepalingmethoden dringen niet eenvoudig door tot de wereld van het verborgen bodemleven en moleculaire technieken zijn veelbelovend, maar nog te duur en te instabiel om toegepast te worden in een meetnet. De meting van protisten (eencellige dieren) in de bodem blijft lastig, vanwege problemen om ze op een representatieve en praktische manier uit de grond te extraheren.

4.1.4 *Zijn DNA-technieken rijp voor praktische toepassing?*

In de LMB-meetronde van 1999 tot en met 2003 zijn met behulp van Denaturing Gradient Gel Electrophoreses (DGGE) DNA-bandenpatronen gemaakt van de bacteriegemeenschappen in bodemmonsters. Die techniek bleek lastig uitvoerbaar in een meetnet, in verband met het probleem van de matige vergelijkbaarheid van de verschillende runs. Hoewel nieuwe DNA-technieken elkaar in hoog tempo opvolgen, lijkt routinematige opzet in een bodemmeetnet nog een brug te ver; de technieken zijn relatief duur en weinig stabiel. Het is wachten op een stabiele en goedkope DNA-techniek voor karakterisering van de bacteriegemeenschap die toegepast kan worden in een meetnet.

DNA-technieken voor de analyse van de nematodengemeenschap lijken dichterbij toepassing in een bodemmeetnet te zijn. Momenteel is het mogelijk om routinematig de aanwezigheid van bepaalde plantpathogene nematoden aan te tonen in grondmonsters. Deze methode werd op commerciële basis ontwikkeld, dankzij de vragen uit de landbouwsector, waardoor het innovatieve vermogen sterk toeneemt. De techniek wordt nu verbeterd, waardoor aantallen van veel

meer soorten nematoden in grondmonsters bepaald kunnen worden. Vooruitlopend op de mogelijkheid om deze techniek routinematig toe te passen werden DNA-monsters van de nematodengemeenschap uit het bodemmeetnet stabiel opgeslagen. Als deze techniek voor een bodemmeetnet beschikbaar komt, is het in feite een spin-off van de ontwikkelingen bij het landbouwkundig onderzoek. Feitelijk is de succesvolle toepassing van sommige andere indicatoren in Bobi ook gebaseerd op spin-off, zoals de klassieke taxonomische nematodenanalyse (geoptimaliseerd voor toepassing in de landbouw) en de toepassing van Biolog-platen (multiwell-platen met verschillende substraten) voor de bacteriegemeenschap. Biolog-platen worden in de gezondheidszorg toegepast om potentieel pathogene bacteriën te identificeren.

DNA-technieken voor de andere groepen bodemorganismen zijn minder ver ontwikkeld. Toch gaan de ontwikkelingen hard en zijn op (korte; vijf à tien jaar) termijn nieuwe mogelijkheden te verwachten. Al deze technieken zijn in wezen vergelijkbaar, want ze zijn gebaseerd op dezelfde principes. Per groep bodemorganismen dient op het punt van de DNA-extractie en zuivering wel een specifiek ontwikkelingstraject doorlopen te worden. Op de korte termijn zijn de verwachtingen voor een praktische, stabiele en goedkope DNA-methode voor karakterisering van de nematodengemeenschap het grootst.

4.1.5 *Zijn ecosysteemdiensten meetbaar via bodembioologische kenmerken?*

Het eenvoudige antwoord is ja. Veel ecosysteemdiensten kunnen gekoppeld worden aan de LSF, en LSF kunnen beoordeeld worden aan de hand van de bodembioologische kenmerken. Het is de verwachting dat de bodembioologische indicatoren ook geschikt zijn om de gegevens te produceren voor de beoordeling van ecosysteemdiensten.

Hoewel het eenvoudige antwoord ja is, is het wetenschappelijk amper uitgewerkt en zeker nog niet geconsolideerd en aanvaard hoe met informatie afkomstig van bodembioologische en andere indicatoren ecosysteemdiensten gekwantificeerd kunnen worden. Een 'ecosysteemdienst' is een containerbegrip, een abstract eindpunt waarvoor vooralsnog weinig eenduidige beoordelingsmethoden ontwikkeld zijn, vooral als het de bodem betreft. In de ecologie wordt veel verwacht van zogenoemde op traits gebaseerde benaderingen. Traits zijn de kenmerken van een organisme of een (groep) organisme(n) die gerelateerd kunnen zijn aan het functioneren van het systeem. Momenteel wordt onderscheid gemaakt tussen response-traits en effect-traits (Mulder et al. 2012, 2013, Lavorel et al. 2013).

Voor de abiotische bodemkenmerken zijn nog geen modellen ontwikkeld om ecosysteemdiensten te beoordelen. Gegevens afkomstig van systeemgerichte indicatoren worden soms direct toegepast voor de beoordeling van ecosysteemdiensten (bijvoorbeeld agrarische productie in ton per hectare). Omdat de bodemfocus bij de laatste toepassing ontbreekt, is hij niet verder onderzocht.

4.1.6 *Bodembioologische indicatoren in een meetnet voor ecosysteemdiensten?*

Een meetnet voor de ecosysteemdiensten van de bodem is niet per definitie verschillend van een meetnet voor de LSF van de bodem. Ecosysteemdiensten betreffen aspecten van de LSF die nuttig zijn voor de mens. De Bodembioologische indicator (Bobi) heeft zich voor wat betreft praktische toepasbaarheid (kostenefficiëntie, robuustheid, gevoeligheid, relevantie) bewezen in twee opeenvolgende meetrondes van het LMB, en in veel specifieke

onderzoeken bij gecontroleerde veldexperimenten en demonstratieprojecten (bijv. Breure 2004, Bloem et al. 2006, Mulder et al. 2006, 2009, Van Eekeren et al. 2008, 2010, Rutgers et al. 2009, Rutgers en Dirven-van Breemen 2012).

De beoordeling van een ecosysteemdienst kan gebaseerd worden op de informatie afkomstig van biologische en abiotische bodemindicatoren en systeemgerichte indicatoren (Rutgers et al. 2012c). Abiotische bodemindicatoren en systeemindicatoren waren al een vast onderdeel van het LMB, maar die informatie werd tot voor kort beschouwd als hulpinformatie om de bodembiologische gegevens te kunnen interpreteren. Uitbreiding van de Bobi-indicatoren met abiotische bodemindicatoren en systeemgerichte indicatoren betekent *de facto* een flinke verbreding van de indicatorenset, die dus niet noodzakelijkerwijs een veel grotere inspanning of budget vraagt, omdat de meeste gegevens toch al werden verzameld of impliciet beschikbaar zijn.

4.1.7 *Andere opzet van het meetnet en andere indicatoren?*

De kenmerken van de bodem kunnen nu en in de toekomst via een landelijk of ander bodemmeetnet bepaald blijven worden. Voor de systeemindicatoren en overige indicatoren zijn daarnaast andere instrumenten nodig, bijvoorbeeld satellietopnamen of gegevens over het bedrijfsmanagement. Sommige gegevens zijn beschikbaar via het LEI of het CBS. Een evaluatie van de technische eisen die aan een dergelijk meetnet worden gesteld, was geen onderdeel van dit onderzoek. Ook de technische eisen aan systeemindicatoren en overige indicatoren waren geen onderdeel van dit onderzoek.

4.2 **Tweede workshop (bodemkunde) d.d. 9 december 2011**

4.2.1 *Samenvatting van het workshopresultaat*

- De huidige Bobi en LMB kunnen binnen de praktische beperkingen die landelijke monitoring stelt beschouwd worden als *state of the art*.
- Om waardevol te zijn voor een ecosysteemdienstenbenadering zijn abiotische indicatoren en is aanvulling met bijvoorbeeld betrouwbare bedrijfsmanagementgegevens essentieel.
- De schaal is belangrijk: voor klimaatfuncties kan volstaan worden met een lagere resolutie dan voor bijvoorbeeld bodemvruchtbaarheid.
- Organische stof (in verschillende fracties) is een belangrijke chemische indicator voor ecosysteemdiensten van de bodem.

4.2.2 *Inleiding workshop 2*

In Bijlage 3 is een verslag van de tweede workshop opgenomen. Voor de tweede workshop zijn deskundigen uitgenodigd die voor hun onderzoek gebruik maken van de chemische en fysische kenmerken van het bodemsysteem, binnen de context van de bodemecologie en de agrobiodiversiteit. Geen van de aanwezigen was betrokken bij het ontwerp van Bobi. Discussie werd gevoerd over dezelfde vijf punten in paragraaf 4.1.2. In onderstaande samenvatting werden punten 1 en 2, en punten 3 en 4 samengevoegd.

4.2.3 *Is Bobi state of the art en hoe staan DNA-technieken er voor?*

Binnen de praktische en budgettaire beperkingen die monitoring van de bodem stelt, kan Bobi nog steeds beschouwd worden als de *state of the art* op bodembiologisch gebied. De basishouding voor het opbouwen van een lange (en daardoor waardevolle) meetserie is stabiliteit en continuïteit. Daarvoor is

een stabiele indicatorenset nodig. Een aantal mogelijke aanvulligen is al benoemd, zoals de meting van protisten en het doen van herhaalde metingen gedurende het seizoen. Om technische en financiële redenen liggen deze aanvullingen niet direct voor de hand.

Er is weliswaar een snelle ontwikkeling in toepassing van DNA-technieken, maar de informatie ligt in het verlengde van de klassieke taxonomische methoden. Dit levert niet per se nieuwe mogelijkheden voor beoordeling van ecosysteemdiensten op. Pas als de prijs-kwaliteitverhouding van de DNA-technieken beter wordt dan die van de klassieke methoden, is vervanging van een indicator aan de orde. Momenteel is dat stadium nog niet bereikt, hoewel onderzoekers soms anders doen voorkomen.

4.2.4 *Zijn ecosysteemdiensten meetbaar en kan dat in een meetnet?*

Boeren hechten veel waarde aan de P-voorziening, bodemkwaliteit en bodemleven. Met name de laatste twee zijn kwalitatieve of intuïtieve waarden voor de boer; ze zijn niet gedefinieerd. De analyse van de beschikbare P-voorraad en het bijbehorende bemestingsadvies blijkt nog veel ruis te vertonen. Organische stof wordt steeds meer als een sleutelfactor voor de bodemkwaliteit beschouwd, met een grote indicatorwaarde. Boeren zijn zich steeds meer bewust van de meerwaarde van een goede organische stofhuishouding, voor: i) de stimulering van de bodemvruchtbaarheid, ii) de borging van de productiemogelijkheden op de langere termijn, en iii) het milieu in het algemeen (vastlegging van koolstof). Aan de andere kant is mineralisatie van organische stof nodig om via een natuurlijke weg nutriënten vrij te maken voor de groei van gewassen zonder overmatige toevoeging van mest. Deze zaken lijken niet eenvoudig met elkaar in overeenstemming gebracht te kunnen worden. Minimalisatie van het weglekken van voedingsstoffen naar grond- en oppervlaktewater dient zowel de belangen van het milieu als die van de boer.

Belangrijke ecosysteemdiensten zijn: schone lucht, schoon water, waterretentie, voedselproductie en ziektevermindering. Om een beoordeling van de bodemkwaliteit op basis van de ecosysteemdiensten te kunnen doen, is het van belang om te kijken naar het schaalniveau. Op het schaalniveau van het bodemmeetnet van Nederland kan wel op het niveau van bedrijven informatie over ecosysteemdiensten gegeven worden. Voor een schatting van de bijdragen van de Nederlandse bodem aan het mondiale klimaat kan met minder meetpunten volstaan worden. Kortom, het kleinste schaalniveau bepaalt de fijnmazigheid van het meetnet.

De lijst van bodemparameters, die overgenomen is van het World Research Institute (WRI 2009), is een goede stap in de richting van concretisering. De lijst bevat nu ruim 1200 indicatoren, en dat is te lang (www.esindicators.org) om praktisch te zijn. Eigenlijk zou dit moeten worden teruggebracht tot een aantal simpele indicatoren. Een vertrekpunt voor een rangordening van bodemindicatoren voor ecosysteemdiensten zou kunnen zijn:

1. organische stof, gedifferentieerd naar een labiele en recalcitrante fractie;
2. waterinfiltratiecapaciteit;
3. verdichting van de grond, mede in relatie tot oppervlakkige afstroming;
4. vormen en vorming van aggregaten (bodemstructuurvorming);
5. diepte van beworteling.

4.2.5 *Is een andere invulling van het meetnet nodig?*

Als het huidige meetnet de variatie weergeeft die van nature voorkomt en de steekproef voldoende representatief is, kunnen de resultaten uit de monitoring als een referentie of ijkpunt worden gezien. De experimentele component (veldproeven waarin de effecten van een bepaald beheer worden onderzocht) ontbreekt in het meetnetprogramma. Het is belangrijk om veldexperimenten met het Bobi-instrumentarium te volgen om de toestand vast te stellen en de drivers bekend te maken, zodat er handelingsperspectief ontstaat. Er is vraag naar duurzaamheidsinstrumenten.

Verschillende instituten en organisaties (LEI, DLV, LTO, PPO, Blgg-AgroXpertus, et cetera) zijn waardevolle partners om impact naar de praktijk te genereren, vanwege de historische banden en verwevenheid met de agrarische sector. Voortzetting van lange meetseries is heel belangrijk, omdat er nog nauwelijks tijdreeksen zijn of de waarde ervan niet wordt begrepen (maar: Magurran et al. 2010, McDonald-Madden et al. 2010). Voor de interpretatie en het begrip van de metingen is het nodig om ook een continue reeks van bedrijfsgegevens te hebben. Deze dient gedurende de monitoring aangelegd te worden. Een 'waarde' (karakterisering) eens in de zes jaar zegt weinig over de historie van bodemgebruik en -bewerking. Een biologisch meetnet 'doe je eigenlijk voor het nageslacht'. Die ervaring is ook opgedaan met andere langjarige meetreeksen, in Nederland en in het buitenland. Ze geven een historische referentie en tonen bijvoorbeeld trends in effecten van klimaatverandering.

4.3 **Eerste stap van de MCA**

4.3.1 *Samenvatting van het resultaat van de eerste stap*

- De drie verschillende groepen indicatoren (biologische bodemindicatoren, abiotische bodemindicatoren en systeemgerichte indicatoren) zijn ongeveer gelijkwaardig in hun vermogen om bij te dragen aan de kwantificering en beoordeling van de bodembiodiversiteit of de ecosysteemdiensten.
- Er is over het algemeen geen groot verschil tussen de mogelijkheden om bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten te beoordelen, maar bodembiodiversiteit als begrip is concreter dan ecosysteemdiensten.

4.3.2 *Deelnemers*

Het doel van de MCA was om informatie over potentiële indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten op een efficiënte en transparante wijze bij elkaar te brengen en deze informatie verder te bewerken tot een rangordening voor relatieve bruikbaarheid van deze indicatoren. De benodigde informatie betrof onder meer praktische uitvoerbaarheid, relevantie voor beleid, praktijk en ecosysteem, gevoeligheid, betaalbaarheid en communiceerbaarheid. Professionals, deskundig in de bodemecologie, bodemkunde en het agrarisch advies, werden uitgenodigd om aan dit proces deel te nemen. Dit betrof alle partners in het Bobi-consortium en enkele onderzoekers buiten deze groep. Alle deelnemers aan de MCA zijn coauteur van dit rapport.

4.3.3 *Welke indicatoren dienen gescoord te worden?*

In de aanloop naar de eerste stap van informatieverzameling over indicatoren voor wat betreft hun indicatorwaarde voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten is een potentiële lijst met indicatoren opgesteld (zie Tabel 4). Hierbij is een bodemfocus gehanteerd (zie paragraaf 3.2). De potentiële indicatoren voor

de bodem zijn in drie groepen ingedeeld, namelijk biologische bodemindicatoren, abiotische bodemindicatoren en overige indicatoren, inclusief systeemgerichte indicatoren. Sommige indicatoren zijn geaggregeerd, om de lijst met indicatoren kort te houden (tussen de 10 en 25 te waarderen entiteiten is optimaal in een MCA). Er bestaan bijvoorbeeld verschillende methoden voor de bepaling van de bacteriebiomassa in grondmonsters, maar er is slechts gescoord op één niet nader gespecificeerde bacteriebiomassa-indicator. Bij de derde stap van MCA zijn de geaggregeerde indicatoren gedeaggregeerd en apart gescoord. De schaal van relatieve geschiktheid liep van 0 (ongeschikt) tot 10 (maximaal relatief geschikt).

De indicator 'percentage of totale omvang van het verharde of afgedekte bodemoppervlak' is niet meegenomen in de analyse, omdat het Natuurlijk Kapitaal van de bodem bij afdekking vrijwel volledig opgeofferd wordt om te voorzien in één (belangrijke) ecosysteemdienst, namelijk ruimte en draagvermogen voor wonen, gebouwen, industrie, wegen, spoorlijnen, infrastructuur of bodem-ongebonden landbouw in kassen en stallen. Bodemkundigen en ecologen zijn het erover eens dat deze benutting veel impact heeft op het Natuurlijk Kapitaal en alle overige benutting van de ecosysteemdiensten van de bodem marginaliseert. Om dit evidente resultaat niet te laten doorwerken in de rangordering van indicatoren is het buiten beschouwing gelaten. Afdekking van de bodem wordt ook als een serieuze bodemb bedreiging gezien door de EU (COM 2006) en de TCB (2009), waarvoor specifiek bodembeleid noodzakelijk geacht wordt.

4.3.4 Resultaten stap 1

Tabel 4 toont de resultaten van de eerste inschatting die tien deelnemers hebben gedaan van de mate van geschiktheid van diverse indicatoren voor de meting van de bodembiodiversiteit of de ecosysteemdiensten van de bodem.

Puntsgewijs zijn de volgende observaties gedaan en zijn conclusies getrokken:

1. De gemiddelde scores per indicatorgroep lopen weinig uiteen: de laagste is 5,5 en de hoogste 5,9. Dit betekent dat deelnemers aan de MCA denken dat de verschillen tussen de groepen indicatoren (biologisch, abiotisch, systeemgericht) voor wat betreft de mogelijkheden om ecosysteemdiensten te beoordelen niet groot zijn. Ook is de inschatting dat bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten op een vergelijkbaar niveau beoordeeld kunnen worden.
2. De gemiddelde scores van de biologische bodemindicatoren voor de biodiversiteit variëren van 1,9 tot 9,3 en voor de ecosysteemdiensten van 3,8 tot 7,1. Met andere woorden, met deze set is de inschatting van de bruikbaarheid voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit meer gespreid dan voor de ecosysteemdiensten van de bodem
3. Als de standaardafwijking beschouwd wordt als een maat voor het verschil van inzicht bij de deelnemers, is de uitkomst dat er wat meer verdeeldheid is over de wijze waarop de bodembiodiversiteit beoordeeld moet worden dan over die van de ecosysteemdiensten. Dit kan wijzen op een 'vooordeel' voor wat de specifieke bijdrage van de eigen discipline aan mogelijkheden voor beoordeling van bodembiodiversiteit betreft, terwijl dit door een hoger integratieniveau bij de ecosysteemdiensten een minder grote rol speelt.
4. De verschillen van mening over de bruikbaarheid van verschillende abiotische indicatoren waren relatief klein. Men is dus meer verdeeld over de bruikbaarheid van systeemindicatoren en biologische indicatoren voor beoordeling van ecosysteemdiensten.

5. Opvallend is de lage score voor basale respiratie (*'Basal respiration'*) als indicator voor de bodembiodiversiteit, want dit is wereldwijd een van de meest toegepaste indicatoren voor het bodemleven (na microbiële biomassa en regenwormdichtheid). Dit is waarschijnlijk het gevolg van de traditionele opvatting van diversiteit, namelijk soortenrijkdom.
6. De analyse van de nematodengemeenschap scoort het hoogst; hierin neemt Nederland een bijzondere positie in, in vergelijking met andere landen, vanwege de grote belangstelling uit de Nederlandse landbouw voor de nematodengemeenschap (Mulder et al. 2003, Vonk et al. 2013).
7. De eerste en tweede systeemindicator (bodemgebruik en historisch bodemgebruik; Tabel 4) werden niet door alle deelnemers als indicator gezien, waardoor de standaardafwijking groot was. In de bodemkundige literatuur is hiervoor een grond aanwezig, maar in de wetenschappelijke literatuur over ecosysteemdiensten worden bodemtype en vooral bodemgebruik wel als belangrijke parameters gezien. Dit verklaart de hoge standaarddeviatie.
8. Sommige systeemindicatoren betreffen uitsluitend landbouw, maar omdat landbouw ongeveer 73% van het onbedekte areaal omvat en omdat in de landbouw het beheer van de bodem relatief intensief is, werd dit niet als een bezwaar ervaren bij de inschatting.
9. Er is een aanwijzing dat de mate van aggregatie van de indicatoren de scoring heeft beïnvloed, bijvoorbeeld bij de overige nutriënten en zware metalen. Informatie over zware metalen lijkt minder goed bruikbaar dan bijvoorbeeld calcium, magnesium en andere macro- en micronutriënten. In stap 3 (paragraaf 3.4.3) zijn deze indicatoren daarom gedeaggregeerd.

4.3.5 Conclusies en discussie bij stap 1

- Alle (geaggregeerde) indicatoren hebben het vermogen om gegevens te leveren waarmee de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten beoordeeld kunnen worden, maar de mate waarin verschilt per indicator en per eindpunt.
- Er is niet één groep indicatoren gemiddeld veel beter dan een andere indicatorgroep. Deze bevindingen ondersteunen de visie in relevante beleidsdocumenten dat bodemkwaliteit beoordeeld dient te worden aan de hand van een set biologische, chemische en fysische kenmerken.
- De deelnemers hebben geen andere indicatoren ingebracht. Bij enkele indicatoren is wel een verfijning of uitbreiding van de omschrijving voorgesteld. De indeling in drie groepen indicatoren werd als verhelderend ervaren om de schijnbare mismatch tussen systeemindicatoren van de VN en het WRI (2009; www.esindicators.org) en de hier gepresenteerde bodemindicatoren te onderscheiden. 'In het algemeen (in general)' als aanduiding bij ecosysteemdiensten is geschrapt, want het zorgde voor onduidelijkheid. 'Gemiddeld' als aanduiding zou waarschijnlijk beter hebben volstaan. De gemiddelde score voor ecosysteemdiensten komt later in de stappen 2 en 3 opnieuw terug (paragrafen 4.4 en 4.5).
- Het lijkt alsof de deelnemers de term bodembiodiversiteit minder eenduidig interpreterden dan de term ecosysteemdiensten, omdat de indicatoren voor bodembiodiversiteit meer verdeeld gescoord werden. Dit is misschien te verklaren, doordat microbiologen en ecologen verschillende definities voor biodiversiteit hanteren, en beleid en wetenschap ook. De verwijzing naar de eerder toegepaste definitie van *bodembiodiversiteit = functionele diversiteit* (Schouten et al. 1997) gaf hierbij onvoldoende houvast. Bij een eerdere deskundigenconsultatie scoorde men het effect van een stressor op bodembiodiversiteit meer eensgezind dan op de ecosysteemdiensten (Rutgers et al.

2010). Het lijkt dus alsof 'ecosysteemdiensten' als begrip door deskundigen eenduidiger geïnterpreteerd wordt dan 'bodembiodiversiteit', maar men denkt wel meer zicht te hebben op de effecten van stress en bodembeheer op de bodembiodiversiteit. Met andere woorden bodembiodiversiteit is een concreter begrip dan ecosysteemdiensten voor deskundigen, en juist daardoor gevoelig voor interpretatieverschillen zolang er geen strikte beleids-, praktijk-, of bodembeheerkaders gehanteerd worden.

- De scores in stap 1 zijn nog onvoldoende voor een bruikbare rangordening en selectie van indicatoren voor bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten, omdat een aantal criteria nog niet is verdisconteerd (bijvoorbeeld de prijs-prestatieverhouding van een indicator) en omdat de ecosysteemdiensten niet gespecificeerd zijn.

4.4 Tweede stap in de MCA

4.4.1 Samenvatting van het resultaat van de tweede stap

- Alle indicatoren zijn gescoord voor hun mogelijke relatieve bijdrage aan de kwantificering van elf ecosysteemdiensten van de bodem.
- Alle groepen indicatoren bevatten goede en relatief minder goede indicatoren en per ecosysteemdienst is dit verschillend; er is niet één unieke indicator die op de meeste fronten beduidend beter (slechter) scoort dan de andere indicatoren. Een compleet gebalanceerd systeem bevat dus meerdere indicatoren uit alle groepen (chemisch, fysisch en biologisch).

4.4.2 Ecosysteemdiensten van de bodem

Tijdens de voorbereiding voor de tweede stap van de MCA is een hanteerbare en voor de bodem relevante lijst ecosysteemdiensten opgesteld. De uitdaging was dat ecosysteemdiensten doorgaans niet op het niveau van de bodem worden beschreven, maar op het niveau van 'finale' ecosysteemdiensten (MEA 2005, WRI 2009, Maes et al. 2013, CICES 2013). In paragraaf 3.1 is aangegeven dat een focus op bodem als onderdeel van het ecosysteem nuttig is om drivers te identificeren, zodat uiteindelijk een reëel handelingsperspectief voor bodembeheer en milieubeleid kan ontstaan. Voor de bodem zijn verschillende lijsten beschikbaar (TCB 2003, 2012, Rutgers et al. 2005, Dominati et al. 2010, Robinson et al. 2013).

Tabel 4. Schatting van het belang van informatie afkomstig van diverse indicatoren voor de kwantificering van bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten van de bodem. De gemiddelde scores zijn afkomstig van tien deelnemers aan de MCA. Daarnaast zijn de standaarddeviaties gegeven als maat voor het verschil van inzicht. De maatlat liep van 0 (onbruikbaar) tot 10 (maximale bruikbaarheid van de indicator voor meting van het eindpunt). NA betekent 'niet gescoord'. De cellen bevatten een achtergrondkleur; paars = hoge score vs wit = lage score; felgroen = lage standaarddeviatie vs wit = hoge standaarddeviatie.

	GEMIDDELDE		STANDAARDDEVIATIE	
	score voor geschiktheid		score voor geschiktheid	
	bodem-biodiversiteit	ESD	bodem-biodiversiteit	ESD
Geaggregeerde biotische bodemindicatoren				
1	7,5	6,3	2,1	2,0
2	4,1	4,9	2,0	3,0
3	3,5	5,5	1,7	2,4
4	3,8	5,9	2,2	2,9
5	6,1	4,5	2,5	0,8
6	5,6	5,3	1,7	2,0
7	7,0	6,4	2,7	2,7
8	6,4	6,0	3,0	2,2
9	3,3	4,1	1,5	2,2
10	1,9	3,8	0,6	2,1
11	6,8	4,9	2,7	1,2
12	9,3	6,8	1,4	2,1
13	7,8	6,1	2,3	1,9
14	7,9	7,1	2,2	1,7
15	8,8	6,3	1,3	2,3
16	6,0	3,1	3,2	1,9
17	3,3	5,5	2,5	3,3
	5,5	5,7	2,3	2,1
Abiotische bodemindicatoren				
1	na	6,9	na	2,7
2	na	4,9	na	1,5
3	na	6,2	na	2,1
4	na	4,2	na	1,4
5	na	4,9	na	1,6
6	na	5,0	na	1,0
7	na	6,4	na	1,7
8	na	7,9	na	2,2
9	na	5,7	na	2,3
10	na	8,9	na	1,2
11	na	7,7	na	1,5
12	na	4,3	na	1,0
13	na	6,8	na	2,3
14	na	7,1	na	2,1
15	na	7,0	na	1,8
16	na	3,8	na	1,9
17	na	2,6	na	1,9
	5,9	5,9	1,8	1,8
Systeemindicatoren ('% afdekking' buiten beschouwing gelaten vanwege evidentie)				
1	na	7,8	na	3,3
2	na	5,2	na	3,3
3	na	7,3	na	1,9
4	na	7,1	na	1,9
5	na	6,3	na	2,0
6	na	5,6	na	2,2
7	na	8,2	na	1,6
8	na	7,0	na	1,8
9	na	5,6	na	1,5
10	na	6,0	na	2,1
11	na	6,0	na	1,9
12	na	6,0	na	2,5
13	na	4,7	na	1,9
14	na	4,3	na	1,8
15	na	4,8	na	1,9
16	na	2,9	na	1,7
17	na	4,8	na	2,5
18	na	5,3	na	2,3
19	na	2,7	na	2,1
20	na	4,8	na	1,1
	5,6	5,6	2,1	2,1

De Technische commissie bodem (TCB 2003) identificeerde zes overkoepelende ecosysteemdiensten ('ecologische diensten'):

1. Bodemvruchtbaarheid;
2. adaptatie en veerkracht;
3. buffer en reactorfunctie;
4. biodiversiteit;
5. ziekte en plaagwering;
6. fysieke structuur.

De ecosysteemdienst 'voorzien in een fysieke structuur en ruimte voor bouwen, wonen, industrie, infrastructuur, verkeer, spoorlijnen, afvalberging en niet-grondgebonden landbouw in kassen' is niet opgenomen in de in dit onderzoek toegepaste 'bodemplijst', omdat hij evident maatschappelijk en economisch van belang is, maar bij de daadwerkelijke benutting ook een evident grote impact heeft op het functioneren van de bodem als leverancier van overig Natuurlijk Kapitaal (zie ook paragraaf 4.3.3). Wanneer de bodem wordt afgedekt, is er geen toestroom van energie in de vorm van gereduceerde koolstofverbindingen en slechts een beperkte toestroom van nutriënten, zodat het bodemleven afsterft. Het mee laten lopen van deze ecosysteemdienst in de MCA zou te bepalend zijn voor de uitkomst.

Bij praktijkdemonstraties en pilots is gebleken dat diverse begunstigen van ecosysteemdiensten van de bodem ('*beneficiaries*'), zoals boeren en waterschappen, bekend zijn met diverse apart te onderscheiden kenmerken van het bodemsysteem die van belang zijn voor de levering van ecosysteemdiensten (Huijsmans en De Wit 2008, Smeding et al. 2008, Rutgers et al. 2012c). Dat was de aanleiding om bepaalde (hooggeaggregeerde) ecosysteemdiensten uit de internationale classificaties (MEA 2005, WRI 2009, TEEB 2010, CICES 2013) te deaggregeren tot specifieke kenmerken van het bodemsysteem. Zo is bijvoorbeeld de productiefunctie van de bodem door de inbreng van boeren in drie of vier te onderscheiden 'intermediaire' ecosysteemdiensten verdeeld, namelijk (i) natuurlijk nutriënten leverend vermogen, (ii) goede bodemstructuur, (iii) natuurlijk vermogen om ziekten en plagen te onderdrukken, en eventueel (iv) wateropzuigend (bij regen) en waterleverend (bij droogte) vermogen (Rutgers et al. 2005, 2007). Zolang het aantal te onderscheiden ecosysteemdiensten niet te groot wordt, is zo'n onderverdeling hanteerbaar en zinvol. Door vanaf het begin rekening te houden met afzonderlijke onderdelen ontstaat inzicht in de toestand van het Natuurlijk Kapitaal met voldoende onderscheidende aspecten om het handelingsperspectief concreet te maken op het niveau van het bodembeheer en -beleid.

Bovenstaande systematiek is ook overgenomen bij dit onderzoek. Dit leidde tot een lijst met elf ecosysteemdiensten of aspecten die er direct aan gekoppeld kunnen worden (Tabel 5), kortweg ecosysteemdiensten van de bodem.

In Tabel 2 is ook de koppeling aangegeven met de internationale classificaties, via de drie domeinen productiediensten, regulatiediensten en culturele diensten. In de classificatie van CICES (2013) is het moeilijk om bijvoorbeeld weerstand en herstelvermogen van het systeem een eigen plek te geven, terwijl ze voor het bodembeheer van belang kan zijn en in die zin ook gebruikt wordt (robuuste systemen leveren uitgespaarde beheerskosten).

Tabel 5. Ecosysteemdiensten van de bodem in lijn gebracht met CICES (2013) en andere kaders (TEEB 2010, MEA 2005, Rutgers et al. 2007).

Soil service in support of ecosystem service	Aggregated soil ecosystem service	CICES section	CICES division
1a. Nutrient retention and release 1b. Soil structure 1c. Natural disease suppressiveness ('biocontrol')	1. Supporting the production functions of the soil (crop, cattle, landscape) for agriculture, forests, nature, recreation and green areas	Provisioning services	Nutrition Materials Energy
2a. Resistance and resilience 2b. Potential for other land uses 3a. Fragmentation and mineralization of plant residues, building of soil organic matter, carbon cycling 3b. Natural attenuation or purifying capacity and nutrient cycling 3c. Water: retention, release and transport 3d. Climate functions (all temporal and spatial scales)	2. Resistance, resilience and flexibility (general support function) 3. Supporting the regulation functions of the soil (incl. nutrient cycles, clean ground water and clean surface water)	Regulation and maintenance services (CICES), regulating services (TEEB), regulating and supporting services (MA)	Mediation of waste, toxics and other nuisances Mediation of flows Maintenance of physical, chemical, biological conditions
4a. Habitat function, biodiversity and gene pool 4b. Ethical, cultural and educational functions	4. Supporting soil biodiversity and habitat functions	Cultural services	Physical and intellectual interactions with biota, ecosystems, and land-/seascapes Spiritual, symbolic and other interactions with biota, ecosystems, and land-/seascapes

4.4.3 Resultaten stap 2

In Tabel 6 zijn de resultaten van de tweede ronde samengevat met per ecosysteemdienst de gemiddelde score voor de relatieve geschiktheid van een specifieke indicator. Elf ecosysteemdiensten van de bodem zijn onderscheiden. Voor de rangordening van de bruikbaarheid van informatie van indicatoren voor beoordeling is het van belang de verschillende ecosysteemdiensten te onderscheiden. Elke situatie, elke bodembeleidsvraag en elke uitdaging voor een duurzamer bodembeheer en -beleid heeft een eigen context en daardoor een eigen focus op de optimale samenstelling van ecosysteemdiensten. Voor de rangordening ten behoeve van een generiek meetnet met landelijke dekking hebben alle elf ecosysteemdiensten van de bodem een gelijk gewicht gekregen. Dit kan afhankelijk van de context en naar behoefte aangepast worden.

Acht deskundigen op bodemgebied hebben de scores gegeven op een schaal van 0 (ongeschikte informatie) tot 10 (maximale relatieve geschiktheid). Alle potentiële indicatoren zijn op identieke wijze benoemd en in drie groepen ingedeeld op dezelfde wijze als in stap 1 (paragraaf 3.4).

Tabel 7 toont een selectie van drie keer acht indicatoren die een hoogste score (Tabel 7A) of een gemiddeld hoge score (Tabel 7B) ontvingen van de deelnemers aan de MCA.

Punsgewijs zijn de volgende observaties gedaan aan de resultaten van Tabel 6 en 7 en zijn voorlopige conclusies getrokken:

1. Een respons van acht deelnemers aan de MCA is voldoende voor een stabiele rangordening. De deskundigheid van de deelnemers lag op het vlak van de bodemecologie, met enige zwaarte bij de nematologie, maar de andere groepen organismen (wormen, microarthropoden, micro-organismen) waren ook voldoende vertegenwoordigd.
2. Gemiddeld over alle voorgestelde indicatoren en ecosysteemdiensten lopen de scores voor de diverse groepen indicatoren niet sterk uiteen, namelijk 4,5, 4,6 en 4,4. Dit komt overeen met de bevindingen uit stap 1, en

bevestigt de conclusie dat de deskundigen denken dat alle groepen indicatoren een rol kunnen hebben in een optimale set indicatoren voor beoordeling van ecosysteemdiensten.

3. De mogelijkheden om het bodemgebruik te veranderen en de culturele, ethische en educatieve ecosysteemdiensten werden door twee (verschillende) deelnemers niet gescoord.
4. Opvallend is dat bij enkele deelnemers de gemiddelde score in stap 2 beduidend lager is dan de ex-antescore die in stap 1 gegeven werd voor het geaggregeerde eindpunt 'ecosysteemdiensten'. Voor alle deelnemers was de score in stap 1 gemiddeld 5,8 en in stap 2 4,5 (op een schaal van 0 tot 10). Een mogelijke verklaring voor de lagere scores in stap 2 is dat er relatief vaak een 0 werd gescoord door enkele deelnemers (geen enkele indicatorwaarde); deze overmaat aan 0-scores verlaagde het gemiddelde aanmerkelijk. Volgens deze deelnemers is het bij nadere beschouwing dus onmogelijk om deze ecosysteemdiensten enigszins acceptabel te kwantificeren met behulp van biologische, abiotische en/of systeemgerichte indicatoren voor de bodem.
5. In het mondelinge overleg met de deelnemers bleek soms een verschil van inzicht over de definitie van een indicator (zie ook het vorige punt). In het bedoelde perspectief voor dit onderzoek is een indicator voor een kenmerk van de bodem in principe bruikbaar, als er een plausibele relatie verondersteld kan worden – statistisch en/of direct en/of indirect – tussen het kenmerk en het bedoelde eindpunt (ecosysteemdienst c.q. bodem-biodiversiteit). Dit is een ruime opvatting voor indicator. Sommige deelnemers hebben een lage score (nul) gegeven aan indicatoren die niet via een mechanistisch principe gekoppeld kunnen worden aan een eindpunt. De bijdrage van bijvoorbeeld de nematodengemeenschap aan de totale biomassa in het systeem is gering, zodat een relatie met de bodemstructuur minder voor de hand ligt, in tegenstelling tot de regenworm- en bacteriegemeenschap. Aan de andere kant is de nematodengemeenschap wel indicatief voor het gehele bodemleven, vanwege de veelheid aan trofische relaties en de verschillende levensstrategiegroepen, en daarmee ook indicatief voor de energie- en nutriëntenstatus van de bodem, en dus ook indicatief voor de (natuurlijke) waterregulatie via bijvoorbeeld regenwormen, bacteriën en organische stof.
6. De biologische indicatoren scoorden gelijkmatiger dan de abiotische en systeemindicatoren (meer uitschieters naar boven en beneden). Een mogelijke verklaring hiervoor is de verwevenheid van bodembioologische indicatoren in het bodemvoedselweb; de indicatoren zijn vaak onderling gecorreleerd, vaak positief, maar soms ook juist negatief (bijvoorbeeld microarthropoden en regenwormen). Die mate van verwevenheid is geringer bij de abiotische bodemindicatoren.
7. De gemiddelde scores voor de biologische en abiotische bodemindicatoren verschillen niet veel (respectievelijk 4,5 en 4,6). Bij de biologische bodemindicatoren is het gemiddelde van alle hoogste scores voor de indicatoren echter hoger dan het gemiddelde van alle hoogste scores voor de ecosysteemdiensten, respectievelijk 7,4 en 7,1. Bij de abiotische bodemindicatoren is dit andersom, namelijk 7,2 en 7,7. Er is dus meestal een abiotische indicator die een hogere score heeft voor de beoordeling van een ecosysteemdienst dan een biologische indicator (meestal organischestofgehalte). Gemiddeld genomen scoorden bodembioologische indicatoren niet slechter dan de abiotische bodemindicatoren. Dit illustreert het vermogen van bodembioologische indicatoren om de toestand van de ecosysteemdiensten op een integralere manier te

benaderen dan de abiotische bodemindicatoren, maar ook het grote belang van organische stof voor het functioneren van het ecosysteem.

8. De systeemgerichte en overige indicatoren nemen bij de vergelijking onder punt 6 een overeenkomstige positie in als de abiotische kenmerken. Individuele indicatoren scoren relatief goed bij specifieke ecosystemendiensten, maar zijn minder goed dan de biologische indicatoren in staat om de toestand op een integraal niveau te beschrijven.
9. De berekening van de gemiddelde score als maat voor de bruikbaarheid werkt, omdat vrijwel alle deelnemers alle indicatoren en alle ecosystemendiensten hebben gescoord. In dat geval is het niet van belang dat sommige deelnemers vaker een gemiddelde scoren hadden (4 tot en met 6) en weinig keer een nul of tien scoorden, terwijl andere deelnemers juist wel vaak een nul en een tien scoorden.
10. De standaarddeviatie als omgekeerde maat voor hoeveelheid 'consensus' werkt niet goed, vanwege de in punt 9 aangehaalde verschillende wijze van scoren door de deelnemers. Het normaliseren en centreren van de scores zou een oplossing kunnen zijn (niet uitgevoerd). De gemiddelde standaarddeviatie voor de verschillende groepen indicatoren verschilde niet.
11. Een enkele ecosystemedienst is door een enkele respondent niet gescoord (bijvoorbeeld culturele, ethische en onderwijskundige kwaliteiten), vanwege gebrek aan eenduidige definities of een verondersteld gebrek aan relevante indicatoren.

4.4.4

Conclusies en discussie bij stap 2

- De observatie uit de eerste stap, namelijk dat er geen groot verschil is tussen de drie groepen indicatoren voor de geschiktheid voor beoordeling van diverse ecosystemendiensten werd in de tweede stap bevestigd. Dit ondersteunt het uitgangspunt in het bodembeleid zoals verwoord in de Beleidsbrief Bodem (VROM 2003) dat de bepaling van het Natuurlijk Kapitaal het beste gebaseerd kan worden op een samenstel van chemische, fysische en biologische kenmerken (hier: biologische, abiotische en systeemkenmerken). Uit het gegeven dat alle deelnemers deze indicatorgroepen ongeveer gelijk scoorden, ongeacht de professionele achtergrond, volgt de conclusie dat dit resultaat relatief robuust is. Het ligt niet in de verwachting dat andere deskundigen tot een andere conclusie zullen komen.
- Ten opzichte van de drie typen kenmerken (chemisch, fysisch en biologisch) in de Beleidsbrief Bodem (VROM 2003) is bij het hier gepresenteerde onderzoek onderscheid gemaakt tussen 'bodemindicatoren' (gebaseerd op een meetbaar kenmerk in of aan de bodem) en 'systeemgerichte en overige indicatoren'. De discussie of bepaalde activiteiten zoals 'bodembewerking', 'maaifrequentie' of 'bodemgebruik' (systeemindicatoren) kunnen fungeren als een indicator voor het Natuurlijk Kapitaal of bepaalde ecosystemendiensten is hier niet gevoerd. Bij dit onderzoek is verondersteld dat wanneer een bepaald kenmerk kan dienen om een ecosystemedienst te kwantificeren, het beschouwd kan worden als een potentiële indicator, ongeacht of het gedeeltelijk of uitsluitend volgt uit menselijk handelen (peilbeheer, bodembewerking, et cetera), dan wel ingeperkt is door de kenmerken van het natuurlijke systeem zelf (grondsoort, klimaat, et cetera).
- Een aantal indicatoren is belangrijk voor de kwantificering van het Natuurlijk Kapitaal en de ecosystemendiensten van de bodem, maar is niet relevant voor het bodembeheer of bodembeleid, omdat ze geen bijdrage leveren aan het bieden van een handelingsperspectief. Voorbeelden hiervan zijn grondsoort en klimatologische omstandigheden. Andere kenmerken, zoals het grondwaterpeilbeheer, zijn mogelijk wel te beïnvloeden, maar slechts op

een grotere ruimtelijke en bestuurlijke schaal dan die van individuele bedrijven.

- Uit de schatting van de deelnemers blijkt organische stof een sleutelfactor te zijn voor veel ecosysteemdiensten. Het is onderdeel van het meetnet vanaf het begin in 1993 (Wattel-Koekkoek et al. 2012). Gedurende de drie monitoringscycli is de bepalingmethode aangepast, waardoor het afleiden van trends bemoeilijk wordt. Bepaling van de verschillende fracties organische stof (wateroplosbaar, stabiel, labiel) zou waardevolle aanvullende informatie kunnen leveren (Wattel-Koekkoek et al. 2003). Deze aanvullende bepaling van de fracties organische stof is als aparte indicator gescoord en kwam ook naar voren als een van de betere indicatoren voor karakterisering van bepaalde ecosysteemdiensten (Tabel 7B).
- Indicatoren, uit elke indicatoren groep een, die zowel een hoge score kregen voor een specifieke ecosysteemdienst en een hoge gemiddelde score kregen voor alle elf ecosysteemdiensten zijn:
 - nematodengemeenschap;
 - organischestofgehalte;
 - wijze en frequentie van bodembewerking (bij landbouwkundig bodemgebruik; bodemgebruik, natuurdoeltype en ecotoop worden gezien als een belangrijke indicator bij niet-landbouwkundig bodemgebruik).

De hoge verwachting die de deelnemers aan de MCA hebben van deze indicatoren laat zich als volgt verklaren:

- De nematodengemeenschap is een diverse groep veelvoorkomende bodemorganismen, met veel verschillende functionele kenmerken en vertakkingen in het hele bodemvoedselweb. Er zijn in Nederland veel data, kennis en ervaring aanwezig; de indicator heeft zich 'bewezen'.
- Het belang van organische stof als abiotische sleutelparameter voor het bodemleven is breed bekend. Organische stof is de belangrijkste koolstof- en energiebron voor het bodemleven. Als de aanvoer van gereduceerde koolstofverbindingen (meestal afkomstig van levende en dode planten) stopt, worden het bodemleven en bijna alle ecosysteemdiensten bedreigd en neemt het Natuurlijk Kapitaal af. Bodembewerking in een landbouwkundige context wordt door bodemkundigen gezien als een versturende factor voor het functioneren van het bodemsysteem, met name omdat het relatief stabiele organische stof in de bodem gedeeltelijk voor afbraak beschikbaar komt.

Tabel 6. Gemiddelde van de scores die acht personen hebben gegeven aan de bruikbaarheid van indicatoren voor beoordeling van elf ecosysteemdiensten. De maatlat liep van 0 (onbruikbaar) tot 10 (het bruikbaarst).

Achtergrondkleur in de cellen van de spreadsheet; paars = hoge score, blauw = gemiddelde score, wit = lage score; felgroen = hoogste scores per indicator (rijen) of ecosysteemdienst (kolommen).

1			2		3				4		↓ GEMIDDELDE	↓ HOOGSTE SCORE
Supporting production functions of the soil for agriculture, forests, nature, recreation and other green areas			Resistance, resilience and flexibility (general support function)		Supporting regulation functions of the soil (incl. nutrient cycles, clean ground water and clean surface water)				Supporting soil biodiversity and habitat functions			
a.	b.	c.	a.	b.	a.	b.	c.	d.	a.	b.		
Nutrient retention and release	Soil structure	Natural disease suppressiveness (biocontrol)	Resistance and resilience	Adaptation and options for other land uses	Fragmentation and mineralization plant residues, building of soil organic matter	Natural attenuation or purifying capacity and other nutrient cycling	Water: retention, release and transport	Climate functions (all temporal and spatial scales)	Habitat function, biodiversity and gene pool	Ethical, cultural and educational functions		

Voorafgestelde lijst aangegeerde biotische bodemindicatoren (korte namen: zie tabel 4 voor langere namen)

1	omvang bacteriegemeenschap	7,8	4,3	4,5	5,5	4,2	7,0	7,4	3,8	6,0	6,0	1,5	5,3	7,8											
2	groei snelheid en activiteit bacteriën	7,3	2,8	2,9	4,1	2,8	5,6	7,1	2,3	4,0	3,3	0,8	3,9	7,3											
3	potentiële C-mineralisatie, basale respiratie	7,3	2,9	2,5	3,8	3,7	6,6	6,9	2,5	5,3	2,5	2,2	4,2	7,3											
4	N-mineralisatie en/of anaerobe N mineralisatie	8,0	3,8	2,6	4,4	5,3	7,1	6,7	3,1	3,3	3,0	1,8	4,5	8,0											
5	structurele diversiteit micro-organismen ()	4,4	1,8	5,4	5,8	4,5	4,4	6,7	1,5	2,4	7,5	2,3	4,2	7,5											
6	fysiologische diversiteit bacteriën ()	5,8	1,9	5,3	5,3	4,3	5,8	6,7	2,3	3,0	6,0	3,0	4,5	6,7											
7	omvang (actieve) schimmelgemeenschap	6,4	5,8	4,6	4,5	5,2	6,6	6,1	4,6	4,0	6,5	1,8	5,1	6,6											
8	mycorrhizaschimmels	5,3	4,6	4,1	5,0	4,7	4,8	5,0	4,1	3,3	6,1	2,0	4,4	6,1											
9	enzymactiviteiten	4,9	1,9	4,0	4,4	4,0	5,5	6,3	2,0	3,8	3,9	1,8	3,9	6,3											
10	litter-bag, bait lamina	4,9	3,0	1,9	2,5	2,7	5,8	3,3	2,0	3,4	2,4	2,7	3,1	5,8											
11	protozoën (aantal en taxa)	5,8	3,1	2,9	3,4	3,2	6,9	5,0	1,5	2,4	7,8	2,3	4,0	7,8											
12	nematoden (aantal en taxa, plantparasieten)	6,8	4,6	6,8	5,4	6,0	6,8	4,1	2,5	2,6	9,3	2,5	5,2	9,3											
13	potwormen (aantal en taxa)	5,9	5,4	3,1	5,6	4,5	6,5	3,9	4,1	2,9	8,3	3,3	4,9	8,3											
14	regenwormen (aantal en taxa)	6,1	7,8	2,9	5,5	5,8	7,4	3,4	7,5	3,8	8,1	6,5	5,9	8,1											
15	micro-arthropoden (aantal en taxa)	4,1	4,5	4,3	4,6	5,7	4,8	3,4	2,5	2,0	8,9	3,0	4,3	8,9											
16	isopoden, loopkevers, spinnen, etc.	2,5	3,0	2,6	3,4	4,2	4,8	2,7	2,4	1,6	7,5	5,8	3,7	7,5											
17	doorworteling, wortelbiomassa	5,6	7,3	3,8	4,5	4,3	4,0	4,1	7,4	4,9	3,8	5,3	5,0	7,4											
												GEMIDDELDE →	5,8	4,0	3,8	4,6	4,4	5,9	5,2	3,3	3,4	5,9	2,9	4,5	7,4
												HOOGSTE SCORE →	8,0	7,8	6,8	5,8	6,0	7,4	7,4	7,5	6,0	9,3	6,5	7,1	

Voorafgestelde lijst abiotische bodemindicatoren

1	textuur: klei, silt, zand	6,9	8,5	5,4	6,3	7,3	7,1	6,9	7,6	5,9	5,9	4,5	6,6	8,5											
2	structuur: aggregaten, vorm en stabiliteit	5,1	9,0	3,8	4,9	6,7	6,5	4,6	7,4	4,3	4,1	4,0	5,5	9,0											
3	bulkdichtheid en porievolumen	5,1	8,3	3,0	4,4	4,5	5,4	3,3	7,6	4,3	4,8	1,7	4,7	8,3											
4	% leefruimte (water-lucht)	4,1	7,4	3,4	4,0	3,8	4,9	3,3	5,3	3,3	4,8	1,5	4,1	7,4											
5	indringweerstand	3,6	7,0	2,5	4,0	4,3	3,8	2,3	6,5	4,1	3,8	2,7	4,0	7,0											
6	waterdoorlatendheid (infiltratiesnelheid)	3,6	7,4	3,0	3,8	5,7	4,8	3,3	8,1	4,8	3,1	2,2	4,5	8,1											
7	vochtgehalte en vochtleverend vermogen	5,1	6,4	2,9	4,9	5,2	6,1	5,0	7,3	4,9	4,8	2,0	4,9	7,3											
8	zuurgraad (pHx)	6,1	5,4	5,5	4,6	6,3	7,5	5,9	3,0	5,1	6,4	1,5	5,2	7,5											
9	CEC	5,9	5,1	3,1	4,6	5,0	4,3	3,0	2,0	4,4	4,0	1,0	3,9	5,9											
10	gehalte organische stof	8,3	8,3	7,8	7,9	7,8	7,9	8,3	7,8	7,3	7,6	4,5	7,6	8,3											
11	fracties organische stof (stabiel, labiel)	7,5	7,4	5,5	6,1	6,3	6,6	5,4	6,3	6,0	6,3	1,8	5,9	7,5											
12	humuszuren organische stof	5,3	3,8	3,3	4,0	3,0	5,1	3,6	2,8	3,9	4,3	1,2	3,6	5,3											
13	C/N-ratio organische stof	7,0	4,5	3,6	5,0	5,5	6,9	4,4	3,8	4,6	4,9	2,3	4,8	7,0											
14	totaal N	5,8	2,8	3,0	4,6	6,5	5,0	4,0	2,1	3,4	4,6	2,3	4,0	6,5											
15	totaal P, en andere P-fracties	6,6	2,3	3,0	4,3	6,8	4,9	4,0	1,8	2,8	4,8	2,2	3,9	6,8											
16	Overige nutriënten en metalen	4,0	2,0	2,1	3,6	6,2	2,3	4,1	1,1	1,0	3,6	2,2	2,9	6,2											
17	bestrijdingsmiddelen en organische stoffen	1,8	0,9	3,9	2,9	5,7	1,5	3,7	0,6	1,0	2,4	1,0	2,3	5,7											
												GEMIDDELDE →	5,4	5,7	3,8	4,7	5,7	5,3	4,4	4,8	4,2	4,7	2,3	4,6	7,2
												HOOGSTE SCORE →	8,3	9,0	7,8	7,9	7,8	7,9	8,3	8,1	7,3	7,6	4,5	7,7	

Voorafgestelde lijst svsteemindicatoren 2012 ('percentage afdekking' buiten beschouwing gelaten vanwege evidentie)

1	bodemgebruik, ecotoop, natuurdoeltype	6,1	6,6	6,7	6,4	6,9	6,5	5,4	6,4	7,0	7,4	5,8	6,5	7,4											
2	historisch bodemgebruik	4,8	4,8	5,0	5,4	5,5	4,6	4,3	4,9	4,9	5,9	6,2	5,1	6,2											
3	grondwaterstand en peilbeheer	5,3	5,1	2,8	4,5	5,7	5,1	3,4	7,1	5,5	5,8	4,3	5,0	7,1											
4	primaire productie, gewasopbrengsten	7,6	6,1	6,6	5,9	5,2	7,3	4,0	5,5	6,0	5,8	3,8	5,8	7,6											
5	veebezetting, dichtheid en soort	5,1	4,6	2,5	3,8	4,7	4,1	2,9	2,6	6,4	4,1	3,0	4,0	6,4											
6	beweidning en bijvoeding vee, incl. krachtvoer	5,1	3,9	2,4	3,0	3,8	3,4	2,6	3,5	6,0	3,5	2,5	3,6	6,0											
7	aanvoer nutriënten en mest	7,9	4,0	3,5	5,9	5,7	6,6	3,9	4,3	6,3	6,0	3,3	5,2	7,9											
8	frequentie en wijze van bodembewerking	5,9	8,3	4,9	5,9	5,0	6,4	5,1	6,9	6,1	6,3	4,0	5,9	8,3											
9	bodemberijding, vertrapping, maai/frequentie	3,6	7,4	3,5	4,4	4,5	4,8	4,0	6,4	4,5	4,6	3,0	4,6	7,4											
10	bestrijdingsmiddelen en grondontsmetting	4,1	3,1	6,5	5,9	4,7	4,4	5,3	2,4	2,9	5,5	3,2	4,4	6,5											
11	Rotatie, vruchtwisseling, graslandvernieuwing	5,6	6,0	7,6	6,4	5,3	6,1	4,7	5,4	4,8	6,4	5,0	5,8	7,6											
12	diversiteit planten, vegetatieopname, bos	5,4	3,4	4,8	6,0	6,5	4,1	4,1	4,0	3,6	6,6	6,5	5,0	6,6											
13	% gras van het totaal, i,r,t, mais en bouwland	4,9	4,8	5,0	5,9	4,3	4,9	4,6	5,5	5,4	5,6	2,8	4,9	5,9											
14	% braak op het totaal van het productieareaal	4,1	4,6	5,3	5,0	3,5	4,4	4,4	5,3	5,3	5,1	2,5	4,5	5,3											
15	% niet-productieve landschapselementen	3,0	3,1	5,3	4,6	4,8	3,0	3,7	3,9	4,8	6,4	5,7	4,4	6,4											
16	leaf area index	2,1	1,6	1,6	2,3	1,5	2,4	1,8	3,1	2,4	2,4	1,2	2,0	3,1											
17	GHG-productie (methaan, CO2, lachgas)	2,8	2,8	1,3	1,5	1,8	4,0	2,0	3,3	8,1	1,9	1,7	2,8	8,1											
18	waterbergend vermogen	3,1	6,0	1,3	3,3	4,3	3,3	2,9	8,1	5,4	2,5	0,8	3,7	8,1											
19	recreatie en educatie	0,9	0,8	0,5	1,9	4,2	0,6	0,4	1,0	1,6	2,5	6,5	1,9	6,5											
20	temperatuur, evaporatie, neerslag	5,4	3,0	2,8	1,9	4,2	5,3	3,9	5,3	5,8	2,9	0,7	3,7	5,8											
												GEMIDDELDE →	4,6	4,5	4,0	4,5	4,6	4,6	3,7	4,7	5,1	4,9	3,6	4,4	6,7
												HOOGSTE SCORE →	7,9	8,3	7,6	6,4	6,9	7,3	5,4	8,1	8,1	7,4	6,5	7,3	

Tabel 7. Zes rangschikkingen van indicatoren voor het beoordelen van ecosysteemdiensten volgens de inschatting van deskundigen:

A. drie keer acht indicatoren met de hoogste score voor een specifieke ecosysteemdienst (zie Tabel 6):

B. drie keer acht indicatoren met een gemiddeld hoge score voor alle elf (gelijkgewogen) ecosysteemdiensten. De nummering van de indicatoren is gelijk aan die in Tabel 4 en 6; de benaming is verkort.

A. Acht hoogst scorende indicatoren

	hoogste score
<u>Biologische bodemindicatoren</u>	
12 nematoden	9,3
15 micro-arthropoden	8,9
13 potwormen	8,3
14 regenwormen	8,1
4 N-mineralisatie	8,0
1 biomassa bacteriën	7,8
11 protozoën	7,8
5 structurele diversiteit bacteriën	7,5
<u>Abiotische bodemindicatoren</u>	
2 structuur: vorm en aggregaatsstabiliteit	9,0
1 textuur: klei, silt, zand	8,5
10 gehalte organische stof	8,3
3 bulkdichtheid en porievolume	8,3
6 waterdoorlatendheid	8,1
8 zuurgraad (pHx)	7,5
11 fracties organische stof (stabiel, labiel)	7,5
4 % leefruimte (water+lucht)	7,4
<u>Systeemgerichte en overige indicatoren</u>	
8 frequentie en wijze bodembewerking	8,3
18 waterbergend vermogen	8,1
17 GHG-productie (methaan, CO ₂ , lachgas)	8,1
7 aanvoer van meststoffen (N, P, K) en OS	7,9
4 primaire productie, opbrengsten, gewasresten	7,6
11 rotatie, vruchtwisseling, graslandvernieuwing	7,6
1 bodemgebruik, ecotoop, natuurdoeltype	7,4
9 bodemberijding, vertrappeling, maaien	7,4

B. Acht gemiddeld hoog scorende indicatoren

	gemiddelde score
<u>Biologische bodemindicatoren</u>	
14 regenwormen	5,9
1 biomassa bacteriën	5,3
12 nematoden	5,2
7 biomassa schimmels	5,1
17 doorworteling, wortelbiomassa	5,0
13 potwormen	4,9
6 fysiologische diversiteit bacteriën	4,5
4 N-mineralisatie	4,5
<u>Abiotische bodemindicatoren</u>	
10 gehalte organische stof	7,6
1 textuur: klei, silt, zand	6,6
11 fracties organische stof (stabiel, labiel)	5,9
2 structuur: vorm en aggregaatsstabiliteit	5,5
8 zuurgraad (pHx)	5,2
7 vochtgehalte en vochtleverend vermogen	4,9
13 C/N-ratio organische stof	4,8
3 bulkdichtheid en porievolume	4,7
<u>Systeemgerichte en overige indicatoren</u>	
1 bodemgebruik, ecotoop, natuurdoeltype	6,5
8 frequentie en wijze bodembewerking	5,9
4 primaire productie, opbrengsten, gewasresten	5,8
11 rotatie, vruchtwisseling, graslandvernieuwing	5,8
7 aanvoer van meststoffen (N, P, K) en OS	5,2
2 historisch bodemgebruik	5,1
12 diversiteit planten, vegetatieopname, bos	5,0
3 grondwaterstand en peilbeheer	5,0

4.5 Derde stap in de MCA: rangordening van indicatoren

4.5.1 Samenvatting van het resultaat van de derde stap

- Vijf groepen van ongelijksoortigen criteria (praktische uitvoerbaarheid, kosten, relevantie voor kwantificering van het eindpunt, gevoeligheid en relevantie voor beleid en beheer) zijn meegewogen in de rangordening van de indicatoren voor praktische toepassing in een bodemmeetnet.
- Er zijn veel goede indicatoren, met weinig uitschieters naar boven en naar beneden. Dit impliceert dat alternatieve rangschikkingen mogelijk zijn, zonder beduidend kwaliteitsverlies van een gebalanceerde indicatorenset.

- Oude gegevens uit eerdere meetinspanningen en monitoring blijven ook in de toekomst bruikbaar voor de beoordeling van ecosysteemdiensten. Deze conclusie is gebaseerd op het feit dat de 'oude' indicatoren goed scoren in de rangschikking die het resultaat is van dit onderzoek.
- Meer gewicht voor de kosten van uitvoering hebben slechts een beperkt effect op de rangordening, omdat de kosten van de verschillende indicatoren niet sterk uiteen lopen. Het aantal indicatoren is dus bepalend voor de totale kosten, niet de keuze van indicatoren.
- De keuze om de complete bundel ecosysteemdiensten of de bodembiodiversiteit te meten heeft een beperkt effect op de meeste optimale set indicatoren.

4.5.2 *Overige criteria voor de rangordening van indicatoren*

In de voorgaande fase is door deelnemers aan de MCA aangegeven of en in welke mate de informatie van bepaalde indicatoren van betekenis kan zijn voor de bepaling van de bodembiodiversiteit en elf ecosysteemdiensten van de bodem. De derde stap voor de MCA betrof de inschatting van de bruikbaarheid van deze indicatoren aan de hand van aanvullende criteria:

1. Praktische uitvoerbaarheid
 - a. Wat is het niveau van de benodigde (laboratorium)faciliteiten?
 - b. Wat is de benodigde deskundigheid om de meting of berekening uit te voeren?
2. Kosten
 - a. opstart- en investeringskosten;
 - b. (hulp)materiaalkosten per analyse;
 - c. aantal uren x uurtarief voor het veldwerk per analyse;
 - d. aantal uren x uurtarief voor het labwerk per analyse.
3. Betekenis van de informatie. Dit is feitelijk een herhaling van stap 1 en 2. Levert de indicator informatie op die gebruikt kan worden om:
 - a. de bodembiodiversiteit te kwantificeren;
 - b. ecosysteemdiensten van de bodem te beoordelen.
4. Gevoeligheid. Is de indicator in staat om onderscheidend vermogen te leveren op het niveau van:
 - a. grondsoort en bodemtype;
 - b. bodemgebruik;
 - c. verstoringen als gevolg van milieudrukfactoren (bijv. de V-thema's).
5. Geschiktheid en relevantie voor het beleid en beheer:
 - a. is de informatie relevant voor het beleid en communiceerbaar naar de stakeholders?
 - b. is de indicator gestandaardiseerd?
 - c. kan de indicator toegepast worden in een monitoringssysteem?

Bovenstaande criteria zijn overgenomen van een EU-project (Lemanceau 2011, Faber et al. 2013) en worden ook in andere studies genoemd (Doran en Zeiss 2000, Turbé et al. 2010). De criteria werden in een spreadsheet aangeboden aan de deelnemers van de MCA met de vraag of men kon aangeven in welke mate indicatoren aan de criteria tegemoetkamen. Een aantal geaggregeerde indicatoren uit de stappen 1 en 2 werd gedeaggregeerd tot op het niveau van een meetprotocol. Hierdoor groeide de lijst met biologische bodemindicatoren van 17 tot 38 en die met abiotische indicatoren van 17 tot 20. De lijst met systeemgerichte indicatoren en overige indicatoren bleef identiek (20 indicatoren). Om het scoren toch in een beperkte tijd te kunnen uitvoeren werd de schaal voor scoren ingekort van 0 (slechtste score) tot en met 5 (beste

score). Bijlage 5 bevat de lijst met gedeaggregeerde indicatoren. Bijlage 6 bevat de aanvullende criteria en scoringsklassen.

4.5.3 Resultaten stap 3

Tabel 8 toont een samenvatting van de resultaten van de derde ronde van de MCA. Zeven deskundigen op bodemgebied en agrarisch bodemadvies hebben de relatieve geschiktheid van 77 indicatoren aan de hand van vijf groepen criteria (paragraaf 4.5.2) geschat. In overleg met alle deelnemers aan de MCA is als startpunt aan elk van de vijf criteria een gelijk gewicht meegegeven (20%). Deze ex-anteweging kan naar behoefte aangepast worden. Het effect van alternatieve wegen werd apart geëvalueerd (zie paragraaf 4.5.5).

Puntsgewijs zijn de volgende observaties met behulp van de tabel gedaan en zijn conclusies getrokken:

1. Net als in de voorgaande stappen zijn er volgens de deelnemers geen grote verschillen tussen de diverse groepen indicatoren. Omdat in de derde stap een nadere onderverdeling is gemaakt in de groep van biologische bodemindicatoren (namelijk bodemfauna, micro-organismen en functionele biologische bodemindicatoren), worden er in totaal vijf groepen potentiële indicatoren onderscheiden (inclusief functionele abiotische bodemindicatoren en systeemindicatoren). Voor de vijf groepen potentiële indicatoren bedraagt de laagste gemiddelde gewogen score 2,57 (microbiologische indicatoren) en de hoogste 3,11 (abiotische functionele bodemindicatoren). De relatief kleine verschillen maken dit resultaat wederom in lijn met het uitgangspunt in de Beleidsbrief Bodem (VROM 2003), namelijk dat beoordeling van bodemkwaliteit het beste uitgevoerd kan worden met een geïntegreerde set chemische, fysische en biologische parameters in een systeemgerichte context. Bij de stappen 1 en 2 van de MCA ging het om inhoudelijke argumenten (zie paragrafen 4.3.4 en 4.4.3); deze derde stap laat zien dat andere criteria voor indicatoren, zoals kosten, praktische bruikbaarheid, gevoeligheid en beleidsmatige relevantie, deze zienswijze niet wezenlijk veranderen.
2. De microbiologische indicatoren hebben de laagste gemiddelde score gekregen, namelijk 2,57. Er zijn drie omstandigheden die deze betrekkelijk lage score mogelijk verklaren:
 - A. Voor de microbiologische indicatoren is een veelheid aan DNA-technieken beschikbaar, maar de DNA-technieken hebben in het algemeen een lage score gekregen (gemiddeld 2,4; zie punt 5 hieronder).
 - B. Microbiologische indicatoren scoren slecht als indicator voor de meting van de bodembiodiversiteit (zie discussie paragraaf 4.6.1),
 - C. Enkelvoudige bepalingen (één eindpunt in de methode; geeft informatie over één kenmerk) scoren slechter dan meervoudige eindpuntbepalingen, vooral op het gebied van de gevoeligheid. Fauna-indicatoren zijn altijd gebaseerd op een multi-eindpuntbepaling, vanwege de taxonomische identificatie op het niveau van soorten (elke soort is een apart kenmerk); bij de microbiologische methoden is dit een beperkt aantal.

Rekening houdend met deze factoren is de conclusie dat bepaalde microbiologische indicatoren even bruikbaar zijn als de andere indicatoren.
3. De lijst met potentiële bodemindicatoren uit de stappen 1 en 2 van de MCA is gedeaggregeerd tot op het niveau van een technisch meetvoorschrift. Voor de analyse van de bacteriebiomassa in grond zijn bijvoorbeeld meerdere protocollen beschikbaar. Met de uitkomst van stap 3 is het dus

mogelijk om een keuze te maken uit meerdere protocollen die hetzelfde eindpunt bedienen (bijvoorbeeld bacteriebiomassa, respiratie en nematodengemeenschap).

4. Alle DNA-technieken scoorden slechter dan het traditionele equivalent (gemiddeld respectievelijk 2,4 en 2,9; bij de nematoden 2,6 en 3,3). Dit lijkt te illustreren dat de meeste DNA-technieken onvoldoende 'rijp' zijn voor routinematige toepassing in een meetnet of andere bezwaren kennen. Overigens liepen de waarderingen van de deskundigen over bruikbaarheid van DNA-technieken sterker uiteen dan die van de klassieke analysemethoden. De expertise van DNA-technieken was gemiddeld beperkter dan voor alle andere technieken (respectievelijk 2,0 en 2,9).
5. De gewogen (zie punt 1.) en gemiddelde scores per indicator variëren, maar er is niet één unieke indicator die duidelijk uitstijgt boven alle andere potentiële indicatoren, of één die als onbruikbaar moet worden beschouwd in een praktisch meetnet. Op een theoretische schaal van 0 tot 5 bedraagt de laagste gewogen en gemiddelde score 2,2 voor de moleculair biologische analyse van de protozoëngemeenschap en pyrosequencing van bacteriën, en de hoogste 3,7 voor het organischestofgehalte (Tabel 8). De standaardafwijking als maat voor verschillen in schattingen van deskundigen¹ aan de hand van de verschillende criteria lag steeds tussen de 0,9 en 1,2, met een paar uitschieters (omhoog 1,3 voor DNA-barcoding van nematoden en omlaag 0,8 voor de klassieke analyse van de nematoden).
6. Organischestofgehalte krijgt de hoogste gemiddelde score, net als bij de stappen 1 en 2. Dit betekent dat naast het grote belang vanwege de rol die organische stof kan spelen bij de kwantificering van het Natuurlijke Kapitaal van de bodem, hij tevens op de andere criteria gemiddeld goede scores behaalt (naast matige scores op de bodembiodiversiteit en op gevoeligheid). De analyse van verschillende fracties van de organische stof scoort op het gebied van gevoeligheid voor verstoring beter dan totaalgehalte.
7. De deelnemers toonden de minste overeenstemming bij de inschatting van de bruikbaarheid van de systeemgerichte indicatoren. Dit kan veroorzaakt zijn door de relatieve onbekendheid met dit type indicatoren.
8. De complete set indicatoren die in het kader van Bobi en het LMB wordt toegepast laat zich goed vergelijken met de rangordening in Tabel 8. Alle Bobi-indicatoren (categorieën A, B en C) scoren bij de bovenste helft van de rangschikking van deze MCA. Datzelfde geldt voor alle LMB-indicatoren (categorie D) en de systeemindicatoren (categorie E), met uitzondering van de concentraties van diffuus verontreinigende stoffen (zware metalen en organische microverontreinigingen). Het LMB is in 1993 gestart met als doel de bodembelasting met diffuse verontreiniging te monitoren.
9. Opvallende 'nieuwe' en veelbelovende indicatoren en andere observaties:
 - A. *Fauna*
Er zijn geen goed scorende 'nieuwkomers'. De vijf bodemfauna-indicatoren die in Bobi werden toegepast bezetten de vijf hoogste plaatsen in de rangordening. Ondanks het feit dat voor alle indicatoren een zekere mate van deskundigheid benodigd is voor taxonomische identificatie, scoren de DNA-methoden voorlopig slechter. DNA-barcoding van de nematodengemeenschap scoort het hoogst. In het EU-project EcoFinders (Lemanceau 2011, Faber et al. 2013) werden voor

¹ Bij deze stap waren de scores van de verschillende deelnemers over het geheel homogener dan in de stap 2, waarbij specifiek naar bepaalde ecosysteemdiensten werd geïnformeerd. De standaarddeviatie als omgekeerde maat voor consensus is dan mogelijk wel bruikbaar.

alle faunagroepen DNA-methoden geëvalueerd, maar geen enkele behaalde een hoge score (ongepubliceerde gegevens).

B. *Micro-organismen*

De bepaling van de bacteriebiomassa met de fumigatie-extractiemethode (FE) scoort hoog, maar wordt niet als een 'nieuwkomer' beschouwd, omdat in Bobi voor hetzelfde eindpunt de 'microscop-telmethode' toegepast wordt.

Schimmels werden tijdens de tweede LMB-ronde in 2001, 2002 en 2004 en systematisch vanaf het begin van de derde LMB-ronde bepaald, als toevoeging op de Bobi-indicatoren. Schimmels werden niet beschouwd als een geschikte indicator in de eerste opzet voor Bobi (Schouten et al. 1997), maar voorschrijdend inzicht en de mogelijkheid om schimmels routinematig te analyseren veranderden de situatie.

Bepaling van de PLFA (Phospho Lipid Fatty Acids) lijkt een goed alternatief als indicator van de structurele diversiteit van de microbiële gemeenschap. Bij deze bepaling worden zowel bacteriën als schimmels gemeten. PLFA scoort beter dan de op DNA-techniek gebaseerde methoden voor micro-organismen.

Analyse van de Mycorrhizae-gemeenschap lijkt een veelbelovende indicator te zijn. De kosten voor bemonstering, de extractie en de analyse in het laboratorium zouden beperkende factoren kunnen zijn. Bij toepassing van PLFA kunnen Mycorrhizae wel gemeten worden in de gewone mengmonsters via de biomarker Neutral Lipid Fatty Acid. Protisten zijn de ontbrekende, maar wel in niet-zandige bodems essentiële groep bodemorganismen. Het ontbreken van praktische, stabiele en betaalbare meetprotocollen belemmert toepassing van indicatoren voor deze groep in een routinematige opzet (zie Mulder et al. 2011). Er zijn wel specifieke PLFA-biomarkers voor protisten, maar daar is nog weinig ervaring mee.

C. *Functionele biologische bodemindicatoren*

De bepaling van de wortelbiomassa is een nieuwkomer. Het steken van de monsters is bewerklijker dan in eerste instantie werd verwacht, wat de bruikbaarheid van de methode in de weg kan staan.

Litterbags scoren onverwacht goed. Het nadeel van de methode is dat het veldwerk niet meer in één dag kan plaatsvinden, wat de kosten voor veldwerk doet toenemen.

D. *Functionele abiotische bodemindicatoren*

Vele goed scorende indicatoren werden al in het LMB toegepast. De indicator 'klei, silt, zand' (grondsoort) kreeg een lage score, omdat grondsoort niet gezien wordt als een indicator, maar als een vaststaand en plaatsgebonden gegeven. Sommige indicatoren, zoals meting van de indringweerstand en waterinfiltratiesnelheid, worden regelmatig toegepast en zijn relatief eenvoudig te implementeren.

Waterinfiltratiesnelheid staat nu sterk in de belangstelling, maar de bruikbaarheid van de resultaten is nog niet goed onderbouwd.

Andere goed scorende indicatoren zijn gericht op de kwaliteit van de organische stof (C/N-verhouding, labiele en stabiele fracties). Gezien het belang van organische stof is uitbreiding van de indicatorenset op dit gebied aan te bevelen (Wattel-Koekkoek et al. 2003).

E. *Systeemgerichte en overige indicatoren*

Dit betreft indicatoren waarvoor de informatie veelal op het niveau van het bodembeheer en de bedrijfsvoering verzameld dient te worden.

Hiervoor zal meer gebruik worden gemaakt van de informatie van het LEI (Landbouw Economisch Instituut) en geografische informatie (bijvoorbeeld ruimtelijke analyse van het bodemgebruik). Hoewel zulke

indicatoren regelmatig worden toegepast is de bijbehorende informatie nog niet in een, voor beoordeling van ecosysteemdiensten praktische, toepasbare vorm beschikbaar.

10. De slechtst scorende indicator in het huidige analysepakket van Bobi en het LMB is de bepaling van de leucine/thymidine-inbouwsnelheid bij de microbiële gemeenschap (score 2,67). Deze score wordt verklaard door de behoefte aan specifieke apparatuur en expertise en de veronderstelde lage gevoeligheid van de methode voor verstoring en grondsoort. Een lage score is hier een relatief begrip, want de indicator staat nog steeds bij de bovenste helft van goed scorende indicatoren, en het verschil met de bepaling van de bacteriebiomassa (2,75) is niet heel groot.

4.5.4 Conclusie en discussie stap 3

- Omdat MCA geen 'exacte wetenschap' is en omdat bijna alle indicatoren scores hebben gekregen die, op enkele uitzonderingen na, dicht bij elkaar in de buurt liggen, zijn gegevens die met deze indicatoren verkregen worden meestal goed bruikbaar. Het gevaar is dat de resultaten van de hier gepresenteerde MCA overgeïnterpreteerd worden. Bij vergelijkbare analyses zullen alternatieve rangordeningen ontstaan, die niet veel slechter of veel beter zijn. De uitkomst van deze MCA kan gebruikt worden om indicatoren te rangordenen en te selecteren, maar dat betekent niet dat niet geselecteerde indicatoren slecht zijn. Een regelmatige herwaardering van de rangordening is nuttig om te bepalen of alle indicatoren nog *state of the art* zijn.
- De rangordening van indicatoren voor beoordeling van ecosysteemdiensten van de bodem in een landelijk meetnet laat weinig verrassingen zien. Veel biologische bodemindicatoren die in gebruik waren bij lopende projecten, zoals het Bobi-project (Rutgers et al. 2009), EU-project Ecofinders (Faber et al. 2013, Lemanceau 2009), project SIZEMIC (Cohen en Mulder 2013), ERGO/BE-Basic (Vervoort et al. 2012) en veel andere projecten, scoren ook goed bij de beoordeling van ecosysteemdiensten. Chemische parameters die bij het LMB werden geanalyseerd zijn ook hoog in de ranglijst terug te vinden, met uitzondering van zware metalen en organische microverontreinigingen.
Over de hele breedte van het beschikbare analysepakket kan daarom geconcludeerd worden dat de meeste indicatoren een gelijkwaardige en zinvolle bijdrage leveren aan het genereren van kwantitatieve informatie over de bodem als onderdeel van het Natuurlijk Kapitaal van Nederland, naast de systeemgerichte en overige indicatoren. De gegevens die met alle indicatoren samen worden verkregen zijn daarom te gebruiken voor de beoordeling van de ecosysteemdiensten van de bodem.
- Alle geëvalueerde indicatoren zijn bruikbaar voor de analyse van de toestand van de bodem, in termen van biodiversiteit en ecosysteemdiensten, maar de mate waarin verschilt per indicator, per ecosysteemdienst, per grondsoort en bodemgebruikscategorie. De resultaten van de MCA zijn bruikbaar om hier de optimale keuzes in te maken. Een gebalanceerde set met biologische, abiotische en systeemgerichte indicatoren geeft het meeste inzicht in de bodemkwaliteit. Het selecteren van de meest optimale set van indicatoren voor een specifiek doel blijft een uitdaging. De vuistregels hiervoor kunnen zijn:
 - Selecteer indicatoren die mechanistisch of statistisch goed met de gewenste eindpunten (specifieke set ecosysteemdiensten, de bodem-biodiversiteit) correleren en geef dit criterium voldoende gewicht ten opzichte van de andere criteria. Als een beperkte focus volstaat, is het

mogelijk om daar bij de selectie van indicatoren rekening mee te houden.

- Selecteer per eindpunt (ecosysteemdienst, of bodembiodiversiteit) uit alle indicator domeinen (biologisch, abiotisch, systeemgericht) tenminste één indicator teneinde de onzekerheid als gevolg van onwetendheid efficiënt te verminderen. Deze vuistregel borduurt voort op ervaring bij de beoordeling van bodemkwaliteit in het geval van een bodemverontreiniging. Deze benadering wordt *Weight of Evidence* genoemd (WoE; Chapman et al. 2002, Rutgers en Jensen 2011) en wordt ook toegepast bij de bewijsvoering in rechtszaken.
- Bij meerdere eindpunten is het vanuit efficiencyoverwegingen zinvol om te onderzoeken of er synergiewinst behaald kan worden door de resultaten van één indicator voor meerdere eindpunten te gebruiken. Op deze wijze kan de totale indicatorenset geoptimaliseerd worden.
- Een beperkte set indicatoren voor een minimale dataset (MDS) van het Natuurlijk Kapitaal van de bodem (elf ecosysteemdiensten en de bodembiodiversiteit) in een landsdekkend bodemmeetnet kan gebaseerd worden op de resultaten van deze MCA. De indicatoren komen uit de volgende domeinen (zie Bijlage 6 voor details)
 - Biologische bodemindicatoren: regenwormen, potwormen, nematoden, microarthropoden, schimmels, bacteriën, N-mineralisatie, C-mineralisatie, wortels.
 - Abiotische bodemindicatoren: bodemkenmerken, indringweerstand, bulkdichtheid, organischestofparameters, nutriënten.
 - Systeemgerichte indicatoren: bodemgebruik, vegetatie, diverse kenmerken van het agrarische bodembeheer (teelten, rotatie, bewerking, bemesting, bestrijding, berijding), grondwater.

4.5.5 *Andere gewichten en selectie van criteria*

Voor de rangordening in stap 3 hebben de vijf groepen criteria vooraf elk een gelijk gewicht gekregen, namelijk 20%. Wanneer bepaalde criteria een ander gewicht krijgen, zal naar verwachting de rangordening veranderen. Om het effect van andere weegfactoren te bestuderen zijn er alternatieve gewichten aan de criteria meegegeven.

Bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten van de bodem

Het criterium 'relevantie voor het natuurlijk systeem (*appropriateness to measure*)' is verkaveld over twee aspecten die elk een gelijk gewicht van 10% kregen, namelijk de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem. Beide aspecten hebben een potentieel belang bij de selectie van indicatoren. De vraag is in welke mate de rangordening verandert als slechts een van beide aspecten (c.q. geïntegreerde eindpunten) beoordeeld dient te worden. In de MCA is daartoe het gewicht van het ene aspect op 20% gezet en het andere op 0%, en omgekeerd.

Voor drie indicatorgroepen (Bodemfauna, Functionele biologische bodemindicatoren en Functionele abiotische bodemindicatoren) trad geen enkele verschuiving in de rangorde van indicatoren op. Bij de Microbiologische indicatoren steeg de Leucine/thymidine-inbouw twee plekken bij een focus op uitsluitend de ecosysteemdiensten (ten koste van MicroResp en de Mycorrhizae) en daalde twee plekken bij uitsluitend een focus op de bodembiodiversiteit (ten gunste van DGGE en de schimmelgemeenschap).

Een grotere verschuiving trad op bij de systeemgerichte indicatoren: de primaire productie steeg vijf plaatsen (naar plaats twee in de rangorde) bij een focus op uitsluitend de ecosysteemdiensten en daalde vijf plaatsen bij een focus op uitsluitend de bodembiodiversiteit. Primaire productie is een lastig te interpreteren parameter als het om de ecosysteemdiensten van de bodem gaat, omdat aanvoer van nutriënten (mest, veevoer) voor een klein of juist een groot deel de primaire productie bepaalt.

De conclusie is dat het voor alle indicatoren - behalve de hierboven benoemde uitzonderingen - niet van belang is of bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten het eindpunt van de analyse vormen.

Een zwaarder gewicht voor de kosten

Om het kostenaspect zwaarder te laten wegen kregen andere criteria een lagere weegfactor. Het belang van het criterium 'kosten voor bemonstering en analyse' werd verhoogd van 20% tot 40%. Het criterium 'relevantie voor het natuurlijk systeem' hield een gelijk gewicht (20%). Andere criteria kregen een lager gewicht, namelijk praktische uitvoerbaarheid 10%, gevoeligheid 15%, en relevantie voor het beleid 15%. Deze herverdeling van gewichten had geen enkel effect op de rangordening van indicatoren. De oorzaak is dat geëvalueerde indicatoren in de MCA niet zozeer in prijs verschillen dat het de rangordening beïnvloedt, wanneer er een zwaarder belang aan gehecht wordt.

Als kosten een belangrijk aspect zijn in de uitvoering van een meetcampagne, kunnen deze alleen in belangrijke mate beïnvloed worden door het aantal indicatoren te verminderen.

4.6 Evaluatie van de MCA en de workshops

MCA is geen exacte wetenschap (zie Tekstkader 3; blz. 41). Het doel van de analyse was om caleidoscopische en onvergelijkbare informatie over indicatoren, afkomstig van meerdere deskundigen en onderzoeken, op een efficiënte, gestandaardiseerde en transparante wijze zodanig bij elkaar te brengen dat er een verdedigbare rangorde ontstaat van de bruikbaarheid van indicatoren voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten in een bodemmeetnet. Voor de MCA in dit onderzoek is een aantal evaluatiepunten en controles ingebouwd, en er is discussie ontstaan, die hieronder in aparte paragrafen is uitgewerkt, namelijk:

1. het effect van vooroordelen bij deskundigen;
2. consistentie en verloop gedurende de verschillende fasen;
3. variatie in de scores voor alle criteria;
4. vergelijking met Bobi;
5. statistische analyse van data als basis voor indicatorselectie.

4.6.1 Vooroordelen bij de deelnemers aan de MCA?

De bodemecologie is verdeeld in verschillende disciplines, onder andere voor de verschillende groepen organismen in het bodemvoedselweb. De onderlinge verschillen in grootte van organismen in de bodem is enorm. Een regenworm en een bacterie verschillen ongeveer twaalf of dertien ordes van grootte op gewichtsbasis.

De onderzoeksdomeinen voor regenwormen en bodembacteriën zijn daarom compleet verschillend, met eigen vaktermen, conceptuele kaders en onderzoeksaanpak. Dat geldt in meer of mindere mate voor alle groepen organismen.

Tabel 8. Gemiddelde en standaardafwijking (st.dev.) van de inschatting die deelnemers gegeven hebben aan de bruikbaarheid van indicatoren aan de hand van vijf gelijkgewogen groepen criteria, namelijk i. praktische uitvoerbaarheid, ii. kosten, iii. relevantie voor het systeem, iv. Gevoeligheid, en v. relevantie voor het beleid (zie tekst; spreadsheet uit EU-project Bijlage). De indicatoren zijn gesorteerd naar afnemende gemiddelde score. Bij grote verschillen tussen de inschatting van de deskundigen (hoge standaarddeviatie) is de betreffende cel blauw gekleurd. De groene kleur duidt aan dat de indicator onderdeel was van Bobi. De paarse kleur duidt aan dat de indicator onderdeel was van het LMB. De grijze kleur duidt aan dat de indicator op ad-hocbasis af en toe wordt toegepast, maar nog geen formeel onderdeel is van de Bobi- en LMB-indicatoren.

		weighed				weighed			
		average	st.			average	st.		
A. Fauna		score	dev.	D. Functional and abiotic soil indicators		score	dev.		
2	Earthworms	Counts, weight, morphology	3.56	1.06	48	organic matter content	3.69	1.01	
6	Nematodes	Counts, sizes, morphology	3.28	0.83	46	acidity (pHx)	3.66	0.87	
4	Mites	Counts, sizes, morphology	3.08	1.01	44	water infiltration rate	3.44	1.09	
5	Collembola	Counts, sizes, morphology	3.04	1.11	51	C/N ration OM	3.33	1.01	
3	Enchytraeids	Counts, weight, morphology	3.03	0.91	52	total N	3.30	0.92	
1	Carabid beetles, etc.	Counts, morphology	2.85	1.20	43	penetration resistance	3.26	1.13	
8	Nematodes	Molecular: DNA-barcoding	2.63	1.34	49	organic matter composition 1 (stable, labile)	3.23	1.05	
7	Nematodes	Molecular: TRFLP	2.47	1.20	41	bulk density, pore volume	3.20	1.05	
average			2.99	1.08	55	total P	3.18	0.88	
B. Microbes					53	PAI	3.13	0.88	
19	Bacteria	Biolog	2.91	0.91	54	Pwater	3.13	0.88	
10	Bacteria	FE, biomass	2.86	0.99	47	CEC	3.09	0.95	
17	Bacteria	PLFA	2.83	0.95	42	% living space (water+air)	3.04	1.13	
22	Fungi	Counts, biomass, active fungi	2.79	0.96	45	humidity and pF curve	2.97	1.12	
12	Bacteria	SIR, biomass	2.76	0.92	40	texture, aggregates, form and stability	2.95	1.07	
9	Bacteria	Counts, biomass	2.75	0.92	56	other nutrients (Ca, Mg, S, K)	2.93	0.87	
18	Bacteria	MicroResp	2.75	0.99	39	lutum, clay, silt, sand	2.90	1.07	
25	Fungi	Mycorrhiza	2.68	1.17	57	heavy metals	2.79	0.97	
11	bacteria	Leucine/thymidine assimilation	2.67	1.11	50	humic acid composition	2.56	0.99	
23	Fungi	Counts, morphology	2.67	1.00	58	pesticides, organic pollutants	2.53	0.94	
16	Bacteria	DGGE	2.58	1.05	average			3.11	0.99
15	Bacteria	TRFLP	2.51	1.03	E. Functional and systemic indicators*				
20	Bacteria	Functional genes	2.46	1.06	59	land use, ecotope, nature type	3.58	1.03	
14	Bacteria	Micro-arrays	2.45	1.12	65	application of nutrients (NPK) and SOM, (organic) manure	3.37	0.95	
28	Protozoa	Counts, morphology	2.41	0.97	71	percentage grass, related to corn and arable	3.31	1.13	
24	Fungi	Molecular	2.40	1.01	70	plant diversity, vegetation, forest	3.30	1.09	
26	Fungi	Fungilog	2.38	1.01	69	rotation, frequency of grassland renewal	3.30	1.11	
27	Protozoa	Counts, MPN	2.38	1.11	66	soil improvement, tillage	3.25	1.10	
13	Bacteria	Pyrosequencing	2.30	1.18	62	primary production, crop yields, market crop value, farm yield	3.21	0.96	
29	Protozoa	Molecular	2.21	1.13	72	percentage fallow, related tot total production area	3.19	1.13	
average			2.57	1.04	68	pesticide usage and soil sterilization	3.18	1.13	
C. Functional biotic soil indicators					73	percentage non-productive landscape elements	3.15	1.15	
38	Root biomass	Number/depth of roots	3.23	1.00	61	ground water trap, ground water management, (kwel)	3.13	1.15	
32	N-functions	N- mineralization	3.23	1.08	60	historical land use	3.13	1.19	
30	Respiration	Basal respiration, CO2 production	3.19	1.01	63	cattle density	3.05	1.09	
34	N-functions	Denitrification	3.02	1.00	78	temperature, soil temperature, evaporation, precipitation	3.04	1.03	
37	Litter Bags		3.02	1.02	77	number of tourists, recreation area, educational visits	2.80	1.21	
31	Respiration	Basal respiration, O2 consumption	2.99	1.00	67	soil acces (freq + weights), trapping of cattle, mowing	2.76	1.22	
33	N-functions	Nitrification	2.93	0.98	76	water buffering capacity	2.71	1.11	
36	Bait Lamina		2.82	1.13	64	grass consumption, feeding, krachtvoer	2.65	1.17	
35	Enzymes	several options	2.77	0.88	75	GHG production (methane, N2O, CO2)	2.63	1.11	
average			3.02	1.01	74	leaf area index	2.39	1.07	
					average			3.06	1.13

De samenstelling van de deskundigengroep zal dus invloed hebben op de selectie van de biologische bodemindicatoren: kiest een microbioloog andere indicatoren dan een nematoloog? Hoewel de totale groep relatief beperkt was (zeven deelnemers in deze stap), kan een analyse van de omvang van dit type afwijkingen helpen bij de interpretatie van de onderzoeksresultaten.

Twee van de zeven deelnemers hebben een microbiologische achtergrond. De overigen hebben expertise op het gebied van diverse bodemfauna of agrarisch bodemadvies. Om hier beter zicht op te krijgen is in stap 3 van de MCA aan elke deelnemer gevraagd om per indicator aan te geven wat het expertiseniveau is op een schaal van 0 tot 5, volgens de volgende categorieën:

0. geen expertise;
1. alleen via de (wetenschappelijke) literatuur;
2. via externe collega's buiten het eigen instituut;
3. via naaste collega's;
4. technische expertise door praktische toepassing;
5. technische en wetenschappelijke expertise.

De indicatoren zijn vervolgens in vijf groepen ingedeeld, namelijk Fauna, Micro-organismen, Functionele biologische bodemindicatoren, Abiotische bodemindicatoren en Systeemgerichte indicatoren. In Tabel 9 zijn de resultaten samengevat van de deskundigheid met de vijf groepen indicatoren. De laagste gemiddelde score voor een complete indicatorgroep per deskundige was 1,9 (expertise via externe collega's en wetenschappelijke literatuur), de hoogste score was 4,4 (expertise op technisch en wetenschappelijk niveau) en de gemiddelde deskundigheid over alle indicatorgroepen was 3,1 (naaste collega's). Als alle deskundigen worden samengevoegd, zijn de gemiddelde verschillen niet groot: laagste gemiddeld score is 2,6 voor de Micro-organismen en de hoogste is 3,5 voor de Abiotische bodemindicatoren. De verschillen tussen de deskundigen binnen indicatorgroepen waren groter, namelijk gemiddeld 2,3. De conclusie is dat de gekozen samenstelling van de groep deelnemers aan de MCA een redelijk evenwichte combinatie van deskundigheid oplevert, over de verschillende indicatorgroepen heen².

De specifieke professionele achtergrond van een deelnemer aan de MCA kan de score voor bepaalde indicatoren beïnvloeden. Het is niet ondenkbaar dat bijvoorbeeld een microbioloog veel vertrouwen heeft in microbiologische indicatoren en die dus hoge scores geeft.³ Om dit potentiële effect zichtbaar te

² De volgende gedetailleerde observaties zijn gedaan, met enkele verrassende uitkomsten:

- De expertise met biologische indicatoren lijkt gemiddeld lager dan die van de abiotische en systeemgerichte indicatoren. Eén verklaring is dat in de bodemecologie de deskundigen meestal expertise hebben van één of een beperkt aantal groepen bodemorganismen, terwijl abiotische en systeem informatie relevant is om de bodembiologische gegevens te interpreteren ('hulpgegevens'). Alle deelnemers hebben te maken met dit type hulpgegevens en zijn dus 'deskundig' daarin.
- De expertise met betrekking tot micro-organismen lijkt geringer dan voor de Bodemfauna. Voor de micro-organismen bevatte de lijst veel indicatoren op basis van DNA-technieken, waarvoor de deskundigheid gemiddeld gering was. Wanneer de DNA-technieken niet mee werden geteld bij de gemiddelde expertise voor de indicatoren steeg de score voor de fauna-indicatoren van 3,0 naar 3,2 en van de microbiologische indicatoren van 2,6 naar 3,0.
- De drie hoogste scores waren voor de functionele bodemindicatoren en vier van de zeven deskundigen geven aan meer expertise te hebben op het gebied van de functionele indicatoren dan voor de andere indicatoren. De functionele bodemindicatoren hebben een brede verspreiding en voorzien vaak in biologische en abiotische basisinformatie over (het functioneren van) de bodem als ecosysteem.
- De expertise met betrekking tot de systeemgerichte en overige indicatoren bleek op een gelijk niveau te liggen aan die van de bodemindicatoren. Een deelnemer gaf aan dat de eigen expertise vooral op systeemniveau aanwezig was. De gevolgtrekking hieruit is dat onderzoekers in het bodemdomein blijkbaar ook veel gebruik maken van systeemgerichte informatie, en daardoor de bruikbaarheid van deze informatie voor de beoordeling van ecosysteemdiensten in kunnen schatten.

³ De wet van het instrument: If the only tool you have is a hammer, you tend to see every problem as a nail.

maken is per deskundige de wijze van scoren berekend (Tabel 10) voor alle drie de stappen in de MCA. Deze tabel kan dus dit type vooroordeel zichtbaar maken bij analyse van scoringspatronen, ondanks het feit dat het aantal deelnemers aan de MCA beperkt was.

De gemiddelde score bedraagt 5,5 (de 5%- en 95%-percentiel zijn respectievelijk 2,8 en 7,4) op een relatieve schaal van 0 tot 10. De vraag was om alle indicatoren relatief van elkaar te scoren en de schaal van 0 tot 10 in zijn geheel te benutten. Er zijn geen opvallende verschillen en dus zijn er geen patronen af te leiden uit de scores: de verschillen tussen de drie groepen indicatoren, tussen de drie stappen en tussen het gros van de geconsulteerde deskundigen zijn niet consistent en niet groot. Enkele lagere scores werden na een mondelinge uitleg verklaard, doordat men in die gevallen de overtuiging had dat sommige ecosysteemdiensten in het geheel niet met indicatoren beoordeeld konden worden (bijvoorbeeld 'culturele diensten' scoorde laag ten opzichte van 'waterregulatie'). Bij de hoge scores was het omgekeerde het geval, maar die waren er minder. Een gemiddelde van 5,5 over alle indicatoren zou kunnen suggereren dat er een klein aantal slecht scorende indicatoren bij zit, terwijl het gros van de indicatoren iets beter dan gemiddeld presteert, volgens de opinie van de deelnemers.

De scores van de professionals met een microbiologische achtergrond ('microbiologen' 1 en 3; Tabel 9) in de laatste stap van de MCA zijn apart berekend, om te evalueren of de achtergrond resulteert in een ander scoringsprofiel voor de verschillende indicatoren. Dit lijkt slechts in zeer beperkte mate op te treden (data niet in een tabel; zie Tabel 8 voor het gemiddelde). De op de bodemfauna gebaseerde indicatoren krijgen van de microbiologen 0,1 scorepunt minder (van 3,0 naar 2,9). Het verrassende is dat de microbiologische indicatoren exact dezelfde gemiddelde score krijgen (2,6): de microbiologen geven de microbiologische indicatoren dus gemiddeld dezelfde scores als de andere deelnemers aan de MCA. De functionele biologische bodemindicatoren krijgen iets hogere scores, namelijk 3,3 in plaats van 3,0 en datzelfde geldt voor de functionele abiotische bodemindicatoren (3,3 in plaats van 3,1). De systeemgerichte en overige indicatoren krijgen iets lagere scores van de microbiologen, namelijk 2,9 in plaats van 3,1. Al met al lijken de verschillen tussen professionals met een microbiologische of bodemfauna-achtergrond niet of slechts beperkt door te werken in andere scores voor indicatoren.

De voorlopige conclusie is dat het niet aannemelijk is dat bij deze beperkte groep van deelnemers aan de MCA de professionele achtergrond een grote rol heeft gespeeld bij het scoren van indicatoren. Als er toch kleine verschillen tussen deskundigen bestaan, heeft de samenstelling van de groep deelnemers aan de MCA dit kleine effect gemiddeld. Er waren vier deelnemers met een achtergrond in de bodemfauna, twee in de microbiologie, en een in het agrarisch bodemadvies.

Een belangrijke aanvullende conclusie uit Tabel 10 is dat alle indicatoren potentie hebben voor toepassing in een bodemmeetnet voor ecosysteemdiensten. De drie groepen indicatoren hebben gemiddeld ongeveer dezelfde scores. Alle deelnemers hebben antwoorden gegeven die ongeveer in dit patroon passen. Alle geconsulteerde deskundigen hebben als werkterrein de bodem en de bodemecologie, maar gebruiken daarnaast regelmatig systeemkennis. Een systeemgerichte aanpak kenmerkt zich door de benutting van alle potentieel aanwezige informatie; beoordeling van ecosysteemdiensten krijgt de meest

Tabel 9. Geschatte expertise van de zeven deelnemers aan stap 3 van de MCA voor vijf groepen van indicatoren. De schatting is per indicator gedaan en voor deze tabel per indicatorgroep gemiddeld. Het zwaartepunt van de expertise van een deelnemer is met een heldere achtergrondkleur aangegeven.

Indicatorgroep	EXPERT stap 3:	1	2	3	4	5	6	7	gemiddelde
A. Bodemfauna		2,1	4,0	2,4	2,0	2,8	3,4	4,0	3,0
B. Micro-organismen		2,9	3,3	3,8	1,9	1,9	2,0	2,1	2,6
C. Functionele biologische indicatoren		3,9	4,9	4,2	2,2	2,0	2,9	3,4	3,4
D. Functionele abiotische indicatoren		3,6	4,9	3,8	2,6	2,2	2,9	4,4	3,5
E. Systeemgerichte indicatoren (+overig)		3,2	3,4	2,8	2,4	3,0	3,5	4,4	3,2

Tabel 10. Gemiddelde scores van de bruikbaarheid van informatie afkomstig van groepen indicatoren voor de beoordeling van de ecosysteemdiensten van de bodem. In totaal 12 deskundigen zijn hiervoor geconsulteerd voor in totaal drie stappen in de MCA. Afwijkende scores (> 95%; < 5% percentiel) en bijzondere patronen zijn met gele arcering aangegeven.

expert	STAP 1				STAP 2				STAP 3*			
	biologische indicatoren	abiotische indicatoren	systeemindicatoren	gemiddelde alle indicatoren	biologische indicatoren	abiotische indicatoren	systeemindicatoren	gemiddelde alle indicatoren	biologische indicatoren	abiotische indicatoren	systeemindicatoren	gemiddelde alle indicatoren
A	5,7	5,9	5,6	5,7	5,4	5,2	5,4	5,3	7,1	6,0	5,2	6,1
B	4,0	6,0	5,8	5,3	2,4	2,3	1,5	2,1				
C	7,4	7,1	6,8	7,1	4,0	5,0	5,8	4,9	7,5	8,2	9,4	8,4
D	6,0	6,5	5,6	6,0	6,0	5,9	5,2	5,7	5,4	5,8	6,0	5,7
E		6,1	5,7	5,9	5,4	5,8	5,6	5,6	6,0	5,8	6,0	5,9
F	7,1	7,1	7,7	7,3	6,5	6,6	6,5	6,5	6,8	6,6	7,6	7,0
G					3,1	3,1	3,9	3,4	3,3	2,2	5,6	3,7
H	6,4	6,4	6,4	6,4								
I	5,0	4,8	5,1	5,0	3,3	3,4	2,8	3,2	4,3	4,8	5,0	4,7
J	7,0	6,5	6,6	6,7								
K	6,5	6,5	5,3	6,1								
L	4,1	4,8	4,6	4,5								
	5,9	6,2	5,9	6,0	4,5	4,7	4,6	4,6	5,8	5,6	6,4	5,9

* De scores in stap 3 zijn met 2 vermenigvuldigd, om ze vergelijkbaar met de scores van stappen 1 en 2 te maken.

optimale invulling bij toepassing van indicatoren uit elk domein, dus met biologische, abiotische en systeemgerichte indicatoren.

4.6.2 *Consistentie en variatie in opinies over indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten*

Bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten zijn containerbegrippen waarvoor nog geen definitieve meetinstrumenten bestaan. Daarom hebben deskundigen verschillende zienswijzen over de wijze waarop ecosysteemdiensten en bodembiodiversiteit het best gemeten kunnen worden, uitgaande van de specifieke context voor het onderzoek en de eigen expertise. Omdat het werkgebied 'bodem' begrensd is en deskundigen met een specifieke achtergrond binnen het bredere bodemgebied actief zijn en regelmatig samenwerken, vindt er 'kruisbestuiving' plaats en is er tevens een 'gemeenschappelijke' basis. Met behulp van een MCA kunnen zowel de variatie in de opinies als het gemeenschappelijke beeld zichtbaar gemaakt worden.

Bij alle drie stappen in de MCA is gevraagd om aan te geven hoe bruikbaar informatie van bepaalde indicatoren is om de bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten te kwantificeren:

- Bij stap 1 was de vraag gericht op de relatieve betekenis van informatie afkomstig van bepaalde geaggregeerde indicatoren voor kwantificering van de bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten. Stap 1 betrof in feite een stap om deelnemers vertrouwd te maken met deze MCA.
- Bij stap 2 zijn elf ecosysteemdiensten van de bodem afzonderlijk gescoord. Het gemiddelde van alle elf ecosysteemdiensten kan beschouwd worden als de gemiddelde bruikbaarheid van informatie van bepaalde indicatoren voor beoordeling van de ecosysteemdiensten. Een van de ecosysteemdiensten (4a) betrof 'habitatfunctie en bodembiodiversiteit' en kan dus apart worden geanalyseerd.
- Bij stap 3 van de MCA is de vraag in stap 1 herhaald, maar dan als een van de criteria voor de bruikbaarheid van indicatoren, naast prijs-prestatieverhouding, gevoeligheid, communiceerbaarheid en uitvoerbaarheid.

Door vergelijking van de (genormaliseerde) scores van indicatoren voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit of de ecosysteemdiensten in de drie stappen ontstaat een indruk van de (in)consistentie van het kader waarin deze beoordeling heeft plaatsgevonden. Met andere woorden: zijn de begrippenkaders 'bodembiodiversiteit' en 'ecosysteemdiensten' eenduidig en volwassen genoeg om de uitkomst van de MCA van betekenis te laten zijn?

Tabel 11 toont het resultaat via alle genormaliseerde gemiddelde scores per geaggregeerde indicator en per stap. De volgende observaties kunnen aan de hand van de tabel gedaan worden:

- Over het geheel genomen is er een consistent beeld over de bruikbaarheid van informatie voor kwantificering van de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem. Sommige indicatoren scoorden hoog in alle drie stappen van de MCA (zoals de nematodengemeenschap, gehalte organische stof en bodembewerking); andere indicatoren hadden een consistent lage score (zoals enzymactiviteiten, zware metalen, en leaf area index). Het consistente beeld uit zich in relatief kleine maximale verschillen in scores over alle drie de stappen heen (laatste kolom Tabel 11). Met andere woorden, de scores van alle deelnemers zijn consistent.
- Specifieke uitzonderingen op het consistente beeld zijn:

- *Omvang bacteriegemeenschap als indicator voor bodembiodiversiteit*
De oorzaak zit in de interpretatie van de term 'bodembiodiversiteit'. Bij stap 1 is benadrukt dat bodembiodiversiteit ook de functionele aspecten van het bodemleven omvatte, naast de klassieke verscheidenheid (de 'beleidsmatige' interpretatie; zie paragraaf 1.2.2). Bij stap 2 ging het uitsluitend over ecosysteemdienst 4a, habitatfunctie en bodembiodiversiteit. Bij stap 3 is geen definitie aan de deelnemers meegegeven. De grote verschillen voor de omvang van de schimmelgemeenschap laten zich op dezelfde wijze verklaren.
- *Textuur (klei et cetera) als indicator voor zowel bodembiodiversiteit als ecosysteemdiensten*
Grondsoort wordt in de bodemkunde meestal niet als indicator gezien, maar als hulpinformatie om bepaalde bodemecologische aspecten te duiden. Vanuit een systeembenadering met een ruimtelijke context kan grondsoort wel beschouwd worden als een indicator (zie paragraaf 4.4.4).
- *GHG-productie als indicator voor ecosysteemdiensten*
De uitstoot van broeikasgassen als indicator voor ecosysteemdiensten scoorde redelijk hoog bij de vraag naar de gemiddelde geschiktheid, maar gemiddeld erg laag bij de vraag naar geschiktheid voor elf afzonderlijke ecosysteemdiensten (de score van GHG-productie als indicator voor klimaatfuncties contrasteerde sterk met de score voor alle andere ecosysteemdiensten). Als een indicator een specifiek eindpunt dicht benadert (bijvoorbeeld de indicator 'primaire productie' voor de ecosysteemdienst 'agrarische productie'), krijgt de indicator een duidelijk profiel en wordt het belang groter ingeschat, ondanks het feit dat de indicator voor andere ecosysteemdiensten slecht presteert. Het kan ook zijn dat bepaalde ecosysteemdiensten impliciet een zwaarder gewicht krijgen dan andere ecosysteemdiensten (bijvoorbeeld agrarische productie is belangrijker dan de culturele ecosysteemdiensten).
- Bij alle groepen indicatoren liepen de scores in de drie stappen voor de bodembiodiversiteit minder sterk uiteen dan voor ecosysteemdiensten. Dit fenomeen is eerder waargenomen bij een MCA voor een onderzoek in het kader van de Europese Bodemstrategie (COM 2006; Rutgers et al. 2010). De interpretatie hiervan is dat deskundigen in de bodem en ecologie het met elkaar eens zijn dat de bodembiodiversiteit gekwantificeerd kan worden, terwijl ecosysteemdiensten van de bodem een nieuw concept is. Dit is verklaarbaar, omdat bodembiodiversiteit al langer verankerd is in wetenschappelijke disciplines dan onderzoek aan ecosysteemdiensten.

De vraag die aan het begin van deze paragraaf werd gesteld kan dus positief beantwoord worden: de containerbegrippen bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem bieden voldoende houvast aan deskundigen op bodemgebied om tot transparante en betekenisvolle keuzes te komen met betrekking tot het meten van bodemkenmerken en systeemeigenschappen. De nuances en de verschillen in opinies bij deskundigen leiden vaak tot geanimeerde discussies, waardoor ze worden uitvergroet. Maar de verschillen zijn klein genoeg om een op consensus gebaseerde optimaal meetinstrument samen te stellen. Een praktische set indicatoren op basis van consensus in het vakgebied is dus binnen handbereik.

Tabel 11. Schattingen van de bruikbaarheid van indicatoren voor bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten van de bodem. De genormaliseerde en gemiddelde score is berekend: $(score - \text{gemiddelde score}) / (\text{standaardafwijking})$. Het maximale verschil (laatste twee kolommen) geeft het grootste gescoorde gemiddelde verschil (genormaliseerd) aan tussen de stappen.

Met een achtergrondkleur zijn de hoge scores aangegeven. Paars en lichtpaars: hoge scores voor bodembiodiversiteitsindicatoren. Groen en lichtgroen: hoge scores voor ecosysteemdiensten-indicatoren.

Geaggregeerde biotische bodemindicatoren

- 1 omvang bacteriegemeenschap (aantal/ biomassa)
- 2 groeisnelheid en activiteit bacteriën
- 3 potentiële C-mineralisatie, basale respiratie
- 4 N-mineralisatie en/of anaerobe N mineralisatie
- 5 structurele diversiteit bacteriën/schimmels/archaea
- 6 fysiologische diversiteit bacteriën
- 7 omvang schimmelgemeenschap en activiteit
- 8 mycorrhizaschimmels
- 9 enzymactiviteiten (dehydrogenase, fosfatase, etc)
- 10 litter-bag, bait lamina
- 11 protozoën (aantal en taxa)
- 12 nematoden (aantal en taxa, plantparasieten)
- 13 potwormen (aantal en taxa)
- 14 regenwormen (aantal en taxa)
- 15 micro-arthropoden (aantal en taxa)
- 16 isopoden, loopkevers, spinnen, mieren, etc.
- 17 doorworteling, wortelbiomassa

	Stap 1		Stap 2		Stap 3		Stap 1+2+3		Maximaal verschil	
	bodem-biodiversiteit	ESD	ESD 4a (biodiversiteit)	11 ESD	bodem-biodiversiteit	ESD	bodem-biodiversiteit	ESD	bodem-biodiversiteit	ESD
gemiddelde, genormaliseerde score geschiktheid indicatoren voor ESD-kwantificering										
1	0,78	0,75	0,03	1,15	-0,77	0,29	0,02	0,73	1,55	0,86
2	-0,78	-0,50	-1,14	-0,83	-0,94	-0,08	-0,95	-0,47	0,36	0,75
3	-1,07	0,07	-1,46	-0,43	-1,28	0,29	-1,27	-0,02	0,40	0,72
4	-0,95	0,41	-1,25	-0,01	-0,94	1,79	-1,04	0,73	0,31	1,80
5	0,15	-0,85	0,68	-0,35	0,43	-0,97	0,42	-0,72	0,24	0,63
6	-0,08	-0,16	0,03	0,00	0,43	-0,08	0,13	-0,08	0,40	0,08
7	0,55	0,87	0,25	0,92	-0,77	1,04	0,01	0,94	1,31	0,12
8	0,26	0,52	0,09	-0,03	0,26	0,29	0,20	0,26	0,17	0,56
9	-1,18	-1,19	-0,87	-0,90	-0,59	-0,83	-0,88	-0,97	0,28	0,08
10	-1,82	-1,53	-1,51	-1,96	-1,11	-0,45	-1,48	-1,32	0,41	1,51
11	0,43	-0,50	0,78	-0,67	0,26	-0,83	0,49	-0,67	0,52	0,32
12	1,59	1,21	1,42	1,07	1,80	1,04	1,60	1,11	0,38	0,17
13	0,90	0,64	1,00	0,57	0,95	-1,20	0,95	0,00	0,05	1,84
14	0,95	1,55	0,94	2,07	0,43	1,41	0,78	1,68	0,52	0,65
15	1,36	0,75	1,26	-0,19	1,80	-0,45	1,47	0,04	0,54	1,20
16	0,09	-2,10	0,68	-1,16	0,95	-1,94	0,57	-1,73	0,27	0,79
17	-1,18	0,07	-0,93	0,76	-0,94	0,67	-1,01	0,50	0,01	0,10
gemiddelde										
									0,45	0,72

Abiotische bodemindicatoren

- 1 textuur: klei, silt, zand
- 2 structuur: aggregaten, vorm en stabiliteit
- 3 bulkdichtheid en porievolumen
- 4 % leefruimte (water+lucht)
- 5 indringweerstand
- 6 waterdoorlatendheid (infiltratiesnelheid)
- 7 vochtgehalte en vochtleverend vermogen
- 8 zuurgraad (pHx)
- 9 CEC
- 10 gehalte organische stof
- 11 fracties organische stof (stabiel, label)
- 12 humuszuren organische stof
- 13 C/N ratio organische stof
- 14 totaal N
- 15 totaal P, fracties P
- 16 overige nutriënten en zware metalen
- 17 Bestrijdingsmiddelen, organische verontreinigingen

1	na	0,59	0,92	1,50	-0,89	-0,95	0,01	0,38	1,81	2,45
2	na	-0,60	-0,45	0,66	-0,26	0,06	-0,35	0,04	0,19	0,60
3	na	0,20	0,04	0,10	-0,26	-0,28	-0,11	0,00	0,30	0,47
4	na	-1,00	0,04	-0,37	-0,26	-0,62	-0,11	-0,66	0,30	0,25
5	na	-0,60	-0,74	-0,44	-0,89	-0,62	-0,82	-0,55	0,15	0,17
6	na	-0,54	-1,23	-0,09	-0,26	0,73	-0,75	0,04	0,97	0,82
7	na	0,33	0,04	0,25	-1,52	0,06	-0,74	0,21	1,56	0,27
8	na	1,19	1,31	0,46	1,00	1,07	1,16	0,91	0,31	0,74
9	na	-0,14	-0,55	-0,60	-0,26	0,06	-0,40	-0,22	0,29	0,66
10	na	1,79	2,29	2,28	1,63	1,75	1,96	1,94	0,65	0,54
11	na	1,06	1,21	1,01	2,27	1,75	1,74	1,27	1,05	0,73
12	na	-0,93	-0,35	-0,76	-0,26	-0,62	-0,31	-0,77	0,09	0,15
13	na	0,53	0,14	0,12	1,00	1,07	0,57	0,57	0,86	0,95
14	na	0,73	-0,06	-0,48	0,37	-0,28	0,16	-0,01	0,43	1,20
15	na	0,66	0,04	-0,53	0,37	-0,28	0,21	-0,05	0,33	1,20
16	na	-1,27	-0,84	-1,31	-0,89	-0,95	-0,87	-1,18	0,05	0,36
17	na	-2,00	-1,82	-1,80	-0,89	-1,97	-1,35	-1,92	0,93	0,16
gemiddelde										
									0,60	0,69

Systeemindicatoren 2012 ('percentage afdekking' buiten beschouwing gelaten vanwege evidentie)

- 1 bodemgebruik, ecotoop, natuurdoeltype
- 2 historisch bodemgebruik
- 3 grondwaterstand en peilbeheer, kwel en inzijing
- 4 primaire productie, gewasopbrengsten
- 5 veebezetting, dichtheid en soort
- 6 beweiding en bijvoeding vee, incl, krachtvoer
- 7 nutriënten (N, P, K) en OS, (kunst) mest
- 8 requentie en wijze van bodembewerking
- 9 bodemberijding, vertrapping, maaifrequentie
- 10 bestrijdingsmiddelen en grondontsmetting
- 11 rotatie, vruchtwisseling, graslandvernieuwing
- 12 diversiteit planten, vegetatieopname, bos
- 13 % gras van het totaal, i.r.t, mais en bouwland
- 14 % braak op het totaal van het productieareal
- 15 % niet-productieve landschapselementen
- 16 leaf area index
- 17 GHG-productie (methaan, CO2, lachgas)
- 18 waterbergend vermogen
- 19 recreatie en educatieve bezoeken
- 20 temperatuur, evaporatie, neerslag

1	na	1,48	1,51	1,67	1,44	1,07	1,47	1,41	0,07	0,60
2	na	-0,27	0,61	0,54	0,54	-0,15	0,58	0,04	0,07	0,69
3	na	1,18	0,54	0,43	0,00	-0,76	0,27	0,28	0,53	1,93
4	na	1,02	0,54	1,12	-0,36	1,99	0,09	1,37	0,89	0,87
5	na	0,49	-0,43	-0,37	-0,36	0,46	-0,40	0,19	0,08	0,86
6	na	-0,04	-0,81	-0,68	-1,07	0,16	-0,94	-0,19	0,27	0,83
7	na	1,78	0,69	0,63	1,08	1,07	0,88	1,16	0,40	1,15
8	na	0,95	0,83	1,18	1,08	0,77	0,96	0,96	0,25	0,42
9	na	-0,04	-0,14	0,14	-0,71	-1,37	-0,43	-0,42	0,58	1,51
10	na	0,26	0,39	-0,07	0,90	0,46	0,64	0,22	0,52	0,53
11	na	0,26	0,91	1,08	0,54	1,07	0,73	0,81	0,37	0,01
12	na	0,26	1,06	0,47	0,90	-0,45	0,98	0,09	0,16	0,92
13	na	-0,65	0,46	0,36	0,90	-0,45	0,68	-0,25	0,44	0,82
14	na	-0,88	0,16	0,05	0,54	-0,45	0,35	-0,43	0,38	0,50
15	na	-0,57	0,91	-0,04	0,90	-0,45	0,91	-0,36	0,01	0,41
16	na	-1,87	-1,45	-1,95	-1,15	-2,35	-1,30	-2,05	0,30	0,48
17	na	-0,57	-1,78	-1,32	-1,79	0,77	-1,79	-0,38	0,01	2,09
18	na	-0,19	-1,40	-0,58	-1,07	-0,15	-1,24	-0,31	0,33	0,43
19	na	-2,02	-1,40	-2,08	-1,43	-0,15	-1,42	-1,42	0,03	1,93
20	na	-0,57	-1,18	-0,59	-0,89	-1,06	-1,04	-0,74	0,29	0,49
gemiddelde										
									0,30	0,87

4.6.3 Variatie in de scores voor alle criteria (toepasbaarheid)

Bij de derde stap van de MCA zijn de indicatoren beoordeeld op hun geschiktheid aan de hand van verschillende criteria. Het resultaat is in de paragrafen 4.5.2 en 4.5.3 gepresenteerd. In Tabel 12 zijn de standaardafwijkingen van schattingen van de deelnemers gepresenteerd, om te beoordelen waar de deskundigen relatief gelijke opinies hebben en waar niet.

De grootste verrassing betrof de schattingen voor de kosten. De verwachting was dat kosten relatief gezien goed objectiveerbaar en bekend zijn, maar voor een aantal aan de kosten gerelateerde criteria werden relatief hoge standaardafwijkingen aangetroffen (Tabel 12). Deze betroffen de kosten per monster voor de indicatoren voor bodemorganismen (bodemfauna en micro-organismen). De verklaring is dat sommige deelnemers deze kolom hebben gescoord inclusief de uren van analisten en technici, terwijl slechts de materiaalkosten bedoeld waren.

Hoge standaardafwijkingen werden ook waargenomen voor de schatting van de benodigde uren voor onderzoek met systeemgerichte indicatoren. Dit is verklaarbaar uit de structuur en opzet van deze MCA. De vragenlijsten en scoringsmethoden zijn geënt op het bemonsteren (veldwerk) en analyseren van grondmonsters (laboratoriumwerk). Bij de systeemgerichte en overige indicatoren gaat het vaak om andersoortige informatie, op het niveau van het bodembeheer (bedrijven), satellietopnames of ruimtelijke analyse en daar werkt de benadering met veldwerk en monsteranalyse niet.

Bij de inschatting van de overige kosten werden veel posten zoals verwacht wel met een relatief grote eenstemmigheid gescoord, zoals de kosten voor veldwerk voor de microbiële, biologische en abiotische functionele indicatoren (groepen B, C en D; Tabel 12). Dit strookt wel met de verwachting dat deze kosten objectief vast te stellen zijn.

Tabel 12. Standaardafwijkingen van schattingen waarmee indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosystemendiensten voldoen aan bepaalde criteria. De criteria zijn ingedeeld in 5 hoofdgroepen, namelijk praktische meetmogelijkheden (lichtblauw), kosten (oranje), relevantie van de informatie (blauw), gevoeligheid (geel) en de beleidsrelevantie (grijs). Gescoord werd op een schaal van 0 (geen score) tot 5 (goede score) zoals aangegeven in Tabel 8. Dit Excel-bestand werd ontwikkeld in het FP7-EU project EcoFINDERS (Lemanceau 2011).

Scoring	Ease of measurement		Costs (in Euro)				Overall estimate for appropriateness to measure		Sensitivity for differences in			Fit for Purpose			
	Equipment	skills	capital start-up	per sample	Labour costs Field	Lab	bio-diversity	ecosystem services	soil type	land use	disturbance	under-standable	standard-isation	monitoring	
5	all	general	<2k	<2	Low	Low	high	high	high	high	high	charismatic	ISO OECD	already high	
4	majority		2-10k	2-5											
3	most	mod.	10-50k	5-20	med	med	med	med	med	med	explainable	medium	satisfactory		
2	few		50-100k	20-100										medium	
1	v. few	spec.	>100k	100-500	High	High	low	low	low	low	low	low	low	low	
0	only exp	acad.	undef	>500	undef	undef	zero	zero	zero	zero	zero	zero	not yet	low zero	
A Fauna	1.2	0.9	0.9	1.6	0.9	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.2	0.8	1.2	1.2	1.08
B Microbes	0.8	1.2	1.1	1.5	0.6	1.2	1.1	1.0	0.9	1.2	0.8	0.9	1.2	1.0	1.04
C Functional biotics	1.0	1.1	0.8	1.3	0.6	1.1	1.2	1.3	1.0	1.2	1.0	0.9	1.0	0.9	1.01
D Functional abiotics	0.8	0.9	1.3	1.0	0.7	0.8	1.1	1.2	1.0	1.0	1.1	1.0	0.9	1.1	0.99
E System oriented	0.8	0.7	0.6	1.0	1.7	2.0	1.0	1.0	1.3	1.2	1.2	1.0	1.1	0.9	1.11
gemiddelde-->	0.91	0.96	0.93	1.30	0.89	1.22	1.07	1.12	1.05	1.14	1.07	0.91	1.07	1.02	

4.6.4 Rangordening van indicatoren in relatie tot Bobi

In de inleiding werd gesteld dat Life Support Functies (LSF) en ecosysteemdiensten verschillende concepten zijn, maar dat het niet de verwachting is dat voor beoordeling van ecosysteemdiensten andere indicatoren nodig zijn dan voor de LSF. In 1997 zijn de indicatoren voor LSF vastgesteld (Schouten et al. 1997). De rangordening van indicatoren voor de ecosysteemdiensten kan vergeleken worden met de Bobi-indicatoren (zie Tabel 8). Voor de rangordening zijn de biologische bodemindicatoren gedeaggregeerd tot een meetinstrument en in drie groepen ingedeeld, namelijk bodemfauna, micro-organismen en functionele indicatoren:

1. Bodemfauna. De eerste vier indicatoren in de rangordening voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten betreffen allemaal indicatoren die momenteel ook toegepast worden bij Bobi. De analyse van loopkevers, pissebedden, duizendpoten, miljoenpoten *et cetera* is arbeidsintensief en vereist taxonomische deskundigheid. De twee DNA-technieken voor de nematodengemeenschap hebben zich nog niet bewezen en zijn onvoldoende praktijkrijp. Van de Bobi-indicatoren hebben de potwormen de laagste score gekregen. De veronderstelling is dat potwormen als indicator enige overlap vertonen met regenwormen; als er geen regenwormen aanwezig zijn, dan zouden de potwormen als indicator niet mogen ontbreken. De springstaarten zijn een onderdeel van de Bobi-indicator 'mijten en springstaarten', want beide groepen worden aan dezelfde extracten geanalyseerd.
2. Micro-organismen. De Bobi-indicatoren hebben hoge scores, maar schijnbaar minder hoog dan andere indicatoren die onderdeel waren van de MCA. De rangordening geeft op dit punt een enigszins vertekend beeld, omdat er meerdere indicatoren voor hetzelfde eindpunt zijn geëvalueerd, terwijl er uiteraard slechts één indicator per eindpunt nodig is. Er staan bijvoorbeeld drie methoden voor de bepaling van de bacteriebiomassa in de top tien, namelijk Fumigatie Extractie (FE), Substrate-Induced Respiration (SIR) de bij Bobi toegepaste microscoopmethode. De FE- en SIR-methode stellen geringe eisen aan de benodigde apparatuur en zijn daarom wijdverbreid. Deze methoden meten de totale microbiële biomassa. Bij microscopische metingen (Bloem et al. 1995) worden schimmels en bacteriën apart bepaald. Dit past beter bij voedselweb en allometrische benaderingen, en de verhouding tussen de biomassa's van schimmels en bacteriën geeft informatie over het functioneren van de bodem en de kans op stikstof verliezen (De Vries et al. 2006, 2012, Mulder et al. 2009).
3. Functionele bodemindicatoren. De Bobi-indicatoren scoren goed, maar het eindpunt en de best scorende indicator (wortelbiomassa) is geen onderdeel van Bobi. Het is de vraag of deze indicator geschikt is voor toepassing in een praktisch en robuust meetnet; de informatie is mogelijk alleen zinvol toe te passen in het geval van graslanden die ouder zijn dan één jaar en de kosten voor monsternamen en analyse zijn mogelijk hoger dan verwacht.

In een optimale set indicatoren voor beoordeling van ecosysteemdiensten van de bodem zal een aantal bekende indicatoren van Bobi opgenomen kunnen worden op basis van de uitkomst van de workshops en de MCA in dit rapport. Naast de biologische bodemindicatoren zijn ook abiotische bodemindicatoren en systeemgerichte indicatoren gewenst (zie paragrafen 4.5.2 en 4.5.3 voor een uitgebreidere verantwoording).

Resumerend is de verwachting dat een aantal Bobi-indicatoren gebruikt kan worden in een indicatorsysteem voor de bodembiodiversiteit en ecosysteem-

diensten van de bodem. Dit betreft ook aanpassingen die na 1997 aan Bobi zijn gedaan. De meeste biologische bodemindicatoren van Bobi kunnen beschouwd worden als *state of the art*. Dit betekent ook dat veel oude gegevens waardevol blijven bij toekomstige analyses en toepassingen.

4.6.5 *Statistische analyse van gegevens als basis voor indicatoreselectie*

Veelvuldig werd ingebracht dat MCA een pseudowetenschap is en dat te weinig gebruik gemaakt wordt van de objectieve resultaten uit het verleden om geschikte indicatoren te selecteren. Een statische analyse van alle gegevens die met bodembioologische indicatoren zijn verkregen zou een objectief antwoord kunnen geven of betreffende indicator bruikbaar is (bijvoorbeeld Andrews et al. 2002). Er zijn voordelen, maar er passen ook andere overwegingen bij een dergelijke aanpak:

1. Alleen op basis van een significante correlatie met een ander kenmerk in het systeem (statistisch; met een plausibele mechanistische uitwerking) vormt een grond voor selectie van betreffende indicator. Dit vormt 'het bewijs' dat de betreffende indicator zinvolle informatie oplevert in plaats van 'ruis'. Dit bevoordeelt echter indicatoren waarvoor (a) veel meetgegevens en analysecapaciteit beschikbaar zijn en waarbij (b) het correlerende kenmerk ook altijd, gelijktijdig en voldoende nauwkeurig is bepaald.
2. Nieuwe indicatoren, indicatoren waar een beperkte onderzoeksinspanning mee is gepleegd of indicatoren die geen significante correlatie met andere systeemkenmerken vertonen, zullen niet via een dergelijk statische aanpak geselecteerd kunnen worden.
3. Het is niet mogelijk om aanvullende of onvergelykbare criteria (bijvoorbeeld prijs-prestatieverhouding) mee te wegen bij de selectie van indicatoren. Daar is altijd een MCA voor nodig.
4. Een statistische analyse levert informatie die bruikbaar is om de indicatorenset te beperken. Bij elke significante correlatie is er feitelijk een overschot aan systeeminformatie beschikbaar, als de achterliggende ecologische mechanismen om de correlaties te duiden bekend zijn. Als een significante correlatie optreedt, dan kan men een van beide informatiebronnen (indicatoren) elimineren en de indicatorenset beperken.
5. Een statische analyse van meetgegevens levert slechts verbanden die gelden binnen de beperkingen van de set (plaats, tijd en inzet van deskundigheid, kwaliteit van de steekproef). Er wordt geen gebruik gemaakt van informatie uit andere sets met gegevens, de formele wetenschap, de intuïtieve expertise van deskundigen, en andere onderzoeksdomeinen. Innovatieve veranderingen zijn met een statistische analyse alleen niet realiseerbaar.

Niettegenstaande deze overwegingen is een statische analyse bruikbaar om een grote indicatorenset in te perken tot een kleinere en praktisch bewezen indicatorenset. Een dergelijke aanpak wordt bijvoorbeeld gevolgd voor de selectie van indicatoren in het westelijke veenweidegebied (Deru et al. 2012, www.bodemveenweiden.nl).

5 Toepassing van indicatoren in een bodemmeetnet

5.1 Selectie van indicatoren voor een bodemmeetnet

Diverse indicatoren werden beoordeeld op de potentie om bij te dragen aan de beoordeling van bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten. Aanvullende criteria zoals kosten en praktische mogelijkheden voor toepassing in een landelijk meetnet zijn medebepalend voor de geschiktheid van de indicatoren. Dit is de uitkomst van twee workshops met deskundigen, de in dit onderzoek uitgevoerde MCA, en van ervaringen met Bobi in het LMB en andere indicatorsystemen.

Op basis van de rangordening kan een praktische set voor een landelijk bodemmeetnet samengesteld worden. Behalve de rangordening spelen ook aanvullende overwegingen een rol (zie ook Ritz et al. 2009):

1. *Onzekerheid.* Hoe meer indicatoren worden toegepast, hoe groter de hoeveelheid beschikbare informatie, des te kleiner de onzekerheid in de beoordeling van ecosysteemdiensten. Voor een redelijke doorsnede van het complexe bodemsysteem met elf ecosysteemdiensten ligt het voor de hand om een 'batterij' indicatoren toe te passen. Het bodemsysteem is simpelweg te complex om met één enkele indicator te beschrijven. Voor een optimale set is het van belang om een redelijke doorsnede uit alle indicator domeinen te nemen, namelijk biologische en abiotische bodemindicatoren, en systeemgerichte indicatoren, om de conceptuele onzekerheid bij de beoordeling van ecosysteemdiensten via proxy's zo klein als praktisch mogelijk te laten zijn (zie ook paragraaf 4.5.4).
2. *Overlappende indicatoren.* Een uitvloeisel van de toepassing van een batterij indicatoren (zie punt 1. hierboven) is dat de kans bestaat dat sommige indicatoren, onder bepaalde omstandigheden, overlappende informatie leveren en daardoor gedeeltelijk redundant zijn. Deskundigen weten op basis van onderzoek waar de kans op overlappende kenmerken relatief groot is. Dit is overigens niet scherp afgebakend. Zolang de eindpunten niet overeenkomen, bevat elke indicator unieke informatie, die niet volledig via een andere indicator verkregen kan worden.
3. *Omvang bodemmeetnet.* Voor een betrouwbaar landelijk beeld is het nodig om een bepaald minimum aantal locaties te bemonsteren. Diverse studies geven aan dat een gestratificeerd meetnet met acht tot tien strata en ongeveer twintig locaties per stratum een redelijk betrouwbaar landelijk beeld opleveren (Wattel-Koekkoek et al. 2012). Met dit aantal wordt een ruimtelijke resolutie behaald die past bij het niveau waarop het bodembeheer zich voor een groot deel afspeelt, namelijk op het niveau van een agrarisch bedrijf of een (natuur)terrein, en waarop een redelijk mate van handelingsperspectief gebaseerd kan worden. Voor een groter ruimtelijk schaalniveau, bijvoorbeeld in relatie tot klimaatverandering (mondiaal), zou een kleiner aantal locaties volstaan. Voor het bodembeheer op perceelsniveau is een groter aantal locaties nodig, maar dit is praktisch niet uitvoerbaar door beperkingen aan budget en menskracht (zie punt 4 hieronder).
4. *Balans tussen veldwerk en bodemanalyses.* Om aan bodemmonsters te komen voor analyse met indicatoren dient de locatie bezocht en gemonsterd te worden. Hiervoor is een minimum budget nodig. Gemakshalve worden de kosten die met het bezoek aan de locatie en het veldwerk zijn gemeoid als

een relatief klein deel van de totale kosten van bemonstering en analyse beschouwd. In dat geval is het niet nodig om de meetnetinfrastructuur en de bemonstering aan een (multicriteria-)analyse te onderwerpen om de totale projectmatige kosten verantwoord in te zetten. Zie ook punt 5 hieronder voor een beschouwing van de kosten.

5. *Beschikbaar budget.* Alle indicatoren leveren (gedeeltelijk) unieke informatie op voor de bepaling van ecosysteemdiensten. Het is niet goed mogelijk om aan te geven wat de kleinst mogelijke set indicatoren is - een zogenoemde Minimale Dataset (MDS). Het is belangrijk om voor alle sleutelkenmerken van de bodem waarvan de informatie in proxy's voor ecosysteemdiensten gebruikt dient te worden en die niet via andere indicatoren verkregen kan worden, te meten met een praktische indicator.
6. *Efficiënte inzet van faciliteiten en expertise, en het voorkomen van trendbreuken.* Gestreefd moet worden naar een efficiënte coördinatie, inrichting en uitvoering van een meetnet, het veldwerk en de analyses, en het zoveel mogelijk combineren van meetnetten (TCB 2007; Westerhof et al. 2007). Hierbij dient zoveel mogelijk te worden aangesloten bij bestaande praktijk, zodat gegevens en kennis uit het verleden hun waarde behouden en nieuwe gegevens maximaal te benutten zijn. Ervaringen uit het verleden met het LMB en Bobi zijn hierbij van belang. Voor 'nieuwe' indicatoren (ook abiotische en systeemgerichte indicatoren) moet een optimale inrichting worden ontwikkeld. Als een nieuwe indicator een vergelijkbare prestatie levert als een oude indicator, prevaleert de laatste. Een meetnet en de opbouw van een waardevolle set gegevens is in die zin 'conservatief'. Bij een overgang van de ene naar een andere indicator dient rekening gehouden te worden met een flink overlap in tijd waarbij beide indicatoren gelijktijdig worden toegepast (Spijker et al. 2009, Wattel-Koekkoek et al. 2012).
7. *Organischestofgehalte.* Organische stof is een essentieel onderdeel van een vitale bodem. Het gehalte ervan is een indicator voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten, omdat het de bron is van koolstof en energie voor het bodemleven. Organischestofgehalte als indicator scoort daarom over het geheel genomen relatief goed. Op het punt van gevoeligheid scoort de indicator minder. Dit wordt veroorzaakt, doordat organische stof niet homogeen is en traag reageert op invloeden van buiten; er zijn gemakkelijk en moeilijk afbreekbare componenten en de beschikbaarheid varieert sterk. Het verdient dus aanbeveling om verschillende fracties van organische stof te meten en de indicatorenset in evenwicht te brengen met een of meer gevoelige biologische bodemindicatoren en systeemindicatoren.

5.2 Indicatoren voor de beoordeling van ecosysteemdiensten van de bodem

Op basis van bovenstaande overwegingen, de resultaten uit de workshops en de MCA kan de volgende praktische set indicatoren worden voorgesteld om de elf ecosysteemdiensten van de bodem te beoordelen in een landsdekkend bodemmeetnet. Er is uitgegaan van een vergelijkbaar aantal indicatoren als in Bobi (Rutgers et al. 2009). Met minder indicatoren zal informatie ontbreken om sommige ecosysteemdiensten te beoordelen. Uitbreiding van de indicatorenset zal de onzekerheid in de beoordeling verkleinen. De voorgestelde set indicatoren ziet er als volgt uit:

Bodembioologische indicatoren

1. Bodemfauna:
 - a. regenwormen (aantallen en soortensamenstelling);
 - b. microarthropoden (aantallen en soortensamenstelling);
 - c. nematoden (aantallen en soortensamenstelling);

- d. potwormen (aantallen en soortensamenstelling; indien regenwormen worden bepaald, kan overwogen worden om potwormen niet te analyseren en vice versa).
- 2. Micro-organismen:
 - a. biomassa en aantallen bacteriën;
 - b. schimmelbiomassa en lengte schimmeldraden;
 - c. PLFA-bacteriën (nieuwe indicator: optioneel als het budget het toelaat).
- 3. Functionele biologische bodemindicatoren:
 - a. potentiële C-mineralisatie;
 - b. potentiële N-mineralisatie;
 - c. anaerobe N-mineralisatie;
 - d. functionele diversiteit bacteriën.

Alle bodemfauna-indicatoren, PLFA en de functionele diversiteit bacteriën betreffen zogenoemde multi-eindpunttechnieken, dat wil zeggen dat er meerdere kenmerken met één methode bepaald worden. Per indicator levert dat een multidimensionale set gegevens op (bij de bodemfauna bijvoorbeeld de soortensamenstelling).

Abiotische bodemindicatoren

1. Textuur en grondsoort (bijvoorbeeld zand, klei).
2. Organische stof
 - a. totaal gehalte organische stof;
 - b. meerdere fracties organische stof (oplosbaar, beschikbaar, recalcitrant; meest geschikte techniek nog nader vast te stellen).
3. Bodem-pH.
4. Diverse nutriënten (totaal N, diverse P-fracties, K, Mg, Ca, S).
5. Wortelbiomassa (N.B. alleen onder grasland; robuustheid en kosten van de methode nader te evalueren).
6. Bulkdichtheid en indringweerstand.
7. Bodemtemperatuur en bodemvochtigheid.

Systeemgerichte en overige indicatoren (LB = bij landbouwcategorieën)

1. Bodemgebruik en historisch bodemgebruik.
2. Toepassing van organische mest en kunstmest (LB).
3. Percentage gras ten opzichte van mais en akker (LB).
4. Diversiteit van de plantengemeenschap (vooral bij natuur en grasland).
5. Rotatie en vruchtwisseling (LB).
6. Bodembewerking (LB).
7. Primaire productie (LB).
8. Percentage braak (LB).
9. Bodemontsmetting en toepassing van bestrijdingsmiddelen (LB).
10. Percentage niet-productieve landschapselementen (LB).
11. Peilbeheer en grondwaterstand.
12. Veedichtheid (LB en natuur).
13. Klimaatinformatie: (bodem)temperatuur, neerslag, verdamping.

N.B. Er is nog maar weinig ervaring met de systeemgerichte en overige indicatoren. De wijze waarop de data efficiënt verzameld moet worden en hoe de informatie moet worden toegepast binnen proxy's voor ecosysteemdiensten, alsmede de betrouwbaarheid, zijn grotendeels onbekend. Sommige gegevens zijn privacy-gevoelig, zodat er een bijzondere voorziening voor het gebruik van de informatie getroffen moet worden.

In Bijlage 7 is bovenstaande indicatorenset uitgebreider beschreven.

5.3 Indicatoren voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit

In de vorige paragraaf is een voorstel voor een praktische set van indicatoren gedaan voor toepassing in een landelijk meetnet. Het betreft een conglomeraat van gegevens waarmee de ecosysteemdiensten van de bodem beoordeeld kunnen worden, inclusief de bodembiodiversiteit, via een specifieke set proxy's. De gegevens worden steeds verzameld binnen drie indicator domeinen, namelijk bodembioïologische indicatoren, abiotische bodemindicatoren en systeemgerichte indicatoren.

'Bodembiodiversiteit en habitatfuncties' als ecosysteemdienst krijgt via deze aanpak met de MCA een specifieke invulling, doordat ook abiotische bodem-indicatoren en systeemgerichte indicatoren relevant lijken te zijn. Hiermee wordt het kenmerk van bodembiodiversiteit als ecosysteemdienst recht gedaan en dat sluit goed aan op de nutsgerichte focus van het Natuurlijk Kapitaal van Nederland.

Het is ook mogelijk om bodembiodiversiteit uitsluitend te meten met biologische bodemindicatoren. Bodembiodiversiteit in het Europese bodem- en biodiversiteitsbeleid (COM 2011, COM 2006) appelleert namelijk rechtstreeks aan de levende en functionele aspecten van de bodem. Dit vertoont dan parallellen met de aanpak die tot nu toe met Bobi is gevolgd om de LSF te kwantificeren. Dit is ook conform de gevolgde werkwijze om de bodembiodiversiteit op de kaart van de provincie Noord-Brabant te zetten (Rutgers et al. 2012b). De informatie over de bodembiodiversiteit wordt dan slechts samengesteld uit de kenmerken van de levende bodem, en dat appelleert gemakkelijker met de bodembiodiversiteit. De rangorde van biologische bodemindicatoren is hiervoor geschikt.

6 Proxy's voor ecosysteemdiensten

In Hoofdstuk 1 is de term 'proxy' geïntroduceerd als een manier om de kenmerken van de bodem te integreren tot een maat voor de prestatie van een ecosysteemdienst. Elke ecosysteemdienst van de bodem zal door een unieke proxy worden getypeerd. De eerste ervaringen met zulke proxy's voor ecosysteemdiensten van de bodem zijn gepubliceerd door Van Wijnen et al. (2012) en Rutgers et al. (2012c). De set van tien relatief eenvoudige algoritmes was gebaseerd op de binaire (ongewogen) toepassing van een set genormaliseerde bodemkenmerken, in een samengestelde *distance to target*-benadering. Mogelijke nuances die met specifieke weegfactoren voor verschillende bodemkenmerken kunnen worden aangebracht zijn niet verkend.

De vraag kan gesteld worden of en hoe resultaten van de MCA in dit rapport bruikbaar zijn voor de ontwikkeling van betere proxy's voor ecosysteemdiensten. Het uitgangspunt bij de voorgestelde indicatoren is brede toepassing in een meetnet. Het uiteindelijke doel is om met de gegevens afkomstig van alle indicatoren ecosysteemdiensten te beoordelen. Het ligt voor de hand om voor de samenstelling van de proxy's in eerste instantie uit te gaan van de multicriteria-score voor de geschiktheid van de indicator om die bepaalde ecosysteemdiensten te beoordelen.

Een proxy voor een ecosysteem heeft bijvoorbeeld de volgende algemene vorm:

$$\text{Ecosysteemdienst} = \sum_{(1 \rightarrow n)} \gamma_n \cdot B_n \quad \text{vergelijking 1}$$

Waarin γ een weegfactor en B een bodemkenmerk (biologisch, abiotisch of systeemgericht) voorstelt. Deze worden gesommeerd van 1 tot n kenmerken. De weegfactoren γ kunnen gebaseerd worden op de scores per ecosysteemdienst uit de tweede stap van de MCA, waarbij het totaal van alle weegfactoren 1 is. De bodemkenmerken dienen genormaliseerd en eventueel geschaald te worden, om de optelling van wezenlijk verschillende kenmerken toe te laten. De schaling kan vorm gegeven worden door middel van een *distance-to-target* benadering zoals bij de berekening van de prestaties van de ecosysteemdiensten van de bodem bij vier akkerbouwbedrijven in de Hoeksche Waard is gedaan (Rutgers et al. 2012c).

De uitdrukking van een set bodemkenmerken in het presteren van een ecosysteemdienst van de bodem staat nog in de kinderschoenen. In dit opzicht is de discussie over de betekenis van bodem in het ecosysteemdienstenconcept van belang. Dominati et al. (2010), Breure et al. (2012), Robinson et al. (2013) en de TCB (zie Tekstkader 2) breken een lans voor een betere herkenbaarheid en afbakening van de bodem als leverancier van ecosysteemdiensten om het handelingsperspectief in het kader van duurzame ontwikkeling maximaal van relevante informatie te voorzien (ook dit rapport). Het is een uitdaging om dit aspect in het kader van de Atlas Natuurlijk Kapitaal (ANK; EZ 2013) verder te ontwikkelen tot een volwaardige aanpak.

7 Duurzaam bodembeheer en ruimtelijke inrichting

De onderzoeksvraag was gericht op indicatoren voor een meetnet om een landelijk beeld van de bodem te krijgen waarmee de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten beoordeeld kunnen worden. Deze informatie is relevant voor bijvoorbeeld DANK en het internationale verdrag betreffende de biodiversiteit 2020. Ze was niet specifiek gericht op de identificatie van de drivers achter de toestand van de bodembiodiversiteit en de ecosysteemdiensten, noch op het bieden van uitzicht op het handelingsperspectief op verschillende ruimte- en tijdschalen.

Het handelingsperspectief voor burgers, bedrijven en overheden is van essentieel belang om informatie over bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van maatschappelijke betekenis te laten zijn. Dit hoofdstuk besteedt aandacht aan de bredere betekenisgeving van informatie over de bodembiodiversiteit en de ecosysteemdiensten voor burgers, bedrijven en overheden. Het is geen uitputtend overzicht, omdat er enorm veel mogelijkheden zijn.

7.1 Maatschappelijke betekenis van bodeminformatie

Puntsgewijs volgt hieronder een overzicht van hoe bodeminformatie op een praktische manier maatschappelijke betekenis kan hebben.

7.1.1 *Bewustwording*

Het concept van ecosysteemdiensten kan helpen om de bewustwording bij burgers, bedrijven en overheden te stimuleren. Bodem is nu nog letterlijk en figuurlijk onzichtbaar als het gaat om duurzaamheidsoverwegingen; burgers zijn gemiddeld slecht op de hoogte van de veelheid aan rollen van de gezonde bodem voor de instandhouding van een hoge levensstandaard (voedsel, drinkwater, klimaat, omgevingskwaliteit, *et cetera*) en gezonde ecosystemen. Tot voor kort was onze relatie met klimaat ook onzichtbaar, maar als gevolg van veel publieke aandacht voor klimaatverandering is de bewustwording op dit vlak sterk verbeterd.

Bodem wordt nog vaak gezien als een privaat goed, met alleen baten voor de eigenaar (of pachter) van de grond (TCB 2012, Rutgers en Dirven-van Breemen 2012). Veel baten komen echter ook toe aan gebruikers 'op afstand', die daarvoor weinig of niets hoeven te doen. Soms is er ook afwenteling van schade aan ecosysteemdiensten, bijvoorbeeld bij gaswinning en historische bodemverontreiniging. Met de koppeling aan de ecosysteemdiensten kunnen de baten en de kosten concreet worden gemaakt en zo dus 'gemakkelijker' onder de aandacht van de burger, bedrijven en overheid worden gebracht.

In het onderwijs krijgt de bodem steeds meer aandacht. Onder de vlag van GLOBE krijgen leerlingen de mogelijkheid om zelf milieumetingen te doen en de resultaten aan te bieden aan onderzoeksinstituten zoals het KNMI en RIVM (www.globenederland.nl). Scholen in 111 landen zijn aangesloten bij dit wereldwijde initiatief. De bodemmodule bevat een aantal indicatoren die ook bij dit onderzoek zijn geëvalueerd (Rutgers en Dirven-van Breemen 2012).

Crowdsourcing biedt verrassende mogelijkheden om de bewustwording te vergroten bij de burgers. Voor de bodem in relatie tot het klimaat is de

zogenoemde Tea Bag Index ontwikkeld, waarbij iedereen met behulp van vrij verkrijgbare theezakjes metingen aan de decompositiesnelheid van organische stof in de bodem kan uitvoeren (Dingemans et al. 2012).

7.1.2 *Ruimtelijke vraagstukken*

Bijna nergens ter wereld wordt de beperkte ruimte zo zorgvuldig benut en ingericht als in Nederland. De bodem speelt hierbij echter een geringe rol; de maakbaarheidsgedachte 'alles kan overal' is dominant geworden. Duurzaam bodemgebruik stelt echter specifieke eisen aan de ecosysteemdiensten. Het beheer van de bodem staat vaak op gespannen voet met duurzaamheid; de maakbaarheid is begrensd en gaat ten koste van andere waardevolle ecosysteemdiensten. Het is maar de vraag of de winst aan de geplande ecosysteemdiensten opweegt tegen het verlies aan ongeplande en dus onbeheerde ecosysteemdiensten. Door bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten op de kaart te zetten kunnen inrichtingsvraagstukken zo geanalyseerd worden dat het bodembeheer een serieuze factor in het onderhandelingsproces wordt. Het gaat bijvoorbeeld om:

1. Het type landbouw af te stemmen op het Natuurlijk Kapitaal van de bodem, zodat relatief weinig beheer (onder andere bodembewerking, bemesting, bestrijding en beregening) nodig is voor een kwalitatief gezonde landbouwproductie.
In het recente verleden is het beheer steeds verder geïntensiveerd als gevolg van innovatieve technieken, meer mechanisering en hogere inputs.
2. Het afdekken van de bodem (wegen, infrastructuur, huizen, gebouwen, niet-grondgebonden landbouw in kassen) daar te plannen waar het Natuurlijk Kapitaal van de bodem relatief geringe schade oploopt. Door afdekken gaat relatief veel Natuurlijk Kapitaal verloren. In een stedelijke omgeving is onafgedekte bodem een schaars goed, waardoor er vaak een chronisch tekort aan Natuurlijk Kapitaal is. Dit kan zich bijvoorbeeld uiten in een 'hitte-eiland-effect'.
3. Natuurontwikkeling zo te plannen dat een robuuste natuur ontstaat, waarbij met relatief weinig beheer de natuurdoelen gemakkelijker gehaald worden door rekening te houden met het Natuurlijk Kapitaal van de bodem.
4. Het beheer zo te organiseren dat een maximale benutting van het Natuurlijk Kapitaal mogelijk is via bundels van ecosysteemdiensten, bijvoorbeeld door ontsluiting van gebieden voor recreatie, zodat recreanten ecosysteemdiensten kunnen 'consumeren' (wandelen- en fietsroutes ontwikkelen met aansprekende beschrijvingen van het Natuurlijk Kapitaal) en meervoudig ruimtegebruik (bijv. natuur, landbouw en schoon oppervlaktewater en drinkwater).

Diverse ontwikkelingen en initiatieven rond de ruimtelijke inrichting hebben baat bij informatie over het Natuurlijk Kapitaal van de bodem. Op provinciaal niveau worden geo-informatiesystemen (bodematlas, bodemwijzer, et cetera) aangeboden en onderhouden, met potentiële aandacht voor het Natuurlijk Kapitaal. De provincie Noord-Brabant bijvoorbeeld heeft een Bodemwijzer ontwikkeld waarin kaarten over de bodembiodiversiteit zijn opgenomen (Rutgers et al. 2012b; zie ook Figuur 2). De betekenis van planvorming en duurzame ruimtelijke inrichting op gemeentelijk niveau krijgt via de Impuls Lokale Duurzaamheid (ILD; vervolg op Impuls Lokaal Bodembeheer, ILB) extra aandacht. Op nationaal niveau wordt duurzaam bodembeheer en inrichting geregeld via de Structuurvisie op de Ondergrond (STRONG) en in de toekomst in de integrale Omgevingswet (Ow). Optimale benutting van ecosysteemdiensten is

een brede ambitie bij deze initiatieven. Hierdoor neemt het Natuurlijk Kapitaal dankzij de duurzamere ruimtelijke inrichting toe.

7.1.3 *Duurzaam bodembeheer*

Een duurzamer bodembeheer heeft informatie nodig van graadmeters en indicatoren voor de ecosysteemdiensten. De MCA van dit onderzoek is hiervoor een geschikt generiek vertrekpunt. Daarnaast vormt de systematiek met referenties voor een gezonde bodem een generiek kader om actuele informatie over de staat van het Natuurlijk Kapitaal te spiegelen, zodat de beoordeling plaats kan vinden (Rutgers et al. 2007, 2009). De ingrediënten voor de diverse praktische instrumenten zijn er. Het is dus 'slechts' een kwestie van het praktijkrijp te maken, samen met partijen die deze instrumenten willen gaan gebruiken. De 'incentives' hiervoor zijn soms beperkt, maar op diverse plaatsen zijn de bedoelingen goed en is men enthousiast aan het werk:

1. De vergroening van het Gemeenschappelijke Landbouwbeleid (GLB) koerst aan op een duurzamere landbouw. De instrumenten hiervoor zijn in ontwikkeling. Maatregelen in het kader van het bodembeheer (minder en minimale bodembewerking, minder bemesting, een groter percentage organische mest, groenbemesting, minder bestrijdingsmiddelen, minder beregening, betere timing voor het oogsten, ruimere rotaties, meer permanent gras) of de inrichting van landbouwgebieden (niet-productieve landschapselementen) kunnen hierbij van belang zijn. Het is mogelijk om bodeminformatie als onderdeel van het Natuurlijk Kapitaal toe te passen in afreksystemen voor een duurzamere landbouw. Een mogelijkheid is bijvoorbeeld een getrapt systeem, waarbij er meer afgerekend kan worden, naarmate het Natuurlijk Kapitaal beter (lees: nauwkeuriger) beoordeeld wordt.
2. Lokale initiatieven richten zich op een duurzamere landbouw, los van de internationale en nationale ontwikkelingen. Veldleeuwerik (www.veldleeuwerik.nl) en de Noordelijke Friese Wouden (www.duurzaamboerblijven.nl) zijn zulke voorbeelden. In Veldleeuwerik is er aandacht voor een duurzamer bodembeheer, maar het instrumentarium om dat vorm te geven is nog beperkt. In de Noordelijke Friese Wouden streven de boeren naar een duurzame veehouderij. Het is mogelijk om de uitkomsten en de principes die gehanteerd zijn bij dit onderzoek, praktisch in te zetten bij een verdere ontwikkeling van het thema bodem binnen deze initiatieven.
3. Gemeenten krijgen steeds meer met ecosysteemdiensten en het Natuurlijk Kapitaal van hun gemeente te maken (zie ook de vorige paragraaf). In het ILD kan het bodembeheer verduurzaamd worden door meer rekening te houden met de ecosysteemdiensten van de bodem. Dit uit zich in de optimalisering van meerdere ecosysteemdiensten, waardoor het Natuurlijk Kapitaal toeneemt en de beheerskosten afnemen.

Ook voor het bodembeheer geldt, net als bij de ruimtelijke inrichting (zie vorige paragraaf) dat STRONG en de Ow nationale wettelijke kaders (zullen) zijn.

7.1.4 *Bestaande en nieuwe (generieke) instrumenten*

Milieubeleid dat zich niet specifiek richt op de bescherming tegen (bekende) bedreigingen, maar op de kansen die onze leefomgeving biedt, staat nog in de kinderschoenen. De *governance*-structuren en institutionele ervaringen hoe dit op een efficiënte en praktische manier kan worden uitgevoerd ontbreken. Het instrument 'belonen' in een complexe wereld leidt regelmatig tot 'pervers gedrag', waarbij de doelen van de regelgeving (hier: maximalisatie van de

opbrengsten van ecosysteemdiensten voor meerdere partijen) er niet meer toe doen en men voor het eigen gewin kiest. Dit maakt de ontwikkeling van betaal- en beloningssystemen, naast de technische uitdagingen, ingewikkeld.

Ondanks de enorme uitdagingen zijn er diverse ontwikkelingen in de technische onderbouwing van deze nieuwe vormen van beleid en *governance*, zoals de rangordening van indicatoren voor de beoordeling van de ecosysteemdiensten van de bodem in dit rapport. Hieronder wordt in het kort een aantal procesmatige en technische ontwikkelingen aangestipt:

1. *Triple-O-aanpak (Ontdekken, Overeenkomen, Ontwikkelen)*

Voor lokaal bodembeheer of gebiedsontwikkeling is een werkwijze ontwikkeld om op basis van ecosysteemdiensten tot betere besluiten te komen (Starink et al. 2012). De werkwijze is uitgewerkt aan de hand van vier speelvelden (Rutgers et al. 2012a), waarvoor verschillende instrumenten ontwikkeld kunnen worden. Een belangrijk speelveld is dat van de stakeholders en gebruikers; zij definiëren de gewenste kwaliteiten (die vertaalbaar zijn naar ecosysteemdiensten). Een ander belangrijk aspect is de evaluatie van mogelijke opties (effect van 'maatregelen') in het bodembeheer of in de gebiedsontwikkeling, waarop afwegingen voor beheer en inrichting gebaseerd kunnen worden. Hiervoor is systeeminformatie nodig, die via beoordeling van ecosysteemdiensten moet worden verkregen. Informatie over de kwantitatieve effecten van maatregelen (bijv. via factsheets; Faber et al. 2009, Rutgers et al. 2012a) is dan nodig om afwegingen te kunnen maken.

2. *Referenties Biologische Bodemkwaliteit*

De beoordeling van ecosysteemdiensten vraagt om een maatlat met ijkpunten voor een duurzame situatie en eventueel ook de onduurzame toestand. Een eerste referentiesysteem voor de gezonde bodem is opgesteld (Rutgers et al. 2007, Rutgers en Dirven-van Breemen 2012), gebaseerd op een landelijk databestand. Het betreft een samenstel van biologische en abiotische kenmerken, en systeeminformatie. Bij de referentiekwaliteit presteren alle ecosysteemdiensten samen optimaal, ten opzichte van alle andere locaties waarvan gegevens beschikbaar zijn.

3. *Routeplanner Bodemambities en Ruimte x Milieu H2ruimte*

De Routeplanner Bodemambities (www.bodemambities.nl) gaat uit van een brede kijk op bodembeheer, met als voordeel dat meer aanknopingspunten met ruimtelijke ontwikkeling ontstaan. Daardoor kunnen kansen worden benut die bodem en ondergrond bieden, en risico's van bodemgebruik goed worden ingeschat. Daarmee kunnen ambities worden geformuleerd en nota's bodembeheer worden opgesteld. Ruimte x Milieu (www.ruimtexmilieu.nl, www.H2ruimte.nl) biedt praktische hulp bij de formulering van kwaliteitsambities voor gebiedsontwikkeling en bij de ontwikkeling van investeringen die tot gebiedskwaliteit leiden. Beide instrumenten bedienen zich van de lagenbenadering, waarbij kaartmateriaal met verschillende aspecten over elkaar kunnen worden gelegd, zodat er nieuwe verbanden ontstaan.

Beide systemen en de daarvan afgeleide webapplicaties zijn nog ontstaan in het tijdperk van de V-thema's en bevatten dus veel uitgewerkte instrumenten voor het omgaan met de verschillende bedreigingen. De Routeplanner Bodemambities bevat verschillende 'thema's', waaronder 'bodembiodiversiteit' en 'bodemvruchtbaarheid', die verder worden uitgewerkt voor toepassing bij de optimalisering van bundels ecosysteemdiensten. Beide webapplicaties zijn bezig zich te vernieuwen en te verbeteren, met meer aandacht en instrumenten voor ecosysteemdiensten (zie ook punt 4. hieronder).

4. *Milieu Effect Rapportage (MER)*

Voor activiteiten die milieuschade kunnen aanrichten is een Milieu Effect Rapportage (MER) verplicht. Dit betreft grote infrastructurele projecten, maar ook bijvoorbeeld intensieve veehouderij en windmolenparken. De MER is momenteel gericht op milieuschade en niet zozeer op de benutting van het ecosysteem. Een benadering op basis van ecosysteemdiensten biedt kansen om op een transparante en integrale manier om te gaan met verschillende soorten milieuschade door MER-plichtige activiteiten, zodat er een goed onderbouwde afweging gemaakt kan worden. Daarnaast biedt een dergelijke benadering de mogelijkheden om de benutting van het ecosysteem te optimaliseren. In feite is er dan sprake van een Milieu Benuttings Rapportage (MBR). Via een dergelijke analyse worden de 'baten' (financieel en anderszins) geoptimaliseerd en dus groter.

5. *Watertoets (bodemtoets) en ecosysteemdienstentoets*

Het doel van de huidige watertoets is waarborgen dat waterhuishoudkundige doelstellingen expliciet en op evenwichtige wijze in beschouwing worden genomen bij alle ruimtelijke plannen en besluiten van Rijk, provincies en gemeenten met een relevante waterhuishoudkundige impact. Ook hier wordt de eventuele milieuschade getoetst op aanvaardbaarheid. Een 'bodemtoets' bestaat niet; effecten op de bodem kunnen worden meegenomen in een MER.

Een ecosysteemdienstentoets kan als aanvullend instrument ontwikkeld worden. Zo'n toets kan twee doelen dienen. Enerzijds kan een onderbouwing op basis van ecosysteemdiensten nuttig zijn om bepaalde aspecten met een negatief milieueffect op een transparante manier inhoudelijk met elkaar te vergelijken (af te wegen). Anderzijds biedt zo'n kader de mogelijkheid om het benuttingspotentieel van de leefomgeving te optimaliseren, zodat er meer (financiële en andere) baten gerealiseerd kunnen worden.

Het gemeenschappelijke doel van MER en watertoets als formele (wettelijke) kaders is het zichtbaar maken van de negatieve effecten van het beheer, de ruimtelijke inrichting of het bouwwerk op de omgeving. Een ecosysteemdienstentoets gaat uit van de totale baten van het systeem en neemt dus impliciet alle positieve en negatieve effecten mee. Het is in alle gevallen aan te bevelen om de inhoudelijke basis van deze instrumenten, kaders en raamwerken op elkaar af stemmen, zodat er een groter maatschappelijk draagvlak zal ontstaan voor dit type afweging, inclusief een verbeterd milieubesef bij burgers, bedrijven en overheid. Een benadering op basis van ecosysteemdiensten is hiervoor ideaal, omdat daarmee een integraal beeld gemaakt kan worden van alle positieve en negatieve effecten. Daarnaast wordt precies de juiste hoeveelheid informatie (complexiteit) geïntegreerd die nodig is voor de afweging. Onze relatie met de leefomgeving is weliswaar complex, maar niet zo complex dat het onmogelijk is om afwegingen te doen waarbij duurzaamheid wordt nagestreefd.

Alle losse, maar op zichzelf nuttige, instrumenten dienen in een samenhangend kader voor een generiek technisch instrumentarium gezet te worden, met de volgende elementen:

1. indicatoren om kwantitatieve informatie te verkrijgen over essentiële systeemkenmerken, inclusief de bodem;
2. analyse via modellen en berekeningen van het huidige en toekomstige presteren van het systeem in termen van ecosysteemdiensten;
3. ontwikkelen van referentiesystemen voor goede (en eventueel slechte) prestaties van ecosysteemdiensten en goede status van het Natuurlijk Kapitaal;

4. beoordelen van de kwaliteit van de ecosysteemdiensten door toepassen van deze referenties;
 5. analyse van opties om de ecosysteemdiensten te beïnvloeden.
- De toepassing van een dergelijk multidimensionaal technisch instrumentarium dient te geschieden in overleg en afstemming met de maatschappelijke actoren (gebruikers en stakeholders). De Triple-O-aanpak (Starink et al. 2012) en de NEN 5737 (2010) met de Triade bevatten bouwstenen voor de afstemming tussen de stakeholders en systeemdeskundigen om effectief met ecosysteemdiensten aan de slag te gaan.

7.2 Beperkte middelen, maximale kennisbasis

Gegevensbestanden met bodemkenmerken zijn, in vergelijking met die voor de rijkswateren en lucht, minder compleet en meer verbrossend bij verschillende bronhouders aanwezig. Er is geen centrale bodemfaciliteit met gegevens over het Natuurlijk Kapitaal van de bodem. Bodem is heterogener dan water en lucht en wordt beschouwd als privaat eigendom. Metingen in de bodem worden uitgevoerd in opdracht van het rijk, provincies, gemeenten, bedrijven en andere private rechtspersonen. Veel gegevens zijn niet openbaar, in verband met het eigendom en de privacy. De ecologische processen in de bodem zijn complex en de biodiversiteit in bodems is veel groter dan in het water. Voor elk doel en voor elke schaal (ruimte en tijd) zijn specifieke analysemethoden in gebruik. Het is dus niet verrassend dat er een chronisch gebrek is aan (betrouwbare en eenduidige) gegevens of dat bestaande gegevens niet vindbaar zijn.

Er bestaan twee grote centrale gegevensfaciliteiten met vooral abiotische kenmerken van de bodem en ondergrond in Nederland. Dit zijn het Bodemkundige Informatiesysteem (BIS; www.bodemdata.nl) van Alterra in Wageningen en de database van de Geologische Dienst Nederland (DINO; www.dinoloket.nl). Momenteel worden in het kader van de BRO (Basisregistratie Ondergrond; <http://www.e-overheid.nl/onderwerpen/stelselinformatiepunt/stelsel-van-basisregistraties/1489-basisregistratie-ondergrond-bro>) gegevens van zowel DINO als BIS ontsloten. Systeeminformatie is versnipperd over meerdere instanties. Het Landbouw Economisch Instituut (LEI) is de bronhouder van veel gegevens van agrarische bedrijven. Het GAN (Gegevens Autoriteit Natuur) was een centrale faciliteit voor ontsluiting van natuur en biodiversiteitsgegevens. Momenteel zijn bodembioologische gegevens beperkt vindbaar. DESITE (nog niet publiek beschikbaar) is een bestand met plaatsgebonden biologische, abiotische en soms ook bodemverontreinigingsdata. Nederlandse gegevens over regenwormen (aantal en soortenrijkdom) zijn momenteel beschikbaar via de Nederlandse en Mondiale biodiversiteitsportalen (NLBIF en GBIF: respectievelijk Netherlands en Global Biodiversity Information Facility; www.nlbif.org en www.gbif.org).

Gecoördineerde, gestructureerde en langjarige monitoring levert de meest eenduidige en betrouwbare milieugegevens op. De TCB (2007) geeft aan dat het streven moet zijn naar efficiënte coördinatie, inrichting en uitvoering van meetnetten, het veldwerk en de analyses, en het zoveel mogelijk combineren van verschillende meetnetten. Daarbij geldt ook dat naarmate de meetreeks langer wordt, ze steeds meer betekenis krijgt en waardevoller wordt voor de kennisbasis (onderzoek) en het beleid. Het vervangen van oude door nieuwe analysetechnieken dient met de grootste zorg te gebeuren om oude gegevens hun waarde te laten behouden. De diffuse belasting van de bodem met bodemverontreinigende stoffen is op een robuuste wijze in het LMB bepaald. Hiermee is inzicht verkregen in de (langzame) veranderingen waarmee de opties

voor toekomstige metingen onderbouwd kunnen worden (Spijker et al. 2009, Wattel-Koekoek et al. 2012).

Voor de eenduidigheid en optimaal en efficiënt gebruik van beperkte informatie wordt aanbevolen om zoveel mogelijk dezelfde gestandaardiseerde indicatoren toe te passen, bijvoorbeeld voor metingen aan het Natuurlijk Kapitaal van de bodem. Waar mogelijk dienen meerdere sets gegevens bij elkaar gebracht te worden in één (meta)datasysteem of 'informatiehuis'. Voor bodem is de informatie nog te vaak verbrokkeld en beperkt beschikbaar via bijvoorbeeld projectdossiers. Een informatiehuis 'Bodem' kan in de toekomst een portaal zijn naar diverse soorten bodeminformatie, die toegepast kan worden voor de berekening van het Natuurlijk Kapitaal.

Literatuur

- Alkemade JRM, Schouten AJ (1995) Toepassingsmogelijkheden van bodembioologische gegevens in Milieubalans en Milieuverkenningen. Rapport 712901002, RIVM, Bilthoven.
- Andrews SS, Karlen DL, Mitchell JP (2002) A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agricul. Ecosys. Environ* 90: 25-45.
- Bal D, Beije HM, Fellingner M, Haveman R, Van Opstal AJFM, Zadelhoff FJ (2001) Handboek natuurdoeltypen, 2e geheel herziene druk. Rapport 2001/020, Expertise Centrum LNV, ISBN 90-75789-09-2, Wageningen.
- Bispo A, Cluzeau D, Creamer R, Dombos M, Graefe U, Krogh PH, Sousa JP, Peres G, Rutgers M, Winding A, Römbke J (2009) Learned discourses: Indicators for monitoring soil biodiversity. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 5: 717-719.
- Bloem J, Veninga M, Shepherd J (1995) Fully automatic determination of soil bacterium numbers, cell volumes and frequencies of dividing cells by confocal laser scanning microscopy and image analysis. *Appl. Environ. Microbiol.* 61: 926-936.
- Bloem J, Breure AM (2003) Microbial indicators. In: *Bioindicators and Biomonitors, Trace Metals and Other Contaminants in the Environment 9B* (eds AM Markert, AM Breure, H Zechmeister), pp. 259-282. Elsevier, Amsterdam.
- Bloem J, Vos A (2004) Fluorescent staining of microbes for total direct counts. In: Kowalchuk GA, De Bruijn FJ, Head IM, Akkermans ADL, Van Elsas JD (eds.), *Molecular Microbial Ecology Manual*, 2nd edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 861-874.
- Bloem J, Schouten AJ, Sørensen SJ, Rutgers M, Van der Werf A, Breure AM (2006) Monitoring and evaluating soil quality. In: Bloem J, Benedetti A, Hopkins DW (eds.), *Microbiological Methods for Assessing Soil Quality*. CABI, Wallingford, Oxfordshire, UK. pp. 23-49.
- Bodem (2012) Jaargang 22, nr. 5. Accent: 25 jaar Wet bodembescherming. *Bodem: Tijdschrift over duurzaam bodembeheer*. Kluwer, Den Haag.
- Bongers T (1990) The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia* 83: 14-19.
- Boumans LJM, Wattel-Koekkoek EJW, Van der Swaluw E (2013) Veranderingen in regen- en grondwaterkwaliteit als gevolg van atmosferische emissiereducties: Meten aan verzuring 1989-2010. Rapport 680720005, RIVM, Bilthoven.
- Breure AM (2004) Ecological soil monitoring and quality assessment. In: Doelman P, Eijsackers H (eds.), *Developments in Soil Science*, volume 29; *Vital Soil - Function, Value and Properties*. Elsevier, Amsterdam, pp. 281-305.
- Breure AM, De Deyn GB, Dominati E, Eglin T, Hedlund K, Van Orshoven J, Posthuma L (2012) Ecosystem services: a useful concept for soil policy making! *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4: 578-585.
- Brussaard L, Kuyper T, Didden WAM, De Goede RGM, Bloem J (2004). Biological soil quality from biomass to biodiversity - importance and resilience to management stress and disturbance. In: Schjønning P, Emholt S, Christensen BT (eds.), *Managing Soil Quality - Challenges in Modern Agriculture*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 139-161.

- Canali S, Benedetti A (2006) Soil nitrogen mineralization. In: Bloem J, Hopkins DW, Benedetti A (eds.), *Microbiological Methods for Assessing Soil Quality*, pp. 23-49. CABI, Wallingford, UK, pp. 127-135.
- Chapman PM, McDonald BG, Lawrence GS (2002) Weight-of-evidence issues and frameworks for sediment quality (and other) assessments. *Human Ecol. Risk Assess.* 8: 1489-1515.
- Chapman SJ, Campbell CD, Artz RRE (2007) Assessing CLPPs using MicroResp™ - A comparison with biolog and multi-SIR. *J. Soils Sed.* 7: 406-410.
- CICES (2013) Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012 (Haines-Young R, Potschin M, eds.), EEA Framework Contract No EEA/IEA/09/003 (Download at www.cices.eu or www.nottingham.ac.uk/cem).
- Cohen JE, Mulder C (2013; in druk) Soil invertebrates, chemistry, weather, human management, and edaphic food webs at 135 sites in The Netherlands: SIZEWEB. *Ecology / Ecological Archives / MORPHO*.
- COM (2006) EP Commission Communications 2006: Soil Thematic Strategy (231 final) and Proposal for a Soil Framework Directive (232 final).
- COM (2011) 244 final: Communication from the commission to the European Parliament, the council, the economic and social committee and the committee of the regions. Our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020.
- Darbyshire JF, Wheatley RE, Greaves MP, Inkson RHE (1974) A rapid micromethod for estimating bacterial and protozoan populations in soil. *Rev. Ecol. Biol. Soil* 11: 465-475.
- Deru J, Van Eekeren N, De Boer H (2010) Beworteling van grasland: een literatuurstudie. Nutriëntenopname in relatie tot bewortelingsdiepte en -intensiteit. Factoren en potentiële maatregelen die de beworteling beïnvloeden. Publicatienummer 2010-018 LbV. LBI en WUR-Livestock Research, Driebergen.
- Deru J, Van Eekeren N, Kloen H, Dijkman W, Van den Akker J, De Goede R, Schouten T, Rutgers M, Smits S, Jagers op Akkershuis G, Dimmers W, Keidel H, Lenssinck F, Bloem J (2012) Bodemindicatoren voor duurzaam bodemgebruik in de veenweiden: Ecosysteemdiensten van landbouw- en natuurpercelen in het veenweidegebied van Zuid-Holland, Noord-Holland en Utrecht. Deel A Onderzoeksrapportage. Publicatienummer 2012-005 LbD, Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- De Vries FT, Hoffland E, Van Eekeren N, Brussaard L, Bloem J. (2006) Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting management. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2092-2103.
- De Vries FT, Bloem J, Quirk H, Stevens C, Bol R, Bardgett RD (2012) Extensive management promotes plant and microbial nitrogen retention in temperate grassland. *PLoS ONE* 7(12): e51201.
- Diden W, Römbke J (2001) Enchytraeids as indicator organisms for chemical stress in terrestrial ecosystems. *Ecotox Environl Saf* 50: 25-43.
- Dingemans BJJ, Keuskamp JA, Sarneel JM (2012) De Tea Bag Index: theezakjes als wetenschappelijk meetinstrument. *Bodem* 22(6): 8-9.
- Dominati E, Patterson M, Mackay A (2010) A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69: 1858-1868.
- Donn S, Neilson R, Griffiths BS, Daniell TJ (2012) A novel molecular approach for rapid assessment of soil nematode assemblages - variation, validation and potential applications. *Meth. Ecol. Evol.* 3:12-23.
- Doran JW, Zeiss MR (2000) Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15: 3-11.

- EEA (2010) State and outlook of the European environment (SOER). European Environment Agency (EEA), <http://www.eea.europa.eu/soer>.
- EZ (2013) Uitvoeringsagenda Natuurlijk Kapitaal: behoud en duurzaam gebruik van biodiversiteit. Brief van het Ministerie van Economische Zaken aan de Tweede Kamer, 22 juni 2013, Den Haag.
- 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; Rapport 1813, Alterra WUR, Wageningen.
- Faber JH, Creamer RE, Mulder C, Römbke J, Rutgers M, Paulo Sousa J, Stone D, Griffiths BS (2013) The Practicalities and Pitfalls of Establishing a Policy - Relevant and Cost - Effective Soil Biological Monitoring Scheme. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 9: 276-284.
- Heink U, Kowarik I (2010) What criteria should be used to select biodiversity indicators? *Biodiv. Cons.* 19: 3769-3797.
- Huijsmans KGA, De Wit J (2008) Prestaties van de bodem in natuurontwikkelingsgebied Banisveld. Ontwikkeling bodembioologische referenties voor 'heide op voormalige landbouwkundige zandgrond'. Rapport 13/99088990/KH, Grontmij, Houten, Nederland.
- Jagers op Akkerhuis GAJM, Dimmers WJ, Van Vliet PCJ, Goedhart PW, Martakis GFP, De Goede RGM (2008) Evaluating the use of gel-based subsampling for assessing responses of terrestrial microarthropods (Collembola and Acari) to different slurry applications and organic matter contents. *Appl. Soil Ecol.* 38: 239-248.
- Keeney DR, Nelson DW (1982) Nitrogen-inorganic forms. In "Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties" (A. L. Page, R. H. Miller, and D. R. Keeney, Eds.), pp. 643-698. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Kuramae EE, Yergeau E, Wong LC, Pijl AS, Van Veen JA, Kowalchuk GA (2012) Soil characteristics more strongly influence soil bacterial communities than land-use type. *FEMS Microbiol. Ecol.* 79: 12-24.
- Lavorel S, Storkey J, Bardgett RD, de Bello F, Berg MP, Le Roux X, Moretti M, Mulder C, Pakeman RJ, Díaz S, Harrington R (2013) A novel framework for linking functional diversity of plants with other trophic levels for the quantification of ecosystem services. *J. Veg. Sci.* 22: 942-948.
- Lemanceau P (2011) EcoFINDERS: characterizing biodiversity and soil functioning in Europe. 23 partners from 10 European countries and China. *Biofuture 2011*, 326:56-58.
- Liu Z, Lozupone C, Hamady M, Bushman FD, Knight R (2007) Short pyrosequencing reads suffice for accurate microbial community analysis *Nucleic Acids Research* 35: e120.
- Magurran AE, Baillie SR, Buckland ST, Dick JM, Elston DA, Scott EM, Smith RI, Somerfield PJ, Watt AD (2010) Long-term datasets in biodiversity research and monitoring: Assessing change in ecological communities through time. *Trends in Ecology and Evolution* 25: 574-582.
- Maes J, Teller A, Erhard M, Lquete C, Braat L, Berry P, Egoh B, Puydarrieux P, Fiorina F, Santos F, Paracchini ML, Keune H, Wittmer H, Hauck J, Fiala I, Verburg P, Condé S, Schägner JP, San Miguel J, Estreguil C, Ostermann O, Barredo JI, Pereira HM, Stott A, Laporte V, Meiner A, Olah B, Royo Gelabert E, Spyropoulou R, Petersen JE, Maguire C, Zal N, Achilleos E, Rubin A, Ledoux L, Brown C, Raes C, Jacobs S, Vandewalle M, Connor D, Bidoglio G (2013) Mapping and assessment of ecosystems and their services. An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020. Publications of the European Union, Luxembourg.

- Markert BA, Breure AM, Zechmeister HG, eds. (2003) Bioindicators and biomonitors. Principles, concepts and applications. Trace Metals and other Contaminants in the Environment 6. Elsevier, Oxford.
- McDonald-Madden E, Baxter PWJ, Fuller RA, Martin TG, Game ET, Montambault J, Possingham HP (2010) Monitoring does not always count. *Trends Ecol. Evol.* 25: 547-550.
- MEA (2005) Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. Washington, DC: World Resources Institute; 2005.
- Mulder C, Elser JJ (2009) Soil acidity, ecological stoichiometry and allometric scaling in grassland food webs. *Global Change Biol.* 15: 2730-2738.
- Mulder C, De Zwart D, Van wijnen HJ, Schouten AJ, Breure AM (2003) Observational and simulated evidence of ecological shifts within the soil nematode community of agroecosystems under conventional and organic farming. *Funct. Ecol.* 17: 516-525.
- Mulder C, Cohen JE, Setälä H, Bloem J, Breure AM (2005a) Bacterial traits, organism mass, and numerical abundance in the detrital soil food web of Dutch agricultural grasslands. *Ecol. Lett.* 8: 80-90.
- Mulder C, Van Wijnen HJ, Van Wezel AP (2005b) Numerical abundance and biodiversity of below-ground taxocenes along a pH gradient across the Netherlands. *J. Biogeogr.* 32: 1775-1790.
- Mulder C, Den Hollander HA, Vonk JA, Rossberg AG, Jagers op Akkerhuis, GAJM, Yeates GW (2009) Soil resource supply influences faunal size-specific distributions in natural food webs. *Naturwissenschaften* 96: 813-826.
- Mulder C, Boit A, Bonkowski M, De Ruyter PC, Mancinelli G, Van der Heijden MGA, Van Wijnen HJ, Vonk JA, Rutgers M (2011) A belowground perspective on Dutch agroecosystems: How soil organisms interact to support ecosystem services. *Adv. Ecol. Res.* 44: 277-357.
- Mulder C, Boit A, Mori S, Vonk JA, Dyer SD, Faggiano L, Geisen S, González AL, Kaspari M, Lavorel S, Marquet PA, Rossberg AG, Sterner RW, Voigt W, Wall DH (2012) Distributional (in)congruence of Biodiversity-Ecosystem Functioning. *Adv. Ecol. Res.* 46: 1-88.
- Mulder C, Ahrestani FS, Bahn M, Bohan DA, Bonkowski M, Griffiths BS, Guicharnaud RA, Kattge J, Krogh PH, Lavorel S, Lewis OT, Mancinelli G, Naeem S, Peñuelas J, Poorter H, Reich PB, Rossi L, Rusch GM, Sardans J, Wright IJ (2013) Connecting the green and brown worlds: Allometric and stoichiometric predictability of aboveground and belowground networks. *Adv. Ecol. Res.* 49: 67-173.
- NEN 5737 (2010) Bodem; Landbodem; Proces van locatiespecifieke ecologische risicobeoordeling van bodemverontreiniging. Nederlandse norm, Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.
- Pavoine S, Bonsall MB (2011) Measuring biodiversity to explain community assembly: A unified approach. *Biol. Rev.* 86: 792-812.
- PBL (2012) Balans van de Leefomgeving 2012. Publicatie 500248001, ISBN 978-94-91506-13-0, Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Den Haag.
- Pulleman M, Creamer R, Hamer U, Helder J, Pelosi C, Guénola Pérès G, Rutgers M (2012) Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4:529-538.
- RIVM (1989) Concern for tomorrow. A national environmental survey 1985-2010. Report 010198901, RIVM, Bilthoven.
- Ritz K, Black HIJ, Campbell CD, Harris JA, Wood C (2009) Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. *Ecol. Ind.* 9:1212-1221.

- Robinson DA, Hockley N, Cooper DM, Emmett BA, Keith AM, Lebron I, Reynolds B, Tipping E, Tye AM, Watts CW, Whalley WR, Black HIJ, Warren GP, Robinson JS (2013) Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biol. Biochem.* 57:1023-1033.
- Römbke J, Sousa J-P, Schouten T, Riepert F (2006) Monitoring of soil organisms: a set of standardized field methods proposed by ISO. *Eur J Soil Biol* 42: S61-S64.
- Rutgers M, Mulder C, Schouten AJ, Bogte JJ, Breure AM, Bloem J, Jagers op Akkerhuis GAJM, Faber JH, Van Eekeren N, Smeding FW, Keidel H, De Goede RGM, Brussaard L (2005) Typering van bodemecosystemen - Duurzaam bodemgebruik met referenties voor biologische bodemkwaliteit. Rapport 607604007, RIVM, Bilthoven.
- Rutgers M, Breure AM, Insam H (2006) Substrate utilization in Biolog™ plates for analysis of CLPP. In: *Microbiological Methods for Assessing Soil Quality* (eds J Bloem, A Benedetti, DW Hopkins), pp. 212-227. CABI, Wallingford.
- Rutgers M, Mulder C, Schouten AJ, Bloem J, Bogte JJ, Breure AM, Brussaard L, De Goede RGM, Faber JH, Jagers op Akkerhuis GAJM, Keidel H, Korthals G, Smeding FW, Ter Berg C, Van Eekeren N (2007) Typering van bodemecosysteem in Nederland met tien referenties voor biologische bodemkwaliteit. Rapport 607604008, RIVM, Bilthoven.
- Rutgers M, Schouten AJ, Bloem J, Van Eekeren N, De Goede RGM, Jagers op Akkerhuis GAJM, Van der Wal A, Mulder C, Brussaard L, Breure AM (2009) Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. *Eur. J. Soil Sci.* 60: 820-832.
- Rutgers M, Jagers op Akkerhuis GAJM, Bloem J, Schouten AJ, Breure AM (2010) Priority areas in the Soil Framework Directive: the significance of soil biodiversity and ecosystem services. Rapport 607370002, RIVM, Bilthoven.
- Rutgers M, Jensen J (2011) Site-specific ecological risk assessment. Chapter 15, in: F.A. Swartjes (Ed.), *Dealing with Contaminated Sites – from Theory towards Practical Application*, Springer, Dordrecht. pp. 693-720.
- Rutgers M, Dirven-Van Breemen L, eds. (2012) Een gezonde bodem onder een duurzame samenleving. Rapport 607406001, RIVM, Bilthoven.
- Rutgers M, Oude Boerrigter P, Starink J, Winkler T, Hendriks C (2012a) Ecosysteemdiensten als ordenend principe voor duurzaam bodembeheer en gebiedsinrichting: rekenen met de Triple-O aanpak in het Leiden Bio Science Park. Rapport 607711010, RIVM, Bilthoven.
- Rutgers M, Van Wijnen HJ, Schouten AJ, Mulder C, De Zwart D, Posthuma L, Bloem J, Van Eekeren N, De Goede RGM (2012b) Bodembiodiversiteit op de kaart van Noord-Brabant. Rapport 607063001, RIVM, Bilthoven.
- Rutgers M, Van Wijnen HJ, Schouten AJ, Mulder C, Kuiten AMP, Brussaard L, Breure AM (2012c) A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Sci. Tot. Env.* 415: 39-48.
- Schouten AJ, Brussaard L, De Ruiter PC, Siepel H, Van Straalen NM (1997) Een indicatorsysteem voor life support functies van de bodem in relatie tot biodiversiteit. Rapport 712910005, RIVM, Bilthoven.
- Schouten AJ, Rutgers M, Breure AM (2001) Bobi op weg – tussentijdse evaluatie van het project bodembioologische indicator. Rapport 607604002, RIVM, Bilthoven.
- Schouten T, Breure AM, Mulder C, Rutgers M (2004) Nematode diversity in Dutch soils, from Rio to a Biological Indicator for Soil Quality. *Nematology Monographs and Perspectives* 2: 469-482.

- Smeding F, Zanen M, Schouten T (2008) Bodemkwaliteit Drenthe, 1-jarige pilot Referenties Biologische Bodemkwaliteit. Rapport LB21, Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- Smit E, Leeflang P, Glandorf B, Van Elsas JD, Wernars K (1999) Analysis of fungal diversity in the wheat rhizosphere by sequencing of cloned PCR-amplified genes encoding 18S rRNA and temperature gradient gel electrophoresis. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 2614-2621
- Sobek EA, Zak JC (2003) The Soil FungiLog procedure: Method and analytical approaches toward understanding fungal functional diversity. *Mycologia* 95: 590-602.
- SPA (1995) Strategisch Plan van Aanpak Biologische Diversiteit: Nederlandse Uitwerking van het Verdrag inzake Biologische Diversiteit. Ministeries van VROM, LNV en Ontwikkelingssamenwerking, Den Haag.
- Sparling GP, Schipper LA (2002) Soil quality at a national scale in New Zealand. *J. Environ. Qual.* 31: 1848-1857.
- Spijker J, Schouten AJ, Van der Hoek KW, Wattel-Koekkoek EJW (2009) Evaluatie van het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Rapport 680718002, RIVM, Bilthoven.
- Starink J, Nuiver H, Keuning S, eds. (2012) Ecosysteemdiensten in de praktijk van duurzaam bodembeheer en gebiedsontwikkeling: De Triple-O aanpak. Met bijdragen van: Oude Boerrichter P, Westerhof R, Rutgers M, Van der Meulen S, Smit A, Breure T, Van Eijsden G, Roghair C, Winkler T. Consortium Ecosysteemdiensten in de praktijk. *Bodem+*, Agentschap NL, Den Haag. (<http://www.agentschapnl.nl/content/triple-o-aanpak-ontdekken-overeenkomen-ontwikkelen>)
- Swartjes FA, Rutgers M, Lijzen JPA, Janssen PJCM, Otte PF, Wintersen A, Brand E, Posthuma L (2012) State of the art of contaminated site management in The Netherlands: Policy framework and risk assessment tools. *Sci. Tot. Envir.* 427-428:1-10.
- TCB (2003) Advies duurzamer bodemgebruik op ecologische grondslag. Advies A33, Technische commissie bodem, Den Haag.
- TCB (2007) Advies Monitoren. Advies S34. Technische Commissie bodem, Den Haag.
- TCB (2009) Advies gevolgen afdekken van de bodem. Advies A48. Technische commissie bodem, Den Haag.
- TCB (2012) Advies beter besluiten met ecosysteemdiensten, Advies A73, Technische commissie bodem, Den Haag.
- TEEB (2010) The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and economic foundation. EarthScan, Cambridge, UK.
- Thoden T, Molendijk L, Van Overbeek L (2013; in druk) Verkenning bodemindicatoren. Project 3250230512. Praktijkonderzoek Plant en Omgeving, WUR, Wageningen.
- Torsvik V, Sørheim R, Goksøyr J (1996) Total bacterial diversity in soil and sediment communities - A review. *J. Industr. Microbiol. Biotechnol.* 17:170-178.
- Turbé A, De Toni A, Benito P, Lavelle P, Lavelle P, Ruiz N, Van der Putten WH, Labouze E, Mudgal S (2010) Soil biodiversity: functions threats and tools for policy makers. Bio Intelligence Service, IRD and NIOO, Report for European Commission (DG Environment), Brussels.
- Vačkář D, Ten Brink B, Loh J, Baillie JEM, Reyers B (2012) Review of multispecies indices for monitoring human impacts on biodiversity. *Ecol. Ind.* 17: 58-67.
- Van der Wal A, Bloem J, Mulder C, de Boer W (2008) Relative abundance and activity of melanized hyphae in different soil systems. *Soil Biol. Biochem.* 41: 417-419

- Van der Wal A, Geerts RHEM, Korevaar H, Schouten AJ, Jagers op Akkerhuis GAJM, Rutgers M, Mulder C (2009) Dissimilar response of plant and soil biota communities to long-term nutrient addition in grasslands. *Biol. Fertil. Soils* 45: 663-667.
- Van Duijvenbooden W, Van Driel W, Willems WJ (1995) Resultaten van een onderzoek naar de mogelijke opzet van een Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Coördinatie-Commissie voor Metingen in het Milieu (CCRX 1995-7).
- Van Eekeren N, Bommelé L, Bloem J, Schouten T, Rutgers M, De Goede R, Reheul D, Brussaard L (2008) Soil biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. *Appl. Soil Ecol.* 40: 432-446.
- Van Eekeren N, De Boer H, Hanegraaf M, Bokhorst J, Nierop D, Bloem J, Schouten T, De Goede R, Brussaard L (2010) Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. *Soil Biol. Biochem.* 42: 1491-1504.
- Van Eekeren N, Deru J, De Boer H, Philipsen B (2011) Terug naar de graswortel. Brochure LbD2011-023. Louis Bolk Instituut, Driebergen.
- Van Wijnen HJ, Rutgers M, Schouten AJ, Mulder C, De Zwart D, Breure AM (2012) How to calculate the spatial distribution of ecosystem services across the Netherlands. *Sci. Tot. Environ.* 415: 49-55.
- Vervoort MTW, Vonk JA, Mooijman PJW, Van den Elsen SJJ, Van Megen HHB, Veenhuizen P, Landeweert R, Bakker J, Mulder C, Helder J (2012) SSU Ribosomal DNA-Based Monitoring of Nematode Assemblages Reveals Distinct Seasonal Fluctuations within Evolutionary Heterogeneous Feeding Guilds. *PLoS One* 7: e47555.
- Vonk A, Breure AM, Mulder C (2013) Environmentally-driven dissimilarity of trait-based indices of nematodes under different agricultural management and soil types. *Agr. Env. Ecosys.*
- VRM (2003) Beleidsbrief Bodem. Kenmerk BWL/2003 096250, Ministerie van VRM, Den Haag.
- Wattel-Koekkoek EJW, Buurman P, Van Der Plicht J, Wattel E, Van Breemen N (2003). Mean residence time of soil organic matter associated with kaolinite and smectite. *Eur. J. Soil Sci.* 54: 269-278.
- Wattel-Koekkoek EJW, Van Vliet ME, Boumans LJM, Ferreira J, Spijker J, Van Leeuwen TC (2012) De bodemkwaliteit in Nederland in 2006-2010 en de verandering ten opzichte van 1993-1997. Rapport 680718003, RIVM, Bilthoven.
- Westerhof R, Passier H, Busink R, Tamis W (2007) Slim monitoren van bodemkwaliteit. Rapport 2007-U-R0051/A, TNO Bouw en Ondergrond, Utrecht.
- Winding A, Hund-Rindke K, Rutgers M (2005) The use of microorganisms in ecological soil classification and assessment concepts. *Ecotox. Environ. Saf.* 62: 230-248.
- WRI (2009) Report from the workshop on Ecosystem Service Indicators, developing and mainstreaming ecosystem service indicators for human wellbeing: gaps, opportunities and next steps.
- Xue K, Wu L, Deng Y, He Z, Van Nostrand J, Robertson PG, Schmidt TM, Zhou J (2013) Functional gene differences in soil microbial communities from conventional, low-input, and organic farmlands. *Appl. Environ. Microbiol.* 79: 1284-1292.
- Yeates GW (2003) Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biol. Fertil. Soils* 37: 199-210.

Bijlage 1. Ecosysteemdiensten van de bodem

Preambule

1. Ecosysteemdiensten betreft een jong concept. Het is niet algemeen geaccepteerd om de term 'ecosysteemdiensten van de bodem' te gebruiken. Desgewenst kan de term aangepast worden tot de 'ondersteunende diensten van de bodem', 'ondersteunende functies van de bodem' of anderszins. Een focus op de bodem is relevant, omdat er een praktisch handelingsperspectief geboden kan worden, dat bij een systeembenadering beperkt is (zie Hoofdstuk 3; TCB 2012, Robinson et al. 2013, Dominati et al. 2010). De uitwerking in dit rapport biedt mogelijkheden voor de beoordeling van ecosysteemdiensten.
2. De fysieke structuur voor boven- en ondergronds bouwen, infrastructuur, afdekking, transport, kassen (substraatteelt), pijpen en leidingen is buiten beschouwing gelaten (zie Hoofdstuk 3 voor een motivatie) als ecosysteemdienst van de bodem. Ze ontbreekt ook in de CICES (2013) typologie en het voorstel van Maes et al. (2013) voor het beoordelen en karteren van ecosysteemdiensten. In deze internationale kaders behoort dit aspect wel tot het Natuurlijk Kapitaal.
3. Onderstaande lijst 'ecosysteemdiensten van de bodem' is niet uitputtend in de omschrijving van alle theoretisch mogelijke ecosysteemdiensten in detail. Doel was om een praktische lijst samen te stellen om toe te passen binnen de gestelde doelen van dit project; niet te kort waardoor onderscheidend vermogen verdwijnt, en niet te lang om de hanteerbaarheid te borgen. Voor elke situatie (plaats- en tijdgebonden) is het zinvol om na te gaan of de ecosysteemdiensten voldoende compleet zijn benoemd voor een eerste inventarisatie van systeemkenmerken en indicatoren. Bij eerder onderzoek is een aanpak gevolgd waarbij stakeholders (begunstigden) zelf aangaven welke ecosysteemdiensten van belang waren (Smeding et al. 2008, Huijsmans en De Wit 2008, Rutgers et al. 2012).

Elf ecosysteemdiensten van de bodem

Voorstellijst met elf ecosysteemdiensten van de bodem (gebaseerd op TCB 2003, Rutgers et al. 2008, MA 2005, CICES 2013; zie Tabel 5).

1. Productie

Ondersteunend aan de productiefuncties van de bodem (gewassen, vee, natuurdoeltypen, doelsoorten, sierplanten en landschap) ten behoeve van de landbouw, bosbouw, natuur, recreatie, wonen met tuin en overige groene gebieden:

a. *Nutriëntenhuishouding:*

Het natuurlijk nutriëntenleverende vermogen, het voorkomen van lekverliezen en afstroming, preferentieel gebrek aan nutriënten, etc.);

b. *Bodemstructuur:*

Grondsoort, aggregaten en profielontsluiting;

c. *Natuurlijk vermogen om ziekten en plagen te onderdrukken:*

Met name belangrijk voor landbouw, omdat elke geringe aantasting een verminderde primaire productie betekent (of een toename van het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen).

Dit zijn naast de rol van water en klimaat (zie 3. Regulatie) de drie belangrijkste geaggregeerde bodemkenmerken die de primaire productie bepalen ter ondersteuning van bovenstaande functies. De productie van

schoon grondwater ten behoeve van grondwateronttrekkingen is geadresseerd onder de regulatiefuncties (3).

2. Weerstand tegen stress, herstelvermogen en vermogen tot aanpassen

Stabiliteit, robuustheid, veerkracht, veranderingsvermogen, et cetera. Deze dienst is in de MA (2005) en CICES (2013) typologie niet apart benoemd, maar wordt verondersteld een onderdeel te zijn van alle andere ecosysteemdiensten. De TCB (2003) heeft deze ecosysteemdienst wel apart benoemd:

- a. *Weerstand tegen milieudruk en herstelvermogen na calamiteiten:*
Als gevolg van milieudruk, omgevingsbeheer en klimaateffecten komt de bodem onder druk te staan en kan ze aangetast worden. Weerstand bieden aan deze druk, veerkracht en herstelvermogen na calamiteiten is een gewenste bodemeigenschap.
- b. *Aanpassingsvermogen:*
De bodem wordt benut binnen de contouren van het huidige bodemgebruik, maar is van oorsprong meestal in staat om meerdere gebruiksfuncties te ondersteunen. Het vermogen om op termijn die andere functies te kunnen blijven ondersteunen is een gewenste bodemeigenschap.

3. Regulatie

Ondersteunend aan alle regulatiefuncties van de bodem (klimaat, leefomgeving), inclusief schoon grondwater, drinkwaterproductie en schoon oppervlaktewater:

- a. *Koolstofhuishouding:*
Fragmentatie en afbraak van dood plantaardig materiaal, opbouw (stabiele) bodem organische stof, koolstofkringloop, voorzien in koolstof voor energie en bouwstoffen.
- b. *Zelfreinigend vermogen en overige kringloopfuncties:*
Overmaat toxische en andere stoffen onschadelijk maken of elimineren, bijdragen aan alle kringloopfuncties van de bodem om accumulatie en gebreken te voorkomen (koolstof bij a.).
- c. *Waterhuishouding en –transport:*
De bodem voorziet in een structuur om water op te vangen, vast te houden, af te geven en te transporteren, ten behoeve van landbouw, natuur, oppervlaktewater, grondwater en alle andere groene functies, en ten behoeve van de leefbaarheid.
- d. *Klimaatfuncties:*
De bodem draagt bij aan klimaatregulatie op alle ruimte- en tijdschalen, via de buffering van vocht en regulatie van de temperatuur (alle ruimte- en tijdschalen; bijvoorbeeld lokaal klimaat in stad en mondiaal klimaat via koolstofvastlegging en GHG-uitstoot).

4. Habitatfunctie en bodembiodiversiteit

Deze diensten vallen in de MA (2005) en CICES (2013) typologie onder de culturele ecosysteemdiensten van de bodem. Ten opzichte van eerder onderzoek (bijvoorbeeld Rutgers et al. 2012) is deze nader onderverdeeld in:

- a. *Habitatfunctie, bodembiodiversiteit en genenvoorraad:*
Het vermogen van de bodem om de grote genenvoorraad en onvermoede processen in stand te houden en het ecosysteem te ondersteunen.

b. *Ethische, culturele en educatieve functies:*

De bodem is de basis van het terrestrische leven op aarde, het aquatische leven in oppervlaktewateren en het aquatische leven in de kustwateren. De bodem biedt tevens inspiratie en kan op allerlei manieren bijdragen aan culturele functies.

Bijlage 2. Verslag van de workshop op 9 september 2011

Workshop Bobi-ESD 1: naar een indicatorsysteem voor biodiversiteit en ecosystemendiensten van de bodem

Datum: 7 september 2011

Plaats: RIVM Bilthoven.

Deelnemers: Lijbert Brussaard (WUR), Henk Siepel (RUN), Matty Berg (VUA), Ton Breure (RUN/RIVM), Niek de Wit (minIenM), Michiel Rutgers (RIVM), Ton Schouten (RIVM)

Inleiding

De doelen, achtergronden en vragen die ten grondslag liggen aan de workshop zijn vooraf aan de deelnemers toegezonden. Het doel is in feite tweeledig: 1) evaluatie van de huidige indicatorset tegen de achtergrond van nieuwe technische mogelijkheden of meetmethoden, en 2) zo mogelijk vanuit de bestaande kennis en meetgegevens doorontwikkelen naar een meetnet voor ecosystemendiensten (ESD) van de bodem. Vanuit Bobi is hier in een eerder stadium een eerste kwantitatieve uitwerking aan gegeven, in het project Referenties voor Biologische Bodemkwaliteit (RBB). Aansluitend zijn drie pilotprojecten (Hoeksche Waard, Drenthe, Banisveld) uitgevoerd. De vraag is of, en hoe, deze methode moet worden doorontwikkeld.

Gezien de omvang en complexiteit van de materie is een aantal bijeenkomsten met deskundigen gepland. Een nieuw concept zal in bredere kring worden gepresenteerd om draagvlak te creëren.

De vragen waar een antwoord op wordt gezocht in deze workshop zijn:

1. Is Bobi nog state-of-the-art voor monitoring van de bodembiodiversiteit en 'LSF' of zijn aanpassingen dringend nodig (Minimum Data Set bodembiodiversiteit NL, balans in indicatorset, praktische aspecten)?
2. Zijn genomic-technieken rijp voor toepassing in een monitoring? Welke wel, welke niet?
3. Zijn de ESD's van de bodem meetbaar. Zo ja hoe?
4. Wat is een MDS voor ESD in NL (balans indicatorset, abiotiek-biotiek)
5. Is het Bobi-meetnet om te vormen tot een meetnet voor ESD?

Ton Schouten bespreekt de geschiedenis, omvang en inhoud van het Bobi-project, aan de hand van een presentatie. De oorsprong gaat terug tot 1995. Na de publicatie van het concept (Schouten et al. 1997. RIVM rapport 712910005) is in 1997 een pilot gedaan. Vervolgens zijn sinds 1999 twee meetrondes van vijf jaar uitgevoerd in het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB). De LMB-locaties zijn aangevuld met metingen op biologische bedrijven en extra categorieën in twee tussenjaren (2004, 2005). Het heeft een inventarisatie van de diversiteit en biologische kenmerken van de Nederlandse bodem opgeleverd. De meetgegevens zijn opgeslagen in een database en tot een groot aantal publicaties verwerkt. Het overzicht van het Bobi-project wordt afgerond met een lijstje onderwerpen en indicatoren die niet konden worden gemeten of mogelijk ten onrechte niet aan bod zijn gekomen.

Aansluitend gaat Michiel Rutgers in op de concepten die voor ecosystemendiensten zijn gepubliceerd. Het denken in termen van 'ecosystem services' heeft definitief z'n intrede gedaan met het uitkomen van de Millennium Ecosystem Assessment (2005). In feite is het een hernieuwde uitwerking van de begrippen

'life support functions' en 'functional biodiversity' die sinds de Convention on Biological Diversity (Rio de Janeiro, 1992) worden gebruikt om het nut van biodiversiteitsbehoud te benadrukken. In Nederland is het TCB-advies A33 uit 2003 een belangrijke mijlpaal. Het bovengenoemde RBB-project is grotendeels op het TCB-raamwerk gebaseerd.

Het aantal publicaties over 'ecosystem services' is de laatste jaren explosief gegroeid. Een relatief klein percentage gaat over 'soil ecosystem services' (<5%). Een vergelijkbare verhouding treft men aan bij 'Biodiversity' en 'Soil biodiversity'. De beschrijving van ESD-bodem blijft meestal abstract of spitst zich in (veld)experimenten toe op de rol van bodemorganismen in een bepaalde functie. Er zijn geen voorbeelden gevonden van een set indicatoren of meetnet, die een brede range ecosystemendiensten beslaan en die een kwantitatieve invulling hebben gekregen.

Niek de Wit geeft zijn visie op ecosystemendiensten van de bodem vanuit beleidsmatig perspectief. Ondanks dat het concept al een aantal jaren geleden is gelanceerd, is het nog niet echt ontwikkeld. Bovendien is er een (traditionele) scheiding tussen milieu- en natuurbeleid. Dit bemoeilijkt een integrale aanpak, die juist inherent is aan het ESD-concept.

Niek de Wit wijst er op dat het Beleidsprogramma Biodiversiteit uit 2008 niet is genoemd in de voorgaande overzichten.

Biodiversiteit is ons Natuurlijk Kapitaal en levert de maatschappij goederen en diensten (ecosysteemdiensten). Het vertegenwoordigt daarmee ook een sociale en economische waarde, die essentieel is voor ons bestaan. Het ministerie van I&M wil mogelijk maken dat het natuurlijke systeem duurzamer en effectiever wordt benut. Door het faciliteren van groene oplossingen worden het profijt van ecosystemendiensten en de milieukwaliteit versterkt. Dit zijn oplossingen die zorgen dat de productie van o.a. voedsel en vezels gegarandeerd blijft en de LSF voor de mens in stand gehouden worden. Deze regulerende diensten vormen de 'groene motor' van het milieu.

De biodiversiteit vermindert nog steeds, waardoor ecosystemen in kwaliteit achteruit gaan. Hierdoor komt de levering van ecosystemendiensten onder druk te staan. Het gevolg hiervan is economische schade door een verminderde productiecapaciteit, vooral van hernieuwbare natuurlijke hulpbronnen, en het geheel of gedeeltelijk wegvallen van regulerende functies. Het behoud en vooral het duurzaam gebruik van biodiversiteit (ecosysteemdiensten) maken – gezien het maatschappelijke belang – ten onrechte nauwelijks expliciet onderdeel uit van het beleid van overheden en bedrijfsleven. Ook de burgers zijn zich onvoldoende bewust hoe belangrijk biodiversiteit is voor hun welvaart en welzijn en wat de mogelijkheden zijn om hier anders mee om te gaan.

Het ministerie van IenM, en meer in het bijzonder het taakveld Biodiversiteit en Ecosysteemdiensten, ziet het als zijn *core business* om ervoor te zorgen dat de 'groene motor' optimaal draait en blijft draaien. Dat betekent dat op de lange termijn dat zowel nationaal als internationaal ecosystemen gezond zijn en duurzaam worden gebruikt. Dit is de basisvoorwaarde voor duurzame productie van biotische grondstoffen en producten binnen en buiten Nederland. Om dit doel te bereiken wordt langs drie lijnen gewerkt - de '3 B's' - te weten Begrijpen, Benutten en Betalen:

- Onder de noemer Begrijpen wordt gewerkt aan vergroting van het maatschappelijke bewustzijn, het creëren van een handelingsperspectief voor de maatschappij en de kennisontwikkeling.

- Onder de noemer Benutten wordt het duurzaam gebruik van ecosystemen inhoudelijk vormgegeven.
- Onder de noemer Betalen wordt gewerkt aan het waarderen van ecosystemendiensten en het internaliseren van de kosten van het gebruik ervan.

De politieke aandacht voor het onderwerp ecosystemendiensten neemt de laatste twee jaren snel toe, onder impuls van beleidsontwikkelingen als de Europese Biodiversiteitsstrategie, de strategie Europa 2020, de herziening van het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid 2014-2020. Ook is er een groeiend aantal internationale studies, die duiden op snel groter wordende risico's van overschrijding van kritische niveaus in ecosystemekwaliteit en de repercussies voor voedselproductie, armoedebestrijding en klimaatregulering.

Op internationaal niveau (Europees en mondiaal) vindt een discussie plaats over de manier waarop ecosystemendiensten kunnen dienen als basis voor duurzaam bodemgebruik. Uit evaluaties van het Eu-biodiversiteitsbeleid is gebleken dat bescherming van de biodiversiteit door middel van Natura2000 gebieden niet voldoende is.. Daarvoor is ook het buitengebied nodig. Dit is de reden voor de keuze voor duurzaam gebruik van ecosystemendiensten/duurzaam bodemgebruik als hoofddoel voor het beleid.

Bevordering van duurzaam gebruik van ecosystemendiensten heeft daarnaast een impuls gegeven aan onderzoek naar de bruikbaarheid van (bestaand) economisch instrumentarium in de waardering (kwalitatief en kwantitatief) van ecosystemendiensten. Dit zijn de zogenaamde TEEB (The Economics of Ecosystem services and Biodiversity) studies, die thans zowel internationaal als nationaal ('TEEB.nl') worden verricht. Onderdeel van dergelijke studies is onderzoek naar de mogelijkheden en beperkingen om de waarde van ecosystemendiensten in geld uit te drukken (monetariseren).

In verband met dat laatste aspect speelt de vergroening van het Gemeenschappelijk landbouwbeleid. In 2014 gaan nieuwe uitgangspunten gelden. Het subsidiestelsel zal op een groenere leest worden geschoeid. Duurzaam bodembeheer, c.q. duurzaam gebruik van ecosystemendiensten van de bodem maakt deel uit van wat in EU-termen '*green infrastructure*' heet en wat nauw aansluit bij de zogenaamde groen-blauwe diensten uit bestaande subsidieregelingen.

Voor praktische implementatie is het dan wel nodig dat (op papier nog abstracte) ESD worden vertaald naar maatschappelijke waarden, die in geld kunnen worden uitgedrukt en zo als basis kunnen dienen waarop investeerders (beheerders, bijv. boeren en landeigenaren) kunnen worden afgerekend op de levering van ecosystemendiensten. Dat kan alleen als er een referentie (doel) en een eenvoudig instrument is om de geleverde ESD te meten. Elke boer of bedrijf moet eenvoudig (goedkoop) de benodigde informatie kunnen leveren, bijvoorbeeld vergelijkbaar met een mestboekhouding.

In de ogen van IenM zou Bobi moeten dienen als referentie-instrument voor duurzame bodemkwaliteit, mede door de grote hoeveelheid data die reeds beschikbaar zijn over bodems en bedrijven in Nederland. Ook moeten onderdelen van Bobi om te vormen, of uit te breiden zijn voor de nieuwe taak; een eenvoudig instrument om ESD te beoordelen.

Discussie

Na afloop van de presentaties komen direct verschillende ideeën over tafel.

Lijbert Brussaard wijst op een psychologisch effect, dat kleef aan de verantwoordelijkheid voor ESD. "Ecosysteemdiensten zijn van niemand, maar zijn tegelijk voor iedereen". Het gevolg is dat niemand zich verantwoordelijk voelt en de opbrengst van ESD wordt misbruikt voor individueel gewin. Dit wordt ook de *tragedy of the common* genoemd (tragedie van de meent).

Bij het optimaliseren van ESD voor het maatschappelijke belang kan worden gewerkt volgens de 4B's: Begrijpen, Beheren/beheersen, Benutten, en Beprijzen. Dit principe wordt ook in TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) uitgewerkt. TEEB komt voort uit "the G8 Potsdam initiative for biodiversity" (2007) De studie wordt gefaciliteerd door UNEP, EC en 6 westerse landen, waaronder Nederland.

Op de vraag van Niek de Wit hoe de inzichten vanuit Bobi kunnen worden toegepast in het nieuwe landbouwbeleid stelt Henk voor om eerst te kijken naar het huidige stelsel van subsidies in de landbouw. Die zijn nog steeds gericht op het optimaliseren van de productie. Productie zou één van de ecosysteemdiensten moeten zijn waarmee iets te verdienen is. Het beleid en stimuleringsmaatregelen kunnen dan worden ingezet om op meer factoren te sturen. Daarvoor moet er wel een goed begrip zijn van het agrarische systeem en de ecosysteemdiensten die er door kunnen worden geleverd. Herverdeling kan ten koste gaan van de productie. Een Goede Landbouw Praktijk kan als referentie dienen voor het belonings/kosten-model. Wanneer daar bovenuit wordt gekomen gaat het extra inkomsten opleveren.

Lijbert Brussaard: houd wel in de gaten dat publieke goederen (ESD) ook hier weer een private waarde krijgen voor de boer en dat dus misbruik op de loer ligt. Een verlaging van de productie hoeft in Nederland geen probleem te zijn. De voedselproductie is voldoende en een afname van de inkomsten kan uit andere ESD worden gecompenseerd. Als de beheersinspanningen in milieuhygiënische zin goed geprijsd worden, dan zouden de productieverliezen zelfs marginaal kunnen zijn, of misschien wel negatief kunnen uitvallen. Een groene infrastructuur bevordert de ESD. Daarom is er ook meer inzicht nodig in de ruimtelijke verdeling van biodiversiteit die aan de ESD ten grondslag ligt. Dit is een onderwerp dat terug zou moeten komen in de ESD-kennisagenda. Begrippen als duurzaamheid zijn aan erosie onderhevig. Door het bedrijfsleven wordt biodiversiteit vaak als synoniem gebruikt voor duurzaamheid. Het zelfde geldt voor ESD. Het is dus van belang helder te definiëren wat er met ESD van de bodem wordt bedoeld.

Henk Siepel: hoe komen we nu naar een meetnet voor ESD? Als je in detail begint loopt het waarschijnlijk vast. Zijn voorstel is: kijk eerst wat er nu haalbaar is, pas dat toe, en ga daarna stapsgewijs verfijnen. Stel dat je begint op nationale schaal, welke ESD-bodem spelen dan een rol? Je zou dan kunnen denken aan het behoud- en vastleggen van organische stof in de bodem. Dit kan worden doorvertaald naar CO₂-opslag/emissie. Daarvoor is een prijs per hectare vast te stellen. Dit gebeurt in feite al voor de verplichtingen die voort komen uit het klimaatverdrag. De benadering is nu nog modelmatig en gebaseerd op grootschalige indicatoren. Hoe zit het bijvoorbeeld precies met de afname van het veenpakket? Welke maatregelen zijn het meest effectief, de aanleg van houtwallen of verhoging van het OS-gehalte in de bodem?

Je zou door deze bril opnieuw naar de Bobi-database moeten kijken: is er een begin te maken met grootschalige ESD?

Lijbert Brussaard: in de praktijk liggen de zaken vaak wat meer gecompliceerd. Nederland lijkt een uitzondering wat betreft de vastlegging van OS. Deze is

namelijk afhankelijk van het soort teelt. Wanneer je dit wilt koppelen aan ESD heb je dus tegelijk te maken met synergie en trade-off.

Niek de Wit: Het systeem van landbouwsubsidies op de prijzen van producten wordt afgeschaft. Daarvoor in de plaats voert de EU het principe van 'cross compliance' in. Dit houdt in dat boeren zich aan de regelgeving moeten houden (inclusief milieuwetgeving), en dat subsidie (Single Payment Scheme) kan worden gegeven voor alle activiteiten in het bedrijfssysteem. Cross compliance werkt nog niet overal binnen de EU, maar is wel sterk in ontwikkeling.

Lijbert Brussaard: voor verdere uitwerking en nieuwe indicatoren zou een soort van 'toepassingsagenda' moeten worden opgesteld. Er zijn zo al een aantal onderwerpen te noemen die potentieel bruikbaar zouden kunnen zijn zoals: de N/P-ratio (zie publicaties C. Mulder); welke ecosysteemdiensten kunnen we alleen verklaren en kwantificeren uit kennis over biodiversiteit (zie publicatie Sandra Diaz, 2007); onderdelen uit het project ECOFinders, analyse van aanwezige traits en verbindingen tussen traits onder/bovengronds. Verder kan worden gedacht aan karakteristieke genen voor nitrificatie en denitrificatie. Ook specifieke genen voor het verteren van chitine kunnen worden gemeten. (NB literatuur: Diaz et al. 2007. PNAS 104:20684; Mulder en Elser 2009)

Henk Siepel: Een belangrijk aspect voor de prestatie van ESD, is de geschiedenis of het voormalige gebruik van de bodem. Dit zou onderdeel moeten zijn van de locatiebeschrijving in een meetnet, of van de vragenlijst die door een beheerder wordt ingevuld. De 'habitat-responsrelatie' is nu alleen gericht op productiefuncties. Deze zijn uit de landbouwkunde bekend.

Deze verbanden zouden ook voor andere ESD moeten worden vastgesteld, bijvoorbeeld door experimenteel onderzoek of analyse van geschikte databases.

Matty Berg: Voortbouwend op de bestaande Bobi-dataset zou een volgende stap kunnen zijn, het omzetten van diversiteitsgegevens naar trait-waardes. Deze benadering is inmiddels redelijk ver ontwikkeld. Dit zouden nieuwe indicatoren kunnen worden voor ESD.

Ton Breure: Wat het afrekenen op de levering van ESD betreft, is het de vraag hoe gedifferentieerd dat moet zijn om in de praktijk te kunnen worden toegepast. Dat heeft bijvoorbeeld consequenties voor de schaal waarop een meetnet wordt ingericht en de gehanteerde monsterelementen.

Niek: Beide benaderingen zijn nodig: van grof (nationaal) naar kleinschalig, en van correlatief tot mechanistisch, om de verschillende ESD te kunnen waarderen.

Henk Siepel: De tussenstappen zijn nu nog niet te maken of vooraf te bedenken. Laten we beginnen met de ESD waar wel iets over te zeggen is.

Ton B: voor de ruimtelijke aspecten zijn we afhankelijk van de mogelijkheden die geografische informatiesystemen kunnen leveren.

Henk Siepel: Zijn DNA-technieken al zo ver dat ze in een meetnet kunnen worden gebruikt?

Matty Berg: Dat is voor de meeste groepen nog niet het geval.

Lijbert Brussaard: Het is niet altijd nodig om het hele soortenscala op basis van DNA te analyseren. Het kan ook zijn dat genen of genexpressie alleen (wel/niet aanwezig) al voldoende is.

Niek de Wit: Het vaststellen van de soortenrijkdom op een gestandaardiseerde manier blijft lastig. Je zou zelfs kunnen zeggen dat het halen van de biodiversiteitsdoelstellingen van 2010 een kwestie van goed monitoren is. Met andere woorden, technische en methodische aspecten kunnen van grote invloed zijn op de uitkomst van een onderzoek.

Henk Siepel: met het gebruik van nematoden als indicator-organismen is men nog steeds het meest gevorderd. De barcoding techniek kan worden gebruikt om soorten te meten. Hier zijn traits uit af te leiden. Kwantitatieve bepaling, dus de schatting van het aantal dieren, is nog lastig, maar ook dat is in ontwikkeling.

Nematoden en bacteriën hebben dan een streepje voor, omdat de hoeveelheid DNA per individu constant is. Bepaalde soorten, zoals quarantaine-organismen (aaltjes) kunnen gevoelig worden opgespoord. Deze ontwikkeling is inmiddels een flink aantal jaren aan de gang. Het gaat echter minder snel dan aanvankelijk was voorgespiegeld.

Lijbert Brussaard: Wanneer we het hebben over een ecosysteemproces, dan ligt daar meestal een combinatie van traits onder, door verschillende trofische niveaus heen. Dat meet je dus nog niet zo makkelijk met DNA-technieken. Gezien de mogelijke interacties tussen processen is het de vraag hoe dit doorwerkt in ESD. Er is gericht fundamenteel onderzoek nodig om hier meer inzicht in te krijgen.

Ton Breure: Desondanks is het mogelijk om een beschrijving van een ecosysteem te geven, al is het maar een analyse van de structuur en voorkomende soorten.

Matty Berg: Uit experimenten met kunstmatige (eco)systemen blijkt dat er meestal redundantie is als de soorten-combinaties door de onderzoekers worden gekozen. Dit leidt altijd weer tot discussies over het nut van behoud van biodiversiteit. Waar het in dit verband uiteindelijk om gaat is de 'functionele dissimilariteit'. Deze bepaalt de gevoeligheid voor veranderingen. Het trait-concept kan verder worden gedifferentieerd in respons-traits en effect-traits. Het zou waardevol zijn om de Bobi-database op deze manier te analyseren.

Ton Breure: wat nog niet aan bod is gekomen, zijn de (on)mogelijkheden van remote sensing. Biedt dat uitkomst voor het meten en beoordelen van ESD? Bij de aanwezigen zijn geen voorbeelden bekend, dit zou nader moeten worden onderzocht.

De toekomst van het Bobi-project

Henk Siepel: Het werk aan Bobi moet worden gecontinueerd. Met de huidige resultaten kunnen we een aantal vragen beantwoorden. Op basis van de ervaringen in de afgelopen 10 jaar kan een aantal indicatoren worden geoptimaliseerd, en mogelijk een aantal nieuwe metingen worden toegevoegd. Daarnaast moet een begin worden gemaakt met het ESD-spoor. In eerste instantie nog grof en grootschalig. Hieruit komen vanzelf ideeën voort. Bovendien worden in de loop van de tijd nieuwe technieken ontwikkeld. Deze gaan ook nieuwe mogelijkheden opleveren. Dus, de vraag over het kwantificeren van ESD-bodem is zeer relevant. Momenteel is dit vooral een ordenend concept. Er zijn mogelijkheden om hier mee aan de slag te gaan. Doe dat als het ware van bovenaf en in kleine stapjes.

Lijbert Brussaard: Het speelveld van ESD-bodem is tamelijk onoverzichtelijk. Het is nodig om eerst te beschrijven wat we wel- en niet weten. Welke kennis is nodig om de vragen te kunnen beantwoorden of om cross-compliance in de landbouwpraktijk in te voeren op basis van ESD. Dit vraagt om een analyse, die uitmondt in een toepassingsagenda. Deze geeft dan ook de noodzaak aan van een goede kennisagenda.

Ton Breure: Op den duur zouden 'stakeholders' niet alleen moeten kunnen profiteren van de opbrengst van ESD, maar ook de bijkomende kosten hiervan dragen. In plaats dat een meetnet door de overheid wordt betaald, zouden 'stakeholders' zelf voor de aanlevering van kengetallen en indicatorwaarden moeten zorgen.

Lijbert Brussaard: Hierbij gaan we er wel van uit dat een bedrijf een goede eenheid is voor de eenheid van ESD. Gezien het integrale karakter en de verschillende schaalniveaus, kan blijken dat optimalisaties van ESD juist op gebieds- of streekniveau nodig is.

Ton Breure: De meningen en discussie samenvattend, kunnen we concluderen dat voortzetting van het Bobi-project een zinvolle investering wordt gevonden.

Een aantal meetmethoden kan worden vernieuwd. Er zijn mogelijkheden om het meetprogramma uit te breiden naar ESD. Hiervoor is geen kant-en-klaar recept te geven. Er is een logisch stappenplan (agenda) nodig. Daarnaast zijn er een aantal nieuwe (AIO)projecten waar mee kan worden samengewerkt om de implementatie van nieuwe methoden te versnellen.

Bijlage 3. Verslag van de workshop op 14 december 2011

Workshop Bobi-ESD 2: naar een indicatorsysteem voor biodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem

Datum: 14 december 2011

Plaats: NIOO Wageningen (14.00 - 16.00 uur)

Deelnemers: Wim van der Putten, Marthijn Sonneveld†, Oene Oenema, Michiel Rutgers, Ton Schouten

(Marthijn Sonneveld is overleden op 28 december 2013)

Opening

Niek de Wit moest helaas op het laatste moment afzeggen. Peter Kuikman zou aanvankelijk aanwezig zijn voor Oene Oenema, door ziekte werd dit toch weer omgedraaid.

Deze bijeenkomst was een vervolg op de workshop van 7 september 2011. Het doel was dezelfde vraagstelling in een bredere kring van deskundigen te bespreken. Het verslag van 7 september en de notitie over achtergronden en doel van Bobi-ESD, zijn vooraf rondgestuurd. Er is een lagere prioriteit gegeven aan de evaluatie van de huidige indicatorset in Bobi. Het accent is gelegd bij het bespreken van ecosysteemdiensten van de bodem en de mogelijkheden om dit meetbaar te maken.

De vragen waar een antwoord op wordt gezocht zijn:

1. Is Bobi nog state-of-the-art voor monitoring van de bodembiodiversiteit en 'LSF' of zijn aanpassingen dringend nodig?
2. Zijn genomic-technieken rijp voor toepassing in een monitoring? Welke wel, welke niet?
3. Zijn de ESD's van de bodem meetbaar. Zo ja hoe?
4. Wat is de minimum set aan indicatoren voor ESD van de bodem (balans indicatorset, abiotiek-biotiek)?
5. Is het Bobi-metnet om te vormen tot een meetnet voor ESD?

Inleiding

Er is voor gekozen om de het Bobi-project (geschiedenis, omvang, invulling) en de daaruit voortgekomen Referenties Biologische Bodemkwaliteit (RBB) nog een keer te presenteren. Vanuit, of tegen deze achtergrond wordt gezocht naar mogelijkheden om ecosysteemdiensten in het meetprogramma op te nemen. Het Bobi-project is voortgekomen uit het Strategisch Plan van Aanpak Biodiversiteit (SPA), dat rond 1995 door de overheid werd vastgesteld. In het SPA werd gevraagd kwaliteitsdoelstellingen te ontwikkelen voor "biodiversiteit buiten de beschermde gebieden, met aandacht voor cryptobiota en het belang voor life support functies". In feite was er veel overeenkomst met de huidige vraag naar beoordeling van ecosysteemdiensten van de bodem. Destijds zijn abstracte LSF stapsgewijs ontrafeld tot meetbare biologische indicatoren. Dit is bovendien gedaan in de structuur van het bodem-voedselwebmodel, waarmee biodiversiteit (en biomassa) te vertalen is naar snelheid van koolstof- en stikstofomzettingen (processen/functies). Uiteindelijk moesten er keuzes worden gemaakt op basis van praktische- en financiële randvoorwaarden. Het indicatorsysteem maakt nu een (onvolledige) dwarsdoorsnede door het bodemvoedselweb. De modelmatige uitwerking van de metingen naar processen of functies kon niet worden

gerealiseerd. Daar is in latere fase invulling aan gegeven door de allometrische voedselweb-analyse (zie werk van Christian Mulder).

Sinds 1999 zijn twee meetrondes van vijf jaar uitgevoerd in het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB). De 200 LMB-locaties zijn aangevuld met metingen op biologische bedrijven, en extra categorieën natuur in twee tussenjaren (2004, 2005). Het meetprogramma (1999 t/m 2011) heeft een unieke inventarisatie van de biodiversiteit en biologische kenmerken van de Nederlandse bodem opgeleverd. De meetgegevens zijn opgeslagen in een database en tot een groot aantal publicaties verwerkt.

De Referenties Biologische Bodemkwaliteit (RBB) zijn een spin-off van deze kennisbasis. Het was een uitwerking van Bobi-metingen in ecosysteemdiensten, naar aanleiding van het TCB-rapport: "Duurzamer bodemgebruik op ecologische grondslag" (2003). Het RBB-project heeft geleid tot een drietal pilots waarin de methodiek is toegepast op praktijksituaties. Als voorbeeld wordt het resultaat van het onderzoek in de Hoeksche Waard getoond.

Vanaf 2002 is er deelgenomen in verschillende veldproeven, om een beter zicht te krijgen op het effect van grondgebruik c.q. landbouwpraktijken. Het accent heeft hierbij gelegen op bemesting (mineraal, organisch, compost), ploegen en vruchtwisseling.

De TCB heeft in het advies van 2003 al een aantal ontbrekende parameters in het Bobi-programma geïdentificeerd. Deze zijn voor een deel ingevuld. Daarnaast zijn er een aantal groepen of indicatoren te noemen die niet konden worden gemeten, of ten onrechte niet aan bod zijn gekomen. Voorbeelden zijn, protozoa (eencelligen), soortensamenstelling bodemschimmels, bodeminsecten, fysische bodemeigenschappen, plantproductie, bedrijfsgegevens.

Het denken in termen van 'ecosystem services' heeft definitief zijn intrede gedaan met het uitkomen van de Millennium Ecosystem Assessment in 2005. In feite is het een hernieuwde uitwerking van de begrippen 'life support functions' en 'functional biodiversity' die sinds de Convention on Biological Diversity (Rio de Janeiro, 1992) worden gebruikt. In Nederland is het bovengenoemde TCB-advies uit 2003 een belangrijke mijlpaal. Het aantal publicaties over 'ecosystem services' is de laatste jaren explosief gegroeid. Echter, een relatief klein percentage gaat over 'soil ecosystem services' (<5%). Een vergelijkbare verhouding treft men aan bij 'Biodiversity' en 'Soil biodiversity'. De beschrijving van ESD-bodem blijft meestal kwalitatief, grootschalig of beperkt tot diagrammen van processen die elkaar beïnvloeden. Er zijn tot nu toe geen voorbeelden gevonden van een set indicatoren of meetnet, die een brede range ecosysteemdiensten beslaan en die een kwantitatieve invulling hebben gekregen.

Opmerkingen/vragen naar aanleiding van de presentatie

- In het ministerie van IenM komen de beleidsvelden bodem en oppervlakte water bij elkaar. Leidt dit er toe dat ESD, die vaak compartiment overstijgend zijn, breder worden ingevuld? Volgens Michiel is de benadering voorlopig vanuit Bodem.
- Wim van der Putten stelt voor om het tweede spoor (stakeholders, draagvlak) vorm te geven, of te laten leiden door de 'top 100 vragen'. Er zijn voorbeelden van een dergelijke werkwijze, o.a. in een publicatie van Sutherland et al. (2006). De werkwijze is dus omgekeerd: niet vanuit de wetenschap afleiden welke ecosysteemdiensten belangrijk zijn (moeten

worden gevonden), maar vanuit de gebruikers kijken welke diensten worden gevraagd.

- Je kan drie groepen gebruikers van ESD onderscheiden: landbouw, natuur, stedelijk. Daar zou je met de uitwerking naar kunnen differentiëren.
- Het voorbeeld van de RBB-pilot Hoeksche Waard laat zien dat er een addertje onder het gras zit bij de ESD - ziekte en plaagwering. Door niet de ziektewering zelf te meten, maar de dichtheid van een aantal schadelijke soorten, kan hier ook het effect van bestrijdingsmiddelen in zitten. Je moet oppassen voor een cirkelredenering.
- Waarom is de RBB-methodiek niet voldoende om een indicatie van ESD te geven? De systematiek maakt gebruik van stakeholders, is transparant, geeft een beoordeling van ESD (in amoëbe-vorm). Dat is al een fraai resultaat.
- ESD hangen veelal samen. Als je de ene (bijv. productie) wilt maximaliseren, dan gaat dat ten koste van andere diensten of eigenschappen (bijvoorbeeld organische stof). Er is dus sprake van 'trade-off'. Die is lastig te kwantificeren, tenzij de verbanden in een ESD-webmodel te vatten zijn.
- Een ander aspect van 'trade-off', is de vraag hoe ver je kunt gaan met het gebruik van een dienst of het uitputten van een andere dienst, voordat het systeem instort.

Discussie naar aanleiding van de 5 vragen

Ad 1+2. Is Bobi nog up-to-date en zijn genomics-technieken toepasbaar?

Wim van der Putten: de meeste omissies zijn al door jullie zelf genoemd, daar is niet zoveel meer aan toe te voegen. Je moet niet te veel veranderen aan een indicatorset, dit is de basis. Uitbreiding is mogelijk als daar vraag of aanleiding toe is. Een meetreeks wordt waardevoller naarmate je langer resultaten hebt kunnen verzamelen over dezelfde indicatoren.

Er is een snelle ontwikkeling in toepassing van DNA-technieken. Dit is veelal een verlenging van de taxonomie (benoemen van soorten). Het is de vraag of dat nieuwe mogelijkheden biedt voor beoordeling van ESD. Het bepalen van z.g. 'functionele genen' zou een bruikbare ontwikkeling kunnen zijn.

Genomics technieken komen geleidelijk beschikbaar. Als de prijs/kwaliteit of prijs/bruikbaarheid op een geschikt niveau is beland, dan kunnen dit type analyses zeker in een meetprogramma worden opgenomen.

Oene Oenema: Uit onderzoek op de vakgroep is gebleken dat boeren veel waarde hechten aan: P-voorziening, bodemkwaliteit, en bodemleven. Met name de laatste twee zijn kwalitatieve of intuïtieve waarden, ze zijn niet gedefinieerd. Kan je hier nu invulling aan geven vanuit het meetnet? De analyse beschikbare P en het bijbehorende bemestingsadvies blijkt meer ruis te vertonen dan men zou verwachten.

Het Blgg is een waardevolle partner om impact naar de praktijk te genereren. Dit vanwege de historische banden en verwevenheid met de agrarische sector. Voortzetting van lange meetseries is heel belangrijk, omdat er nog nauwelijks tijdreeksen zijn of de waarde ervan niet wordt begrepen.

Voor de interpretatie en het begrip van de metingen is het eigenlijk nodig een continue reeks van bedrijfsgegevens te hebben. Een 'waarde' (karakterisering) eens in de 5 of 6 jaar zegt te weinig omdat de voorhistorie van grondgebruik en -bewerking er in door klinkt.

Wim van der Putten: Geeft het huidige meetnet de variatie weer die van nature voorkomt? Met andere woorden is de steekproef voldoende representatief? In dat geval kan het als referentie of als ijkpunt worden gezien. De experimentele component ontbreekt aan het meetprogramma, zet die er bij op.

Een biologisch meetnet 'doe je eigenlijk voor het nageslacht'. Die ervaring is opgedaan met andere langjarige meetreeksen. Ze geven nu een historische referentie, en tonen bijvoorbeeld trends in effecten van klimaatverandering.

Marthijn Sonneveld: Is het Bobi-meetnet niet te verankeren door aansluiting te zoeken bij de Showcases van SKB?

Wim van der Putten: Bobi en ESD zijn zo breed dat het als een integraal programma bij STW zou kunnen worden aangeboden. Op die manier zou een belangrijke stap voorwaarts kunnen worden gemaakt.

Ad 3+4. Zijn ESD van de bodem meetbaar, en welke zou men dan moeten meten?

Oene Oenema: Algemeen gesproken wordt waarde gehecht aan: schone lucht, schoon water, water-retentie, voedselproductie, en ziektevering. Processen hangen met elkaar samen, en het is niet haalbaar om alle ESD tegelijk te beoordelen. Eigenlijk zou het beleid aan moeten geven bij welke ESD de prioriteit moet worden gelegd.

Daarnaast zijn er tegenstrijdige belangen. Vanuit het oogpunt van klimaatregulatie is het wenselijk om zoveel mogelijk organische stof in de bodem op te slaan. Duurzaam gebruik van de bodem vraagt echter ook een intensievere benutting van natuurlijke decompositie- en mineralisatieprocessen. Hiervoor is afbraak van organische stof nodig om opgeslagen nutriënten vrij te maken voor plantengroei. Beide diensten zijn dus niet op hetzelfde moment te optimaliseren.

Marthijn Sonneveld: Om de ESD-bodem te kunnen operationaliseren, is het van belang om te kijken naar het schaalniveau. In dit geval: wat is relevant op de schaal van het (Bobi)meetnet?

Het is mogelijk om iets te zeggen over productie, omdat op bedrijfsniveau wordt gewerkt. De lokale bodem is wel een onderdeelje van de functie klimaatregulatie, maar het bodemmeetnet kan de (mondiale) dienst of nationale CO₂-balans niet invullen.

Wim van der Putten: De lijst van ESD-bodem parameters, die overgenomen is uit de World Research Institute publicatie, is een goede stap in de richting van concretisering. Eigenlijk zou dit verder moeten worden teruggebracht tot een aantal simpele indicatoren.

Oene Oenema: Een vertrekpunt voor een selectie van ESD-bodem indicatoren zou kunnen zijn:

1. organische stof gedifferentieerd naar een labiele en recalcitrante fractie,
2. waterinfiltratie-capaciteit,
3. verdichting van de grond, mede in relatie tot oppervlakkige afstroming,
4. vorming van aggregaten (bodemstructuurvorming), en
5. diepte van beworteling.

Afsluiting

De beschikbare tijd was tekort om de ESD-bodem lijst helemaal te bespreken en door te vertalen naar parameters of indicatoren die in een meetnet te analyseren zijn. Het overzicht over het hele Bobi-meetprogramma van de afgelopen 10 jaar werd waardevol gevonden, evenals de discussie over ecosysteemdiensten. Er zijn verschillende suggesties gedaan die kunnen helpen bij het vinden van een geschikte vorm voor een nieuw Bobi-ESD programma.

Bijlage 4. Indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten

Deze bijlage bevat een lijst met geaggregeerde indicatoren voor de meting van de bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem. Deze indicatoren zijn door professionals beoordeeld op relatieve geschiktheid voor kwantificering van de bodembiodiversiteit of ecosysteemdiensten. Daarnaast is gevraagd de relatieve geschiktheid te scoren aan de hand van een set aanvullende criteria, zoals de kosten en de gevoeligheid. Vanwege de aanvullende criteria werd een aantal indicatoren op voorhand niet opgenomen. Ook dient de indicator toepasbaar te zijn in een landsdekkend bodemmeetnet.

De lijst is samengesteld uit bestaande indicatoren. De lijst diende bondig te zijn om de MCA in een beperkte tijd te kunnen uitvoeren. Indicatoren die aangrijpen aan één eindpunt of die binnen een samenhangend meetprotocol geanalyseerd worden, werden geaggregeerd tot één indicator. Een voorbeeld hiervan zijn de nematoden. De aantallen, biomassa, de soortensamenstelling en het voorkomen van specifieke nematodensoorten zijn geaggregeerd tot één indicator. Er zijn verschillende methoden beschikbaar, namelijk klassieke tellingen en taxonomische identificatie met behulp van de microscoop, en twee op DNA-analyse gebaseerde technieken. Ook voor de bepaling van de bacteriebiomassa in de bodem zijn verschillende methoden beschikbaar, die geaggregeerd zijn tot één indicator. Samengestelde of berekende indicatoren zijn niet opgenomen, bijvoorbeeld de verhouding tussen de bacterie- en schimmelbiomassa. In onderstaande lijst is de indicator kort omschreven. Meer informatie over de indicatoren is in Bijlage 5 te vinden.

Er is een onderverdeling gemaakt in drie typen indicatoren, namelijk biologische bodemindicatoren, abiotische bodemindicatoren, en overige indicatoren, inclusief systeemindicatoren. Dit komt voort uit de notie dat bodemkwaliteit (cf. ecosysteemdiensten) beoordeeld dient te worden aan de hand van de verschillende kenmerken van de bodem (chemisch, fysisch en biologisch: Beleidsbrief Bodem; VROM 2003) en dat de beoordeling van indicatoren gekleurd kan zijn door het dominante werkveld van de betrokken deskundigen. Het is bijvoorbeeld niet ondenkbaar dat bodemecologen de biologische bodemindicatoren meer geschikt achten dan de abiotische bodemindicatoren of de systeemindicatoren. Dit wordt snel duidelijk door de indicatoren per werkveld in aparte groepen onder te verdelen.

Biologische bodemindicatoren

1. omvang bacteriegemeenschap (aantal en/of biomassa, SIR, FE);
2. groeisnelheid en activiteit bacteriën (DNA- en eiwitsynthese);
3. potentiële C-mineralisatie, basale respiratie;
4. potentiële N-mineralisatie en/of anaerobe N-mineralisatie;
5. structurele diversiteit bacteriën/schimmels/archaea (DGGE, T-RFLP, PLFA);
6. fysiologische diversiteit bacteriën (CLPP: Biolog, Microresp);
7. omvang schimmelgemeenschap (biomassa) en fractie actieve schimmels;
8. mycorrhizaschimmels;
9. enzymactiviteiten (dehydrogenase, fosfatase, cellulase, urease, amylase, et cetera);
10. litterbag, bait lamina;
11. protozoën (aantal en taxa);

12. nematoden (aantal en taxa, plantparasieten);
13. potwormen (aantal en taxa);
14. regenwormen (aantal en taxa);
15. microarthropoden (aantal en taxa);
16. isopoden, kevers, spinnen, mieren, slakken, veelpotigen (aantal en taxa);
17. doorworteling, wortelbiomassa.

Abiotische bodemindicatoren

1. textuur: klei, silt, zand;
2. structuur: aggregaten, vorm en stabiliteit;
3. bulkdichtheid en porievolume;
4. % leefruimte (water+lucht);
5. Indringweerstand;
6. waterdoorlatendheid (infiltratiesnelheid);
7. vochtgehalte en vochtleverend vermogen;
8. zuurgraad (pH_x);
9. CEC;
10. gehalte organische stof;
11. fracties organische stof (stabiel, labiel);
12. humuszuren organische stof;
13. C/N-ratio organische stof;
14. totaal N;
15. totaal P, water oplosbaar P (P_w) en/of extraheerbaar P (PAI);
16. overige nutriënten en zware metalen (Ca, Mg, K, S, Fe, Mn, Al, Zn, Cu, etc.);
17. bestrijdingsmiddelen en overige organische verontreinigingen.

Systeemindicatoren en andere indicatoren voor de bodem

1. bodemgebruik, ecotoop, natuurdoeltype;
2. historisch bodemgebruik;
3. grondwaterstand en peilbeheer, kwel en inzijging;
4. primaire productie, gewasopbrengsten, lot van gewasresten;
5. veebezetting, dichtheid en soort;
6. beweiding en bijvoeding vee, inclusief krachtvoer;
7. aanvoer van nutriënten (N, P, K) en OS, mestaan- en -afvoer (hoeveelheid en soort; kunstmest, organische mest) en wijze van toediening;
8. frequentie en wijze van bodembewerking;
9. frequentie en wijze van bodemberijding, vertrappeling, maaifrequentie;
10. toepassing van bestrijdingsmiddelen en grondontsmetting;
11. rotatie en vruchtwisseling, frequentie graslandvernieuwing;
12. diversiteit planten, vegetatieopname, bos;
13. percentage gras van het totaal, in relatie tot mais en bouwland;
14. percentage braak op het totaal van het productieareaal;
15. percentage niet-productieve landschapselementen ten opzichte van het productieareaal;
16. leaf area-index;
17. GHG-productie (methaan, kooldioxide, lachgas);
18. waterbergend vermogen;
19. aantal toeristen, recreanten, personen die leven van landbouw en natuur;
20. temperatuur, bodemtemperatuur, evaporatie, neerslag.

N.B. 1 Sommige zaken zijn ogenschijnlijk verschillend (bijvoorbeeld 11 graslandvernieuwing en rotatie) maar toch onder één noemer gezet, omdat ze een vergelijkbaar aspect betreffen bij verschillende systemen en dus effectief samengenomen kunnen worden.

N.B. 2 De lijst met systeemindicatoren bevat enkele landschapsaspecten naast vele bodemgeoriënteerde elementen.

Bijlage 5. Gedeaggregeerde indicatoren in de derde stap van de multicriteria-analyse

Lijst met alle indicatoren (gedeaggregeerd):

A Fauna

1. *Loopkevers, insecten (mieren etc.), miljoenpoten, duizendpoten, spinnen, pissebedden (abundantie en taxonomische identificatie).*
Deze worden vaak met behulp van een vangbeker met fixatievloeistof verzameld en in het laboratorium geanalyseerd. Voor het verzamelen van de organismen dient de monsterlocatie twee keer bezocht te worden (inzetten en oogsten).
2. *Regenwormen (abundantie en taxonomische identificatie).*
Dit is een indicator die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009)
3. *Potwormen (abundantie en taxonomische identificatie).*
Dit is een indicator die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009)
4. *Mijten (abundantie en taxonomische identificatie).*
Dit is een deel van een indicator 'mijten en springstaarten' die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009)
5. *Springstaarten (abundantie en taxonomische identificatie).*
Dit is een deel van een indicator 'mijten en springstaarten' die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009)
6. *Nematoden (abundantie en taxonomische identificatie).*
Dit is een indicator die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009)
7. *Nematoden (TRFLP: Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism).*
Dit is een moleculair-biologische techniek (DNA-techniek) om profielen te maken van het DNA van leefgemeenschappen, in dit geval de nematoden (Donn et al. 2012).
8. *Nematoden (DNA-barcoding).*
Dit is een moleculair-biologische techniek (DNA-techniek) om gemeenschappen te karakteriseren op basis van bekende SSU-rDNA-sequenties (Vervoort et al. 2012).

B Micro-organismen

9. *Bacteriën (abundantie en biomassa).*
Dit is een indicator die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009). Een autosampler transporteert preparaten van bodem met bacteriën en schimmels naar een microscoop die met een beeldanalysesysteem automatisch worden geanalyseerd.
10. *Bacteriën en schimmels (FE: biomassabepaling via fumigatie en extractie).*
Een wijdverbreide techniek om de microbiële biomassa (indirect) te bepalen via fumigatie (behandeling met chloroform doodt alle organismen) en extractie van koolstof als maat voor de microbiële biomassa (bacteriën en schimmels).
11. *Bacteriënactiviteit (thymidine- en leucine-assimilatiesnelheid).*
Dit is een indicator die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009).
12. *Bacteriën (biomassa SIR, Substrate-Induced Respiration).*
Dit is een wijdverbreide techniek om microbiële biomassa te bepalen door

een grondmonster een puls met glucose te geven en vervolgens de CO₂-uitstoot te meten. De veronderstelling is dat de CO₂-uitstoot gerelateerd is aan microbiële biomassa.

13. *Bacteriën (pyrosequencing)*.
Dit is een molecuair-biologische techniek om DNA-moleculen te sequencen. De techniek wordt toegepast om profielen te maken van microbiële gemeenschappen (Liu et al. 2007).
14. *Bacteriën (microarrays)*.
Dit is een molecuair-biologische barcoding techniek waarmee op basis van bekende DNA-sequenties een gemeenschap van bacteriën en schimmels gekarakteriseerd kan worden (Kuramae et al. 2012).
15. *Bacteriën en schimmels (TRFLP: Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism)*.
Dit is een molecuair-biologische techniek (DNA-techniek) om profielen te maken van het DNA van leefgemeenschappen, in dit geval bacteriën en schimmels.
16. *Bacteriën en schimmels (DGGE: Denaturing Gradient Gel Electrophoresis)*.
Dit is een molecuair-biologische techniek (DNA-techniek) om profielen te maken van het DNA van leefgemeenschappen, in dit geval bacteriën en schimmels (Winding et al. 2005, Smit et al. 1999). DGGE is toegepast gedurende één meetronde met Bobi (Rutgers et al. 2009).
17. *Bacteriën (PLFA: Phospholipid Fatty Acid profiling)*.
Dit is een techniek om op basis van vetzuren in de celwanden van bacteriën en schimmels profielen te maken die specifiek zijn voor de levensgemeenschap (Winding et al. 2005). Net als de DNA-technieken 5 tot en met 9 leveren PLFA's inzicht in de structuur van de microbiële gemeenschap, vergelijkbaar met de soortensamenstelling van de bodemfauna.
18. *Bacteriën (MicroResp)*.
MicroResp is een multiwell-systeem voor SIR (zie 12), waarbij maximaal 96 verschillende substraten tegelijk worden toegepast om de respiratie te meten. Op deze wijze worden fysiologische (metabole) profielen van de microbiële gemeenschap gemaakt (Chapman et al. 2007), zogenoemde CLPP (community level physiological profile).
19. *Bacteriën (Biolog)*.
Biolog is een multiwell-systeem waarbij maximaal 95 verschillende substraten tegelijk kunnen worden aangeboden om de bacteriële groei te induceren. Op deze wijze kunnen er fysiologische (metabole) profielen van de microbiële gemeenschap gemaakt worden (Winding et al. 2005), zogenoemde CLPP (community level physiological profile). Biolog is een indicator die in het Bobi-project wordt gebruikt (Rutgers et al. 2009), waarbij platen met 32 verschillende substraten worden gebruikt. De profielen van deze en de vorige indicator (18) zijn onvergelijkbaar met de meeste op DNA-gebaseerde analyses en de analyses van de soortensamenstelling van bodemfauna.
20. *Functionele genen (Amo, Nif, Nos, et cetera)*.
Met behulp van DNA-technieken kunnen de genen die coderen voor functionele enzymen gedetecteerd worden, bijvoorbeeld via microarrays (Xue et al. 2013).
21. *Pyrosequencing zie 13*.
In de MCA is deze indicator per abuis twee keer opgenomen en gescoord. Dit heeft geen effect op de resultaten van de MCA.
22. *Schimmelbiomassa en fractie actieve schimmeldraden*.
Dit is een indicator die in het Bobi-project wordt gebruikt (Bloem et al. 2006, Rutgers et al. 2009). Een autosampler transporteert preparaten van bodem

met bacteriën en schimmels naar een microscoop die met een beeldanalysesysteem automatisch worden geanalyseerd.

23. *Schimmels (soortensamenstelling).*
Het betreft een identificatie aan de hand van de morfologie van mycelia en de vruchtlichamen (paddenstoelen).
24. *Schimmels (TRFLP, DGGE).*
Zie 15 en 16.
25. *Schimmels (Mycorrhiza, abundantie, en eventueel taxonomische identificatie).*
26. *Schimmels (Fungilog).*
Biolog heeft naast een systeem voor bacteriën ook een multiwell-systeem ontwikkeld om fysiologische profielen van de schimmelgemeenschap te maken, zogenoemde CLPP (community level physiological profile). Door de veelvuldige groei mycelia vertoont de kleurmeting in de putjes meer variatie dan bij de bacterieplaten (Sobek en Zak 2003).
27. *Protozoën (abundantie via most probable number).*
Protozoën worden geteld via een Most Probable Number-methode na groei in een medium met bacteriën als voedselbron (Darbyshire et al. 1974).
28. *Protozoën (abundantie en taxonomische identificatie).*
29. *Protozoën (DNA-technieken; TRFLP etc.).*

C Functionele biologische bodemindicatoren

30. *Respiratie (basale respiratie; CO₂-productie).*
Meting van de CO₂-productiesnelheid onder geconditioneerde omstandigheden (temperatuur en vochtgehalte) zonder toevoegingen aan het grondmonster is een indicator die bij Bobi wordt toegepast (Bloem et al. 2006, Rutgers et al. 2009).
31. *Respiratie (basale respiratie; O₂-consumptie).*
Meting van de O₂-consumptiesnelheid onder geconditioneerde omstandigheden (temperatuur en vochtgehalte) zonder toevoegingen aan het grondmonster is een indicator die bij Bobi wordt toegepast (Bloem et al. 2006, Rutgers et al. 2009).
32. *N-functies (stikstofmineralisatie).*
De toename van minerale stikstof (nitraat, ammonia) onder geconditioneerde omstandigheden (temperatuur en vochtgehalte) zonder toevoeging aan het grondmonster is een indicator die bij Bobi wordt toegepast (Bloem et al. 2006, Rutgers et al. 2009).
33. *N-functies (nitrificatie).*
De potentiële nitrificatie wordt gemeten door ammonia toe te voegen en de transformatie naar nitriet en nitraat te meten onder geconditioneerde omstandigheden (temperatuur en vochtgehalte; Bloem et al. 2006). Deze indicator wordt niet toegepast in Bobi (Rutgers et al. 2009).
34. *N-functies (denitrificatie).*
Denitrificatie (productie van gasvormige stikstofverbindingen N₂O, NO en N₂) wordt gemeten in een afgesloten ruimte (Bloem et al. 2006). Deze indicator wordt niet toegepast in Bobi (Rutgers et al. 2009).
35. *Enzymen several options.*
36. *Bait Lamina.*
37. *Litterbag voor decompositiebepaling.*
38. *Wortelbiomassa number/depth of roots.*

D Functional and abiotic soil indicators

39. *Clay, silt, sand.*
40. *Texture, aggregates, form and stability.*
41. *Bulk density and pore volume.*

- 42 % living space (water+air).
- 43 Penetration resistance.
- 44 Water infiltration rate.
- 45 Humidity and pf curve.
- 46 Acidity (pHx).
- 47 CEC.
- 48 Organic matter content (organic carbon content).
- 49 Organic matter composition 1 (stable, labile).
- 50 Humic acid composition.
- 51 C/N ratio SOM.
- 52 Total N.
- 53 Pal.
- 54 Pwater.
- 55 Total P.
- 56 Other nutrients (Ca, Mg, S, K).
- 57 Heavy metals.
- 58 Pesticides, organic pollutants.

E Functional and systemic indicators (percentage soil sealing not included)

- 59 land use, ecotope, nature type
- 60 historical land use
- 61 ground water trap, ground water management, (kwel + inzijing)
- 62 primary production, crop yields, market crop value, fate of plant residues
- 63 cattle density, abundance and type
- 64 grass consumption, feeding, krachtvoer
- 65 application of nutrients (NPK) and SOM, (organic) manure management and application type
- 66 soil improvement, tillage
- 67 soil access (freq + weights), trapping of cattle, mowing frequency
- 68 pesticide usage and soil sterilization
- 69 rotation, frequency of grassland renewal
- 70 plant diversity, vegetation, forest
- 71 percentage grass, related to corn and arable
- 72 percentage fallow, related tot total production area
- 73 percentage non-productive landscape elements
- 74 leaf area index
- 75 GHG production (methane, N₂O, CO₂)
- 76 water buffering capacity
- 77 number of tourists, recreation area, educational visits, people who live from landscape and agriculture
- 78 temperature, soil temperature, evaporation, precipitation

Bijlage 6. Criteria voor de multicriteria-analyse inclusief klassegrenzen

Alle criteria voor de MCA van indicatoren voor bodembiodiversiteit en ecosysteemdiensten van de bodem afgebeeld in een screendump uit Excel. De criteria zijn in vijf groepen onderverdeeld zoals aangegeven met de kleuren. De vijf klassegrenzen van 0 (laagste score voor de indicator) tot 5 (hoogst mogelijke score) zijn ook aangegeven. De spreadsheet werd ontwikkeld in het EU-project EcoFINDERS en is slechts in het Engels beschikbaar (Lemanceau 2011).

Scoring	Ease of measurement		Costs (in Euro)				Overall estimate for appropriateness to measure		Sensitivity for differences in			Fit for Purpose		
	Equipment	skills	capital start-up	per sample	Labour costs Field	Lab	bio-diversity	ecosystem services	soil type	land use	disturbance	under-standable	standard-isation	monitoring
5	all	general	<2k	<2	Low	Low	high	high	high	high	high	charismatic	ISO OECD	already high
4	majority		2-10k	2-5										high
3	most	mod.	10-50k	5-20	med	med	med	med	med	med	med	explainable	medium	satisfactory
2	few		50-100k	20-100										medium
1	v. few	spec.	>100k	100-500	High	High	low	low	low	low	low	low	low	low
0	only exp	acad.	undef	>500	undef	undef	zero	zero	zero	zero	zero	zero	not yet	zero
	0.91	0.96	0.93	1.30	0.89	1.22	1.07	1.0	1.1	1.1	1.0	1.2	1.2	1.2
	rutgersm: Your estimate about the availability of the equipment in different labs		rutgersm: costs of equipment only, not labour		rutgersm: materials and consumables per sample, excluding labour		rutgersm: biodiversity according to policy definition, i.e. linked to the functioning of the soil		rutgersm: like tillage or heavy metals		rutgersm: i.e. soil properties - texture, pH, etc.		rutgersm: Expressed as "Will Policy Makers understand it?" How easy is it to communicate how/why it is used to the general public?	

Bijlage 7. Indicatoren voor een landelijk bodemmeetnet

Deze bijlage bevat een voorstel voor een set indicatoren waarmee de kenmerken van de bodem gemeten kunnen worden die nodig zijn voor de beoordeling van de bodembiodiversiteit en de ecosysteemdiensten van de bodem. De indicatoren zijn gegroepeerd in drie domeinen en doorgenummerd. De nummering wijkt af van alle voorgaande nummeringen. Enkele overwegingen worden gegeven bij de nieuwe indicatoren.

De omvang van de set wordt ingegeven door ervaringen met Bobi in het LMB. Een ruimere set geeft meer informatie, maar is praktisch niet meer te coördineren in verband met de benodigde menskracht (voor het veldwerk en voor de analyses) en expertise. Met een kleinere set wordt de set bodemkenmerken incompleet en kunnen sommige ecosysteemdiensten niet meer optimaal beoordeeld worden.

Bodembioologische indicatoren

Bodemfauna (methoden die bij Bobi worden gebruikt; Rutgers et al. 2009)

1. regenwormen (aantallen en soortensamenstelling);
2. microarthropoden (aantallen en soortensamenstelling);
3. nematoden (aantallen en soortensamenstelling);
4. potwormen (aantallen en soortensamenstelling; indien regenwormen worden bepaald, kan overwogen worden om potwormen niet te analyseren).

Micro-organismen (methoden die bij Bobi worden gebruikt; Rutgers et al. 2009)

5. biomassa en aantallen bacteriën;
6. biomassa en aantallen schimmels;
7. PLFA-bacteriën (nieuwe indicator: optioneel als het budget het toelaat; zie Bijlage 5).

Functionele biologische bodemindicatoren (methoden die bij Bobi worden gebruikt; Rutgers et al. 2009)

8. potentiële C-mineralisatie.
9. potentiële N-mineralisatie.
10. anaerobe N-mineralisatie.
11. functionele diversiteit bacteriën.
12. wortelbiomassa (ervaring met monsterapparatuur dient uitgebreid te worden; zie Bijlage 5).

Alle bodemfauna indicatoren, PLFA en de functionele diversiteit bacteriën betreffen zogenoemde multi-eindpunttechnieken, dat wil zeggen dat er meerdere kenmerken met één methode bepaald worden. Per indicator levert dat een multidimensionale set gegevens op. Bij de bodemfauna is dat bijvoorbeeld de soortensamenstelling.

Indicator 7 (PLFA) en 12 (wortelbiomassa) zijn nieuw. Er zal eerst een pilot uitgevoerd moeten worden met betrekking tot de robuustheid van deze indicatoren. De ervaringen met de wortelbiomassa is dat de monsterapparatuur (wortelboor) nog niet optimaal is, waardoor het veel kracht kost om het monster te nemen.

Abiotische bodemindicatoren

(De meeste indicatoren worden momenteel al in het LMB toegepast; Rutgers et al. 2009.)

13. textuur en grondsoort (zand, klei);
14. totaal gehalte organische stof;
15. meerdere fracties organische stof (oplosbaar, beschikbaar, recalcitrant; meest geschikte techniek nog nader vast te stellen);
16. pH;
17. diverse nutriënten (totaal N, diverse P-fracties, K, Mg, Ca, S);
18. wortelbiomassa (N.B. alleen onder grasland; robuustheid en kosten van de methode nader te evalueren);
19. bulkdichtheid en indringweerstand;
20. bodemtemperatuur en bodemvochtigheid.

Indicator 15 (organischestoffracties) is nieuw. Het protocol is nog niet vastgesteld. De robuustheid van deze indicator zal nog onderzocht moeten worden.

Systeemgerichte en overige indicatoren

(LB = bij landbouw categorieën)

21. bodemgebruik en historisch bodemgebruik;
22. toepassing van organische mest en kunstmest (LB);
23. percentage gras ten opzichte van mais en akker (LB);
24. diversiteit van de plantengemeenschap (vooral bij natuur en grasland);
25. rotatie en vruchtwisseling (LB);
26. bodembewerking (LB);
27. primaire productie (LB);
28. percentage braak (LB);
29. bodemontsmetting en toepassing van bestrijdingsmiddelen (LB);
30. percentage niet-productieve landschapselementen (LB);
31. peilbeheer en grondwaterstand;
32. veedichtheid;
33. klimaatinformatie: geïntegreerde (bodem)temperatuur, neerslag, verdamping.

De meeste indicatoren (niet: 21, 24 en 32) in deze groep hebben betrekking op bedrijfsgerichte systeeminformatie die via het LEI verkregen kan worden, mits de locatiecoördinaten niet gepubliceerd worden. Hoe de informatie afkomstig van deze indicatoren toegepast worden, is nog onderwerp van studie.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag