



Ontwikkeling praktijktool voor bodem C

Jan Peter Lesschen, Chantal Hendriks, Annelotte van der Linden, Bart Timmermans, Joost Keuskamp,
Dirk Keuper, Marjoleine Hanegraaf, Sjaak Conijn, Thalisa Slier

Ontwikkeling praktijktool voor bodem C

Jan Peter Lesschen¹, Chantal Hendriks¹, Annelotte van der Linden¹, Bart Timmermans², Joost Keuskamp^{3/4}, Dirk Keuper³, Marjoleine Hanegraaf⁵, Sjaak Conijn⁵, Thalisa Slier¹

1 Wageningen Environmental Research

2 Louis Bolk Instituut

3 CLM Onderzoek en Advies BV

4 Biont Research

5 Wageningen Plant Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research, Louis Bolk Instituut, CLM Onderzoek en Advies BV en Wageningen Plant Research in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoek binnen het klimaatenvelop programma Slim landgebruik (projectnummer BO-53-002-009).

Wageningen Environmental Research

Wageningen, maart 2020

Gereviewd door:

Gert Jan Reinds, teamleider van Duurzaam Bodemgebruik

Akkoord voor publicatie:

Gert Jan Reinds, teamleider van Duurzaam Bodemgebruik


Rapport 2990
ISSN 1566-7197

In het Klimaatakkoord is voor landbouwbodems een doelstelling van 0,5 Mton CO₂-vastlegging per jaar in 2030 voorgesteld. Om dit te realiseren, is er behoefte aan een praktijktool die op perceel- en bedrijfsniveau veranderingen in bodem C-voorraad kan berekenen en het effect van bodem C-maatregelen kan kwantificeren. Uit een inventarisatie van mogelijke bodem C-modellen zijn er drie geselecteerd: CCB, NDICEA en RothC. De databehoeftes van de modellen is in kaart gebracht en de modellen zijn getest aan de hand van twee langetermijndatasets, de 'Mest als Kans'-proef en een langetermijnexperiment van proefboerderij Vredepeel. De keuze voor welk model te gebruiken als praktijktool hangt af van de beoogde toepassing. Wanneer de tool alleen voor monitoring van bodem C geschikt moet zijn, zou RothC een logische keuze zijn vanwege de minimale data-invoer en de mogelijkheid om makkelijk grote datasets (veel percelen) door te rekenen. Als het doel gericht is op advisering van boeren zou NDICEA geschikter zijn, omdat het meer indicatoren berekent en interacties met stikstof- (en fosfaat)bemesting meeneemt. CCB zit hier qua gebruikersgemak en databehoeftes tussenin.

Trefwoorden: systeemmodellen, koolstofkringloop, koolstofvastlegging, bodem

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/517746> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

CC license CC-BY-NC 4.0

 2020 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- 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.

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



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Inhoud

	Verantwoording	5
	Samenvatting	7
1	Introductie	9
	1.1 Achtergrond	9
	1.2 Doelstelling	9
	1.3 Aanpak	10
2	Programma van eisen	11
3	Analyse bestaande koolstofmodellen	12
	3.1 Keuze modellen	12
	3.1.1 CANDY	12
	3.1.2 CANDY Carbon Balance (CCB)	12
	3.1.3 Century	12
	3.1.4 Cool Farm Tool	12
	3.1.5 DayCent	13
	3.1.6 DeNitrification-DeComposition (DNDC)	13
	3.1.7 EPIC	13
	3.1.8 NDICEA	13
	3.1.9 ORCHIDEE	13
	3.1.10 OS balans NMI	13
	3.1.11 OS-balans Productschap Akkerbouw	14
	3.1.12 RothC	14
	3.2 Criteria voor beoordeling	14
	3.3 Resultaat analyse	17
4	Databehoefte modellen	18
5	Kwantitatieve vergelijking modellen	20
	5.1 Beschrijving testdataset	20
	5.1.1 Proeflocatie Mest Als Kans in Lelystad	20
	5.1.2 Proeflocatie Vredepeel	21
	5.2 Beschrijving aanpak	21
	5.3 Resultaten	23
	5.3.1 Koolstofaanvoer	23
	5.3.2 Koolstofvoorraad	24
	5.4 Discussie	25
6	Simuleren van maatregelen	29
	6.1 Grondbewerking	29
	6.1.1 NDICEA	29
	6.1.2 CCB	30
	6.1.3 RothC	31
	6.2 Externe aanvoer organische stof	31
	6.2.1 NDICEA	31
	6.2.2 CCB	31
	6.2.3 RothC	31

6.3	Interne input organische stof	32
6.3.1	NDICEA	32
6.3.2	CCB	32
6.3.3	RothC	32
7	Conclusies en aanbevelingen	34
	Literatuur	35
	Bijlage 1 Gedetailleerde beschrijving bodem C-modellen	37

Verantwoording

Rapport: 2990

Projectnummer: 5200044766

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: teamleider van Duurzaam Bodemgebruik

naam: Gert Jan Reinds

datum: 02-03-2020

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Gert Jan Reinds

datum: 02-03-2020

Samenvatting

De landbouwsector kan op verschillende manieren bijdragen aan de klimaatdoelstellingen. Zo kunnen boeren aanpassingen doen in hun bodembeheer die ervoor zorgen dat er meer CO₂ opgeslagen of vastgehouden wordt in de bodem (bodem C-maatregelen). In het Klimaatakkoord is voor landbouwbodems een doelstelling van 0,5 Mton CO₂-vastlegging per jaar opgenomen in 2030. Om dit te realiseren, is er behoefte aan een praktijkmodel dat op perceel- en bedrijfsniveau veranderingen in bodem C-voorraad kan berekenen en het effect van bodem C-maatregelen kan kwantificeren. Het doel van deze studie is om vanuit bestaande bodem C-modellen één of meerdere praktijkmodellen te identificeren. Het praktijkmodel moet toepasbaar zijn in Nederlandse condities, zich lenen voor opschaling en bodem C-maatregelen door kunnen rekenen om de netto CO₂-emissie of -vastlegging te bepalen, zodat het gebruikt kan worden voor het monitoren van de realiseerbare bijdrage aan de klimaatdoelstelling voor slim landgebruik.

De eisen waaraan een praktijkmodel moet voldoen, zijn opgesteld en de geschiktheid van twaalf koolstofmodellen is geïnventariseerd. Uit deze inventarisatie zijn vier potentiële praktijkmodellen geselecteerd: Century, CCB, NDICEA en RothC. Deze modellen zijn getest aan de hand van twee lange-termijndatasets, namelijk vanuit de 'Mest als Kans' (MAK) proef (Rietberg en Van der Burgt, 2012) en vanuit een aantal proefvelden van proefboerderij Vredepeel. Century is tijdens deze test afgevallen als praktijkmodel vanwege de complexiteit en de verouderde software, die geautomatiseerd runnen moeilijk maakt. De andere drie modellen hebben voor- en nadelen en zijn meer of minder geschikt voor het doorrekenen van bepaalde bodem C-maatregelen.

Gedurende dit project is duidelijk geworden dat er op dit moment nog niet voor één model gekozen moet worden als praktijkmodel. De keuze voor welk model te gebruiken als praktijkmodel hangt af van de beoogde toepassing. Wanneer het model alleen voor monitoring van bodem C geschikt moet zijn, zou RothC een logische keuze zijn, aangezien de inputdata makkelijk te verkrijgen zijn in de praktijk, de code gemakkelijk aan te passen is en grote datasets (veel percelen) doorgererekend kunnen worden. Als het doel gericht is op advisering van boeren zou juist NDICEA geschikter zijn, omdat het meer indicatoren (en met hogere temporele resolutie) kan leveren op en ook interacties met stikstof (en fosfaat) bemesting meeneemt. CCB heeft een bepaald gebruikersgemak als voordeel; ook door mensen met weinig kennis van het model kunnen maatregelen om bodem C te verhogen, worden ingevoerd.

Om beter inzicht te krijgen in het functioneren van de verschillende modellen zou het goed zijn om deze modellen te testen op één of meer langetermijndatasets. Aangezien deze binnen Nederland zeer beperkt beschikbaar zijn, zou ook gebruikgemaakt kunnen worden van data uit omliggende landen. Een alternatief is het gebruiken van een fictief proefveld met klassieke akkerbouwrotatie (tarwe, bieten, aardappelen), aangezien de nu gebruikte testdatasets niet de standaard akkerbouwrotatie hebben. De volgende stap is daarna om de software van het praktijkmodel geschikt te maken voor toepassing, het praktijkmodel te testen op bedrijven binnen de pilots van het 'Slim Landgebruik'-programma en maatregelen door te rekenen voor de voorgestelde bodem C-maatregelen.

1 Introductie

1.1 Achtergrond

In 2017 heeft het kabinet in het regeerakkoord reductiedoelstellingen voor broeikasgasemissies opgenomen. De landbouw- en landgebruikssector moet in 2030 een bijdrage leveren van 3,5 Mton CO₂ per jaar; hiervan is 1,5 Mton opgenomen voor slim landgebruik. In het Klimaatakkoord dat in juni 2019 is gepresenteerd, is dit verder uitgewerkt en is een reductiedoelstelling voor landbouwbodems opgenomen van 0,5 Mton CO₂ per jaar in 2030. Dit betekent dat er in Nederland gemiddeld per hectare landbouwgrond ongeveer 500 kg CO₂ (ofwel 125 kg koolstof) extra per jaar in de bodem moet worden vastgelegd. Om de bijdrage die de bodem kan leveren aan het vastleggen van koolstof (C) te bepalen, is het belangrijk om de bijdrage van maatregelen die C-vastlegging bevorderen te kwantificeren.

Voor het kwantificeren van vastlegging (of verliezen) van organische koolstof in de bodem zijn metingen over langere tijd nodig, omdat het meestal een relatief langzaam proces betreft waarin op korte termijn slechts kleine veranderingen optreden ten opzichte van een grote voorraad. Om een goed beeld te krijgen van de koolstofvoorraad, is inzicht in de ruimtelijke en temporele variabiliteit noodzakelijk. Het nemen en analyseren van bodemonsters is echter een kostbaar proces, wat het monitoren van de koolstofvoorraad belemmert. Daarnaast is het direct bepalen van de effecten van bodem C-maatregelen lastig, omdat het aantal boeren dat maatregelen heeft geïmplementeerd gering is, er praktische variatie bestaat in hoe en waar dit precies wordt gedaan en omdat langetermijmetingen ontbreken. Het alternatief is om veranderingen in de koolstofvoorraad in te schatten met behulp van simulatiemodellen. Momenteel zijn er veel koolstofmodellen beschikbaar, maar niet elk model is geschikt als praktijkmodel. Het praktijkmodel moet namelijk geschikt zijn om voor Nederlandse landbouwbedrijven met grasland en/of bouwland koolstofvoorraden te kwantificeren, veranderingen in C-voorraad te simuleren en het effect van bodem C-maatregelen te schatten.

Deze studie vergelijkt en beoordeelt beschikbare bodem C-modellen met als doel één of meerdere modellen te identificeren als praktijkmodel. Het praktijkmodel zou op langere termijn kunnen worden uitgebouwd tot een Decision Support Tool, waarmee boeren het effect van bodem C-maatregelen kunnen analyseren en afwegen. Het is van belang dat de uitkomsten met de praktijktool aansluiten bij de nationale emissieregistratie of uiteindelijk zelfs gebruikt kunnen worden om mitigatie-inspanningen zichtbaar te maken in de emissieregistratie en mee te laten tellen voor de nationale reductiedoelstelling. Het praktijkmodel moet daarmee bijdragen aan het bereiken van de mitigatiedoelstelling van 1,5 Mton voor slim(mer) landgebruik.

Dit project sluit aan op het lopende Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI) project 'Belang van vastlegging van koolstof in de bodem voor mitigatie van broeikasgassen', waarin Wageningen Research samen met FrieslandCampina werkt aan de ontwikkeling van een bodem C-module om koolstofvastlegging in minerale landbouwbodems en CO₂-emissies uit veengronden op bedrijfsniveau te bepalen voor de melkveehouderij.

1.2 Doelstelling

Het doel van deze studie is om vanuit bestaande C-modellen één of meerdere praktijkmodellen te identificeren voor het kwantificeren van de koolstofvoorraad in minerale landbouwbodems op perceel- en bedrijfsniveau en het simuleren van veranderingen in de koolstofvoorraad onder huidig of alternatief bodembeheer. Het praktijkmodel moet toepasbaar zijn in Nederlandse condities, zich lenen voor opschaling en bodem C-maatregelen door kunnen rekenen om de netto CO₂-emissie of -vastlegging te bepalen, zodat het gebruikt kan worden voor het monitoren van de realiseerbare bijdrage aan de klimaatdoelstelling voor slim landgebruik.

1.3 Aanpak

Voor de ontwikkeling van het praktijkmodel zijn verschillende stappen doorlopen. Er is eerst in samenwerking met stakeholders uit de sector en onderzoekers die bodemkoolstof modelleren een programma van eisen opgesteld voor een praktijkmodel. Aspecten die we in acht hebben genomen tijdens het opstellen van het programma van eisen, zijn o.a. de bruikbaarheid en toepassing van het te ontwikkelen praktijkmodel voor nationale emissieregistratie, de (beperkte) beschikbare data van bedrijven en de koppeling met bestaande gebruiks- en bodemdata van bedrijven. Tevens is er een selectie gemaakt van de maatregelen die het model door moet kunnen rekenen.

Vervolgens is er een inventarisatie uitgevoerd van bestaande modellen die mogelijk geschikt zijn als praktijkmodel. Tijdens deze inventarisatie is er gekeken naar modellen met een uiteenlopende complexiteit; van een simpele organische stofbalanstool, zoals de *OS-tool* van het NMI, tot complexe procesmodellen als *Century*. Voor de modellen die voldeden aan de gestelde eisen is er gekeken welke data er ten minste nodig zijn om het model op perceel- en bedrijfsniveau te kunnen gebruiken. De inputdata van de geselecteerde modellen omvatten o.a. data over bodem, weer, bedrijfsmanagement, bemesting en gewasopbrengst.

Op basis van de gestelde eisen worden de geschiktste modellen getest aan de hand van twee langetermijndatasets, namelijk vanuit de 'Mest Als Kans' (MAK) proef en een aantal proefvelden van proefboerderij Vredepeel. Voor het vervolg van deze studie zullen de modellen ook nog worden getest op een aantal praktijkbedrijven die meedoen aan de pilots in het Slim Landgebruik-programma. Met behulp van de daar opgedane ervaring zal samen met de sector en het ministerie van LNV besloten worden hoe een praktijkmodel zal worden geïmplementeerd. Hiervoor zal het model omgezet worden naar een geschikte softwareomgeving, met koppeling aan bestaande datasystemen en een toegankelijke gebruiksomgeving.

2 Programma van eisen

In samenspraak met het ministerie van LNV en de stakeholders die deelnemen aan het Slim Landgebruik Programma is besloten om in dit project – voor de periode 2018/2019 – de focus te leggen op het zoeken naar een praktijkmodel dat geschikt is voor het schatten van veranderingen in bodem C onder onveranderd of alternatief bodembeheer. In een later stadium kan het praktijkmodel mogelijk verder worden ontwikkeld als Decision Support Tool. Om een geschikt praktijkmodel te ontwikkelen, is het belangrijk om de behoefte van de gebruikers duidelijk in beeld te hebben. Daarom is er in samenwerking met het ministerie, onderzoekers en andere stakeholders een programma van eisen opgesteld waarin naar voren komt wat het model moet bieden en aan welke criteria het idealiter moet voldoen. Hierbij zijn onderstaande aspecten genoemd die voor de ontwikkeling van het praktijkmodel in acht genomen zijn. Het model moet:

- Een organische stof (OS)-balans op perceelniveau kunnen uitrekenen op basis van de aanvoer en afbraak van organische stof in de bodem.
- Afbraak van organische stof kunnen simuleren, waarbij rekening wordt gehouden met bodemtype, gewas en klimaat.
- Passen in een monitoringsinstrument dat gebruikt wordt (of kan worden) bij de berekening van de broeikasgasemissies in ketenanalyses.
- Bruikbaar zijn en aansluiten bij de nationale emissieregistratie.
- Effecten van bodemmaatregelen kunnen simuleren, waaronder verandering in aanvoer organische stof, aanpassing in rotaties en mate van grondbewerking.
- Een databehoeftte hebben die past bij de (beperkte) beschikbare data van bedrijven en mogelijkheid voor koppeling met bestaande bedrijfsmanagement- en bodemdatasystemen.
- Inzichtelijke resultaten leveren voor gebruikers (boeren, maar ook organisaties en ketenpartijen die bij monitoring betrokken zijn).
- De mogelijkheid hebben voor koppeling van koolstofdynamiek met mogelijke afwenteling op N₂O-emissies.

3 Analyse bestaande koolstofmodellen

3.1 Keuze modellen

Om te onderzoeken welke bestaande bodemkoolstofmodellen en tools geschikt zijn voor het praktijkmodel, hebben we een lijst opgesteld met modellen die frequent worden toegepast in onderzoek alsook in de praktijk. Bij de eerste inventarisatie is gekeken naar:

- Organische stof (OS) balans tools (bijv. OS-tool NMI)
- Modellen gebaseerd op de 'stock change approach' van de IPCC (bijv. Cool Farm Tool)
- Dynamische koolstofmodellen (bijv. Roth-C, NDICEA, EPIC, ORCHIDEE, CCB)
- Procesmodellen (bijv. CANDY, DayCent, Century, DNDC, EPIC)

Hieronder staat een korte beschrijving van de verschillende modellen. Meer informatie over de modellen is te vinden in Bijlage 1.

3.1.1 CANDY

Het CANDY-model is opgebouwd uit meerdere modules en is ontwikkeld om koolstof- en stikstofdynamiek van landbouwbodems te simuleren. Het model is gebaseerd op langetermijnexperimenten en kan gebruikt worden om dagelijkse veranderingen in water, temperatuur, koolstof en stikstof in de bodem te berekenen. Hiermee kunnen landbouwbedrijven kortetermijnvariaties in bodemstikstof bepalen. Daarnaast bevat het model ook een koolstofmodule waarmee langetermijnveranderingen in de koolstofvoorraad in de bodem berekend kunnen worden. Deze zijn afhankelijk van aanvoer van organisch materiaal, bodemstructuur, klimaat en bedrijfsmanagement (Franko et al., 1995).

3.1.2 CANDY Carbon Balance (CCB)

Het CANDY Carbon Balance (CCB) model is een versimpelde versie van de bodemkoolstofmodule van CANDY, met een lagere databehoeft. CCB is ontwikkeld om jaarlijkse veranderingen in organischestofgehalte van landbouwbodems te simuleren. Dit kan op perceelniveau, maar ook op grote schaal, zoals regionaal of landelijk. De jaarlijkse verandering in koolstof is afhankelijk van temperatuur, neerslag, irrigatie, gewasopbrengst, aanvoer van vers organisch materiaal, bodemstructuur, en het initiële organisch stofgehalte van de bodem (Franko et al., 2011). Voor simulaties op perceelniveau kunnen gegevens handmatig ingevoerd worden. Voor simulaties van grotere gebieden kunnen middels de zogenaamde batch-mode eenvoudig grote hoeveelheden data ingevoerd worden.

3.1.3 Century

Het procesmodel Century 4.6 kan gebruikt worden om de koolstof- en nutriëntendynamiek te simuleren voor verschillende soorten ecosystemen, waaronder graslanden, landbouwgronden, bossen en savannes. Voor de grasland-, gewas- en bossystemen zijn er verschillende modules voor de productie van planten die gekoppeld zijn aan een gemeenschappelijk bodemorganische stof-module. De organische stof-module simuleert de stroming van C, N, P en S door plantenafval en de verschillende anorganische en organische compartimenten in de bodem (Parton et al., 1992).

3.1.4 Cool Farm Tool

De Cool Farm Tool 2.0 is een decision-support tool, ontwikkeld door de Cool Farm Alliance. Deze tool is bedoeld voor boeren en de voedselverwerkende industrie om gezamenlijk aan klimaatdoelstellingen te werken en verbeteringen in de voedselketen te realiseren. Het kan onder andere gebruikt worden om de CO₂-footprint bij het verbouwen van gewassen te berekenen. In de online rekentool worden

gegevens ingevoerd voor bijvoorbeeld het gewas, de opbrengst, het kunstmestverbruik, de landbewerking en oogstmethode. De tool bepaalt vervolgens de CO₂-footprint van het geteelde gewas. Op deze manier kunnen scenario's worden berekend om te bepalen wat verstandige keuzes zijn om zo de milieu-impact in de voedselketen te beperken (Hillier et al., 2011).

3.1.5 DayCent

DayCent 4.5 is een biogeochemisch model dat in staat is om groei van gewassen, koolstofdynamiek, N-uitspoeling, gasvormige emissies (bijv. N₂O, NO, N₂, NH₃, CH₄ en CO₂) en koolstofluxen te simuleren in akkerbouwgewassen, graslanden, bossen en savanne-ecosystemen. Het model kan ook gebruikt worden om verschillende managementpraktijken te simuleren (bijv. bemesting, grondbewerking, snoeien, snijden, begrazen etc.), evenals specifieke externe verstoringen (bijv. brand) (Parton et al., 1998). Het model is een uitgebreide versie van het Century-model.

3.1.6 DeNitrification-DeComposition (DNDC)

Het DeNitrification-DeComposition (DNDC 9.5) model is een procesmodel voor koolstof en stikstof biogeochemie in de landbouw bodems. Het model bevat vier modules en kan gebruikt worden om gewasgroei, bodemtemperatuur, bodemkoolstofdynamiek, N-uitspoeling en emissies van lachgas (N₂O), stikstofmonoxide (NO), stikstof (N₂), ammoniak (NH₃), methaan (CH₄) en koolstofdioxide (CO₂) te berekenen (Li et al., 1994).

3.1.7 EPIC

Het Environmental Policy Impact Climate (EPIC) 08.10 model is ontwikkeld om de invloed van bodemerosie op bodem productiviteit in de Verenigde Staten te bepalen (Izaurre et al., 2006). Het EPIC-model bestaat uit meerdere componenten om erosie, plantengroei en gerelateerde processen te simuleren. Het bevat ook economische componenten om de kosten van erosie en de effecten van managementmaatregelen door te rekenen. De nieuwste versie van EPIC bevat ook een koolstofmodule die gebaseerd is op het Century model (Parton en Rasmussen, 1994).

3.1.8 NDICEA

NDICEA 6.2 is een dynamisch model ontwikkeld om effecten van afbraak van koolstof en nalevering van stikstof door verschillen in landbouwmanagement (rotatie, bemesting etc.) weer te geven op perceelniveau (Van der Burgt et al., 2006). NDICEA is opgebouwd uit verschillende modules voor gewas, water en bodem. Van de drie modules is de bodemmodule het uitgebreidst. Deze module bevat zowel een koolstofafbraak-model als een stikstoflux-model. Het model is gemaakt om boeren praktisch inzicht en advies te kunnen geven. Metingen van N-mineraal op verschillende dieptes in de bodem, en C-organisch, kunnen worden gebruikt ter validatie van berekeningen.

3.1.9 ORCHIDEE

ORCHIDEE 2.0 is een dynamisch vegetatiemodel, ontwikkeld door Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). Het simuleert de uitwisseling van water, koolstof en energie tussen het aardoppervlak en de atmosfeer. Het model kan gekoppeld worden aan een global climate model om interactie van vegetatie en landgebruik met het klimaat te simuleren. De bodemmodule van dit model is vergelijkbaar met die van Century (Krinner et al., 2005).

3.1.10 OS balans NMI

OS Balans NMI 1.2.0 is een simpele, gebruikersvriendelijke rekentool ontwikkeld voor bedrijven in de akkerbouw, vollegrondsgroenteteelt en de boomkwekerij (NMI, 2014). Met deze tool kan de organische stof-balans van landbouwbedrijven berekend worden. De organische stof-balans is gebaseerd op de aan- en afvoer van organisch materiaal. In deze tool wordt ook rekening gehouden met de afbraak van organische stof in de bodem.

3.1.11 OS-balans Productschap Akkerbouw

De OS-balans tool van het productschap akkerbouw is ontwikkeld als hulpmiddel voor akkerbouwers bij organische stofbeheer op hun bedrijf (Zwart et al., 2013). Met deze tool kunnen de OS-balans en stikstofmineralisatie per teeltrotatie op een eenvoudige manier worden berekend. De OS-balans wordt bepaald aan de hand van het Effectieve Organische Stof (EOS) gehalte in gewasresten, groenbemesters en organische meststoffen en de natuurlijke afbraak van bestaande organisch stof in de bodem. De natuurlijke afbraak wordt berekend als functie van organischestofgehalte. De balans van EOS en natuurlijke afbraak geeft inzicht in de verandering van het OS-gehalte in de bodem.

3.1.12 RothC

RothC-26.3 is een dynamisch model voor afbraak van koolstof in de bodem. Het model is ontwikkeld om de koolstofdynamiek in minerale bodems te simuleren en houdt rekening met de effecten van temperatuur, neerslag, verdamping, kleigehalte en bodembedekking. Het kan gebruikt worden om veranderingen in bodemorganische stof-gehalte te simuleren met behulp van vooraf bekende inputgegevens, maar ook om de inputgegevens te bepalen als de veranderingen in bodemorganische stof bekend zijn. RothC is gekalibreerd op data van langetermijnexperimenten uit Rothamsted. Het was in eerste instantie ontwikkeld voor akkerland, maar het model is later uitgebreid, zodat het ook voor grasland en bosbouw gebruikt kan worden. Het model is veelvuldig getest en gevalideerd, maar het vereist voor elke situatie een aparte initialisatie en validatie. Het model wordt gebruikt op verschillende schaalniveaus, variërend van plot tot wereldschaal, met data van langetermijnexperimenten uit verschillende regio's en landen (Coleman and Jenkinson, 1996).

3.2 Criteria voor beoordeling

Modeleigenschappen en selectiecriteria dragen bij aan de geschiktheid van een model als praktijktool. De twaalf modellen zijn uitgebreid geïnventariseerd. Een overzicht van deze inventarisatie is weergegeven in Tabel 1.

Er is een aantal criteria opgesteld die de keuze van een model als potentiële praktijktool beïnvloeden:

- Idealiter is het model wetenschappelijk gepubliceerd en toegepast in wetenschappelijke studies.
- Idealiter is het model publiekelijk beschikbaar, heeft het een licentie voor commercieel gebruik en is de Application Programming Interface (API) beschikbaar.
- Het moet mogelijk zijn om de broncode van het model te verifiëren en aan te passen.
- Idealiter is het model gevalideerd en toegepast in gebieden vergelijkbaar met Nederland.
- De benodigde inputparameters moeten beschikbaar (of makkelijk te verkrijgen) zijn.
- Idealiter heeft het model meerdere outputparameters en niet alleen C.
- Het model moet bodemorganische stof dynamisch of procesmatig simuleren.
- Het model moet op perceel- en bedrijfsniveau kunnen fungeren.
- Het model moet bodem C-maatregelen door kunnen rekenen.

Tabel 1 Beoordelingscriteria en eigenschappen van de twaalf geselecteerde modellen.

	CANDY	CCB	Century	Cool farm tool	Daycent	DNDC	EPIC	NDICEA	ORCHIDEE	OS balans NMI*	OS product-schap	Roth C
Selectiecriteria												
Wetenschappelijk gepubliceerd	Veel	Veel	Veel	Weinig	Veel	Veel	Veel	Veel	Veel	Niet	Veel	Veel
Publiekelijk beschikbaar	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Licentie commercieel gebruik	Onbekend	Op aanvraag	Onbekend	Op aanvraag	Onbekend	Onbekend	Op aanvraag	Op aanvraag	Op aanvraag	Onbekend	Onbekend	Op aanvraag
Code/rekenregels openbaar	Nee	Ja	Op aanvraag	Op aanvraag	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Op aanvraag	Ja
API beschikbaar**	Ja	Nee	Ja	Ja	Beschikbaar te maken	Beschikbaar te maken	Ja	Nee	Beschikbaar te maken	Nee	Nee	Beschikbaar te maken
Gevalideerd	Beperkt	Beperkt	Ja	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Nee	Ja
Bestaande (praktijk)toepassingen	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Veel	Beperkt	Beperkt	Veel	Veel	Veel	Veel	Beperkt	Veel
Inputdata makkelijk te verkrijgen	Ja	Ja	Beperkt	Ja	Beperkt	Beperkt	Beperkt	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja
Outputparameters	Meerdere	Meerdere	Meerdere	Meerdere	Meerdere	Meerdere	Meerdere	Meerdere	Meerdere	Alleen C	Meerdere	Alleen C
OS-dynamisch	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nee	Beperkt	Ja
Toepassingsgebied vergelijkbaar met NL ***	Ja	Ja	Beperkt	Ja	Beperkt	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja
Perceel- en bedrijfsniveau	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Bodem C-maatregelen	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Moelijk	Makkelijk	Niet	Niet	Niet	Moelijk
grondbewerking doorrekenen												
Bodem C-maatregelen interne OS input doorrekenen	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk
Bodem C-maatregelen externe aanvoer OS doorrekenen	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk	Moelijk	Niet	Makkelijk	Niet	Makkelijk	Makkelijk	Makkelijk
Eigenschappen												
Wordt actief verder ontwikkeld	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja	Ja	Ja	Nee	Ja
OS/C pools (C (conceptueel) /M (meetbaar))	C en M	C	C	Alleen totaal OS	C	C	C en M	C	C	Alleen totaal OS	Alleen totaal OS	C en M
Aantal OS-/C-pools	3	4	3	1	3	4	3	3	3	1	1	5
Temporele schaal	1-100 jaar	1-100 jaar	1-1000 jaar	1-20 jaar	1-1000 jaar	1-1000 jaar	1-1000 jaar	1-12 jaar	1-100 jaar	1-5 jaar	1-10 jaar	1-1000 jaar
Temporele resolutie	Dag	Jaar	Maand	Jaar	Dag	Dag	Dag	Dag	Verschillende (uur-jaar)	1 jaar	Jaar/rotatie	Maand

	CANDY	CCB	Century	Cool farm tool	Daycent	DNDC	EPIC	NDICEA	ORCHIDEE	OS balans NMI*	OS product- schap	Roth C
Ruimtelijke resolutie	Micro tot perceel	Perceel tot regionaal 30 cm	Perceel tot landschap 20 cm	Bedrijfs- niveau 30 cm	Perceel 20 cm	Perceel tot nationaal	Perceel	Punt of perceel Variabel	Perceel tot wereld 0-2 m	Perceel	Perceel	Perceel tot wereld Variabel
Bodemdiepte	Wel	Wel	Niet	Niet	Wel		Variabel	Wel		Niet	Variabel	Variabel
Meerdere bodemlagen	Wel	Wel	Wel	Niet	Wel	Wel	Wel	Wel	Niet	Niet	Niet	Niet
N-interacties	Wel	Wel	Wel	Niet	Wel	Wel	Wel	Wel	Niet	Niet	Niet	Niet
Relatie met waterbalans	Wel	Wel	Wel	Niet	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Niet	Niet	Wel
Procesmodel	Wel	Wel	Wel	Niet	Wel	Wel	Wel	Wel	Wel	Niet	Niet	Wel

* Niet voor grasland

** Application Programming Interface

*** Grasland en akkerbouw, vergelijkbaar met Nederland qua klimaatzone

3.3 Resultaat analyse

Om uiteindelijk tot een selectie van geschiktste modellen te komen, hebben we gekeken welke modellen voldoen aan de selectiecriteria. Op basis hiervan zijn we tot een selectie gekomen van vier modellen: Century, RothC, CCB en NDICEA.

Deze vier modellen zijn wetenschappelijk gepubliceerd, publiekelijk beschikbaar en hebben een beschikbare broncode. Verder kunnen deze vier modellen de meeste bodem C-maatregelen doorrekenen en is de OS-balans dynamisch geïmplementeerd. De inputdata zijn makkelijk te verkrijgen voor CCB en RothC, maar moeilijker voor Century. NDICEA kan met makkelijk verkrijgbare data rekenen, maar het kan met moeilijker verkrijgbare data meer detail bieden (met name op de stikstofdynamiek).

De modellen CANDY, DNDC, Daycent, EPIC en ORCHIDEE zijn niet gekozen, aangezien deze modellen veel inputdata en veel kennis vereisen, en daarmee niet geschikt zijn als praktijkmodel. De modellen zijn meer geschikt voor toepassing in onderzoek. De OS-balanstool van NMI en die van Productschap Akkerbouw zijn daarentegen wel ontwikkeld als praktijktool, maar kunnen minder goed de bodem C-dynamiek simuleren en nemen het effect van bodemtype en klimaat niet mee. Daarnaast zijn deze tools ook minder geschikt voor het doorrekenen van de effecten van een aantal bodem C-maatregelen. Aanpassingen in de broncode zijn nodig om deze modellen geschikter te maken als praktijkmodel.

De Cool Farm Tool is uiteindelijk niet meegenomen, aangezien dit model bodem C op een andere manier simuleert. Het model simuleert bodem C met behulp van de stock change approach van de IPCC en het werkt met grove klassen van bodem C. Daardoor kan het model niet goed bodem C-veranderingen over tijd simuleren. De Nederlandse akkerbouwsector heeft nu echter wel voorgesteld om de Cool Farm Tool te gebruiken voor het berekenen van de Carbon Footprint van de teelt van gewassen. De Cool Farm Tool is hier zeker geschikt voor en heeft gedetailleerde berekeningen voor de emissies van N₂O en CO₂ uit energie, maar voor monitoring van bodem C-veranderingen is het dus minder geschikt. Mogelijk zou in de toekomst ook een meer proces gebaseerd model voor bodem C gekoppeld kunnen worden aan de Cool Farm Tool. IPCC heeft hiervoor recentelijk een nieuwe tool gelanceerd (Buendia et al., 2019). Deze tool werd gelanceerd en gepubliceerd nadat deze studie was uitgevoerd. Vandaar dat we dit niet meegenomen hebben in onze analyse.

4 Databehoefte modellen

De vier geschiktste koolstofmodellen hebben verschillende databehoeften. De databehoefte is afhankelijk van het doel van het model en de complexiteit van het model. Uit Tabel 1 kwam naar voren dat de inputdata voor RothC en CCB makkelijker te verkrijgen zijn dan de inputdata voor Century. NDICEA kan zowel met een beperkte als met een uitgebreide dataset rekenen. Als we de modellen gaan testen, zal NDICEA met een uitgebreide dataset rekenen. De databehoefte kan opgesplitst worden in noodzakelijke en optionele inputparameters. Voor de vier koolstofmodellen zijn deze noodzakelijke inputparameters gegeven in Tabel 2.

Klimaatdata kunnen verkregen worden via het KNMI en hoeven dus niet apart door de gebruiker te worden aangeleverd. Andere inputdata moeten verkregen worden uit bestaande databases of aan de hand van metingen.

Tabel 2 Noodzakelijke input parameters voor de vier geselecteerde modellen (lege cellen betekent dat het model deze parameter niet gebruikt).

Input parameter	RothC	NDICEA	Century	CCB
OS of C gehalte	% per perceel	g/kg of % per perceel/object	g C/m ²	% per perceel of dt/ha
N gehalte			g N/m ²	% per perceel
Bulk dichtheid	g/cm ³ per perceel*		g/cm ³	g/cm ³
Kleigehalte	% per perceel	% per perceel/object		% per perceel
Siltgehalte				% per perceel
Kieselgehalte				% per perceel
Bodemtextuur		type*	fractie [0-1]	
Bodembedekking	wel/niet per maand			
PH			[-]	
Temperatuur	°C, per bedrijf/perceel	°C per regio/locatie	°C	°C per perceel
Neerslag	mm/maand per bedrijf/perceel	mm/dag per regio/locatie	mm/maand	mm/jaar per perceel
Potentiële evapotranspiratie	mm/maand per bedrijf/perceel	mm/dag per regio/locatie		
Zonnestraling/ gewasverdamping (Makkink)		Watt/dag of joule/cm ² /dag		
Type organische mest	type op gewas-/perceelniveau	type per perceel/object	type per plot, maand	type per perceel, jaar
Hoeveelheid organische mest	ton/ha op gewas-/perceelniveau	ton/ha per perceel/object	ton/ha per plot	dt/ha per perceel
C-gehalte organische mest	kg/ton op gewas-/perceelniveau*	kg/ton per perceel/object	kg/ton per plot, maand	w/w% per perceel
N-gehalte organische mest	kg/ton op gewas-/perceelniveau*	kg/ton of % per perceel/object*		w/w% per perceel
Manier van toediening		kan wel/niet gekozen worden		
Moment van toediening	Jaar	datum	maand	jaar
Drogestofgehalte mest		kg/ton per perceel/object*		w/w% per perceel
Gewastype	type per gewas/perceel	type per perceel/object	type per plot	type per perceel
Moment van oogst		Datum	maand	
Moment van inzaai		Datum	maand	

Input parameter	RothC	NDICEA	Century	CCB
Opbrengst	kg/ha per gewas en perceel	ton/ha per perceel/object		dt/ha per perceel
Harvest index	[-] per gewas			
Opbrengst gewasresten	kg/ha per gewas en perceel *	ton/ha per perceel/object*		dt/ha per perceel
Afvoer gewasresten	kg/ha per gewas en perceel			dt/ha per perceel
Moment afvoer gewasresten		datum		
Moment van irrigatie	maand per perceel*	datum	maand	jaarbasis
Hoeveelheid	mm/maand per perceel*	mm/dag per perceel/object	intensiteit per plot, maand	mm/jaar per perceel
N-gehalte irrigatie water		mg/L*		g/L
Beweiding	% per perceel/bedrijf		intensiteit per plot, maand	per perceel
Soortensamenstelling grasland		per perceel of bedrijf		per perceel
Scheuren	% per perceel/bedrijf	datum per perceel/bedrijf		per perceel
Maaidatum		datum per perceel/bedrijf		
Grondbewerking	type per gewas of perceel	intensiteit per perceel/object	intensiteit per plot	per perceel

* Optioneel voor betreffende model

In het project 'Ontsluiting van en koppeling aan praktijkdata over bodemgebruik en bodemmanagement', project 1.7 van het Slim Landgebruik Programma, is gekeken in hoeverre deze benodigde inputdata, zoals weergegeven in Tabel 2, beschikbaar zijn in bestaande databronnen, waaronder landbouwtelling, Kringloopwijzer, Teeltcentraal en het Bedrijven Informatienetwerk. Uit de analyse kwam naar voren dat geen enkele databron alle benodigde data voor de modelsimulaties bevat. Evenwel is het merendeel van de benodigde data uit een combinatie van datasets te halen (Smit et al., 2019). Een deel van de data over bodembeheer maatregelen bleek te ontbreken of niet op het juiste detailniveau aanwezig te zijn. Verdere informatie over deze analyse kan gevonden worden in het rapport van Smit et al. (2019).

5 Kwantitatieve vergelijking modellen

Naast de kwalitatieve vergelijking van de modellen, zoals beschreven in de vorige hoofdstukken, zijn de geselecteerde koolstofmodellen ook kwantitatief met elkaar vergeleken op basis van datasets van twee langetermijnexperimenten. Dit levert inzicht in de vergelijkbaarheid van de modellen en de geschiktheid voor toepassing onder Nederlandse omstandigheden op basis van data uit deze praktijkproeven. Voor deze studie zijn de data van proeflocatie MAK en van proefboerderij Vredepeel geselecteerd.

Het model Century bleek tijdens het testen van de modellen niet correct te functioneren vanwege de complexiteit en de verouderde software, die automatiseren voor meerdere percelen niet mogelijk maakte. Aanpassingen in de interface van het model zijn noodzakelijk om het toe te kunnen passen. Century is daarom alsnog afgefallen als potentieel praktijkmodel en zal niet verder meegenomen worden in de kwantitatieve analyse.

5.1 Beschrijving testdataset

5.1.1 Proeflocatie Mest Als Kans in Lelystad

De proeflocatie van MAK in Lelystad is een van de langstlopende proeflocaties van Nederland (sinds 1999). De boerderij is gelegen ten noorden van Lelystad en het kleigehalte van de bodem varieert tussen de 9 en 9,75%. De proef is aangelegd met dertien typen bemesting in vier herhalingen. In deze studie focussen we op vier typen bemesting, namelijk: NPK, rundveedrijfmest, groente-, gruit-, en tuinafvalcompost (gft) en potstalmest. Voor deze studie gebruiken we de OS-gehaltes die in 2007 en 2016 gemeten zijn in de bodem op 25 cm diepte. In 2007 lag het OS-gehalte in de laag 0-30 cm tussen de 1,5 en 1,7% en in 2016 tussen de 1,7 en 2,1%. Uit de metingen blijkt dat het uitsluitend gebruiken van gft op termijn kan leiden tot lagere opbrengsten. Hetzelfde geldt voor het uitsluitend gebruiken van NPK (Bloem et al., 2017). Op alle percelen wordt van 2011 t/m 2013 en van 2015 t/m 2017 naast NPK, drijfmest, gft of potstalmest ook een groenbemester geteeld na de oogst van het hoofdgewas. De groenbemester en de gewasresten die overblijven na de oogst van het hoofdgewas worden in de bodem ondergewerkt.

Tabel 3 Organische mestgiften (ton vers) voor vier verschillende behandelingen in de proeflocatie 'Mest als Kans' in Lelystad.

Jaar	Gewas	NPK	Drijfmest	Gft	Potstalmest
2007	Aardappel	0	0	0	0
2008	Schorseneer	0	39,5	18,9	40,5
2009	Pastinaak	0	41,0	18,9	37,4
2010	Pompoen	0	0	0	0
2011	Pastinaak	0	40,5	9,2	35,4
2012	Aardappel	0	38,5	8,3	27
2013	Schorseneer	0	0	0	0
2014	Prei	0	38,6	9,7	31,4
2015	Suikermis	0	38,6	9,7	31,4
2016	Schorseneer	0	0	0	0
2017	Pastinaak	0	38,6	9,3	31,4
2018	Zomergerst	0	0	0	0

5.1.2 Proeflocatie Vredepeel

Proefboerderij Vredepeel is gelegen in het Limburgse Vredepeel. Deze jonge ontginningsgrond had aan het begin van het experiment een OS-gehalte in de bodem voor de laag 0-30 cm tussen de 3,6 en 4,4%, waarbij het kleigehalte lager is dan 1%. De proefboerderij onderscheidt drie typen bemesting: 1) biologisch bemesting waarbij rundveedrijfmest, vaste rundermest en Vinassekali toegediend wordt aan de bodem, 2) bemesting met een lage C-input waarbij alleen mineralenconcentraat toegediend wordt aan de bodem en 3) bemesting met standaard C-input, waarbij zowel runder-, vleesvarkens- en zeugendrijfmest toegediend wordt (Tabel 4). Op het perceel met biologische bemesting zijn vanaf 2000 metingen gedaan, maar voor de andere twee percelen zijn alleen data van 2011 t/m 2016 beschikbaar met één gewasrotatie voor alle drie de bemestingstypen. De gewasrotatie bestaat uit aardappelen, conservenerwt, prei, zomergerst, suikerbiet en snijmais (n=6). Op het perceel met biologische input wordt peen gekweekt in plaats van suikerbiet. De gemeten veranderingen in OS-gehalte zijn variabel en de periode van 2011 t/m 2016 is te kort om inzicht te krijgen in de verandering in koolstofvoorraad. Daarom is besloten om deze metingen nog drie keer te herhalen t/m 2034. Om de weerdata voor de koolstofmodellen te extrapoleren, worden de KNMI-data van 2002 gebruikt. Dit jaar wordt gezien als representatief jaar zonder grote extremen. De gewasresten van zomergerst en prei worden afgevoerd. De gewasresten en/of stoppels van de andere gewassen worden in de bodem ondergewerkt.

Tabel 4 Organische mestgiften (ton vers) voor drie verschillende behandelingen voor de proeflocatie in Vredepeel.

Jaar	Gewas	Biologische	Laag	Standaard
2011	Aardappel	47	0	30
2012	Doperwt	10	0	20
2013	Prei	28	0	40
2014	Zomergerst	20	0	0
2015	Suikerbiet/peen	40	0	35
2016	Snijmais	60	0	35

5.2 Beschrijving aanpak

Om de modellen op een consistente manier met elkaar te vergelijken, is het belangrijk dat de inputdata zo veel mogelijk hetzelfde zijn. Op deze manier zijn verschillen in de resultaten meest waarschijnlijk te verklaren door de werking en parametrisatie van het model. Voor de vergelijkbaarheid zijn de volgende aannames gemaakt:

- De startwaarde van het organischestofgehalte in de bodem is het eerste jaar waarin metingen plaatsvonden. Voor MAK is hiervoor het OS-gehalte van 2007 genomen die bepaald is door middel van 'loss on ignition' en voor Vredepeel is het OS-gehalte van 2011 genomen die bepaald is met de Near InfraRed (NIR) methode.
- De bodemonsters zijn genomen op 25 cm diepte, maar de modellen gaan ervan uit dat het OS-gehalte dat op deze diepte gemeten is, representatief is voor de bovenste dertig centimeter.
- Voor omrekening van OS-percentages naar totaal C-gehalte is aangenomen dat de bodem-organische stof voor de helft uit C bestaat. Dit geldt voor zowel zand- als kleibodems (Pribyl et al., 2010).
- Voor Vredepeel ontbraken gegevens van de gewasresten (bovengrondse stoppel) van snijmais in 2016. Hiervoor is een waarde van 1 ton C/ha aangenomen.
- Er is voor MAK en Vredepeel gerekend met verschillende weerdata: voor MAK zijn data uit KNMI zone 5 gebruikt en voor Vredepeel uit KNMI zone 14.
- Voor Vredepeel was maar een periode van zes jaar aan data beschikbaar. Aangezien dit voor bodem C-modellering een korte periode is, is deze rotatie nog drie keer herhaald en daarmee is een periode van 2011-2034 doorgerekend.
- Voor de toekomstige jaren (2018-2034) is gerekend met de weerdata van 2002. Dit is een standaardjaar in het NDICEA-model.

- De klei- en silt-percentages van de bodem zijn in het geval van Vredepeel in het laboratorium gemeten. Bij de MAK-data zijn kleigehalte en de afslibbaarheid gemeten en het silt-percentage is geschat met de door Eurofins gehanteerde formule $\text{Afslibbaar\%} = \text{klei\%} + 0.3 \cdot \text{silt\%}$.
- De modellen werken met vooraf gedefinieerde gewassen en meststoffen om C-input af te leiden. In het geval dat een gewas of meststof niet beschikbaar is in het model, dan is deze vervangen door een alternatief met vergelijkbare eigenschappen.
- Indien drogestof- en C-gehaltes van meststoffen, gewassen of gewasresten niet expliciet zijn opgegeven, zijn de standaardwaarden van het model genomen. Voor Vinassekali wordt een C-gehalte van 29,9% aangehouden (Harry Verstegen, pers.com).

De modellen leveren voor de vergelijking als resultaat de berekende totale jaarlijkse koolstofinput naar de bodem en de koolstofvoorraad voor de bovenste bodemlaag (0-30 cm). De verschillen tussen de modellen en de verschillen tussen gemeten en gesimuleerde OS-gehaltes zullen worden geëvalueerd. Deze evaluatie zal meegenomen worden in de discussie omtrent de geschiktheid van de modellen voor het ontwikkelen van een praktijkmodel voor bodem C-berekeningen.

In sommige gevallen is het gewas of de meststof niet beschikbaar in het model en moet deze vervangen worden door een alternatief met vergelijkbare eigenschappen. Voor CCB worden schorseneer en pastinaak vervangen door peen, omdat peen een vergelijkbare humificatie-coëfficiënt (d.w.z. coëfficiënt voor het omzetten van vers organisch materiaal in stabielere organische stof) en hoeveelheid gewasresten heeft na oogst. In RothC worden deze gewassen vervangen door 'overige groenten'. Schorseneer en pastinaak zijn wel beschikbaar voor NDICEA. Hetzelfde geldt voor pompoen en prei. Voor CCB en RothC zijn deze gewassen vervangen door aardappel, omdat bij deze gewassen een geringe hoeveelheid organische stof achterblijft, met een relatief lage humificatie-coëfficiënt. In CCB is suikermais vervangen door corncobmix en conservenerwt door voedererwt. In RothC worden deze gewassen vervangen door respectievelijk mais en peulvruchten.

Voor Vredepeel wordt voor bemestingstype 'laag' en 'standaard' de groenbemester Engels raai geoogst waarbij de gewasresten worden afgevoerd. In CCB en NDICEA is deze teelt opgenomen als hoofdgewas, omdat afvoer van gewasresten bij invoer van groenbemester niet mogelijk is. Groenbemesters waarvan de oogst niet wordt afgevoerd (zoals grasklaver en Japanse haver), zijn in NDICEA en CCB opgenomen als rogge. In RothC wordt geen onderscheid gemaakt tussen verschillende typen groenbemester.

Voor de drie bemestingstypen in Vredepeel zijn ook de hoeveelheden bovengrondse stoppel gemeten. In RothC en NDICEA zijn deze data gebruikt als input. NDICEA berekent de ondergrondse stoppel – afhankelijk van het gewas – met behulp van omrekeningsfactoren. RothC doet dit niet. Voor CCB is het niet mogelijk om gemeten hoeveelheden stoppel in te voeren. Het betreft namelijk een vaste waarde, afhankelijk van het gewas.

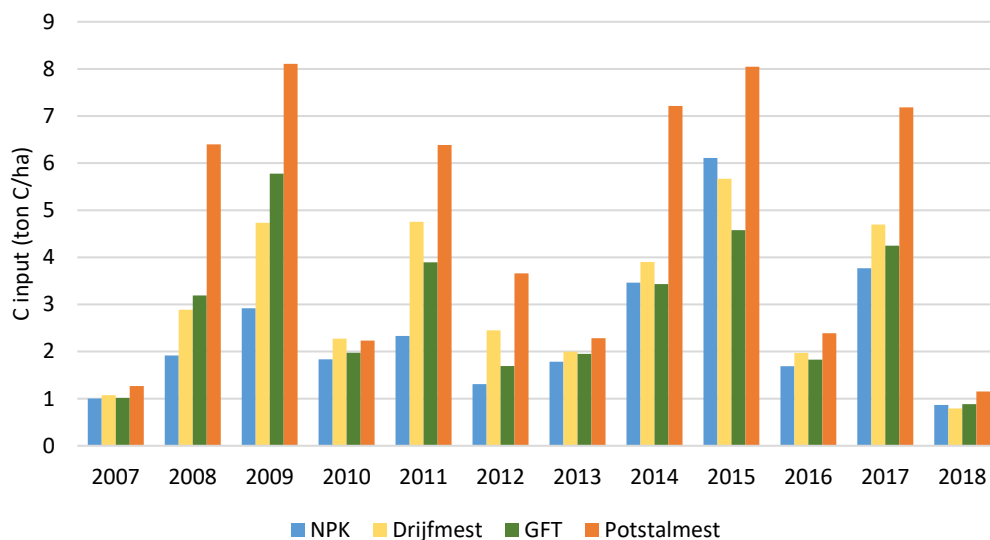
Voor CCB worden de inputdata gecorrigeerd indien drogestof- (ds) en C-gehaltes van meststoffen zijn gemeten. Bijvoorbeeld, rundveedrijfmest heeft binnen CCB een standaard ds-gehalte van 10% en een C-gehalte van 30% van de ds. De rundveedrijfmest toegepast op Vredepeel-bio heeft een C-gehalte van 3,2%. Als in het bio-scenario 1 ton rundveedrijfmest toegediend wordt, wordt dat binnen CCB vertaald naar 1,0667 ton om aan dezelfde C-invoer te komen. Voor de drie MAK-scenario's met dierlijke mest of gft is dezelfde werkwijze toegepast.

Vinassekali, toegepast in het Vredepeel-bio-scenario, is voor de modellen ingevoerd als zuiveringsslib, met een correctie voor het opgegeven C-gehalte van 29,9% (Harry Verstegen, pers.com.). Het C-gehalte van vaste rundermest en rundveedrijfmest in de Vredepeel-scenario's zijn overgenomen door alle drie de modellen zoals opgegeven op basis van algemene cijfers van De Haan et al. (2017). Voor MAK zijn deze data wel gemeten. We zien dat ondanks de gedetailleerde data die beschikbaar zijn voor deze twee proeflocaties, het lastig blijft om de modelinput consistent en compleet te krijgen. Pragmatische keuzes zijn daardoor soms noodzakelijk.

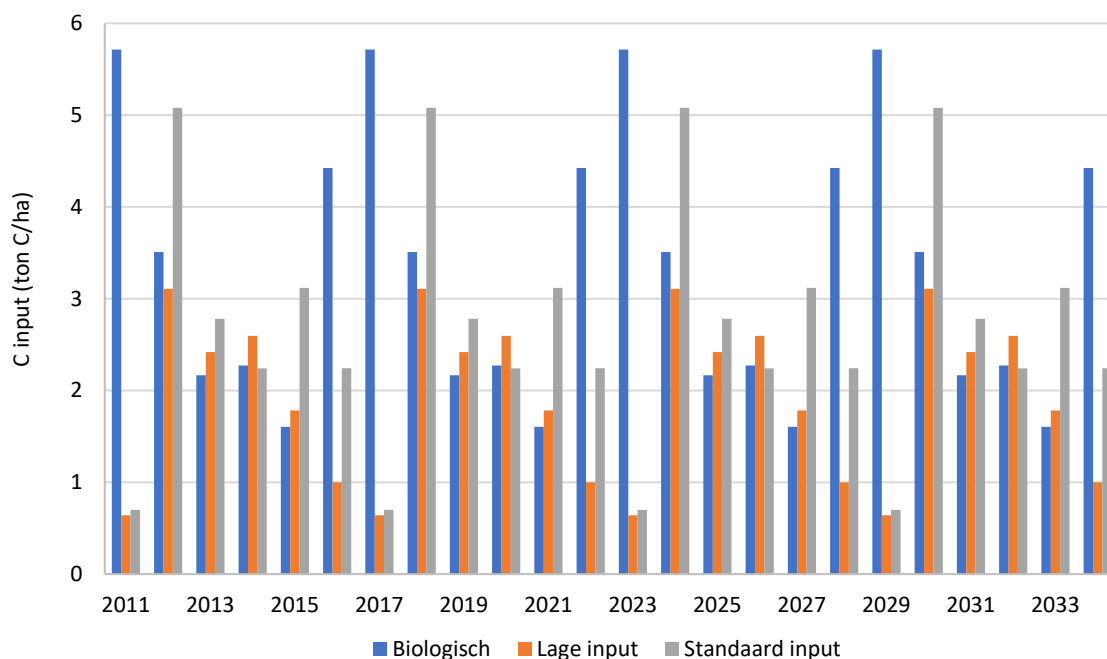
5.3 Resultaten

5.3.1 Koolstofaanvoer

Door de verschillende aannames zitten er kleine verschillen in de totale jaarlijkse koolstofinput tussen de drie modellen. De koolstofinput bestaat uit groenbemester, externe OS-input en gewasresten. Voor RothC, dat als voorbeeld in Figuur 1 is weergegeven, fluctueert de koolstofinput op de locatie MAK tussen de 0,8 en 8,4 ton C/ha. De koolstofinput tussen de verschillende percelen ligt in sommige jaren dichter bij elkaar dan in andere. Met name de totale koolstofinput met potstalmest ligt in 7 van de 12 jaren (een stuk) hoger dan in de andere scenario's. Voor de locatie Vredepeel geldt ook dat de totale koolstofinput tussen de drie modellen kleine verschillen vertoont vanwege de aannames. De koolstofinput van RothC fluctueert in Vredepeel tussen de 0,6 en 5,7 ton C/ha. Het biologische perceel ontvangt een afwijkende hoeveelheid organische input. In de jaren dat de organische stof aanvoer voor de scenario's 'laag' en 'standaard' laag is, is deze voor het scenario 'biologisch' juist hoog (Figuur 2).



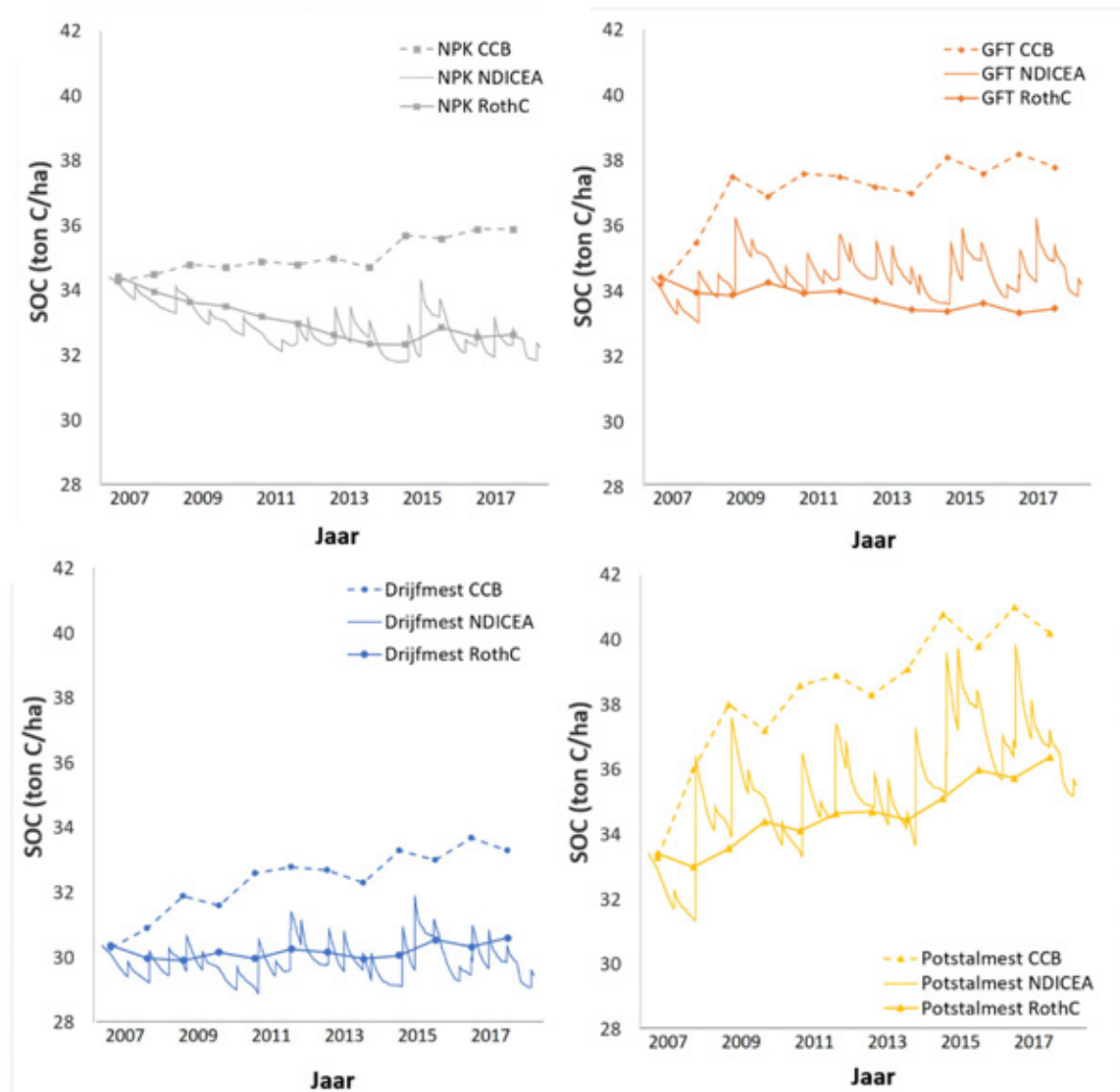
Figuur 1 Totale koolstof input voor de vier behandelingen in 'Mest als Kans' (Lelystad).



Figuur 2 Totale koolstofinput voor de drie behandelingen in Vredepeel.

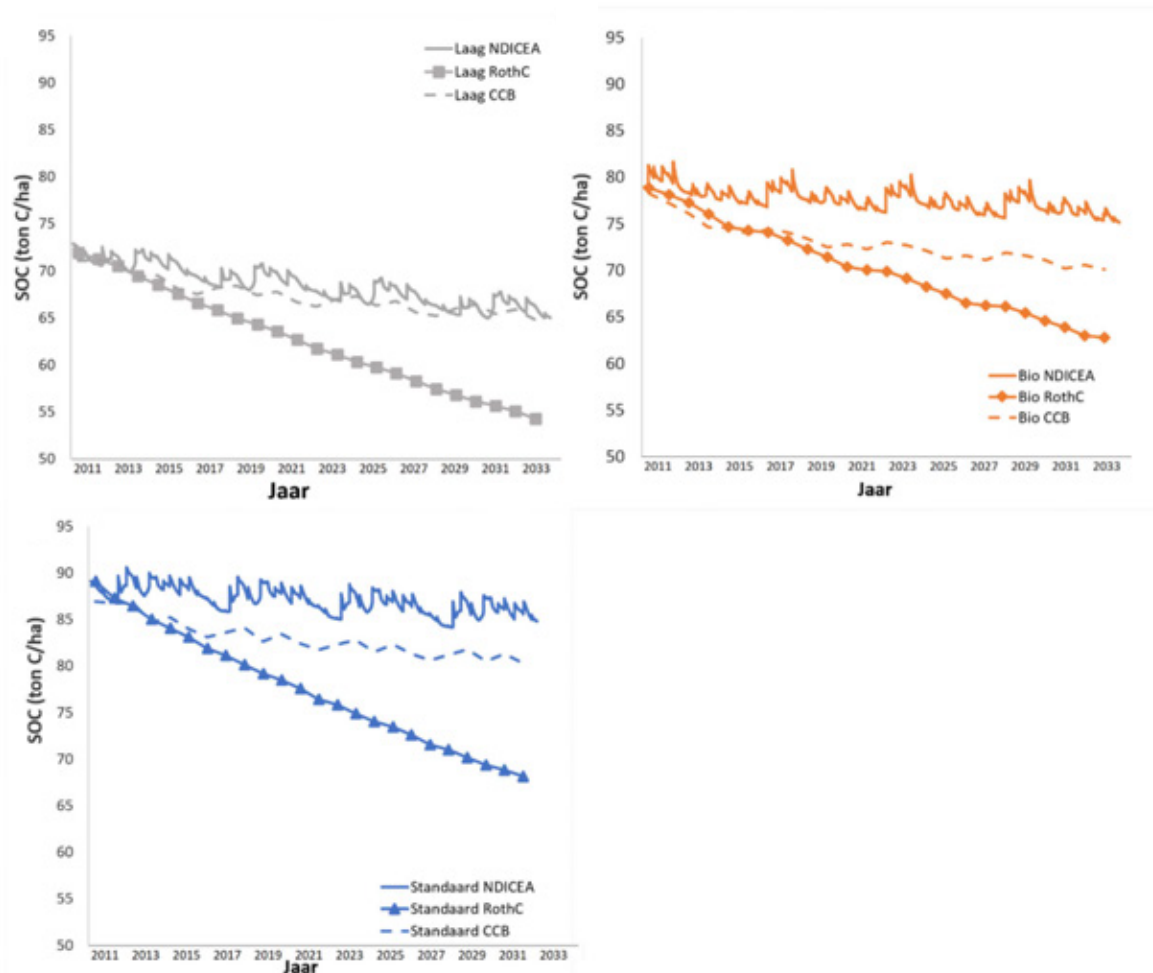
5.3.2 Koolstofvoorraad

In MAK zien we dat alle drie de modellen een stijgende koolstofvoorraad simuleren voor het perceel waar potstalmest wordt toegediend en RothC en NDICEA een lichte daling simuleren voor het perceel waar alleen NPK wordt toegediend (Figuur 3). De koolstofvoorraad blijft min of meer gelijk in de percelen waar rundveedrijfmest of gft-compost wordt toegediend. De resultaten van CCB geven een veel hogere koolstofvoorraad vergeleken met RothC en NDICEA, die dichtbij elkaar liggen. De gemeten OS-gehaltes zijn weergegeven in Figuur 5. Echter, een trend op basis van twee metingen is gezien de onzekerheid in de bodem OS-bepaling eigenlijk niet goed mogelijk.



Figuur 3 Voor vier verschillende behandelingen en drie verschillende modellen zijn bodemorganische stof (SOC) gehalten gesimuleerd (locatie: 'Mest als Kans' in Lelystad).

Voor de Vredepeel-percelen zien we dat de koolstofvoorraad volgens alle drie de modellen en voor alle drie de behandelingen afneemt. Echter de snelheid waarmee de koolstofvoorraad afneemt, verschilt per model. NDICEA laat de kleinste daling zien en RothC de grootste. In de eerste zes jaar van de simulatie zijn de resultaten van RothC en CCB vrijwel gelijk, terwijl daarna voor de langere termijn RothC een sterkere daling voorspelt in vergelijking met de resultaten van CCB. NDICEA en RothC laten vergelijkbare resultaten zien voor de behandeling 'laag'. Alleen voor de mesttoediening 'laag' en 'standaard' zijn langetermijnexperimenten beschikbaar. De gemeten OS-gehaltes zijn weergegeven in Figuur 6 en deze wijzen uit dat de afname in OS-gehalte die RothC laat zien, minder realistisch is dan die van CCB.



Figuur 4 Voor drie verschillende behandelingen en drie verschillende modellen zijn bodem-organische stof (SOC) gehaltes gesimuleerd (locatie: Vredepeel).

5.4 Discussie

Uit de vergelijking wordt duidelijk dat er behoorlijke verschillen zijn tussen de modellen, waardoor de verandering in bodem C op basis van simulatie behoorlijk onzeker is. Voor MAK voorspellen de modellen NDICEA en RothC dezelfde trend en wijkt CCB hiervan af. Voor Vredepeel voorspellen alle drie de modellen dezelfde trend, maar laat RothC een veel sterkere daling in koolstofvoorraad zien dan NDICEA en voor de langere termijn ook vergeleken met CCB. Voor een volgende fase is het belangrijk om een modelvergelijking uit te voeren waarbij specifiek gekeken wordt naar bodemmaatregelen, aangezien het dan belangrijk is dat modellen elkaar niet gaan tegenspreken. De absolute toe- of afname in bodem C is dan minder van belang, maar de richting van verandering moet wel consistent voorspeld worden. Voor de proeflocatie MAK simuleert CCB een hogere C-vastlegging dan NDICEA en RothC. We zien bij CCB vooral in de eerste jaren een sterke toename in koolstofvoorraad, terwijl deze in de jaren daarna stabiliseert. De initialisatie van het model zou dan ook een mogelijke verklaring kunnen zijn voor de hogere koolstofvastlegging bij CCB voor MAK. De hogere koolstofvastlegging zoals berekend met CCB voor de MAK-proef kan ook verklaard worden door het bodemtype in Flevoland. CCB is erg gevoelig voor het kleigehalte van de betreffende bodem. Mogelijk wordt de remmende invloed van het kleigehalte op de afbraak van organische stof overschat.

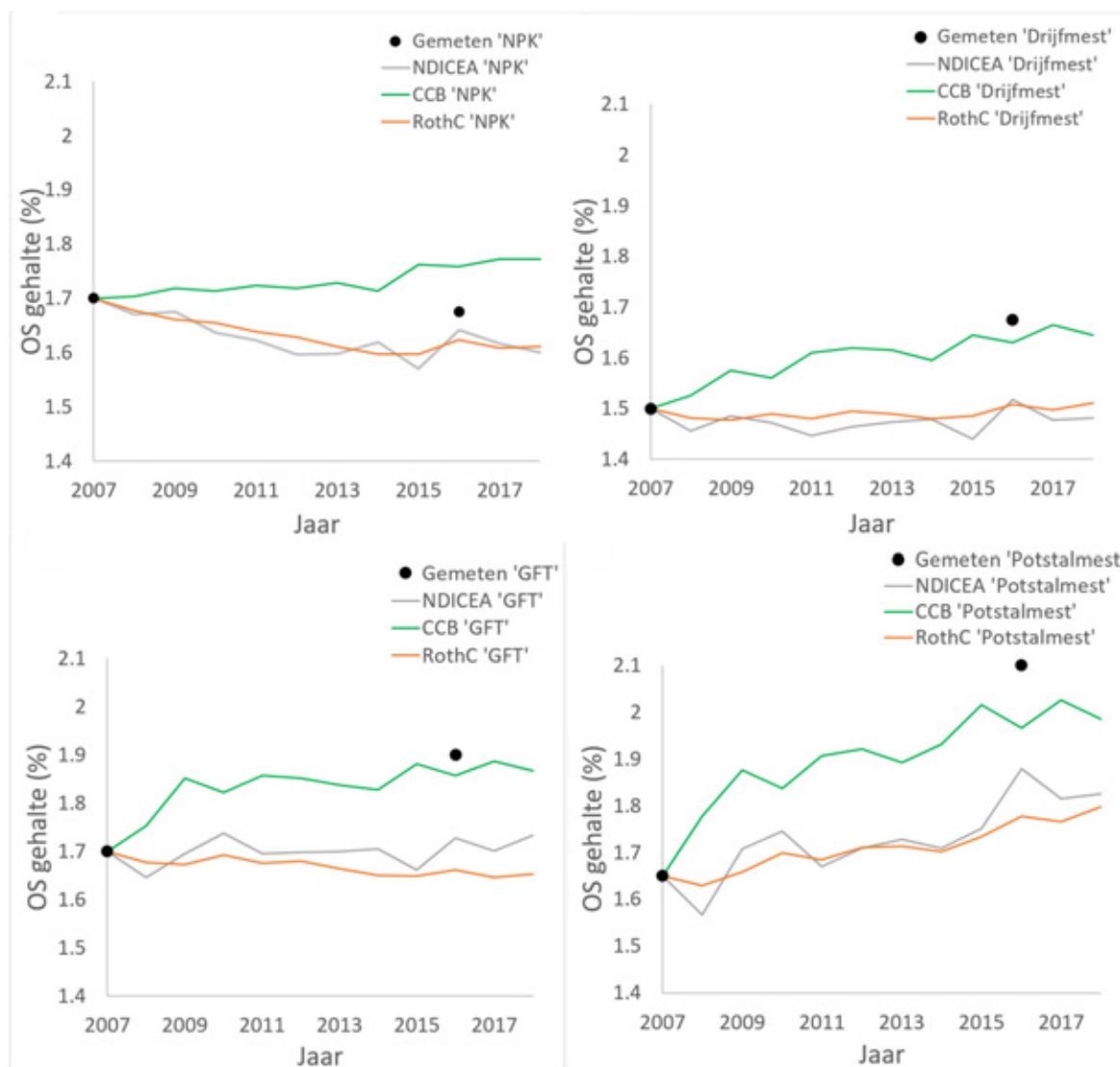
Voor de Vredepeel-resultaten kunnen de verschillen deels verklaard worden door een specifieke aanpassing in de afbraak voor NDICEA. NDICEA heeft een correctiefactor voor zandgronden zonder leem. Zodra het OS-gehalte hoger is dan 2%, wordt er aangenomen dat er 2% actieve OS aanwezig is. Het resterende percentage wordt toegevoegd aan een langzamere OS-/C-pool. Deze aanpassing is gemaakt om bodems met oude koolstof, zoals enkeerd- en moerige gronden, beter te kunnen

simuleren. Aangezien Vredepeel gelegen is op een veenontginning, is het vrij goed mogelijk dat er in de bodem nog oude stukken veen vermengd zijn en dat deze bodem dus een hoger OS-gehalte heeft dan je normaal gesproken bij een zandgrond verwacht. Door deze aanpassing simuleert NDICEA in dit geval waarschijnlijk beter dan RothC en CCB.

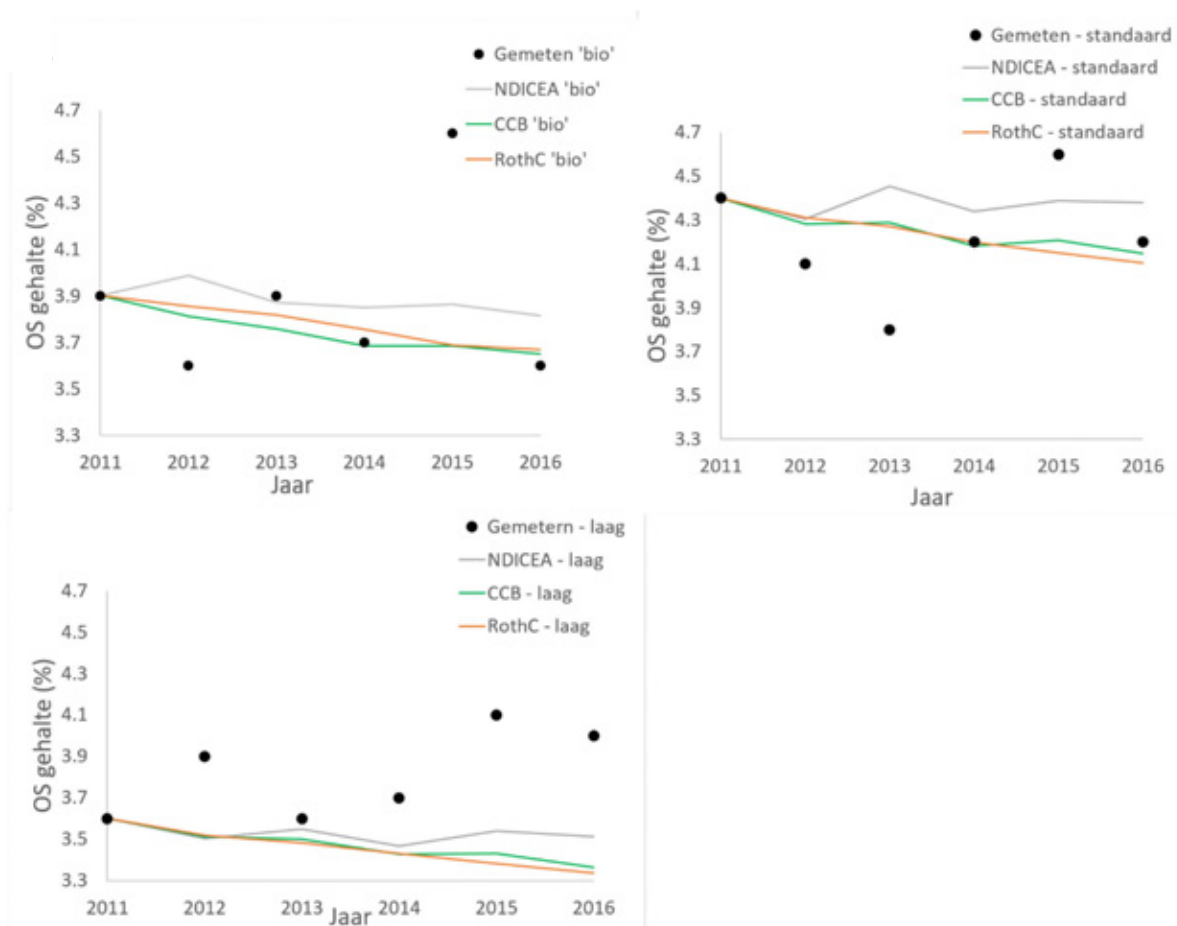
De modellen zijn ontwikkeld en gekalibreerd onder verschillende situaties. Dit kan ook de verschillen tussen de modellen verklaren. RothC is bijvoorbeeld gekalibreerd met data uit Rothamsted (dominant klei), CCB is vooral gekalibreerd op Midden-Europese bodems, waar kleibodems relatief ondervertegenwoordigd zijn. Toepassing van CCB op kleigrond zou nog een extra validatiestap vereisen. NDICEA is vooral getest en gekalibreerd voor stikstofdynamiek en niet specifiek op koolstof. Hoewel de kalibratiedata in Nederland zijn genomen, heeft de parametrisatie van de koolstofafbraak plaatsgevonden onder gecontroleerde condities (dus niet in een veldsituatie).

Op basis van deze twee datasets is moeilijk te zeggen welk model het best de organische-stofvoorraad simuleert, aangezien er slechts beperkte meetdata zijn (Figuur 5 en Figuur 6). Voor Vredepeel is er wel bijna jaarlijks gemeten, maar voor de percelen die in deze studie meegenomen zijn, zijn er data beschikbaar voor slechts zes jaar (Figuur 6). Hieruit is nog geen duidelijke trend van toe- of afname waar te nemen. Zes jaar is te kort om duidelijke verschillen in OS-gehalte te krijgen. Voor de proeflocatie MAK zijn er voor drie jaar data beschikbaar (2007, 2012 en 2016). Echter, de bodemanalyses voor de tweede meting (2012) zijn uitgevoerd in een ander laboratorium dan de eerste en derde meting en wijken nogal af, waardoor ze niet bruikbaar zijn. De onzekerheid in de bodem OS-bepaling maakt het niet mogelijk om te spreken van een trend gebaseerd op twee meetmomenten. Op basis van de eerste (2007) en laatste meting (2016) is wel duidelijk dat voor het perceel met potstalmest de grootste toename is gemeten (van 1,65% naar 2,1% OS). Voor potstalmest lijkt CCB dus de beste schatting te maken, omdat de stijging van RothC en NDICEA gering is. Voor drijfmest en gft is de toename in OS-gehalte volgens CCB ongeveer 0,2%. Voor de andere twee modellen en voor NPK is het OS-gehalte min of meer gelijk gebleven.

De gemeten en gesimuleerde OS-gehalten voor MAK en Vredepeel zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 5 en Figuur 6. Voor MAK volgt CCB de gemeten OS-gehalten het best, alhoewel de gemeten OS-gehalte voor de behandeling NPK hoger uitvalt dan gesimuleerde waarden. Voor de locatie Vredepeel simuleren CCB en RothC vergelijkbare OS-gehalten. In de gemeten OS-gehalten zit ook een grote spreiding. Zo zijn voor 2015 in alle drie de behandelingen hogere OS-gehalten gemeten dan gesimuleerd.



Figuur 5 De gemeten (zwarte punten) en gesimuleerde (gekleurde lijnen) OS-gehaltes voor vier behandelingen en drie verschillende koolstofmodellen (locatie: 'Mest als Kans' in Lelystad).



Figuur 6 De gemeten (zwarte punten) en gesimuleerde (gekleurde lijnen) OS-gehalten voor drie behandelingen en drie verschillende koolstofmodellen (locatie: Vredepeel).

6 Simuleren van maatregelen

Het rapport van Lesschen et al. (2012) presenteert een tabel met bodem C-maatregelen en de potentiële koolstofvastlegging die deze maatregelen kunnen bewerkstelligen. Aan de hand van een literatuurstudie is deze tabel vernieuwd. De maatregelen kunnen onderverdeeld worden in drie categorieën: grondbewerking, externe aanvoer OS en interne OS-input. Tabel 5 toont de bodem C-maatregelen en de geschiktheid per model om deze maatregelen te simuleren. Met de geschiktheid bedoelen we de mogelijkheid van het model om een maatregel te simuleren. Dit zegt nog niets over de kwaliteit van de resultaten. De geschiktheid van de modellen wordt hierna per categorie in meer detail beschreven.

Tabel 5 Bodem C-maatregelen en de geschiktheid van de geselecteerde koolstofmodellen om deze maatregel te simuleren (groen = geschikt, oranje = nu nog niet geschikt, maar met aanpassingen evt. wel geschikt te maken, rood = niet geschikt).

	Maatregel	Geschiktheid model voor simulatie van maatregel		
		CCB	NDICEA	RothC
Grondbewerking	Niet-kerende grondbewerking			
	Geen grondbewerking			
	Niet scheuren grasland			
Externe aanvoer OS	Dierlijke mest toevoegen			
	Compost toevoegen			
Interne input OS	Gewasresten achterlaten			
	Verbeteren gewasrotaties			
	Kruidenrijk grasland			
	Agroforestry			
	Vanggewas/ groenbemester			

6.1 Grondbewerking

Maatregelen als niet-kerende grondbewerking, geen grondbewerking en niet scheuren grasland kan koolstofvastlegging bevorderen. Bij niet-kerende grondbewerking wordt de bodem niet of alleen oppervlakkig bewerkt. In de literatuur worden tegensprekende effecten van niet-kerende grondbewerking op koolstofvastlegging beschreven. Deze tegenspraak lijkt vooral veroorzaakt door verschillen in de bodemdiepte waarover de analyse plaatsvindt. Andere factoren die meespelen, zijn klimaat, management en bodemtype (Luo et al., 2010). In het algemeen wordt er een toename van koolstofvastlegging in de bovenste bodemlaag geconstateerd en een afname van koolstofvastlegging in diepere bodemlagen (>25 cm). Het is van belang dat deze maatregel doorgerekend kan worden op perceelniveau, zodat individuele bedrijven zelf het effect van deze maatregel op boven- en ondergrond kunnen doorrekenen (ervan uitgaande dat benodigde gegevens beschikbaar zijn).

6.1.1 NDICEA

De totale bodemorganische stof in NDICEA is verdeeld over een aantal fracties. Iedere fractie wordt gekarakteriseerd door een specifieke afbraakconstante, afhankelijk van de relatieve leeftijd van een fractie. De afbraak wordt per dag (tijdstap in het model) gecorrigeerd door vermenigvuldiging met vier correctiefactoren (temperatuur, bodemvocht, zuurgraad en een 'decayfactor', zie hieronder). Deze factoren beïnvloeden (verlagen resp. verhogen) direct de hoeveelheid afgebroken organisch materiaal en ook de snelheid waarmee de relatieve leeftijd van organisch materiaal toeneemt. Als de afbraak van organisch materiaal geremd wordt, verandert de kwaliteit (en dus de relatieve leeftijd) ook minder (Janssen, 1984).

De decayfactor is afhankelijk van grondsoort én grondbewerking. Verschillen in grondbewerking zijn afgeleid uit Koopmans et al. (2014). Deze verschillen kunnen in het model doorgevoerd worden door de waarden van de decayfactor te veranderen. In de literatuur komen verschillen voor ten aanzien van het effect van grondbewerkingsintensiviteit. De auteurs van dit rapport hebben daarom een gemiddelde verwachting genomen over 15 tot 100 jaar om op middellange- en lange termijn de effecten van grondbewerkingsintensiteit te simuleren. Koopmans et al. (2014) concludeerden uit een simulatie van een aantal praktijkscenario's met de afgeleide waarden van de decayfactor dat kalibratie nodig was. Dit was vooral het geval bij behandelingen met ondiepere grondbewerking. De grote variatie binnen de maatregel 'ondieper ploegen' maakt het moeilijk te interpreteren (bijv. hoe diep, hoe vaak, welke machines etc.). Dit leverde veel variatie in resultaten, zoals de literatuurreview van Koopmans et al. (2014) ook liet zien. Na kalibratie van het model, waarbij OS-gehaltes tweemaal gemeten werden in verschillende behandelingen, gaf de simulatie wel een bevredigend resultaat volgens Koopmans et al. (2014).

In de praktijk zullen de grondsoort en de grondbewerkingsintensiteit worden gekozen door de gebruiker. Een zandgrond met conventionele grondbewerking is gekozen als standaard met een decayfactor van 1. Tabel 6 toont de decayfactor voor verschillende bodemsoorten en grondbewerkingsintensiteiten die in het model gekozen kunnen worden. Desgewenst kan deze ook handmatig aangepast worden om andere situaties door te rekenen.

Tabel 6 De waarde van de decayfactor in NDICEA als functie van grondsoort (lichtere grondsoorten: snellere afbraak) en bodembewerking (intensievere bodembewerking: snellere afbraak).

Bodemsoort	Conventionele grondbewerking	Gereduceerde grondbewerking	Geen grondbewerking
Leemarm zand	1	0,85	0,71
Veen	1	0,85	0,71
Grof zand	1	0,85	0,71
Zwak lemig zand	1	0,85	0,71
Sterk lemig zand	0,96	0,81	0,68
Loss	0,92	0,78	0,65
Zeer licht zavel (11-16% slib)	0,89	0,75	0,62
Matig lichte zavel (17-24% slib)	0,86	0,73	0,60
Lichte klei (36-49% slib)	0,78	0,66	0,54
Matig zware klei (50-71% slib)	0,71	0,60	0,49

Langjarig grasland en het scheuren van grasland kunnen ook gemodelleerd worden met NDICEA. NDICEA berekent de toename van organische stof tijdens de graslandfase, maar dit wordt pas toegevoegd aan de bodem op het moment van scheuren. Dus zolang er niet gescheurd wordt, zit deze 'organische stof' niet in het bodemcompartiment, maar in de plant (= zode). NDICEA hanteert hierbij een vaste fractie organische stof-afbraak door het scheuren van grasland. Daarnaast komt door scheuren een hoeveelheid vers organisch materiaal in de bodem met aanvankelijk een relatief hoge afbraaksnelheid (zoals dat ook voor ander vers plantenmateriaal geldt). Deze afwijking van wat er in de praktijk kan gebeuren (bijv. driejarig grasland met jaarlijkse extra OS naar de bodem), komt doordat NDICEA ontwikkeld is als model voor de akkerbouw, waar meestal eenjarig grasland als afwisseling van akkerbouwteelten werd toegepast.

6.1.2 CCB

CCB hanteert vier OS-/C-pools van organische stof die variëren van zeer labiel tot zeer stabiel. Ieder van deze pools volgt een eerste ordeafbraak, die afhangt van klimaat, bodemtype en ploegregime (van conventioneel ploegen tot niet-kerende grondbewerking). De bijdrage van achtergebleven gewasresten aan bodemorganische stof is gewas-specifiek en hangt af van de hoeveelheid gewasresten, de stabiliteit daarvan en de humificatie-coëfficiënt. Deze eigenschappen kunnen worden gemodelleerd voor verschillende delen van de plant, waardoor er rekening gehouden kan worden met het eventueel onderwerken van gewasreten. CCB rekent ook stikstofdynamiek uit, maar dit heeft geen

gevolgen voor het koolstofverlies. Kruidenrijk grasland en het (niet) scheuren van grasland kan beperkt worden meegenomen via de effecten op C-input. Het is niet mogelijk om biologische interacties tussen soorten te simuleren.

6.1.3 RothC

RothC is een model met vier OS-/C-pools die verschillen in relatieve afbraakconstanten. Het standaardmodel kan alternatieven in grondbewerking momenteel niet simuleren, aangezien het werkt met één bodemlaag en omdat het wel of niet ploegen geen effect heeft op de afbraakcoëfficiënt. Dit laatste wordt in veel andere modellen met één factor gesimuleerd (zie NDICEA waarbij een correctie op de afbraakfactor wordt toegepast) of met de IPCC-methode opgelost waarbij de bodem C-voorraad met een bepaalde factor wordt verhoogd als er niet-kerende of geen grondbewerking wordt toegepast. Zo'n factor zou aan RothC kunnen worden toegevoegd of worden afgeleid op basis van literatuur.

Scheuren van grasland kan al wel door het model gesimuleerd worden, aangezien de factor voor bodembedekking dan verandert en ook de C-aanvoer naar de bodem kan voor de duur van het scheuren worden aangepast. In het TKI project 'Belang van vastlegging van koolstof in de bodem voor mitigatie van broeikasgassen' voor de melkveehouderij zijn voor het scheuren van grasland al testen gedaan met RothC. Hieruit bleek dat RothC in staat is scheuren te simuleren door C-input en grondbedekking in het model te wijzigen. Echter, een goede termijnproef waarin dit is getest en die als validatie gebruikt kan worden, is er niet.

6.2 Externe aanvoer organische stof

6.2.1 NDICEA

In de huidige versie van NDICEA zijn 47 verschillende typen van externe organische stof-aanvoer gedefinieerd. Voor alle typen zijn er standaardwaarden in het model aanwezig wat betreft toedieningshoeveelheid, tijdstip, relatieve leeftijd van de OS, fractie droge stof en fractie C, en N, P en K. Deze kunnen gemakkelijk gewijzigd worden om eigen input te creëren.

6.2.2 CCB

De bijdragen van externe organische stof aan de bodem OS-/C-pool wordt uitgerekend aan de hand van het C-gehalte, de stabiliteit en de humificatie-coëfficiënt van het toegevoerde materiaal. Met deze eigenschappen wordt uitgerekend hoe groot de bijdrage van de aangevoerde organische stof aan de verschillende pools is. Deze zijn voor een groot aantal OS-bronnen al gedefinieerd en kunnen naar behoefte worden toegevoegd.

6.2.3 RothC

In RothC kan externe aanvoer van organische stof in de vorm van mest of compost direct als inputdata ingevoerd worden. De verschillen tussen de mestsoorten komen met de huidige parametrisatie met name tot uitdrukking door verschillen in aanvoer, aangezien bijv. vaste mest meer C bevat dan drijfmest. Het model zou echter ook kunnen rekenen met specifieke verdelingen over de verschillende C-pools per mestsoort. Er lopen nu meerdere experimenten binnen WUR waarbij in respiratieproeven de humificatie-coëfficiënten van verschillende (nieuwe) mestsoorten worden bepaald. Deze zouden in de toekomst gebruikt kunnen worden om het model te verbeteren.

6.3 Interne input organische stof

6.3.1 NDICEA

NDICEA rekent met verschillen in gewasrotaties en in groenbemesters en bevat invoerdata van 140 verschillende gewassen en 28 verschillende groenbemesters. In het model zijn de gewassen opbrengst-gestuurd, waarbij de gebruiker de opbrengst van het hoofdproduct opgeeft met een zaai- en oogsttijdstip. Het model berekent de opbrengst van bovengrondse en ondergrondse delen, de opname van N, P en K en de gewasresten in de verschillende bodemlagen. In NDICEA kunnen standaardwaarden voor C-aanvoer (afkomstig uit praktijkonderzoek in Nederland) voor de verschillende gewassen en groenbemesters gebruikt worden. Verder zijn alle eigenschappen van de gewassen aan te passen. Een limitatie van het model is dat rotaties tot twaalf jaar gedefinieerd kunnen worden. Door een aantal cycli achter elkaar door te rekenen, zou je meer dan twaalf jaar kunnen simuleren.

NDICEA maakt onderscheid in inputgegevens voor gras en grasklaver. Het simuleren van kruidenrijk grasland is mogelijk na aanpassing van de bestaande parameters voor gras of grasklaver. De volgende parameters zouden dan aangepast moeten worden: opbrengstniveau, bewortelingsdiepte, de verhouding bovengrondse en ondergrondse organische stof en de verdeling van organische stof over de bodemlagen. Het opbrengstniveau en de bewortelingsdiepte zijn direct door de gebruiker aan te passen. Dit geldt niet voor de verhouding van bovengrondse en ondergrondse organische stof, waarvoor een gebruiker meerdere aanpassingen moet doen. De huidige versie van NDICEA verdeelt gewasresten en organische stof nog niet over verschillende bodemlagen (100% toediening aan de bouwvoor).

6.3.2 CCB

CCB berekent de input en output van koolstof met een tijdstap van een jaar. Invoer van de exacte datum van gebeurtenissen zoals oogsten, ploegen of bemesten is wel mogelijk, maar dit dient alleen ter documentatie en speelt geen rol in de berekening. De input van organische stof uit verbouwde gewassen (hoofdgewas en groenbemester) en bemesting wordt in het jaar van oogsten toegevoegd aan de bodem OS-/C-pool. Bij meerdere oogsten in één jaar, zoals bij het verbouwen van een zomergewas na groenbemester of winterprei, wordt de totale aanvoer van organisch materiaal dus berekend uit de som van beide oogsten. De bijdrage van verbouwde gewassen aan de bodemkoolstof wordt bepaald aan de hand van de hoeveelheid achtergebleven materiaal en de kwaliteit daarvan. De hoeveelheid achtergebleven materiaal hangt af van de geoogste hoeveelheid en de fractie hiervan die achterblijft. Om de achterblijvende fractie te berekenen, wordt elk gewas onderverdeeld in een deel dat altijd wordt afgevoerd (doelooft), een mogelijk onder te werken deel (gewasresten) en een deel dat bij de oogst niet kan worden verwijderd (achterblijvende resten). De relatieve bijdrage van achterblijvende delen naar bodem C hangt af van gewas-specifieke afbraaksnelheid en humificatie-coëfficiënt.

Voor kruidenrijk grasland zouden in CCB specifieke verdelingen van boven- en ondergronds materiaal kunnen worden gedefinieerd, maar het is niet mogelijk om veranderingen in bewortelingsdiepte mee te nemen, omdat in CCB koolstof homogeen aan de bouwvoor wordt toebedeeld. Veranderingen in de soortenverdeling van kruidenrijk grasland zal handmatig moeten worden ingevoerd, omdat plantengroei niet expliciet wordt gemodelleerd.

6.3.3 RothC

In RothC wordt geen onderscheid gemaakt tussen bovengrondse en ondergrondse gewasresten, zoals in NDICEA en CCB, omdat RothC maar één omrekeningsfactor gebruikt die de totale resten berekent als functie van gewasopbrengst. RothC gebruikt parameters voor het berekenen van de hoeveelheid groenbemester of vanggewas die in de bodem gewerkt wordt.

RothC rekent met gewasrotaties, maar de standaardinterface kan hierin slechts één gewas per jaar doorrekenen. Zodra er meer dan één gewas tegelijkertijd op een perceel staat, zal de gebruiker het

perceel moeten opsplitsen en later de resultaten van de opgesplitste percelen bij elkaar moeten optellen. Een nadeel hiervan is dat het model geen rekening houdt met de interactie die het gewas ondervindt van het andere gewas in het geval van kruidenrijk grasland of agroforestry. Als echter op basis van literatuur en experimentele data afgeleid kan worden hoeveel de aanvoer van C naar de bodem toeneemt voor maatregelen als kruidenrijk grasland of agroforestry, dan kan dat wel worden meegenomen in het model. Effecten van vastlegging in diepere bodemlagen kunnen niet worden gesimuleerd, omdat evenals bij NDICEA slechts één bodemlaag gesimuleerd wordt waarvoor meestal de bouwvoor gekozen wordt. Er is al een experimentele versie van RothC in de literatuur beschreven waarin meerdere bodemlagen kunnen worden gesimuleerd (Dechow et al., 2019), maar het is nog niet duidelijk of deze versie geschikt is voor de Nederlandse situatie.

7 Conclusies en aanbevelingen

- Gedurende de loop van dit project is duidelijk geworden dat er op dit moment nog niet voor één model gekozen moet worden als praktijkmodel. Elk model heeft voor- en nadelen en is meer of minder geschikt voor het doorrekenen van bepaalde bodem C-maatregelen.
- De drie modellen die uiteindelijk in de kwantitatieve analyse zijn meegenomen, verschillen wel duidelijk van elkaar. In termen van complexiteit en benodigde inputdata is NDICEA het veeleisendst, aangezien het model op dagbasis rekent, interactie heeft met stikstof en gewasgroei simuleert. NDICEA kan echter ook met minder input worden toegepast, maar dat is in de simulaties nog niet getest. RothC is het minst complex en heeft daardoor ook minder inputdata nodig en CCB zit qua complexiteit en inputdata tussen NDICEA en RothC in. CCB heeft een bepaald gebruikersgemak als voordeel; ook door mensen met weinig kennis van het model kunnen maatregelen om bodem C te verhogen worden ingevoerd.
- De keuze welk model te gebruiken als praktijkmodel hangt sterk af van de doelen waarvoor het gebruikt gaat worden. Wanneer het model alleen voor monitoring van bodem C geschikt moet zijn, dan zou RothC een logische keuze zijn, aangezien het inputdata vraagt die makkelijk te verkrijgen zijn, de broncode makkelijk aan te passen is en grote datasets (veel percelen) goed zou kunnen doorrekenen voor de lange termijn. Als het doel gericht is op advisering van boeren, zou NDICEA geschikter zijn, omdat het uitgebreide output geeft en ook interacties met stikstof- (en fosfaat)bemesting meeneemt.
- De modellen zijn ontwikkeld en gekalibreerd onder verschillende situaties. Daardoor zal de kwaliteit van de resultaten ook ruimtelijke en temporele variatie vertonen. Welk model het geschiktst is onder welke Nederlandse omstandigheden kan niet met overtuiging geconcludeerd worden uit deze studie. Een multi-model ensemble is een interessant alternatief om de trend in SOC stock met meer zekerheid te voorspellen. Riggers et al. (2019) concluderen dat een multi-modelanalyse de onzekerheid in gesimuleerde SOC stocks reduceert.
- Om een goed beeld te krijgen van de veranderingen in koolstofvoorraad onder huidig en alternatief landgebruik zijn langetermijndata nodig. Het doorrekenen van meer langetermijn-experimenten en bedrijfsrotaties uit de Slim Landgebruik-netwerken met de modellen, biedt naast kwantitatieve resultaten voor de desbetreffende proef/rotatie ook beter inzicht op het functioneren van verschillende modellen. In Nederland zijn maar zeer beperkte langetermijn- datasets voor bodem C beschikbaar. In andere landen, waaronder Duitsland, Denemarken, Oostenrijk en Engeland liggen meer langetermijnexperimenten. Deze zouden gebruikt kunnen worden om de drie modellen beter te valideren en ook om het effect van verschillende maatregelen verder door te rekenen. Langetermijndata kunnen ook gebruikt worden voor validatie van de modellen en voor een gevoeligheidsanalyse.
- Voor een consistentere kwantitatieve modelvergelijking zou als alternatief voor een langetermijnexperiment, ook een fictief proefveld met klassieke akkerbouwrotatie (tarwe, bieten, aardappelen) gebruikt kunnen worden. Bestaande praktijkdata hebben vaak geen consistente meetreeks ter beschikking en de twee proeflocaties hanteren geen klassieke akkerbouwrotatie.
- Een volgende stap is om de potentiële praktijkmodellen te testen op bedrijven binnen de pilots van het Slim Landgebruik-programma. Hieruit zal blijken in hoeverre de benodigde inputdata daadwerkelijk beschikbaar zijn en of deze makkelijk uit de bedrijfsmanagementsystemen te halen zijn. Daarnaast zouden dan ook de effecten van voorgestelde bodem C-maatregelen doorgerekend kunnen worden voor de desbetreffende bedrijven. Met medewerking van de sector zou het praktijkmodel binnen één à twee jaar operationeel en toepasbaar kunnen zijn.

Literatuur

- Buendia, E.C., Guendehou, S., Limmeechokchai, B., Pipatti, R., Rojas, Y., Sturgiss, R., Tanabe, K., Wirth, T., Romano, D., Witi, J., Grag, A., Weitz, M.M., Cai, B., Ottinger, D.A., Dong, H., MacDonald, J.D., Ogle, S.M., Rocha, M.T., Sanchez, M.J., Bartram, D.M., Towprayoon, S. (2019): 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, Technical Support Unit c/o Institute for Global Environmental Strategies. Kanagawa, Japan.
- Coleman, K., Jenkinson, D.S. (1996): RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 237-246.
- De Haan, J.J., M. Wesselink, W. van Dijk, H.A.G. Verstegen, W.C.A. van Geel, W. van den Berg (2017): Effect van organische stofbeheer op opbrengst, bodemkwaliteit en stikstofverliezen op een zuidelijke zandgrond. Resultaten van de gangbare bedrijfssystemen van het project Bodemkwaliteit op zand in de periode 2011-2016. Wageningen Research, Rapport WPR-754. 108 blz.; 31 fig.; 45 tab.; 51 ref.
- Dechow, R., Franko, U., Kätterer, T., Kolbe, H. (2019): Evaluation of the RothC model as a prognostic tool for the prediction of SOC trends in response to management practices on arable land. *Geoderma* 337: 463-478. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.10.001.
- Franko, U., Kolbe, H., Thiel, E., Ließ, E. (2011): Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma* 166, pp. 119-134. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.07.019.
- Franko, U., Oelschlägel, B., Schenk, S. (1995): Simulation of Temperature-, Water- and Nitrogen dynamics using the Model CANDY. *Ecological Modelling*, 81, pp. 213-222. doi: 10.1016/0304-3800(94)00172-E.
- Hillier, J., Walter, C., Malin, D., Garcia-Suarez, T., Mila-i-Canals, L., & Smith, P. (2011): A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. *Environmental Modelling & Software*, 26(9), pp. 1070-1078.
- Izaurrealde, R. C., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N. J., Quiroga Jakas, M. C. (2006): Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling* 192(3-4), pp. 362-384. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.010.
- Janssen B.H. (1984): A simple method for calculating decomposition and accumulation of 'young' soil organic matter. *Plant and Soil* 76: 297-304.
- Koopmans, C.J., Rietberg, P., van der Burgt, G.J. (2014): Calibration and adaptation of the NDICEA model to reduced tillage systems. Final report for the CORE Organic II funded project. Work package 5.2. Publication number: 2014-019 LbP. 48 p.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S.; Prentice, I. C. (2005): A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19 (1).
- Lesschen, J.P., Heesmans, H., Mol-Dijkstra, J., van Doorn, A., Verkaik, E., van den Wyngaert, I., Kuikman, P. (2012): Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2396. 62 blz.; 7 fig.; 19 tab.; 57 ref.

-
- Li, C., Frolking, S., Harriss, R. (1994): Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 8, pp. 237-254. doi: 10.1029/94GB00767.
- Luo, Z., Wang, E., Sun, O.J. (2010): Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture Ecosystems & Environment* 139: 224-231. DOI: 10.1016/j.agee.2010.08.006. doi: 10.1016/j.agee.2010.08.006.
- NMI (2014): Organische stof rekentool. <https://www.nmi-agro.nl/tools/organische-stof-rekentool>. Geraadpleegd op 20 juni 2019.
- Parton, W. J., Hartman, M., Ojima, D., Schimel, D. (1998): DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. *Global and planetary Change*, 19, pp. 35-48. doi: 10.1016/S0921-8181(98)00040-X.
- Parton, W.J., Ojima, D., Schimel, D., Kittel, T.G.F. (1992): Development of simplified ecosystem models for applications in Earth system studies: the CENTURY experience. *Earth system modelling*, pp. 281-302.
- Parton, W.J., Rasmussen, P.E. (1994): Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 530-536. doi: 10.2136/sssaj1994.03615995005800020040x
- Pribyl, D. W. (2010): A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156, 75-83. doi:10.1016/j.geoderma.2010.02.003.
- Rietberg, P., Van der Burgt, G-J. (2012): Mest Als Kans 2012: Activiteiten en resultaten. Bedrijfs optimale bemesting. Louis Bolk Institute BO-12.03-002-023.
- Riggers, C., Poeplau, C., Don, A., Bamminger, C., Hoper, H., Dechow, R. (2019): Multi-model ensemble improved the prediction of trends in soil organic carbon stocks in German croplands. *Geoderma* 345, 17-30. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.03.014.
- Smit, A.B., Breemer, A.M., Rietberg, P., Reijs, J.W., Venema, G.S. (2019): Ontsluiting van en koppeling aan praktijkdata over bodemgebruik en bodemmanagement; Doordacht landgebruik project 1.7: Ontsluiting data voor projecten 1.2 en 3.1. Wageningen, Wageningen Economic Research. Concept rapport.
- Van der Burgt, G.J.H.M., Oomen, G.J.M., Habets, A.S.J., Rossing, W.A.H. (2006): The NDICEA model, a tool to improve nitrogen use efficiency in cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74: 275. Doi: 10.1007/s10705-006-9004-3.
- Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., Van der Burgt, G. (2013): De organische stof balans met de te verwachten stikstoflevering per teeltrotatie: Opzet en gebruikswijze van een rekenmodule. Masterplan Mineralenmanagement, proj.nr. 12059. doi: 10.1007/s10705-006-9004-3.

Bijlage 1 Gedetailleerde beschrijving bodem C-modellen

Model naam	CANDY
Versie	3.20.17.36
Datum laatste versie	19.04.2018
Ontwikkelaar	Helmholz Centre for Environmental Research - UFZ
Website	http://www.ufz.de/index.php?en=39725
Handleiding (link)	http://www.ufz.de/export/data/2/95948_CANDY_MANUAL.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties - modelbeschrijving	Franko, U., Oelschlägel, B., Schenk, S. (1995): Simulation of Temperature, Water and Nitrogen dynamics using the Model CANDY. <i>Ecol. Model.</i> , 81, S. 213-222
	Franko, U., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klir, J., Körschens, M., Poulton, P.R., Richter, D.D. (1997): Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CANDY model. <i>Geoderma</i> , 81, 109-120
	Franko, U., Mirschel, W. (2001): Integration of a Crop Growth Model with a Model of Soil Dynamics. <i>Agronomy Journal</i> , 93, S. 60-66
Validatie	Franko, U., Kuka, K., Romanenko, I. A., Romanenkov, V. A. (2007): Validation of the CANDY model with Russian long-term experiments. <i>Regional Environmental Change</i> 7 (2), 79-91
Toepassing	Franko, U., RÜHLMANN, J., (1991): Simulation of C-dynamics and N-dynamics in sandy soil used for vegetable production. <i>Gartenbauwissenschaft</i> , 56: 174-179.
Review	Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franko, U. et al. (1997): A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. <i>Geoderma</i> , 81, S. 153-225
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Niet bekend
Code/rekenregels openbaar?	Nee
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Dag
Temporele extent (duur van simulatie)	Decennia
Ruimtelijke resolutie	Microschaal - plotschaal
Bodemdiepte/bodemlagen	1D-model in blokken van 10 cm. Binnen elke laag is er een verdeling van poriën.
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	akkerbouw en grasland in gematigde zones
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Eigen stikstofmodel, inclusief N ₂ O-productie
Relatie met waterbalans?	Eigen watermodule
Welke processen worden er gemodelleerd?	Opname en groei plant, afbraak SOM, stikstofdynamiek
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Grondbewerking, opbrengen organisch materiaal, bemesting
Benodigde inputparameters	Verdeling OS/C pools, Klimaat, N-input, C-input, eigenschappen plant (bouwplan, planteigenschappen), wateropbrengst, bodemstructuur (porieverdeling)
Outputparameters	
Export format	SQL-database
Beschrijving OS-/C-pools	Vers organisch materiaal, labiel SOM, stabiel SOM, inert SOM
SOM-dynamiek	Eerste orde afbraak met limitatie door beperkte uur van activiteit bij suboptimale omstandigheden (biological active time/BAT)
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Beiden is mogelijk
Type interface	Local GUI
OS	Windows

Model naam	CANDY
API beschikbaar of te maken?	Nee, en sourcecode is niet beschikbaar
Gevalideerd? Waarvoor?	Beperkt
Bestaande (praktijk)toepassingen	In gebruik bij HelmHolzinstituut
Bestaande implementaties (link)	http://www.ufz.de/index.php?en=39725
Zwakke punten	Code niet openbaar, geen API, weinig toepassingen en validatie
Sterke punten	Meetbare OS-/C-pools
Overige opmerkingen	Contact: Prof. Dr. Hans-Jörg Vogel Department of Soil System Science hans-joerg.vogel@ufz.de

Model naam	CCB
Versie	2016
Datum laatste versie	2016
Ontwikkelaar	Helmholz Centre for Environmental Research - UFZ
Website	https://www.ufz.de/index.php?en=39729
Handleiding (link)	https://www.ufz.de/export/data/2/149997_CCC_Manual11_uf.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties - modelbeschrijving /-validatie	Franko, U., Kolbe, H., Thiel, E., Ließ, E. (2011): Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. <i>Geoderma</i> 166 pp. 119–134
Modelbeschrijving/toepassing	Franko, U., Merbach, I. (2017): Modelling soil organic matter dynamics on a bare fallow Chernozem soil in Central Germany <i>Geoderma</i> 303 pp 93-98
Toepassing	Franko, U., Spiegel, H. (2015): Modeling soil organic carbon dynamics in an Austrian long-term tillage field experiment. <i>Soil and tillage Research</i> 156 pp 83-90. 10.1016/j.still.2015.10.003
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Ja
Code/rekenregels openbaar?	Worden beschikbaar gemaakt door Uwe Franko < uwe.franko@ufz.de >
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Jaar
Temporele extent (duur van simulatie)	Decennia
Ruimtelijke resolutie	Plot-regionaal
Bodemdiepte/bodemlagen	Simuleert de bovenste 30 cm van een bodem
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Akkerbouw en grasland in gematigde zones
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Beperkt stikstofmodel
Relatie met waterbalans?	Ja, op basis van jaarlijkse regenval en texture
Welke processen worden er gemodelleerd?	Afbraak OS
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Bouwplan, ploegen, opbrengen organisch materiaal
Benodigde inputparameters	MAT, MAP, oogst, gewas, bodemtextuur, aanvoer OS, ploegen (ja/nee), irrigatie (ja/nee)
Outputparameters	
Export format	SQL-database
Beschrijving OS-/C-pools	Vers organisch materiaal, labiel SOM, stabiel SOM, inert SOM
SOM-dynamiek	Eerste orde afbraak met limitatie door beperkte uur van activiteit bij suboptimale omstandigheden (biological active time/BAT)
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Conceptueel
Type interface	Local GUI/batch modus
OS	Windows
API beschikbaar of te maken?	Nee, sourcecode model komt beschikbaar
Gevalideerd? Waarvoor?	Beperkt (Europa)

Model naam	CCB
Bestaande (praktijk)toepassingen	In gebruik bij HelmHolzinstituut
Bestaande implementaties (link)	https://www.ufz.de/index.php?en=39729
Zwakke punten	Beperkt toegepast en gevalideerd
Sterke punten	Uwe Franko <uwe.franko@ufz.de>
Overige opmerkingen	Contact: Prof. Dr. Hans-Jörg Vogel Department of Soil System Science hans-joerg.vogel@ufz.de / Uwe Franko <uwe.franko@ufz.de>

Model naam	Century
Versie	Century 4.6
Datum laatste versie	
Ontwikkelaar	Colorado State University
Website	http://www.nrel.colostate.edu/projects/century
Handleiding (link)	https://www2.nrel.colostate.edu/projects/century/MANUAL/html_manual/man96.html#CULT100
Wetenschappelijk gepubliceerd	ja
Referenties - modelbeschrijving	Parton, W.J., D.S. Ojima, D.S. Schimel, and T.G.F. Kittel. 1992. Development of simplified ecosystem models for applications in Earth system studies: the CENTURY experience. Pages 281-302 in D.S. Ojima, editor. Earth system modeling. Proceedings from the 1990 Global Change Institute on Earth System Modeling, Snowmass, Colorado, USA. (689
Validatie	Gilmanov, T.G., W.J. Parton, and D.S. Ojima. 1997. Testing the CENTURY ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR representing wide climatic/soil gradient. Ecological Modelling 96:191-210.
Toepassing	Kelly, R.H., W.J. Parton, G.J. Crocker, P.R. Grace, J. Klir, M. Korschens, P.R. Poulton, and D.D. Richter. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CENTURY model. Geoderma 81:75-90.
Review	Byrne, Kenneth & Kiely, Ger. (2009). Evaluation of Models (PaSim, RothC, CENTURY and DNDC) for Simulation of Grassland Carbon Cycling at Plot, Field and Regional Scale.
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Staat niet expliciet iets over vermeld
Code/rekenregels openbaar?	Ja

Temporele resolutie (reken tijdstap)	Maand
Temporele extent (duur van simulatie)	Jaren tot eeuwen
Ruimtelijke resolutie	Plot- en landschapsniveau
Bodemdiepte/bodemlagen	Top 20 cm (dieper kan maar dan moeten parameters worden aangepast)
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Grasland, akkerbouw, bos en savannes op verschillende gronden, in verschillende klimaatzones
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Eigen stikstofmodel
Relatie met waterbalans?	Eigen watermodel
Welke processen worden er gemodelleerd?	Stikstofbalans, koolstofbalans, fosforbalans, zwavelbalans
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Grondbewerking, bouwplan, organische stof input

Benodigde inputparameters	Maandelijkse minimum- en maximumtemperatuur, maandelijkse neerslag, bodemtextuur, N-, P- en S-gehalte van de plant, lignine gehalte van het plantmateriaal, atmosferische en bodem N-input, en de initiële bodem C- en N-gehalten (P en S zijn optioneel)
Outputparameters	Fluxen van C, N, P, en S
Export format	ASCII text files
Beschrijving OS-/C-pools	3 OS/C pools (active, slow and passive) met verschillende potentiële afbraaksnelheden.

Model naam	Century
SOM-dynamiek	Elke pool heeft een eigen afbraaksnelheid die afhankelijk is van temperatuur en neerslag. Bodemtextuur bepaalt de afbraaksnelheid van de actieve pool.
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Conceptueel
Type interface	
OS	Windows, Unix
API beschikbaar of te maken?	Ja
Gevalideerd? Waarvoor?	Grasland U.S., akkerbouw
Bestaande (praktijk)toepassingen	
Bestaande implementaties (link)	
Zwakke punten	Niet mogelijk om fertiliser toediening in te voeren
Sterke punten	Uitgebreid gevalideerd
Overige opmerkingen	Contact: century@nrel.colostate.edu CENTURY5 version 5.4.7.6 is een nieuwere versie maar deze is nog niet openbaar beschikbaar en niet gevalideerd. Contact voor versie 5:dennis@nrel.colostate.edu
Model naam	Cool Farm Tool
Versie	The Cool Farm Tool Version 2.0 - beta 3
Datum laatste versie	
Ontwikkelaar	De Cool Farm Institute
Website	https://coolfarmtool.org/
Handleiding (link)	https://coolfarmtool.org/wp-content/uploads/2016/09/Data-Input-Guide.pdf https://www.unilever.com/Images/the-cool-farm-tool-a-user-guide_tcm244-409280_en.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties - modelbeschrijving	Hillier, J., Walter, C., Malin, D., Garcia-Suarez, T., Mila-i-Canals, L., & Smith, P. (2011). A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. <i>Environmental Modelling & Software</i> , 26(9), 1070-1078.
Review	Whittaker, C., McManus, M. C., & Smith, P. (2013). A comparison of carbon accounting tools for arable crops in the United Kingdom. <i>Environmental Modelling & Software</i> , 46, 228-239.
	Hillier, J., Abdalla, M., Bellarby, J., Albanito, F., Datta, A., Dondini, M., ... & Kuhnert, M. (2016). Mathematical modeling of greenhouse gas emissions from agriculture for different end users. <i>Synthesis and Modeling of Greenhouse Gas Emissions and Carbon Storage in Agricultural and Forest Systems to Guide Mitigation and Adaptation</i> , (advagricysystem6), 197-228.
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Nee
Code/rekenregels openbaar?	Ja
Temporele resolutie (reken tijdstap)	1 jaar
Temporele extent (duur van simulatie)	1-20 jaar
Ruimtelijke resolutie	Bedrijfsniveau
Bodemdiepte/bodemlagen	1 bodemlaag (30 cm)
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Wereldwijd
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Cool Farm Tool berekent N ₂ O-emissies van bemesting etc., maar directe link met bodem C is er niet
Relatie met waterbalans?	Nee
Welke processen worden er gemodelleerd?	Geen processen, wel wordt effect van groenbemester, grondbewerking redelijk meegenomen
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Verandering in grondbewerking, bouwplan, organische stof input

Model naam	Cool Farm Tool
Benodigde inputparameters	Algemene info perceel, opbrengst, bodemtextuur, SOM, bodemvocht, pH, gewasresten aan- of afvoer, bemesting, verandering in landgebruik of grondbewerking, groenbemesters, energiegebruik en transport (optioneel)
Outputparameters	Totale emissies bedrijf
Export format	
Beschrijving OS-/C-pools	Een pool, totale OS-voorraad
SOM-dynamiek	Geen
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Meetbaar, totaal OS
Type interface	Website
Operating System	OS-onafhankelijk
API beschikbaar of te maken?	Ja
Gevalideerd? Waarvoor?	Nee
Bestaande (praktijk)toepassingen	Ja, wordt al op grote schaal (duizenden bedrijven) toegepast
Bestaande implementaties (link)	www.coolfarmtool.org
Zwakke punten	Gebaseerd op IPCC stock change methodiek, daardoor ongeschikt voor monitoren van bodem C, o.a. door gebruik van discrete bodem C-klassen i.p.v. continue data
Sterke punten	Al sterke toepassing in praktijk, koppeling aan andere datasystemen
Overige opmerkingen	

Model naam	DAYCENT
Versie	DayCent4.5
Datum laatste versie	
Ontwikkelaar	Colorado State University
Website	https://www2.nrel.colostate.edu/projects/daycent-home.html
Handleiding (link)	https://www2.nrel.colostate.edu/projects/daycent-downloads.html
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties - modelbeschrijving	Parton, W. J., Hartman, M., Ojima, D., & Schimel, D. (1998). DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. <i>Global and planetary Change</i> , 19(1-4), 35-48.
Validatie	Del Grosso, S. J., Parton, W. J., Mosier, A. R., Hartman, M. D., Keough, C. A., Peterson, G. A., ... & Schimel, D. S. (2001). Simulated effects of land use, soil texture, and precipitation on N gas emissions using DAYCENT. In <i>Nitrogen in the Environment: Sources, Problems and Management</i> (pp. 413-431). Del Grosso, S., Ojima, D., Parton, W., Mosier, A., Peterson, G., & Schimel, D. (2002). Simulated effects of dryland cropping intensification on soil organic matter and greenhouse gas exchanges using the DAYCENT ecosystem model. <i>Environmental pollution</i> , 116, S75-S83. Del Grosso, S. J., Mosier, A. R., Parton, W. J., & Ojima, D. S. (2005). DAYCENT model analysis of past and contemporary soil N ₂ O and net greenhouse gas flux for major crops in the USA. <i>Soil and Tillage Research</i> , 83(1), 9-24.
Toepassing	Del Grosso, Stephen J., et al. "Global scale DAYCENT model analysis of greenhouse gas emissions and mitigation strategies for cropped soils." <i>Global and Planetary Change</i> 67.1-2 (2009): 44-50.
Review	Thomas, A. R., Bond, A. J., & Hiscock, K. M. (2013). A multi-criteria based review of models that predict environmental impacts of land use-change for perennial energy crops on water, carbon and nitrogen cycling. <i>Gcb Bioenergy</i> , 5(3), 227-242.
Publiek beschikbaar	Nee
Licentie voor commercieel gebruik	Onduidelijk
Code/rekenregels openbaar?	Nee
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Dag
Temporele extent (duur van simulatie)	Jaren tot eeuwen
Ruimtelijke resolutie	Plot
Bodemdiepte/bodemlagen	Koolstofsimulatie alleen in top 20 cm
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Grasland, akkerbouw

Model naam	DAYCENT
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Eigen stikstofmodel
Relatie met waterbalans?	Eigen watermodel
Welke processen worden er gemodelleerd?	Plantengroei, waterbalans, nutriënten cycli, bodemkoolstofdynamiek
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Grondbewerking, bouwplan, organische stof input
Benodigde inputparameters	Dagelijkse minimum-/maximumtemperatuur en neerslag, bodemtextuur, landgebruik en bedekking (bijv. gewastype, teeltschema's, hoeveelheid en timing van wijzigingen aan voedingsstoffen)
Outputparameters	Dagelijkse N-gas flux (N ₂ O, NO _x , N ₂), CO ₂ flux van heterotrofe bodemademhaling, bodem C en N, NPP, H ₂ O en NO ₃ uitspoeling en andere parameters.
Export format	ASCII text files
Beschrijving OS-/C-pools	3 OS-/C-pools (active, slow and passive) met verschillende potentiële afbraaksnelheden
SOM-dynamiek	Afbraaksnelheden zijn afhankelijk van beschikbaarheid van substraat, lignine gehalte, C/N-ratio, water-/temperatuurstress en grondbewerking intensiteit
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Conceptueel
Type interface	Local GUI
OS	Windows, DOS of UNIX
API beschikbaar of te maken?	Beschikbaar op aanvraag
Gevalideerd? Waarvoor?	Ja, grasland, akkerbouw en bos in Zweden en Oregon
Bestaande (praktijk)toepassingen	COMET-Farm tool
Bestaande implementaties (link)	http://cometfarm.nrel.colostate.edu/ Paustian, K., Schuler, J., Killian, K., Chambers, A., Del Grosso, S., Easter, M., ... & Ogle, S. (2012). COMET2. 0—Decision Support System for Agricultural Greenhouse Gas Accounting. In Managing Agricultural Greenhouse Gases (pp. 251-270).
Zwakke punten	Model is minder goed gevalideerd dan Century. Sommige invloeden op dinitrificatie kunnen niet gesimuleerd worden.
Sterke punten	Inputdata zijn makkelijk te verkrijgen
Overige opmerkingen	Contactadres: Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA Telefoonnummer: (970) 491-2195 E-mail: century@colostate.edu

Model naam	DNDC
Versie	Base: 9.5
Datum laatste versie	25 augustus 2012
Ontwikkelaar	Changsheng Li, University of New Hampshire
Website	http://www.dndc.sr.unh.edu
Handleiding (link)	Manual: http://www.dndc.sr.unh.edu/model/GuideDNDC95.pdf , scientific basis and processes: http://www.dndc.sr.unh.edu/papers/DNDC_Scientific_Basis_and_Processes.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties- modelbeschrijving	Li et al., 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. Global Biogeochemical Cycles, 8:237-254. Lugato et al., 2010 Application of DNDC biogeochemistry model to estimate greenhouse gas emissions from Italian agricultural areas at high spatial resolution
Validatie	Wang et al., 2008. Modeling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China. Geoderma, 147:47-55.
Toepassing	Li, 1995. Impact of agricultural practices on soil C storage and N ₂ O emissions in 6 states in the US. In: Advances in Soil Science (eds. R. Lai et al.), Soil Management and Greenhouse Effect, pp.101-112. Research and Development of a DNDC Online Model for Farmland Carbon Sequestration and GHG Emissions Mitigation in China
Review	First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution
Publiek beschikbaar	Ja

Model naam	DNDC
Licentie voor commercieel gebruik	Onbekend
Code/rekenregels openbaar?	CODE DNDC EUROPE: http://afoludata.jrc.ec.europa.eu/dataset/denitrification-decomposition-model-dnnc-adapted-application-europe-wide-scale/resource
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Dag
Temporele extent (duur van simulatie)	Jaren tot eeuwen
Ruimtelijke resolutie	Plot tot nationaal
Bodemdiepte/ bodemlagen	
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Natuurlijke en landbouwbodems, nat en droog, in gematigde gebieden
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Eigen stikstofmodule
Relatie met waterbalans?	Eigen waterbalans
Welke processen worden er gemodelleerd?	Stikstofbalans, Koolstofbalans, Waterbalans, Plantengroei (optioneel)
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Grondbewerking, bouwplan
Benodigde inputparameters	
Outputparameters	Opbrengst, microbiële activiteit, C opslag, nitraatuitspoeling, N ₂ O, NO, NH ₃ , CH ₄ en CO ₂ -emissies
Export format	.TXT
Beschrijving OS-/C-pools	SOM bestaat uit 1) litter 2) microbiële biomassa 3) actieve humus en 4) passieve humus. Elke pool bestaat uit 2 of 3 sub-pools.
SOM-dynamiek	Elke OS-/C-pool heeft een eigenafbraaksnelheid, afhankelijk van poolgrootte, kleigehalte, N-beschikbaarheid, bodemtemperatuur en vochtbeschikbaarheid
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Conceptueel
Type interface	Locale GUI, online versie in ontwikkeling voor berekening C dynamiek in Chinese landbouw.
OS	Windows
API beschikbaar of te maken?	Geen bestaande API, maar Sourcecode is in C++ beschikbaar
Gevalideerd? Waarvoor?	Ja, in Italië en China
Bestaande (praktijk)toepassingen	Ja, in China, Europa en de VS zijn landbouwmaatregelen doorgerekend
Bestaande implementaties (link)	
Zwakke punten	Lastig te initialiseren, hoge databehoeft, minder actieve ontwikkeling, gefragmenteerd
Sterke punten	Mechanistisch; Integratie C/N-model
Overige opmerkingen	

Model naam	EPIC
Versie	v08.10
Datum laatste versie	2004
Ontwikkelaar	Opdrachtgever: United States Department of Agriculture Maker: Blackland Research and Extension Center
Website	https://epicapex.tamu.edu/model-executables/
Handleiding (link)	https://agrilifecdn.tamu.edu/epicapex/files/2015/10/EPIC.0810-User-Manual-Sept-15.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties - <i>modelbeschrijving</i>	Sharpley, A.N., and J.R. Williams, eds. 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. Washington, DC: USDA Technical Bulletin No. 1768.
Validatie	Is uitgebreid gevalideerd op het gebied van water, irrigeren, en bodemstikstof. Resultaten van validatie voor berekeningen van bodemkoolstof zijn niet gevonden.
Toepassing	Putnam, J., J. Williams, and D. Sawyer. 1988. "Using the Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) to Estimate the Impact of Soil Erosion for the 1985 RCA Appraisal." J. Soil Water Cons. 43(4): 321-26.

Model naam	EPIC
Review	https://www.card.iastate.edu/products/publications/pdf/05wp397.pdf
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	GNU General Public License © agreement
Code/rekenregels openbaar?	Ja
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Dag
Temporele extent (duur van simulatie)	Honderden tot duizenden jaren
Ruimtelijke resolutie	Perceelniveau tot ongeveer 1 ha
Bodemdiepte/bodemlagen	10 bodemlagen
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Het model is ontwikkeld voor Texas en VS, maar ook aangepast en gevalideerd voor o.a. gewassen in zuid Frankrijk.
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Ja, maar vooral N-uitspoeling, N-afspoeling, P-afspoeling en N-effecten op productie.
Relatie met waterbalans?	Ja
Welke processen worden er gemodelleerd?	-
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Bodembewerking, irrigatie, rotaties, pesticiden en verliezen hiervan, en minerale meststof input. Maar het model is voornamelijk bedoeld voor het doorrekenen van effecten op erosie.
Benodigde inputparameters	Locatie, bodemgegevens, klimaatgegevens, gewasdata, grondbewerking, bemesting, en toediening van bestrijdingsmiddelen.
Outputparameters	Dit model genereert veel outputparameters, o.a. opbrengst en bodemkoolstof.
Export format	.out files (Deze kunnen geopend worden met Excel).
Beschrijving OS-/C-pools	Dit model heet drie OS-/C-pools: snel (microbieel, dagen of weken), langzaam en passief, gebaseerd op Century. Bij deze pools zit erosie er heel expliciet in.
SOM-dynamiek	De drie pools hebben elk hun eigen afbraaksnelheden.
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Beide
Type interface	versie is te downloaden en draait op computer, er zijn grafische interfaces (winaEPIC en iEPIC) om in beeld te brengen wat er uit komt
OS	Allerhande, Windows is prima
API beschikbaar of te maken?	Ja, programmeertaal is fortran
Gevalideerd? Waarvoor?	Vooraf voor productie, ook wel voor N-niveaus in bodem, beperkt voor OS-hoeveelheid. Niet gevalideerd voor Nederlandse omstandigheden.
Bestaande (praktijk)toepassingen	Het model is in diverse andere wetenschappelijke modellen geïntegreerd.
Bestaande implementaties (link)	
Zwakke punten	Het model is ontwikkeld om de interacties tussen erosie, klimaatsverandering en gewasproductie te simuleren. Bodemkoolstof- veranderingen staan niet centraal in dit model.
Sterke punten	Met dit model kunnen ook maatregelen als grondbewerking doorgerekend worden. Het is alleen niet bekend of dit slechts effect heeft op het afstromen van bodem door water of ook op effecten op OS in de grond.
Overige opmerkingen	
Model naam	NDICEA
Versie	6.2
Datum laatste versie	2014
Ontwikkelaar	Louis Bolk Instituut, in eerste instantie i.s.m. Wageningen Universiteit
Website	http://www.ndicea.nl/indexnl.php?i=nlnieuw
Handleiding (link)	http://www.ndicea.nl/docs/Handleiding_NL_NDICEA_6_2.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties - modelbeschrijving	Van der Burgt GFHM, Oomen GJM, Hobets ASJ, Rossing WAH (2006) The NDICEA model, a tool to improve nitrogen use efficiency in cropping systems. Nutr Cycl Agroecosyst 74, pp. 275–294
Validatie	https://www.researchgate.net/publication/240498603_Nitrogen_mineralisation_in_organic_farming_systems_A_test_of_the_NDICEA_model

Model naam	NDICEA
Toepassing	Als learning tool (http://orgprints.org/7210/); als management tool (http://orgprints.org/15860/)
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Ja
Code/rekenregels openbaar?	Ja
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Dag
Temporele extent (duur van simulatie)	1 tot 12 jaar
Ruimtelijke resolutie	Punt of perceelniveau
Bodemdiepte/bodemlagen	2 bodemlagen (bouwvoor en ondergrond), variabel in diepte in te stellen.
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Gemaakt voor Nederland, gevalideerd/gebruikt in UK, België, Duitsland, Denemarken en Spanje
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Ja
Relatie met waterbalans?	Ja
Welke processen worden er gemodelleerd?	Afbraak van organische stof, waarbij C en N vrijkomen in diverse vormen. Gericht op akkerbouw /grasland en in rotatie (landbouwmanagement). Veel verschillende typen bemesting en gewassen en groenbemesters zitten erin.
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Rotatie en wisselingen hierin, grondbewerking ruw (intensief tot extensief), hogere of lagere input organische stof, andere soort organische stof etc.
Benodigde inputparameters	Klimaatgegevens (temperatuur, neerslag, straling, verdamping), bodemdata (type, klei gehalte, os gehalte, laagindeling), Gewasdata (opbrengst, timing zaai en oogst, kwaliteit), bemesting (hoeveelheid, kwaliteit, timing), irrigatie gegevens.
Outputparameters	C-dynamiek, N-dynamiek, N-verliezen (uitspoeling en vervluchtiging), gewasbeperking of overbemesting
Export format	csv
Beschrijving OS-/C-pools	Continu – van elke input van organisch materiaal wordt separaat de afbraak berekend, dus zeer veel kleine pools die verschillen in afbraaksnelheid.
SOM-dynamiek	Afbraakcurve zoals gepubliceerd door Jansen in 1984 en 1996, 2 parameters (apparent initial age and humificationcoefficient), beïnvloed door C: N, lignine en polyfenolen
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Totale pool meetbaar, subverdeling niet
Type interface	Stand-alone op computer, EXE-file
OS	Windows
API beschikbaar of te maken?	Niet beschikbaar, wel te maken
Gevalideerd? Waarvoor?	Met name voor stikstofdynamiek in percelen. Langetermijnproeven geven mogelijkheid op validatie met OS in bodem.
Bestaande (praktijk)toepassingen	Door bedrijven met planning, door adviseurs
Bestaande implementaties (link)	Niet bekend
Zwakke punten	Programmataal is verouderd, niet gemakkelijk toegankelijk en voor automatisch invullen net te detaillistisch om goed te kunnen rekenen door specifieke info over gewassen en timing van gewassen.
Sterke punten	Praktijkgerichte info, specifiek voor landbouw, robuust en redelijk precies op perceelniveau, en naast koolstof zit stikstof goed in model.
Overige opmerkingen	

Model naam	ORCHIDEE
Versie	2.0
Datum laatste versie	2018
Ontwikkelaar	Team van ontwikkelaars (en open source): o.a. diverse labs van het Franse National Center for Scientific Research (CNRS) en de Vrije Universiteit van Amsterdam (groep Systems Ecology).
Website	https://orchidee.ipsl.fr/you-orchidee/ ; https://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/browser
Handleiding (link)	https://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/wiki/Documentation/UserGuide#Howtosection
Wetenschappelijk gepubliceerd	

Model naam	ORCHIDEE
Referenties- modelbeschrijving	Krinner, G.; Viovy, N.; de Noblet-Ducoudré, N.; Ogée, J.; Polcher, J.; Friedlingstein, P.; Ciais, P.; Sitch, S.; Prentice, I. C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. <i>Glob. Biogeochem. Cycles</i> , 2005, 19 (1).
Aanpassing voor crops	Wu, X.; Vuichard, N.; Ciais, P.; Viovy, N.; de Noblet-Ducoudré, N.; Wang, X.; Magliulo, V.; Wattenbach, M.; Vitale, L.; Tommasi, P. D.; Moors, E. J.; Jans, W.; Elbers, J.; Ceschia, E.; Tallec, T.; Bernhofer, C.; Grünwald, T.; Moureaux, C.; Manise, T.; Ligne, A.; Cellier, P.; Loubet, B.; Larmanou, E. & Ripoche, D. ORCHIDEE-CROP (v0), a new process based Agro-Land Surface Model: model description and evaluation over Europe <i>Geosci. Model Dev.</i> , 2016, 9, 857-873
Validatie	Zie: https://orchidee.ipsl.fr/publications/
Toepassing	idem
Review	idem
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Fair Use Policy for ORCHIDEE: https://orchidee.ipsl.fr/you-orchidee/
Code/rekenregels openbaar?	Ja
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Verschillende
Temporele extent (duur van simulatie)	Van 15 minuten tot meerdere jaren
Ruimtelijke resolutie	van 1 gridpunt op kaart tot globaal
Bodemdiepte/ bodemlagen	0-2 meter diepte, verschillend voor energie (warmte) en voor waterflux
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Het model is wereldwijd toepasbaar, maar lijkt meer geschikt voor wilde natuur en vegetaties en bossen dan voor nuanceverschillen in gewassen. Er is echter een evolution, de ORCHIDEE-STICS koppeling, die het misschien beter mogelijk maakt, maar dan wordt het wel complexer.
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Niet in bodem
Relatie met waterbalans?	Wel uitspoeling en verlies van dissolved organic matter (DOC)
Welke processen worden er gemodelleerd?	Veel verschillende processen
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Verandering in landgebruik, van bijv. bos naar grasland of naar akkerland
Benodigde inputparameters	Ongeveer 400 parameters. https://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/wiki/Documentation/OrchideeParameters
Outputparameters	Veel outputparameters waaronder, biomassa, fotosynthese, bodem organische stof.
Export format	.nc files (numerical control)
Beschrijving OS-/C- pools	DOC (dissolved organic matter) en drie pools, 'active', 'slow' en 'passive', vergelijkbaar met Century. Afbraak snelheden hangen af van vochtgehalte en van temperatuur.
SOM-dynamiek	In uitwisseling met vegetatie, atmosfeer en waterstromen.
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Totale SOC en DOC zijn meetbaar, onderverdeling is conceptueel.
Type interface	Onbekend
OS	Werkt op meerdere
API beschikbaar of te maken?	Nee, maar wel hulp hoe het te doen online
Gevalideerd? Waarvoor?	Voor vele modules en situaties, maar nog niet voor SOC in bodems op diepte in Europa, daarvoor zijn ze net in aanpassing, zie: https://ddd.uab.cat/pub/artpub/2018/189291/Camino_et_al_GeosciModDev_2018.pdf
Bestaande (praktijk)toepassingen	Veel gebruikt in publicaties in het kader van klimaatsverandering
Bestaande implementaties (link)	Onbekend
Zwakke punten	Grof en eigenlijk niet voor landbouw gemaakt. Als dit model toegepast wordt, wordt het model complexer en omvangrijker.
Sterke punten	Koppelingen mogelijk, zowel met datasets ter opschaling, als met agronomische submodellen, bijv. ORCHIDEE-STICS.
Overige opmerkingen	

Model naam	OS balans NMI
Versie	1.2.0
Datum laatste versie	Onbekend
Ontwikkelaar	NMI gerard.ros@nmi-agro.nl; romke.postma@nmi-agro.nl
Website	https://os-balans.nl
Handleiding (link)	https://www.milieukeur.nl/Public/Milieukeur_Agro_Food_Plantaardig_open_teelt_Schema/HANDLEIDINGOS-tool.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Nee
Referenties	
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Onbekend
Code/rekenregels openbaar?	Nee
Temporele resolutie (reken tijdstap)	3 jaar
Temporele extent (duur van simulatie)	3 jaar
Ruimtelijke resolutie	Perceelniveau
Bodemdiepte/bodemlagen	Onbekend
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Akkerbouw, vollegrondsgroenteteelt en de boomkwekerij in Nederland
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Geen
Relatie met waterbalans?	Geen
Welke processen worden er gemodelleerd?	Afbraak van bodem-organische stof
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Aan- en afvoer organisch materiaal
Benodigde inputparameters	Bouwplan, bodem-organischestofgehalte, kleigehalte, aan- en afvoer gewasresten
Outputparameters	Organisch stof aanvoer en afvoer
Export format	GUI
Beschrijving OS-/C-pools	Onbekend
SOM-dynamiek	Onbekend
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	
Type interface	Web, local GUI
OS	Windows
API beschikbaar of te maken?	Nee
Gevalideerd? Waarvoor?	Onbekend
Bestaande (praktijk)toepassingen	Milieukeur
Bestaande implementaties (link)	https://os-balans.nl/bedrijf.html
Zwakke punten	Lijkt slechts met forfaitaire getallen te werken voor decompositie. Werkt niet voor grasland
Sterke punten	Gebruikersvriendelijk voor een agrariër
Overige opmerkingen	

Model naam	RothC
Versie	RothC-26.3, version 2.1
Datum laatste versie	7.04.2009
Ontwikkelaar	Rothamsted Research UK
Website	https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc
Handleiding (link)	https://www.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/RothC_guide_WIN.pdf
Wetenschappelijk gepubliceerd	Ja
Referenties - modelbeschrijving	Coleman, K., Jenkinson, D.S., 1996. RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 237-246.

Model naam	RothC
Validatie	Coleman, K., Jenkinson, D.S., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klir, J., Korschens, M., Poulton, P.R., Richter, D.D., 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. <i>Geoderma</i> 81, 29-44.
Toepassing	Cerri, C.E.P., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K., Bernoux, M., Falloon, P., Powlson, D.S., Batjes, N.H., Milne, E., Cerri, C.C., 2007. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. <i>Agric., Ecosyst. Environ.</i> 122, 58-72. Mondini, C., Coleman, K., Whitmore, A.P., 2012. Spatially explicit modelling of changes in soil organic C in agricultural soils in Italy, 2001-2100: Potential for compost amendment. <i>Agric., Ecosyst. Environ.</i> 153, 24-32.
Review	Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franko, U. et al. (1997): A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. <i>Geoderma</i> , 81, S. 153-225 Byrne, Kenneth & Kiely, Ger. (2009). Evaluation of Models (PaSim, RothC, CENTURY and DNDC) for Simulation of Grassland Carbon Cycling at Plot, Field and Regional Scale.
Publiek beschikbaar	Ja
Licentie voor commercieel gebruik	Op aanvraag bij copyright houder (Rothamsted Research)
Code/rekenregels openbaar?	Beschikbaar op aanvraag, WUR beschikt over de code
Temporele resolutie (reken tijdstap)	Maand
Temporele extent (duur van simulatie)	Jaren tot eeuwen
Ruimtelijke resolutie	Plot, perceel, regionaal en wereldwijd
Bodemdiepte/bodemlagen	RothC is ontwikkeld voor topsoils tot 25 cm en bevat 1 bodemlaag.
Toepassingsgebied (qua klimaat, bodems, landgebruik)	Akkerbouw, grasland en bosgebieden op minerale gronden. De nieuwe RothPC is voor vulkanische en droge bodems. Verschillende klimaatzones.
Stikstofinteracties? (incl. N ₂ O-emissies)	Wel in Roth-CNP (K. Coleman, S.E. Muhammed, A.E. Milne, L.C. Todman, A.G. Dailey, M.J. Glendining, et al. The landscape model: a model for exploring trade-offs between agricultural production and the environment <i>Sci. Total Environ.</i> , 609 (2017), pp. 1483-149)
Relatie met waterbalans?	Op basis van maandelijkse neerslag en verdamping wordt overschot/tekort berekend, wat invloed heeft op de afbraakfactoren.
Welke processen worden er gemodelleerd?	Koolstofbalans
Welke maatregelen kunnen doorgerekend worden?	Bouwplan, organische stof input
Benodigde inputparameters	Kleigehalte, maandelijkse temperatuur, neerslag en evapotranspiratie, gewasdekking, aanvoer gewasresten en mest, schatting van de afbreekbaarheid van het aangevoerde plantmateriaal (DPM/RPM-ratio), diepte van de bemonsterde bodemlaag Optioneel: ¹⁴ C van OS
Outputparameters	Totale bodemkoolstofvoorraad op maandelijkse of jaarlijkse intervallen en de verdeling over de verschillende pools. Daarnaast geeft het ook een ¹⁴ C- waarde voor elke tijdstap en een schattig van CO ₂ -verlies door afbraak van organisch materiaal.
Export format	ASCII output files
Beschrijving OS-/C-pools	Vijf OS-/C-pools in totaal. Vier actieve pools: Decomposable Plant Material (DPM), Resistant Plant Material (RPM), Microbial Biomass (BIO) en Humified Organic Matter (HUM). En één inactieve pool: Inert Organic Matter (IOM).
SOM-dynamiek	Elke pool heeft een vaste afbraaksnelheid. De afbraaksnelheden worden beïnvloed door temperatuur, vochtgehalte en aanwezigheid van vegetatie.
OS-/C-pools meetbaar of conceptueel	Conceptueel
Type interface	Local GUI
OS	Windows en DOS

Model naam	RothC
API beschikbaar of te maken?	Nee, wel te maken, in project met FrieslandCampina wordt gewerkt aan koppeling met Kringloopwijzer database
Gevalideerd? Waarvoor?	Ja, meerdere studies.
Bestaande (praktijk)toepassingen	Miterra-NL (WEnR) gebruikt in beleidsverkenningen, Roth-C is de basis voor de C module in de Klimaatlat van CLM. Roth-C is ingebouwd in de soil fertility toolkit en BioEsoil tool (WEnR), Roth-C is de basis van het Belgische bodem C model C-slim.
Bestaande implementaties (link)	Klimaatlat (www.klimaatlat.nl) CSLIM (http://bdbnet.bdb.be/pls/apex/f?p=131:48:234561551889823::NO) BioESoil (www.bioesoil.org),
Zwakke punten	Grondbewerking kan nog niet doorgerekend worden en model kan niet gebruikt worden voor bodems met een hoog OS-gehalte. Aanvoer C uit gewasresten grasland nog grote onzekerheid (maar geldt voor alle modellen).
Sterke punten	Relatief lage databehoefte, al veel toegepast en beschreven in de literatuur.
Overige opmerkingen	Contact: Kevin Coleman kevin.coleman@rothamsted.ac.uk

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 2990
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 12.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.



To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 2990
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 12.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

