

Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023

Voortgangsrapportage juni 2021

C.J. Koopmans, B.G.H. Timmermans, M. Hoogmoed, D. Heupink, J.J.P.
Crujisen, J. De Haan, I. Selin Norén, T. Slier en J.P. Wagenaar

Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd door het Louis Bolk Instituut en Wageningen University & Research met subsidie van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend Programma Slim Landgebruik (BO-53-002).

Juni, 2021

C.J. Koopmans¹, B.G.H. Timmermans¹, M. Hoogmoed¹, D. Heupink¹, J.J.P. Cruijsen², J. De Haan², I. Selin Norén², T. Slier² en J.P. Wagenaar¹ (2021). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023. Voortgangsrapportage juni 2021.

¹Louis Bolk Instituut ² Wageningen University & Research

48 pagina's

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1 Inleiding	9
2 Doelstellingen.....	11
3 Materiaal en methode.....	13
3.1 Effectiviteit van maatregelen voor de koolstofvastlegging	13
3.2 Kengetallen organische stof aanvoer van gewasresten en groenbemesters	17
4 Resultaten	19
4.1 Effectiviteit van maatregelen voor de koolstofvastlegging	19
4.2 Kengetallen van gewasresten en groenbemesters.....	28
4.3 Modelberekeningen aan gewasresten, compost en grondbewerking	31
5 Conclusies en aanbevelingen voor proeven en metingen richting 2030.....	35
5.1 Conclusies.....	35
5.2 Aanbevelingen	37
6 Referenties	41
Bijlage 1. LTE- Proefopzet beschrijvingen	42
Akkerbouw.....	42
Veehouderij	44
Bijlage 2. - Bouwplannen per regio	46
Bijlage 3. Bemestingsdetails zoals ingevoerd in NDICEA	47

Samenvatting

Als uitvloeisel van het Klimaatakkoord dat in 2015 in Parijs is gesloten, is in Nederland in 2018 het Klimaatakkoord gesloten. Ook de landbouwsector heeft zich gecommitteerd aan klimaatdoelstellingen. Een onderdeel daarvan is het doel om 0,5 Mton CO₂-equivalenten per jaar vast te leggen in minerale landbouwbodems, met ingang van 2030. Deze doelstelling is één van de twee pijlers van het Nationaal Programma Landbouwbodems (NPL). De tweede pijler is dat alle landbouwbodems (1.8 miljoen hectare) in 2030 duurzaam beheerd worden.

Binnen het programma Slim Landgebruik is de kernvraag wat er nodig is om de doelstelling van 0,5 Mton CO₂-equivalenten per jaar te halen. Dit rapport is een jaarrapportage van een meerjarige studie naar het vaststellen van de effectiviteit van landbouwkundige maatregelen voor het vastleggen van koolstof in de organische stof van minerale bodems. Daarmee wordt een praktische toetsing beoogd van de koolstofvastlegging zoals beschreven in Lesschen *et al.* (2012) voor de Nederlandse condities. Het gaat hierbij zowel om de koolstofvastlegging van individuele maatregelen als om het effect van de combinatie van maatregelen. In deze 3e voortgangsrapportage ligt de focus op individuele maatregelen die tot op heden nog niet zijn onderzocht of nog onvoldoende zijn onderbouwd en gekwantificeerd. In een aparte rapportage (Hoogmoed *et al.*, 2021) is gekeken naar de effecten van koolstofmaatregelen op de bodemkwaliteit: hoe beïnvloeden deze maatregelen de metingen uit de BLN-indicatorset en koppelen deze maatregelen naast koolstofvastlegging positief mee richting een duurzaam beheer van de bodem. Daarnaast worden nieuwe kengetallen voor effectieve organische stof in een aparte rapportage afgeleid en gerapporteerd (Selin Norén *et al.*, 2021). De koolstofvastlegging van maatregelen in CO₂ per ha per jaar levert in combinatie met het areaal waarop maatregelen toepasbaar zijn in Nederland, antwoord op de vraag of 0,5 Mton CO₂-eq. reductie per jaar in de landbouwpraktijk op minerale bodems in Nederland technisch mogelijk is. Deze vraag is onderwerp van project F1 binnen het programma Slim landgebruik (Slier *et al.*, in prep).

In deze studie ligt de focus op de evaluatie van de koolstofvastlegging aansluitend bij Lesschen (2012) door metingen van de organische stof in de bodem in Lange Termijn Experimenten. Daarbij wordt steeds de vergelijking gemaakt tussen percelen mét en zónder toepassing. Ook is gebruik gemaakt van vergelijkingen tussen praktijkpercelen waarop de maatregelen zijn toegepast. In de conclusies worden resultaten rond de gevonden koolstofvastlegging vergeleken met de literatuurgegevens uit Lesschen (2012).

In de maanden oktober – december 2020 is een meetcampagne uitgevoerd bij diverse Lange Termijn Experimenten verspreid over Nederland, op zowel zand- als kleigronden, waarbij de bodem volgens een gestandaardiseerd protocol werd bemonsterd (Koopmans *et al.*, 2019). De bodem koolstofmetingen zijn hierbij aangevuld met metingen aan de BLN-indicatoren set zoals beschreven in Hanegraaf *et al.* (2019) en gerapporteerd in Hoogmoed *et al.* (2021). Een deelonderzoek richtte zich op het actualiseren van kengetallen zoals de effectieve organische stof aanvoer voor gewasresten en groenbemesters om zo een verbeterde inschatting te krijgen van de effectieve bijdrage van organische stof input aan de koolstofvastlegging. In 2020 is ook verder gerekend aan bouwplannen om de koolstofvastlegging te kwantificeren bij verschillende maatregelen, namelijk voor het behouden van de gewasresten van granen (stro) en suikerbieten

(suikerbietentopjes) en voor een stapeling van extra composttoevoer in combinatie met niet-kerende grondbewerking.

Tabel 1. Gemeten potentieel voor koolstofvastlegging in de bodem van Lange Termijn Experimenten (LTE's) voor zeven geselecteerde maatregelen in vergelijking met schattingen van Lesschen (2012).

Maatregel	Vastlegging laag 0-30 cm (ton CO ₂ /ha/jaar)		Lesschen (2012)
	Zand	Klei	Zand & Klei
Akkerbouw			
Compost toevoegen	0,5 /ton o.s. ¹	0,5-0,7 /ton o.s.	-
Groenbemesters inzetten	(nog) geen verschil	-	0,4
Gewasresten achterlaten ²	0,4-1,0	0,2-0,7	0,8
Meerjarige akkerranden ³	(-0,4)	0,25	0,2
Verbeteren gewasrotaties ¹	1,6	1,6	1,2
Veehouderij			
Leeftijd grasland verhogen	14-18	5,5 ¹	3,6
Mais-gras wisselteelt grasfase	5-8	-	-
Kruidenrijk grasland	(nog) geen verschil	(nog) geen verschil ⁴	-

¹ Meting uit 2019

² Op basis van kengetallen en modelberekeningen

³ Uitgaande van een 3 m rand aan één kant van een ha perceel

⁴ Uitzondering bij hoog kruidenaandeel, uitgestelde maaidatum en vaste mest; grootte wordt nog gecorrigeerd

De resultaten van een vergelijkend onderzoek in een 23 jaar lang lopende proef met composttoedieningen op niveaus van onbemest, kunstmest, 15, 30 en 45 ton per ha per jaar laten zien dat door de compostgiften sprake is van aanzienlijke koolstofvastlegging van 0,7 tot 0,5 ton CO₂ per ha per jaar per ton organische stof. Bij lagere hoeveelheden compost lijkt daarbij sprake van relatief iets meer vastlegging dan bij hogere giften. De resultaten zijn in overeenstemming met de resultaten uit voorgaande jaren voor Nederlandse condities (Koopmans *et al.*, 2020) en laten de effectiviteit zien van koolstofvastlegging door compost. De hoeveelheden die kunnen worden toegediend binnen de kaders van de Nederlandse wetgeving moeten daarbij echter niet uit het oog worden verloren.

In een 5 jaar oude LTE zijn de effecten van uiteenlopende groenbemesters ten opzichte van zwarte braak (na een hoofdgewas) onderzocht. Wat opvalt in deze LTE is de variatie tussen de herhalingen, die groot is. Ook na correctie voor het koolstofgehalte per veldje, dat bij het begin van de proef gemeten is, zijn geen verschillen gevonden tussen het wél en niet toepassen van een groenbemester. Daar de toediening van effectieve organische stof door een groenbemester relatief beperkt is, is mogelijk de looptijd van de proef nog te kort, en zullen pas na zo'n 10 jaar toepassen van een groenbemester significante verschillen in organische stof in de bodem meetbaar zijn.

De effecten van meerjarige akkerranden zijn zowel voor de zuidwestelijke klei alsook voor de noordelijke zandgronden onderzocht. Op de kleigronden leidde de toepassing van akkerranden tot een significante verhoging van de koolstofvoorraad in de bodem waarbij sprake was van een CO₂-vastlegging van 8,3 ton CO₂ per ha akkerrand per jaar. Bij een rand van 3 m langs één zijde van een vierkant perceel van 1 ha dan levert dit een CO₂-vastlegging op van 0,25 ton CO₂ per ha. Voor het noordelijke zand werd dit effect niet aangetoond. Hier werd zelf een lagere koolstofvoorraad gemeten in de akkerranden. Een duidelijke verklaring voor dit fenomeen is er nog niet. Duidelijk is dat akkerranden een effect op koolstofvastlegging kunnen hebben. Hoe dit effect uitpakt hangt echter van omstandigheden (uitgangssituatie, management van rand en perceel) af, en wordt verder onderzocht.

Waar op kleigrond in 2019 een heel duidelijk effect van de leeftijd van grasland verhogen (niet scheuren) op de koolstof vastlegging werd gevonden, werd dit effect op de zandgronden niet gevonden. Door de hoge organische stofgehaltenes die in de zandpercelen reeds aanwezig waren, ook zonder de toepassing van de maatregel, werd een effect mogelijk niet zichtbaar. Daarom werden in 2020 zorgvuldig praktijkpercelen geselecteerd op zand met een oplopende leeftijd van grasland en met een voorgeschiedenis van langjarige akker (maisteelt) als uitgangssituatie. Dit leidde in 2020 tot een significant hoger koolstofgehalte en een hogere koolstof voorraad in zowel de bovengrond als in de ondergrond als gevolg van het 'verhogen van de leeftijd van grasland'. Het gaat daarbij om een behoorlijk grootte jaarlijkse vastlegging van 18 (1-3 jaar oud grasland) en 14 ton CO₂ per ha per jaar (> 12 jaar oud). De specifieke grootte van de vastlegging wordt komend jaar nauwkeuriger bepaald door het meten van meer percelen. Op kleigronden zijn in 2020 metingen uitgevoerd om te verkennen wat het effect van een eenmalige vernieuwing van de graszode is door het scheuren en opnieuw inzaaien ervan. De resultaten tonen geen significante verschillen in koolstofgehalte tussen grasland dat vernieuwd werd, en permanent grasland dat niet gescheurd werd.

Melkvee bedrijven op zandgrond hebben vaak percelen met langjarige maisteelt. In de maatregel wisselteelten wordt onderzocht of een wisselteeltsysteem met een aandeel tijdelijk grasland op dergelijke percelen positief kan uitwerken op de koolstofvastlegging. De metingen laten zien dat dit inderdaad zo is. Daarbij is de koolstofvastlegging in vergelijking met maisteelt behoorlijk en in de grootte van 5-8 ton CO₂ per ha per jaar.

Drie jaar na start van de LTE's met kruidenrijk grasland op zand en klei, werd op zandgrond een lichte trend van toename van organische stof gevonden, die echter niet significant is. Op kleigrond werd een CO₂-vastlegging gevonden op percelen die in beheer zijn met kruidenrijk grasland met uitgestelde maaidatum. In de controle alsook in de behandeling werd daarbij vaste mest toegediend. Het effect is echter te groot om alléén veroorzaakt te zijn door kruidenrijk grasland, en wordt het komende jaar nog gecorrigeerd door analyse van opgeslagen bodemonsters van de uitgangssituatie.

De resultaten van de twee studies naar nieuwe kengetallen voor groenbemesters en gewasresten laten zien dat voor groenbemesters de hoeveelheid effectieve organische stof die in de bodem wordt gebracht behoorlijk verschilt afhankelijk van het zaaitijdstip van de groenbemester. Vergeleken met de huidige kengetallen kan hiermee nauwkeuriger de organische stof aanvoer ingeschat worden (Selin Norén *et al.*, 2021). De nieuw gepresenteerde kengetallen voor

gewasresten laten vergeleken met de huidige kengetallen voor enkele gewassen ook grote verschillen zien. Voor suikerbieten bijvoorbeeld, zijn significant lagere organische stof input waarden gemeten dan de huidige kengetallen aangeven. Voor zomertarwe zijn significant hogere waarden gevonden. Deze verschillen kunnen diverse oorzaken hebben, bijvoorbeeld nieuwe rassen of veranderde oogstechnieken. Ook kan het jaar van bemonsteren een rol hebben gespeeld. De metingen van 2020 worden daarom in 2021 herhaald.

Modelberekeningen naar de effecten van gewasresten laten zien dat de op jaarbasis gemiddelde koolstofvastlegging door gewasresten aanzienlijk kan zijn (0,2 – 0,7 ton CO₂ per ha per jaar), maar afhangt van de regio. Dit hangt samen met het standaard bouwplan dat per regio verschilt. De hoeveelheid extra vastlegging die wordt gerealiseerd door extra graan op te nemen in het bouwplan verschilt ook in de regio's. Dit is deels een functie van hoe het 'extra graan' in het bouwplan is ingevuld. In sommige regio's blijft de lengte van het bouwplan gelijk en wordt er een hoofdgewas vervangen door een graangewas (bijvoorbeeld in de regio Centrale Zeeklei Noordoostpolder). Terwijl in andere regio's het extra graangewas als een extra jaar in het bouwplan zal worden opgenomen (bijvoorbeeld in de regio centrale zeeklei Flevoland). Het bouwplan en bodemtype speelt dus een grote rol in hoe effectief de bijdrage is van gewasresten en een extra graangewas voor de koolstofvastlegging.

Ook is gekeken of de effecten van maatregelen bij stapeling (meerdere maatregelen gecombineerd toepassen) nu simpelweg opgeteld kunnen worden. Dit effect is onderzocht door een modelstudie waarbij de maatregelen 'compost toevoegen' en 'niet-kerende grondbewerking' werden gecombineerd. De resultaten zijn in grote lijnen positief, dat wil zeggen dat ze laten zien dat stapeling van maatregelen in eerste instantie mogelijk is. De resultaten geven aan dat de stapeling van maatregelen kan zorgen voor een relatief beperkte interactie waarbij soms meer koolstof (noordelijke zand en dalgrond) en soms minder (centrale zeeklei) wordt vastgelegd vergeleken met een simpele optelsom van de aparte maatregelen.

1 Inleiding

Het doel van het programma Slim Landgebruik is het leveren van de benodigde kennis om te komen tot een additionele vastlegging van 0,5 Mton CO₂-eq per jaar aan de Nederlandse minerale landbouwbodems in aanloop naar en vanaf 2030. In dit onderzoek ligt de focus vooral op het verbeteren en verdiepen van het inzicht in de (zekerheid) van de effectiviteit van koolstofvastlegging door verschillend landbouwkundige maatregelen.

De potentiële koolstofvastlegging van zeven maatregelen is gedurende de jaren 2018 en 2019 in beeld gebracht aan de hand van metingen in Lange Termijn Experimenten (LTE's). Het gaat hierbij om de maatregelen geselecteerd uit Lesschen (2012), aangevuld met suggesties van maatregelen uit de praktijk (Koopmans en Janmaat, 2019; Wagenaar *et al.*, 2019):

Tabel 1.1 Maatregelen in het onderzoek naar de koolstof vastlegging in de jaren 2018 en 2019. Tevens is het resultaat na 2 jaar onderzoek weergegeven.

Maatregel	2018	2019	Resultaat
Akkerbouw			
Niet-kerende grondbewerking	x	x	In de LTE's wordt geen positieve bijdrage op C gevonden. In de literatuur wordt dit regelmatig bevestigd. Resultaat geldt zowel voor zand als klei.
Verbeteren gewasrotaties	x	x	Positief effect op koolstofvastlegging uit de LTE's. Resultaat is deels gebaseerd op aanvullende modelberekening. Resultaat op basis van metingen op praktijkbedrijven toont een trend. De vele variaties op deze maatregel en de metingen op bedrijven maakt dat de zekerheid van deze maatregel nog beperkt is.
Compost en mest toevoegen akkerbouw	x	x	Resultaten uit de LTE's zijn positief en veelal significant. Totaal effect voor NL is afhankelijk van beschikbaarheid en type meststof.
Veehouderij			
Leeftijd grasland (niet-scheuren)	x	x	Zekerheid op klei is groot door herhaalde positieve resultaten in de LTE's. Op zand is het resultaat wisselend en de zekerheid daarmee kleiner.
Niet-kerende grondbewerking in mais	x	1/2	Effect is gemeten op zand in slechts 1 proef. Op klei is geen effect gevonden.
Mais-gras wisselteelt		x	Metingen beperkt tot een nulmeting. De verwachting is dat de effectiviteit van koolstofvastlegging positief is.
Kruidenrijk grasland	x		In de LTE's is slechts een nulmeting uitgevoerd. De verwachting is dat de effectiviteit positief is.

De resultaten per onderzochte maatregel zijn gerapporteerd in Koopmans *et al.* (2019) en Koopmans *et al.* (2020).

In 2019 zijn alle metingen aangevuld met bodemkwaliteitsmetingen verricht in de lange termijn experimenten aansluitend bij de 'BLN indicatorset' (Hanegraaf *et al.*, 2019). De resultaten

hiervan zijn apart gerapporteerd in Hoogmoed *et al.* (2021). Een database is ontworpen en in gebruik om verzamelde gegevens op een gestructureerde wijze te beheren.

De huidige beschikbare kengetallen over hoeveelheden en afbraaksnelheid van gewasresten en groenbemesters zijn gebaseerd op metingen uit de jaren '80. In samenwerking met de PPS Beter Bodembeheer is binnen dit onderzoek bijgedragen aan een literatuurstudie en zijn proeven gedaan om de kengetallen te actualiseren. Een overzichtsrapportage is in voorbereiding (Selin Norén *et al.*, 2021).

In Koopmans *et al.* (2020) is de vastlegging van CO₂ bij aanpassingen in de gewasrotatie gekwantificeerd met behulp van het bodemmodel NDICEA. In de huidige rapportage is verder gewerkt met het NDICEA-model en zijn berekeningen uitgevoerd voor de maatregel 'gewasresten achterlaten'. Ook zijn modelberekeningen uitgevoerd naar de effecten van de stapeling van de maatregelen 'compost toevoegen' en 'niet-kerende grondbewerking'.

Daarmee geeft deze tussenrapportage zicht op

- De koolstofvastlegging in de bodem van de onderzochte maatregelen aansluitend bij Lesschen (2012) aan de hand van de Lange Termijn Experimenten en vergelijkingen tussen praktijkpercelen.
- Geactualiseerde kengetallen rond organische stof aanvoer naar de bodem uit gewasresten en groenbemesters.
- De effecten van het achterlaten van gewasresten en stapeling van de maatregelen met extra compost aanvoer in combinatie met niet-kerende grondbewerking.

In de conclusies wordt ingegaan hoe deze resultaten zich verhouden tot de literatuurgegevens uit Lesschen (2012).

In de aanbevelingen tenslotte geven we de visie weer van het onderzoeksteam richting benodigde proeven en metingen op weg naar 2030 om de bevindingen verder te onderbouwen en te borgen.

2 Doelstellingen

Het doel van deze meerjarige studie is het vaststellen van de effectiviteit van landbouwkundige maatregelen voor het vastleggen van koolstof in de organische stof van minerale bodems. Daarmee wordt een praktische toetsing beoogd van de koolstofvastlegging zoals beschreven in Lesschen *et al.*, (2012) voor de Nederlandse condities. Het gaat hierbij zowel om de koolstofvastlegging van individuele maatregelen als om het effect van de combinatie van maatregelen. In deze voortgangsrapportage ligt de focus op individuele maatregelen die tot op heden nog niet zijn onderzocht of nog onvoldoende zijn onderbouwd en gekwantificeerd. Tevens is gekeken naar de effecten van deze maatregelen op de bodemkwaliteit: hoe beïnvloeden deze maatregelen de metingen uit de BLN-indicatorset en koppelen deze maatregelen naast koolstofvastlegging positief mee richting een duurzaam beheer van de bodem. De resultaten hiervan zijn gerapporteerd in Hoogmoed *et al.*, (2021). In combinatie met de technische toepasbaarheid van de maatregelen in Nederland, welke in een aparte studie worden vastgesteld (Slieker *et al.*, 2021) kan daarmee worden bepaald of de doelstelling van de 0,5 Mton CO₂-eq. reductie per jaar in de landbouwpraktijk op minerale bodems in Nederland technisch mogelijk is. Daartoe dient echter rekening gehouden te worden met eventuele afwentelingseffecten zoals naar de emissie van lachgas. Dit is het onderwerp van een separate studie binnen het programma Slim landgebruik.

3 Materiaal en methode

3.1 Effectiviteit van maatregelen voor de koolstofvastlegging

3.1.1 Keuze van maatregelen

Tabel 3.1 geeft aan welke maatregelen in 2020 nader zijn onderzocht op hun effectiviteit voor de koolstofvastlegging. Bij de keuze is geselecteerd op basis van een verwachte significante bijdrage aan de koolstofvastlegging, blijkend uit de opname van een maatregel in Lesschen (2012) of een verwachte significante bijdrage zoals gebleken uit de studie van Slier *et al.*, (2019). De mate van onderbouwing van de effectiviteit van een maatregel speelde als aanvullend criterium een rol.

Tabel 3.1 Maatregelen in het onderzoek naar de koolstofvastlegging in 2020. De experimentele methode is afhankelijk van de beschikbare onderzoek locaties.

Maatregel	Mate van onderbouwing voorafgaand aan 2020	Experimentele methode*
Akkerbouw		
Compost toevoegen	Redelijk aantal metingen. Resultaten wisselend	1 –looptijd 5 jaar
Groenbemesters	Beperkt aantal metingen	1 en 4
Méérjarige akkerranden	Geen metingen	2
Verbeteren gewasrotaties	Beperkt aantal metingen Vele varianten op de maatregel mogelijk.	4
Veehouderij		
Leeftijd grasland verhogen (niet-scheuren)	Beperkt aantal metingen	2
Mais-gras wisselteelt	Zeer gering aantal metingen	2
Kruidenrijk grasland	Nulmeting uitgevoerd	(1)-looptijd 3 jaar
Compost en mest veehouderij	Geen metingen	3

* 1: Volwaardige Lange Termijn Experiment (LTE) voorhanden

2: Vergelijking tussen (praktijk)percelen

3: 0-meting in gestarte LTE

4: Meting aan kengetallen (van groenbemesters) in combinatie met modelsimulaties

De activiteiten in het onderzoek naar de effectiviteit van de maatregelen verlopen langs vier lijnen:

1. Er is een volwaardig lange-termijn experiment beschikbaar waarbij een klimaatrelevante maatregel wordt vergeleken met een referentiebehandeling. De duur van dit experiment is meerdere jaren (>5 jaar) waardoor een eventueel significant verschil in organische stofopbouw in de bodem verwacht mag worden.
2. Een wetenschappelijk lange termijn experiment ontbreekt maar literatuuronderzoek en Lesschen (2012) geven aan dat een maatregel een potentiële bijdrage aan de koolstofvastlegging geeft. In dit geval worden praktijkpercelen onderzocht waarmee een

vergelijk kan worden gemaakt tussen percelen mét de maatregel toegepast en percelen waarbij de maatregel achterwege is gelaten. Ook kan de maatregel in oplopende mate worden toegepast. Dit betreft bijvoorbeeld de maatregel 'leeftijd van grasland verhogen' (=niet scheuren) of de maatregel 'verbeteren gewasrotaties' met als voorbeeld een oplopende aandeel graan in het bouwplan. Dit geeft een schatting van de effectiviteit van een maatregel.

3. Geen van beide bovenstaande situaties doet zich voor, voor een maatregel. Waar dit mogelijk is wordt dan aangesloten met een 0-meting in een net opgestart experiment zodat na een aantal jaren een herhaalmeting kan worden verricht en de opbouw van koolstof in de tijd kan worden gevolgd. Dit kan zowel in een setting van een lange termijn experiment als in de setting van praktijkpercelen zijn.
4. Indien geen van de opties mogelijk is en ook een 0-meting uitgesloten is met modelberekening eventueel. In combinatie met verbeterde invoergegevens (kengetallen) een indicatie gegeven van de koolstofvastlegging.

3.1.2 Maatregelen en LTE-locatie

In Tabel 3.2 staan de LTE-proeflocaties vermeld waar in het najaar en winter van 2020-2021 is gemeten. In een experiment gericht op het effect van compost (en bokashi) bemesting is een 0-meting verricht. Hier kunnen nog geen conclusies omtrent de potentie van koolstofvastlegging worden verbonden.

Tabel 3.2. Geselecteerde maatregelen en de LTE waarin deze gemeten zijn.

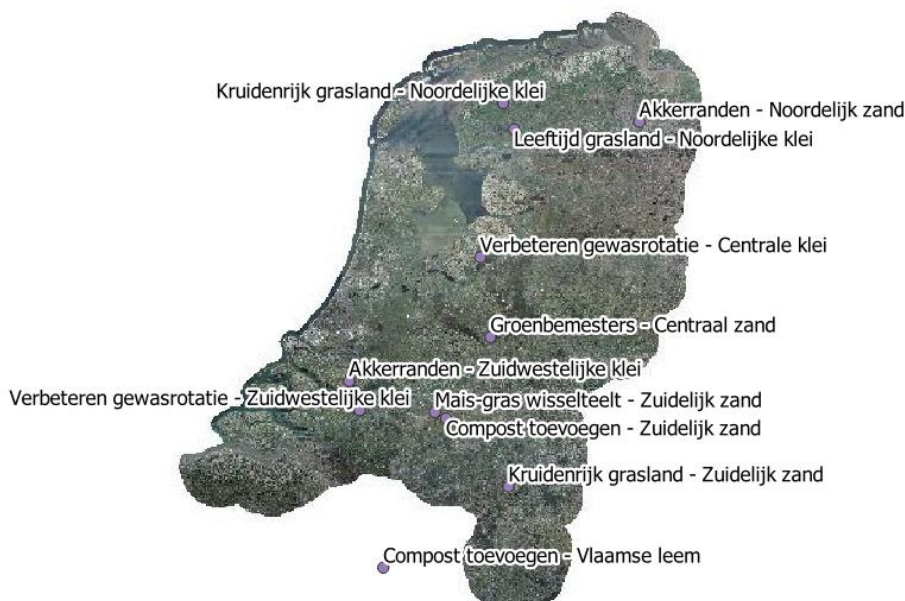
Akkerbouw	Klei	Zand
Compost toevoegen		Vlaamse leem (Bierbeek – Belgische Bodemkundige Dienst)
Groenbemesters		Centraal zand (Wageningen - WUR)
Méérjarige akkerranden	Zuidwestelijke klei (Bedrijven – Hoeksche Waard)	Noordelijk zand (bedrijven - Groningen)
Verbeteren gewasrotaties (0-meting)	Centrale klei (startmeting bedrijven - Flevoland)	Zuidelijk zand (startmeting bedrijven - Brabant)
Veehouderij	Klei	Zand
Leeftijd grasland verhogen (niet scheuren)	Noordelijke klei (bedrijven - Friesland)	Bedrijven - Brabant
Mais-gras wisselteelt		Bedrijven - Brabant
Kruidenrijk grasland	Noordelijke klei (Dairy Campus - Friesland)	Zuidelijk zand (Kelpen Oler - Limburg)
Compost en mest veehouderij (0-meting)		Zuidelijk zand (Boxtel - LBI)

De details van de verschillende LTE's en proefopzetten zijn beschreven in Bijlage 1.

3.1.3 Metingen aan de koolstofvastlegging en BLN-indicatoren

In de maanden september – december 2020 is een meetcampagne uitgevoerd waarin bodemmetingen volgens een gestandaardiseerd SL- protocol zijn uitgevoerd (Koopmans *et al.*, 2019, 2020). Op elke locatie (Figuur 3.1) zijn naast metingen aan koolstof en organische stof ook de voornaamste BLN-indicatoren bepaald (Tabel 3.3). De procedure in het kort:

- Monstername voor bodemkoolstof op 2 diepten: 0-30 cm en 30-60 cm (volgens protocol Koopmans *et al.*, (2019)).
- Chemische, fysische en biologische BLN-indicatoren voor de laag 0-30 cm (monstername volgens protocol Koopmans *et al.*, (2019) en analyse volgens Hanegraaf *et al.*, (2019);
- Bepaling van de bulkdichtheid met 100 cc-ringen in verticale wand in een profielkuil (3 stuks op 15 cm en 3 stuks op 45 cm) en watervasthoudend vermogen (op 15 cm) op basis van onderdruk in pF-bakken bij de Bodemkundige dienst van België met metingen bij pF 0, 2, 2.7 en 4.2;
- Bodemweerstandmeting met behulp van een penetrologger tot een diepte van 80 cm; Bodemscan aan de hand van een profielkuil tot 60 cm diepte volgens standaard SL-protocol (Koopmans *et al.*, 2019).



Figuur 3.1 Weergave van de LTE-onderzoeklocaties van de verschillende maatregelen.

Tabel 3.3 Koolstof en BLN-indicatormetingen verricht binnen de studie welke aansluiten bij de metingen en protocollen van Koopmans et al. (2019) en Hanegraaf et al. (2019).

Bereik	Indicator	Methode	Laboratorium
Koolstof & organische stof	C-elementair	Elem. analyse ¹	Eurofins
	C-totaal	1150 °C ²	Eurofins
	Organische stof	NIRS ³	Eurofins
	Organische stof-gloeiverlies	Gloeiverlies ⁴	Eurofins
Fysisch	Textuur (klei/silt/zand)	NIRS	Eurofins
	Watervasthoudend vermogen	pF bak	BDB
	Bulkdichtheid	Ringen 100 cc	BDB/LBI
	Weerstand	Penetrologger	LBI/WUR
Chemisch	Nmin		Eurofins
	N-totaal	Kjeldahl-Klassiek	Eurofins
	pH-ClCl ₂	ClCl ₂ -extr.	Eurofins
	P-voorraad (P-AI)		Eurofins
	P-beschikbaar	ClCl ₂ -extr.	Eurofins
	Pw	berekening	Eurofins
	K-CEC	NIRS	Eurofins
	K-beschikbaar	ClCl ₂ -extr.	Eurofins
Biologisch	HWC	Extractie	WenR
	Pot min. N (PMN)	NIRS	Eurofins
	Microbiële biomassa	NIRS	Eurofins
	Microbiële activiteit	NIRS	Eurofins
	Schimmelbiomassa	NIRS	Eurofins
	Bacteriële biomassa	NIRS	Eurofins
Visuele	Bodemscan	Visueel	LBI/WPR
Beoordeling			

¹ Soil organic carbon (SOC elementaire C analysis gevolgd door droge verbranding (Yeomans and Bremner, 1991; Soon and Abboud, 1991, ISO 10694). Internal classical code = COR6

² Total Carbon: SOC + inorganic carbon. Verbranding bij 1150 °C (NEN 15936). Internal classical code = CTT6

³ Near Infra Red Spectroscopy

⁴ Gloeiverlies bij 550 °C (NEN 5754, 2005). Internal classical code = GLV1

3.1.4 Statistiek

De statistiek in dit onderzoek is uitgevoerd met behulp van het programma Genstat (VSN International, 2018). Daarbij is bij LTE's gebruik gemaakt van ANOVA, in herhalingen en in blokken als er sprake was van een blok-indeling. Indien er een ongebalanceerde opzet was (niet even veel herhalingen voor elke behandeling) is een ANOVA voor unbalanced design gebruikt. Significante effecten werden benoemd als de nulhypothese een waarschijnlijkheid van minder dan 5% had ($p < 0.05$, dit is de algemeen gangbare grens in de wetenschap). Alleen in het geval van significante effecten is de vastlegging voor de behandelingen berekend.

Als post-hoc test is met least significant difference (lsd) gewerkt. Daarmee werden, in het geval van significante verschillen ($p < 0.05$), verschillende letters achter de getallen genoteerd om te duiden welke behandelingen van elkaar verschilden.

De koolstof voorraad is uitgerekend met een behandeling-specifieke bodemdichtheid per laag, indien de dichtheid significant verschilde per behandeling. Indien dit niet het geval was is met de gemiddelde dichtheid van een LTE gerekend, per bodemlaag.

3.2 Kengetallen organische stof aanvoer van gewasresten en groenbemesters

De effectieve organische stof (EOS) is de hoeveelheid organische stof wat nog in de bodem aanwezig is één jaar na onderwerken. De EOS wordt berekend door het organische stof (ca. 90% van het droge stof) te vermenigvuldigen met de humificatiecoëfficiënt (HC), dit is de fractie OS wat na één jaar nog niet afgebroken is. In 2018 en 2019 is literatuuronderzoek en veldbepalingen gedaan aan de organische stof van groenbemesters. In 2019 is een incubatieproef uitgevoerd aan groenbemesters om de humificatiecoëfficiënt te bepalen. In de incubatieproef wordt koolstofrespiratie gemeten en vervolgens modelmatig geëxtrapoleerd naar 1 jaar en een temperatuurcorrectie toegepast. De verzamelde data zijn in 2020 volledig geanalyseerd. Met de data uit de incubatieproef is gekeken of de afgeleide humificatiecoëfficiënten verschillend zijn van de huidige HC's. EOS-kengetallen zijn opgesteld voor tien groenbemestersoorten. Voor elk soort apart is het best fittende model gebruikt om het verband tussen zaaitijdstip en bovengrondse organische stof te beschrijven. Vervolgens is het best fittende model voor het verband tussen blad:wortel ratio en bovengrondse organische stof gefit. De ondergrondse organische stof is op basis van deze modellen berekend en vervolgens is het totale EOS van bovengronds en ondergronds berekend.

In 2018 is ook literatuuronderzoek gedaan naar de EOS van gewasresten. Dit leidde echter tot weinig resultaat. In 2020 zijn veldmetingen aan de EOS van gewasresten van de belangrijkste akkerbouwgewassen gedaan. Er zijn 234 datapunten verzameld door bemonsteringen. Deze zijn aangevuld met data uit de literatuur. Eind 2020 is ook een incubatieproef met gewasresten gestart om de humificatiecoëfficiënten te bepalen. De resultaten hiervan komen beschikbaar in de zomer 2021.

3.2.1 Modelberekeningen aan gewasresten, compost en grondbewerking

In 2019 zijn voor vier akkerbouwregio's de koolstofvastlegging van verschillende bouwplannen doorgerekend met behulp van het simulatiemodel NDICEA. Hierbij was voor elke regio een standaardbouwplan vastgesteld en op basis daarvan verschillende bouwplanverruiming met extra graan en groenbemesters doorgerekend (Koopmans *et al.*, 2020). Voor deze bouwplannen zijn de nieuwe kengetallen voor groenbemesters zoals bepaald binnen dit project en afhankelijk van de zaaitijd, gebruikt. In 2020 is er verder gerekend met NDICEA aan een deel van deze bouwplannen om de koolstofvastlegging te kwantificeren bij verschillende maatregelen:

- 1) Door behoud van de gewasresten van granen (stro) en suikerbieten (suikerbietentopjes);
- 2) Extra compost toevoer in combinatie met gereduceerde grondbewerking.

3.2.2 Koolstofvastlegging door behoud van gewasresten

Een relatief gemakkelijke en in de praktijk al vaak toegepaste maatregel voor het verhogen van bodemorganische stof (c.q. koolstof) is het achterlaten van gewasresten op het land. Vooral met stroresten van graangewassen kan een relatief grote hoeveelheid effectieve organische stof worden toegevoegd aan de bodem. Een afweging hierbij is dat stro ook geld oplevert wanneer dit verkocht wordt als veevoer. Suikerbietengewasresten worden doorgaans achtergelaten op het land. Maar, het overleven van bepaalde schimmelziektes in de gewasresten kan nadelig zijn

waardoor deze soms ook wel afgevoerd worden. Ook bevatten suikerbietgewasresten een relatief hoge hoeveelheid stikstof die gedurende de winter vatbaar is voor uitspoeling.

De hoeveelheid koolstofvastlegging door middel van tarwestro gewasresten is voor elke regio gemodelleerd in twee bouwplannen: 1) in het standaard bouwplan, en 2) in het met tarwe verruimde bouwplan ('extra graan'). In bijlage 2 zijn de standaard en extra graan bouwplannen per regio weergegeven. Voor suikerbieten gewasresten is de hoeveelheid koolstofvastlegging alleen in het standaardbouwplan gemodelleerd.

In deze studie zijn alleen de gewasresten tarwestro en suikerbietenresten meegenomen. Omdat de vernieuwde kengetallen voor gewasresten (zie hoofdstuk 2 in dit rapport) op het moment van uitvoeren nog in onderzoek waren en daarmee niet beschikbaar is gebruik gemaakt van de tot nu toe meest actuele kengetallen voor groenbemesters (2019) en van regio specifieke cijfers van de afgelopen vijf jaar uit de KWIN-AGV (2018).

3.2.3 Koolstofvastlegging bij het stapelen van de maatregelen compost toevoer akkerbouw en gereduceerde grondbewerking.

In dit onderzoek is onderzocht of er sprake is van een interactie-effect wanneer maatregelen gestapeld worden. Ofwel, is de koolstofvastlegging groter wanneer beide maatregelen tegelijk worden toegepast, dan de som van de twee maatregelen wanneer deze apart worden toegepast. In deze berekeningen is ervoor gekozen om één standaardbouwplan uit de zandregio (Noordoostelijk zand en dal gebied) en één standaardbouwplan uit een kleiregio (Centrale Zeeklei Flevoland) te onderzoeken. Het gaat hierbij om de stapeling van de maatregelen 'extra compost toevoer akkerbouw' en 'gereduceerde grondbewerking'. Voor grondbewerking zijn zowel de effecten van 'gereduceerde grondbewerking' als 'minimale grondbewerking' berekend. Ook de extra composttoevoer is op twee verschillende manieren benaderd:

1) In een realistisch scenario wat betreft de grootte en frequentie van de compostgift(en). Een teler zou dit scenario op dit moment binnen de kaders van de wetgeving relatief makkelijk kunnen toepassen. Dit hield in een groencompost gift van 20 ton per ha na een graangewas, bij de teelt van de groenbemester. De standaardbemesting is aangepast om de compostgift binnen de kaders van de mestwetgeving toe te passen. Zie bijlage 3 voor de bemesting.

2) In een extreem scenario waarbij grote hoeveelheden compost worden toegepast bovenop de standaard bemesting. Dit scenario is onrealistisch voor een teler om binnen de huidige kaders van de mestwetgeving toe te kunnen passen. Dit hield in een jaarlijkse groencompostgift 20 ton per ha. De standaard bemesting is in dit scenario niet aangepast.

Berekeningen

Bij de omrekening van de hoeveelheid organische stof naar de hoeveelheid koolstof is uitgegaan van een koolstofgehalte van 50%

in de organische stof. De hoeveelheid koolstof is daarna omgerekend naar hoeveelheid CO₂ met een factor 3,67 (i.e. 44/12: moleculairgewicht van CO₂ (44) t.o.v. moleculairgewicht C (12)).

4 Resultaten

4.1 Effectiviteit van maatregelen voor de koolstofvastlegging

4.1.1 Akkerbouw

Compost toevoegen

De resultaten

In de LTE op Vlaamse Leemgrond, waarin 23 jaar lang vaste hoeveelheden kunstmest en compost werden toegevoegd, zien we duidelijke effecten op het koolstofgehalte en de koolstofopbouw, in zowel de bovengrond (Tabel 4.1 A) als de ondergrond (Tabel 4.1 B). We zien allereerst dat bemesting door kunstmest, in vergelijking met de onbemeste variant, een hoger gehalte en een toename in bodemkoolstof in bovengrond en ondergrond gaf. Dit komt door meer wortels en bovengrondse gewasresten. Verder zien we dat een grotere hoeveelheid compost ook een hogere toename in koolstofgehalte en voorraad tot gevolg had.

Korte discussie

Als eerste zien we in deze LTE dat de gevonden effecten helemaal in overeenstemming zijn met de effecten gevonden in andere (Nederlandse) LTE's (Koopmans *et al.*, 2020): hier rapporteerden we een toename van ongeveer 0,5 ton CO₂ per ha per jaar per ton toegediende organische stof. De gevonden resultaten in deze LTE bevestigen dit. Daarbij kan worden opgemerkt dat het hier gaat om relatief grote hoeveelheden compost die ook nog eens jaarlijks worden toegediend. Er lijkt een trend te zijn dat de opbouw per ton organische stof die werd toegediend, hoger is bij 15 ton dan bij 45 ton compost per ha per jaar. Het is de vraag of deze trend doorzet bij kleinere hoeveelheden, die in te passen zouden zijn in een bemestingsplan onder Nederlandse condities met beperkte mogelijkheden om compost toe te dienen. Opvallend is ook dat de relatief grote verschillen in koolstofgehalte en voorraad ook in de ondergrond te zien zijn.

Tabel 4.1 A Compost toevoegen, LTE op Vlaamse leemgrond. Bouwvoor 0-30 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer tussen de behandelingen.

Behandeling	Aantal herhalingen	Looptijd (jaar)	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)	Vastlegging per ton OS (ton CO ₂ /ha/jr per ton OS)
Onbemest	4	23	0,8 a	35 a	-1,1	
Kunstmest	4	23	0,9 b	42 b	0,0	
15 ton/ha/jr compost	4	23	1,3 c	58 c	2,5	0,69
30 ton/ha/jr compost	4	23	1,6 d	68 d	4,2	0,58
45 ton/ha/jr compost	4	23	1,9 e	79 e	6,0	0,55

Tabel 4.1 B Compost toevoegen, LTE op Vlaamse leemgrond. Ondergrond 30-60 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer tussen de behandelingen.

Behandeling	Aantal herhalingen	Looptijd (jaar)	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)	Vastlegging per ton OS (ton CO ₂ /ha/jr per ton OS)
Onbemest	4	23	0,4 a	17 a	-0,5	
Kunstmest	4	23	0,5 b	21 b	0,0	
15 ton/ha/jr compost	4	23	0,6 c	29 c	1,3	0,35
30 ton/ha/jr compost	4	23	0,6 c	27 c	1,1	0,15
45 ton/ha/jr compost	4	23	0,7 d	32 d	1,8	0,17

Groenbemesters inzetten

De resultaten

Op de centrale zandgrond nabij Wageningen is een LTE onderzocht die de inzet van verschillende soorten groenbemesters met zwarte braak (geen groenbemester na het gewas) vergelijkt (Tabel 4.2 A en 4.2 B). We zien in de metingen van koolstofgehalte en koolstofvoorraad geen significante verschillen tussen deze behandelingen, in zowel de bouwvoor (0-30 cm) als de ondergrond (30-60 cm). Wat opvalt is dat in deze LTE de variatie tussen de herhalingen behoorlijk groot is, en dat de proef nu 5 jaar loopt. Ook na correctie voor het koolstofgehalte per veldje, dat bij het begin van de proef gemeten is, zien we geen significante verschillen.

Korte discussie

Om een effect van de groenbemesters te zien tegen de achtergrond van de relatief grote variatie tussen de herhalingen is een langere looptijd nodig. Op basis van berekeningen met de in deze rapportage gepubliceerde nieuwe effectieve organische stof kengetallen (hoofdstuk 4.2) blijkt dat de te verwachten maximale koolstofvastlegging in dezelfde orde van grootte (~2 ton C per ha) is als de gemeten variatie tussen de behandelingen. Om een significant verschil te kunnen meten zou de looptijd van de LTE rond de 10 jaar moeten zijn.

Tabel 4.2 A. Verschillende groenbemesters in het bouwplan, LTE op centrale zandgrond. Bouwvoor 0-30 cm. n.s.: niet significant

Behandeling	Aantal herhalingen	Looptijd (jaar)	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Zwarte braak	5	5	1,2	53	n.s.
Bladrammenas	5	5	1,2	51	n.s.
Japane haver	3	4	1,3	54	n.s.
Bladrammenas + japane haver	5	5	1,3	57	n.s.
Bladrammenas + wikke + japane haver	5	5	1,2	50	n.s.

Tabel 4.2 B. Verschillende groenbemesters in het bouwplan, LTE op centrale zandgrond. Ondergrond 30-60 cm. n.s: niet significant

Behandeling	Aantal herhalingen	Looptijd (jaar)	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Zwarte braak	5	5	0,7	35	n.s.
Bladrammenas	5	5	0,7	35	n.s.
Japane haver	3	4	0,6	31	n.s.
Bladrammenas + japane haver	5	5	0,7	35	n.s.
Bladrammenas + wikke + japane haver	5	5	0,6	30	n.s.

Meerjarige akkerranden

De resultaten

Om te onderzoeken of meerjarige akkerranden een effect hebben op het koolstofgehalte en de koolstofvoorraad van akkerbouwpercelen werd er in twee regio's een meting gedaan in 8 akkerranden en in het direct aansluitende perceel. Op de zuidwestelijke kleigrond (Hoekse waard) leverde dit een significant hoger koolstofgehalte en een hogere koolstofvoorraad op in de bouwvoor van de akkerrand (Tabel 4.3 A). Dit duidt op een positieve koolstofvastlegging door de akkerrand, in vergelijking met de rest van het perceel. Op de noordelijke zandgrond hebben we te maken met een vrij hoog organische stofgehalte. We vinden hier een lager koolstofgehalte en een lagere koolstofvoorraad in de akkerrand in vergelijking met het bijbehorende perceel. De ondergrond van de akkerranden was niet significant verschillend met die van het bijbehorende perceel zowel in de zuidwestelijke kleigrond als ook in de noordelijke zandgrond (Tabel 4.3 B).

Korte discussie

Het beeld van de akkerranden in beide regio's is grasachtig. Bij méérjarige akkerranden nemen grassen vaak de overhand over bloemen en kruiden. Omdat grasland koolstof vastlegt, is hiervan dan ook te verwachten dat dit ook in de akkerranden kan gebeuren. We meten dit op de kleigrond, maar meten het tegenovergestelde op zandgrond. En complicerende factor bij de interpretatie is dat op de zuidwestelijke akkerranden bij het schonen van sloten de bagger wel op de akkerranden wordt achtergelaten. Mogelijk dat de reeds hoge koolstofgehalten op de zandgronden ook met dit fenomeen te maken hebben. Dit moet in het komende jaar nog verder worden nagegaan.

Tabel 4.3 A Meerjarige akkerranden (grasachtig), meting op praktijkpercelen op twee grondsoorten. Gemeten werd in de rand, en in het perceel waar de rand aan lag. Bouwvoor 0-30 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer tussen akkerrand en perceel per grondsoort. Koolstofvoorraad en vastlegging worden uitgedrukt per hectare akkerrand. Er is nog niet gecorrigeerd voor het relatief kleine oppervlak van de akkerrand ten opzichte van een geheel perceel (ha).

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	Leeftijd akkerrand (jaar)	C-elementair (%)	Koolstofvoorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Zuid-westelijke klei	Akkerrand (meerjarig)	8	15	2,3 b	100 b	8,3
	Perceel	8	15	1,4 a	63 a	
Noordelijk zand	Akkerrand (meerjarig)	8	3 + 8	5,2 a	181 a	-14,7
	Perceel	7	3 + 8	6,5 b	225 b	

Tabel 4.3 B Meerjarige akkerranden (grasachtig), meting op praktijkpercelen op twee grondsoorten. Gemeten werd in de rand, en in het perceel waar de rand aan lag. Ondergrond 30-60 cm. Koolstofvoorraad en vastlegging worden uitgedrukt per hectare akkerrand. Er is nog niet gecorrigeerd voor het relatief kleine oppervlak van de akkerrand ten opzichte van een geheel perceel (ha).

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	Leeftijd akkerrand (jaar)	C-elementair (%)	Koolstofvoorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Zuid-westelijke klei	Akkerrand (meerjarig)	8	15	1,6	71	niet significant
	Perceel	8	15	1,1	47	
Noordelijk zand	Akkerrand (meerjarig)	8	3 + 8	3,5	157	niet significant
	Perceel	7	3 + 8	3,8	172	

Verbeteren gewasrotaties

De resultaten

Voor deze maatregel ontbreekt een volwaardig lange termijn experiment. Door het volgen van specifieke percelen in de tijd door middel van metingen en modelberekeningen wordt het effect verder gekwantificeerd. Hiervoor is het afgelopen jaar een startmeting uitgevoerd. Op klei en zand zijn percelen gezocht waarvoor een duidelijk verschil in aandeel graan in de rotatie is te verwachten voor de komende jaren. De percelen moesten wat betreft ligging en bedrijfsvoering vergelijkbaar en enigszins representatief zijn. In de startmeting zien we in beide regio's echter een groot verschil in grondslag, ondanks de zorgvuldige selectie van de percelen (Tabel 4.4 A en 4.4 B). Hiervoor moet in berekeningen aan de organische stof op deze percelen in de komende jaren worden gecorrigeerd.

Korte discussie

Afgelopen jaar werden praktijkpercelen mét en zónder de maatregel meer graan in de rotatie vergeleken. De resultaten toonden een duidelijke trend in alle regio's met meer bodemorganische stof in de rotaties met een groter aandeel graan. Over de regio's was het gehalte aan organische stof significant hoger bij bouwplannen met meer graan. Een correlatie is echter nog geen oorzakelijk verband. Daarom worden nu modelberekeningen met bekende input ingezet (aanpak 4).

Deze aanpak omvat vier stappen:

1. Het meten van een (beperkte) tijdreeks op praktijkbedrijven met meer en minder graan in het bouwplan;
2. Het invoeren van input gegevens voor deze bedrijven in een of meer rekenmodellen;
3. Het narekenen van de tijdreeks (validatie, oftewel "het model begrijpt wat er gebeurt");
4. Aantonen dat het extra graan zorgt voor een toename in koolstofvastlegging door scenariovergelijking.

Deze aanpak, in combinatie met een uitgebreidere meting aan meer praktijkpercelen, moet helpen de effecten van de maatregel verder te kwantificeren. Hieraan wordt de komende jaren verder gewerkt.

Tabel 4.4 A. Startmeting voor berekenen van koolstofopbouw aan de hand van inputgegevens. Bouwvoor 0-30 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer.

Grondsoort	Aantal percelen	Startmeting C-elementair (%)	Startmeting koolstof voorraad (ton C/ha)	Verwacht aandeel graan in bouwplan
Centrale klei	5	1,8 a	76 a	hoog aandeel (± 50 %)
	5	2,9 b	118 b	lager aandeel (± 30 %)
Zuidwestelijk zand	5	1,2 a	50 a	hoog aandeel (± 30 %)
	5	1,8 b	75 b	lager aandeel (± 10 %)

Tabel 4.4 B. Startmeting voor berekenen van koolstofopbouw aan de hand van inputgegevens. Ondergrond 30-60 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer.

Grondsoort	Aantal percelen	Startmeting C-elementair (%)	Startmeting koolstof voorraad (ton C/ha)	Verwacht aandeel graan in bouwplan
Centrale klei	5	2,1 a	73 a	hoog aandeel (± 50 %)
	5	3,8 b	115 b	lager aandeel (± 30 %)
Zuidwestelijk zand	5	0,8 a	34 a	hoog aandeel (± 30 %)
	5	1,5 b	64 b	lager aandeel (± 10 %)

4.1.2 Veehouderij

Leeftijd grasland verhogen

De resultaten op zandgrond

Op zandgrond is in 2020 een zeer zorgvuldige selectie van percelen uitgevoerd. Hierbij is specifiek gezocht naar percelen, zonder recent grasland verleden, die omgezet zijn naar grasland. We zien dat deze selectie, ondanks dat dit behoorlijke moeite heeft gekost, een duidelijk resultaat oplevert (Tabel 4.5 A en 4.5 B). Toenemende leeftijd van grasland, op percelen van veehouders zonder recent graslandverleden, levert een significante verhoging van het koolstofgehalte en van de koolstof voorraad in zowel de bovengrond als in de ondergrond op. Het gaat daarbij om een behoorlijk grootte jaarlijkse vastlegging.

Korte discussie

Deze metingen tonen een duidelijke toename van koolstof in de bodem onder grasland op zandgrond. Het gaat daarbij echter nog om een vrij beperkt aantal percelen. Bovendien is er nog geen meting van percelen ouder dan 3 maar jonger dan 12 jaar. Uitbreiding van deze meetset in het komende jaar moet deze resultaten versterken.

Tabel 4.5 A. Leeftijd grasland op zandgrond, meting van praktijkpercelen met een akkerbouw verleden voor de aanleg van meerjarig grasland van de aangegeven leeftijd. Bovengrond 0-30 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer.

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Zand	0 jaar oud	6	1,5 a	61 a	
	1-3 jaar oud	4	1,8 b	76 b	18
	> 12 jaar oud	3	2,5 c	105 c	14

Tabel 4.5 B. Leeftijd grasland op zandgrond, meting van praktijkpercelen met een akkerbouw verleden voor de aanleg van meerjarig grasland van de aangegeven leeftijd. Ondergrond 30-60 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer.

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	Leeftijd akkerrand (jaar)	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)
Zand	0 jaar oud	6	0,98 a	43 a	
	1-3 jaar oud	4	1,65 b	73 b	36
	> 12 jaar oud	3	1,57 b	69 b	8

De resultaten op kleigrond

Op kleigrond is er al een duidelijke toename van bodem koolstof bij ouder wordend grasland aangetoond (Koopmans et al., 2019; Koopmans et al., 2020). Hier zijn afgelopen jaar metingen uitgevoerd om te verkennen wat het effect van eenmalige vernieuwing van de graszode door scheuren en opnieuw inzaaien is. De resultaten tonen geen significante verschillen in

koolstofgehalte tussen grasland dat vernieuwd werd, en permanent grasland dat niet gescheurd is (Tabel 4.6 A en 4.6 B).

Korte discussie

De vraag, of grasland vernieuwd kan worden, is in het kader van kwaliteit van de zode voor veehouders belangrijk. De huidige gegevens geven in zoverre een antwoord, dat het ging om éénmalig scheuren, dat in de meeste gevallen al een aantal jaar geleden is gebeurt. Vaker vernieuwen, en meer recent vernieuwen, is daarbij nog niet onderzocht. Ook hier zal in de komende jaren verder aan gemeten worden.

Tabel 4.6 A. Leeftijd grasland op klei, meting effect van eenmalige graslandvernieuwing in de afgelopen 20 jaar. Bovengrond 0-30 cm.

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Klei	vernieuwd (1x) in afgelopen 20 jr	5	4,06	140,61	niet significant
	niet vernieuwd	4	4,38	151,52	

Tabel 4.6 B. Leeftijd grasland op klei, meting effect van eenmalige graslandvernieuwing in de afgelopen 20 jaar. Ondergrond 30-60 cm.

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Klei	vernieuwd (1x) in afgelopen 20 jr	5	1,88	76,34	niet significant
	niet vernieuwd	4	1,58	63,95	

Mais-gras wisselteelt

De resultaten

Bedrijven op zandgrond hebben vaak percelen met langjarige maisteelten. In de maatregel wisselteelten wordt onderzocht of een wisselteeltsysteem met een aandeel tijdelijk grasland op dergelijke percelen positief kan uitpakken voor de bodemkoolstof vastlegging. De metingen laten zien dat dit inderdaad zo is (Tabel 4.7 A en 4.7 B). Daarbij is de koolstofvastlegging in vergelijking met maisteelt behoorlijk. Logischerwijs is er echter een trend dat naarmate er een groter aandeel van de tijd grasland in de wisselteelt zit, het koolstof gehalte en de voorraad hoger waren. De effecten zijn wat kleiner dan blijven grasland, en alleen significant in de bovengrond.

Korte discussie

De koolstofvastlegging van een wisselteelt met mais en tijdelijk grasland is uiteraard kleiner dan die van langjarig grasland. Toch is er veel extra koolstofvastlegging ten opzichte van mais. De huidige metingen tonen daarbij slechts een beperkt aantal varianten en er missen nog een

heleboel gegevens. Gaat het koolstofgehalte van een wisselteeltsysteem naar een plafond? Wat is het effect van vaker wisselen versus minder vaak wisselen? Door het verder kwantificeren van wisselteelten mais en gras kan er een bedrijfsoptimum voor koolstofvastlegging worden gezocht.

Tabel 4.7 A. Wisselteelten in vergelijking met continueelt mais op zandgrond, meting van praktijkpercelen. Bovengrond 0-30 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer.

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Zand	Continu mais (>12 jr)	6	1,5 a	61 a	
	meerjarig mais, dan 1-3 jr gras	4	1,8 a	77 ab	5
	meerjarig gras, dan 1-3 jr mais	7	2,2 b	86 b	8

Tabel 4.7 B. Wisselteelten in vergelijking met continueelt mais op zandgrond, meting van praktijkpercelen. Ondergrond 30-60 cm. Verschillende letters geven significante verschillen weer.

Grondsoort	Behandeling	Aantal herhalingen	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Zand	Continu mais (>12 jr)	6	0,98	44	niet significant
	meerjarig mais, dan 1-3 jr gras	4	1,65	72	
	meerjarig gras, dan 1-3 jr mais	7	1,27	56	

Kruidenrijk grasland

De resultaten

De effecten van kruidenrijk grasland (3 seizoenen oud) zijn opnieuw bemeaten. We zien dat op zandgrond een lichte trend lijkt te zijn van een hoger koolstof gehalte en een hogere koolstof voorraad onder kruidenrijk grasland in de bovengrond (Tabel 4.8 A). De verschillen zijn echter niet significant. In de ondergrond zijn op zandgrond geen verschillen gevonden (Tabel 4.8 B). Op kleigrond vinden we in de LTE twee soorten beheer waarin gemeten is. We zien hier een significant hogere koolstofvastlegging in de behandeling met de meeste kruiden bij een beheer met uitgestelde maaidatum en vaste mest (Tabel 4.9 A). Deze behandeling had een hoger koolstofgehalte en een hogere koolstofvoorraad in vergelijking met de overige behandelingen. In de ondergrond vinden we dit effect niet terug (Tabel 4.9 B).

Korte discussie

Kruidenrijk grasland is een interessante maatregel, omdat veel veehouders ermee aan de slag zouden willen. Er zijn duidelijk voordelen van inzet van dit beheer op allerlei vlakken te verwachten (biodiversiteit, smakelijkheid, klimaatrobuustheid). Een effect op bodemkoolstof zou daarbij een mooie toevoeging zijn. De LTE's lopen echter nog relatief kort. We zien in de meeste gevallen dan ook (nog) geen duidelijke verschillen. Toch is de trend op zandgrond hoopvol, en

zal in de komende jaren verder worden uitgediept. De verschillen in de behandeling met uitgestelde maaidatum en vaste mest op kleigrond zijn opvallend groot. Er wordt op dit moment nog een her-analyse van bewaarde monsters voor inzet van deze behandelingen uitgevoerd, om te corrigeren voor eventuele beginverschillen. Mogelijk is er een interactie van kruidenrijk grasland met maaidatum en bemesting. Ook dit zal in de komende jaren verder worden uitgediept.

Tabel 4.8 A. LTE Kruidenrijk grasland op zandgrond. Bovengrond 0-30 cm.

Grondsoort	Aantal kruiden	Beheer	Loop-tijd	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Löss/zand	0	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	1,7	72,7	niet significant
	5	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	1,8	77,0	
	>15	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	1,8	78,1	

Tabel 4.8 B. LTE Kruidenrijk grasland op zandgrond. Ondergrond 30-60 cm.

Grondsoort	Aantal kruiden	Beheer	Loop-tijd	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Löss/zand	0	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	0,8	38,0	niet significant
	5	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	0,9	40,3	
Löss/zand	>15	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	0,8	38,0	

Tabel 4.9 A. LTE Kruidenrijk grasland op kleigrond. Bovengrond 0-30 cm. De proef omvat twee soorten beheer, beiden met dezelfde kruidenbehandelingen. Verschillende letters geven significante verschillen weer.

Grondsoort	Aantal kruiden	Beheer	Loop-tijd	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Klei	0	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	4,3 a	150 a	
	5	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	4,2 a	147 a	
	>15	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	4,2 a	146 a	
Klei	0	uitgestelde maaidatum, vaste mest	3	4,2 a	146 a	
	5	uitgestelde maaidatum, vaste mest	3	4,1 a	144 a	
	>15	uitgestelde maaidatum, vaste mest	3	4,9 b	170 b	29.9

Tabel 4.9 B. LTE Kruidenrijk grasland op kleigrond. Ondergrond 30-60 cm. De proef omvat twee soorten beheer, beiden met dezelfde kruidenbehandelingen.

Grondsoort	Aantal kruiden	Beheer	Looptijd	C-elementair (%)	Koolstof voorraad (ton C/ha)	Vastlegging (ton CO ₂ /ha/jr)
Klei	0	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	2,8	113,2	niet significant
	5	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	3,0	121,4	
	>15	geen uitgestelde maaidatum, drijfmest en kunstmest	3	2,6	108,1	
Klei	0	uitgestelde maaidatum, vaste mest	3	3,0	122,5	niet significant
	5	uitgestelde maaidatum, vaste mest	3	2,9	117,3	
	>15	uitgestelde maaidatum, vaste mest	3	2,9	118,4	

4.2 Kengetallen van gewasresten en groenbemesters

Het doel van dit deelonderzoek is om de kengetallen voor de effectieve organische stof (EOS) aanvoer van gewasresten en groenbemesters te actualiseren en waar nodig uit te breiden. Dit om een betere inschatting te kunnen maken van de potentie voor koolstofvastlegging in de bodem met de aanvoer van verschillende typen organisch materiaal. De onderdelen 4.2.1. en 4.2.2. worden uitgebreid gerapporteerd in Selin Norén *et al.* (2021).

4.2.1 Groenbemesters

In tabel 4.10 staat aangegeven hoeveel organische stof wordt gevormd afhankelijk van het zaaitijdstip. Vergeleken met de huidige kengetallen kan hiermee nauwkeuriger de organische

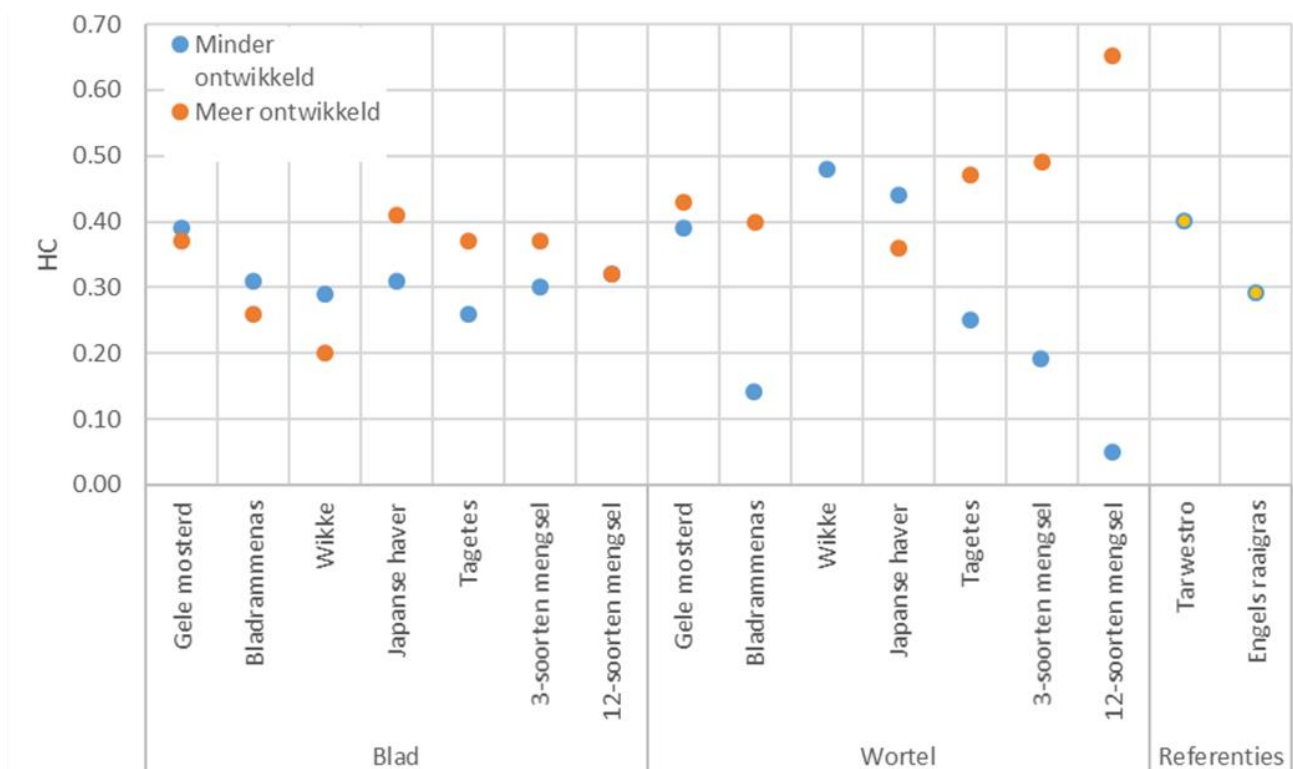
Tabel 4.10. De nieuwe kengetallen voor EOS-aanvoer in kg/ha van groenbemesters ingedeeld per halve maand.

kg EOS/ha	Zaaitijdstip						
	15-Jul	01-Aug	15-Aug	01-Sept	15-Sept	01-Okt	15-Okt
Winterrogge	800					650	-
Japanse haver	2050	1650	1000	550	450	400	300
Wikke	800	700	500	350	250	-	-
Bladrammenas	2050	1600	950	650	350	150	-
Italiaans raaigras	1850	1600	1250	1000	750	450	200
Facelia	-	1100	600	350	150	50	-
Rietzwenkgras	-	-	-	-	1050		-
Gele mosterd	1800	1250	750	500	350	250	-
Wintergerst	-	-	-	650			300
Tagetes	2500	1350	1200	-	-	-	-

stof aanvoer ingeschat worden. Bij deze getallen wordt ervan uitgegaan dat de groenbemester wordt onderwerkt aan het begin van de wintermaanden. De nauwkeurigheid van deze kengetallen verschilt per soort en zaaitijdstip. Zo zijn er weinig data beschikbaar voor rietzwenkgras en facelia, en is er geen goed verband gevonden tussen de EOS en het zaaitijdstip bij winterrogge en wintergerst. Daarom zien we voor deze soorten één getal voor een hele periode. Tabel 4.10 is een update van de tabel gerapporteerd in Koopmans et al. (2020).

4.2.2 Humificatiecoëfficiënten

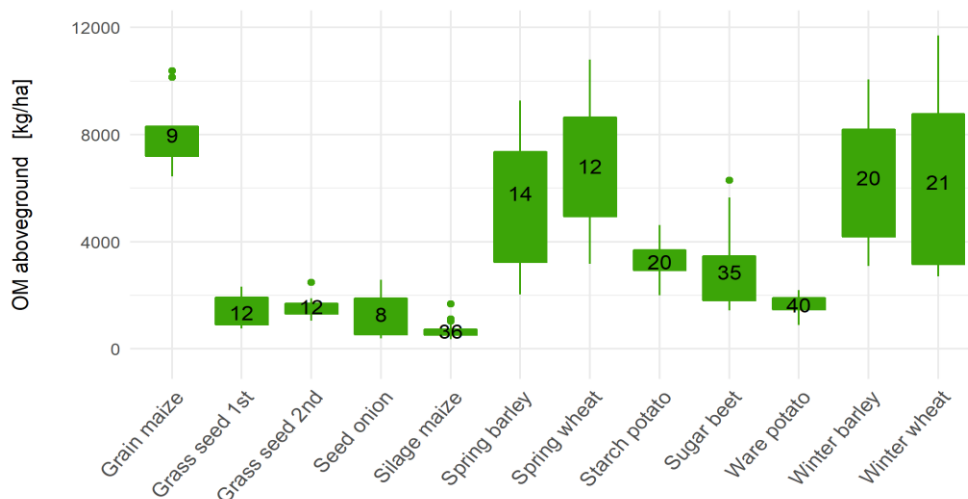
In de incubatieproef met groenbemesters was de spreiding van de afgeleide humificatiecoëfficiënten (HC's) groot, met name voor de wortels (Figuur 4.1). De huidige kengetallen voor HC's van blad en wortel van groenbemesters zijn 0,2 en 0,35, respectievelijk. De gemiddelde van de metingen ligt voor zowel blad als wortel rond de 0,3-0,4. Door de onverwacht grote en moeilijk te verklaren variatie en weinig meetpunten geeft deze proef onvoldoende onderbouwing om de huidige HC's te vervangen.



Figuur 4.1 De afgeleide humificatiecoëfficiënten voor groenbemesters voor blad en wortels van vijf groenbemesters en twee referenties. De incubatieproef is uitgevoerd voor dezelfde groenbemesters in twee verschillende stadia van ontwikkeling.

4.2.3 Gewasresten

De spreiding van de verzamelde data van de bovengrondse OS van gewasresten is in Figuur 4.2 te zien.



Figuur 4.2 De spreiding van de data van de bovengrondse organische stof van gewasresten. Bij granen is dit inclusief het stro. Eerstejaars graszaad en tweedejaars graszaad worden onderscheiden. De getallen geven het aantal datapunten aan.

Als de nieuwe EOS-kengetallen vergeleken worden met de huidige kengetallen zien we voor enkele gewassen grote verschillen (Tabel 4.11). Voor suikerbieten bijvoorbeeld, zijn significant lagere waarden gemeten dan de huidige. Voor zomertarwe zijn significant hogere waarden gevonden. Deze verschillen kunnen komen door nieuwe rassen, veranderde oogsttechnieken, de bemonsteringsmethode, de groeiomstandigheden in 2020 en het moment van bemonsteren. De metingen van 2020 worden in 2021 herhaald en daarna worden de data geanalyseerd waarbij ook gekeken wordt naar de mogelijke oorzaken van de verschillen tussen de huidige kengetallen en de metingen.

Tabel 4.11 De gemiddelde gemeten effectieve organische stof in kg/ha van gewasresten en verschil tussen de huidige kengetallen en de nieuwe metingen.

Gewas	Nieuwe metingen				Huidige kengetallen	Verschil
	Bovengronds	Ondergronds	Stro	Totaal	Totaal	
Suikerbieten	573	138	-	710	1275	-565
Zetmeelaardappelen	652	123	-	770	815	-45
Consumptieaardappelen	328	188	-	520	875	-355
Snijmaïs	134	381	-	520	660	-140
Korrelmaïs	1598	303	-	1900	2175	-275
Graszaad – Engels raaigras	292	1399	-	1690	1750	-60
Wintergerst	1917	496	945	2410	2350	60
Zomertarwe	2045	949	1053	2990	2590	400
Wintertarwe	1949	772	1518	2720	2630	90
Zomergerst	1744	507	1228	2250	1940	310
Zaaiuien	257	10	-	270	300	-30

4.3 Modelberekeningen aan gewasresten, compost en grondbewerking

4.3.1 Koolstofvastlegging door behoud van gewasresten

De modelberekeningen laten zien dat de op jaarbasis gemiddelde koolstofvastlegging door behoud van graan gewasresten afhankelijk is van de regio (Tabel 4.12). De hoeveelheid extra vastlegging die wordt gerealiseerd door extra graan op te nemen in het bouwplan verschilt ook in de regio's. Dit is deels een functie van hoe het 'extra graan' in het bouwplan is ingevuld. In sommige regio's blijft de lengte van het bouwplan gelijk en wordt er een hoofdgewas vervangen door een graangewas (bijvoorbeeld in de regio Centrale Zeeklei Noordoostpolder, zie bijlage 2). Terwijl in andere regio's het extra graangewas als een extra jaar in het bouwplan zal worden opgenomen (bijvoorbeeld in de regio centrale zeeklei Flevoland). Omdat de koolstofvastlegging als gemiddelde op jaarbasis wordt uitgedrukt zorgt een extra jaar in het bouwplan dus voor een 'verdunding' en een gemiddeld iets lagere vastlegging. De koolstofvastlegging door behoud van graangewasresten is het kleinst in het standaard bouwplan in de regio Centrale Zeeklei Noordoostpolder (0,18 ton CO₂ per ha per jaar), met een aandeel graan van 1:6 in het bouwplan. Niet verwonderlijk is de koolstofvastlegging het grootste in de extra graan bouwplannen met een aandeel graan van 2:4 in de rotatie.

Tabel 4.12 Vastlegging door behoud van graangewasresten, in het standaard bouwplan en het bouwplan met extra graan, berekend met NDICEA.

	Vastlegging door behoud van gewasresten*
	ton CO ₂ /ha/jaar
Centrale zeeklei Flevoland	
Standaard bouwplan	0,67
Extra graan	0,74
Centrale zeeklei Noordoostpolder	
Standaard bouwplan	0,18
Extra graan	0,60
Noordoostelijk zand en dal gebied	
Standaard bouwplan	0,46
Extra graan	1,01
Zuid Oost Nederland **	
Extra graan	0,42

* Getallen geven het verschil aan tussen gewasresten ingewerkt en gewasresten afgevoerd (ingewerkt-afgevoerd)

**Standaard bouwplan in regio Zuid Oost Nederland bevat geen graangewas en is dus niet van toepassing in deze tabel.

De koolstofvastlegging door het behoud van suikerbietengewasresten is het hoogst (0,15 ton CO₂ per ha per jaar) in een bouwplan met 1:4 suikerbiet, in de regio Centrale Zeeklei Flevoland (Tabel 4.13). In de overige regio's is de koolstofvastlegging vrij laag met 0,04-0,05 ton CO₂ per ha per jaar in de langere bouwplannen met een suikerbiet aandeel van 1:6 tot 1:8.

Tabel 4.13. Vastlegging door het behouden van suikerbietengewasresten. Berekend met NDICEA.

	Vastlegging door behoud van gewasresten *
	ton CO ₂ / ha/ jaar
Centrale zeeklei	0,15
Centrale zeeklei Noordoostpolder	0,05
Noordelijke zand en dalgronden	0,04
Zuidoostelijk zand	0,05

* Getallen geven het verschil aan tussen gewasresten ingewerkt en gewasresten afgevoerd (ingewerkt-afgevoerd)

4.3.2 Koolstofvastlegging bij het stapelen van de maatregelen 'compost toevoegen akkerbouw' en 'gereduceerde grondbewerking'

In tabel 4.14 is de extra koolstofvastlegging weergegeven door inzet van de maatregelen gereduceerde grondbewerking, niet-kerende grondbewerking en compost toevoegen in de akkerbouw, en de stapeling van deze maatregelen, ten opzichte van het standaard bouwplan (zie Bijlage 2). De gecombineerde maatregelen compost toevoegen en gereduceerde grondbewerking zorgen voor een interactie. In andere woorden, de koolstofvastlegging is groter of kleiner wanneer de twee maatregelen samen worden toegepast, dan de som van de twee maatregelen apart. Opvallend is dat de interactie soms positief en soms negatief is: soms wordt er meer, maar soms juist minder koolstofvastgelegd bij de gestapelde maatregelen, vergeleken bij de som van de aparte maatregelen. Op Centrale zeeklei is de interactie negatief (kleiner dan de som) in het realistisch scenario, en positief in het extreme scenario. In het Noordoostelijk zand en dal gebied is het precies omgekeerd, daar is de interactie in het realistische scenario positief en in het extreme scenario juist negatief. Wanneer de interactie positief is, is het verschil met de som groter dan wanneer de interactie negatief is. In het Noordoostelijk zand en dal gebied bijvoorbeeld is het verschil verwaarloosbaar, in het realistisch scenario met gereduceerde grondbewerking, met 2,02 vergeleken met 1,97 ton CO₂ per ha per jaar)

De koolstofvastlegging in tabel 4.14 is berekend met het model NDICEA. Voor de maatregel 'gereduceerde grondbewerking' en 'compost toevoegen' zijn ook gemeten waarden beschikbaar vanuit de lange termijn experimenten (Koopmans *et al.*, 2020; paragraaf 4.1 maatregel compost toevoegen). Metingen in de LTE's op Centrale zeeklei lieten een koolstofvastlegging zien van 0.69 ton CO₂ per ha per jaar door NKG t.o.v. ploegen, maar dit verschil was niet statistisch significant. Voor het Noordoostelijk zand en dal gebied zijn geen LTE's beschikbaar. Op Zuidelijk zand was wel een LTE beschikbaar. Hier werd een afname van koolstofvastlegging gevonden, variërend van -2,79 tot -5,82 ton CO₂ per ha per jaar, maar ook deze verschillen waren niet significant t.o.v. ploegen. Voor compost toevoegen was een LTE beschikbaar op Centrale zeeklei, waarbij jaarlijks 20 ton groencompost werd toegediend. Dit is vergelijkbaar met het 'extreme scenario' in deze studie, op Centrale zeeklei. In de LTE werd een significante koolstofvastlegging van 1.84 ton CO₂ per ha per jaar gevonden, t.o.v. kunstmest. Dit is lager dan de hier gemodelleerde vastlegging. Ook was er een LTE op Vlaamse leem, waar jaarlijks 15 of, 30 ton compost werd toegediend. Daar lag de koolstofvastlegging tussen de 2,5 – 4,2 ton CO₂ per ha. Dit komt overeen met de 3,2 ton CO₂ per ha per jaar zoals gevonden met de modelberekeningen.

Tabel 4.14. Verschil in vastlegging door de maatregelen gereduceerde grondbewerking, minimale grondbewerkingen extra compost toevoegen en de stapeling van deze maatregelen, ten opzichte van het standaard bouwplan met conventionele kerende grondbewerking. Berekend met het model NDICEA. Bij de gestapelde maatregelen staat onder de gemodelleerde vastlegging de hoeveelheid vastlegging berekend als de som van de twee maatregelen apart.

Regio	Gereduceerde grondbewerking (ton CO ₂ /ha/jr)	Minimale grondbewerking (ton CO ₂ /ha/jr)	Scenario	Compost (ton CO ₂ /ha/jr)	Compost en gereduceerde grondbewerking (ton CO ₂ /ha/jr)	Compost en minimale grondbewerking (ton CO ₂ /ha/jr)
Centrale zeelei						
Verschil t.o.v. standaard bouwplan met kerende grondbewerking	0,73	1,48	Realistisch scenario*	1,27	1,87 (som maatregelen: 2,00)	2,65 (som maatregelen: 2,75)
			Extreem scenario**	4,67	5,62 (som maatregelen: 5,40)	6,44 (som maatregelen: 6.15)
Noordoostelijk zand en dal gebied						
Verschil t.o.v. standaard bouwplan met kerende grondbewerking	0,39	0,83	Realistisch scenario*	1,58	2,02 (som maatregelen: 1.97)	2,52 (som maatregelen: 2.41)
			Extreem scenario**	3,20	3,73 (som maatregelen: 3.59)	4,35 (som maatregelen: 4,03)

* 1 gift van 20 ton groencompost na de tarwe teelt, bij de groenbemester

** jaarlijks een gift van 20 ton groencompost

5 Conclusies en aanbevelingen voor proeven en metingen richting 2030

5.1 Conclusies

Het doel van deze meerjarige studie is toetsing van de effectiviteit van landbouwkundige maatregelen voor het vastleggen van koolstof, zoals gegeven in Lesschen (2012) aan de hand van langer lopende experimenten (LTE's). Daarmee wordt niet zozeer een absolute waarde van de koolstof vastlegging beoogd maar wel de toetsing of deze vastlegging ook overeenkomt met de praktijk onder Nederlandse condities.

Uit deze voortgangsrapportage blijkt dat individuele maatregelen sterk verschillen in de potentie om koolstof vast te leggen in de bodem (tabel 5.1). De resultaten voor de maatregel 'compost toevoegen' bevestigt de toename van ongeveer 0,5 ton CO₂ vastlegging per ton toegevoegde organische stof zoals deze ook in 2019 in andere LTE's werd gevonden. Deze vastlegging lijkt relatief wat effectiever bij lagere giften dan bij de (extreem) hoge giften.

Tabel 5.1 Gemeten potentieel voor koolstofvastlegging in de bodem van Lange Termijn Experimenten (LTE's) voor zeven geselecteerde maatregelen in vergelijking met schattingen van Lesschen (2012).

Maatregel	Vastlegging laag 0-30 cm (ton CO ₂ /ha/jaar)		Lesschen (2012)
	Zand	Klei	Zand & Klei
Akkerbouw			
Compost toevoegen	0,5 /ton o.s. ¹	0,5-0,7 /ton o.s.	-
Groenbemesters inzetten	(nog) geen verschil	-	0,4
Gewasresten achterlaten ²	0,4-1,0	0,2-0,7	0,8
Meerjarige akkerranden ³	(-0,4)	0,25	0,2
Verbeteren gewasrotaties ¹	1,6	1,6	1,2
Veehouderij			
Leeftijd grasland verhogen	14-18	5,5 ¹	3,6
Mais-gras wisselteelt grasfase	5-8	-	-
Kruidenrijk grasland	(nog) geen verschil	(nog) geen verschil ⁴	-

¹ Meting uit 2019

² Op basis van kengetallen en modelberekeningen

³ Uitgaande van een 3 m rand aan één kant van een ha perceel

⁴ Uitzondering bij hoog kruidenaandeel, uitgestelde maaidatum en vaste mest; grootte wordt nog gecorrigeerd

De resultaten bevestigen dat er potentie voor koolstofvastlegging is bij aanvoer van *extra* organische stof in de vorm van (vaste) mest en/of compost. Deze maatregel wordt door akkerbouwers als kansrijk gezien voor de praktijk (Hoogmoed *et al.*, 2021). Voorwaarde is echter wel dat de mestwetgeving extra giften toelaat en er echt sprake is van 'extra' aanvoer. Dit kan alleen worden gerealiseerd indien geëxporteerd materiaal binnen Nederland wordt ingezet of compost, die nu wordt verbrand, in de landbouw als bodemgift wordt gebruikt.

De resultaten van de maatregel 'inzet van groenbemesters' stelden teleur doordat er geen significante verschillen werden aangetroffen als gevolg van de inzet van groenbemesters op zand, nog als resultante van het type groenbemesters. De verklaring hiervoor moet worden gezocht in de looptijd van het bemonsterde experiment (5 jaar). Dit bleek te kort om al voor significante effecten op zandgrond te leiden. Ook werd veel variatie in de bodem aangetroffen. Ondanks dat daarmee de effectiviteit van deze maatregel nog niet kon worden aangetoond mag ervan worden uitgegaan dat extra inzet van groenbemesters op de lange duur zal bijdragen aan extra koolstofvastlegging in de bodem.

De resultaten van de maatregel 'gewasresten achterlaten' zoals deze via een modelstudie zijn verkregen bevestigen de potentie van de maatregel en de effectiviteit ervan zoals deze is gegeven door Lesschen (2012). Van belang is wel dat de potentie bleek te verschillen per regio (bodem en rotatie afhankelijk) met een lagere bijdrage in een standaard bouwplan op zeekei in de Noordoostpolder en een veel grotere potentie bij de inzet van een extra graangewas op dalgronden in het noordoostelijke zandgebied.

Doordat de maatregel 'meerjarige akkerranden' slechts in een vergelijkende studie op praktijkpercelen kon worden onderzocht (methode 2) is het organische stofgehalte in de rand bij aanleg onbekend. Toch tonen de metingen significante verschillen in koolstof voorraad in de randen ten opzichte van het perceel waar ze aan liggen. In het noordoostelijke zandgebied betrof dit een lagere koolstofvoorraad. Op de kleigronden in het zuidwesten werd wel een potentiële vastlegging van 8 ton CO₂ per ha per jaar door de akkerrand gevonden. Wordt uitgegaan van een 3 m brede rand langs één kant van een vierkant perceel van 1 ha dan leidt dit tot een vastlegging van 0,25 ton CO₂ per ha per jaar voor het perceel als geheel. Daarmee kan ook deze maatregel als effectief worden beschouwd. Metingen aan meer percelen, na zorgvuldige selectie, en in combinatie met een nauwkeurige analyse van het beheer moet de grootte en richting van een effect verder kwantificeren.

In 2020 is slechts een nulmeting verricht op percelen om het verloop in organische stof bij een groter aandeel granen in het bouwplan te kunnen volgen. Daarmee blijft de maatregel 'verbeteren gewasrotaties' wel een maatregel met veel potentieel op basis van gegevens uit voorgaande jaren. Het gebrek aan gecontroleerde LTE's om dit te bevestigen is echter wel een aandachtspunt voor de toekomst.

De effectiviteit van de maatregel 'leeftijd van grasland verhogen' (niet scheuren) kon in deze studie ook voor zandgronden worden aangetoond. Uitbreiding van de meetset is de komende jaren echter noodzakelijk om de zekerheid van de vastlegging verder te vergroten. Hoewel sprake was van significante verschillen is de gevonden waarde van 18 ton CO₂ per ha per jaar

aan de onwaarschijnlijk hoge kant. Mogelijk dat het zeer beperkte aantal onderzoekspercelen hierin een rol heeft gespeeld.

Een tussenoplossing voor de maatregel 'leeftijd van grasland verhogen', is de wisselteelt tussen mais en gras, waarbij een bedrijf 60% van zijn percelen permanent in gras heeft liggen maar daarnaast 20% mais en 20% gras dat elke 3 jaar rouleert. Deze studie toont aan dat in een dergelijke wisselteelt sprake kan zijn van een effectieve bijdrage aan de koolstofvastlegging ten opzichte van een continu-teelt van mais.

De maatregel 'kruidenrijk grasland' is relatief nieuw en was niet opgenomen in Lesschen (2012). De LTE's op zand en klei lopen intussen 3 jaar. In zandgrond kon nog geen effect worden aangetoond, hoewel er sprake lijkt van een licht positieve trend. Voor klei kon een effect worden aangetoond in percelen met kruidenrijk grasland met uitgestelde maaidatum en vaste mest in de controle maar ook in de behandeling. Het effect is echter te groot om alléén veroorzaakt te zijn door het kruidenrijk grasland, en er wordt nog gecorrigeerd met verschillen bij start van de proef (analyseresultaten van destijds opgeslagen monsters zijn onderweg). Deze resultaten wijzen op mogelijke potentie van kruidenrijk grasland mits dit langjarig in stand kan worden gehouden voor de koolstof vastlegging.

5.2 Aanbevelingen

Gedurende 3 jaar (2018-2020) zijn data verzameld over de potentiële vastlegging van CO₂ in bodemorganische stof met landbouwkundige maatregelen aan de hand van metingen in Lange Termijn Experimenten (tabel 5.2). Het overall doel van deze meerjarige studie is inzicht krijgen in het effect van landbouwkundige maatregelen op de koolstofvastlegging. Voor de klimaatopgave van 0,5 Mton CO₂-eq emissiereductie uit minerale landbouwbodems ten opzichte van ongewijzigd beleid in 2016, moet worden gecorrigeerd voor eventuele afwentelingseffecten, bijvoorbeeld door veranderingen in lachgasemissies.

Richting 2030 wordt ter verdere onderbouwing van het inzicht in het effect van koolstofvastleggende maatregelen het volgende aanbevolen:

- *Lange termijneffecten van maatregelen volgen; Aanleggen van LTE's voor de belangrijkste maatregelen en monitoren op ontwikkelingen in koolstofvastlegging en bodemkwaliteit.*

Met de resultaten uit tabel 5.1 zijn redelijke indicaties verkregen van de koolstofvastleggingspotentieel van verschillende landbouwkundige maatregelen. Daarmee is getoetst of de koolstofvastlegging bij Nederlandse proeven in overeenstemming is met de indicatieve waarden uit Lesschen (2012). Sommige maatregelen lijken dan ook aanzienlijk effectiever dan andere. Niet altijd waren echter gecontroleerde lange termijn experimenten voorhanden. In die gevallen is gebruik gemaakt van vergelijkingen tussen praktijkpercelen. Het verdient aanbeveling lange-termijn experimenten te starten naar de effecten van 'verbeteren gewasrotaties' en 'niet scheuren van grasland' om de effecten van deze maatregelen ook met de jaren te kunnen volgen en wetenschappelijk te kunnen vaststellen. Hierbij is het ook wenselijk om andere bodemkwaliteitsparameters en gewasproductie te volgen.

Tabel 5.2 Koolstof vastleggende maatregelen met het jaar van onderzoek, een inschatting van de effectiviteit naar aanleiding van de onderzoeksresultaten en de zekerheid (betrouwbaarheid) op basis van de resultaten uit de statistische analyses. + geeft weer dat de effectiviteit/zekerheid van het effect is groot; 0 geeft weer dat er geen effect/zekerheid is; ? geeft weer dat er geen uitspraak mogelijk is gezien de hoeveelheid beschikbare data.

Maatregel	Onderzoeks- jaar			Effec- tiviteit	Zeker- heid	Resultaat
	'18	'19	'20			
Akkerbouw						
Niet-kerende grondbewerking	x	x		0	0	In de LTE's wordt geen positieve bijdrage op koolstofvastlegging gevonden. In de literatuur wordt dit regelmatig bevestigd. Resultaat geldt zowel voor zand als klei.
Verbeteren gewasrotaties	x	x	x	++	0	Positief effect op koolstofvastlegging uit de LTE's. Resultaat is deels gebaseerd op aanvullende modelberekening. Resultaat op basis van metingen op praktijkbedrijven toont een trend. De vele variaties op deze maatregel en de metingen op bedrijven maakt dat deze maatregel nog onzeker is.
Compost en mest toevoegen akkerbouw	x	x	x	+	++	Resultaten uit de LTE's zijn positief en veelal significant. Totaal effect voor NL is afhankelijk van beschikbaarheid en type organische stof input.
Groenbemesters/ Vanggewassen			x	0	0	Wereldwijde reviews tonen een positief resultaat (Slier, 2019). Waarschijnlijk alleen effectief in combinatie met aanpassingen in bouwplan.
Gewasresten achterlaten			x	+	+	Eerste resultaten van modelberekeningen in 2020 zijn positief. Literatuur toont beperkt kwantitatieve resultaten.
Meerjarige akkerranden			x	+	0	Onderzoek naar deze maatregel m.b.t. koolstofvastlegging is schaars, doordat akkerranden veelal voor andere doeleinden worden toegepast.
Veehouderij						
Leeftijd grasland (niet-scheuren)	x	x	x	++	+	Zekerheid op klei is redelijk door herhaalde positieve resultaten in de LTE's. Op zand is het resultaat nog wisselend en de zekerheid daarmee beperkt.
Niet-kerende grond- bewerking in mais	x	x		+ / 0	0	Effect is gemeten op zand in slechts 1 proef. Op klei is geen effect gevonden.
Mais-gras wisselteelt		x	x	+	+	Eerste metingen tonen dat de effectiviteit van koolstofvastlegging positief is.
Kruidenrijk grasland	x		x	+	?	Experimenten lopen veelal te kort om effect te vinden. Resultaat op klei toont effectiviteit na 15 jaar.
Compost en mest toevoegen veehouderij				?	?	Verwacht resultaat op koolstofvastlegging positief. Geschikte LTE's zijn niet gevonden.
Agroforestry/bossa ges				?	?	Staat in de belangstelling. Bijdrage (nog) niet vastgesteld.

- *In LTE's ook lachgasemissies meten.*
Potentieel kan de koolstofvastlegging teniet worden gedaan als maatregelen tot toenemende emissies van lachgas leiden. Momenteel wordt in een klein aantal LTE's en maatregelen de lachgasemissie gemeten. Het verdient aanbeveling om in meerdere LTE's de gecombineerde effecten van zowel de koolstofvastlegging alsook de eventuele lachgas emissies te volgen. Hierbij kan ook gedacht worden aan LTE's waarin combinaties van maatregelen worden toegepast.
- *Focus in bovenstaande LTE's vooral op kennislacunes rond maatregelen.*
Het verdient aanbeveling een aantal maatregelen die vooralsnog niet tot een effectieve koolstofvastlegging hebben geleid nader te onderzoeken. Het kan hierbij gaan om (i) varianten van niet-kerende grondbewerkingstechnieken die mogelijk wel aantoonbaar bijdragen aan de koolstofvastlegging; (ii) akkerranden die mogelijk zo kunnen worden ingericht dat ze aantoonbaar effectiever bijdragen dan uit de huidige metingen is gebleken; (iii) optimalisatie van het mais-gras wisselteeltsysteem; (iv) het optimaliseren van kruidenrijk grasland zodat maximaal wordt bijgedragen aan de koolstofvastlegging, en (v) systemen met inbedding van bomen in het agrarische systeem gecombineerd met een effectief verdienmodel.
- *Doe aanvullend onderzoek in de LTE's naar bodemprocessen t.a.v. koolstof en stikstof.*
Ook is meer inzicht nodig in hoe bodemprocessen ten aanzien van stikstof en koolstof in de bodem functioneren in relatie tot omgevingsfactoren zoals bijvoorbeeld weer, grondsoort, type gewas en meststof met als doel de maatregelen te kunnen doorontwikkelen en optimaliseren.
- *Monitor effecten van stapeling van maatregelen op koolstofvastlegging en bodemkwaliteit.*
Ook zal gefocust dienen te worden op de stapeling van meerdere maatregelen met een relatief kleine bijdrage aan de koolstofopbouw in de praktijk versus de nu voorgestelde, soms meer ingrijpende maatregelen. In een dergelijk geval is het aantoonbaar maken van de effectiviteit een extra uitdaging.
- *Verbeter de koolstofmodellen aan de hand van de LTE-data.*
Op basis van referentielocaties zouden de modellen die koolstofvastlegging simuleren verbeterd kunnen worden, data betrouwbaarder worden verzameld en referentiemetingen worden gebruikt om de veranderingen in koolstof ook op de lange termijn en onder meerdere omstandigheden te kunnen volgen en voorspellen. Metingen in dergelijke referentie LTE's kunnen de modelbenaderingen ondersteunen. Dit is noodzakelijk omdat een modelbenadering alleen, zonder gedegen toetsing in de praktijk onbetrouwbaar kunnen zijn. Goede afstemming tussen wat daadwerkelijk in de praktijk plaatsvindt en modellering van achterliggende processen komt de betrouwbaarheid van de aanpak te goede. Daarbij is een uitgedachte wisselwerking tussen bodemtype en bedrijfssysteem noodzakelijk om verschillende omgevingsfactoren te kunnen meenemen. Het ontwerp van de proeven is echter bij voorkeur wel zodanig dat deze elkaar kunnen

versterken en niet, zoals onder de huidige omstandigheden, leiden tot niet-direct-vergelijkbare experimentele opzetten.

- *Stel een eenduidige wijze vast van meten van koolstofvastlegging.*
Eenduidigheid in koolstofmetingen tenslotte is een basisvoorwaarde om de koolstofvastlegging in de toekomst en de monitoring daarvan gestandaardiseerd en betaalbaar te kunnen volgen. Naast het, meer fundamenteel ontwikkelen van koolstofmetingen zou op basis van alle beschikbare data een analyse gedaan kunnen worden welke van de gehanteerde koolstofanalyses de komende jaren het meest geschikt is om als standaard te kunnen fungeren. Deze methode verdient dan ook opgenomen te worden in een selectie van de BLN.

6 Referenties

Hanegraaf, M.C., H.G.M. van den Elsen, J.J. de Haan en S.M. Visser (2019). Bodemkwaliteitsbeoordeling van landbouwgronden in Nederland – Indicatorset en systematiek, versie 1.0. Wageningen Research, Rapport WPR-795, 34 p.

Koopmans, C.J., B. Timmermans, J.P. Wagenaar, J.P. van 't Hull, M.C. Hanegraaf en J.J. de Haan (2019). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof: Resultaten uit Lange Termijn Experimenten (LTE's): voortgangsrapportage 2019. Louis Bolk Instituut en Wageningen Research, 54 p.

Koopmans, C.J., B. Timmermans, J.P. Wagenaar, J.P. van 't Hull, M.C. Hanegraaf en J.J. de Haan (2019). Bijlage bij Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof. Louis Bolk Instituut en Wageningen Research, 54 p.

Koopmans, C., Timmermans, B., de Haan, J., van Opheusden M., Selin Norén, I., Slier, T., Wagenaar, J.P. (2020). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023: voortgangsrapportage 2020. Louis Bolk Instituut en Wageningen Research, 35 p.

KWIN-AGV (2018). Kwantitatieve Informatie Akkerbouw en Vollegrondsgroenteteelt, 2018, Wageningen University & Research, business unit Open Teelten, publicatienummer 776, ISSN 1571-3059.

Lesschen, J. P., Vellinga, T., Dekker, S., van der Linden, A., & Schils, R. (2020). Mogelijkheden voor monitoring van CO₂-vastlegging en afbraak van organische stof in de bodem op melkveebedrijven (No. 2993). Wageningen Environmental Research.

Selin Norén, I., van Geel, W., de Haan, J. (2021). Cover crop reference values: Effective organic matter and nitrogen uptake. Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research (WPR), no. WPR-877, 98 p.

Slier, T., Lesschen, J.P., Kuikman, P., & van der Kolk, J., (2019). Tabel 7 – Een kritische blik en update. Notitie in het kader van Slim Landgebruik. Wageningen, Wageningen Environmental Research.

VSN International (2018). Genstat for Windows 19th Edition, Version 19.1.0.21390. VSN International, Hemel Hempstead, UK. Web page: Genstat.co.uk.

Bijlage 1. LTE- Proefopzet beschrijvingen

Akkerbouw

1. Compost toevoegen (Bodemkundige Dienst België – Bierbeek)

Door compost toe te voegen wordt via de bemesting organische stof aangevoerd. In het experiment van de Bodemkundige Dienst van België, gelegen op een zanderig/lemige grond te Bierbeek, Vlaanderen, wordt sinds 1997 de toepassing van verschillende composthoeveelheden met elkaar vergeleken. Op het perceel vindt een vruchtwisseling plaats van suikerbiet, aardappelen, wortelen, uien en wintertarwe, met gele mosterd als groenbemester na de wintertarwe. De wintertarwe wordt een op twee geteeld, na een jaar hak- of rooivruchten volgt een jaar met wintertarwe en gele mosterd. Naast de compostbemesting wordt afhankelijk van de teelt de bemesting aangevuld met kunstmest.

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
onbemest	4	geen bemesting
kunstmest	4	alleen bemesting met kunstmest
jaarlijks 15 ton/ha	4	jaarlijks 15 ton/ha compost, aangevuld met kunstmest
jaarlijks 30 ton/ha	4	jaarlijks 30 ton/ha compost, aangevuld met kunstmest
jaarlijks 45 ton/ha	4	jaarlijks 45 ton/ha compost, aangevuld met kunstmest

2. Groenbemesters (WUR - Wageningen)

Groenbemesters kunnen bijdragen aan het organische gehalte doordat het gewas na de teelt wordt ingewerkt. Groenbemesters kunnen mono of in mengsels worden geteeld. Het *Clever cover cropping* experiment op proefboerderij Nergena in Wageningen zijn verschillende behandelingen bemeten waarin de effecten van groenbemesters en groenbemestermengsels worden onderzocht. Het experiment is gestart in 2016 en ligt in een gangbare gewasrotatie met wintertarwe, maïs, aardappelen, zomergerst en erwten. In 2019 waren erwten het hoofdgewas. Op dit perceel worden 5 behandelingen als nateelt met elkaar vergeleken: zwarte braak, bladrammenas, Japanse haver, een mengsel van bladrammenas en Japanse haver en een mengsel van bladrammenas en Japanse haver en wikke. Het perceel wordt bemest met kunstmest (30 kg N/ha). Dit wordt jaarlijks toegepast.

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
Zwarte braak	5	geen nateelt
Bladrammenas	5	nateelt bovengrondse biomassa
Japanse haver	5	nateelt ondergrondse biomassa
Bladrammenas + Jap. haver	5	mengsel
Bladrammenas + Jap. Haver + wikke	5	mengsel met vlinderbloemige

3. Meerjarige akkerranden op klei (Hoeksche Waard) en zand (Groningen)

In theorie kunnen meerjarige akkerranden bijdragen aan het vastleggen van koolstof doordat de grassige en/of kruidenrijke vegetatie meerdere jaren de kans krijgt om te groeien zonder dat

de grond wordt bewerkt. Hierbij is dus het meerjarige aspect van de akkerrand van belang, evenals het aantal jaren waarin de rand ligt. Om de bijdrage van meerjarige akkerranden in kaart te brengen zijn metingen uitgevoerd op praktijkpercelen en de bijbehorende akkerrand van in de Hoeksche Waard (klei) en in Groningen (zand). De bedrijven zijn geselecteerd via de plaatselijke agrarische natuurverenigingen, respectievelijk Coöperatie Collectief Hoeksche Waard (CCHW) en de Agrarische Natuurvereniging Oost-Groningen (ANOG). Bedrijven met relatief lang liggende meerjarige akkerranden zijn geselecteerd. Per bedrijf is een selectie gemaakt van acht percelen en bijbehorende randen waarop is gemeten. Hierbij dient het perceel als referentie voor de bijbehorende rand. In de Hoeksche Waard is gemeten in randen die 2005 liggen. Deze randen worden niet bemest en maximaal tweemaal per jaar geklepeld. Maaisel wordt incidenteel afgevoerd (twee à driemaal in de 15 jaar). Jaarlijks wordt slootbagger opgebracht op de rand. De referentiepercelen aldaar hebben een vruchtwisseling met wintertarwe, aardappelen, peulvruchten, zomergerst, suikerbiet en uien en worden bemest met kunstmest en chompost. De randen in Groningen liggen op zijn minst sinds 2009, maar hier is in 2016 en 2017 aardappel verbouwt. De referentiepercelen hebben een vruchtwisseling met hennep, aardappelen, gerst en suikerbieten.

Hoeksche Waard:

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
Meerjarige akkerrand	8	Kruidenrijke grasrand onder agrarisch natuurbeheer, sinds 2005
Perceel	8	Akkerbouwperceel onder gangbaar beheer

Groningen:

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
Meerjarige akkerrand	8	Kruidenrijke grasrand onder agrarisch natuurbeheer, sinds 2009 m.u.v. 2016 en 2017
Perceel	7*	Akkerbouwperceel onder gangbaar beheer

* één perceel is niet bemonsterd wegens onduidelijkheid over de locatie

4. Verbeteren gewasrotaties op klei (Flevoland) en zand (Brabant)

Het verbeteren van gewasrotaties met het oog op het vastleggen van koolstof kan worden bereikt door het verhogen van het aandeel graan, of rustgewassen zoals bijvoorbeeld grasklaver, luzerne en graszaad in de gewasrotatie op te nemen. Voor nu wordt gefocust op het aandeel graan in de gewasrotatie. Daartoe zijn metingen uitgevoerd op praktijkpercelen van bedrijven met een voor de regio hoog en laag aandeel graan in de rotatie. De bedrijven zijn geselecteerd uit de praktijknetwerken van het aanpalende project Netwerk Akkerbouw. Bedrijven met een representatieve vruchtwisseling voor de regio zijn geselecteerd, per regio één bedrijf met relatief veel graan in de rotatie en één met weinig graan in vergelijking met de rest van de regio. Per bedrijf is een selectie gemaakt van vijf percelen waarop is gemeten. Door op deze manier twee bedrijven per regio met elkaar te vergelijken is er minder variatie in onder andere bodemtype binnen een behandeling, zoals het geval was in de opzet waarvoor is gekozen in 2019 toen op meerdere bedrijven is gemeten. Met die opzet was het echter mogelijk op alle percelen in hetzelfde gewas te meten en daarmee variatie door gewas uit te sluiten. Met de huidige opzet was dit echter niet mogelijk.

Flevoland:

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
Weinig graan	5	25% graan, vruchtwisseling met aardappelen, uien, wintertarwe en suikerbiet
Veel graan	5	50% graan, vruchtwisseling met aardappelen, uien, wintertarwe en suikerbiet

Brabant:

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
Weinig graan	5	ongeveer 10% graan, vruchtwisseling met aardappelen, uien, suikerbiet, sperziebonen, wintertarwe, cichorei, asperge, graszaadvermeerdering
Veel graan	5	50% graan, vruchtwisseling met aardappelen, uien, wintertarwe en suikerbiet

Veehouderij

1. Leeftijd grasland verhogen (niet-scheuren) op noordelijke klei (Friesland)

In aanvulling op de metingen in 2018 en 2019 zijn in 2020 metingen gedaan om de koolstofvastlegging bij het verhogen van de leeftijd van grasland op klei nog beter in beeld te krijgen. Uit voorgaande jaren is gebleken dat het verhogen van de leeftijd van grasland op klei significant kan bijdragen aan koolstofvastlegging, in ieder geval wanneer scheuren uitgesteld wordt tot >20 jaar. Echter valt te verwachten dat de koolstofvastlegging van een perceel oud grasland afvlakt na een bepaalde leeftijd, wanneer een stabiele status is bereikt. In 2020 zijn percelen in de leeftijdscategorie 5-20 jaar en veel oudere graslandpercelen (>100j) geselecteerd om dit mogelijke effect in kaart te brengen. Deze percelen zijn geselecteerd op drie praktijkbedrijven uit het aanpalende project Netwerk Veehouderij op de noordelijke klei.

Behandeling	Gemiddelde leeftijd (jaar)	Aantal percelen
Jong grasland	12 (range 5-20 jaar)	5
Oud grasland	+100	4

2. Leeftijd grasland en wisselteelt mais en gras op zand (Brabant)

Naast permanent grasland hebben veel melkveebedrijven tijdelijk grasland en maisteelt. Dit kan als een soort permanente teelten, of door in verschillende frequentie af te wisselen. In 2019 is op zand geen positief effect op koolstofvastlegging gevonden van het verhogen van de leeftijd van grasland op zand. Mogelijk lag de oorzaak hier bij een relatief hoog organisch stofgehalte in de jonge graslanden, veroorzaakt door een verleden met (lang)jarige perioden van grasland op dat perceel. In 2019 is ook een eerste verkennende meting gedaan naar de wisselteelt van mais en gras, maar hier konden door het klein aantal onderzochte percelen geen conclusies aan verbonden worden.

Om over zowel het verhogen van de leeftijd van het grasland als de wisselteelt van mais en gras op zand uitspraken te kunnen doen zijn in 2020 percelen geselecteerd uit het

veehouderijnetwerk Duinboeren. De percelen zijn geselecteerd in vier categorieën: mais na gras, permanent grasland, gras na mais en continue bouwland. Hierbij is erop gelet dat de percelen in de categorie gras na mais voor de inzaai van gras in ieder geval sinds 2009 bouwland waren.

Behandeling	Gemiddeld aantal jaar	Aantal percelen
Mais na gras	1 (range 1-4 jaar)	8
Permanent grasland	>10 jaar	4
Gras na mais	3 (range 1-6 jaar)	5
Continue bouwland	>10 jaar	6

3. Kruidenrijk grasland op klei (Dairy campus – Friesland) en zand (Kelpen Oler, Limburg)

Kruidenrijk grasland kan mogelijk bijdragen aan koolstofvastlegging door diepere beworteling van de diversiteit aan kruiden die het organische stofgehalte kan verhogen in diepere bodemlagen. In 2018 is een twee LTE's een verkennende meting uitgevoerd. Aangezien dat jaar de proeven net waren ingezaaid konden toen geen uitspraken worden gedaan over de effectiviteit van het verhogen van de diversiteit van grasland. In 2020 zijn beide herbemonsterd. In de proef op zand (Limburg) is in dezelfde behandelingen gemeten als in 2018; Biodivers primair weidevogelmengsel (BPW), Biodivers functioneel weidevogelmengsel (BFW) en grasland (controle), allen met drijfmestbemesting. In de proef op klei (Dairy Campus) zijn naast de in 2018 bemonsterde behandelingen BPW, BFW en controle met drijfmestbemesting ook deze behandelingen maar dan bemest met stalmest bemonsterd. Stal- of vaste mest wordt vaker toegepast op kruidenrijk grasland omdat het bijdraagt aan haar functie voor biodiversiteit. Vaste mest kan echter mogelijk ook bijdragen aan koolstofvastlegging door een hogere input van organische stof ten opzichte van drijfmest.

Limburg:

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
Biodivers primair weidevogelmengsel (B3)	4	Hoog percentage kruiden, hoge soortdiversiteit, drijfmest
Biodivers functioneel weidevogelmengsel (B3)	4	Hoog percentage kruiden, lagere soortdiversiteit, hoog percentage vlinderbloemigen, drijfmest
Gras (B3)	4	Controle, drijfmest

Friesland:

Behandeling	Herhalingen	Beschrijving
Biodivers primair weidevogelmengsel (B3)	4	Hoog percentage kruiden, hoge soortdiversiteit, drijfmest
Biodivers functioneel weidevogelmengsel (B3)	4	Hoog percentage kruiden, lagere soortdiversiteit, hoog percentage vlinderbloemigen, drijfmest
Gras (B3)	4	Controle, drijfmest
Biodivers primair weidevogelmengsel (B1)	4	Hoog percentage kruiden, hoge soortdiversiteit, stalmest
Biodivers functioneel weidevogelmengsel (B1)	4	Hoog percentage kruiden, lagere soortdiversiteit, hoog percentage vlinderbloemigen, stalmest
Gras (B1)	4	Controle, stalmest

Bijlage 2. - Bouwplannen per regio

	Centrale Zeeklei Flevoland		Centrale Zeeklei Noordoostpolder	
Jaar	Standaard	Extra graan	standaard	Extra graan
1	Consumptie-aardappel	Consumptie-aardappel	Suikerbiet	Suikerbiet
2	Suikerbiet	Suikerbiet	Zaai-ui	Zaai-ui
3	Zaai-ui	Wintertarwe	Pootaardappel	Pootaardappel
4	Wintertarwe + groenbemester	Zaai-ui	Wintertarwe + groenbemester	Wintertarwe + groenbemester
5		Wintertarwe + groenbemester	Tulp verhuur	Tulp verhuur
6			Pootaardappel	Wintertarwe
	Noordoostelijk zand en dal gebied		Zuid Oost Nederland	
Jaar	Standaard	Extra graan	standaard	Extra graan
1	Zetmeelaardappel	Zetmeelaardappel	Consumptie-aardappel	Consumptie-aardappel
2	Suikerbiet	Suikerbiet	Snijmais met vanggewas winterrogge	Zomergerst
3	Zetmeelaardappel	Zomergerst	Waspeen	Waspeen
4	Zomergerst + groenbemester	Zomergerst	Conserven-erwt met volgteelt stamslaboon	Zomergerst
5	Zetmeelaardappel		Consumptie-aardappel	Consumptie-aardappel
6	Zomergerst + groenbemester		Suikerbiet	Zomergerst
7			Snijmais met vanggewas winterrogge	Lelie verhuur
8			Lelie verhuur	Zomergerst

Bijlage 3. Bemestingsdetails zoals ingevoerd in NDICEA

Bij het vaststellen van de bemesting zijn een aantal aannames gedaan. Zo zijn we in beide regio's uitgegaan van een fosfaattoestand in de bodem met Pw-waardes tussen de 46 en 55, en dus een bemestingsruimte van 60 kg P. Voor de N-bemesting is de N-bemestingsruimte volledig ingevuld, en is niet gerekend met nalevering uit gewasresten of iets dergelijks.

Noordoostelijk zand en dal gebied – standaard bemesting		
	1^e gift	2^e gift
Zetmeelaardappel	184 kg N in 33 ton drijfmestmix (50:50) (100 kg P)	46 kg N kunstmest
Suikerbiet	112 kg N in 20 ton drijfmestmix (50:50) (61 kg P)	33 kg N kunstmest
Zetmeelaardappel	184 kg N in 33 ton drijfmestmix (50:50) (100 kg P)	46 kg N kunstmest
Zomergerst	80 kg N kunstmest	
Groenbemester	50 kg N kunstmest	
Zetmeelaardappel	184 kg N in 33 ton drijfmestmix (50:50) (100 kg P)	46 kg N kunstmest
Zomergerst	80 kg N kunstmest	
Groenbemester	50 kg N kunstmest	
Zetmeelaardappel	184 kg N in 33 ton drijfmestmix (50:50) (100 kg P)	46 kg N kunstmest
Noordoostelijk zand en dal gebied – realistisch scenario, compost na graan		
	1^e gift	2^e gift
Zetmeelaardappel	168 kg N in 30 ton drijfmestmix (50:50) (91 kg P)	62 kg N kunstmest
Suikerbiet	78 kg N in 14 ton drijfmestmix (50:50) (43 kg P)	67 kg N kunstmest
Zetmeelaardappel	168 kg N in 30 ton drijfmestmix (50:50) (91 kg P)	62 kg N kunstmest
Zomergerst	80 kg N kunstmest	
Groenbemester	40 kg N kunstmest + 20 ton groencompost (10 kg N, 22 kg P)	
Zetmeelaardappel	168 kg N in 30 ton drijfmestmix (50:50) (91 kg P)	62 kg N kunstmest
Zomergerst	80 kg N kunstmest	
Groenbemester	40 kg N kunstmest + 20 ton groencompost (10 kg N, 22 kg P)	
Zetmeelaardappel	168 kg N in 30 ton drijfmestmix (50:50) (91 kg P).	62 kg N kunstmest
Noordoostelijk zand en dal gebied – onrealistisch scenario, elk jaar compost		
In het onrealistische scenario is er elk jaar, bovenop de standaard bemesting (zie hierboven), 20 ton groencompost toegediend bij de eerste gift van het hoofdgewas (N.B. dus niet nogmaals bij de groenbemesters)		

Centrale Zeeklei Flevoland – standaard bemesting			
	1^e gift	2^e gift	3^e gift
Consumptie-aardappel	150 kg N in 27 ton drijfmestmix (50:50) (82 kg P)	100 kg N kunstmest	
Suikerbiet	150 kg N in 27 ton drijfmestmix (50:50) (82 kg P)		
Zaai-ui	35 kg N kunstmest, (15 kg P kunstmest)	70 kg N kunstmest	70 kg N kunstmest
Wintertarwe	112 kg N in 20 ton drijfmestmix (50:50) (61 kg P)	78 kg N kunstmest	40 kg N kunstmest
Groenbemester	60 kg N kunstmest		
Centrale Zeeklei Flevoland – realistisch scenario, compost na graan			
Consumptie-aardappel	150 kg N in 27 ton drijfmestmix (50:50) (82 kg P)	100 kg N kunstmest	
Suikerbiet	112 kg N in 20 ton drijfmestmix (50:50) (61 kg P)	38 kg kunstmest N	
Zaai-ui	35 kg N kunstmest, (15 kg P kunstmest)	70 kg N kunstmest	70 kg N kunstmest
Wintertarwe	112 kg N in 20 ton drijfmestmix (50:50) (61 kg P)	78 kg N kunstmest	40 kg N kunstmest
Groenbemester	50 kg N kunstmest + 20 ton groencompost (10 kg N, 22 kg P)		
Centrale Zeeklei Flevoland – onrealistisch scenario, elk jaar compost			
In het onrealistische scenario is er elk jaar, bovenop de standaard bemesting (zie hierboven), 20 ton groencompost toegediend bij de eerste gift van het hoofdgewas (N.B. dus niet nogmaals bij de groenbemesters)			