



ALTERRA

WAGENINGEN UR



Quick Scan organische stof: kwaliteit, afbraak en trends

Alterra-rapport 2128
ISSN 1566-7197

C.M.A. Hendriks

Quick Scan organische stof:
kwaliteit, afbraak en trends

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het
beleidsondersteunend Domein Natuur, Landschap en Platteland, Thema Bodem, Water en Klimaat.
Projectcode BO-11-002.01-008 (Europese Bodemstrategie)

Quick scan organische stof: kwaliteit, afbraak en trends

C.M.A. Hendriks

Alterra-rapport 2128

Alterra, onderdeel van Wageningen UR
Wageningen, 2011

Referaat

Hendriks, C.M.A., 2011. *Quick Scan organische stof: kwaliteit, afbraak en trends*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2128. 34 blz.; 2 fig.; 5 tab.; 49 ref.

Organische stof is van grote invloed op de bodemstructuur, bodemvruchtbaarheid en gewasopbrengst. Landbouwkundig gebruik en fysieke aanpassingen van het milieu beïnvloeden het organische stofgehalte in de bodem. Om de voorraad organische stof duurzaam te beheren is het van belang om inzicht te hebben in factoren die van invloed zijn op de opbouw en afbraak van organische stof. Met literatuuronderzoek is kennis bijeen gebracht over opbouw, afbraak en trends in het organische stofgehalte. De trendanalyses laten een wisselend beeld zien maar tonen geen eenduidige afname. (Voormalig) bodemgebruik, veranderingen in het fysieke milieu en management zijn belangrijke factoren die het organische stofgehalte bepalen. Gezien de onzekerheden in analyses, experimenten en modelresultaten is het moeilijk om te zeggen of een verandering in het organische stofgehalte zich werkelijk voordoet bij minerale gronden in Nederland. Bij een gebalanceerd beheer zijn er mogelijkheden om het organische stofgehalte in stand te houden of zelfs te verhogen. Aanbevolen wordt om effecten van veranderend landgebruik en landbouwkundig beheer nader te onderzoeken.

Trefwoorden: bodemorganische stof, koolstof, bodemgebruik, Nederland, Europese bodemstrategie

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2011 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2128

Wageningen, januari 2011

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Achtergrond	11
1.3 Doel	12
1.4 Leeswijzer	12
2 Betekenis van organische stof	13
3 Kwaliteit van organische stof	15
3.1 Samenstelling organische stof	15
3.2 Opbouw van organische stof	16
3.3 Afbraak van organische stof	17
4 Onderzoek naar organische stofgehalten	21
4.1 Experimenten	21
4.2 Modelstudies	23
4.3 Trendanalyses	24
4.3.1 Nederland	24
4.3.2 Europa	25
5 Discussie en conclusies	27
Literatuur	31

Samenvatting

Betekenis van organische stof

Hoewel organische stof in de meeste gronden slechts een paar procenten uitmaakt van de bodem, heeft het een grotere invloed op de bodemeigenschappen dan het gehalte doet vermoeden. Organische stof is van invloed op veel bodemeigenschappen die belangrijk zijn voor de gewasgroei: nutriëntenvoorziening, doorwortelbaarheid, bodemdichtheid, vochtleverend vermogen, waterbergend vermogen, beluchting, draagkracht, stuifgevoeligheid, verkruijmelbaarheid, slempgevoeligheid en erosiegevoeligheid (Van Eekeren et al., 2008, Van Soesbergen et al., 1986, Janssen et al., 1990). Ook de samenstelling van het bodemleven wordt in sterke mate beïnvloed door organische stof (Brussaard, 1994). Naast de betekenis voor bodemkwaliteit en gewasopbrengsten heeft organische stof ook een belangrijke betekenis voor het milieu door de invloed op het vasthouden en uitspoelen van nutriënten (Kooijman et al., 2009; Strahm en Harrison, 2007) en bestrijdingsmiddelen (Spark en Swift 2002; Dousset et al., 2010) naar grond- en oppervlaktewater en door het vastleggen van koolstof (Kuikman et al., 2003).

Samenstelling, opbouw en afbraak van organische stof

Organische mest, het gewas, al dan niet natuurlijk, en gewasresten zijn belangrijke bronnen van organische stof in de bodem. Afstervende delen van de planten (wortels, bladeren, stengels, vruchten, takken, stammen) komen in de bodem terecht. Van de organische materialen die op en in de grond komen is ruim 90% afkomstig van planten. Ook de meeste dierlijke mest kan als een plantaardig verteringsproduct gezien worden, aangezien de meeste landbouwhuisdieren planten(delen) als voedsel eten. Daarmee zijn plantenbestanddelen de belangrijkste bron voor de humusvorming. Door vertering vallen de plantendelen uiteen en komen in de bodem terecht. Het merendeel van deze organische stof blijft geconcentreerd in de bovenste bodemlagen van het bodemprofiel. De opbouw van organische stof is een langdurig proces, het duurt vele tientallen jaren of langer voordat het organische stofgehalte van de bodem structureel is verhoogd. Dit is afhankelijk van grondsoort, gewas en beheer.

De afbraak van organische stof is een natuurlijk proces en wordt voornamelijk bepaald door drie factoren: bodemorganismen, het fysische (bodem)milieu en de kwaliteit of samenstelling van de organische stof zelf (Brussaard, 1994). De chemische samenstelling van planten is een belangrijke eigenschap die invloed heeft op de vertering van de plant na afsterven. Planten(delen) met een hoog eiwit- of suikergehalte breken makkelijker af dan planten(delen) met een hoog ligninegehalte. Hierdoor neemt het ligninegehalte van de organische stof in de tijd toe en de afbraaksnelheid af. De afbraaksnelheid verloopt exponentieel, met een hoge snelheid in de eerste maanden of jaren van afbraak, waarna de snelheid asymptotisch terug loopt naar nul in latere jaren.

Naast de samenstelling van de plantenresten is ook de beschikbaarheid van stikstof van grote invloed op de afbraaksnelheid. Micro-organismen die de afbraak voor hun rekening nemen hebben veel stikstof nodig (Janssen et al., 1990). Over het algemeen bevatten groene plantendelen veel eiwitten en koolhydraten die rijk zijn aan stikstof. Houtachtige delen bevatten veel lignine en zijn armer aan stikstof. De afbraaksnelheid van groene plantendelen is daarom hoger dan van bijv. houtsnippers of zaagsel (Kolenbrander, 1974). Een veelgenoemde vuistregel voor de afbraaksnelheid van organische stof is 2% afbraak van organische stof per jaar (o.a. Kortleven, 1963). De afbraaksnelheid is echter niet constant en neemt af met de tijd (De Willigen et al., 2008). De afbraak van het labiele deel van de organische stof is de eerste jaren na toediening hoog waarna het geleidelijk afneemt tot lagere snelheden. De resterende stabiele organische stof is rijk aan moeilijk

afbreekbare bestanddelen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij enkeerdgronden, waar de organische stof die eeuwen geleden is toegediend nog steeds in de bodem aanwezig is, maar dan alleen de zeer stabiele fracties.

Experimenten

In langjarige experimenten in Engeland (lopend sinds 1852, 1856 en 1897) werden geen eenduidige trends in toe- of afname van organische stof geconstateerd voor permanent grasland. Zowel afnemende als toenemende organische stofgehalten werden gevonden bij gelijkblijvend beheer (Johnston, 1986; Hopkins et al., 2009). Uit potproeven over 50 jaar van Wadman en De Haan (1997) bleek dat bij hogere initiële organische stofgehalten de afbraak geleidelijker gaat, maar langer doorgaat dan bij gronden met een lagere organische stofgehalte. Er werd een verband vermoed met een relatief hoger gehalte stabiele organische stof in gronden met een hoog initieel gehalte.

In langjarige experimenten met verschillende vormen van bodembewerking, waaronder geen of minimale grondbewerking, werden verschillende resultaten gevonden. Stockfisch et al. (1999) vonden een aanvankelijke toename van organische stof bij minimale grondbewerking. Deze toename werd vrijwel meteen te niet gedaan na het ploegen van de grond. Hermle et al (2008) vonden geen verschil in organische stofgehalten bij verschillende mate van intensiteit van de bodembewerking. Wel vonden ze een andere verdeling van de organische stof door het bovenste bodemprofiel (0-40 cm), wat bevestigd wordt in meerdere studies (Govaerts et al., 2009).

Modelstudies

Er zijn diverse vergelijkende studies naar modellen van organische stof uitgevoerd (o.a. De Willigen et al., 2008; Chardon et al., 2009). Met de modellen kan het verloop in organische stof redelijk worden gesimuleerd. Wel is er verschil in toepassingsmogelijkheden van de modellen. Sommige modellen vragen een meer gedetailleerde invoer dan andere. En sommige modellen zijn vooral op de afbraak van kortere tijdspannen toegespitst. Uitgevoerde modelberekeningen geven voor de verschillende modellen soms sterk uiteenlopende resultaten. Echter, in de meeste gevallen kunnen wel algemene trends, met een zekere bandbreedte, worden aangegeven. Zo berekenen de meeste modellen een relatieve afbraaksnelheid van organische stof met een exponentieel verloop, afvlakkend van 2 tot 20 jaar waarna de relatieve afbraaksnelheid min of meer constant blijft.

Volgens De Willigen et al. (2008) is een belangrijk probleem bij het vergelijken van modeluitkomsten met actuele waarden van het bodemorganische stofgehalte dat de actuele bodemorganische stofgehalten slechts ten dele het resultaat zijn van de huidige condities. Voormalig landgebruik, slechte drainage, afwezigheid van kunstmest en bekalken heeft de decompositie snelheid van het bodemorganische stofgehalte in het verleden, zeg voor 1900, sterk beïnvloed, en daardoor de accumulatie van het bodemorganische stofgehalte. Van de andere kant waren bij het vroegere landgebruik de gewasopbrengsten en daardoor ook gewasresiduen die in de grond verwerkt werden lager dan de huidige niveaus, resulterend in lagere niveaus van organische stofgehalten dan verwacht op basis van de huidige toediening van organische meststoffen en gewasresten.

Trends in organische stofverloop

Uit de literatuur komt geen eenduidig beeld naar voren voor trends in veranderingen van hoeveelheden organische stof in landbouwgronden. Zo werd voor Nederland geen eenduidige afname gevonden na analyse van een grote dataset over de periode 1984-2004, met gegevens verspreid over Nederland en voor verschillende grondsoorten en gewassen (Reijneveld et al., 2009; Hanegraaf, 2009a). Ook uit de resultaten van het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB) blijkt geen aantoonbare trend in het organische stofgehalte. In een vervolgonderzoek van Hanegraaf et al. (2009b) naar het organische stofgehalte in de provincie Drenthe werd een lichte afname geconstateerd voor een deel van de onderzochte percelen onder aardappelen, bollen en

gras. Alleen in maïspcelen werd een stijging geconstateerd. In Vlaanderen vond Sleutel et al. (2003) een afname van het bodemorganische koolstofgehalte over de periode 1989-2000. Geopperd werd dat de afname van het organische stofgehalte samenhangt met verminderd toepassen van varkensmest en de lichte textuur van de grond in Vlaanderen. In hoeverre afname van organische stof samenhangt met veranderd landgebruik is niet duidelijk. Wel is bekend dat er veel bedrijven zijn veranderd van gemengd naar een akkerbouw bedrijf. Bellamy et al. (2005) rapporteren een dalende trend in het organische stofgehalte voor Engeland en Wales voor de periode 1978-2003. De afname werd gevonden voor alle vormen van landgebruik waardoor invloed van klimaatverandering werd verondersteld. Smith et al. (2007) plaatsen hier echter kanttekeningen bij omdat het aantal stuks vee in die periode zou zijn afgenomen en er minder mest is toegediend. Bovendien zou ook geen rekening zijn gehouden met veranderd landbouwkundig management en historisch landgebruik. In Frankrijk vond Saby et al. een negatieve trend in het koolstofgehalte van de bodem over de perioden 1990-1994, 1995-1999 en 2000-2004. De afname werd voor een belangrijk deel toegeschreven aan de gestegen temperatuur en veranderd landgebruik.

Conclusies

Samenvattend kan gezegd worden dat we op globaal niveau de meeste vragen over opbouw, afbraak en trends van organische stof kunnen beantwoorden. We weten globaal hoe organische stof is samengesteld, hoe de opbouw en afbraak van organische stof verloopt en welke factoren daarop van invloed zijn. Daar kunnen we op globaal niveau uitspraken mee doen.

Op meer gedetailleerd niveau weten we veel, maar ook nog heel veel niet. We weten wel globaal hoe afbraakprocessen verlopen, maar de precieze processen zijn moeilijk te analyseren omdat ze over lange tijd verlopen (soms meerdere eeuwen), historische factoren de opbouw en afbraak beïnvloeden, de deelprocessen niet altijd bekend zijn of (nog) niet begrepen worden en omdat de invloed van bodembiota complex is (veel verschillende soorten). Ook effecten van management in interactie met fysische en biotische factoren zijn nog niet altijd bekend. Hierdoor zijn bijv. modelvoorspellingen niet onder alle omstandigheden even nauwkeurig.

De keuze van gewas en teelt (beheer) speelt een belangrijke rol bij het organische stofverloop. Er zijn veel experimenten en diverse trendanalyses uitgevoerd. Desondanks blijft het effect van verschillende gewassen (continu en wisselteelten), wisselingen in gewas en teeltwijzen (management) in combinatie met bodem, klimaat en historisch landgebruik op het organische stofgehalte toch een moeilijk te voorspellen proces.

In de context van de Europese Bodemstrategie, waarbij afname van de hoeveelheid organische stof als één van de belangrijkste bodembedreigingen wordt genoemd, is het dus vanwege alle genoemde onzekerheden moeilijk om te zeggen of deze bedreiging zich in Nederland werkelijk voordoet bij de minerale gronden.

Aanbevolen wordt om met beschikbare gegevens op regionaal niveau na te gaan wat de invloed is van veranderend landgebruik en landbouwkundig beheer op het organische stofgehalte. Daarnaast wordt aanbevolen om het organische stofverloop meer structureel te volgen in praktijksituaties bij bekende voorgeschiedenis, beheer en teelt. Belangrijk is daarbij een onderscheid te maken in de organische stof nodig voor de leverantie van nutriënten en voor het in stand houden dan wel opbouwen van de totale hoeveelheid organische stof welke belangrijk is voor o.a. structuur en vochtleverend vermogen van de bodem. Deze gegevens kunnen dan tevens bijdragen aan nieuwe inzichten en betere modellen en voorspellingen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De Europese Bodemstrategie beoogt een duurzaam beheer van de bodem in de EU en steunt op vier pijlers: een kaderwetgeving, integratie van de bodembescherming in nationaal en communautair beleid, dichten van de kenniskloof van bodembescherming, en meer publieksvoorlichting over bodembescherming. Één van die vier pijlers is kaderwetgeving. In september 2006 heeft de Europese Commissie daarom een voorstel gedaan voor een richtlijn tot vaststelling van een kader voor de bescherming van de bodem (Kaderrichtlijn Bodem). Het voorstel voor de richtlijn heeft vooral betrekking op een aantal bodembedreigingen, te weten afdekking, erosie, verlies van organische stof, verdichting, verzilting, verzuring, aardverschuivingen en verontreinigingen.

De Bodemstrategie spreekt dus van een aantal bodembedreigingen en op termijn van de aanwijzing van risicogebieden of prioritaire gebieden voor een aantal van die bedreigingen en het nemen van maatregelen in die gebieden. Bij het aanwijzen van prioritaire gebieden gaat het over de volgende bodembedreigingen:

1. erosie
2. afname van de hoeveelheid organische stof
3. verdichting
4. verzilting
5. aardverschuivingen en waarschijnlijk wordt toegevoegd:
6. verzuring

In de recente teksten is bovendien toegevoegd dat bij het aanwijzen van prioritaire gebieden niet alleen rekening moet worden gehouden met woestijnvorming en klimaat, maar ook met bodembiodiversiteit.

In 2009 is vooral meer aandacht besteed aan het aanwijzen van prioritaire gebieden: waar zouden deze in Nederland kunnen liggen? Hack-ten Broeke et al. (2009) hebben vastgesteld dat de aandacht dan vooral uit zal gaan naar prioritaire gebieden waar afname van de hoeveelheid organische stof, ondergrondverdichting of winderosie een rol speelt. Daarnaast is er in Nederland zeker ook sprake van bodemverontreiniging en van afdekking. Ook is er in 2009 gewerkt aan een kosten-baten analyse van maatregelen die kunnen worden voorgesteld voor de prioritaire gebieden (Kuhlman et al., 2010).

Vraagstelling 2010

Voor 2010 spitst de kennisbehoefte zich toe op erosie, verdichting, afdekking en organische stof ter voorbereiding op de Europese regelgeving. Voor afname van organische stof zijn er vragen over kwaliteit en vooral de afbraaksnelheid van organisch materiaal.

1.2 Achtergrond

In september 2006 is door de Europese Commissie het voorstel gedaan om te komen tot een Kaderrichtlijn Bodem met als doel om de bodem te beschermen en duurzaam bodemgebruik te bevorderen. Daarbij worden de volgende thema's van belang geacht: erosie, verlies van organische stof, verdichting, verzilting, aardverschuivingen, verzuring, verontreiniging en afdekking. Voor de eerste zes bedreigingen zullen volgens het voorstel zogenaamde prioritaire gebieden aangewezen moeten worden door de lidstaten en maatregelen moeten worden genomen om aantasting van de bodem in die gebieden te beperken. Vooruitlopend op de eventuele totstandkoming van die Kaderrichtlijn Bodem en uitgaande van de Europese Bodemstrategie zijn

verschillende deelonderzoeken uitgevoerd, direct gekoppeld aan de hierboven genoemde vraagstelling. In dit rapport wordt de problematiek van verlies aan organische stof behandeld.

De bezorgdheid om verlies aan organische stof is niet nieuw. Ook in het midden van de 20e eeuw was er al zorg om de kwaliteit van de bodem en de bodemvruchtbaarheid. Zo onderzochten Kortleven en Pijl (1954) *'De voorziening van de grond met organische stof, voorheen en thans'*. Zij deden hun onderzoek omdat, *'Vrij algemeen heeft de mening postgevat, dat de hoeveelheid organische stof, die de grond ten deel valt, kleiner zou zijn geworden sinds de opkomst van het kunstmestgebruik.'* Uit een analyse van inwoneraantallen, oppervlakte cultuurgrond, gewaskeuze en rundveebezetting, komen zij tot de conclusie dat *'de voorziening van de cultuurgrond met organische stof sinds het in zwang komen van het kunstmestgebruik niet is achteruitgegaan'*.

Ook bij de huidige bezorgdheid over organische stof speelt bemesting een rol. Door regelgeving over hoeveelheden bemesting in verband met uitspoeling en fosfaatverzadiging, is de vraag gerezen of dit invloed heeft op het organische stofgehalte. Meer algemeen is de vraag wat de invloed is van het moderne intensieve management van landbouwgronden op de opbouw en afbraak van organische stof.

1.3 Doel

Doel van het onderzoek was om een beknopt overzicht te geven van kennis over kwaliteit, opbouw, afbraak en trends van organische stof.

De kennis is door literatuuronderzoek bijeengebracht.

De informatie wordt gebruikt bij het in kaart brengen van de minerale gronden die gevoelig zijn voor afname van organische stof op basis van bijvoorbeeld afbraaksnelheid. Wat moeten we weten over de kwaliteit van organische stof en als het vooral om afbraaksnelheid gaat, weten we daarvan dan al voldoende uit de literatuur?

1.4 Leeswijzer

Organische stof is een belangrijke component van de bodem die van belang is voor veel bodemeigenschappen en is van groot belang voor gewasgroei. In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de betekenis van organische stof. Organische stof kan in verschillende vormen voorkomen. Verschillende vormen hebben verschillende betekenis voor opbouw en afbraak van de organische stof. Dit wordt in hoofdstuk 3 toegelicht. Hoofdstuk 4 geeft een beknopt overzicht van onderzoek naar de opbouw en afbraaksnelheid van organische stof en de factoren die daarop van invloed zijn. Experimenten, modelstudies en trendanalyses in Nederland en andere Europese landen komen aan de orde. Tot slot wordt op basis van de informatie uit de voorgaande hoofdstukken in hoofdstuk 5 een discussie gevoerd en conclusies getrokken.

2 Betekenis van organische stof

Hoewel organische stof in de meeste gronden slechts een paar procenten uitmaakt van de bodem, heeft het een grotere invloed op de bodemeigenschappen dan het gehalte doet vermoeden. Organische stof is van invloed op veel bodemeigenschappen die belangrijk zijn voor de gewasgroei: nutriëntenvoorziening, doorwortelbaarheid, bodemdichtheid, vochtleverend vermogen, waterbergend vermogen, beluchting, draagkracht, stuifgevoeligheid, verkruijmelbaarheid, slempgevoeligheid en erosie gevoeligheid (o.a. Van Eekeren et al., 2008; Van Soesbergen et al., 1986; Janssen et al. 1990). Ook de samenstelling van het bodemleven wordt in sterke mate beïnvloed door organische stof (Brussaard, 1994). Kunstmest kan voor een deel de nutriëntenvoorziening door organische stof en mineralisatie vervangen, echter voor veel akkerbouwgewassen leidt een management met alleen minerale bemesting tot opbrengstdalingen en is aanvullende organische bemesting noodzakelijk om de opbrengst op peil te houden (Janssen et al., 1990). Van de andere kant heeft minerale bemesting een opbrengst verhogende werking waardoor meer droge stof door het gewas wordt geproduceerd, bovengronds en ondergronds, waardoor het organische stof gehalte in de bodem toeneemt (De Willigen et al., 2008).

Onderzoek uit het project *Zorgen voor Zand* (Van Eekeren et al., 2010) laat het belang van bodemkwaliteit zien. In het project werd een experiment uitgevoerd met bemesting van 20 graslandpercelen van een verschillend productieniveau. In tabel 1 staan de opbrengsten bij de verschillende bemestingniveaus.

Tabel 1

Opbrengst van grasland bij verschillende bemestingniveaus.

Bemesting (kg N)	Opbrengst gemiddeld (ton ds. ha ⁻¹)	Opbrengst laagst producerende gronden (ton ds. ha ⁻¹)	Opbrengst hoogst producerende gronden (ton ds. ha ⁻¹)
0	7,6	3,8	10,0
150	11,0	6,2	15,4
300	12,3	7,4	17,5

Op de hoogst producerende gronden leverde elke kg stikstof (tot 300 kg) 25 kg droge stof op, terwijl op de laagst productieve gronden de opbrengst maar 12 kg droge stof per kg stikstof bedroeg, meer dan de helft minder. De onderzoekers schrijven deze verschillen in opbrengsten en rendementen van bemesting voor een groot deel toe aan het verschil in bodemkwaliteit. Organische stof, zuurgraad, vochtleverend en stikstofleverend vermogen zijn hierbij belangrijke kwaliteitseigenschappen van de bodem die gewasopbrengsten beïnvloeden.

Naast de betekenis voor bodemkwaliteit en gewasopbrengsten heeft organische stof ook een belangrijke betekenis voor het milieu door de invloed op het binden en uitspoelen van nutriënten (Kooijman et al., 2009; Strahm en Harrison, 2007) en de adsorptie van bestrijdingsmiddelen (Spark en Swift, 2002; Riemens et al., 2004; Dousset et al. 2010) naar grond- en oppervlaktewater en door het vastleggen van koolstof. Kuikman et al. (2003) berekende voor Nederland een totale hoeveelheid koolstof in de bovenste 30 cm van de bodem van 286 Tg C. Ter vergelijking, in 2009 bedroeg de CO₂-uitstoot in Nederland 170 Mton ofwel ca. 51,8 Tg C (Emissieregistratie, 2010).

3 Kwaliteit van organische stof

3.1 Samenstelling organische stof

Van minerale gronden bestaat het grootste deel van de bodem uit anorganisch materiaal. Organisch materiaal maakt gemiddeld voor Nederland voor ca. 4% deel uit van de bouwvoor (Janssen et al., 1990). Het bodemorganische materiaal is te verdelen in levende organische stof (15%, bestaande uit planten en dieren) en dode organische stof (ca. 85%). In tabel 2 is een verdeling van de organische stof over de verschillende vormen gegeven.

Tabel 2

Samenstelling van organische bestanddelen in massafracties van de bovenste horizont van een bos (Janssen et al., 1990).

grond	minerale grond	94%						
	organisch materiaal	6%	dood organisch materiaal	85%				
			levend organisch materiaal	15%	wortels	55%		
					bodemorganismen	45%	bacteriën	50%
							schimmels	23%
							wormen	14%
							macrofauna	5%
							mesofauna	2,5%
							microfauna	3,5%

Het grootste gedeelte van de herkomst van bodemorganische stof is plantaardig. De samenstelling van plantaardig materiaal is daarom ook van grote invloed op de samenstelling van bodemorganische stof. De chemische samenstelling van planten variëren met de soort en leeftijd. Ook grondsoort en management (bemesting) kunnen van invloed zijn op de samenstelling. Een globaal overzicht van de samenstelling van vers plantaardig materiaal is gegeven in tabel 3.

Tabel 3

Globale samenstelling van vers plantaardig materiaal (Janssen et al., 1990).

stof	massagehalte in oorspronkelijk materiaal (%)	afbraak na één jaar (%)
Fenolen	5	10
Wassen	5	25
Lignine	40	50
Cellulose	20	75
Hemicellulose	15	90
Suikers	15	99

3.2 Opbouw van organische stof

Tot het begin van de 20e eeuw werden landbouwgronden voornamelijk met organische mest bemest. Hiermee werden voor het gewas benodigde voedingstoffen en tevens organische stof aangevoerd. Een andere belangrijke bron van organische stof is het gewas zelf, al dan niet natuurlijk, dat op een bodem groeit. Afstervende delen van de planten (wortels, bladeren, stengels, vruchten, takken, stammen) komen in de bodem terecht. Door vertering vallen de plantendelen uiteen en komen als organische stof in de bodem terecht. Het merendeel van de organische stof blijft geconcentreerd in de bovenste bodemlagen van het bodemprofiel. Bij de omzetting spelen schimmels, bacteriën en bodemfauna een belangrijke rol. De bodemschimmels en bodemfauna zelf vormen ook een onderdeel van de in de bodem voorkomende organische stof. Van de organische materialen die op en in de grond komen is ruim 90% afkomstig van planten. Ook de meeste dierlijke mest kan als een plantaardig verteringsproduct gezien worden, aangezien de meeste landbouwhuisdieren planten(delen) als voedsel eten. Daarmee zijn plantenbestanddelen de belangrijkste bron voor de humusvorming. Bij de opbouw van organische stof is de kwaliteit van de organische meststof van belang. Het organische stof gehalte van verschillende mestsoorten varieert.

De chemische samenstelling van het toegediende organische materiaal bepaalt hoe het afbraakproces verloopt en of de toegediende organische stof zal bijdragen tot de opbouw van stabiele organische stof, of enkel bruikbaar is voor de snelle levering van nutriënten. De humificatiecoëfficiënt (h_c) is hier een indicatie voor. Deze coëfficiënt geeft aan welk deel van het toegediend organische materiaal na één jaar nog steeds in de bodem aanwezig is en dus op termijn kan bijdragen aan de opbouw van stabiele organische stof. Zanen et al. (2008) vonden zo dat verschillende compostsoorten en potstalmest meer bijdraagt aan de organische stofopbouw dan drijfmest en kippenmest. Compost en stalmest dragen meer bij aan organische stofopbouw dan groenbemesting. Het andere deel, labiele humus, wordt gedurende het eerste jaar al gemineraliseerd of geassimileerd door de microbiële biomassa, maar draagt dus wezenlijk bij aan de nutriëntenvoorziening.

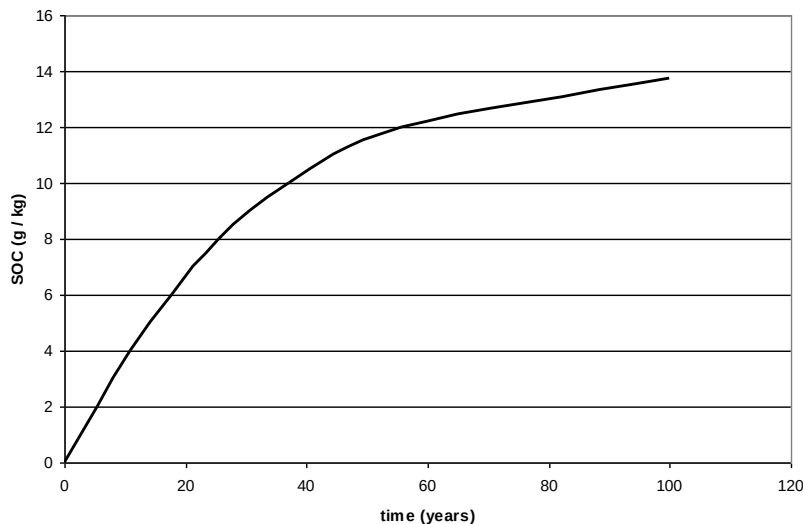
In tabel 4 zijn humificatiecoëfficiënten van enkele types organisch materiaal gegeven. Naarmate de humificatiecoëfficiënt hoger is, dragen de meststoffen meer bij aan de vorming van de stabiele organische stof die nodig is voor een duurzame bodemkwaliteit op lange termijn.

Tabel 4

Humificatiecoëfficiënten van verschillende organische materialen (bron: Bodemkundige Dienst van België en de Universiteit van Gent, 2006).

Organische meststof	Humificatiecoëfficiënt
suikerbiet met blad en kop	0.22
kool	0.25
gras	0.25
groenbemesters	0.30
graan	0.31
ondergrondse gewasresten	0.35
drijfmest	0.40
vaste mest	0.50
gft-compost	0.86
champost	0.91
groen-compost	0.96

De opbouw van organische stof, vanuit een nulsituatie, wordt verondersteld exponentieel te verlopen waarbij na een zeker tijd een maximum wordt bereikt. In figuur 1 is een voorbeeld van de opbouw van organische stof gegeven zoals berekend met het model CENTURY (De Willigen et al., 2008).



Figuur 1

Voorbeeld van het verloop van de opbouw van het organisch koolstofgehalte (SOC) uitgaande van 0 g C/kg bodem bij aanvang en een continu toevoer van 1,47 g C/kg bodem (De Willigen et al., 2008).

3.3 Afbraak van organische stof

De afbraak van organische stof is een natuurlijk proces en wordt voornamelijk bepaald door drie factoren: bodemorganismen, het fysische (bodem)milieu en de kwaliteit of samenstelling van de organische stof zelf (Brussaard, 1994). De chemische samenstelling van planten is een belangrijke eigenschap die invloed heeft op de afbraak van de plantendelen na afsterven. Planten bestaan uit verschillende macromoleculaire verbindingen: koolhydraten (cellulose, zetmeel, suikers), eiwitten, vetten en lignine. Ieder van deze stof kent een ander afbraakproces en afbraaksnelheid. Iedere plantensoort heeft een eigen specifieke samenstelling van deze verbindingen. Hierdoor is de afbraaksnelheid van de verschillende plantensoorten ook verschillend. De resistentie tegen microbiële afbraak is in eerste instantie afhankelijk van het aantal verschillende verbindingen tussen de bouwstenen binnen de macromoleculen. Tijdens het afbraakproces verdwijnen eerst de makkelijk afbreekbare verbindingen zoals eiwitten en suikers. Daarna volgt cellulose en vervolgens het moeilijk afbreekbare lignine. Het gehalte aan lignine neemt daarom toe in de organische stof naarmate de afbraak verder gaat in de tijd. De snelheid van afbraak neemt daarbij echter af. De afbraaksnelheid verloopt exponentieel, met een hoge snelheid in de eerste maanden of jaren, waarna de snelheid asymptotisch terug loopt naar nul. Voor gewassen met een hoog lignine gehalte betekent dit dat de afbraak langzamer verloopt en het organische stofgehalte in de bodem langer op een hoger gehalte zal blijven.

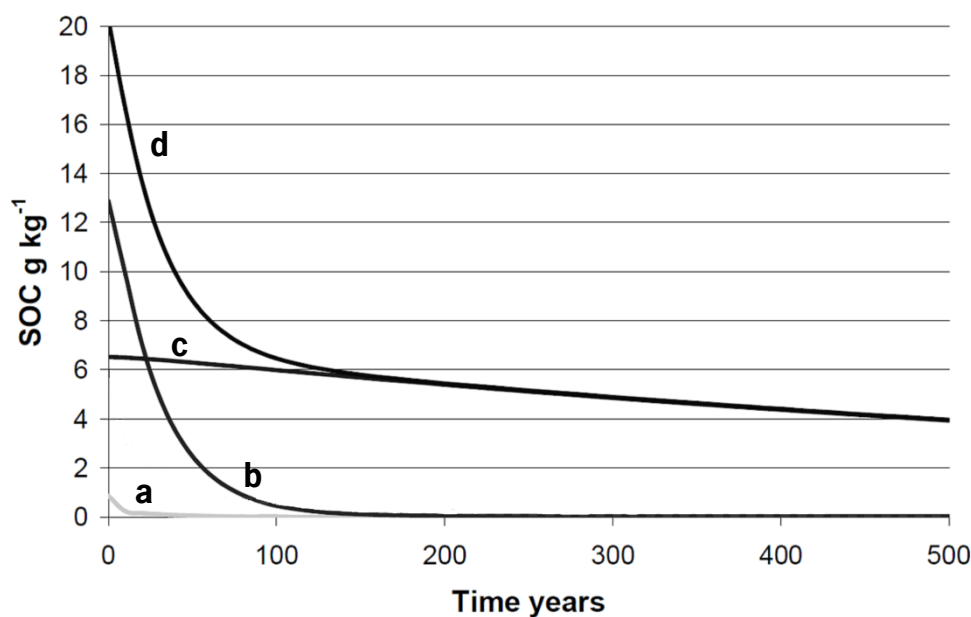
Naast de samenstelling van de plantenresten is ook de beschikbaarheid van stikstof van grote invloed op de afbraaksnelheid. Micro-organismen die de afbraak voor hun rekening nemen hebben veel stikstof nodig (Janssen et al., 1990). Over het algemeen bevatten groene plantendelen veel eiwitten en koolhydraten die rijk zijn aan stikstof. Houtachtige delen bevatten veel lignine en zijn arm aan stikstof. De afbraaksnelheid van groene plantendelen is daarom hoger dan van bijv. houtsnippers of zaagsel (Kolenbrander, 1974).

Zwart (2007) voerde een experiment uit naar de mineralisatie van verschillende mestsoorten. Hoewel er na drie jaar bemesting geen effect op de totale koolstof en stikstofgehalten gevonden werd, was er wel een effect op de stikstofmineralisatie en op de gehalten oplosbaar organisch N (SON) en N-mineraal in het voorjaar. Geconcludeerd werd dat voor de hoeveelheid voor de plant beschikbare stikstof de kwaliteit van de organische stof belangrijker is dan het gehalte organische stof als zodanig.

Van Leeuwen et al. 2010 schatten een afbraak van organische stof op zandgrond voor Nederland van gemiddeld 4% per jaar. Dit is hoger dan een veelgenoemde schatting van 2% (Janssen et al., 1990; Henkens, 1976; Kortleven, 1963). Uit het onderzoek van Van Leeuwen et al. (2010) naar afbraak op verschillende duinzand- en dekzandgronden komt een sterk variërende afbraaksnelheid naar voren van 3,9% voor de dekzandgronden tot 8% bij de natuurlijke duinzandgronden, met een uitschieter naar 9,5%. Janssen et al. (1990) noemen een variatie in afbraak van 0,1% - 15%, afhankelijk van de verschillende fracties van organische stof. Overigens moet opgemerkt worden dat de afbraaksnelheden in het onderzoek van Van Leeuwen waarschijnlijk betrekking hebben op de labiele fractie organische stof. De stabiele fractie breekt beduidend langzamer af. De totale afbraak van organische stof zal daarom vooral in de eerste jaren hoog zijn en in latere jaren afnemen (zie ook paragraaf 4.2 o.a. De Willigen et al., 2008). Een dergelijk hoge jaarlijkse afbraak kan wel in stand blijven als jaarlijks ook een hoge gift van instabiele organische stof aan de bodem wordt toegevoegd. De jaarlijks toegediende gift breekt dan snel af.

De organische bestanddelen die na afbraak van plantaardig of dierlijk materiaal in de bodem langer dan een jaar in de bodem zit wordt effectieve organische stof genoemd. De fractie van de toegediende organische meststof die na een jaar nog in de bodem aanwezig is wordt de humificatiecoëfficiënt (h_c) genoemd. Voor de meeste landbouwgewassen is de humificatiecoëfficiënt bekend uit metingen of schattingen. Zo wordt in een studie van de Bodemkundige Dienst van België en de Universiteit van Gent (2006) voor een groot aantal gewassen, verschillende gewasdelen en mestsoorten een humificatiecoëfficiënt gegeven voor gebruik in een adviessysteem voor het koolstofbeheer in bodems (tabel 4).

Hassink et al. (1997) deed onderzoek naar de snelheid waarmee grootte en dichtheid van organische stof reageert op veranderingen van C-giften. Zij verdelen organische stof onder in fracties van deeltjesgrootte en -dichtheid en onderscheiden daarbij drie dichtheidsklassen van de macro-organische stof: de lichte fractie bestaande uit herkenbare plantenresten, de intermediaire fractie bestaande uit gedeeltelijk gehumificeerd materiaal en de zware fractie bestaande uit amorf organisch materiaal. Bij de deeltjesgrootte worden de fracties $< 20 \mu\text{m}$ en $20\text{-}150 \mu\text{m}$ onderscheiden. De indeling is gebaseerd op de waarneming dat organische stofdeeltjes met de grootte van zandkorrels ($> 150 \mu\text{m}$) instabieler zijn dan organische stofdeeltjes ter grote van de silt en klei-fractie (resp. $2\text{-}63 \mu\text{m}$ en $< 2 \mu\text{m}$). Gevonden werd dat de lichte en intermediaire fracties sneller toenamen na toediening van organische stof dan de zware fractie. Veranderingen in de fractiesdeeltjes $< 20 \mu\text{m}$ en $20\text{-}150 \mu\text{m}$ traden relatief langzaam op en waren gering. Hieruit wordt de conclusie getrokken dat lichte en intermediaire fracties organische stof deeltjes als een indicator van veranderingen in het organische stofgehalte kunnen worden gebruikt die effecten van management op het organische stofgehalte sneller kan indiceren dan de veranderingen in het totale gehalte organische stof. In figuur 2 is de afbraak van organische stof, waarbij drie fracties zijn onderscheiden, grafisch weergegeven zoals berekend met het model CENTURY (De Willigen et al. 2008). Lijn a in de grafiek geeft de afbraak van snel mineraliserende organische stof weer (labiel). Lijnen b en c geven de afbraak van de meer stabiele humus weer, waarbij lijn c de afbraak van de meest stabiele humus weergeeft. Te zien is dat deze meest stabiele humusvorm in honderden jaren slechts weinig afneemt. De meest instabiele humus is echter na 10 -20 jaar al grotendeels verdwenen.



Figuur 2

Voorbeeld van de afbraak van het bodemorganisch koolstofgehalte voor de drie organische stofcomponenten van het model CENTURY (a: actieve; b: langzame; c: passieve fractie; d: totaal C-gehalte), uitgaande van een maximaal koolstofgehalte (evenwicht) waarna geen toevoer van koolstof meer plaatsvindt (De Willigen et al., 2008).

De zuurgraad van de bodem is een belangrijke fysische eigenschap van de bodem die de afbraak en mineralisatie van organische stof beïnvloedt. De zuurgraad heeft invloed op de enzymactiviteit en de samenstelling van de bodembiota en op de deeltjesgrootte en -vorm van de organische moleculen. In een neutraal milieu (pH 6-7) zijn vooral bacteriën actief. Naarmate het milieu zuurder wordt, zijn vooral schimmels actiever (Hendriks, 1992; Haynes, 1984). Bacteriën groeien over het algemeen sneller dan schimmels en zetten een groter deel van de organische stof om in CO₂ (Hendriks, 1992; Edmeades et al., 1981). Verhogen van de zuurgraad tot een pH van 6 à 7 versnelt de afbraak van organische stof (Hendriks, 1992). De afbraak verloopt over het algemeen het snelst in het traject pH 7-8 (Janssen, 1986). Bekalkingsadviezen gaan ook meestal uit van een lager pH traject (Van Eekeren et al., 2008) waarbij organische stof niet te snel wordt afgebroken (tabel 5). Een te hoge pH kan nadelig zijn voor het organische stofgehalte vanwege een verhoogde afbraak, een te lage pH kan nadelig zijn voor de biologische activiteit en structuurstabiliteit.

Tabel 5

Streefwaarden voor de zuurgraad van de bodem voor verschillende gewassen (Van Eekeren et al., 2008).

Gewas	Streeftraject zuurgraad (pH KCl)
Gras	4,8-5,5
Grasklaver	5,2-5,5
Bouwland	5,2-5,7

Haynes en Naidu (1998) rapporteren een verschil in de kortetermijn werking en langetermijn werking van bekalking op organische stof. Op korte termijn zou bekalking inderdaad een afname van organische stof en aggregaatstabiliteit tot gevolg hebben, maar tegelijkertijd een toename in microbiële biomassa bewerkstelligen. Het wordt aannemelijk geacht dat bekalking op lange termijn tot een toename van het organische stofgehalte leidt, vergelijkbaar met toepassing van meststoffen. De oorzaak is gelegen in de toename van top- en wortelgroei door het calcium in de kalkmeststof, en een daardoor hogere input van plantaardig materiaal in de bodem. Huinink (2008) stelt dat er geen bewijs is dat verhoogde N-mineralisatie een gevolg is van bekalking of bodembewerking. Bij scheuren van grasland zou de eenmalige grote toevoer van het gewas verantwoordelijk zijn voor de verhoogde mineralisatie. Ook wordt een pH-effect niet eenduidig genoemd.

Het lutumgehalte is van invloed op het organische stofgehalte van de bodem (Janssen et al., 1990). Een hoger lutumgehalte gaat over het algemeen samen met een voor planten grotere hoeveelheid beschikbaar bodemvocht en nutriënten. Hierdoor neemt de groei van het gewas toe met als gevolg een grotere toevoer van organisch materiaal en een stijging van het organische stofgehalte. In kleigronden is de mineralisatiesnelheid van organische stof lager dan in zandgronden door de vorming van klei-humus-complexen. Deze structuren beschermen organische stof tegen afbraak.

Hoge grondwaterstanden beperken de aëratie van de bodem en daarmee de activiteit van bodemorganismen. Met afnemende microbiologische activiteit neemt ook de mineralisatie van organische stof af. Gronden met hoge grondwaterstanden hebben daardoor veelal een hoger organische stofgehalte dan vergelijkbare gronden met een lagere grondwaterstand. Aan de andere kant kan onder droge omstandigheden het bodemvochtgehalte beperkend worden voor de afbraak. Voor de meeste microbiologische processen is een vochtgehalte van 60-80% van het maximaal vochthoudend vermogen van de grond optimaal (Hendriks, 1992). Bij zowel lagere als hogere vochtgehalten treedt veelal een afname van de afbraaksnelheid op.

4 Onderzoek naar organische stofgehalten

4.1 Experimenten

Hopkins et al. (2009) rapporteren over twee langjarige experimenten in Engeland. Het eerste experiment, Palace Lease, is in noordoost-Engeland en kent een weide-hooi beheer en loopt sinds 1897. Het tweede experiment, Park Grass, is in zuid-oost-Engeland bij Rothamsted, en kent een continu hooibeheer sinds 1856. Dit zijn unieke locaties waar organische stofgehalten over zo'n lange tijd zijn gemeten. Beide plots worden verschillend bemest met dierlijke mest en kunstmest. In 1982 en 2006 is het bodemorganisch koolstofgehalte bepaald aan de laag 0-27 cm voor zes plots van het Palace Lease-experiment. Voor vier van de plots kon geen netto verandering worden aangetoond, twee plots kenden een netto verlies aan het bodemorganisch koolstofgehalte van 15% en 17% sinds 1982. Voor het Park Grass-experiment zijn zes plots bemonsterd in 1959 en in 2002. Voor drie van de plots nam het bodemorganisch koolstofgehalte af met 2-10%, voor de andere drie plots nam het bodemorganisch koolstofgehalte toe met 4-8% tussen 1959 en 2002. Voor beide experimenten konden geen significante verschillen worden aangetoond tussen het bodemorganisch koolstofgehalte in de eerste en de tweede bepaling. Hopkins et al. (2009) concluderen dat er dan ook geen bewijs is dat voor een afname van het bodemorganisch koolstofgehalte in oud, permanent grasland, ondanks een significant hogere lucht- en bodemtemperatuur in de periode 1980 en 2000. Omdat in deze experimenten een verandering van landgebruik kan worden uitgesloten als factor die van invloed is op het gemeten bodemorganisch koolstofgehalte en ook bulkdichtheid niet is geschat maar is gemeten, vragen Hopkins et al. (2009) zich af of de gerapporteerde afname in het bodemorganisch koolstofgehalte wel kan worden toegeschreven aan klimaatverandering. In een experiment dat loopt vanaf 1852 is de ontwikkeling van organische stof gevolgd in een perceel haver dat jaarlijks werd bemest met 35 ton ha⁻¹ vaste organische mest (Johnston, 1986). Het organisch koolstofgehalte nam in de periode van 1852-1971 toe van ca 1% naar 3,3%. Bij geen bemesting nam het organisch koolstofgehalte met ca. 10% af tot ca 0,9%. Met alleen bemesting met kunstmest nam het organische koolstofgehalte toe met ca 10% tot ca 1,1%. Dit laatste werd geweten aan de toename van de ondergrondse biomassa (wortels en gewasresten).

Wadman en De Haan (1997) voerden een potproef uit over 20 jaar naar de afbraak van organische stof. Voor 36 verschillende bodemtypen onder bouwland werd het verloop van organische stof gemeten. Uit de proeven bleek dat de afbraak sterk gecorreleerd was met het initiële gehalte aan organische stof. Na extrapolatie werd berekend dat na 50 jaar voor alle bodemtypen het organische stofgehalte met ca. 25% was afgenomen ten opzichte van de beginsituatie en dat pH en voormalig landgebruik minder bepalend waren. Voor gronden met een hoger initieel organische stofgehalte was daarom de absolute afname groter dan voor gronden met een lagere uitgangssituatie. Wadman en de Haan concluderen dat er in de onderzochte bodemtypen kennelijk een zeker verband bestaat tussen 'jonge' minder resistente organische stof en 'oude' stabiele organische stof. De berekende afbraaksnelheden suggereren dat gronden met een laag organische stofgehalte relatief hoog aandeel 'jonge' organische stof bevatten, wat resulteert in een snelle, maar korte afbraak- periode. In bodems met een hoger organische stofgehalte is het grootste deel van de organische stof meer stabiel, maar gaat de periode van afbraak langer door.

In een 20-jarig experiment in Duitsland is de ontwikkeling in organische stofgehalte vergeleken tussen twee grondbewerkingswijzen (Stockfisch et al., 1999). Bij de conventionele bewerking werd 25-30 cm geploegd, bij minimale bewerking werd alleen oppervlakkig geëgd (6-8 cm) om de stoppel onder te werken en het zaaibed gereed te maken. Er werd voornamelijk graan verbouwd, maar ook andere gewassen waaronder suikerbiet en maïs. Na twintig jaar was het organische stofgehalte in de bodem onder minimum bewerking significant hoger

dan voor de conventionele bewerking. In de bovenste 5 cm was het bodemorganisch koolstofgehalte 17,5 g kg⁻¹ onder minimum bewerking en 11 tot 12 g kg⁻¹ onder conventionele bewerking. In de bovenste 10 cm was het verschil in het bodemorganisch koolstofgehalte tussen beide bewerkingsvormen het grootste. Vanaf 20 cm en dieper was er geen significant verschil. Tussen de verschillende bewerkingsvormen was geen significant verschil in hoeveelheid microbiële koolstof. Het plot met minimum grondbewerking werd na 20 jaar geploegd. Opmerkelijk was dat het organische stofgehalte direct terugviel naar het niveau van het conventioneel bewerkte plot. Waarschijnlijk is de opgebouwde organische stof een labiele vorm die snel afbreekt na bewerking waardoor bodembiota beter toegang krijgen voor afbraak. Langjarige minimale grondbewerking leidde dus weliswaar tot een hoger organische stofgehalte, maar na een intensieve bewerking, in dit geval ploegen, viel het organische stofgehalte direct terug naar het niveau van conventionele bewerking met ploegen.

Hermle et al. (2008) vonden in een 19-jarig experiment in Zwitserland geen verschil in organische stofgehalte voor de laag 0-40 cm van gronden met volledige bewerking (ploegen), minimale bewerking (eggen) en geen bewerking. Voor de laag 0-10 cm was het organische stofgehalte bij minimale en geen bewerking hoger dan bij ploegen. Echter in gronden waar werd geploegd was het organische stofgehalte hoger voor de laag 20-30 cm., waardoor het voor de totale laag 0-40 cm uitmiddelde. Er was dus sprake van een verdelingsverschil over de laag 0-40 cm en geen verschil in het totaal gehalte organische stof. Opgemerkt moet worden dat dit experiment plaatsvond in voormalig grasland dat bij aanvang van het experiment van grasland werd omgezet in bouwland. De eerste zeven jaar was voor alle gronden een sterke afname van organische stofgehalte te zien. Uit de resultaten werd geconcludeerd dat na veertien jaar er een nieuwe evenwichtsituatie was ontstaan. In hoeverre de landgebruiksverandering doorwerkt in de verschillen tussen de verschillende bewerkingswijzen wordt niet helemaal duidelijk. Duidelijk is echter wel dat bij een gelijke uitgangssituatie en met een gelijke voorgeschiedenis in grondgebruik, er geen verschil kon worden aangetoond tussen conventionele bewerking en minimale bewerking of geen bewerking. Wel werd onder minimale bewerking een groter aandeel in de stabiele humusfractie aangetroffen dan onder ploegen en was de stabiele fractie beter verdeeld dan bij geen bewerking, waar vooral toename door accumulatie van gewasresten in de bovenste 10 cm plaats vond. Door een hoger aandeel aan van deze meer stabiele humus in de nieuwe organische stof werd geconcludeerd dat bij minimale bewerking de organische stof duurzamer wordt opgebouwd dan bij geen bewerking.

Een mogelijk verschil in opbouw van organische stof bij beide voornoemde experimenten kan liggen in de verschillende uitgangssituaties. De percelen in het experiment van Stockfisch (1999) waren voorafgaand aan het experiment jarenlang als bouwland met ploegbeheer in gebruik. De percelen van het experiment van Hermle et al. (2008) waren voorgaand het experiment in gebruik als permanent grasland. Hierdoor kunnen de effecten van het historisch beheer en het beheer tijdens de experimenten anders hebben uitgespeeld op het organische stofgehalte. Ook de effecten van verschillende gewassen en verschillende bodems kunnen een rol hebben gespeeld.

Govaerts et al. (2009) analyseerden de uitkomsten van 78 onderzoeken waarbij minimum grondbewerking werd vergeleken met conventionele bewerkingsmethoden. Het koolstofgehalte van de bodem was bij minimale grondbewerking in zeven gevallen lager en in 40 gevallen hoger dan bij conventionele grondbewerking. In 31 gevallen werd geen verschil gevonden. Govaerts et al. (2009) concluderen dat de mechanismen die bepalen of koolstof wordt vastgelegd dan wel vrijkomt nog niet begrepen worden, hoewel een aantal processen die van invloed zijn wel onderscheiden kunnen worden (o.a. doorworteling, een basis koolstof gehalte van de bodem, dichtheid, poriënfractie, klimaat, landschappelijke ligging en historische factoren).

4.2 Modelstudies

De Willigen et al. 2008 heeft acht simulatiemodellen voor het omzetten van organische stof met elkaar vergeleken. De vergelijkingen in de modellen zijn onderling vergeleken en uitkomsten van simulaties zijn vergeleken. De simulaties geven ook inzicht in het proces van afbraak en opbouw van organische stof.

Volgens De Willigen et al. (2008) is een belangrijk probleem bij het vergelijken van model-uitkomsten met actuele waarden van het bodemorganische stofgehalte dat de actuele bodemorganische stofgehalten slechts ten dele het resultaat is van de huidige condities. Voormalig landgebruik, slechte drainage, afwezigheid van kunstmest en bekalken heeft de decompositie snelheid van het bodemorganische stofgehalte in het verleden, zeg voor 1900, sterk beïnvloed, en daardoor de accumulatie van het bodemorganische stofgehalte. Van de andere kant waren bij het vroeger landgebruik de gewasopbrengsten en daardoor ook gewas residuen die in de grond verwerkt werden lager dan de huidige niveaus, resulterend in lagere niveaus van bodemorganische stofgehalten dan verwacht op basis van de huidige toediening van organische meststoffen en gewasresten.

Ook het verschil in omzetting van jonge en oude organische stof speelt een belangrijke rol bij de afbraak-snelheid van de totale pool aan organische stof. De mineralisatiesnelheid van toegediend organisch materiaal (plantaardig/dierlijk) wordt na een jaar nog steeds sterk beïnvloed door de eigenschappen van het oorspronkelijke materiaal, en voor alle materialen is die mineralisatiesnelheid veel hoger dan de mineralisatiesnelheid van het bodemorganische stofgehalte welke al (veel) langere tijd in de bodem verblijft. Zo vond Janssen (1984) dat de mineralisatiesnelheid van 'nieuwe' bodemorganische stof (25 jaar oud) 18x zo hoog was als de mineralisatiesnelheid van 'oude' bodemorganische stof zoals die werd aangetroffen in landbouwgronden op voormalige zeebodems. Het feit dat het huidige bodemorganische stofgehalte slechts ten dele het huidige landgebruik reflecteert, bemoeilijkt het voorspellen en begrijpen van de ontwikkeling van het bodemorganische stofgehalte als gevolg van veranderingen in mestgift, management en klimaatverandering.

De uitgevoerde modelberekeningen geven voor de verschillende modellen soms sterk uiteenlopende resultaten. Echter, in een aantal gevallen kunnen wel algemene trends, met een zekere bandbreedte, worden aangegeven. Zo berekenen alle modellen een relatieve afbraaksnelheid van organische stof met een exponentieel verloop, afvallend van 2 tot 20 jaar waarna de relatieve snelheid min of meer constant blijft. Chardon et al. (2009) berekenen voor een maïs-gras teelt op zandgrond een gemiddelde afname in het bodemorganisch koolstofgehalte van 0,027% per jaar voor de eerste 30 jaar, van 0,0029% per jaar voor de periode van 30 tot 100 jaar en ca. 0,0003% per jaar voor de daarop volgende 1000 jaar. Berekeningen van De Willigen et al. (2008), uitgaande van een initieel organische stofgehalte van 0% en een constante toediening van organische bemesting, laten een exponentieel afvallende opbouw van organische stof zien met een sterke stijging van het gehalte in de eerste 20 jaar en sterk afvallend na 30 tot 50 jaar en een min of meer constant gehalte na 100 jaar. Ook Chardon et al. (2009) berekenen een dergelijk verloop met voor de maïs-gras teelt op zand een stijging van het organische stofgehalte van 2% naar ca. 2,5% voor de eerste 100 jaar, en van ca. 2,5% naar ca. 2,7% voor de daarop volgende 1000 jaar. Hassink (1995) introduceerde het concept van verzadiging van beschermingscapaciteit: als in het verleden de grond verzadigd is geweest met organische stof zou nieuw toegevoegde organische stof niet meer beschermd kunnen worden. Dat zou verklaren waarom het organische stofgehalte een limiet kent. Berekeningen uitgaande van een halvering van toediening van de organische bemesting nadat een maximum gehalte was bereikt, laten een afname van het bodemorganische stofgehalte zien met 2-8 g kg⁻¹ over een periode van 20 jaar, ofwel in gehalten van 20 naar 18 g kg⁻¹ (van 2% naar 1,8%) of van 60 naar 52 g kg⁻¹ (van 6% naar 5,2%).

Dat een afname in organische stof niet meteen een negatief effect hoeft te hebben op de opbrengsten blijkt uit een 20-jarige veldproef van Droeven et al. (1982), waarin verschillende niveaus van organische bemesting werden toegepast waarbij de groei bleef toenemen ondanks een afgenomen organische stofgehalte. Hoogerkamp (1973) toonde aan dat het effect van het bodemorganische stofgehalte op opbrengst vooral het

effect was van door mineralisatie vrijkomende stikstof. In een 9-jarig experiment, werd geen additioneel effect van het bodemorganische stofgehalte op opbrengst gevonden. Toediening van N-kunstmest kon de opbrengstreductie compenseren op gronden met lagere bodemorganische stofgehalten. De Willigen et al. (2008) achten het risico van opbrengstreductie en ernstige schade aan de bodemstructuur door een verminderd organische stofgehalte gering. Een afname in het bodemorganische stofgehalte van 2-8 g kg⁻¹ (halvering organische bemesting) kan resulteren in een afname van stikstofmineralisatie, die geschat wordt op 30-50 kg N per ha per jaar. Afname van het bodemorganische stofgehalte (bij halvering organische mestgift) zal vooral in de eerste 20 jaar plaatsvinden (2-8 g kg⁻¹). Daarna zal het honderden jaren duren om nog eens 2-8 g kg⁻¹ te verliezen. En dat laatste verlies zal minder effect hebben op stikstofmineralisatie dan het bodemorganische stofgehalte verlies in de eerste 20 jaar.

Chardon et al. (2008) concluderen uit hun modelberekeningen en uit literatuurgegevens dat het bodemorganisch koolstofgehalte met 10 tot 20 kg C ha⁻¹ toeneemt per ton toegediende drijfmest. Het positieve effect op het bodemorganisch koolstofgehalte neemt af als de bemesting langere tijd voortduurt (langer dan 30-50 jaar). Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door verzadiging van kleideeltjes die het bodemorganische koolstofgehalte beschermd tegen afbraak.

4.3 Trendanalyses

4.3.1 Nederland

Reijneveld et al. (2009) hebben een grote dataset onderzocht met ca. 2 miljoen uitslagen van het koolstofgehalte in organische stof in de bodem. Alle monsters zijn op identieke wijze genomen door het bedrijfslaboratorium voor Grond- en Gewasonderzoek (BLGG). De monsters zijn genomen op landbouwbedrijven door heel Nederland in de periode 1984 tot 2004. De bemonsteringsdiepte voor permanent grasland was 0-5 cm voor de periode 1984-2000 en 0-10 cm in de periode daarna. Voor bouwland en maïsland was de bemonsteringsdiepte 0-25 cm voor de hele periode. Vanwege de verandering in bemonsteringsdiepte is voor grasland de periode 1984-2000 geanalyseerd en voor bouwland en maïsland de periode 1984-2004. De analyse is uitgevoerd voor landbouwgrond op minerale bodems voor heel Nederland en voor landbouwgrond verdeeld over negen regio's onderling verschillend in bodemtextuur, organische stofgehalte en landgebruik. Het gemiddelde bodemorganisch koolstofgehalte voor Nederland bedroeg voor grasland 43 g kg⁻¹, voor bouwland 20 g kg⁻¹ en voor maïsland 23 g kg⁻¹. Uit de analyse blijkt dat voor de minerale gronden het bodemorganisch koolstofgehalte gehalte onder grasland, akkerland en maïsland over de onderzochte periode gemiddeld jaarlijks toenam met resp. 0,10, 0,08 en 0,23 g C kg⁻¹ bodem. De relatief grote toename in maïsland wordt veroorzaakt doordat het areaal maïsland in de analyseperiode sterk is toegenomen door omzetting van grasland en bouwland in maïsland. Daarmee zou het dus geen effect zijn dat optreedt door het verbouwen of de teeltwijze van maïs, maar door een veranderd landgebruik. Bij de regionale analyse kwam een meer gespreid beeld naar voren uit de data. Zowel toename als afname van het bodemorganisch koolstofgehalte kwam voor onder zowel grasland als bouwland binnen de verschillende regio's. Het aantal situaties waarin het gehalte toename was wel groter dan het aantal waarin het gehalte afnam.

Hanegraaf et al. (2009a) hebben een trendanalyse uitgevoerd op data van organische stofgehalten van zandgronden onder grasland, gras-maïs wisselteelt en permanent maïsland voor de periode 1984-2004. De data waren net als bij Reijneveld et al. (2009) afkomstig van het BLGG en werden onderverdeeld naar de provincies Noord Brabant, Gelderland, Overijssel en Drenthe. Het organische stofgehalte varieerde aanzienlijk tussen de verschillende teelten en de verschillende provincies. Er werd voor ieder van de onderzochte teelten een duidelijke Noord-Zuid gradiënt gevonden van het organische stofgehalte, waarbij het gehalte in noordelijke

richting toeneemt. Voor de verschillende teelten werd geen uniforme trend in toe- of afname van het organische stofgehalte gevonden. Het organische stofgehalte nam in alle drie de teelten zowel af als toe. Voor de mediaan van het organische stofgehalte onder grasland werd een licht stijgend gehalte gevonden voor de periode 1984-2004. Voor gras-maïs wisselteelt en de continue maïsteelt werd een licht dalende trend in de mediaan van het organische stof gehalte gevonden. Dit gold voor iedere provincie, maar iedere provincie kende daarbij een eigen niveau, Drenthe het hoogst en Noord Brabant het laagst. In 75% van alle bodems bleef het organische stofgehalte gelijk of nam het toe, bij zowel permanent grasland als permanent maïsland. Gezien het wisselende beeld bij vergelijkbare teelten en bodems concluderen Hanegraaf et al. (2009a) dat het gezien de onduidelijke trend het logisch lijkt om high-risk percelen aan te wijzen dan high-risk gebieden.

In een vervolgonderzoek in de provincie Drenthe (Hanegraaf et al., 2009b) zijn de eerdere resultaten van Hanegraaf et al. (2009a) verder uitgewerkt. Een dalende trend is vastgesteld voor bijna 30% in de onderzochte aardappelpercelen, 60% van de bollenpercelen, bij 15% van de maïspcelen, 90% van de blijvende graspercelen op laagveen, en 20% van blijvende graspercelen op overige veengronden. Een stijgende trend was alleen zichtbaar in enkele maïspcelen. In alle overige precelen is sprake van een gelijkblijvende trend. Opgemerkt kan dus worden dat, op de bollen- en blijvend graspercelen op laagveen na, in het merendeel van de percelen geen achteruitgang kon worden aangetoond. In de eerdere studie (Hanegraaf et al. 2009a) werd een stijgende trend in organische stof gevonden voor 20% van alle percelen. In het vervolgonderzoek (Hanegraaf et al. 2009b) werd een stijgende trend slechts voor enkele maïspcelen gevonden. Het aantal percelen waar het vervolgstudie (2009b) betrekking op had, was echter wel lager dan in de eerdere trend analyse (2009a).

In het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (LMB) wordt sinds 1993 bodemfysische en bodemchemische kenmerken opgenomen, waaronder het organische stofgehalte . Het LMB is een meerjarig meetprogramma met circa tweehonderd locaties, voornamelijk op landbouwgrond. De metingen worden elke zes jaar uitgevoerd op tien combinaties van grondgebruik en grondsoort. De eerste cyclus vond plaats tussen 1993 en 1997, de tweede tussen 1999 en 2003. In de eerste meetronde zijn de bodemlagen van 0 tot 10 en 30 tot 50 cm en het bovenste grondwater bemonsterd. Analyses zijn uitgevoerd op organische stof, zware metalen en organische microverbindingen. In de tweede meetronde is alleen de bodemlaag van 0 tot 10 cm bemonsterd en geanalyseerd op organische stof en zware metalen. In deze ronde namen voor de eerste keer landbouwbedrijven op lössgrond deel. Van hen is ook de bodemlaag 30 tot 50 cm bemonsterd en zijn analyses op organische microverbindingen uitgevoerd. Uit de resultaten blijkt dat de hoeveelheid organische stof en zware metalen in de bodem van landbouwgrond en bos in de periode 1993 -2003 niet aantoonbaar is veranderd. Waargenomen verschillen vallen binnen de variatie van de meetresultaten (De Jong en Van der Hoek, 2009).

4.3.2 Europa

België

Door Sleutel et al. (2003) is het bodemorganisch koolstofgehalte onderzocht in Vlaams bouwland. Over de periode 1989-2000 is voor meer dan 190.000 monsters van de laag 0-24 cm het bodemorganisch koolstofgehalte bepaald. Over deze periode is de ontwikkeling van het bodemorganisch koolstofgehalte geanalyseerd, rekening houdend met regio en bodemtextuur. Uit de studie komt naar voren dat voor de onderzochte periode het bodemorganisch koolstofgehalte afgenomen is voor alle onderscheiden gebieden, variërend van -0.012% organisch koolstof jr⁻¹ tot -0.061% organisch koolstof jr⁻¹. Voor geheel Vlaanderen daalde het gemiddelde organisch koolstofgehalte voor de periode 1990-1999 van resp. 1.993% tot 1.778%, een afname met 0.215%. In één van de regio's werd een positief verband gevonden tussen het aantal varkens per hectare bouwland en het bodemorganisch koolstofgehalte. Sleutel et al. (2003) concluderen hieruit dat het organische stofgehalte gedaald is door het verminderd toepassen van varkensmest. Voor heel Vlaanderen suggereren ze

dat de Vlaamse mestwetgeving (Manure Action Plan) uit 1990 samen met de lichte textuur (laag kleigehalte) van de bodem belangrijke redenen zijn voor het afgenomen organische stofgehalte. In de studie wordt opgemerkt dat in veel regio's het type bedrijf is veranderd van gemengd bedrijf naar akkerbouwbedrijf. Echter, in hoeverre veranderd landgebruik (omzetting van grasland naar bouwland) een rol speelt bij de afname van het organische stofgehalte blijft onbesproken in het artikel.

Engeland en Wales

Bellamy et al. (2005) onderzocht het organische stofgehalte van 5.662 monsters uit de Nationale Bodeminventarisatie van Engeland en Wales en berekende de trend in het gehalte voor de periode 1978-2003. De analyse liet zien dat het gemiddelde organische stofgehalte daalde met een snelheid van 0,6% per jr^{-1} . De snelheid waarmee het organische stofgehalte afneemt nam toe met de toename van het organische stofgehalte in de grond. Voor gronden met een organische stofgehalte van 100 g kg^{-1} (humusrijke gronden) was de snelheid meer dan 2% jr^{-1} . De afname werd gevonden voor alle vormen van landgebruik. Hieruit werd geconcludeerd dat er een verband bestaat tussen de afname van het organische stofgehalte en klimaatverandering. Veranderingen in landgebruik (omzetten van grasland naar bouwland) konden niet worden onderzocht vanwege gebrek aan gegevens. Dit kan echter grote gevolgen hebben voor toe of afname van het organische stofgehalte. De data uit de studie zijn deels afkomstig uit veengronden. Van deze gronden is bekend dat ze door ontwatering en bewerking veel organische stof verliezen. Smith et al. (2007) plaatsten een aantal kanttekeningen bij de resultaten van Bellamy et al. (2005). Door een afname in aantal varkens en koeien in de onderzochte periode zou minder mest zijn toegediend aan landbouwgronden. Verder zou in de onderzochte periode de oogst efficiënter zijn geworden waardoor er minder gewasresten op het land achter blijven, toename van het areaal maïs in plaats van hooi (grasland), diepere ploegdiepte waardoor er meer mineralisatie en verdunning van het bodemorganisch koolstofgehalte is opgetreden en tot slot effecten van landbouwkundige verbeteringen uit vroegere perioden, zoals ontwatering, diepploegen etc., die langdurige effecten op de afname van het bodemorganisch koolstofgehalte als gevolg kunnen hebben.

Frankrijk

In Frankrijk voerde Saby et al. (2008) een trendanalyse uit op bodemdata verzameld in de Franse Jura over de periode 1990-2004. De data werden bij landbouwbedrijven verzameld door gecertificeerde commerciële bureaus voor bodemvruchtbaarheidsadviezen en opgeslagen in de Franse nationale database. Bodemonsters werden genomen van de ploegvoor bij bouwland en van de laag 0-30 cm bij grasland. De analyse laat een negatieve trend zien voor het bodemorganisch koolstofgehalte in het studiegebied. Het bodemorganisch koolstofgehalte gehalten nam af met respectievelijk 22,4, 18 en 16,4 voor de perioden 1990-1994, 1995-1999 en 2000-2004. Het verlies aan het bodemorganisch koolstofgehalte over de periode was gemiddeld 0,09% per jaar ofwel een verlies van $0,26 \text{ g kg}^{-1}$ bodem. Het initieel bodemorganisch koolstofgehalte is een belangrijke factor bij de mate van afname van het bodemorganisch koolstofgehalte. Hierbij geldt hoe hoger het initiële gehalte hoe groter de afname. Verder werd een sterke relatie met de hoogte gevonden, kleigehalte, uitwisselbaar calcium en landgebruik. Het verlies wordt verder toegeschreven aan gestegen temperatuur op de lager gelegen gronden waar de gemiddelde temperatuur gedurende de meetperiode meer dan 1 graad is gestegen, terwijl de temperatuur op de hoger gelegen gronden niet aantoonbaar is gestegen. Ook het omzetten van permanent grasland naar bouwland heeft het organische stofgehalte doen afnemen.

5 Discussie en conclusies

Afgelopen jaren is veel gediscussieerd over het organische stofgehalte in de bodem, neemt het af, neemt het toe of blijft het misschien wel onveranderd. Dat deze discussie niet nieuw is blijkt uit o.a. een publicatie van Kortleven en Pijl (1954) waarin het effect van vervanging van stalmest door kunstmest op organische stof wordt besproken. De discussie over veranderingen in het organische stofgehalte speelt niet alleen in Nederland (o.a. Reijneveld et al., 2009; Hanegraaf et al., 2009a), maar wordt ook internationaal gevoerd (o.a. Bellamy et al., 2005; Sleutel et al., 2003; Saby et al., 2008). De discussie over recente veranderingen in het gehalte organische stof kan in verschillend perspectief worden gezien. Eventuele veranderingen kunnen gevolgen hebben voor de bodemvruchtbaarheid (o.a. gewasopbrengsten), het milieu (uitspoeling van nutriënten en bestrijdingsmiddelen) en het klimaat (koolstofvastlegging).

Landbouwkundig gebruik is van invloed op het organische stofgehalte. Naast veranderingen in landgebruik en teeltmethoden heeft ook toepassing van verschillende soorten mest gevolgen voor het organische stofgehalte. Met groenbemesting en dierlijke drijfmest worden veel organische bestanddelen toegevoegd aan de bodem. Echter, de afbraaksnelheid van deze stoffen is relatief hoog. De humificatiecoëfficiënt (fractie van de organische bestanddelen die na een jaar nog in de bodem resteren) neemt toe in de volgorde bovengrondse plantendelen ($h_c = 0,2-0,3$) < wortelresten ($h_c = 0,35$) < drijfmest ($h_c = 0,4$) < vaste mest ($h_c = 0,5$) < GFT ($h_c = 0,8$) < groencompost ($h_c = 0,95$). Omdat de koolstofgehalten van de verschillende meststoffen sterk variëren, is het effect op de koolstofopbouw in de bodem ook sterk wisselend. Van veel dierlijke mestsoorten en gewassoorten is de humificatiecoëfficiënt bekend (Bodemkundige dienst van België / Universiteit van Gent, 2006). Slechts een deel van deze waarden zijn afkomstig van metingen. Veel waarden zijn afkomstig van schattingen aan de hand van vergelijking met gewassen waarvan de waarde wel is gemeten. Over het algemeen worden de gehalten als betrouwbaar ervaren en breed toegepast bij modelberekeningen.

Veranderingen in organische stofgehalte kan ook effect hebben op de stikstofbeschikbaarheid. Bij een daling van de organische stofvoorraad zal in de eerste drie tot tien jaar in eerste instantie de instabiele fractie organische stof afnemen (De Willigen et al., 2008). Deze instabiele fractie maakt echter slechts een klein deel uit van de totale organische stofvoorraad van de bodem, en de afbraak van deze fractie zal dus slechts een gering effect hebben op het totale organische stofgehalte. Deze instabiele fractie is echter rijker aan stikstof dan de stabiele organische stof, waardoor geringere totale hoeveelheid ervan wel een significant effect zal hebben op de stikstoflevering en daarmee op de gewasgroei. Bij een daling van het organische stofgehalte door het afnemen van de instabiele fractie organische stof neemt gedurende de eerste jaren van afname de stikstoflevering sneller af dan de daling van het organische stofgehalte doet vermoeden. Dit effect zal sterker merkbaar zijn op de landbouwgronden met een hoge fractie instabiele organische stof (Bodemkundige dienst van België / Universiteit van Gent, 2006).

Niet alleen de fysische, chemische en biologische kanten van organische stof verdienen aandacht, maar ook de wijze waarop over organische stof wordt gedacht, en als onderdeel daarvan koolstof, verdient aandacht. In een artikel van Janzen (2006) wordt een dilemma besproken dat in het beheer van organische stof opgesloten lijkt te liggen. Enerzijds is er het belang vanuit bodemvruchtbaarheid en koolstofvastlegging om organische stof vast te leggen en vast te houden in de bodem. Anderzijds heeft organische stof, in biologisch en landbouwkundig opzicht, het meeste nut als het wordt omgezet. De vraag is dus of we organische stof kunnen behouden, of zelfs kunnen opbouwen, en tegelijkertijd de voordelen van afbraak van organische stof kunnen benutten? De hoeveelheid organische stof kan worden vergeleken met het waterniveau in een stuwmeer. Het waterniveau wordt daarbij bepaald door twee factoren: de hoeveelheid water die er gedurende een bepaalde

tijdperiode instroomt en de hoeveelheid die er gedurende dezelfde periode uitstroomt. Stroomt er veel uit, meer dan er binnenstroomt, dan kan weliswaar veel energie worden opgewekt, maar tegelijkertijd daalt het niveau en wordt op enig moment te laag om nog stroom op te wekken. Het weer laten stijgen van het waterniveau kan door de uitstroom te beperken. Dat gaat dan wel ten koste van de energieopwekking. Voor organische stof geldt naar deze analogie dat de hoeveelheid afneemt als er minder aangevoerd wordt dan er wordt afgebroken. Op enig moment kan dan de levering van bodemdiensten in gevaar komen. Opbouw van organische stof kan, maar gaat, tijdelijk, ten koste van de levering van diensten als bijv. nutriëntenbeschikbaarheid. De wijze waarop de opbouw kan plaatsvinden is uiteraard door aanvoer van organische stof, maar belangrijker is de regulering van microbiële activiteit. Als de microbiële activiteit wordt geremd, zal de afbraak afnemen en de organische stofvoorraad toenemen. Door grondbewerking zoveel mogelijk achterwege te laten zou de microbiële activiteit geremd kunnen worden. Dit wordt bevestigd door o.a. Stockfisch et al. (1999) die een hoger organische stofgehalte vonden in een 20-jarig experiment waarbij grond minimaal werd bewerkt. Echter, toen na twintig jaar de grond werd geploegd, daalde het organische stofgehalte in een jaar naar het niveau van percelen die gangbaar werden beheerd en geploegd. Hermle et al. (2008) echter vonden in een 19-jarig experiment geen verschil in organische stofgehalte tussen ploegen, minimale bewerking en geen bewerking. Tegelijkertijd constateren ze dat de fractie stabiele humus bij minimale bewerking beter verdeeld is over het bodemprofiel waardoor het langer zal persisteren. Govaerts et al. (2009) vonden na analyse van 78 onderzoeken over vergelijking van intensieve en extensieve bodembewerking geen eenduidig beeld van grondbewerking op het organische stofgehalte. Een andere, door het beheer beïnvloedbare, belangrijke factor is de pH (maat voor zuurgraad) van de bodem. Bij een hoge pH (ca. 7-8) mineraliseert organische stof sneller dan bij een lage pH (ca. 3-4). Bij een lage pH is het bodemleven minder actief. Voor gewasgroei is het wenselijk om het bodemleven voldoende te stimuleren. Daarom wordt een matig lage pH (4,8-5,5) aanbevolen (Van Eekeren et al., 2008).

Textuur speelt een belangrijke rol bij de opbouw van organische stof. Kleideeltjes beschermen organische stof tegen afbraak (Janssen et al., 1990; Hassink, 1995). Een praktijkregel, toegepast voor de Nederlandse situatie, is dat het organische stofgehalte met 1 g kg^{-1} stijgt per 1% klei (deeltjes $< 2 \text{ }\mu\text{m}$). De precieze werking van fijne bodemdeeltjes is echter niet bekend en dus moeilijk te modelleren. Hassink (1995) introduceerde het concept van verzadiging van beschermende capaciteit van bodemdeeltjes, die organische stof beschermen tegen afbraak. Als in gronden de verzadigingscapaciteit voor bescherming eenmaal is bereikt, wordt nieuwe organische stof niet meer beschermd en zal sneller afbreken. Dit principe zou verklaren waarom het organische stofgehalte van gronden asymptotisch tot een bepaald maximum oploopt. Hassink (1995) geeft een relatie tussen de verzadigingscapaciteit en het gehalte aan deeltjes kleiner dan $20 \text{ }\mu\text{m}$. De relatie is echter verschillend voor verschillende kleisoorten. Zo worden afbraak en opbouw snelheden voor organische stof berekend die voor kaolinit en smectiet kleien anders zijn dan voor illiet, wat veel in de Nederlandse kleigronden voorkomt.

Uit langjarige trendanalyse van organische stof in Nederland komt geen eenduidig beeld naar voren over toename of afname (Reijneveld et al., 2009; Hanegraaf et al., 2009a). In België (Sleutel et al., 2003) en het Verenigd Koninkrijk werd wel een afnemende trend in organische stofgehalte gevonden. Hier werden mogelijk verbanden met afgenomen toepassing van mest gesuggereerd. Uit de onderzoeken wordt echter niet duidelijk in hoeverre landgebruiksveranderingen een rol spelen bij de afname. In de onderzochte periode zijn ook veel (permanente) graslanden omgezet in bouwland en bouwland met continu maïsteelt. Bij een dergelijke omzetting zal het organische stofgehalte, dat hoog is onder grasland, afnemen tot een nieuw evenwicht is bereikt behorend bij continu maïsland. Een andere reden voor afname kan het hoge initiële organische stofgehalte zijn. Bekend is dat bij hoge initiële waarden de afbraak in absolute zin groter is dan bij lage initiële waarden. Een dergelijke afname treedt o.a. op bij veranderend landgebruik. Door (historische) ontwatering en grondbewerking neemt het organische stofgehalte van dergelijke gronden af. Uit onderzoek van Bellamy et al. (2005) blijkt inderdaad dat gronden met een hoog organische stofgehalte in de beginperiode van de analyse een sterkere daling laten zien dan gronden met een laag gehalte. Bij de gronden met de laagste initiële waarden was zelfs een stijging

van het organische stofgehalte te zien. Smith et al. (2007) concluderen dat klimaatverandering niet de enige oorzaak is voor afnemende koolstofgehalten in de bodem. Daarnaast noemen zij als belangrijke factoren de afname van de veestapel en daarmee de beschikbare mest, meer efficiënte oogstmethoden met minder gewasresten, grotere oppervlakten maïs met minder gewasresten, grotere ploegdiepte en effecten van landgebruiksveranderingen uit het verleden.

Modellen waarmee organische stof of koolstof in de bodem kan worden geëvalueerd voldoen over het algemeen redelijk tot goed voor globale berekeningen. Wel moet onderscheid gemaakt worden in modellen voor voorspelling van korte- en langetermijn trends. Ook is er verschil in modellen in de wijze van berekenen van de organische stofpool. Sommige modellen hanteren één pool met een al dan niet variabele afbraak-snelheid, andere modellen hanteren meerdere pools voor instabiele, stabiele en intermediaire pools (De Willigen et al. 2008). Kennis over parameters benodigd voor de modellen is over het algemeen voldoende voorhanden. Echter, sommige parameters, en daarmee modeluitkomsten, zijn lastig te valideren aan praktijk-situaties. Organische stofgehalten in het veld zijn een resultante van het huidige landgebruik en beheer, maar ook van voormalig landgebruik. Ontwatering, geteelde gewassen, bemesting, bekalking en grondbewerking uit vroeger tijden hebben ook nu nog invloed op de aanwezige hoeveelheid organische stof. Omdat over dit soort zaken vaak weinig bekend is, zijn actuele gegevens niet altijd eenduidig te interpreteren. Bovendien verloopt de tijdschaal van opbouw en afbraak over decennia dan wel eeuwen. Kennis over effecten van huidig en voormalig landgebruik en teeltwijzen op de verschillende fracties van organische stof is nog niet structureel aanwezig.

Er bestaan zeker mogelijkheden om door een zorgvuldig beheer het absolute gehalte organische stof te behouden. Opbouw, maar ook volledige afbraak, is een kwestie van lange adem. Een langjarig experiment uit Engeland (Johnston, 1986) laat een opbouw van het bodemorganisch koolstofgehalte zien van 2,3% in 120 jaar. Bij een eventuele vermindering van het organische stofgehalte kan op middellange termijn een verminderde stikstofvoorziening wel een rol gaan spelen door een vermindering van de gemakkelijk afbreekbare fractie organische stof welke een relatief hoog N-gehalte heeft. Het op langere termijn hoog houden van het organische stofgehalte in de bodem kan door verhogen van de stabiele organische stoffractie. Deze fractie breekt minder snel af maar heeft wel een lager N-gehalte. Dat is in het verleden al gemineraliseerd.

Samenvattend kan gezegd worden dat we op globaal niveau de meeste vragen over opbouw, afbraak en trends van organische stof kunnen beantwoorden. We weten globaal hoe organische stof is samengesteld, hoe de opbouw en afbraak van organische stof verloopt en welke factoren daarop van invloed zijn. Met deze kennis kunnen we op globaal niveau uitspraken doen.

Op meer gedetailleerd niveau weten we veel, maar ook nog heel veel niet. We weten wel globaal hoe afbraakprocessen verlopen, maar de precieze processen zijn moeilijk te analyseren omdat ze over lange tijd verlopen (soms meerdere eeuwen), historische factoren de opbouw en afbraak beïnvloeden, de deelprocessen niet altijd bekend zijn of (nog) niet begrepen worden en omdat de invloed van bodembiota complex is (veel verschillende soorten). Ook effecten van management in interactie met fysische en biotische factoren zijn nog niet altijd bekend. Hierdoor zijn bijv. modelvoorspellingen niet onder alle omstandigheden even nauwkeurig.

De keuze van gewas en teelt (beheer) speelt een belangrijke rol bij het organische stofverloop. Er zijn veel experimenten en diverse trendanalyses uitgevoerd. Desondanks blijft het effect van verschillende gewassen (continu en wisselteelten), wisselingen in gewas en teeltwijzen (management) in combinatie met bodem, klimaat en historisch landgebruik op het organische stofgehalte toch een moeilijk te voorspellen proces.

In de context van de Europese Bodemstrategie, waarbij afname van de hoeveelheid organische stof als één van de belangrijkste bodembedreigingen wordt genoemd, is het dus vanwege alle genoemde onzekerheden moeilijk om te zeggen of deze bedreiging zich in Nederland werkelijk voordoet bij de minerale gronden.

Aanbevolen wordt om met beschikbare gegevens op regionaal niveau na te gaan wat de invloed is van veranderend landgebruik en landbouwkundig beheer op het organische stofgehalte. Daarnaast wordt aanbevolen om het organische stofverloop meer structureel te volgen in praktijksituaties bij bekende voorgeschiedenis, beheer en teelt. Belangrijk is daarbij een onderscheid te maken in de organische stof nodig voor de leverantie van nutriënten en voor het in stand houden dan wel opbouwen van de totale hoeveelheid organische stof die belangrijk is voor o.a. structuur en vochtleverend vermogen van de bodem. Deze gegevens kunnen dan ook bijdragen aan nieuwe inzichten en betere modellen en voorspellingen.

Literatuur

- Bodemkundige Dienst van België / Universiteit van Gent, Vakgroep Bodembeheer en bodemhygiëne, 2006. Ontwikkelen van een expertsysteem voor het adviseren van het koolstofbeheer in de landbouwbodems. Leuven, Gent. 146 p.
- Bellamy, P.H., P.J. Loveland, R.I. Bradley, R.M. Lark en G.J.D. Kirk, 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* 437, 245-248.
- Brussaard, L., 1994. Interrelationships between biological activities, soil properties and soil management. In: D.J. Greenland and I. Szabolcs (eds.). *Soil resilience and sustainable land use*. Wallingford, UK. CAB International: 309-329.
- Chardon, W.J., H. Heesmans en P.J. Kuikman, 2009. Trends in carbon stocks in Dutch soils: datasets and modeling results. *Alterra-rapport 1869*, Alterra, Wageningen.
- Dousset, S., M. Thévenot, D. Schrack, V. Gouy en N. Carluer, 2010. Effect of grass cover on water and pesticide transport through undisturbed soil columns, comparison with field study (Morcille watershed, Beaujolais). *Environmental Pollution* 158(7): 2446-2453.
- Droeven, G., L. Rixhon, A. Crohain and Y. Raimond, 1982. Long term effect of different systems of organic matter supply on the humus content and on the stability of soils with regard to the crop yield in loamy soils. In: D. Boels, D.B. Davies and A.E. Johnston (eds.). *Soil degradation*. Rotterdam, Balkema,: 203-222.
- Edmeades, D.C., M. Judd en S.U. Sarathchandra, 1981. The effect of lime on nitrogen mineralization by grass growth. *Plant and Soil* 60: 177-186.
- Eekeren, N. van, J. Bokhorst, H. de Boer, M. Hanegraaf, 2008. Van schraal naar rijk zand. Beoordeling van maatregelen voor verbetering van zandgronden op melkveebedrijven. Wageningen Louis Bolk Instituut, 38 p.
- Eekeren, N. van, H. de Boer, M. Hanegraaf, J. Bokhorst, D. Nierop, J. Bloem, T. Schouten, R. de Goede en L. Brussaard, 2010. Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry* 42 (9): 1491-1504.
- Emissieregistratie, 2010. *Website Emissieregistratie*. RIVM, Bilthoven; PBL, Den Haag/Bilthoven; CBS, Den Haag; Rijkswaterstaat-Waterdienst, Lelystad; Alterra, Wageningen; AgentschapNL, Utrecht en TNO, Utrecht.
- Govaerts, B., N. Verhulst, A. Castellanos-Navarrete, K.D. Sayre, J. Dixon en L. Dendooven, 2009. Conservation agriculture and soil carbon sequestration: between myth and farmer reality. *Critical reviews in plant science*, 28: 97-122.
- Hack-ten Broeke, M.J.D., C.L. van Beek, T. Hoogland, M. Knotters, J.P. Mol-Dijkstra, R.L.M. Schils, A. Smit en F. de Vries, 2009. Kaderrichtlijn Bodem; Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden. Wageningen, Alterra. Rapport 2007.

- Hanegraaf, M.C., E. Hoffland, P.J. Kuikman en L. Brussaard, 2009a. Trends in soil organic matter in Dutch grasslands and maize fields on Sandy soils. *European Journal of Soil Science* april 2009, 60, 213-222.
- Hanegraaf, M.C., D.W. Bussink, L. van Schöll en M.J.G. de Haas, 2009b. De afbraaksnelheid van organische stof in Drenthe. Rapport 972.06. NMI, Wageningen, 89 p.
- Hassink, J., 1995. Organic matter dynamics and N mineralization in grassland soils. Ph.D. Thesis, Wageningen, 250 p.
- Hassink, J., A.P. Witmore en J. Kubát, 1997. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. *European Journal of Agronomy* 7 (1997); 189-199.
- Haynes, R.J., 1984. Lime and phosphate in the soil - plant system. *Adv. Agron*: 37: 249-315.
- Haynes, R.J. en R. Naidu, 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient cycling in Agroecosystems* 51: 123-137.
- Hendriks, R.F.A., 1992. Afbraak en mineralisatie van veen. Wageningen, Staring Centrum, Rapport 199, 152 p.
- Henkens, C.H., 1976. Hoger humusgehalte een moeilijke zaak. *Bedrijfsontwikkeling* (7): 51-53.
- Hermle, S., T. Anken, J. Leifeld en P. Weisskopf, 2008. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil & Tillage* 98: 94-105.
- Hoogerkamp, M., 1973. Accumulation of organic matter under grassland and its effect on grassland and arable crops. *Agric. Res. Reports* 806, 24 p.
- Hopkins, D.W., I.S. Waite, J.W. McNicol, P.R. Poulton, A.J. Macdonald en A.G. O'Donnell, 2009. Soil organic carbon contents in long-term experimental grassland plots in the UK (Palace Leas and Park Grass) have not changed consistently in recent decades. *Global Change Biology* 15(7): 1739-1754.
- Huinink, J., 2008. Het organische stofgehalte in de bodem, Oosterbeek, Bodemconsult Arnhem, notitie, 9 p.
- Janssen, B.H., 1984. A simple method for calculating decomposition and accumulation of 'young' soil organic matter. *Plant and Soil* 76: 297-304.
- Janssen, B.H., 1986. Een één-parametermodel voor berekening van de decompositie van organisch materiaal. *Vakblad voor biologen* 66 (20): 433-436.
- Janssen, B.H., P. van der Sluijs en H.R. Ukkerman, 1990. Organische stof. In: W.P. Locher en H. de Bakker. *Bodemkunde van Nederland. Deel 1, Algemene bodemkunde, hoofdstuk 8*. Den Bosch, Malmberg, pp. 109-127.
- Janzen, H.H., 2006. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology & Biochemistry* 38: 419-424.
- Johnston, A.E., 1986. Soil organic matter effects on soils and crops. *Soil use management* 2: 97-105.

Jong, C.J. de en K.W. van der Hoek, 2009. Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Resultaten tweede meetronde, 1999-2003. RIVM, Bilthoven, Rapport 680718001/2009, 103 p.

Kolenbrander, G.J., 1974. Efficiency of organic manure in increasing soil organic matter content. Trans. INT. Congr. Soil Sci. 2: 129-136.

Kooijman, A.M., I. Lubbers and M. van Til, 2009. Iron-rich dune grasslands: Relations between soil organic matter and sorption of Fe and P. Environmental Pollution, 157 (11): 3158-3165.

Kortleven, Jac. en H. Pijl, 1954. De voorziening van de grond met organische stof. Landbouwkundig tijdschrift, 66 (2): 90-98.

Kortleven, J., 1963. Kwantitatieve aspecten van humusopbouw en humusafbraak. Versl. Landbouwk. Onderz. 69.1. Wageningen, Pudoc, 109 p.

Kuhlman, T, R. Michels en B. Groot, 2010. Kosten en baten van bodembeheer. Maatregelen tegen winderosie, veenafbraak en ondergrondverdichting. Den Haag, LEI-rapport 2010-058.

Leeuwen, Paul van, Annette Pronk en Henk van den Berg, 2010. Meer inzicht in afbraak organische stof. De Boomkwekerij 7: p. 15.

Reijneveld, A. J. van Wensem, O. Oenema, 2009. Soil organic carbon contents of Agricultural land in the Netherlands between 1984 and 2004. Geoderma 152 (2009): 231-238.

Riemens, M.M., R.Y. van der Weide en J. Hoek, 2004. Milieubelasting door onkruidbestrijding in een biologisch, geïntegreerd en gangbaar systeem. Wageningen Praktijkonderzoek plant en omgeving, PPO projectrapport nr. 520217.

Saby, N.P.A., D. Arrouays, B. Lemercier, S. Folliot, C. Walter en C. Schvartz, 2008. Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004. Soil Use and Management 24: 254-262.

Sleutel, S., S. de Neve, G. Hofman, P. Boeckx, D. Beheydt, O. van Cleemput, I. Mestdagh, P. Lootens, L. Carlier, N. van Camp, H. Verbeeck, I. vande Walle, R. Sason, N. Lust and R. Lemeur, 2003. Carbon stock changes and carbon sequestration potential of Flemish cropland soils. Global Change Biology (2003) 9: 1193-1203.

Smith, P., S.J. Chapman, W.A. Scott, H.I.J. Black, M. Wattenbach, R. Milne, C.D. Campbell, A. Lilly, N. Osite, P.E. Levy, D. G. Lumsdon, P. Millard, W. Towers, S. Zaehle en J.U. Smith, 2007. Climate change cannot be entirely responsible for soil carbon loss observed in England and Wales, 1978-2003. Global Change Biology 13: 2605-2609.

Soesbergen, G. van, C. van Wallenburg, K.R. van Lynden en H.A.J. van Lanen, 1986. De interpretatie van bodemkundige gegevens. Wageningen, STIBOKA, rapport 1976.

Spark, K.M. en R.S. Swift, 2002. Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption. The Science of The Total Environment, 298(1-3): 147-161.

Stockfisch, N., T. Forstreuter en W. Ehlers, 1999. Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. Soil & Tillage Research 52: 91-101.

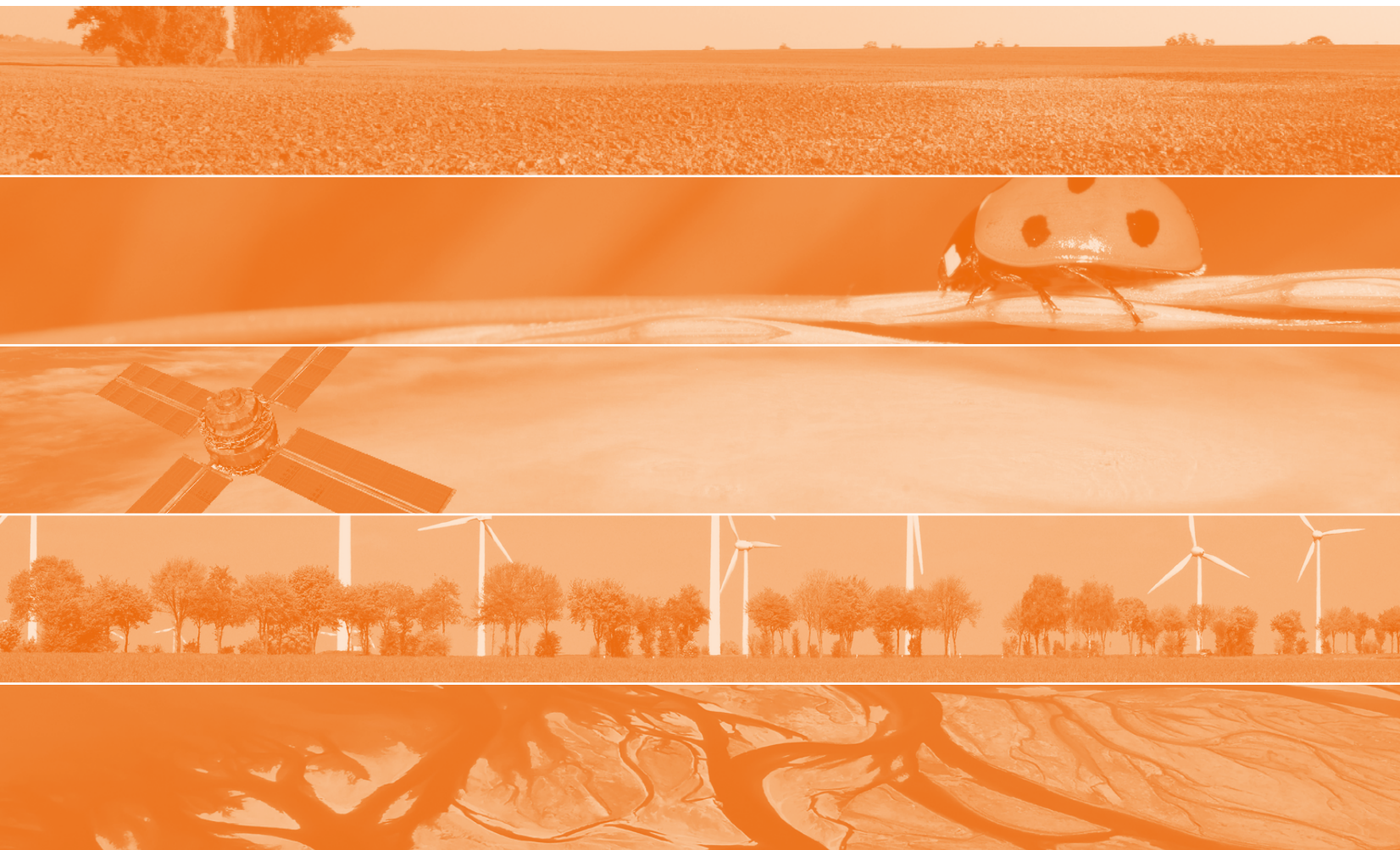
Strahm, B.D en R.B. Harrison, 2007. Mineral and organic matter controls on the sorption of macronutrient anions in variable-charge soils. *Soil Science Society Of Amerika Journal*, 71(6): 1926-1933.

Wadman, W.P. en S. de Haan, 1997. Decomposition of organic matter from 36 soils in a long-term pot experiment. *Plant and Soil* 189: 289-301.

Willigen, P. de, B.H. Janssen, H.I.M. Heesmans, J.G. Conijn, G.J. Velthof en W.J. Chardon, 2008. Decomposition of organic matter in soil; comparison of some models. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1726, 73 p.

Zanen, M., J.G. Bokhorst, C. ter Berg en C.J. Koopmans, 2008. Investeren tot in de bodem. Evaluatie van het proefveld Mest Als Kans. Wageningen, Louis Bolk instituut, rapport nr. LD 11, 38 p.

Zwart, K.B., 2007. Mineralisatie van mest en organische stof in de bodem. Een indicator op basis van (bio) chemische parameters. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1504. 49 p.



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl