

Meerjarige evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden

Integrale analyse over de jaren 2018-2020

J.A.B. Schepens, B.G.H. Timmermans, L.M. Fuchs, R. Peters, J. Bloem
D.T. Heupink, J.P. Wagenaar, T. Slier en C.J. Koopmans

Colofon

Dit rapport is tot stand gekomen binnen het Project 'Evaluatie van de effectiviteit van koolstof vastleggende maatregelen', in het kader van het Beleidsondersteunend Programma Slim Landgebruik (BO-53-002).

Review: Janjo de Haan

Maart 2022

Contact: j.schepens@louisbolk.nl

J.A.B. Schepens¹, B.G.H. Timmermans¹, L. Fuchs², R. Peters², J. Bloem², D.T. Heupink¹, J.P. Wagenaar¹, T. Slier², en C.J. Koopmans¹ (2022). Meerjarige evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden.

¹ Louis Bolk Instituut ² Wageningen University & Research

© 2022 Louis Bolk Instituut

Publicatienummer: 2022-016 LbP

23 pagina's

Deze publicatie is beschikbaar via
www.louisbolk.nl/publicaties

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	3
Samenvatting	5
1 Inleiding en doelstelling	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doelstelling	7
1.3 Leeswijzer	7
2 Methode	8
2.1 Aanpak	8
2.2 Analyse van de LTE's	10
2.3 Samenvoegen van meerdere LTE's per maatregel	11
3 Resultaten	12
3.1 Verbeteren gewasrotatie (aandeel graan)	12
3.2 Dierlijke mest en compost toevoegen	12
3.3 NKG in de akkerbouw	12
3.4 Groenbemesters.....	13
3.5 Meerjarige akkerranden	13
3.6 Leeftijd grasland verhogen	13
3.7 Wisselteelt mais-grasklaver	13
3.8 Kruidenrijk grasland	14
3.9 NKG in de maisteelt.....	14
4 Discussie en Conclusie.....	18
4.1 Akkerbouw	18
4.2 Veehouderij.....	20
4.3 Conclusie	21
5 Literatuur.....	22

Samenvatting

Als uitvloeisel van het Klimaatakkoord uit 2019 heeft de landbouwsector 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. Bij een evenredige verdeling over alle minerale landbouwbodems (1.4 miljoen ha) komt dit neer op 0,4 ton CO₂/ha/jaar. In het onderzoeksprogramma Slim Landgebruik zijn sinds 2018 data verzameld over de potentiële koolstofvastlegging door landbouwkundige maatregelen aan de hand van metingen aan de bodemkoolstof in Lange Termijn Experimenten (LTE's). De resultaten per onderzochte maatregel zijn in de individuele jaren reeds gerapporteerd in Koopmans et al., (2019), Koopmans et al., (2020) en Koopmans et al., (2021). De voorliggende rapportage had als onderzoeksvraag welke van de tot nu toe onderzochte maatregelen voor akkerbouw en veehouderij bij kunnen dragen aan koolstofvastlegging en hoe veel, en wat de zekerheid hiervan tot nu toe is. De rapportage geeft een voorlopige tussenstand wat betreft effecten van maatregelen om CO₂ vast te leggen in ons land.

Hiertoe zijn de in drie jaar verzamelde gegevens gecombineerd tot één dataset met, in zoverre mogelijk, gehomogeniseerde specificering van de behandeling per maatregel, bodemtype, jaar en LTE. Per maatregel is de koolstofvastlegging bepaald. Voor de bandbreedte is het 95% betrouwbaarheidsinterval gebruikt. Deze bandbreedte geeft aan dat het voor 95% zeker is dat het gemiddelde effect van een maatregel binnen het gespecificeerde interval valt. Wanneer er meerdere LTE's beschikbaar waren per maatregel en grondsoort is er een gemiddelde vastlegging en een 95% betrouwbaarheidsinterval bepaald. De proeven met de maatregel dierlijke mest en compost toevoegen omvatten vaak meerdere behandelingen met verschillende hoeveelheden en typen toevoegingen van organische stof. Er is onderscheid gemaakt tussen i) compost ii) vaste mest en iii) drijfmest. De koolstofvastlegging is uitgedrukt per 3 ton (droge) organische stof per hectare. Voor de maatregel leeftijd grasland verhogen is eerst de koolstofvoorraad en de leeftijd van de graslanden per leeftijdscategorie gemiddeld. Vervolgens is er een lineair model gebruikt met de gemiddelde leeftijd van grasland per leeftijdscategorie als verklarende variabele voor de gemiddelde koolstofvoorraad per leeftijdscategorie.

In de akkerbouw zien we voor de maatregel compost toevoeg een positieve effect met de grootste zekerheid gevonden. De koolstofvastlegging per hectare per jaar varieerde van gemiddeld 1,4 ton CO₂ per 3 ton organische stof op klei tot gemiddeld 5,7 ton CO₂ per 3 ton organische stof op zand, met bij de laatste een grotere onzekerheid. Een forse opschaling van het gebruik van compost is echter lastig vanwege de beschikbaarheid van grondstoffen en niet altijd wenselijk door het meekoppelen van stikstof, kalium en fosfaat. Het verbeteren van gewasrotaties door een groter aandeel graan had op zowel zand als klei een positieve trend (niet significant) van 1,0 ton CO₂/ha/jaar op zand en 2,0 ton CO₂/ha/jaar op klei bij zo'n 25% meer graan in het bouwplan. Dit kan deels worden toegeschreven aan het aantal bemeten percelen dat beperkt is. In 2021 zijn daarom metingen op aanvullende percelen ingezet, waarvan de gegevens in de loop van 2022 beschikbaar zullen komen en pas in latere jaren gerapporteerd kunnen worden. De effecten van de maatregelen groenbemesters en meerjarige akkerranden zijn tot nu toe minder zeker wat betreft de koolstofvastlegging. NKG in de akkerbouw vertoonde geen netto (positief) effect op de koolstofvastlegging.

In de veehouderij zien we het grootste positieve effect voor de maatregel leeftijd van grasland verhogen. Ook de zekerheid van deze maatregel is groot met een significante koolstofvastlegging in de bouwvoor op kleigrond van 4,9 ton CO₂/ha/jaar en een duidelijke trend op zandgrond van dezelfde orde van grootte. Deze laatste was echter niet-significant en nog slechts van een beperkt aantal meetpunten. De maatregel wisselteelt mais-grasklaver, die alleen op zandgronden bemeten is, had ook een significante koolstofvastlegging waarvan de grootte nog onzeker is omdat het aantal percelen in de analyse beperkt was en de maatregel de gehele tussenruimte tussen mais en langjarig grasland beslaat. Ten slotte zien we een significant positief effect bij NKG in de maisteelt op kleigrond na meerjarig grasland. De LTE's voor kruidenrijk grasland hebben een erg korte looptijd waarbij (nog) geen effect kon worden aangetoond.

In algemene zin laat deze analyse zien dat er een groot effect van het bodemtype is op de zekerheid van de koolstofvastlegging bij de onderzochte maatregelen. Op kleigronden was deze zekerheid in het algemeen het grootst, op zandgronden was deze een stuk kleiner. Verder blijkt dat maatregelen die effectief zijn, allemaal meer dan 0,4 ton CO₂/ha/jaar vastleggen, ondanks onderlinge verschillen in effectiviteit. In het verlengde van deze gekwantificeerde koolstofvastlegging per maatregel is ook het aantal hectares waarop maatregelen kunnen worden geïmplementeerd en

de mate waarin de praktijk maatregelen daadwerkelijk toepast, bepalend voor het bereiken van de doelstelling van 0,5 Mton CO₂-equivalenten vastlegging in minerale landbouwbodems per 2030.

1 Inleiding en doelstelling

1.1 Achtergrond

Als uitvloeisel van het Klimaatakkoord uit 2019 heeft de landbouwsector 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 een 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.

In het programma Slim Landgebruik zijn sinds 2018 data verzameld over de potentiële koolstofvastlegging door landbouwkundige maatregelen aan de hand van metingen aan de bodemkoolstof in Lange Termijn Experimenten (LTE's). Er wordt steeds gemeten in behandelingen/objecten mét en zonder toepassing van de maatregel. De metingen beogen een praktische toetsing van de berekende potentiële koolstofvastlegging van de landbouwkundige maatregelen zoals beschreven in Lesschen et al. (2012) voor de Nederlandse condities. De resultaten per onderzochte maatregel zijn in de individuele jaren reeds gerapporteerd in Koopmans et al. (2019), Koopmans et al. (2020) en Koopmans et al. (2021). De meeste maatregelen zijn echter meerdere jaren doorgemeten. Combinatie van deze metingen in verschillende jaren kan de zekerheid van de uitkomsten vergroten en een beter overzicht over de meetresultaten bieden. Tabel 1 geeft een overzicht van de landbouwkundige maatregelen met hun specifieke invulling in de metingen tot nu toe, die onderzocht zijn in de LTE's.

Tabel 1. De maatregelen die onderzocht zijn met een korte specificatie over de invulling

Maatregelen	Specifieke invulling
Akkerbouw	
Verbeteren gewasrotatie	Aandeel graan verhogen
Dierlijke mest en compost toevoegen	Compost, vaste mest en drijfmest t.o.v. kunstmest
Groenbemesters	Verschillende soorten
Meerjarige akkerranden	Grasachtige akkerrand t.o.v. moederperceel
NKG in de akkerbouw	Akkerbouwrotatie met rooivruchten, NKG t.o.v. ploegen
Veehouderij	
Leeftijd grasland verhogen	Grasland een periode niet scheuren na mais (zand) of na scheuren (klei)
Wisselteelt mais-grasklaver (60-20-20)	Percelen met afwisselend mais en gras t.o.v. continu mais
Kruidenrijk grasland	Ingezaaide kruidenmengsels in productief grasland t.o.v. raaigras
NKG in de maisteelt	Continu maisteelt met NKG t.o.v. ploegen, beide na meerjarig grasland

1.2 Doelstelling

De voorliggende voortgangsrapportage heeft als doel de resultaten van 3 jaar metingen in LTE's mét en zonder de maatregelen te analyseren, samen te vatten en op basis daarvan een overzicht te creëren van de koolstofvastlegging voor de onderzochte maatregelen. Daarnaast is het doel om een bandbreedte aan te geven van de betrouwbaarheid van de koolstofvastlegging per maatregel. Met deze gegevens kan vanuit de uitgevoerde metingen een antwoord geformuleerd worden op de onderzoeksvraag, welke van de onderzochte maatregelen voor akkerbouw en veehouderij bij kunnen dragen aan koolstofvastlegging en hoe veel, en wat de zekerheid van deze vastlegging is?

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 (Methode) wordt het plant van aanpak beschreven om tot een goede dataset voor de meerjarige analyse te komen. Vervolgens worden de verschillende LTE's benoemd met ligging en looptijden en een verwijzing naar de oorspronkelijke rapportage waarin meer details over de LTE's zijn opgenomen. Ten slotte wordt de statistische analyse beschreven.

In hoofdstuk 3 (Resultaten) worden de resultaten besproken, en gepresenteerd in figuren en tabellen.

In hoofdstuk 4 (Discussie en conclusies) wordt met behulp van de resultaten inzicht gegeven in hoe effectief en hoe zeker de metingen aan de verschillende maatregelen tot nu toe zijn. Daar waar mogelijk worden de resultaten vergeleken met literatuur (andere en eerdere metingen) en worden belemmeringen besproken.

2 Methode

2.1 Aanpak

Gedurende de jaren 2018-2020 zijn er in diverse lopende lange termijn experimenten metingen verricht. Niet altijd waren er gecontroleerde lange termijn experimenten voorhanden. Wanneer deze niet voorhanden waren om een maatregel te evalueren, is er gekozen om praktijkpercelen met verschillend beheer over een langere periode binnen een regio en bodemtype met elkaar te vergelijken. Beide type analyses zijn in deze rapportage samengenomen met de term LTE's. Tabel 2 en Tabel 3 en Figuur 1 geven aan welke LTE's, zijn meegenomen in de huidige data-analyse over de meetjaren 2018-2020. In tabellen zijn ook de referenties opgenomen met de jaarrapportages en achtergrondinformatie over de proeven en geselecteerde behandelingen.

Om het bovenstaande doel (paragraaf 1.2) te bereiken zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Combineren van de in drie jaar verzamelde gegevens tot één dataset met daarin (in zoverre mogelijk) gehomogeniseerde specificering van de behandeling per maatregel, bodemtype, jaar en LTE.
2. Per maatregel en grondsoort zijn de maatregelen in LTE's geselecteerd voor deze meerjarige analyse. Daarbij was het doel een zo compleet mogelijk overzicht van de metingen per maatregel en grondsoort te verkrijgen. Niet alle data waren geschikt om in deze overall analyse mee te nemen:
 - a. Zo bleek het 'extensieve bouwplan' uit 2018 op zand achteraf nauwelijks onderscheidend van het intensieve bouwplan en metingen zijn om die reden buiten beschouwing gelaten.
 - b. Leeftijd grasland verhogen in 2018 en 2019: een paar van de graslandpercelen voor leeftijd grasland verhogen bleken een historie te hebben waardoor deze percelen minder geschikt waren voor deze analyse en zijn uit de dataset gehaald.
3. Per LTE is de koolstofvastlegging per maatregel bepaald, inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval van de vastlegging.
4. Wanneer er meerdere LTE's beschikbaar waren per maatregel en grondsoort is er een gemiddelde vastlegging en een 95% betrouwbaarheidsinterval bepaald.



Figuur 1. Kaart van alle LTE-locaties waar maatregelen zijn geëvalueerd.

Tabel 2. Overzicht van de verschillende LTE's in de akkerbouw die zijn geselecteerd voor de huidige analyse met uitleg over de vergelijking van de behandelingen.

Maatregel	Naam LTE	Afkorting	Jaar bemonsterd	Looptijd LTE (jaar)	Proefopzet verwijzing
Verbeteren gewasrotatie	Zuidelijk zand (bedrijven – Brabant)	GRA2	2019	~30	Koopmans et al., 2020
	Centrale klei (bedrijven – Flevoland) Zuidelijke klei (bedrijven – Zeeland)	GRA1	2019	~30	Koopmans et al., 2020
Dierlijke mest en compost toevoegen	Zuidelijk zand (Vredepeel – WUR) ²	VRE'18+ VRE'19	2018+ 2019	8 (compost) 13/14(mest)	Koopmans et al. 2019, 2020
	Noordelijk zand (Bodemkwaliteit Veenkoloniën – WUR)	BKV	2018	5	Koopmans et al., 2019
	Centrale klei (Lelystad – LBI)	MAK'19	2019 ³	20-21	Koopmans et al., 2020
	Centrale klei (Lelystad – WUR)	BAS'19	2019	9	Koopmans et al., 2020
	Vlaamse leem (Bierbeek – Belgische Bodemkundige Dienst)	BDB	2020	23	Koopmans et al., 2021
Groenbemesters	Centraal zand (Wageningen – WUR)	NER	2020	5	Koopmans et al., 2021
Meerjarige akkerranden	Zuidelijke klei (Bedrijven – Hoeksche Waard)	AKK1	2020	15	Koopmans et al., 2021
	Noordelijk zand (bedrijven – Groningen)	AKK2	2020	11	Koopmans et al., 2021
NKG in de akkerbouw	Centrale klei (Lelystad – WUR) ¹	BAS'18+ BAS'19	2018+ 2019	10-11	Koopmans et al. 2019, 2020
	Zuidelijk zand (Vredepeel – WUR) ²	VRE'18+ VRE'19	2018+ 2019	8-9	Koopmans et al. 2019, 2020
	Noordelijk zand (Valthermond – WUR)	BKV	2018	5	Koopmans et al. 2019;
	Vlaamse klei (Rumbeke-Beitem – België)	INA	2019	14	Koopmans et al., 2020

¹ in Koopmans et al. (2019) is de behandeling NKG-geoptimaliseerd vergeleken met ploegen. Recent bleek dat hier 8-jaarlijks ondiep wordt geploegd, vanaf 2017/2018. Voor de huidige analyse is zowel in 2018 als 2019 de NKG-tussenvorm vergeleken met ploegen.

² in 2018 en 2019 zijn verschillende objecten bemonsterd op Proefbedrijf Vredepeel. In 2019 zijn geen behandelingen bemonsterd met compost toevoegingen.

³ De meting in Mest als Kans in 2018 is niet meegenomen aangezien in 2019 een groter aantal objecten in dezelfde LTE zijn bemonsterd.

Tabel 3. Overzicht van de verschillende LTE's in de veehouderij die zijn geselecteerd voor de huidige analyse met uitleg over de analysemethode.

Maatregel	Naam LTE	Afkorting	jaar	looptijd	Grondsoort
Leeftijd grasland verhogen	Noordelijke klei (bedrijven - Friesland/Groningen)	GVO	2018 + 2019	-	Koopmans et al. 2019, 2020
	Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)	DUI	2018 +2019 +2020	-	Koopmans et al. 2019, 2020, 2021
Wisselteelt mais-grasklaver	Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)	MAIS	2020	12	Koopmans et al., 2021
Kruidenrijk grasland	Noordelijke klei (Dairy Campus - Friesland)	DC	2020	3	Koopmans et al., 2021 ^{1,2}
	Zuidelijk zand (Kelpen Oler - Limburg)	LIM	2020	3	Koopmans et al., 2021 ¹
NKG in de maisteelt	Zuidelijk zand (de Moer - Brabant)	MB	2018	7	Koopmans et al. 2019 ³
	Centrale klei (Lelystad - Flevoland)	DMF	2018	10	Koopmans et al. 2019 ³

¹ Voor deze analyse is gras vergeleken met de behandeling met het kruidenmengsel Biodivers Primair Weidevogels (BPW), aangezien BPW en gras de twee uiterste behandelingen zijn. In voorgaande rapportages werd dit de behandeling met >15 kruiden genoemd.

² Bij de kruidenproef op klei zijn alleen de behandelingen geselecteerd onder het beheer van drijfmest en geen uitgestelde maaidatum. Dit aangezien de kruidenrijk grasland vergelijking mét stalmest en uitgestelde maaidatum een gecombineerde maatregel vergelijkt. Effecten van alleen inzet van kruidenrijk grasland is daardoor moeilijk los te koppelen van de inzet van stalmest en verandering in management.

³ Bij deze proeven is gekozen om ploegen te vergelijken met woelen in stroken en niet met de strokenfrees aangezien dit de behandelingen die het meeste van elkaar verschillen zijn.

2.2 Analyse van de LTE's

Voor deze rapportage is per LTE één waarde voor koolstofvastlegging per maatregel bepaald met bijbehorende bandbreedte van betrouwbaarheid. Voor de bandbreedte is het 95% betrouwbaarheidsinterval gebruikt. Deze bandbreedte geeft aan dat het voor 95% zeker is dat het gemiddelde effect van een maatregel binnen het gespecificeerde interval valt.

Alle data-analyses zijn uitgevoerd met het programma R (R Development Core Team, 2013). De data-analyses zijn per LTE uitgevoerd op de metingen in de 0-30 cm en 30-60 cm bodemlaag. Bij systeemprouven is een lineair gemengd model gebruikt met behulp van de *lmer/lme4* packages in R (Bates et al., 2015; Kuznetsova et al., 2017) waarbij herhalingen als blok zijn meegenomen. Bij niet-geblokte LTE's is een reguliere ANOVA (lineair model) gebruikt. Bij de data-analyses is gecheckt op normaliteit en ongelijke variantie. Effecten waren significant bij een P-waarde <0,05. Van een trend wordt gesproken indien $p < 0,10$, of indien sprake is van resultaten die in dezelfde richting wijzen in meerdere LTE's. Voor de analyse van de maatregelen dierlijke mest en compost toevoegen (akkerbouw) en leeftijd grasland verhogen (veehouderij) zijn afwijkende analysemethoden gebruikt, gezien de aard van de gegevens. Deze worden in de twee paragrafen hieronder apart beschreven.

Analyse van de maatregel dierlijke mest en compost toevoegen (Akkerbouw)

De proeven met de maatregel *dierlijke mest en compost toevoegen* omvatten vaak meerdere behandelingen met verschillende hoeveelheden en typen toevoegingen van organische stof. Zo zijn er bij de proef op Centrale klei (BAS'19) proefbehandelingen met zowel 20 als 40 ton compost/ha (versgewicht), en heeft de proef op Centrale klei (MAK'19) verschillende soorten compost en mest. Om de resultaten van de verschillende LTE's van deze maatregel goed te kunnen vergelijken is de koolstofvastlegging bepaald aan de hand van de hoeveelheid toegevoegde (drooggewicht) organische stof van de behandelingen. Hiervoor is de hoeveelheid aangevoerde droge organische stof per behandeling opgezocht of nagevraagd. Er is onderscheid gemaakt tussen i) compost ii) vaste mest en iii) drijfmest, omdat deze een verschillende werking hebben. Voor de omrekening van verse compost en mest input (bijvoorbeeld 15 ton groencompost) naar droge organische stof (≈ 2.7 ton) zijn metingen gebruikt als deze beschikbaar waren. In andere gevallen is de omrekening gebaseerd op het Handboek Bodem en Bemesting (Tabel 8.1 uit *Handboek Bodem En Bemesting*). Om de koolstofvastlegging ten gevolge van organische stof-input goed te kunnen vergelijken met andere maatregelen is de

koolstofvastlegging uitgedrukt per 3 ton droge organische stof per hectare (wat ongeveer overeenkomt met zo'n 40 ton/ha drijfmest, 20 ton/ha vaste mest en 15 ton/ha compost per jaar).

Analyse van de maatregel leeftijd grasland verhogen (veehouderij)

In de afgelopen drie jaar (2018-2020) zijn elk jaar graslandpercelen bemonsterd om te onderzoeken of de maatregel leeftijd grasland verhogen leidt tot koolstofvastlegging. In voorliggende rapportage zijn de drie bemonsteringsjaren samengevoegd en integraal geanalyseerd. Hiervoor zijn de bemonsterde percelen in leeftijdscategorieën ingedeeld die bij de twee grondsoorten passen, grasland op klei wordt gemiddeld namelijk minder frequent vernieuwd dan op zand. Hierbij is rekening gehouden met een evenredige verdeling van percelen over deze leeftijdscategorieën, met elk minimaal vijf datapunten, zodat de gemiddelde koolstofgehalten per categorie representatief zijn. De categorieën waren 0, 1-5 en 8-12 jaar oud grasland op zandgrond en 0-5, 6-11, 15-20 en >20 jaar oud op kleigrond. Wanneer de kwaliteit of botanische samenstelling van een grasland achteruitgaat, wordt op klei meestal gekozen voor graslandvernieuwing. In tegenstelling daarmee wordt er in deze situatie op zand vaak gekozen voor het tijdelijk omzetten van het grasland in mais.

Op zandgrond is de onderzoeksvraag dus net anders dan op klei. Op zand is het uitgangspunt mais en is de vraag of en hoeveel koolstof vastgelegd wordt wanneer mais plaatsmaakt voor grasland en de leeftijd van dit grasland vervolgens verhoogd wordt. Vandaar dat voor deze analyse op zandgrond ook referentie maispercelen (leeftijd 0), die minstens 5 jaar in mais waren, zijn meegenomen. De graslandpercelen uit deze analyse hebben ook een verleden van minstens 5 jaar mais alvorens ze werden omgezet naar grasland. Voor een aantal graslandpercelen met een leeftijd van meer dan 10 jaar was het niet mogelijk om verder terug in het verleden van het perceel te kijken. De exacte leeftijd van deze percelen is dus niet bekend, maar duidelijk is dat ze ouder dan 10 jaar zijn. Daarom zijn deze percelen in de categorie >10 jaar ingedeeld. Er mag van worden uitgegaan dat ook deze percelen in het verleden maisteelt heeft plaatsgevonden, omdat dit de gangbare praktijk op zandgrond is.

Op klei is de uitgangssituatie gras dat recent is gescheurd en is de vraag hoe de koolstofvoorraad in de bodem weer opbouwt.

Om te bepalen wat de koolstofvastlegging per jaar leeftijdstoename van het grasland is, is eerst de koolstofvoorraad en de leeftijd van de graslanden per leeftijdscategorie gemiddeld. Vervolgens is er een lineair model gebruikt met de gemiddelde leeftijd van grasland per leeftijdscategorie als verklarende variabele voor de gemiddelde koolstofvoorraad per leeftijdscategorie.

2.3 Samenvoegen van meerdere LTE's per maatregel

In sommige gevallen zijn meerdere LTE's bemonsterd per maatregel en grondsoort. Dan gaat het om de maatregelen niet-kerende grondbewerking en dierlijke mest en compost toevoegen. Hiervoor zijn gemiddelde effecten voor meerdere LTE's en bemonsteringsjaren bepaald. Bij het samenvatten van de koolstofvastlegging (in CO₂ equivalenten) van meerdere LTE's of bemonsteringsjaren is gebruik gemaakt van de functie *metagen* in R uit het package *meta* (Schwarzer et al., 2015). Deze functie wordt gebruikt voor meta-analyses van meerdere studies, en berekend een gemiddeld effect en betrouwbaarheidsinterval over meerdere studies. De proef Bodemkwaliteit in de Veenkoloniën (BKV) op Noordelijk zand (Valthermond - WUR) is apart geanalyseerd, aangezien de grondslag van deze bodem verschilt van andere proeven op zand. De bodem in BKV wordt gekenmerkt door een zeer hoog percentages organische stof (~11%) en een zeer grote variatie tussen de herhalingen, onder andere door verschillen in de aan- en afwezigheid van veenlaagjes in de bodem van de objecten.

3 Resultaten

In Figuur 2 en Figuur 3 worden de resultaten van de meerjarige analyse gepresenteerd in ton CO₂/ha/jaar met een 95% betrouwbaarheidsinterval in de bouwvoor (0-30 cm) en de ondergrond (30-60 cm) voor respectievelijk zand- en kleibodems. Figuur 4 geeft de resultaten voor de Veenkoloniën weer. Hieronder worden de resultaten per maatregel besproken. In Tabel 4 en Tabel 5 worden de resultaten nogmaals numeriek weergegeven voor de bouwvoor (0-30 cm) van de zand- en kleigronden.

3.1 Verbeteren gewasrotatie (aandeel graan)

In de tot nu toe bemeten percelen zien we bij een hoger aandeel graan in het bouwplan op beide type bodems een positieve trend van koolstofvastlegging in de bouwvoor: 1,0 ton CO₂/ha/jaar voor zand en 2,0 ton CO₂/ha/jaar voor klei. Dit was echter niet significant voor beide grondsoorten. In de diepere bodemlaag (30-60 cm) zien we een positieve trend op kleigrond, die echter ook niet significant is, en geen verschil op zandgrond. In de rapportage van de metingen in 2019 (Koopmans et al., 2020) is de data van bouwvoor van de beide grondsoorten ook gecombineerd geanalyseerd. Dit leverde een significant verschil op. Opsplitsing per bodemtype verkleint het aantal percelen per bodemtype, waardoor we in deze analyse geen significantie zien maar trends.

3.2 Dierlijke mest en compost toevoegen

De effecten van organische stofinput op zandgronden en kleigronden zijn wisselend, maar meest positief wat betreft de koolstofvastlegging. De effecten van organische stofinput zijn uitgedrukt per 3 ton organische stof, wat overeenkomt met zo'n 40 ton/ha drijfmest en 15 ton/ha compost per jaar en worden hieronder in meer detail besproken.

Compost

Voor de bouwvoor (0-30 cm) zien we in de grafieken dat de effecten van compost positief zijn in de laag 0-30 cm voor kleigrond voor drie verschillende locaties, wat betekent dat een jaarlijkse compostgift van zo'n 15 ton/ha bijdraagt aan koolstofvastlegging. Op zandgrond is er een positieve maar niet-significante vastlegging te zien. Op de dalgronden in de Veenkoloniën is ook een positieve trend, maar met een breed betrouwbaarheidsinterval en geen significante vastlegging. Dit zal hoogstwaarschijnlijk te maken hebben met de grote variatie aan organische (kool)stof die in deze bodem van oudsher aanwezig is, zelfs op perceel niveau. Op de kleigronden zijn de betrouwbaarheidsintervallen klein en de effecten daarmee stabiel positief te noemen.

Kijkend naar de laag 30-60 cm zijn er geen significante effecten te zien van compost, zowel op klei als op zandgrond. In de Veenkoloniën is hier wederom een grote spreiding te zien en geen significant effect. Op kleigronden lijkt er geen duidelijke koolstofvastlegging plaats te vinden in de 30-60 cm laag. Op de kleigrond in Vlaanderen (BDB) is er echter wel een licht positief effect te zien, dat ook significant is. Dit toont wederom aan dat koolstofvastlegging zeer variabel is al naar gelang de samenstelling van de bodem, en mogelijk de bodembewerking en de keuze van gewassen in de rotatie.

Vaste mest en drijfmest

In de bouwvoor (0-30 cm) op zandgrond is er in 2018 geen significant effect gevonden van drijfmest op de koolstofvastlegging. In 2019 werd wel een effect gevonden. Het gemiddelde van deze twee jaren leverde geen significant effect op. Op kleigrond is er geen effect van drijfmest op koolstofvastlegging gemeten. Ook in de diepere bodemlaag (30-60 cm) lijken er geen duidelijke effecten van drijfmest op de koolstofvastlegging in zowel zand- als kleigrond. Vaste mest is alleen op Centrale klei getest (MAK'19). Hier is geen significant effect gevonden.

3.3 NKG in de akkerbouw

In de bovengrond (0-30 cm) had NKG in de LTE's geen significant positieve effecten op het gemeten koolstofgehalte en de daaruit berekende koolstofvoorraad en koolstofvastlegging (Figuren 2 t/m 4). Op kleigrond was er in 2018 in de bouwvoor (0-30 cm) een positief effect (+10%, BAS'18). In 2019 is in dezelfde proef een niet-significante positieve trend in de bouwvoor gemeten. In de Vlaamse leem (INA) zijn geen verschillen in koolstofvastlegging

gevonden voor de bovengrond. Op zandgrond is sprake van een niet-significante negatieve trend, in twee opvolgende jaren. In zand van de noordelijke Veenkoloniën werd een opvallend grote negatieve trend gevonden van NKG in vergelijking met spitten, die echter niet significant was. Worden de beide bemonsteringsjaren op zandgrond in één analyse meegenomen, dan is sprake van een significant negatief effect. Indien al deze trends worden samengenomen, zonder op de exacte significanties te letten, dan zijn deze in de bovengrond in 2 waarnemingen positief, 1 neutraal en in 3 waarnemingen negatief effect. De positieve trends vinden we op klei, en de negatieve op zand.

In de diepere bodemlaag (30-60 cm) werd in de Vlaamse leem in 2019 een lagere koolstofvoorraad (-35%) gevonden met niet-kerende grondbewerking in vergelijking met ploegen, een verschil van dusdanige grootte dat het de vraag is of dit helemaal door de behandelingen veroorzaakt wordt. Ook in de metingen op zandgrond wordt echter een lagere koolstofvoorraad gemeten bij niet-kerend grondbewerking. Op de centrale zeeklei en in de Veenkoloniën was er sprake van een negatieve trend die echter niet significant is. Indien deze trends voor de ondergrond worden samengevat, zonder op de exacte significantie te letten, is sprake van een negatieve trend in alle zes proeven op zand en leem.

3.4 Groenbemesters

Er is geen significante koolstofvastlegging waargenomen bij de behandelingen met groenbemesters ten opzichte van braak in de winter bij de proef op zandgrond (Figuur 2). Dit zien we zowel in de bouwvoor (0-30 cm) als in de ondergrond (30-60 cm). Mogelijk loopt de proef nog niet lang genoeg of is de aanvoer van organische stof uit groenbemesters niet afdoende voor een toename in bodemkoolstof. Wat opvalt is dat in deze LTE de variatie tussen de herhalingen behoorlijk groot is, en dat de proef nu vijf jaar loopt. Om een effect van de groenbemesters te zien tegen de achtergrond van de relatief grote variatie tussen de herhalingen is een langere looptijd nodig.

3.5 Meerjarige akkerranden

In de bouwvoor (0-30 cm) op zandgrond hebben meerjarige akkerranden niet geleid tot meer koolstof in de bodem (Figuur 2). In de bouwvoor (0-30 cm) op klei is er daarentegen wel een effect gevonden (Figuur 3). Daar hebben de akkerranden geleid tot een toename van 8,5 ton CO₂/ha/jaar.

In de diepere bodemlaag (30-60 cm) is geen effect gevonden op zandgronden en een zeer grote spreiding. Op kleigrond was sprake van een positieve trend (niet significant).

Het beeld van de akkerranden in beide regio's is dat van een grasachtige strook langs de percelen. Op kleigrond is hier bovendien slootbagger op gebracht bij het schonen van de sloot naast de percelen. Het graslandachtige karakter, en ook het aanbrengen van de slootbagger op de akkerranden op klei, zijn van belang voor de interpretatie van de effecten.

3.6 Leeftijd grasland verhogen

Een toenemende leeftijd van grasland heeft zowel op zand- als op kleigrond een vergelijkbaar positief effect op koolstof vastlegging. Op kleigrond wordt in grasland met lage herinzaaifrequentie een significante vastlegging van koolstof gevonden in de laag 0-30 cm die per hectare gelijk is aan 4,9 ton CO₂/jaar. Grofweg hetzelfde zien we terug op zandgrond. Hier meten we in de laag 0-30 cm een duidelijke trend van toename in koolstof in de bodem, die echter niet significant is. Mogelijk lag dit aan het beperkte aantal bemonsterde percelen met oud grasland. Deze gemiddelde jaarlijkse opslag van 6,4 ton CO₂/ha lijkt voorlopig van vergelijkbare orde van grote als de toename die op kleigrond bepaald werd.

In de laag 30-60 cm zien we op beide type bodems geen significant effect. Dit wijst erop dat graslanden op Nederlandse bodems gemiddeld geen koolstof vastleggen in de laag 30-60 cm.

3.7 Wisselteelt mais-grasklaver

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 uitwerken op de koolstofvastlegging. De metingen laten zien dat dit inderdaad zo is. Daarbij is de koolstofvastlegging in de bouwvoor (0-30 cm) in vergelijking met continue maisteelt behoorlijk (6,5 ton

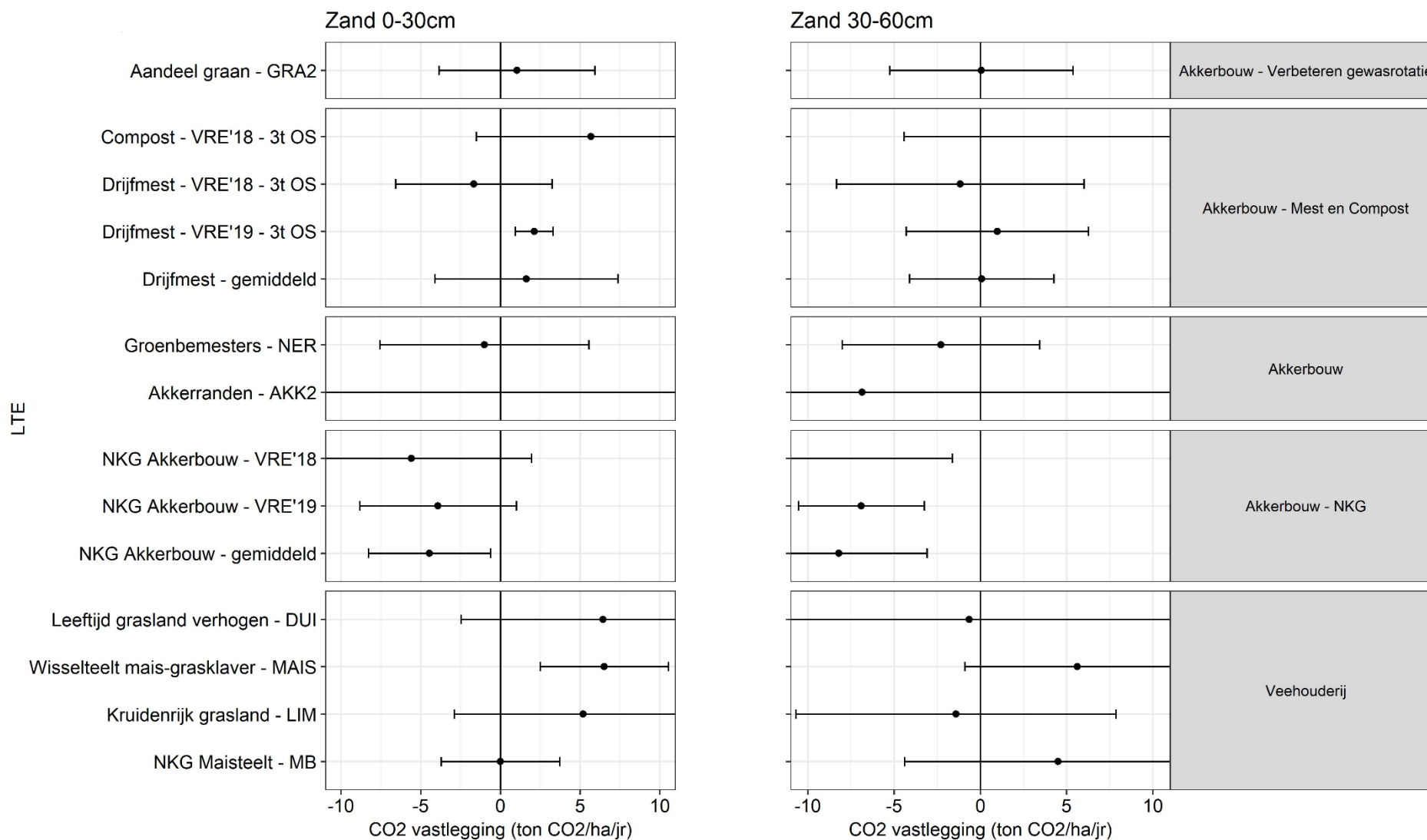
CO₂/ha/jaar, Figuur 2). In de ondergrond zien we geen significant verschil, maar een positieve trend. Binnen de data is er daarbij logischerwijs een trend dat naarmate er een groter aandeel van de tijd grasland in de wisselteelt zit, het koolstofgehalte en de koolstofvoorraad hoger waren.

3.8 Kruidenrijk grasland

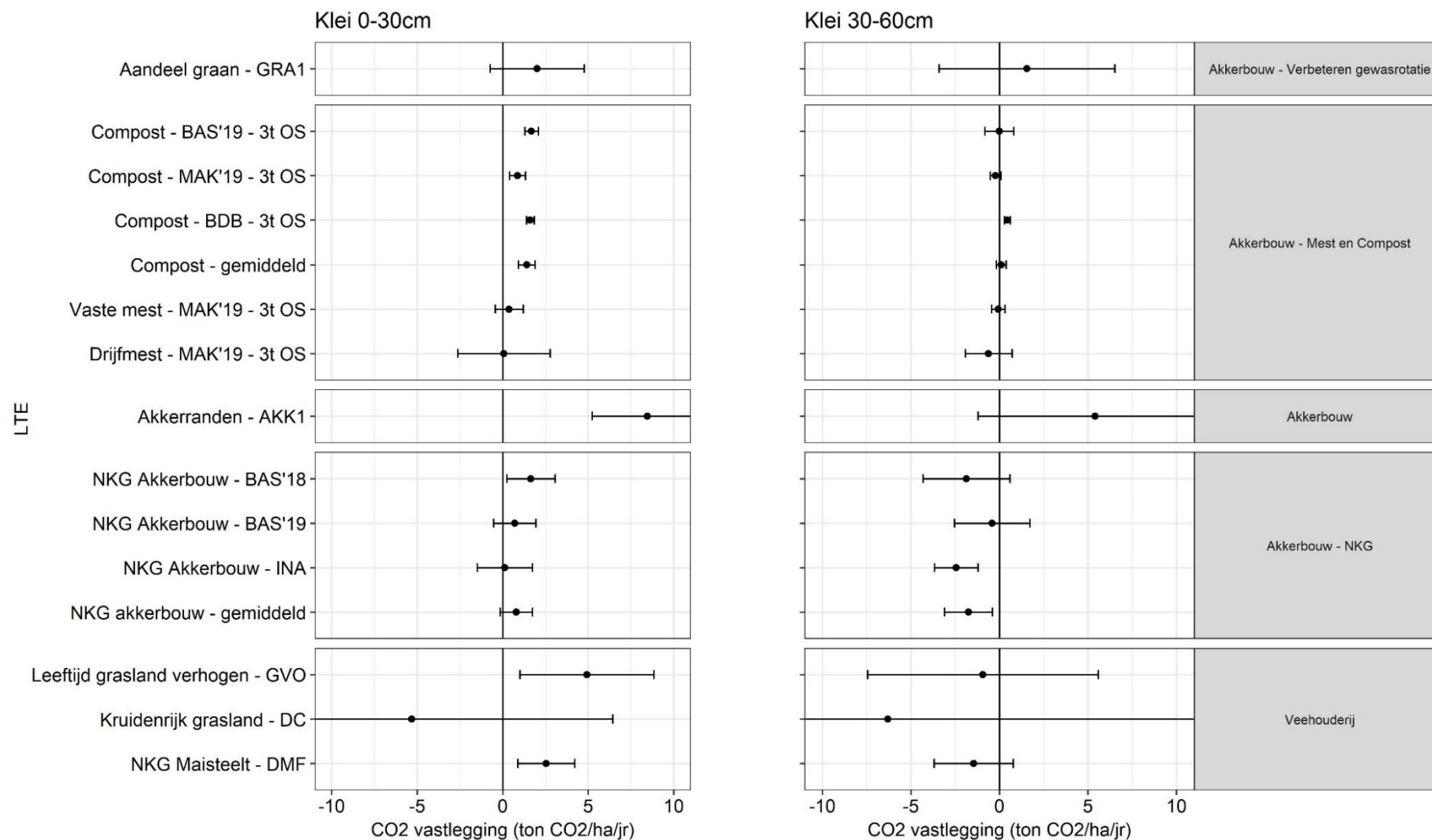
We zien geen significante toename in koolstofvastlegging in de bouwvoor (0-30 cm) en in de diepere bodemlaag (30-60 cm) door kruidenrijk grasland in vergelijking met grasland zonder kruiden op zandgrond en kleigrond. Wel zien we op zandgrond een lichte positieve trend van koolstofvastlegging onder kruidenrijk grasland in de bovengrond (Figuur 2). Dit was onder het beheer van drijfmest. De kruidenproeven zijn echter relatief recent aangelegd, in 2023 wordt nogmaals gemeten.

3.9 NKG in de maisteelt

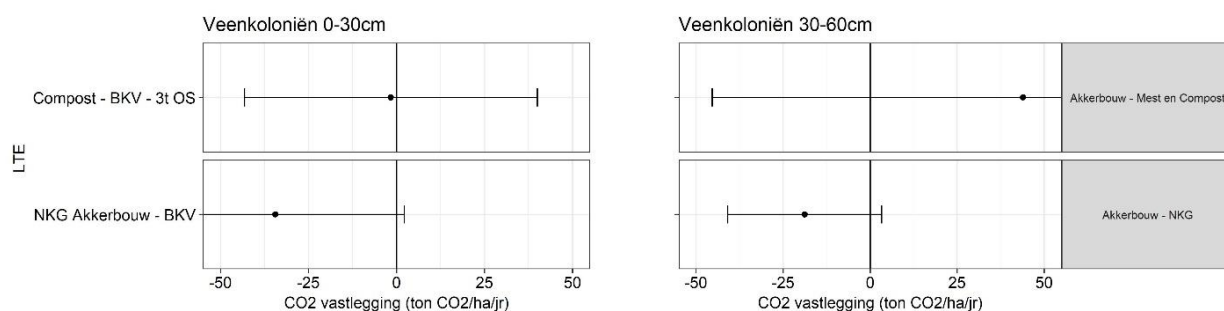
NKG in de maisteelt op percelen met een graslandgeschiedenis had een positief effect op de koolstofvastlegging in de bouwvoor (0-30 cm) op kleigrond. Op zandgrond is er meer variatie en geen significant verschil in de bouwvoor. In de diepere bodemlaag (30-60 cm) meten we geen significante effecten op beide bodemlagen. Door de aard van deze proeven gaat het hier met name om het behouden van organische stof die in de bodem is opgebouwd onder meerjarig grasland, tijdens de daaropvolgende maisteelten.



Figuur 2. Koolstofvastlegging (ton CO₂/ha/jaar) per LTE op zand voor de diepte 0-30 cm en 30-60 cm, voor de locaties GRA2 (Zuidelijk zand), VRE (Zuidelijk zand), NER (Centraal zand), AKK2 (Noordelijk zand), DUI (Zuidelijk zand), MAIS (Zuidelijk zand), LIM (Zuidelijk zand), MB (Zuidelijk zand).



Figuur 3. Koolstofvastlegging (ton CO₂/ha/jaar) per LTE op klei voor de diepte 0-30 cm en 30-60 cm, voor de locaties GRA1 (Centrale en Zuidelijke klei), BAS (Centrale klei), MAK (Centrale klei), BDB (Vlaamse leem), AKK1 (Zuidelijke klei), INA (Vlaamse klei), GVO (Noordelijke klei), DC (Centrale klei) en DMF (Centrale klei).



Figuur 4. Koolstofvastlegging (ton CO₂/ha/jaar) in de Veenkoloniën voor NKG en compost voor de diepte 0-30 cm en 30-60 cm, voor de locatie BKV (Noordelijk zand/Veenkoloniën).

Tabel 4. Overzicht van de koolstofvastlegging per maatregel en het 95% betrouwbaarheidsinterval in de bovenlaag (0-30 cm) op zand. Vetgedrukte gegevens waren significant ($p < 0,05$).

Maatregel	Aantal meetjaren/ LTE's	Koolstof- vastlegging (ton CO ₂ / ha/ jaar)	95% Betrouwbaar- heidsinterval	p-waarde
Verbeteren gewasrotatie (aandeel graan)	1	1,0	-3,9 ; 5,9	0,59
Compost toevoegen (per 3 ton OS)	1	5,7	-1,5 ; 12,8	0,18
Drijfmest toevoegen (per 3 ton OS)	2	1,6	-4,1 ; 7,4	0,58
Groenbemesters	1	-1,0	-7,6 ; 5,6	0,77
Meerjarige akkerranden	1	-16,4	-44,9 ; 12,1	0,23
NKG in de akkerbouw	2	-4,4	-8,3 ; -0,6	0,02
Leeftijd grasland verhogen	3	6,4	1,9 ; 10,3	0,089
Wisselteelt mais-grasklaver	1	6,5	2,5 ; 10,5	0,004
Kruidenrijk grasland	1	5,2	-2,9 ; 13,3	0,18
NKG in de maisteelt	1	0,0	-3,7 ; 3,7	1,0

Tabel 5. Overzicht van de koolstofvastlegging per maatregel en het 95% betrouwbaarheidsinterval in de bovenlaag (0-30 cm) op klei. Vetgedrukte gegevens waren significant ($p < 0,05$).

Hoofdmaatregel	Aantal meetjaren/ LTE's	Koolstof- vastlegging (ton CO ₂ / ha/ jaar)	95% Betrouwbaar- heidsinterval	p-waarde
Verbeteren gewasrotatie (aandeel graan)	1	2,0	-0,7 ; 4,8	0,12
Compost toevoegen (per 3 ton OS)	3	1,4	0,9 ; 1,9	< 0,0001
Vaste mest toevoegen (per 3 ton OS)	1	0,4	-0,5 ; 1,2	0,31
Drijfmest toevoegen (per 3 ton OS)	1	0,1	-2,6 ; 2,8	0,96
Meerjarige akkerranden	1	8,5	5,2 ; 11,7	< 0,0001
NKG in de akkerbouw	3	0,8	-0,2 ; 1,7	0,10
Leeftijd grasland verhogen	3	4,9	1,0 ; 8,8	0,03
Kruidenrijk grasland	1	-5,3	-17,1 ; 6,4	0,43
NKG in de maisteelt	1	2,5	0,9 ; 4,2	0,03

4 Discussie en Conclusie

De uit het Klimaatakkoord van 2019 voortgekomen klimaatdoelstelling is om 0,5 Mton CO₂-equivalenten per jaar op nationaal niveau vast te leggen in minerale landbouwbodems, met ingang van 2030. In Lesschen et al. (2012) worden een aantal maatregelen besproken die hier in potentie aan zouden kunnen bijdragen. Hierbij is gebruik gemaakt van internationale literatuur en modelberekeningen met het model Roth-C. De landbouwpraktijk, het klimaat en de bodems in Nederland verschillen echter sterk van andere landen. De metingen in de LTE's beogen een praktische toetsing van de berekende potentiële koolstofvastlegging van de landbouwkundige maatregelen voor de Nederlandse condities. In het project Slim Landgebruik zijn hiertoe sinds 2018 metingen verricht. In deze rapportage combineren we de gegevens van drie jaar meten (2018, 2019, 2020) tot een voorlopige tussenstand wat betreft effecten van maatregelen om CO₂ vast te leggen in ons land. We proberen daarmee de onderzoeksvraag te beantwoorden welke van de onderzochte maatregelen voor akkerbouw en veehouderij in Nederland bij kunnen dragen aan koolstofvastlegging en hoe veel, en wat de zekerheid hiervan tot nu toe is.

4.1 Akkerbouw

Voor de maatregelen in de akkerbouw zien we tot nu toe het positieve effect met de grootste zekerheid voor de maatregel compost toevoegen. De koolstofvastlegging per hectare per jaar varieerde van gemiddeld 1,4 ton CO₂ per 3 ton organische stof op klei tot gemiddeld 5,7 ton CO₂ per 3 ton organische stof op zand, met bij de laatste een grotere onzekerheid. Verbeteren gewasrotaties door een groter aandeel graan had op beide type gronden een positieve trend van soortgelijke orde van grootte (1,0 ton CO₂/ha/jaar op zand en 2,0 ton CO₂/ha/jaar op klei bij zo'n 25% meer graan in het bouwplan), die echter niet significant was. Dit kan deels worden toegeschreven aan het aantal bemeten percelen nog steeds beperkt is. In 2021 zijn daarom aanvullende percelen bemeten, waarvan gegevens in de loop van 2022 beschikbaar komen en pas in latere jaren gerapporteerd kunnen worden. De overige hier beschreven maatregelen voor de akkerbouw vertoonden geen positief effect op koolstofvastlegging (NKG in de akkerbouw) of zijn tot nu toe minder zeker wat betreft de koolstofvastlegging. Zo ontbreekt bij de groenbemesters een proef met een looptijd en opzet die echt geschikt is voor dit vergelijkende onderzoek.

Bij de meerjarige akkerranden werd een positief effect op kleigronden gevonden. Dit effect bedraagt 8,5 ton CO₂ per ha akkerrand. Vertaald naar een hectare akkerbouwgrond betekent dit, uitgaande van een vierkant perceel van 1 ha met aan 1 zijde een 3 m brede strook akkerrand, dat 0,25 ton CO₂ *per ha perceel* kan worden vastgelegd. Mogelijk is dit effect echter (deels) toe te schrijven aan het opbrengen van slootmaaisel bij (een deel van) de percelen. Op zand is er een niet significant negatief effect van meerjarige akkerranden gevonden.

Compost toevoegen

Extra compost toevoegen leidt tot koolstofvastlegging in bodems. Dit is in overeenstemming met eerder beschreven gegevens (Willekens et al., 2014). Het opschalen van deze maatregel is echter lastig (Viaene et al., 2016). In de eerste plaats speelt de beschikbaarheid van extra grondstoffen voor compost daarbij een rol. Er is veel vraag naar organische reststromen, en zeker daar waar het houtachtig materiaal betreft zijn er concurrerende markten. Viaene et al. (2016) noemen de inzet van kleinschalige reststromen, of reststromen die niet het gehele jaar door beschikbaar zijn, als een mogelijkheid om extra compost te produceren. Dit zou lokaal kunnen worden gestimuleerd. Dat is echter niet eenvoudig: er zou regulatie van het proces, een flexibeler regelgeving, en een financiële prikkel voor nodig zijn. Inzet van compost moet dan ook nog bezien worden als deel van de totale bemestingsstrategie. Metingen aan de brede aspecten van bodemkwaliteit (BLN-indicatoren) laten zien dat ook stikstof, kalium en fosfaat in positieve zin meekoppelen met de inzet van extra compost (Schepens et al., 2022). Bodems zijn al behoorlijk rijk aan bijvoorbeeld fosfaat. Dit maakt een grotere inzet van compost bij de huidige regelgeving zeker niet eenvoudig.

Dierlijke mest toevoegen

Dierlijke mest toevoegen (drijfmest en vaste stalmest), liet geen eenduidig positief effect op de koolstofvastlegging zien. Daarbij komt de vraag of extra inzet van dierlijke mest haalbaar is: enerzijds is de verwachting dat de beschikbaarheid van vaste mest zal afnemen, zeker indien wordt overgegaan tot een krimp van de veestapel. Bovendien wordt het grootste aandeel mest al ingezet. Ook is de beschikbaarheid van vaste mest zeer beperkt, doordat er weinig stallen zijn die vaste mest produceren. Bij zowel vaste mest als drijfmest is het, net als bij compost, wenselijk om deze te zien in de bredere context van bodemrijkdom in ons land en de gehele bemestingsstrategie.

Verbeteren gewasrotatie (aandeel graan)

In de metingen aan de maatregel verbeteren van gewasrotatie door meer graan in een bouwplan zien we een positieve trend van koolstofvastlegging, die sterker is voor klei dan voor zand. De verschillen waren echter niet significant. In de eerdere rapportage van de metingen in 2019 (Koopmans et al., 2020) is de data van de beide grondsoorten ook gecombineerd geanalyseerd. Hieruit bleek dat het verschil in C-elementair significant ($p < 0.05$) verschillend was tussen percelen met veel en weinig graan, en dat het verschil in koolstofvoorraad een duidelijke trend ($p = 0.053$) vertoonde. Dit duidt erop dat het aantal percelen per regio te gering was voor een significant effect. Hierbij speelt het praktische probleem dat het gaat om een vergelijking van praktijkpercelen bij gebrek aan geschikte LTE's. Slechts in Duitsland (nabij Berlijn) en in de Engeland bevinden zich LTE's met een lange looptijd. De omstandigheden aldaar (bodem, neerslag, etc.) zijn echter behoorlijk verschillend van de Nederlandse condities.

Kijkend naar historische vruchtwisselingsproeven die hebben gelopen tot begin jaren '90 vond Floot et al. (1992) op zavelgrond in Flevoland een toename van omgerekend 1,6 en 1,7 ton $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{jaar}$ voor een toename van graan van 0 naar 33% en 55% van het bouwplan, respectievelijk. Ter vergelijking: in onze meting ging het om een toename van 0 naar 25% graan op zandgrond en van ongeveer 20% naar 50% graan op kleigrond. De getallen in Floot et al. (1992) liggen behoorlijk dicht bij de trends die in deze studie zijn gevonden.

NKG in de akkerbouw

Voor de maatregel NKG (akkerbouw) op kleigrond werd geen effect op de koolstofvastlegging gemeten (een eventueel positief effect in de bouwvoor werd tenietgedaan door een negatief effect in de ondergrond). Op zandgrond werd ook geen positief effect gevonden. In andere studies is ook aan deze maatregel gemeten. In Centrale klei zijn in 2016 (Hoek et al., 2019) en 2017 (Krauss et al., 2022) significante positieve effecten op organische stof (+10%) en koolstof voorraad aangetoond in de bouwvoor. Wij hebben eenzelfde effect gemeten in 2018. Dat in deze analyse in 2019 in de bouwvoor van dezelfde proef geen significant effect gevonden is kan een gevolg zijn van andere bemonsterde behandelingen en dieptes en de teelt voorafgaand aan de bemonstering waardoor verschillen kleiner kunnen worden, zoals een jaar met gras-klover met weinig verstorend en meer wortelmassa. Rooigewassen, zoals aardappelen, met weinig wortels en veel bodemverstoring werken de andere kant op. Daarnaast kan het relatief kleine aantal monsters per LTE (4 niet kerend vergeleken met 4 ploegen) een rol spelen. In een uitgebreidere bemonstering met sub-herhalingen is het onderscheidend vermogen groter (Krauss et al., 2022). In elk geval is het van belang dat behandelingen over een langere periode worden bemonsterd en geanalyseerd (Koopmans et al., 2019).

Naast de Centrale klei werden door Krauss et al. (2022) nog 8 Europese LTEs met gereduceerde grondbewerking onderzocht op voornamelijk löss en klei bodems met biologische bedrijfssystemen. In de bovengrond (0-15 cm) nam de C voorraad toe terwijl deze in de onderliggende laag (20-50 cm) afnam. Afname in de ondergrond zien we ook in deze huidige studie (Figuur 3 en 4). Dit kan er mee te maken hebben dat er geen organisch materiaal meer naar beneden wordt geploegd bij gereduceerde grondbewerking.

In de Europese studie was de koolstofvastlegging gemiddeld 0,6 ton $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{jaar}$ gerekend over de laag 0-30 cm, en 0,33 ton $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{jaar}$ gerekend over de laag 0-50 cm. Bij veel hogere (negatieve) waarden in deze analyse voor zandgrond valt te betwijfelen of dit alleen toegeschreven kan worden aan de gereduceerde grondbewerking. In de ondergrond waar zelden of nooit is geploegd kan inherente heterogeniteit mogelijk een rol spelen bij moeilijk te verklaren verschillen. Verder ontbreekt nog een kwantificering van de feitelijke graad van bodemverstoring in de verschillende proeven waarin verschillende machines en strategieën worden gebruikt voor gereduceerde grondbewerking.

4.2 Veehouderij

Voor de maatregelen in de veehouderij zien we tot nu toe het positieve effect met de grootste zekerheid voor leeftijd grasland verhogen, met een significante koolstofvastlegging op kleigrond van 4,9 ton CO₂/ha/jaar in de bouwvoor en een duidelijke trend op zandgrond van dezelfde orde van grootte, die echter niet-significant is en van een zeer beperkt aantal meetpunten afhangt. De maatregel wisselteelt mais-grasklaver, die alleen op zandgronden bemeten is, had ook een significante koolstofvastlegging. De grootte hiervan is echter variabel omdat de maatregel de gehele tussenruimte tussen mais en langjarig grasland beslaat. Ten slotte zien we een significant positief effect bij NKG in de maisteelt op kleigrond, na meerjarig grasland. De LTE's voor kruidenrijk grasland hadden nog een erg korte looptijd en tonen nog geen duidelijke effecten.

Leeftijd grasland verhogen

Voor de maatregel leeftijd grasland verhogen vonden we een significante toename in bodemkoolstof op kleigrond van 4,9 ton CO₂/ha/jaar in de bouwvoor en voor zandgrond een trend van 6,4 ton CO₂/ha/jaar.

In een recente publicatie van Iepema et al. (2021) is in hetzelfde kleigebied in Friesland gekeken naar het effect van leeftijd grasland verhogen na graslandvernieuwing in de toplaag 0-10 cm. Hiervoor zijn jonge graslanden met oudere graslanden vergeleken en is de opbouw van bodemkoolstof gedurende 4 jaar gevolgd. Bij omrekening van hun resultaten naar CO₂ komen we op een vastlegging van 10,8 en 5,8 ton CO₂/ha/jaar in de toplaag 0-10 cm in respectievelijk jonge en oudere graslanden. Als we het verschil in de bodemkoolstofvoorraad tussen jonge en oude graslanden omrekenen naar koolstofvastlegging komen we op 2,5 ton CO₂/ha/jaar in de toplaag 0-10 cm. Deze waarde komt geëxtrapoleerd naar de 0-30 cm laag dicht in de buurt bij onze resultaten, en daarnaast sluit de vergelijking van verschillende graslandpercelen met verschillende leeftijden ook beter aan bij onze aanpak.

Hoewel klei beter in staat is om organische koolstof te binden en vast te houden, is het opvallend dat we een hogere vastlegging in zandgrond maten. Dit kan enerzijds veroorzaakt zijn door het beperkt aantal percelen, of anderzijds doordat de uitgangssituatie van deze percelen continue maisteelt was. Hierdoor begonnen deze percelen waarschijnlijk in een relatief uitgeputte staat, waardoor het koolstofgehalte na omzetting in grasland snel toe kon nemen. We hebben voor deze analyses lineaire modellen gebruikt, maar het zou kunnen dat de vastlegging van koolstof op zand, hoewel initieel hoger, sneller een plafond bereikt dan op klei.

De aanwezigheid van een significante toename in bodemkoolstof in de laag 0-30 cm en de afwezigheid daarvan in de laag 30-60 cm heeft te maken met dat de meeste biologische activiteit en daarmee de toevoer en stabilisatie van organische koolstof plaatsvindt in de toplaag van de bodem en deze processen snel afnemen met diepte. Op klei is de hoogte van het grondwater daarnaast een beperkende factor voor wortelgroei en microbiële activiteit en op zand kunnen deze processen in de diepere bodemlagen beperkt worden door de aanwezigheid van verdichte lagen of de overgang van humusrijk materiaal naar nutriënt-arm wit zand.

Wisselteelt mais-grasklaver

Voor de maatregel wisselteelt mais-gras zijn percelen met permanent bouwland vergeleken met percelen die ofwel omgezet zijn van grasland naar maisland of zijn omgezet van maisland naar grasland. Deze perceel vergelijking is alleen gedaan voor zandgronden aangezien het scheuren van grasland hier vaak gecombineerd wordt met maisteelt, terwijl op klei meestal opnieuw gras wordt ingezaaid. We vinden een significante vastlegging van 6,5 ton CO₂/ha/jaar in de laag 0-30 cm. Er is eerder onderzoek gedaan naar mais-grasklaver wisselteelt in een veldproef die reeds 36 jaar liep, waarbij gras en mais om de drie jaar werd omgewisseld (van Eekeren et al., 2008). Bij omrekening van hun resultaten leidt de wisselteelt tot een koolstofvastlegging van 0,9 ton CO₂/ha/jaar ten opzichte van permanent bouwland in de laag 0-10 cm. Deze vastlegging komt lager uit, ook wanneer deze vastlegging voor de hele 0-30 cm laag zou gelden. In de huidige analyse zijn meer percelen gebruikt met een graslandverleden die zijn omgezet naar bouwland dan andersom. Mogelijk zorgt dit voor een hogere inschatting van de vastlegging. Voor vervolgonderzoek zou het goed zijn om praktijkpercelen te selecteren die een verleden hebben met bij benadering de helft van de tijd gras en de helft van de tijd mais.

NKG in de maisteelt

NKG in de maisteelt in de veehouderij is anders dan in de akkerbouw. Enerzijds door de voorgeschiedenis, en anderzijds doordat er geen rooigewassen worden geteeld en de bodemverstoring minimaal is in deze proeven. Het ging bij deze LTE's om percelen met een graslandverleden en veel organische stof (het betrof een grasland van meer dan 5 jaar oud op beide type bodems, alvorens de periode met continu maisteelt met NKG startte). Dit betekent dat in deze proeven

onderzocht is in hoeverre de NKG de afbraak van bestaande bodem organische stof kan beperken. Deze maatregel kan daardoor relevant zijn daar waar percelen van langjarig grasland om de een of andere reden moeten worden omgezet naar mais (denk bijvoorbeeld in het kader van wisselteelten, die echter vooral op zand relevant zijn).

4.3 Conclusie

De onderzoeksvraag van deze analyse was: welke van de onderzochte maatregelen voor de akkerbouw en veehouderij in Nederland kunnen bijdragen aan koolstofvastlegging en hoe veel, en wat is de zekerheid hiervan tot nu toe? Deze analyse heeft tot het volgende antwoord geleid:

Akkerbouw

- De maatregel compost toevoegen had tot nu toe het positieve effect met de grootste zekerheid, met 1,4 (klei) tot 5,7 (zand) ton CO₂/ha/jaar koolstofvastlegging. Deze zekerheid was echter groter op klei dan op zand.
- Verbeteren gewasrotaties door een groter aandeel graan had op beide type bodems een positieve trend (1,0 tot 2,0 ton CO₂/ha/jaar op zand en klei, respectievelijk) die echter niet significant was, mogelijk door een beperkt aantal bemeten percelen.
- De maatregelen groenbemesters en meerjarige akkerranden zijn tot nu toe minder zeker wat betreft koolstofvastlegging.
- NKG in de akkerbouw had geen positief effect op de koolstofvastlegging.

Veehouderij

- Voor de maatregelen in de veehouderij zien we tot nu toe het positieve effect met de grootste zekerheid voor leeftijd grasland verhogen met een significante koolstofvastlegging op kleigrond van 4,9 ton CO₂/ha/jaar in de bouwvoor en een duidelijke trend op zandgrond van dezelfde orde van grootte, die echter niet-significant is en van een zeer beperkt aantal meetpunten afhangt.
- De maatregel wisselteelt mais-grasklaver, die alleen op zandgronden bemeten is, had ook een significante koolstofvastlegging (6,5 ton CO₂/ha/jaar). De grootte hiervan is echter nog onzeker, door een beperkt aantal meetpunten en omdat de maatregel de gehele tussenruimte tussen mais en langjarig grasland beslaat.
- Ten slotte zien we een significant positief effect bij NKG in de maisteelt op kleigrond, na meerjarig grasland (2,5 ton CO₂/ha/jaar).
- De LTE's voor kruidenrijk grasland hadden nog een erg korte looptijd en tonen nog geen duidelijke effecten.

Aanvullende conclusies

In deze analyse is er een groot effect van bodemtype op de zekerheid van de koolstofvastlegging van de onderzochte maatregelen: op kleigronden was deze over het algemeen het grootste, op zandgronden was deze een stuk kleiner (te zien aan de grotere betrouwbaarheidsintervallen) en op veenkoloniale gronden was deze het kleinst (te zien aan de grootste betrouwbaarheidsintervallen).

Voor de modellering van koolstofvastlegging en de validatie ervan, zijn bij voorkeur metingen over (veel) langere looptijden gewenst. De resultaten van deze analyse laten zien dat verschillen in koolstofvastlegging moeilijk zijn vast te stellen en pas na lange tijd zichtbaar worden.

De uit het klimaatakkoord van 2019 voortgekomen doelstelling is om 0,5 Mton CO₂-equivalenten per jaar vast te leggen op nationaal niveau in minerale landbouwbodems. Met ongeveer 1,4 miljoen hectare landbouwgrond in Nederland zou dit bij een evenredige verdeling 0,4 ton CO₂/ha/jaar zijn. Deze analyse laat zien dat maatregelen die effectief zijn, hier allemaal boven zitten wat betreft de vastlegging, hoewel ze onderling behoorlijk verschillen in hoeveelheid koolstofvastlegging. Daarmee is de oppervlakte waarop maatregelen kunnen worden geïmplementeerd en de mate waarin het in de praktijk tot daadwerkelijk implementatie komt, van doorslaggevend belang voor het al dan niet halen van de doelstelling.

5 Literatuur

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/JSS.V067.I01>
- Floot, H. W. G., Lamers, J. G., & van den Berg, W. (1992). De invloed van de intensiteit van het bouwplan op poot aardappelen, suikerbieten en wintertarwe (vruchtwisselingsproefveld FH 82) = The influence of the cropping frequency of seed potatoes, sugar beets and winter wheat on the soil fertility and crop product. PAGV.
- Handboek bodem en bemesting. (n.d.). www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting.htm
- Iepema, G., Hoekstra, N. J., de Goede, R., Bloem, J., Brussaard, L., & van Eekeren, N. (2022). Extending grassland age for climate change mitigation and adaptation on clay soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13134.
- Hoek, J., Balen, D. van, Haagsma, W., Berg, W. van den, Asperen, P. van, Sukkel, W., Haan, J. de, & Bloem, J. (2019). Bodemindicatoren in BASIS: Identificatie van de belangrijkste biologische en chemische bodemparameters ("bodemindicatoren") in het project BASIS over de periode 2009-2016. <https://doi.org/10.18174/511496>
- Koopmans, C. J., Timmermans, B. G. H., Wagenaar, J. P., Hull, J. van 't, Hanegraaf, M. C., & Haan, J. J. de. (2019). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof: Resultaten uit Lange Termijn Experimenten (LTE's). Louis Bolk Instituut, Driebergen. 54 p. <https://www.louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/evaluatie-van-maatregelen-voor-het-vastleggen-van-koolstof.pdf>
- Koopmans, C. J., Timmermans, B. G. H., de Haan, J. J., van Opheusden, M., Noren, I. S., Slier, T., & Wagenaar, J. P. (2020). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023: Voortgangsrapportage 2020. Louis Bolk Instituut, Driebergen. 35 p. https://www.louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/evaluatie-van-maatregelen-voor-het-vastleggen-van-koolstof-minerale-gronden-2019-2023_0.pdf
- Koopmans, C. J., Timmermans, B. G. H., de Haan, J. J., van Opheusden, M., Noren, I. S., Slier, T., & Wagenaar, J. P. (2021). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023: Voortgangsrapportage 2021. Louis Bolk Instituut, Driebergen, 48 p. <https://www.louisbolk.nl/publicaties>
- Körschens, M. (2006). The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research—a review. *Plant Soil Environ*, 52(Special Issue), 1–8.
- Krauss, M., Wiesmeier, M., Don, A., Cuperus, F., Gattinger, A., Gruber, S., Haagsma, W. K., Peigné, J., Palazzoli, M. C., Schulz, F., van der Heijden, M. G. A., Vincent-Caboud, L., Wittwer, R. A., Zikeli, S., & Steffens, M. (2022). Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. *Soil and Tillage Research*, 216, 105262. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105262>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13). <https://doi.org/10.18637/JSS.V082.I13>
- Lesschen, J. P., Heesmans, H. I. M., Mol-Dijkstra, J. P., van Doorn, A. M., Verkaik, E., van den Wyngaert, I. J. J., & Kuikman, P. J. (2012). Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur. Alterra.
- R Development Core Team. (2013). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Schwarzer, G., Carpenter, J. R., & Rücker, G. (2015). Meta-Analysis with R.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-21416-0>

Van Eekeren, N., Bommel , L., Bloem, J., Schouten, T., Rutgers, M., de Goede, R., Reheul, D., & Brussaard, L. (2008). Soil biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. *Applied Soil Ecology*, 40(3), 432–446. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.06.010>

Viaene, J., Van Lancker, J., Vandecasteele, B., Willekens, K., Bijttebier, J., Ruyschaert, G., De Neve, S., & Reubens, B. (2015). Opportunities and barriers to on-farm composting and compost application: A case study from northwestern Europe. *Waste Management*, 48, 181–192. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.09.021>

Willekens, K., Vandecasteele, B., Buchan, D., & De Neve, S. (2014). Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Applied Soil Ecology*, 82, 61–71. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2014.05.009>