



Advies
Toestand en dynamiek van
organische stof in Nederlandse
landbouwbodems

TCB A110(2016)

De TCB is een onafhankelijke adviescommissie die in 1987 bij wet is ingesteld. De TCB adviseert hoofdzakelijk de ministers van Infrastructuur en Milieu en Economische Zaken over technisch-wetenschappelijke aspecten van milieubeleid voor de bodem. Het gaat daarbij om het vertalen en toepasbaar maken van wetenschappelijke kennis voor het beleid.

De leden van de TCB zijn afkomstig uit disciplines zoals bodemkunde, chemie, geohydrologie, ecologie en toxicologie. Zij adviseren vanuit een brede oriëntatie.

De TCB adviseert onder meer over bodemnormstelling en risicobeoordeling van bodemverontreiniging, bodembeheer in de landbouw, beheer van het bodemwatersysteem inclusief grondwater, en ruimtelijke ordening in relatie tot bodemkwaliteit. De duurzaamheid van het bodemgebruik en het bodembeheer is daarbij het uitgangspunt.

Contactgegevens

Technische commissie bodem

Postbus 30947

2500 GX Den Haag

T 070 - 456 6596

E info@tcbodem.nl

W www.tcbodem.nl

Aan
De staatssecretaris van Infrastructuur en Milieu
Mevrouw S.A.M. Dijkema
Postbus 20901
2500 EX Den Haag

De staatssecretaris van Economische Zaken
De heer M.H.P. van Dam
Postbus 20401
2500 EK Den Haag

TCB A110(2016)

Den Haag, 29 februari 2016

Betreft: advies Toestand en dynamiek van organische stof in Nederlandse landbouwbodems

Mevrouw en Meneer de Staatssecretaris,

Het belang van organische stof (OS) in landbouwbodems wordt meestal voorgesteld als een belang van de bodemvruchtbaarheid en daarmee het belang van agrariërs. In de sector zijn regelmatig zorgen geuit over de mogelijkheden om OS goed te beheren en het gehalte op peil te houden. Inmiddels is bekend dat OS in bodems tal van andere maatschappelijke belangen kan dienen. Het besef dat beheer van OS mede afhankelijk moet zijn van het maatschappelijke doel dat daarmee gediend wordt en dat eenvoudigweg 'meer' OS niet altijd beter is, begint langzaam door te dringen.

De Technische commissie bodem (TCB) heeft op eigen initiatief een werkgroep¹ ingesteld om de verschillende belangen goed te duiden, om de huidige toestand en dynamiek van OS in Nederlandse landbouwgronden² in beeld te brengen en om daaraan conclusies te verbinden voor het beheer. Dit advies is gebaseerd op de bevindingen³ van de werkgroep en daaraan ten grondslag liggende onderzoeken⁴.

De bevindingen van de werkgroep komen samengevat op het volgende neer:

- OS draagt in belangrijke mate bij aan onmisbare ecosysteemdiensten, zoals vruchtbaarheid, biodiversiteit, structuur, vochtregulatie en bindings- en filtercapaciteit van de bodem.
- Bodemorganische-stof is een verzamelnaam voor dood organisch materiaal met zeer uiteenlopende kwaliteiten. De kwaliteit die nodig is voor de verschillende ecosysteemdiensten is niet altijd dezelfde.

1 De samenstelling van de werkgroep is te vinden op de laatste pagina van de bijlage bij dit advies.

2 De bevindingen betreffen minerale landbouwbodems. Veengebieden zijn vanwege het sterk afwijkende karakter buiten beschouwing gelaten.

3 De bevindingen van de werkgroep zijn als bijlage bij dit advies gevoegd.

4 Het onderzoek is beschreven in het rapport Soil organic matter in the Netherlands. Quantification of stocks and flows in the top soil. J.G. Conijn and J.P. Lesschen, 2015. PRI report 619, Alterra report 2663, in opdracht van TCB.

- De jaarlijkse aan- en afvoer van OS is klein ten opzichte van de voorraad die aanwezig is in de bodem.
- Op basis van modelberekeningen, gevoed door meetgegevens, wordt geconcludeerd dat er in de Nederlandse landbouwgronden sprake is van een redelijk stabiel evenwicht tussen aan- en afvoer van OS. Er zijn dan ook geen aanwijzingen dat de voorraad OS in de bodem op grote schaal aan het veranderen is, op enkele risicogebieden na.
- Deze bevindingen zijn met aanzienlijke onzekerheden omgeven, vanwege de aard en aggregatie van de gegevens en de modelaannames.
- De aanvoer van OS bestaat vooral uit 'jonge' OS, terwijl de afvoer via respiratie ook oudere OS betreft. Het vermoeden is daarom dat het aandeel relatief jonge OS toeneemt ten koste van oudere OS in de voorraad van landbouwbodems.
- Relatief jonge OS is goed voor de bodemvruchtbaarheid, maar voor de overige ecosysteemdiensten is oudere OS belangrijk. Dit biedt een aanknopingspunt voor beheer, zie aanbevelingen in dit advies.
- De TCB vindt de aanstaande evaluatie meststoffenwet 2016 bij uitstek een moment waarbij de conclusies en aanbevelingen van dit advies geïmplementeerd kunnen worden.

De achtergronden van deze samenvattende bevindingen worden hieronder toegelicht.

DYNAMIEK VAN OS IN DE LANDBOUWBODEM

Het OS gehalte in de bodem is een resultante van de langjarige aanvoer via bemesting en gewasresten en de langjarig afvoer via afbraak⁵, erosie en uitspoeling naar diepere lagen. Bij aanvoer van OS naar de bodem, via organische meststoffen en gewasresten, is de kwaliteit en daarmee de afbreekbaarheid van deze OS van groot belang. Een deel van de aanvoer wordt namelijk na toediening snel afgebroken, waarbij CO₂ en nutriënten vrijkomen. CO₂ verdwijnt naar de lucht; nutriënten worden door het gewas opgenomen, spoelen uit naar het grondwater en/of spoelen af naar het oppervlaktewater. In de regel geldt dat hoe hoger het gehalte aan cruciale nutriënten in de meststof of gewasrest is ten opzichte van de hoeveelheid koolstof, des te sneller de afbraak verloopt (zie tabel 1).

Tabel 1. Afbreekbaarheid van organische meststoffen en gewasresten. Uit referentie 4. Klassenindeling van TCB, hc = humificatiecoëfficiënt.

Snel (hc < 0,25)	Gemiddeld (0,25 > hc < 0,75)	Langzaam (hc > 0,75)
Bovengrondse gewasresten	Groene mest incl. wortels	GFT compost
Groene biomassa	Stro	Champost
Koolblad	Ondergrondse gewasresten	Groen compost
Gras	Drijfmest	
	Stalmest	
	Bladafval	

Bij een beschouwing van de gemiddelde balans tussen aan- en afvoer van stabiele OS voor bouwland en grasland in Nederland valt op dat de aan- en afvoer klein zijn ten opzichte van wat er in de bodem aanwezig is aan stabiele OS. Dit klopt met waarnemingen dat het stabiele OS gehalte in bodems slechts langzaam verandert ten gevolge van veranderingen in de aan- of afvoer (zie bijlage 1). De aanvoer van stabiele organische stof bestaat overwegend uit relatief jonge organische stof. De afvoerprocessen, zoals afbraak, erosie en af- en uitspoeling betreffen in principe alle organische stof in

⁵ Afbraak wordt ook wel decompositie of respiratie genoemd.

de bodem, dus ook relatief oude organische stof. De commissie vermoedt dat daarmee het aandeel jonge organische stof in de Nederlandse landbouwbodems toeneemt, wat goed kan zijn voor de nutriëntenvoorziening, maar nadelig voor het leveren van de overige ecosysteemdiensten van OS. Verder blijkt dat met name de waarde voor de afvoersnelheid van OS onzeker is. De onzekerheidsmarge voor de gemiddelde waarde van afbraak is groot, omdat daar een groot aantal omstandigheden invloed op heeft en de waarde variabel is in de tijd. Ook zijn bij de afvoer erosie, uitspoeling en afspoeling niet meegenomen vanwege ontbrekende gegevens. Daardoor wordt de afvoer onderschat, onduidelijk is in welke mate.

Intensief gebruik van de bodem kan leiden tot netto verlies van OS, omdat het de aan- en afvoersnelheden beïnvloedt. Hier zijn drie hoofdoorzaken voor te noemen:

- Er wordt te weinig effectieve OS toegevoerd via gewasresten. Dit komt bijvoorbeeld door de teelt van veel gewassen die weinig gewasresten achter laten op en in de bodem (bijvoorbeeld knolgewassen en maïs) of omdat gewasresten worden geoogst of niet worden terug gebracht maar dienen als invoer voor bijvoorbeeld bioraffinage.
- Er wordt een overmaat aan snel afbreekbare organische meststoffen gebruikt. De aanvoer van effectieve OS is laag en de vrijkomende nutriënten uit deze 'snelle meststoffen' worden deels gebruikt door micro-organismen om ook de stabiele OS af te breken.
- Door steeds betere ontwatering en frequente grondbewerking wordt er meer zuurstof in de bodem gebracht, waardoor afbraakprocessen van stabiele OS sneller gaan verlopen.

Het toedienen van grote hoeveelheden OS aan landbouwgronden als tegenmaatregel voor de afname van OS kan gemakkelijk leiden tot extra emissie van het broeikasgas CO₂ en onder ongunstige omstandigheden ook tot emissie van methaan en lachgas, omdat een groot deel van de toegediende OS snel wordt afgebroken door bodemdieren en micro-organismen. De kans hierop is des te groter, naarmate er meer gemakkelijk afbreekbare organische stof wordt toegediend met een relatief hoog gehalte aan nutriënten, bijvoorbeeld ter verbetering van de bodemvruchtbaarheid. Dit levert weinig effectieve organische stof op die kan worden toegevoegd aan de voorraad, en de nutriënten kunnen bijdragen aan versnelling van de afbraak van oudere OS en aan de vorming van lachgas onder natte omstandigheden.

De TCB heeft op basis de bevindingen van de werkgroep de volgende conclusies en aanbevelingen:

1. Organische stof is van onschatbare waarde, niet alleen voor de bodemvruchtbaarheid, maar ook voor andere ecosysteemdiensten die van grote maatschappelijke waarde zijn.
2. De kwaliteit van OS speelt ten onrechte nauwelijks een rol bij bemesting van landbouwgrond.
3. Gezien het belang van OS in minerale bodems, zou naast het voeden van het gewas ook het onderhoud van de voorraad OS (humus) een rol moeten spelen bij de keuze van meststoffen en de omgang met gewasresten. 'Langzame' meststoffen hebben hierbij de voorkeur boven 'snelle' meststoffen.
4. Landbouwkundig beheer zou meer gericht moeten zijn op het behoud van OS in de bodem. Dit betekent onder andere prudent zijn met inzet van mechanische grondbewerking en terughoudendheid met grondwaterstandverlaging om berijdbaarheid van het land te behouden en te verbeteren.
5. Gezien de omvang van het Nederlandse landbouwareaal beveelt de TCB aan meer nadruk te leggen op organisch stofbeheer voor andere ecosysteemdiensten dan bodemvruchtbaarheid. Dit betekent meer focus op behoud van kwaliteit en voorraad van OS, op veroudering van

humus en op relatief nutriëntenarme aanvoer van OS.

6. Op landelijke schaal gezien is een aanzienlijk aandeel van de aanvoer van OS naar de landbouwbodem afhankelijk van import van krachtvoer en plantaardig materiaal uit het verre buitenland. Dit strookt niet met het streven naar verduurzaming, zoals het beperken van 'voetafdrukken', circulaire economie en het sluiten van kringlopen.

Het belang van OS wordt in toenemende mate onderkend. Nationaal wordt de campagne bodembewust boeren voorbereid, waarin organische stof een belangrijke rol speelt. ZLTO heeft een programmaleider Bodem aangesteld, die zich naast bodemvruchtbaarheid ook nadrukkelijk op andere maatschappelijke opgaven gaat richten. Internationaal gezien is er het Franse '4 pour 1000' initiatief, wat voorstelt om het OS gehalte in de bodem te verhogen met 4 promille per jaar. Op basis van berekeningen kan daarmee de mondiale koolstofbalans worden hersteld. Gezien het bovenstaande kan deze actie alleen met 'beleid' ter hand genomen worden. Dit initiatief is gepresenteerd op de COP21⁶. Verder zijn er nieuw geformuleerde Sustainable Development Goals, waarvan er één luidt: *"By 2030, ensure sustainable food production systems and implement resilient agricultural practices that increase productivity and production, that help maintain ecosystems, that strengthen capacity for adaptation to climate change, extreme weather, drought, flooding and other disasters and that progressively improve land and soil quality."*⁷.

Hoogachtend,

Het origineel van dit advies is gestuurd aan de verantwoordelijke bewindspersoon/personen.

Ali Edelenbosch
Voorzitter van de Technische commissie bodem

⁶ The 21st Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP21) was held in Paris in December 2015 with the objective to achieve, for the first time, a universal and binding agreement to efficiently combat climate change and stimulate and accelerate the transition towards resilient and low-carbon societies and economies. Zie <http://www.ag4climate.org/>.

⁷ Zie <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?menu=1300>, goal 2.4.

Bijlage bij Advies A110

Dynamiek van organische stof in Nederlandse landbouwbodems

Rapport van de werkgroep Koolstofstromen in opdracht van de Technische commissie bodem (TCB).

INHOUDSOPGAVE

1. Belang van organische stof in de bodem	1
2. Dynamiek en kwaliteit van bodemorganische stof	3
3. Koolstofvoorraden en –balans per hectare	11
4. Koolstofstromen in de Nederlandse landbouw	19
5. Zorgen voor bodemorganische stof	23
Appendix: samenstelling TCB-werkgroep Koolstofstromen	25

1. BELANG VAN ORGANISCHE STOF IN DE BODEM

Een bodem, zoals we die kennen in Nederland, bevat naast zand, leem en klei ook organische stof (OS). Deze OS bepaalt in belangrijke mate de vruchtbaarheid van de bodem. Bodemvruchtbaarheid is de resultante van een aantal bodemkenmerken, waarvan de hoeveelheid en kwaliteit van OS in de bodem heel belangrijk zijn. Naast de bodemvruchtbaarheid speelt het OS gehalte van de bodem een grote rol bij waterregulatie, filtratie, het vastleggen en afbreken van stoffen, en de mitigatie van klimaatverandering. Het belang van bodem OS voor de landbouw en vragen over kwaliteit en kwantiteit daarvan, zijn in de afgelopen decennia veel aan de orde geweest. Aanleiding daarvoor was enerzijds zorg over de achteruitgang van de hoeveelheid OS in landbouwbodems en anderzijds de wens om in verband met klimaatmitigatie OS gehalten in bodems te verhogen. In de praktijk blijkt het lastig om OS gehalten in landbouwbodems op peil te houden of zelfs te verhogen, omdat de meest voor de hand liggende maatregel – organische mest toevoeren – vanwege de samenstelling van beschikbare organische meststoffen vaak op milieubezwaren stuit. Uit een onderzoek op basis van in opdracht van agrariërs uitgevoerde metingen van bodemkwaliteitskenmerken in Nederlandse landbouwgronden bleek echter dat gemiddelde OS gehalten in minerale landbouwbodems tussen 1984 en 2004 licht waren toegenomen, hoewel er sprake was van grote regionale verschillen en de database onoverkomelijke onzekerheden creëerde¹.

De voorraad OS in de bodem staat inmiddels steeds meer in de belangstelling, bijvoorbeeld als manier om extra koolstof vast te leggen, om zo klimaatverandering door verhoging van de CO₂-concentratie in de atmosfeer tegen te gaan, of om de landbouw meer klimaatrobuust te maken tegen de verwachte toename van weersextremen. Ook in de biologische landbouw worden positieve effecten verwacht van het verhogen van het OS gehalte in de bodem, om meer biodiversiteit te creëren, de natuurlijke nutriëntenlevering te verbeteren en de weerbaarheid tegen ziekten en plagen te vergroten. In bredere context blijken veel maatschappelijke uitdagingen te zijn verbonden aan robuuste landbouwsystemen: genoeg en veilig voedsel voor iedereen, vergroening van de economie, verminderen van de afhankelijkheid van fossiele grondstoffen, efficiënter omgaan met schaarse grondstoffen, voldoende en schoon drinkwater en voedsel, voorkomen van overstromingen en wateroverlast, CO₂-vastlegging, en weerstand tegen klimaatverandering.

De TCB wil met dit rapport de betekenis en de rol van bodem OS in landbouwgronden voor het voetlicht brengen en schetsen wat nodig is om te komen tot een efficiënt beheer zodat de bodem naast bodemvruchtbaarheid nog meer kan bijdragen aan oplossingen voor maatschappelijke opgaven. Om deze vragen te beantwoorden, heeft de TCB de werkgroep Koolstofstromen ingesteld. Deze werkgroep is samengesteld uit deskundigen op het gebied van bodemvruchtbaarheid, bodemgezondheid en OS dynamiek (zie de bijlage voor de samenstelling van de werkgroep). Daarnaast hebben PRI en Alterra (beide Wageningen UR) in 2013 en 2014 in opdracht van de TCB de koolstofvoorraden en –stromen in Nederlandse landbouwgronden gekwantificeerd en het risico geschat dat het gehalte aan OS in de bodem achteruit gaat.

¹ Reijneveld J.A., Van Wensem J., Oenema O., 2009. Soil organic carbon contents of Agricultural land in The Netherlands between 1884 and 2004. *Geoderma* 152:231-238.

LEESWIJZER

Hoofdstuk 2 beschrijft de dynamiek en kwaliteiten van OS in de bodem, en het belang daarvan voor verschillende maatschappelijke opgaven.

Hoofdstuk 3 geeft kwantitatieve informatie over de voorraden en stromen van organisch gebonden koolstof in Nederland. Ook worden gebieden geïdentificeerd met meer of minder risico op achteruitgang van het bodem OS gehalte. Dit hoofdstuk bevat informatie uit het eerdergenoemde PRI/Alterra onderzoek. De volledige resultaten van dit onderzoek zijn separaat gepubliceerd².

Hoofdstuk 4 betreft een overzicht van koolstofstromen in de landbouw op nationale schaal.

Hoofdstuk 5 vat de bevindingen van de werkgroep samen en bevat een pleidooi voor integraal beheer van bodem OS in de landbouw vanuit de betekenis ervan voor voedsel, water en klimaat.

Achtergrondinformatie over OS en bodemleven is opgenomen in aparte tekstboxen. Deze staan los van de hoofdtekst.

² Conijn J.G. en Lesschen J.P.,2015. Soil organic matter in the Netherlands. Quantification of stocks and flows in the top soil. PRI report 619, Alterra report 2663.

2. DYNAMIEK EN KWALITEIT VAN BODEMORGANISCHE STOF

DE NATUURLIJKE KOOLSTOFDYNAMIEK

Planten bestaan uit organisch materiaal dat voor 45 tot 60 procent uit koolstof bestaat. Op wereldschaal leggen planten in het fotosynthesep proces ongeveer 120 gigaton koolstof per jaar vast. Ongeveer de helft hiervan wordt door de planten zelf gebruikt als energiebron en wordt vrij snel weer verademd tot CO₂. De andere helft komt in boven- en ondergrondse voedselketens terecht. Behalve koolstof bevat organisch materiaal zuurstof en waterstof en essentiële elementen zoals stikstof, fosfor en zwavel.

Via de uitscheiding van wortelmateriaal, urine en feces en door sterfte van planten en dieren komen koolstof en de andere chemische elementen in organisch gebonden vorm op en in de bodem terecht. Hiervan is ongeveer 85 procent van plantaardige oorsprong. De afbraak van dit organische materiaal door bodemorganismen is essentieel voor de kringlopen van de elementen en het leven op aarde. Bij de afbraak van dood organisch materiaal in de bodem (mineralisatie) zijn vrijwel alle in de bodem levende micro-organismen, zoals bacteriën en schimmels, betrokken. Net zoals andere levende wezens hebben bacteriën en schimmels koolstof nodig als bron voor celopbouw. De meeste hebben het ook nodig als energiebron.

Een aantal groepen micro-organismen is verantwoordelijk voor specifieke onderdelen van de koolstofcyclus, zoals methaanvormende archaea en methaanoxiderende bacteriën. Schimmels die complexe lignineverbindingen kunnen afbreken worden, afhankelijk van het mechanisme waarmee lignine wordt afgebroken, bruinrot- en witrotschimmels genoemd. Zij spelen een sleutelrol in het afbraakproces waarbij houtige plantenresten beschikbaar komen voor mineralisatie. Bodemfauna is essentieel voor de verkleining, menging en verspreiding van het afgestorven plantaardige en dierlijke materiaal dat in de bodem terecht komt.

De snelheid van afbraak van dood organisch materiaal wordt beïnvloed door omgevingsfactoren zoals temperatuur, vochtvoorziening en de eigenschappen van de OS. De snelheid van afbraak van verschillende organische verbindingen loopt sterk uiteen; het kan enkele uren tot duizenden jaren duren voordat de helft is afgebroken.

Tijdens afbraak van OS ontstaat humus. Dit is een min of meer stabiel eindproduct dat de grond vaak zwart/bruin kleurt. Humus bestaat uit complexe samenvoegingen van een groot aantal kleinere moleculen en ontstaat doordat koolstofketens van verschillende lengte en met een variëteit aan chemische zijgroepen zich vouwen tot ingewikkelde constructies met een groot reactief oppervlak. De kluwen die door het vouwen ontstaat, zorgt ervoor dat veel verbindingen niet goed bereikbaar zijn voor micro-organismen waardoor een groot gedeelte van de OS niet goed kan worden afgebroken. Dit draagt bij aan de stabiliteit van OS. Lignine- en humusverbindingen zijn moeilijk afbreekbaar en dragen in belangrijke mate bij aan de voorraad stabiele OS in de bodem.

De stabiliteit van bodem OS wordt, behalve door de intrinsieke afbreekbaarheid van de OS moleculen zelf, vooral bepaald door bodemeigenschappen en milieucondities. Zo kan organisch gebonden koolstof worden beschermd tegen afbraak doordat het opgesloten zit in bodemaggregaten. Ook kan door chemische binding aan mineralen in de bodem de OS niet meer toegankelijk zijn voor bacteriën

en schimmels en hun enzymen. Kleimineralen en oxiden van ijzer en aluminium in de bodem hebben grote reactieve oppervlakken en zij spelen daardoor een belangrijke rol bij deze vastlegging van OS. Bodems met een hoog kleigehalte en/of veel oxiden kunnen veel organisch gebonden koolstof bevatten door een sterke bodemaggregatie en chemische bindingen tussen OS en bodemmineralen. Daarnaast belemmert een lage beschikbaarheid van zuurstof (onder natte omstandigheden) en water (bij droogte) de afbraak van OS.

Kwaliteit van bodem organische stof

Kwaliteit van bodem OS is een complex en niet eenduidig gedefinieerd begrip dat de resultante is van chemische, fysische en biologische eigenschappen. Afhankelijk van de oorsprong en leeftijd van bodem OS, kan de kwaliteit variëren.

Bodem OS kan:

- Goed of slecht afbreekbaar zijn door (enzymen van) bodemdieren en micro-organismen. Een lage afbraaksnelheid is gunstig voor koolstofvastlegging. Bij een hogere afbraaksnelheid is bodem OS een snelle bron van essentiële voedingsstoffen voor het bodemleven en het gewas. Dit is de motor achter de kringlopen van koolstof, stikstof en andere elementen en bepaalt de beschikbaarheid ervan voor planten.
- Natuurlijke toxische verbindingen bevatten die het afbraakproces vertragen (bijvoorbeeld wasachtige verbindingen of tannine); reactieve oppervlakken hebben, waardoor het bufferend kan werken voor nutriënten en toxische stoffen. De hoeveelheid en aard van de reactieve oppervlakken bepalen de snelheid en het vermogen om stoffen uit te wisselen met het bodemwater. In het bodemwater komen de stoffen niet alleen beschikbaar voor plantenwortels maar kunnen ze ook uitspoelen naar het grondwater.
- Een variabel watervasthoudend vermogen hebben.
- Onder sommige omstandigheden voedingsstoffen vasthouden, en in andere omstandigheden bijdragen aan het uitspoeling van nutriënten.
- De bodemstructuur stabiel maken door aggregaatvorming en daardoor bijdragen aan het voorkomen van erosie en aan het draagvermogen van de bodem bij het gebruik van zware landbouwmachines.
- Contaminanten en giftige stoffen binden en daardoor neutraliseren.
- De bodemtemperatuur beïnvloeden door de donkere kleur waardoor bij hogere gehalten de bodem in het voorjaar eerder opwarmt en het groeiseizoen eerder start.

Er bestaat niet één unieke en breed geaccepteerde methode om de kwaliteit van bodem OS te bepalen. Daarbij speelt mee dat de gewenste kwaliteit van bodem OS afhangt van het doel dat wordt nagestreefd. Voor het leveren van voedingsstoffen voor gewasgroei, is het essentieel dat OS wordt afgebroken. Om koolstof in de bodem op te slaan ten behoeve van mitigatie van klimaatverandering is juist stabiele bodem OS nodig en is daarnaast vooral de kwantiteit ervan van belang. Dit is een bekende paradox: The Soil Carbon Dilemma³.

³ Janzen H.H., 2006. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology & Biochemistry* 38: 419–424.

In figuur 1 staat schematisch samengevat welke rol en betekenis OS in de bodem heeft en hoe de verschillende functies onderling samenhangen⁴. Uit de figuur blijkt de cruciale betekenis van de door de activiteit van het bodemleven veroorzaakte dynamiek van bodem OS voor veel functies.



Figuur 1. Rol en betekenis van OS in de bodem schematisch samengevat. Uit Lal, 2007⁴. GWP = grondwaterproblemen, NPP= netto primaire productie.

⁴ Lal R. 2007. Soil Science and the Carbon Civilization. SSSAJ: Volume 71: Number 5.

WETEN

Planten en koolstof

Planten zijn in staat om met behulp van zonne-energie CO₂ om te zetten in organische verbindingen. Dit wordt fotosynthese genoemd. De primaire producten van de fotosynthese zijn suikers en zuurstof, gevormd uit CO₂ en water. Van de suikers wordt na inbouw van stikstof, fosfor, zwavel en andere elementen plantaardige biomassa gevormd. Planten maken dus zelf de organische verbindingen waaruit ze zijn opgebouwd, zij zijn autotroof. Dieren en de meeste micro-organismen kunnen dit niet, die zijn heterotroof. Zij halen hun energie en bouwstenen uit de organische verbindingen die zij eten en afbreken. Bij de afbraak van OS worden organische verbindingen omgezet in energie, CO₂ en water.

Veengronden

Veengronden zijn bodems met een hoog gehalte aan OS, per definitie meer dan 25 procent in de bovenste 80 cm van de bodem. In Nederland zijn veengronden vooral te vinden in het noorden en het westen. In veengrond wordt OS tegen afbraak beschermd omdat het onder water staat. Ontwatering van veengrond leidt tot oxidatie van de OS en emissie van CO₂ naar de atmosfeer. Dit heeft naast stijging van het CO₂-gehalte in de atmosfeer ook bodemdaling tot gevolg van soms wel enkele cm per jaar. Dit leidt niet tot een meetbare afname van het gehalte aan OS in de bodem, die blijft hoog zolang er nog veen is. De voorraden bodem OS nemen wel degelijk af. Bij voortgaande ontwatering verdwijnt uiteindelijk de veengrond. In bijvoorbeeld de Veenkoloniën is de helft van de in de jaren 50 en 60 als veengrond geclassificeerde gronden inmiddels verdwenen en OS rijke zandgrond geworden⁵. De totale emissie van broeikasgassen uit veenbodems in Nederland is zo'n twee procent van de totale uitstoot van broeikasgassen voor Nederland.⁶ Het gaat om kooldioxide (CO₂), methaan (CH₄) en lachgas (N₂O). De bodemdaling die ontwatering van veen met zich meebrengt, is een maatschappelijk probleem⁷. Veel veengronden, de hoogveengronden, zijn van nature zuur en kennen een hoge grondwaterstand. De vruchtbaarheid van veengrond wordt vooral beperkt door deze natte en zure omstandigheden. De bewerkbaarheid van de grond is slecht vanwege het beperkte draagvermogen voor machines. Het nutriëntenleverend vermogen van veen kan hoog of laag zijn, afhankelijk van de ontstaansgeschiedenis ervan.

OS in natuurlijke bodems en in landbouwgronden

In natuurlijke bodems is het gehalte OS het resultaat van een honderden tot duizenden jaren durend proces van opbouw en afbraak van OS. Het OS gehalte dat uiteindelijk ontstaat is het resultaat van het plantenmateriaal dat wordt geproduceerd en van klimaat- en bodemeigenschappen. De jaarlijkse aanvoer is in evenwicht met de afbraak. In deze bodems zijn schimmels veelal de dominante micro-organismen. In landbouwgronden is de dynamiek van OS veel groter omdat er jaarlijks OS wordt afgevoerd (de oogst) en toegevoegd (gewasresten, dierlijke mest en compost). De afbraak wordt versneld door grondbewerking. In deze bodems zijn bacteriën veelal de dominante micro-organismen.

⁵ Zwart et al., 2011, Alterra 2177, Waterkwaliteit bij de wortel aangepakt.

⁶ Klein Goldewijk K., Olivier J.G.J., Peters J.A.H.W., Coenen P.W.H.G., Vreuls H.H.J., 2005. Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2003. National Inventory Report 2005. RIVM-report 773201009/2005.

⁷ Woestenburger M., Kwakernaak C., 2009. Waarheen met het veen? Kennis voor keuzes in het westelijk veenweidegebied. Wageningen, Uitgeverij Landwerk.

BETEKENIS VAN BODEMORGANISCHE STOF

In het navolgende wordt de betekenis van OS in de bodem voor voedsel, water en klimaat nader beschreven.

Voedsel

Bodem OS is een belangrijke bron van voedingsstoffen voor gewassen, met name van stikstof, maar ook fosfaat en zwavel, zelfs in gangbare intensief bemeste teeltsystemen. In tabel 1 wordt dit met getallen geïllustreerd.

Tabel 1. Hoeveelheid jaarlijks vrijkomende nutriënten uit bodem OS en de jaarlijkse gewasbehoefte.

Nutriënt	Stikstof	Fosfor	Zwavel
Vrijkomend uit bodem OS (kg/ha jr) ⁸	11 - 300	15 - 36	7 - 40
Gewas	Gewasbehoefte (kg/ha jr) ⁹		
	Stikstof	Fosfor	Zwavel
Permanente grasland	450	52	35
Aardappelen	300	40	15
Suikerbieten	200	25	20
Wintertarwe	200	25	20
Maïs	190	40	20

Biologische geteelde gewassen zijn grotendeels afhankelijk van de stikstof uit OS zoals is vastgelegd in de vorm van bijvoorbeeld eiwitten. Als zodanig is deze stikstof niet opneembaar voor planten. Tijdens de microbiologische afbraak van OS worden de organische stikstofhoudende verbindingen omgezet in ammonium, hetgeen vervolgens geoxideerd kan worden tot nitraat. Ammonium en nitraat zijn stikstofvormen die wel door gewassen kunnen worden opgenomen.

Bodem OS heeft ook andere effecten op voedselproductie. Het verbetert de bodemstructuur. Dit vermindert compactheid en korstvorming, en zorgt zo voor een beter watervasthoudend vermogen, een betere wateropname en een betere doorwortelbaarheid van de bodem waardoor planten beter kunnen groeien. De bewerkbaarheid van kleibodems wordt positief beïnvloed door OS, omdat daardoor de dichtheid van de bodem afneemt.¹⁰

⁸ Kennisakker.nl; Zwart et al., 2013. Sturen van de N-mineralisatie in Nederland met kennis over organische stof; Louis Bolk, 2012. Organisch stofbeheer en stikstofleverend vermogen van de grond in de Nederlandse akkerbouw.

⁹ Naar FAO gegevens (www.fao.org), cijfers voor intensieve landbouw met hoge opbrengsten.

¹⁰ Nieder R., Benbi D.K., 2008. Carbon and nitrogen in the terrestrial environment. Springer.

Water

Bodems die rijk zijn aan OS kunnen goed water vasthouden en vervolgens dit water geleidelijk weer afgeven voor plantengroei; de bodem werkt als een spons. Een goede sponswerking helpt wateroverlast tegen te gaan en droogteschade aan gewassen te voorkomen. Het watervasthoudend vermogen van een bodem wordt bepaald door de grootte en de hoeveelheid van de poriën: hoe kleiner de poriën, hoe sterker het water wordt vastgehouden, en hoe meer kleine poriën, hoe groter het watervasthoudend vermogen. Ook als er geen neerslag valt, kunnen planten nog enige tijd blijven groeien op het water dat in de poriën van de bodem zit. De porie-grootteverdeling in een bodem hangt af van de grootte van de minerale deeltjes; een bodem met kleine bodemdeeltjes (klei) bevat meer kleine poriën dan een bodem met relatief grote bodemdeeltjes (zand). Door de microporeuze structuur van OS kan het veel meer water vasthouden dan minerale deeltjes. Het effect van bodem OS op het waterhoudend vermogen is het grootst in zandige bodems en wordt kleiner als het kleigehalte toeneemt, omdat klei, veel meer dan zand, zelf ook bijdraagt aan het watervasthoudend vermogen.

Een ander belangrijk effect van bodem OS is dat het als het ware de minerale bodemdeeltjes aan elkaar lijmt, waardoor aggregaten worden gevormd. Door de aggregaatvorming ontstaat een structuur met poriën van verschillende grootte. Meer OS verbetert de aggregatie en geeft stabielere aggregaten, wat het watervasthoudend vermogen van de bodem vergroot en bodemerosie vermindert. Omgekeerd resulteert verlies van organisch koolstof in minder cohesie van bodemdeeltjes, de stabiliteit van aggregaten wordt kleiner, de bodemstructuur wordt slechter en het gevaar van wind- en watererosie stijgt, leidend tot verlies van vruchtbare bodems, nutriënten en water. OS is van zichzelf waterafstotend, waardoor het, vooral als het droog is en in grotere hoeveelheden voorkomt, aan het bodemoppervlak de waterinfiltratie kan verhinderen.

Bodem OS heeft verschillende effecten op de grondwater- en oppervlaktewaterkwaliteit. Door afbraak van OS komen nutriënten beschikbaar in de bodem. In het groeiseizoen kunnen deze nutriënten worden opgenomen door planten via het wortelstelsel. Buiten het groeiseizoen of als sprake is van extreme neerslag kunnen de nutriënten ook afspoelen naar het oppervlaktewater of uitspoelen naar het grondwater of dieper gelegen bodemlagen, waar ze niet meer beschikbaar zijn voor plantenwortels. Dit kan leiden tot eutrofiering¹¹, vooral in situaties met gemakkelijk afbreekbare OS. Bodem OS draagt dan indirect bij aan de ongewenste belasting van grond- en oppervlaktewater met nutriënten.

Micronutriënten zoals ijzer, zink en koper kunnen adsorberen aan het licht negatief geladen oppervlak van OS. Zij spoelen daardoor niet uit en blijven beschikbaar voor gewasgroei. De mate waarin dit gebeurt, wordt beïnvloed door de zuurgraad van de bodem. OS fungeert dan als een filter dat uitspoeling van nutriënten verhindert. OS fungeert ook als filter voor sommige bestrijdingsmiddelen, die aan de hydrofobe en elektrisch geladen delen van OS kunnen binden. Dergelijke grondgebonden residuen kunnen uiteindelijk onherkenbaar onderdeel gaan uitmaken van de bodem OS.

¹¹ Eutrofiering is de verrijking van ecosystemen met nutriënten, waardoor de biodiversiteit vermindert omdat enkele nutriëntenminnende soorten gaan overheersen (algenbloei in oppervlaktewater, pitrus in natuurterreinen, brandnetels in recreatiegebieden).

Lachgas

Lachgas is een broeikasgas dat ontstaat als tussenproduct van nitrificatie (de omzetting van ammonium (NH_4) in nitraat (NO_3)) en denitrificatie (de omzetting van nitraat in stikstofgas (N_2)). Nitrificatie en denitrificatie zijn microbiële processen. De aanwezigheid van minerale stikstof (ammonium en/of nitraat) en gemakkelijk afbreekbare organische koolstof is de belangrijkste voorwaarde voor het ontstaan van lachgas. Lachgas ontstaat dan ook vooral in bodems die zwaar zijn bemest met stikstof (in de vorm van kunstmest en/of organische mest) en/of in bodems waarin veel minerale stikstof vrijkomt uit de bodem OS. Emissie van lachgas vindt vooral plaats uit beweid grasland en uit bemeste akkerbouwgronden. Lachgas kan ook vrijkomen bij de afbraak van op het land achterblijvende gewasresten.

Geschat is dat de totale lachgasemissie uit de Nederlandse melkveehouderij in 1990 7,2 Mton CO_2 -equivalenten bedroeg, waarvan 30 procent uit beweid grasland, en dat dit met maatregelen zoals minder bemesting en beperkt weiden tot ongeveer 4 Mton CO_2 -equivalenten kan worden teruggebracht¹². De lachgasemissie vanuit bemeste akkerbouwgronden wordt geschat op 4,3 Mton CO_2 -equivalenten in 1990. Dit zou met bemestingsmaatregelen kunnen worden teruggebracht tot ongeveer 3 Mton CO_2 -equivalenten¹³. Vanuit gewasresten zou in 1990 0,5 Mton CO_2 -equivalenten lachgas zijn vrijgekomen¹⁴. Dit zou tot de helft kunnen worden teruggebracht door maatregelen als minder stikstofbemesting (waardoor verlaging van het N-gehalte in de gewasresten) en het afvoeren van stikstofrijke gewasresten zoals suikerbietenblad¹⁴.

Klimaat

OS in de bodem verbetert de veerkracht van agrarische productiesystemen tegen extremer wordende weersomstandigheden als gevolg van klimaatverandering. Hogere gehalten aan OS in de bodem leiden tot minder opbrengstverliezen door droogte omdat water beter in de bodem wordt opgeslagen. Hogere gehalten aan OS in de bodem en de daaraan gerelateerde betere wateropname zorgen voor minder bodemerosie resulterend in hogere gewasopbrengsten en minder CO_2 -emissies¹⁵.

Meer organisch gebonden koolstof in de bodem betekent ook minder CO_2 in de atmosfeer. Zowel vanuit het oogpunt van adaptatie als mitigatie ligt het voor de hand om bestaande OSgehalten in de bodem te willen verhogen. Opbouw van OS is een proces van lange adem. Er kan een generatie overheen gaan om het OSgehalte in de bodem met één procent te verhogen. Het vergt een jaarlijkse aanvoer van grotere hoeveelheden OS dan gebruikelijk was. Op een gegeven moment ontstaat er dan een nieuw evenwicht dat alleen in stand blijft bij een voortdurend hogere aanvoer. Tijdens de opbouw van OS in de bodem zal het uitspoelingsrisico groter zijn omdat een deel van de vers toegediende OS al snel afbreekt (de niet-effectieve fractie) waardoor nutriënten vrijkomen, ook op momenten dat er geen vraag naar is. De kans op uitstoot van lachgas neemt dan ook toe (zie

¹² Veldhof G.L., Haan M.H. de, Holshof G., Pol – van Dasselaar A. van den, Kuikman P.J., 2000. Beperking van lachgasemissie uit beweid grasland: een systeemanalyse. Rapport 114-1, Alterra, Wageningen, 52 pp.

¹³ Veldhof G.L., Haan M.H. de, Schils R.L.M, Monteny G.J., Pol – van Dasselaar A. van den, Kuikman, P.J., 2000. Beperking van lachgasemissie uit bemeste landbouwgronden: een systeemanalyse. Rapport 114-2, Alterra, Wageningen, 68 pp.

¹⁴ Veldhof G.L., Kuikman P.J., 2000. Beperking van lachgasemissie uit gewasresten: een systeemanalyse. Rapport 114-3, Alterra, Wageningen, 82 pp.

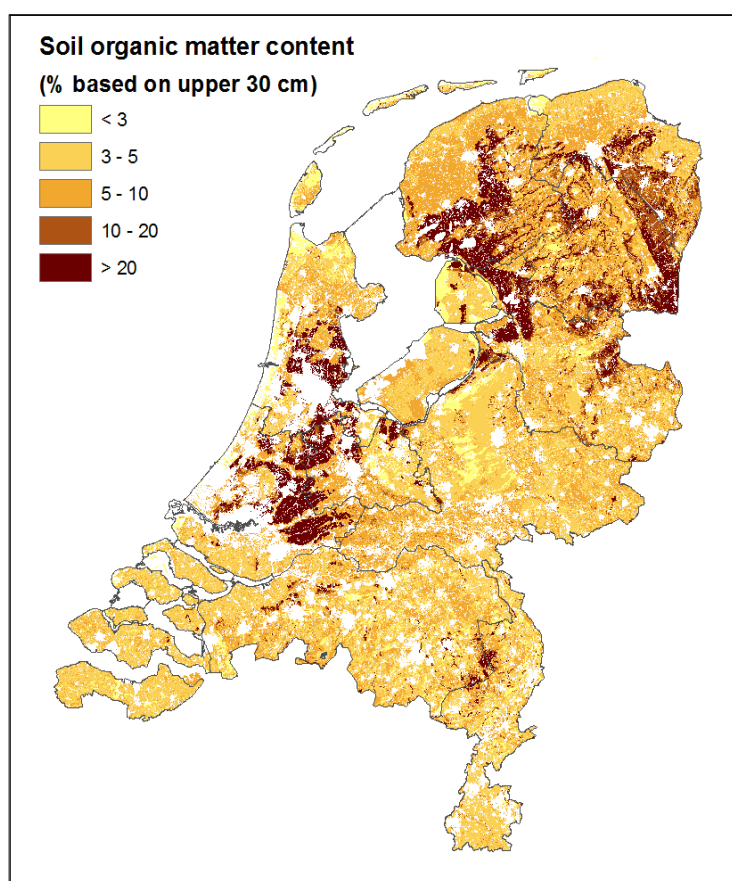
¹⁵ TCB, 2012. Advies Klimaat en het bodem- en watersysteem in gebiedsontwikkeling. A081(2012), Den Haag.

tekstbox). Het is afhankelijk van de lokale omstandigheden hoe de balans tussen positieve en negatieve effecten uitvalt. Het verhogen van bodem OS vergt dus grote hoeveelheden verse OS, een lange adem, en kent risico's op nutriëntenuitspoeling, lachgasvorming en het verspreiden van contaminanten en pathogenen. Vanuit het oogpunt van koolstofvastlegging voor klimaat lijkt een strategie gericht op behoud van reeds vastgelegde organisch gebonden koolstof haalbaarder. Als de aanvoer van OS afneemt door bijvoorbeeld veranderend landgebruik, neemt ook de voorraad OS in de bodem weer af; het vergt een continu en consequent beheer om het gehalte op het gewenste niveau te houden.

3. KOOLSTOFVOORRADEN EN –BALANS PER HECTARE

KOOLSTOFVOORRADEN IN DE NEDERLANDSE BODEM¹⁶

In Nederlandse bodems ligt het OSgehalte in het algemeen tussen de 2 en 7 procent (Figuur 2). Moerige en veengronden hebben een beduidend hoger gehalte aan OS; op sommige veengronden kan het 80 procent zijn.



Figuur 2. OS gehalten van de bodems in Nederland onder grasland, bouwland en natuur².

In tabel 2 wordt de hoeveelheid koolstof in de bovenste 30 cm van de Nederlandse grasland-, bouwland- en natuurbodems in getallen weergegeven. Bodems met dit landgebruik beslaan tezamen ongeveer 75 procent van het landoppervlak in Nederland¹⁷. In de bovenste 30 cm zit gemiddeld ongeveer 11 kg koolstof per m². Dit is in totaal voor Nederland ongeveer 280 miljoen ton koolstof. In graslandbodems is het koolstofgehalte hoger dan in bouwland- en natuurbodems: 12 kg koolstof per m² respectievelijk iets minder dan 10 kg koolstof per m².

¹⁶ De gegevens in de hoofdstuk zijn deels ontleend aan het rapport Soil organic matter in the Netherlands, dat in opdracht van de TCB door PRI en Alterra is opgesteld. Referentie: Conijn J.G. en Lesschen J.P., 2015. Soil organic matter in the Netherlands. Quantification of stocks and flows in the top soil. PRI report 619, Alterra report 2663, Wageningen UR.

¹⁷ Bebouwd oppervlak, wegen, spoorlijnen en moerasachtige gebieden zijn buiten beschouwing gelaten.

Tabel 2. Hoeveelheid koolstof in de bovenste 30 cm van de Nederlandse grasland-, bouwland- en natuurbodems².

Landgebruik	Oppervlakte in Nederland (ha)	Bodem koolstofgehalte (kg C/m ²)	Totale hoeveelheid bodemkoolstof (10 ⁹ kg C)
Grasland	1.222.900	12,3	150.3
Bouwland	938.000	9,4	88.2
Natuur	441.700	9,8	43.3
Totaal/gemiddeld	2.602.600	10,8	281.8

Per grondsoort is er geen duidelijke relatie tussen het landgebruik en het gehalte aan bodemkoolstof². Dit komt deels omdat de hoeveelheid koolstof bepaald wordt door het landgebruik van de afgelopen ongeveer 100 jaar, terwijl de gegevens zijn geclassificeerd naar recent landgebruik. Dat er in het algemeen meer bodemkoolstof aanwezig is in graslandgronden dan in bouwlandgronden (Tabel 2), komt vooral omdat er op de veengronden, de gronden met de hoogste OS gehalten, eigenlijk alleen maar weidebouw mogelijk is en geen akkerbouw. Overigens is het in zijn algemeenheid zo dat onder dezelfde omstandigheden grasland meer OS in de bodem opbouwt dan akkerland doordat de grassen een min of meer permanente, dichte mat van wortels vormt die veel koolstof bevatten. Grasland is effectiever in het vastleggen van koolstof dan andere vegetatietypen, inclusief bossen.

BALANS VAN AAN- EN AFVOER VAN ORGANISCHE STOF PER HECTARE

Het gehalte aan bodem OS is de resultante van de balans tussen de continue aanvoer en afvoer van OS. In absolute hoeveelheden is de omvang van jaarlijkse aan- en afvoer per hectare gering ten opzichte van die van de voorraad. Dit is waarom het bodem OS gehalte maar langzaam verandert.

Afvoer

Bij het beschouwen van afvoer van OS uit de bodem maken landbouwkundigen en bodemkundigen onderscheid tussen de voorraad stabiele OS in de bodem en de OS die jaarlijks wordt toegevoerd naar de bodem in de vorm van organische mest en gewasresten. Van de jaarlijkse toevoer wordt een groot deel snel door micro-organismen afgebroken. De afbraaksnelheid hiervan is sterk afhankelijk van de aard van de toegevoerde OS. Van gewasresten wordt in het eerste jaar na toediening veel afgebroken en van compost weinig (tabel 3).

De hoeveelheid van de vers toegevoerde OS die bijdraagt aan de voorraad stabiele OS in de bodem wordt effectieve OS genoemd. Effectief betekent hier dus dat het een bijdrage levert aan de instandhouding van humus, de stabiele OS in de bodem. Effectieve OS wordt in Nederland operationeel gedefinieerd als het deel van de verse OS dat een jaar na toediening nog in de bodem aanwezig is. Het aandeel effectieve OS deel wordt gebruikt in eenvoudige rekenschema's om de bodem OS balans te bepalen. Het verlies van bodem OS door afbraak wordt dan vergeleken met de aanvoer van het effectieve deel van de vers toegediende OS.

Tabel 3. De fractie van de aan de bodem toegediende OS die in het eerste jaar na toediening nog aanwezig is (effectieve fractie)².

Soort organisch materiaal	Effectieve fractie (%)
Bovengrondse gewasresten	20-35
Ondergrondse gewasresten	30-40
Drijfmest	30-70
Vaste mest	50-60
Compost	75-95

Over verlies van bodemkoolstof door uitspoeling via in water opgeloste OS is weinig bekend. Waarschijnlijk speelt het kwantitatief gezien een beperkte rol bij de koolstofafvoer.¹⁸ Dit geldt in Nederland ook voor koolstofverlies door erosie, al treedt het lokaal in bijvoorbeeld het zuiden van Limburg door watererosie en in de Veenkoloniën door winderosie wel op. Koolstof kan ook naar diepere bodemlagen worden getransporteerd via water of door bodemorganismen waardoor het uit de ene bodemlaag verdwijnt en wordt toegevoegd aan een diepere laag. Schattingen¹⁹ geven aan dat er wereldwijd ongeveer evenveel koolstof zit in de laag van 0 tot 30 centimeter als in de laag van 30 tot 100 centimeter.

In de uitgevoerde berekeningen² werd aangenomen dat koolstofverlies uit de Nederlandse landbouwbodem vooral het gevolg is van bodemrespiratie. In de zestiger jaren van de vorige eeuw werd als vuistregel aangenomen dat jaarlijks 2 procent van de stabiele OS (humus) wordt afgebroken. Dit getal had vooral betrekking op de bovenste 25-30 centimeter van de bodem.²⁰ De vuistregel was gebaseerd op een groot aantal experimenten die onder zeer verschillende omstandigheden en gedurende lange tijd (20 jaar) waren uitgevoerd. Uit een vergelijking met resultaten of aannames van de CLM-maatlat, het voormalige Bedrijfslaboratorium voor grond- en gewasonderzoek (Blgg), het Hilbrands Laboratorium voor Bodemziekten (HLB) en het Rothamsted model Roth-C blijkt echter dat de afbraak van humus kan variëren tussen de 1,6 en 3,1 procent per jaar².

Aanvoer

De koolstofaanvoer op landbouwgronden is sinds 1995 ongeveer op hetzelfde niveau gebleven (Figuur 3). In Nederland vindt op grasland de aanvoer van verse OS, en daarmee van koolstof, voor de helft plaats via gewasresten (graswortels, grasstoppels en afgevallen blad) en voor de andere helft via dierlijke mest. Ook via levende wortels wordt door uitscheiding van organisch materiaal, zoals afgestorven worteldelen, mucigel (materiaal rond het wortelpunt) en wortellexudaten (kleine organische verbindingen die actief door wortels worden uitgescheiden), gemakkelijk afbreekbare koolstof aan de bodem toegevoegd. De meeste dierlijke mest is afkomstig uit de stal en wordt emissiearm via injectie aan de bodem toegediend; de overige mest is afkomstig van het in de wei grazende vee. In totaal wordt er op grasland per jaar ongeveer 3.500 kg effectieve OS per hectare

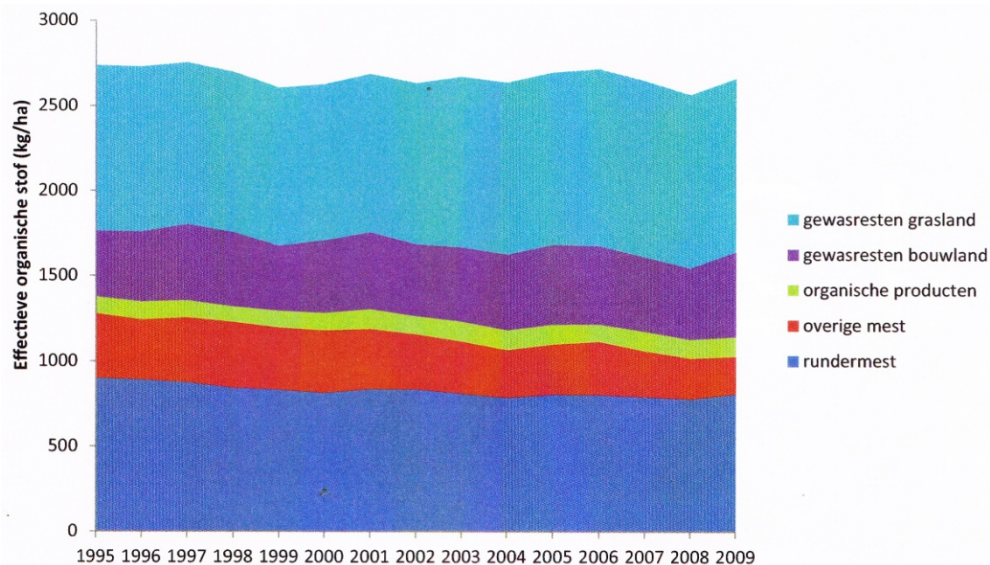
¹⁸ Fest E.P.M., Temminghoff E.J.M., Griffioen J., Van der Grift B., Van Riemsdijk W.H., 2007. Groundwater chemistry of Al under Dutch sandy soils: Effects of land use and depth. *Applied Geochemistry* 22: 1427-1438. Hierin is met de gemeten concentraties aan DOC en het standaard neerslagoverschot geschat dat de DOC-uitspoeling gering is ten opzichte van de voorraad organische stof.

¹⁹ Hiederer R., Köchy M., 2011. Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database. EUR 25225 EN. Publications Office of the European Union. 79 pp.

²⁰ Kortleven J., 1963. Kwantitatieve aspecten van humusopbouw en humusafbraak. Verslagen van landbouwkundige onderzoeken. Rijkstuinbouwconsulent voor Bodemaangelegenheden. Wageningen. 109 pp.

aangevoerd. Dit komt overeen met ongeveer 0,2 kg koolstof per m² en dit is ongeveer 1,5 procent van de koolstofvoorraad in de bovenste 30 centimeter die reeds in de bodem aanwezig was. Andere schattingen (zie bijv. Ten Berge *et al.*, 2000²¹) geven aan dat het aandeel grasresten hoger is waarmee het totaal jaarlijks op ongeveer 5.000 kg effectieve OS per hectare zou uitkomen.

In Nederland wordt koolstof op bouwland vooral aangevoerd via dierlijke mest en gewasresten en in zeer beperkte mate ook via compost. In totaal wordt er op bouwland per jaar ongeveer 2.000 kg effectieve OS per hectare aangevoerd. Dit komt overeen met ongeveer 0,1 kg koolstof per m² en 1 procent van de hoeveelheid OS in de bovenste 30 centimeter van de bodem.



Figuur 3. De aanvoer van effectieve OS per hectare op Nederlandse landbouwgrond in 1995-2009. Uit Schils R., 2012.²²

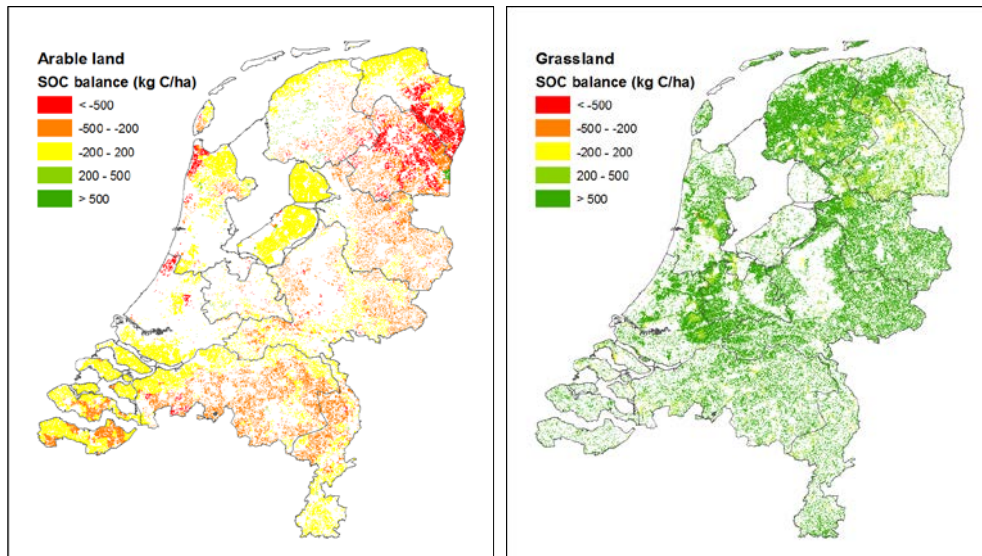
BALANS TUSSEN AAN- EN AFVOER VAN ORGANISCHE STOF IN DE NEDERLANDSE BODEM

De voorraad stabiele OS in de bodem wordt dus voor het grootste deel bepaald door de balans tussen enerzijds aanvoer via effectieve OS uit meststoffen en gewasresten en anderzijds de afbraak door micro-organismen. Met het Roth-C model is de balans tussen de aan- en afvoer van OS berekend voor de Nederlandse akkerbouw- en graslandgronden op minerale bodems². Het resultaat is te zien in figuur 4.

De berekeningen laten zien dat de balans voor de meeste akkerbouwgronden negatief is (figuur 4, links). Op delen langs de Noord- en Zuid-Hollandse kust (de geestgronden) en in het oosten van Groningen en Drenthe neemt de hoeveelheid OS in de bodem jaarlijks af met meer dan 1000 kg per hectare. Als er rekening wordt met toediening van compost wordt de balans iets minder negatief. Voorlopige schattingen laten dan zien dat deze minder negatieve balans met name geldt voor Noord- en Zuid-Holland, Flevoland, Utrecht, Zeeland, Noord-Brabant en Limburg.

²¹ Ten Berge H.F.M., Withagen J.C.M., De Ruijter F.J., Jansen M.J.W., Van der Meer H.G., 2000. Nitrogen responses in grass and selected field crops: QUAD-MOD parameterisation and extension for STONE-application. Wageningen UR, Plant Research International, Report 24.

²² Schils R., 2012. 30 Vragen en antwoorden over bodemvruchtbaarheid. Alterra, Wageningen UR.



Figuur 4. Het verschil tussen aan- en afvoer van organische koolstof (SOC) in de Nederlandse akkerbouwgronden (links) en graslanden (rechts) per hectare minerale bodem². Positieve waarden betekenen dat er meer organische koolstof wordt aangevoerd dan er wordt afgevoerd. Bij negatieve waarden wordt er meer afgevoerd dan aangevoerd. De berekeningen zijn uitgevoerd met het model Roth-C voor de bovenste 25 cm van de bodem. Aanvoer via compost en afvoer via uitspoeling en erosie zijn vanwege de veronderstelde relatief geringe bijdrage en ontbrekende gegevens niet meegenomen. De kaartjes zijn een weergave van modelleerresultaten die zijn gebaseerd op geaggregeerde berekeningen.

De graslandgronden laten een positiever beeld zien. Bijna overal neemt de hoeveelheid OS in de bodem toe, meestal met meer dan 500 kg per hectare per jaar (Figuur 4, rechts). In Nederland is ongeveer 20 procent van het graslandareaal tijdelijk grasland. Dit grasland wordt afgewisseld met akkerbouw. Bollenteelt na gras en maïs-graswisselteelten zijn daar een voorbeeld van. In deze gebieden met gras-akkerrotaties zal door de hogere aanvoer tijdens de graslandfase het gehalte aan OS in de bodem vaak hoger zijn dan in pure akkerbouwgebieden. De resultaten zijn in overeenstemming met Hanegraaf et al.²³ die op basis van historische trends concludeerden dat in Gelderland en Noord Brabant het gemiddelde OS gehalte in grasland niet daalt.

Risicogebieden

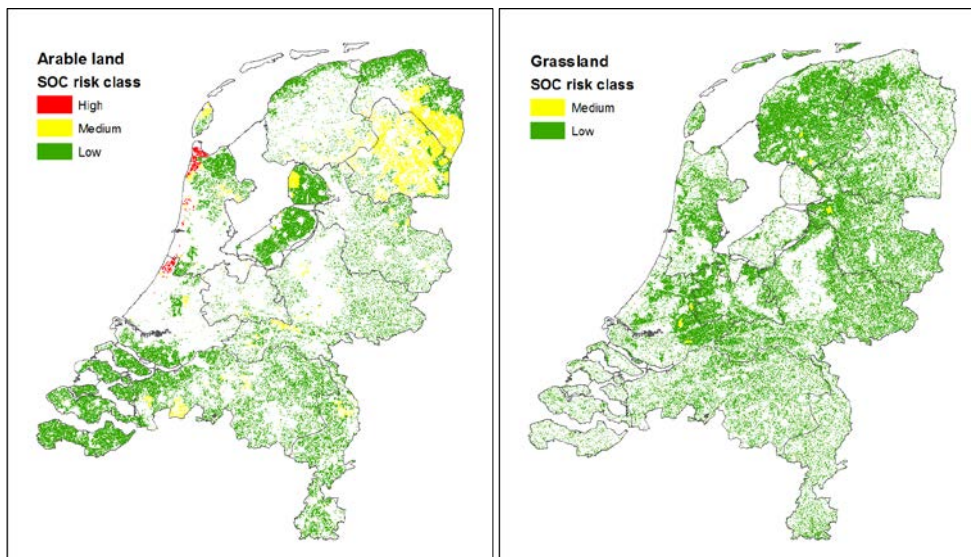
Het risico op achteruitgang van het OS gehalte in Nederlandse akkerbouw- en graslandgronden op minerale bodems is geschat door berekeningen uit te voeren met het Roth-C model. Er is hierbij een arbitraire indeling gemaakt van drie risicoklassen (groot, beperkt en klein). De risicoklassen betreffen de verandering in het eerste jaar ten opzichte van de hoeveelheid OS in de bodem en staan in tabel 4.

²³ Hanegraaf M.C., Hoffland E., Kuikman P.J., Brussaard L., 2009. Trends in soil organic matter contents in Dutch grasslands and maize fields on sandy soils. European Journal of Soil Science 60: 213-222.

Tabel 4. Arbitraire risicoklassen voor minerale gronden voor een groot, beperkt of klein risico op achteruitgang van het gehalte aan OS in de bodem bij een initieel laag (kleiner dan of gelijk aan 3%) en hoog (groter dan 3%) gehalte aan OS in de bovenste 25 cm van de bodem². De in de tabel genoemde percentages hebben betrekking op de OS gehalten.

OS gehalte	Risicoklassen (verandering eerste jaar)	Risico
Laag	Afname van 0,5% of meer	Groot
	Afname tussen 0 en 0,5%	Beperkt
	Geen verandering of toename	Geen
Hoog	Afname van 1% of meer	Groot
	Afname tussen 0,5 en 1%	Beperkt
	Afname kleiner of gelijk aan 0,5%, geen verandering of toename	Klein

De resultaten van deze berekeningen voor bouwland (links) en grasland (rechts) zijn weergegeven in figuur 5. Dit laat zien dat volgens deze berekeningen alleen akkerbouwgronden (links) in de kop van Noord-Holland en achter de duinen op de grens van Noord- en Zuid-Holland een groot risico lopen op daling van het OS gehalte in de bodem. In de Veenkoloniën en kleine delen van de Noordoostpolder, het rivierengebied, Noord Limburg en West Brabant is er een beperkt risico. Voor alle andere akkerbouwgronden (ongeveer 90 procent van het akkerbouwareaal) is het risico klein. Uit figuur 5 blijkt dat er geen graslandgronden (rechts) zijn met een groot risico op achteruitgang van het OS gehalte in de bodem en er zijn maar weinig gronden met een beperkt risico. Deze laatste bevinden zich in het zuiden van Friesland, het westen van Overijssel en in het Groene Hart van Nederland. Bij alle andere Nederlandse graslandgronden (meer dan 98 procent van het totale graslandareaal) is het risico klein op achteruitgang van het gehalte aan OS in de bodem.



Figuur 5. Risico's op achteruitgang in OS gehalten in de Nederlandse akkerbouwgronden². Rood = groot risico, geel = beperkt risico, groen = klein risico. De kaartjes zijn een weergave van modelleresultaten die zijn gebaseerd op geaggregeerde berekeningen.

De hierboven gepresenteerde informatie is gebaseerd op simulatieberekeningen. Deze zijn gedaan met een enigszins aangepast Roth-C model². Het Roth-C model is ontwikkeld om het OS gehalte van bouwland- en graslandgronden onder vergelijkbare klimatologische omstandigheden te berekenen, namelijk het OS gehalte van gronden in het Verenigd Koninkrijk. Roth-C wordt wereldwijd toegepast

en geldt als een van de meest betrouwbare modellen op dit gebied. Dit neemt niet weg dat de hier gepresenteerde uitkomsten niet meer zijn dan indicaties. Dit komt omdat de parameters waarmee de modelberekeningen zijn uitgevoerd met veel onzekerheden zijn omkleed. Het model zelf is een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid en de bepaling van de risicoklassen is arbitrair.

4. KOOLSTOFSTROMEN IN DE NEDERLANDSE LANDBOUW

In het voorgaande hoofdstuk stond de bodem centraal en is aangegeven hoeveel stabiele OS er gemiddeld per hectare in Nederlandse landbouwbodems zit en hoeveel OS er jaarlijks naar de bodem wordt toegevoerd en uit de bodem wordt afgevoerd. Op de schaal van een hectare wordt de aanvoer grotendeels bepaald door organische mest en gewasresten, en de afvoer wordt vooral door afbraak door micro-organismen bepaald. De aanvoer van OS op de schaal van Nederland is mede afhankelijk van hoe er op landelijke schaal met OS stromen wordt omgegaan. Een manier om dit in beeld te brengen, wordt geleverd door de diagrammen die het PBL heeft ontwikkeld voor de handelsstromen van voedsel en mest in, naar en vanuit Nederland²⁴. De diagrammen tonen de omvang van twee belangrijke productstromen: de productie, consumptie, import en export van voedsel en de productie, verwerking en export van dierlijke mest. De handelsstromen zijn door het PBL aangegeven in hoeveelheid product per jaar en hebben betrekking op 2009. Om de orde van grootte te schatten van de koolstofstromen van en naar Nederland en de productie van koolstof in Nederland hebben we de oorspronkelijke PBL-gegevens omgezet in eenheden koolstof. De hoeveelheid koolstof is afhankelijk van het product, melk bevat weinig koolstof en suikers juist veel. Door de afzonderlijke componenten in de voedsel- en meststromen (koolhydraten, aminozuren en vetten) om te rekenen in hoeveelheden koolstof, hebben we op een eenvoudige manier een inschatting gemaakt van de koolstofstromen²⁵, zie tabel 5.

Tabel 5. Schatting van de hoeveelheid koolstof die jaarlijks met landbouwproducten naar Nederland wordt aangevoerd en uit Nederland wordt afgevoerd²⁴.

Producten		C-stromen in de Nederlandse landbouw (kton C per jaar)			
		Import	Vastlegging	Consumptie	Export
A	Vlees en plantaardige producten	250			
A	Krachtvoer	500			
B	Akkerbouw- en tuinbouwgewassen		380		
B	Ruwvoer		600		
C	Vlees, zuivel, kaas, fruit, akkerbouw- en tuinbouwproducten			260	
D	Vlees, zuivel, kaas, fruit, akkerbouw- en tuinbouwproducten				365
	Totaal	750	980	260	365

²⁴ <http://www.pbl.nl/publicaties/slimme-steden-de-opgave-voor-de-21e-eeuwse-stedenbouw-in-beeld>.

²⁵ G.J. van den Born, PBL, persoonlijke mededeling.

In tabel 5 worden de volgende aan- en afvoerposten onderscheiden:

- A. de koolstof die jaarlijks Nederland binnenkomt met agrarische producten (vlees, plantaardige producten en ingrediënten voor krachtvoer),
- B. de koolstof die jaarlijks in de Nederlandse landbouw wordt vastgelegd in de plantaardige productie via de fotosynthese (akkerbouw- en tuinbouwgewassen, ruwvoer),
- C. de koolstof in landbouwkundige producten die jaarlijks in Nederland wordt geconsumeerd (vlees, zuivel, kaas, fruit, akkerbouw- en tuinbouwproducten),
- D. de koolstof in landbouwkundige producten die jaarlijks uit Nederland wordt geëxporteerd (vlees, zuivel, kaas, fruit, akkerbouw- en tuinbouwproducten).

Uit tabel 5 blijkt dat de jaarlijkse import van koolstof in de Nederlandse landbouw, 750 kton, weinig kleiner is dan de hoeveelheid koolstof die er jaarlijks door planten in de Nederlandse landbouw wordt vastgelegd, 980 kton. Aangenomen mag worden dat het op peil houden van het OS gehalte in Nederlandse landbouwbodems voor een aanzienlijk deel afhangt van deze import.

De hoeveelheid koolstof die in Nederland met het voedsel wordt geconsumeerd en de hoeveelheid koolstof die met landbouwproducten wordt geëxporteerd zijn van een lagere orde van grootte, respectievelijk 260 en 365 kton per jaar. Deze cijfers suggereren dat er op Nederlandse schaal jaarlijks een koolstofoverschot in de landbouw is. Het is zeer waarschijnlijk dat in dit schijnbare overschot voor een aanzienlijk deel de verademing tot CO₂ door mensen en dieren is inbegrepen. Mensen en dieren gebruiken voedsel immers voor een groot gedeelte als energiebron. Ook de door mensen en dieren uitgescheiden mest/ feces en urine is inbegrepen in het schijnbare overschot. Verademing en uitscheiding van koolstof door mens en dier zijn niet opgenomen in tabel 5 omdat hier geen betrouwbare cijfers over voorhanden bleken te zijn. Dit verklaart ook waarom het schijnbare overschot zich niet vertaalt in voordurende verhoging van de OS gehalten van Nederlandse bodems.

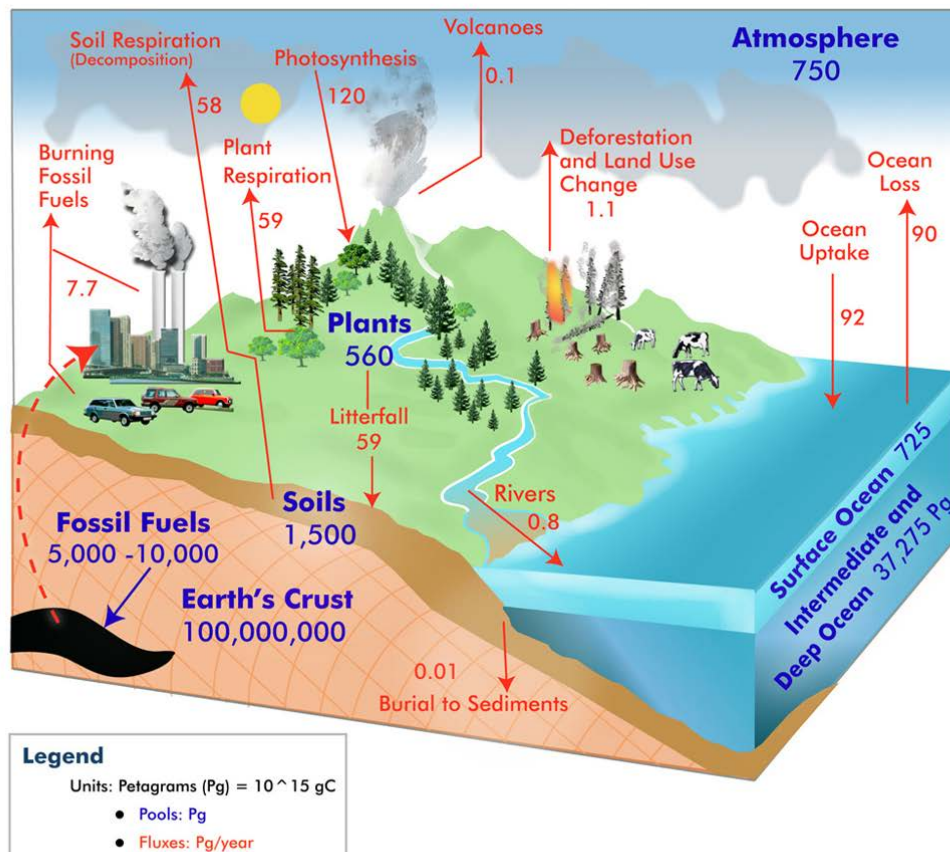
Enkele aan- en afvoerstromen zijn overigens in dit rekenvoorbeeld niet meegenomen, zoals die in de sierteelt. De gegevens zijn daarom niet compleet, maar geven wel een goed beeld van de omvang.

WETEN

Wereldvoorraad koolstof

Op aarde is meer dan 100 miljoen petagram²⁶ van het chemische element koolstof aanwezig. Dat is meer dan 10^{20} kg. Ruim 99 procent hiervan zit opgesloten in de aardkorst en neemt niet deel aan de koolstofkringloop. Van de overige koolstof, in totaal bijna 45×10^{15} kg, bevindt zich circa 85 procent in de oceanen, 9 procent in fossiele brandstoffen en 5 procent in de bodem, atmosfeer en vegetatie. De bodem bevat relatief veel koolstof, grotendeels vastgelegd als bodem OS, qua hoeveelheid twee keer zoveel als in de atmosfeer en drie keer zoveel als in vegetatie; in kalkrijke bodems is koolstof ook in minerale vorm als kalk (calciumcarbonaat, CaCO_3) aanwezig.²⁷

Tussen de koolstofvoorraden vindt voortdurend uitwisseling plaats. Zo nemen plantaardige organismen bij de fotosynthese koolstof als CO_2 op uit de atmosfeer en zetten dit daarmee om in organisch gebonden koolstof (biomassa). Na afsterven komt deze in de bodem terecht. Bij het verbranden van fossiele brandstoffen en bij de ademhaling (van mensen, dieren, van de bodem en van vegetatie) wordt organisch gebonden koolstof weer als anorganisch CO_2 in de atmosfeer gebracht.



Copyright 2010 GLOBE Carbon Cycle Project, a collaborative project between the University of New Hampshire, Charles University and the GLOBE Program Office.
Data Sources: Adapted from Houghton, R.A. Balancing the Global Carbon Budget. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 007.35:313-347, updated emissions values are from the Global Carbon Project: Carbon Budget 2009.

²⁶ Een petagram is een biljoen kilogram (10^{15} gram) en wordt ook wel gigaton genoemd.

²⁷ Koolstof dat is gebonden in minerale vorm is geoxideerd en vormt daarom geen vervanging voor fossiele grondstoffen, dit in tegenstelling tot organisch gebonden koolstof in biomassa dat is gereduceerd en daardoor energiedragend is.

5. ZORGEN VOOR BODEMORGANISCHE STOF

Bodem OS is een indicator voor de robuustheid van agrarische productiesystemen en de gezondheid van bodems. Robuuste agrarische productiesystemen op gezonde bodems zijn belangrijk voor het leveren van voldoende en veilig voedsel en water, het opvangen van de effecten van klimaatverandering en het leveren van biomassa voor materialen en energie. Bodem OS is dus belangrijk voor voedsel, water, energie, klimaatregulatie en gezondheid. De samenleving als geheel en vele partijen daarbinnen hebben daarom direct belang bij duurzaam beheer van bodem OS.

De mondiale koolstofvoorraden in de bodem zijn groot, er zit bijvoorbeeld meer koolstof in de bodem dan in de atmosfeer. In Nederland is het gehalte aan bodem OS relatief hoog, tussen de 2 en 7 procent, waarbij de veenbodems eruit springen met veel hogere gehalten tot wel 80 procent. Gemiddeld zit in de bovenste 30 centimeter van landbouwbodems ongeveer 11 kg koolstof per vierkante meter, in graslandbodems wat meer en in bouwland iets minder. In Nederlandse landbouwgronden is er gemiddeld gezien geen afname van het gehalte aan OS waar te nemen. Op slechts enkele zandgrondgebieden is er een risico op afname van het gehalte aan bodem OS. Dat vraagt aandacht.

De voorraad stabiele OS in de bodem is afhankelijk van omgevingsfactoren zoals bodemtype, klimaat en bodembeheer. Deze factoren bepalen de aan- en afvoerstromen naar en van de voorraad OS. De jaarlijkse stromen zijn klein ten opzichte van de voorraad. De mens beïnvloedt de voorraad OS in de bodem via gebruik en bijbehorend beheer van de bodem. Bij veranderingen in de balans tussen aan- en afvoer door gewijzigd gebruik en beheer duurt het lang voordat een nieuw evenwicht ontstaat. Omdat de jaarlijkse aan- en afvoer klein is ten opzichte van de voorraad duurt het ook lang voordat veranderingen kunnen worden waargenomen.

In Nederland zijn er zorgen over het OS gehalte in de bodem. Uit de onderzoeken komt echter geen netto grootschalige afname naar voren. Er lijkt sprake te zijn van een evenwicht qua voorraad in een situatie met een hoge *turnover* van OS, behoudens enkele kleinere gebieden waar meer risico is op achteruitgang van bodem OS gehalte.

Er is hierbij echter een aantal kanttekeningen te maken.

De aanvoer van OS naar de voorraad in de bodem kan onder druk komen te staan door:

- grootschalig gebruik van gewasresten als grondstof voor de *biobased economy*,
- een verschuiving naar teelten die weinig gewasresten achterlaten,
- verschuivingen naar gebruik van organische mest met een laag effectief organisch stofgehalte,
- toenemende vervuiling van organische reststromen,
- verdere noodzakelijke limitering van de toevoer van fosfor en stikstof via dierlijke mest;
- afname van importen van OS in Nederland ten opzichte van de export.

De afvoer van OS uit de voorraad kan sterk toenemen door verdere intensivering van grondbewerking en toenemende verlaging van het grondwaterpeil.

Het is niet ondenkbaar dat een aantal van deze verandering gaat optreden in Nederland, met als gevolg dat de voorraad stabiele OS zal worden aangetast.

Het op peil houden van de voorraad stabiele OS is gemakkelijker te realiseren dan het vergroten van de voorraad. Dit laatste wordt vaak bepleit ten behoeve van mitigatie van klimaatverandering en andere maatschappelijke opgaven. Hiervoor is gedegen systeemkennis noodzakelijk, omdat veel

maatregelen negatief kunnen uitpakken. Bijvoorbeeld doordat de uitstoot van broeikasgassen juist bevordert wordt, doordat een verhoging van het OS gehalte kan leiden tot meer uitspoeling van stikstof of doordat de bodem extra opgeladen wordt met vooral metalen uit organische reststromen. Deze kennis is vaak onvoldoende aanwezig en er is weinig ervaring met beheer ten behoeve van verhoging van de voorraad stabiele OS.

In het voorgaande is beschreven dat OS verschillende ecosystemendiensten kan leveren. Voor de ecosystemendienst voedselproductie moet OS nutriënten kunnen leveren en moet de OS deels gemakkelijk afbreekbaar zijn. Voor andere ecosystemendiensten is dit niet nodig en is het juist gewenst dat de OS stabiel is. Met deze tegengestelde kwaliteitseisen zou meer rekening moeten worden gehouden bij het beheer van OS. Er is echter nog veel onbekend over hoe dit zou moeten. Het is aan te bevelen hier nader onderzoek naar te laten verrichten.

APPENDIX: SAMENSTELLING TCB-WERKGROEP KOOLSTOFSTROMEN

De werkgroep bestond uit TCB-leden en deskundigen van buiten de TCB en werd ondersteund door een secretaris van de TCB.

TCB-leden:

- De heer dr. ir. J.J. (Jacques) Neeteson, tot 1 januari 2015 manager business unit Agrosysteemkunde van Plant Research International, Wageningen UR, sindsdien senior onderzoeker agroproductiesystemen, Agrosysteemkunde, Wageningen UR (voorzitter).
- De heer prof. dr. J.A. (Hans) van Veen, emeritus hoogleraar microbiële ecologie, Universiteit van Leiden en tot mei 2014 hoofd van de afdeling microbiële ecologie, Nederlands Instituut voor Ecologie, Wageningen, sindsdien senior onderzoeker microbiële ecologie, NIOO-KNAW.
- De heer prof. dr. M.A.P.A. (Rien) Aerts, hoogleraar systeemecologie aan de Vrije Universiteit Amsterdam en directeur van de afdeling Ecologische Wetenschappen van de VU, Amsterdam.
- De heer prof. dr. K. (Karsten) Kalbitz, tot 31 augustus 2014 hoogleraar Earth Surface Science, Instituut voor Biodiversiteit en Ecosysteem-Dynamica aan de Universiteit van Amsterdam, sindsdien Professor Soil Resources and Land Use, Institute of Soil Science and Site Ecology, TU Dresden en afgetreden als TCB-lid.
- De heer dr. ir. M.P.W. (Marthijn) Sonneveld, universitair docent bodemgeografie en landschap aan de Wageningen Universiteit, tot aan zijn overlijden in december 2013.
- De heer prof. dr. ir. A. (Tom) Veldkamp, hoogleraar ruimtelijke omgevingskwaliteit en decaan van de faculteit Geo-observatie en aardobservatie (ITC) aan de Universiteit Twente, Enschede, sinds oktober 2014.

Deskundigen van buiten de TCB:

- Mevrouw prof. dr. E. (Ellis) Hoffland, hoogleraar bodembioïecologie en biologische bodemkwaliteit, Wageningen UR.
- De heer ir. G.J. (Gert Jan) van den Born, PBL, Bilthoven, beleidsonderzoeker sector Water, Landbouw en Voedsel.

Secretariaat TCB:

- mevrouw dr. ir. A.E. (Sandra) Boekhold.

Redactie rapport:

- Mevrouw dr. J. (Joke) van Wensem (algemeen secretaris TCB).
- De heer dr. ir. J.J. (Jacques) Neeteson.

TCB publicaties gerelateerd aan dit advies:

Advies Normstelling voor meststoffen, van afval naar grondstof, A092(2014)

De bodem onder de bio-economie, S48(2013)

Advies Klimaat en het bodem- en watersysteem in gebiedsontwikkeling, A081(2012)

Advies Bodemverdichting, A071(2011)

Advies Sluiten nutriëntenkringlopen, A059(2010)

De commissieleden van de TCB zijn:

Mevr. A. Edelenbosch, voorzitter TCB, openbaar bestuur

Prof.dr. A.P. van Wezel, vicevoorzitter TCB, hoogleraar *Water Quality and Human Health* in de faculteit Geowetenschappen aan de Universiteit Utrecht en *principle scientist* bij KWR *Watercycle Research Institute*, Nieuwegein

Prof.dr. M.A.P.A. Aerts, hoogleraar systeemecologie aan de Vrije Universiteit Amsterdam en directeur van de afdeling Ecologische Wetenschappen van de VU

Prof.dr. J. Griffioen, hoogleraar waterkwaliteitsbeheer in de faculteit Geowetenschappen aan de Universiteit Utrecht en onderzoeker milieugeochemie, TNO Geologische Dienst, Utrecht

Prof.dr.ir. T. J. Heimovaara, hoogleraar *geo-environmental engineering*, aan de Technische Universiteit Delft

Dr.ir. J.J. Neeteson, manager business unit Agrosysteemkunde van Plant Research International, Wageningen UR

Prof.dr. A.M. de Roda Husman, hoogleraar *global changes* en milieuoverdraagbare infectieziekten in het *Institute of Risk Assessment Sciences (IRAS)* aan de Universiteit Utrecht en afdelingshoofd Milieu bij het RIVM, Bilthoven

Prof.dr. J.C.H.M. Vangronsveld, hoogleraar biologie en milieukunde aan de universiteit van Hasselt en directeur van het Centrum voor Milieukunde van de Universiteit Hasselt, België

Prof.dr. J.A. van Veen, emeritus hoogleraar microbiële ecologie aan de Universiteit Leiden en onderzoeker bij het KNAW-Nederlands Instituut voor Ecologie, Wageningen

Prof.dr.ir. A. Veldkamp, hoogleraar ruimtelijke omgevingskwaliteit en decaan van de faculteit Geo-observatie en aardobservatie (ITC) aan de Universiteit Twente, Enschede

Mevr. drs. E.B. Alwayn, ministerieel vertegenwoordiger, directeur Water en Bodem, Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Het secretariaat van de TCB:

Dr. J. van Wensem, algemeen secretaris/ directeur

Drs. J. Tuinstra, adviseur

Dr. M. Rutgers, adviseur, gedetacheerd vanuit het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)

Drs. M. ten Hove, adviseur

Drs. C.C.M. Gribling MPA, adviseur

J.A. Oudshoorn, ondersteuner

Dit advies is opgesteld door Joke van Wensem

