

Koolstofvastlegging van maatregelpakketten toegepast in regio's

Modelstudie naar effecten van maatregelpakketten voor akkerbouw en
veehouderij en vernieuwde kengetallen voor groenbemesters en
gewasresten

B.G.H. Timmermans, G.J.H.M van der Burgt, J.J.P. Cruijssen, Chantal Hendriks, J. Wagenaar,
Isabella Selin Noren, M. Hoogmoed, C.J. Koopmans

Colofon

Dit onderzoek is uitgevoerd door LBI & WUR met subsidie van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend Programma Slim Landgebruik (BO-53-002) en beschrijft de resultaten van de projecten getiteld Impact van pakketten van maatregelen op lange termijn vastlegging (A4) en kengetallen en berekening effecten maatregelen gewasresten achterlaten en groenbemesters op koolstofvastlegging (A5 onderdeel C).

April 2022

Contact: Slimlandgebruik@wur.nl

B.G.H. Timmermans¹, G.J.H.M van der Burgt¹, J.J.P. Cruijsen², Chantal Hendriks², J. Wagenaar¹, Isabella Selin Noren², C.J. Koopmans¹ (2022). Koolstofvastlegging van maatregelpakketten toegepast in regio's. 24 pagina's

¹ *Louis Bolk Instituut* ² *Wageningen University & Research*

Dank aan Daan Verstand en William Bijker voor de goeie samenwerking op het gebied van het samenstellen van de pakketten van maatregelen, en de kosten en baten berekeningen van de pakketten, en aan Leen Janmaat met zijn brede praktijkkennis voor het meedenken over de invulling van de akkerbouwpakketten.

© 2022 Louis Bolk Instituut

Publicatienummer: 2022-022 LbP

23 pagina's

Deze publicatie is beschikbaar via

www.louisbolk.nl/publicaties

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1 Introductie	6
1.1 Doel	8
1.2 Leeswijzer	8
2 Aanpak	9
2.1 Criteria keuze pakketten van maatregelen	9
2.2 Bodemsoort (zand en klei) en regionale opdeling	9
2.3 Pakketten voor de akkerbouw	10
2.4 Berekeningen van effecten van compost	12
2.5 Pakketten voor de veehouderij	12
2.6 Berekeningen aan de pakketten	14
2.7 Groenbemesters en gewasresten achterlaten: losse effecten met nieuwe kengetallen	14
2.8 Aanpak berekeningen groenbemesters en gewasresten achterlaten	16
3 Resultaten	17
3.1 Koolstofvastlegging door pakketten voor de akkerbouw	17
3.2 Koolstofvastlegging door extra compost	18
3.3 Koolstofvastlegging door pakketten voor de veehouderij	19
3.4 Overzicht kosten en effecten van alle doorgerekende pakketten	20
3.5 Koolstofvastlegging door groenbemesters en gewasresten achterlaten, berekend met de nieuwe kengetallen	20
4 Algemene conclusies	22
Referenties	24

Samenvatting

In de afgelopen drie jaar is voor een aantal individuele maatregelen uit de oorspronkelijke tabel Lesschen (2012) onder Nederlandse condities gekwantificeerd, door metingen en berekeningen, hoeveel ton CO₂ per ha per jaar ze kunnen vastleggen en wat de kosten hiervan zouden zijn. Van twee van de losse maatregelen, namelijk het achterlaten van gewasresten en de inzet van groenbemesters, kwamen echter recent (2021 en voorjaar 2022) vernieuwde organische stof input cijfers beschikbaar (Selin Noren, 2021). Effecten van deze losse maatregelen met de nieuwe kengetallen zijn daarbij nog niet doorgerekend. De resultaten van de koolstofvastlegging van individuele maatregelen staan beschreven in de CO₂-bodem tabel (Slier et al., 2022). Bij implementatie in de praktijk zijn echter niet individuele maatregelen maar juist combinaties van maatregelen van belang.

Deze rapportage beschrijft de uitkomsten van een modelstudie met twee componenten. In de eerste plaats de effecten van regio specifieke pakketten van praktijkrelevante maatregelen voor akkerbouw en veehouderij (3.1 t/m 3.4). Aansluitend zijn berekeningen gemaakt aan de effecten van groenbemesters en gewasresten achterlaten met de herziene kengetallen, in praktijkrelevante inpassing in bouwplannen op zand en klei (3.5).

De pakketten van maatregelen zijn het resultaat van een voortraject met deskundigen en stakeholders. Daarbij zijn de meest perspectiefvolle maatregelen gekozen die bijdragen aan koolstofvastlegging volgens de CO₂-bodem tabel (Slier et al., 2021). De maatregelen voor de akkerbouw zijn daarbij op een voor de praktijk haalbare manier ingepast in regionale bouwplannen.

Voor de akkerbouw zijn een tweetal maatregelpakketten opgesteld:

- Pakket 1 met als doel maximalisatie van koolstofvastlegging binnen het huidige bouwplan, wat betekend groenbemester optimalisatie en maximaal gewasresten achterlaten en inwerken.
- Pakket 2 met als doel bouwplanverruiming in twee varianten, met extra graan en graszaad en daarbovenop nogmaals groenbemester optimalisatie en maximaal gewasresten achterlaten en inwerken.

Compost toevoegen is daarbij als losse maatregel doorgerekend. Hiertoe is gerekend met de totale hoeveelheid van 10 ton/ha/jaar groencompost gemiddeld over het bouwplan

Voor de veehouderij zijn er verschillende pakketten voor zand en op klei opgesteld. Dit waren combinaties van maatregelen leeftijd grasland verhogen en wisselteelt mais-gras. Inpassing van de maatregelen tot een praktijk relevant pakket is gedaan door uit te gaan van een referentie-zandbedrijf, en een referentie-kleibedrijf (deze worden uitgebreider omschreven in Verstand *et al.*, 2022). Voor het referentie-zandbedrijf met 20% maïs in het bouwplan is de volgende combinatie van maatregelen doorgerekend:

- Verhogen leeftijd grasland, van 1x per 8 jaar vernieuwen naar 1x per 16 jaar vernieuwen van het grasland.
- Een deel van het standaard grasland met Engels raaigras omzetten in productief kruidenrijk grasland

Voor het referentie-kleibedrijf met 15% maïs in het bouwplan is daarom de volgende combinatie van maatregelen doorgerekend:

- Helft van het areaal maïsland omzetten in productief kruidenrijk grasland
- De leeftijd van de rest van het grasland blijft gelijk
- In de 2 jaar dat maïs na maïs wordt geteeld, wordt in het najaar Italiaans raaigras als vanggewas ingezaaid.

Alle berekeningen zijn gemaakt met de modellen NDICEA en Roth-C, met uitzondering van de veehouderij pakketten, die alleen met NDICEA berekend zijn omdat dit voor Roth-C technisch (nog) niet mogelijk was.

Voor de herziene kengetallen van organische stof input is doorgerekend wat de effecten van de losse maatregelen groenbemesters achterlaten en gewasresten achterlaten zijn. De vernieuwde kengetallen van input van droge biomassa en droge organische stof zijn bepaald binnen het programma Slim Landgebruik gebruikt (Selin Noren *et al.*, 2021). Voor beide bodemtypen is daartoe één referentiebouwplan gebruikt met een standaard vruchtwisseling. Om een realistisch effect voor beide maatregelen voor het zand en klei bouwplan uit te rekenen, is de extra koolstofvastlegging berekend voor elke maatregel tot het moment waarop deze opnieuw in het betreffende bouwplan werd toegepast. Opnieuw is deze berekening uitgevoerd met zowel NDICEA als met Roth-C.

De koolstofvastlegging in de pakketten van maatregelen bedroeg voor de akkerbouw gemiddeld 0,66 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar voor Pakket 1 met inzet van groenbemesters en gewasresten achterlaten. De gemiddelde kosten

hiervan waren 218 euro/ha/jaar. Voor Pakket 2.1 en 2.2, die aanpassingen aan het bestaande bouwplan omvatten (in de meeste gevallen door extra graan) toonden de berekeningen hogere koolstofvastlegging van 1,05 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar en 1,28 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar respectievelijk. Deze Pakketten kosten echter meer het dubbele per hectare (615 en 899 euro/ha/jaar). Tussen de verschillende regio's laten de berekeningen behoorlijke verschillen zien in vastlegging en kosten. We zien een hyperbolisch verband, met maximaal zo'n 1,6 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar koolstofvastlegging door varianten van Pakket 2 met bouwplanverandering, maar met name in de regio's met hoge bouwplansaldi (Noordelijke Zeeklei, Centrale Zeeklei Noordoostpolder) leidt dit tot relatief hoge kosten. Ten slotte is de koolstofvastlegging voor 10 ton/ha/jaar groencompost uitgerekend. Deze is ook zo'n 1,6 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar, maar de kosten hiervan zijn relatief beperkt. Uiteraard kan bij deze maatregel de vraag gesteld worden of deze op grote schaal kan worden toegepast gezien de beschikbaarheid van compost en de plaatsingsruimte voor fosfaat.

Voor de veehouderijpakketten is voor zand een pakket doorgerekend met blijvend grasland dat minder vaak gescheurd wordt (1x per 16 jaar i.p.v. 1x per 8 jaar) wat gecompenseerd wordt door o.a. productief kruidenrijk grasland. Op klei is een pakket doorgerekend met het omzetten van continue maisteelt (redelijk beperkt areaal op klei) naar wisselteelten mais grasklaver, in combinatie met vanggewassen. De berekeningen laten zien dat per hectare waarop de pakketten werden toegepast de koolstofvastlegging op zand 0,71 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar bedraagt, en die op klei 1,43 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar. Echter verrekend naar bedrijfsniveau wordt dit voor zand 0,57 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar en voor klei slechts 0,11 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar. Dit komt omdat het grootste gedeelte van de oppervlakte van de referentiebedrijven uit grasland bestaat. De kosten van beide pakketten waren veel lager dan voor de akkerbouwpakketten, namelijk op zand 8 euro/ha/jaar en op klei 35 eur/ha/jaar (Verstand *et al.*, 2022).

Het overzicht van alle doorgerekende pakketten van maatregelen laat zien dat er goedkope pakketten zijn, die ook bijna niets vastleggen, en pakketten die behoorlijke vastleggingen vertonen (richting de 1,6 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar) maar die relatief heel erg duur zijn. Er zijn echter ook pakketten die behoorlijke koolstofvastlegging tonen, maar zonder extreme kosten. Dit waren:

- Gewasresten en groenbemesters inzetten in bijna alle regio's (uitzondering Zuid Oostelijke Zandgronden waar geen graan en allen vanggewassen met korte groeiduur in het bouwplan zitten)
- Veehouderij Pakket zand. Hier gaat het om het verlagen van de frequentie van scheuren van blijven grasland, in combinatie met maatregelen die dat praktisch haalbaar maken.
- Pakket 2.1 (extra graan), maar niet in de regio's met hoogste bouwplansaldi waar dit te duur is.
- Pakket 2.2 in Noord Oost Nederland (extra graan andere frequentie) en Zuid Westelijke Zeeklei (graszaad erbij)
- Compost toevoegen in de akkerbouw regio's

De berekeningen met de herziene kengetallen voor gewasresten en groenbemesters lieten zien dat na inpassingen in de bouwplannen het effect van gewasresten achterlaten per hectare zand-/kleigrond vergelijkbaar is met of zelfs iets hoger is dan de koolstofvastlegging zoals weergegeven in de huidige CO₂ bodem tabel.

Voor het effect van groenbemesters/vanggewassen is dit met de herziene kengetallen en de huidige bouwplannen op klei en zand juist andersom: hier zien we een wat lagere vastlegging, van 0,96 CO₂-eq/ha/jaar per hectare groenbemesters op klei tot 0,47 ton CO₂-eq/ha/jaar per hectare groenbemesters op zand.

1 Introductie

In de afgelopen drie jaar is voor een aantal individuele maatregelen uit de oorspronkelijke tabel Lesschen (2012) onder Nederlandse condities gekwantificeerd hoeveel ton CO₂ per ha per jaar ze kunnen vastleggen. Dit is onder andere gedaan door metingen in lange termijn experimenten en praktijkpercelen (Koopmans *et al.* 2019; Koopmans *et al.* 2020; Koopmans *et al.*, 2021). Naast metingen zijn er ook modelberekeningen uitgevoerd. De combinatie van metingen en berekeningen aan individuele maatregelen hebben geresulteerd in de CO₂-bodem tabel ([CO2Bodem Tussenresultaten Slim Landgebruik](#)). Deze berekeningen zijn gebaseerd op losse maatregelen en op bestaande kengetallen voor de hoeveelheid koolstof-input van de maatregelen. Naast de effectiviteit zijn ook kosten en baten van belang om een maatregel wel of niet te implementeren. Ook deze zijn voor individuele maatregelen uitgerekend en zijn onder andere in deze CO₂-bodem tabel te vinden.

Bij implementatie in de praktijk zijn echter niet individuele maatregelen maar juist combinaties van maatregelen van belang. Bijvoorbeeld bij een verandering in bouwplan door het inpassen van een extra graangewas is het logisch dat andere zaken mee veranderen, zoals stro dat wel of niet kan worden ingewerkt, de bemesting voor dit graangewas, een extra keer bewerken en een groenbemester inzaaien, enzovoorts. Op deze manier volgen er praktische combinaties van maatregelen, die we "pakketten" hebben genoemd. Omdat de verschillende regio's van ons land verschillen (onder andere in gewaskeuze), zijn dergelijke pakketten grondsoort- en regio specifiek.

Aan twee van de maatregelen, nl. het achterlaten van gewasresten en de inzet van groenbemesters, is binnen het programma Slim Landgebruik in de voorgaande jaren gemeten om de bestaande kengetallen van koolstof input door de maatregelen te herzien. De cijfers hiervan kwamen in het eerste kwartaal van 2022 beschikbaar. Deze nieuwe kengetallen zullen effecten hebben op de hoeveelheid koolstofvastlegging bij implementatie van deze maatregelen. Dergelijke berekeningen, voor praktijksituaties op zand en klei, zijn echter nog niet gemaakt.

Deze rapportage beschrijft de resultaten van een modelstudie met daarin de effecten van pakketten van praktijkrelevante maatregelen per regio (Programmaonderdeel A4) en de resultaten van een modelstudie naar de effecten van de twee losse maatregelen groenbemesters en gewasresten achterlaten met herziene kengetallen, in praktijkrelevante bouwplannen op zand en klei (Programmaonderdeel A5).

1.1 Doel

Het onderliggende project A4 had tot doel de regio specifieke mogelijkheden voor koolstofvastlegging door pakketten van maatregelen uit te rekenen. Hiertoe moesten eerst praktijkrelevante pakketten van maatregelen opgesteld worden. Daarbij is voor de akkerbouw gekeken naar 6 verschillende, regio specifieke bouwplannen zoals benoemd door van Dijk (2012). Voor de veehouderij is een pakket opgesteld per bodemsoort (zand en klei). Het opstellen van deze pakketten is in nauwe samenwerking gebeurt met project B4. Vervolgens is in het project (A4) de effectiviteit van koolstofvastlegging van de pakketten doorgerekend met een tweetal modellen (NDICEA en Roth-C) om een zo goed mogelijke kwantificatie hiervan te krijgen. In het aanpalende project B4 is van dezelfde pakketten de kosten-baten doorgerekend. Deze zijn in deze rapportage naast de koolstofvastlegging gezet.

Het onderliggende project A5 had als een van de doelstellingen met de nieuwe kengetallen van groenbemesters en gewasresten, die in het eerste kwartaal van 2022 beschikbaar kwamen, voor de losse maatregelen inzet van groenbemester en achterlaten van gewasrest een goede praktijkrelevante berekening van de koolstofvastlegging te maken. Dit is gedaan voor twee bouwplannen (zand en klei) en weer met de twee in ons land veel gebruikte modellen (NDICEA en Roth-C).

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft allereerst de aanpak van de modelberekeningen weer. Hierin is voor onderdeel A4 informatie te vinden over de selectieprocedure, de pakketten en berekeningen. Voor onderdeel A5 zijn hier de gebruikte gewasrotaties en de kengetallen te vinden. In hoofdstuk 3 volgen de resultaten, beginnend met de berekeningen aan de koolstofvastlegging van de akkerbouw en veehouderijpakketten, die gezamenlijk met de kosten van de pakketten zoals berekend in Verstand *et al.* (2022) worden gepresenteerd. Daarop volgen de berekeningen van de koolstofvastlegging van de losse maatregelen: het inwerken van gewasresten en de inzet van groenbemesters. Hoofdstuk 4 geeft vervolgens de algemene conclusies over deze modelstudie naar koolstofvastlegging door de pakketten van gestapelde maatregelen, en koolstofvastlegging door gewasresten en groenbemesters met nieuwe kengetallen en in representatieve bouwplannen.

2 Aanpak

2.1 Criteria keuze pakketten van maatregelen

De pakketten van maatregelen die het onderwerp vormen van deze studie zijn het resultaat van een voortraject met deskundigen en stakeholders. Daarbij zijn de meest perspectiefvolle maatregelen gekozen die bijdragen aan koolstofvastlegging volgens de CO₂-bodem tabel (Slieker *et al.*, 2021, [CO2Bodem Tussenresultaten Slim Landgebruik \(wur.nl\)](#)) en volgens de metingen aan lange termijn experimenten (Koopmans *et al.*, 2021). Deze maatregelen waren voor de akkerbouw verbeteren gewasrotatie (tot nu toe ingevuld door extra graan in het bouwplan), groenbemesters/vanggewassen, gewasresten achterlaten, en dierlijke mest en compost toevoegen (ingevuld als compost toevoegen waarvan het effect het meest zeker is). Voor veehouderij is gewerkt met de maatregelen leeftijd grasland verhogen en wisselteelt mais-gras (60-20-20).

Bij het samenstellen van de pakketten van maatregelen met diverse experts is gekeken naar mogelijkheden tot implementatie. Daartoe zijn de maatregelen op een voor de praktijk haalbare manier ingepast in regionale bouwplannen (zie paragraaf 2.2). Hierbij is gebruik gemaakt van regionale kennis opgedaan in het Netwerk Akkerbouw (Janmaat en Koopmans, 2020). Voor de keuze van de maatregelen die in de pakketten doorgerekend zijn is haalbaarheid van opschaling, maar ook aanwezigheid in het GLB van een maatregel een factor geweest. Twee belangrijke beslissingen zijn op grond hiervan gemaakt:

- Als eerste is voor toevoegen van compost besloten, in overleg met LNV, om deze los door te rekenen van de overige maatregelen. Dit omdat er beperkte beschikbaarheid is van extra materiaal voor compost, omdat de kaders van wetgeving de toepassing van grote hoeveelheden compost aan banden leggen, en omdat extra inzet van compost (en mest) niet voorkomt in lijst van GLB-maatregelen. Door deze maatregel los door te rekenen komt er een aanvullend inzicht in de mogelijke effecten op koolstofvastlegging van de maatregel, maar hangen de pakketten niet van deze inzet af en zijn onafhankelijk hiervan.
- Als tweede is voor de veehouderijmaatregel leeftijd grasland verhogen besloten dat deze om praktische (opbrengst technische) redenen niet zonder meer kan: bij deze maatregel is een aanvullende maatregel nodig om deze haalbaar te maken. Denk daarbij aan inzet van bemesting of aan kruidenrijk grasland om effecten van droogte op de zodekwaliteit en opbrengst te verkleinen.

2.2 Bodemsoort (zand en klei) en regionale opdeling

Voor zowel akkerbouw als veehouderij is voor de maatregelen een onderscheid gemaakt tussen zand en klei. Dit omdat beide bodemsoorten een wezenlijk verschil hebben wat betreft een aantal aspecten:

- Het grondgebruik van de landbouw verschilt voor deze twee bodemsoorten, door gewaskeuze en management van bodem en gewas
- Het gehalte aan organische stof is verschillend, zoals ook gemeten in de verschillende netwerken (Hoogmoed *et al.*, 2021; van Hal & Wagenaar, 2021)
- De effectiviteit van de verschillende maatregelen is verschillend, zoals te zien in de CO₂-bodem tabel (Slieker *et al.*, 2021, [CO2Bodem Tussenresultaten Slim Landgebruik \(wur.nl\)](#)).

Voor de veehouderij is dit als uitgangspunt genomen, en zijn er verschillende pakketten voor veehouderij op zand en op klei opgesteld. Voor het verduurzamen van grasland door het verhogen van de leeftijd (minder herinzaai) en toepassen van productief kruidenrijk grasland zijn in 2020 en 2021 modelberekeningen met het bedrijfsbegrotingsprogramma Dairy Wise (Van Alem & Van Scheppingen, 1993; Schils *et al.*, 2008) uitgevoerd. Dit is gebeurd voor typische zand- en kleibedrijven. Met deze aanpak is hier verder gegaan, namelijk door pakketten van maatregelen voor koolstofvastlegging toe te passen op een typisch zand en een typisch kleibedrijf.

Voor de akkerbouw zijn ook binnen een bodemsoort de regionale verschillen in bouwplan als dusdanig groot beoordeeld, dat hier voor een fijnmaziger verdeling is gekozen: namelijk de indeling naar 6 verschillende, regio specifieke bouwplannen zoals benoemd door van Dijk (2012). Enkele voorbeelden ter argumentatie: op zand zijn er regio's met veel zetmeelaardappels (Veenkoloniën), en gebieden waar dit niet zo is. Op klei zijn er gebieden met op kleigrond veel graszaad (bv. Zeeland), en gebieden met veel pootaardappelteelt (bv. Noordoostpolder). Om met dergelijke verschillen rekening te houden werden de onderstaande 6 regio's onderscheiden, waarvan van Dijk *et al.* (2012) een referentiebouwplan heeft opgesteld dat is overgenomen:

1. Noordelijk zeekleigebied (NZK)
2. Centrale zeekleigebied: Flevoland (CZKF)
3. Centrale zeekleigebied: Noordoostpolder (CZKN)
4. Noordoostelijk Nederland met zandgronden en dalgronden (NON)
5. Zuidoostelijk zandgebied (ZOZ)
6. Zuidwestelijk zeekleigebied (ZWZ)

2.3 Pakketten voor de akkerbouw

Voor de akkerbouw zijn een tweetal maatregelpakketten opgesteld. De argumentatie voor de opsplitsing is geweest dat de maatregel verbeteren gewasrotaties, die tot nu toe ingevuld is door extra graan in het bouwplan, een heel ingrijpende en dure maatregel is. Dit omdat hoog salderende gewassen, met name aardappel, vervangen worden door granen (Hoogmoed et al. 2021). Andere maatregelen, zoals achterlaten van gewasresten of inzet van groenbemesters, zijn minder duur maar mogelijk ook minder effectief. Daarom is er een eerste pakket van maatregelen opgesteld, met daarin alle maatregelen die redelijkerwijs binnen het huidige bouwplan mogelijk zijn, maar zonder dit te veranderen (Pakket 1). Binnen dit pakket is voor de zes bestudeerde akkerbouwgebieden de koolstofvastlegging via groenbemesters en gewasresten gemaximaliseerd.

In het tweede pakket zijn de regionale bouwplannen verruimd met meer graan, en vervolgens zijn daarin groenbemesters en gewasresten maximaal ingepast. De hypothese vooraf was dat Pakket 2 de hoogste koolstofvastleggingspotentie heeft omdat er met de bouwplanaanpassing veel organische stof in het systeem gebracht wordt. De verwachting is wel dat als het bouwplan ruimer wordt (meer graan), het bouwplansaldo aanzienlijk afneemt en de maatregel de boer dus veel kost.

Samenvattend zijn voor de akkerbouw de volgende twee pakketten uitgewerkt:

1. Groenbemester optimalisatie en maximaal gewasresten achterlaten en inwerken
2. Bouwplanverruiming, groenbemester optimalisatie en maximaal gewasresten achterlaten en inwerken.

De uitwerking van deze pakketten tot voor bodemtype en regio specifieke inpassingen is weergegeven in Tabel 2.1. Daarbij staat aan de linkerkant steeds het standaard bouwplan (referentie genoemd) afkomstig uit van Dijk (2012) voor de verschillende bodemsoorten, waarna de verschillende invullingen van pakket 1 en pakket 2 zijn weergegeven in de naastgelegen kolommen. Voor pakket 2 met daarin ook bouwplanverruiming zijn steeds twee varianten voor elke regio gemaakt.

*Tabel 2.1. Uitwerking van de maatregelpakketten en de referentie per regio. De bouwplannen tonen verticaal de gewassen per jaar. * betekent een groenbemester na de hoofdteelt. Tabel 2.2 geeft de betekenis van de afkortingen voor de gewassen weer.*

Bouwplannen en pakketten akkerbouw			
Standaard bouwplan (Referentie)	Pakket 1: Maximaliseren groenbemesters en gewasresten	Pakket 2.1: Variant bouwplan + maximaliseren groenbemester + gewasresten	Pakket 2.2 Variant bouwplan + maximaliseren groenbemester + gewasresten
Noordelijk zeekleigebied NZK			
Referentie	Pakket 1	Pakket 2.1	Pakket 2.2
PA	PA*	PA*	PA*
WT*	WT* - Stro	WT* - Stro	WT* - Stro
SB	SB	SB	SB
		WT* - Stro	Grasklaver
			Grasklaver
Centrale zeeklei Flevoland CZKF			
Referentie	Pakket 1	Pakket 2.1	Pakket 2.2
CA	CA*	CA*	UI
SB	SB	SB	WT* - Stro
UI	UI	WT* - Stro	CA
WT*	WT* - Stro	UI	WT* - Stro
		WT* - Stro	SB
			WT* - Stro

Centrale zeeklei Noordoostpolder CZKN			
Referentie	Pakket 1	Pakket 2.1	Pakket 2.2
PA	PA*	WT* - Stro	WT* - Stro
SB	SB	SB	SB
UI	UI*	UI*	WT* - Stro
PA	PA*	PA*	PA*
WT*	WT* - Stro	WT* - Stro	WT* - Stro
Tulp v	Tulp v*	Tulp v*	UI
Noord oostelijk Nederland met zandgronden en dalgronden NON			
Referentie	Pakket 1	Pakket 2.1	Pakket 2.2
ZA	ZA*	ZA*	ZA*
SB	SB	ZG*-Stro	SB
ZA	ZA*	SB	ZG*-Stro
ZG*	ZG*-Stro	ZG*-Stro	ZA*
ZA	ZA*		ZG*-Stro
ZG*	ZG*-Stro		ZG*-Stro
Zuidoostelijk zandgebied ZOZ			
Referentie	Pakket 1	Pakket 2.1	Pakket 2.2
CA	CA*	CA*	CA*
SN+VG	SN+VG	SN+VG	ZG*-Stro
WASP	WASP*	WASP*	WASP*
CE+SSB	CE+SSB	CE+SSB	ZG*-Stro
CA	CA*	CA*	CA*
SB	SB	SB	ZG*-Stro
SN+VG	SN+VG	GR	LE*
LE	LE*	GR	ZG*-Stro
Zuidwestelijk zeekleigebied ZWZ			
Referentie	Pakket 1	Pakket 2.1	Pakket 2.2
CA	CA	CA	CA
WT*	WT* - Stro	WT* - Stro	WT* - Stro
SB	SB	SB	SB
UI	UI	WT* - Stro	WT* - Stro
WT*	WT* - Stro	UI	UI
		WT* - Stro	Graszaad - Stro
			Graszaad -Stro

In de pakketten voor de regio's NZK en CZKN is gekozen om na de pootaardappel (PA) een groenbemester op te nemen, zelfs als de vervolg teelt wintertarwe is. Dat is krap en kan lastig zijn in de praktijk, maar als de pootaardappel begin augustus geoogst wordt en de wintertarwe eind oktober gezaaid, blijven er rond de 8 weken over voor de groenbemester. Dat is voldoende geacht. In het algemeen is het zo dat de opbrengsten van de groenbemesters omlaag gecorrigeerd zijn bij kortere groeiduurtijd en latere zaai. Dit is gedaan na overleg met I. Selin Noren, betrokken bij de metingen aan kengetallen (Selin Noren *et al.*, 2021).

Tabel 2.2. Overzicht afkortingen van gewassen

Afkorting	Gewas
CA	Consumptieaardappel
CE+SBB	Conservenerwt met volgteelt stamslaboon
GR	Grasland verhuur
LE-V	Lelie verhuur
PA	Pootaardappel
SB	Suikerbiet
SN+VG	Snijbiet+Vanggewas
TU-V	Tulp verhuur
Wasp	Waspeen
WT	Wintertarwe
ZA	Zetmeelaardappel

ZG	Zomergerst
----	------------

2.4 Berekeningen van effecten van compost

Zoals hierboven vermeld is inzet van extra compost een van de maatregelen waarvan met behoorlijke zekerheid effecten verwacht kunnen worden op perceelsniveau. Opschaling van deze maatregel naar grootschalige, extra toepassing kent echter problemen (zie paragraaf 2.1) en om die reden is besloten deze maatregel los door te rekenen van de overige maatregelen in de pakketten. Hiertoe is gerekend met de totale hoeveelheid van 10 ton/ha/jaar groencompost gemiddeld over het bouwplan (een behoorlijke hoeveelheid, die echter in een aantal proeven waarin de maatregel werd toegepast toch wel werd overschreden). Deze hoeveelheid compost is voor alle akkerbouwbouwplannen additioneel toegepast bovenop pakket 1. Het effect van de compost ten opzichte van hetzelfde bouwplan zonder compost werd vervolgens uitgerekend. Bij de modelberekeningen ging het om onderstaande hoeveelheid (Tabel 2.3), steeds toegediend na de hoofdteelt en voor een eventueel daaropvolgende groenbemester.

Tabel 2.3. Compost scenario's die zijn doorgerekend.

Bouwplan	Duur bouwplan (jaar)	Toediening groencompost
Noordelijk zeekleigebied NZK	3	30 ton/ha na poot aardappel
Centrale zeeklei Flevoland CZKF	4	25 ton/ha na zaaiui, 15 ton/ha na wintertarwe
Centrale zeeklei Noordoostpolder CZKN	6	25 ton/ha na zaaiui, 15 ton/ha na poot aardappel en 20 ton/ha na tulp.
Noord oostelijk Nederland met zandgronden en dalgronden NON	6	20 ton/ha na elk van de drie zetmeelaardappel teelten
Zuidoostelijk zandgebied ZOZ	8	20 ton/ha na consumptie aardappel, 20 ton/ha na waspeen, 20 ton/ha na conservenerwt met volgteelt stamslaboon, 20 ton/ha na lelie.
Zuidwestelijk zeekleigebied ZWZ	5	20 ton/ha na wintertarwe, 30 ton/ha na zaaiui.

2.5 Pakketten voor de veehouderij

Voor de veehouderij zijn combinaties van maatregelen leeftijd grasland verhogen en wisselteelt mais-gras (60-20-20) doorgerekend. Inpassing van de maatregelen tot een praktisch relevant pakket is gedaan door uit te gaan van een typisch zandbedrijf, en een typisch kleibedrijf. Deze zijn als referentie gedefinieerd in overleg tussen LBI en WUR en volgen in de onderstaande paragraaf. Bij het vaststellen van de combinatie van maatregelen is rekening gehouden met de relevantie en toepasbaarheid van de maatregelen op de grondsoorten in de specifieke regio's. LBI maakt hierbij gebruik van de kennis opgedaan in de regionale netwerken van het project "Netwerken in de Veehouderij" (o.a. van Hal en Wagenaar, 2021).

Dit betekent dat de effecten van de pakketten in de veehouderij dus niet alleen gezien dienen te worden per oppervlakte-eenheid van de percelen waarop het desbetreffende pakket werd toegepast, maar ook op bedrijfsniveau. De pakketten worden namelijk wel niet toegepast op de overige hectares van het bedrijf, maar deze hangen hier wel mee samen, zeker in economische zin (Verstand *et al.*, 2022).

2.5.1 Kenmerken zandbedrijf – referentie

Het referentie zandbedrijf is afgeleid van het gemiddelde zandbedrijf uit tabel 4 van Timmerman *et al.*, 2019. Op basis van expertkennis is een Noord-Brabants melkveebedrijf vastgesteld als referentie. Dit bedrijf heeft een bovengemiddeld aantal koeien (100 stuks) die gemiddeld 8500 kg melk per jaar produceren. De jongveebezetting is 6 stuks jongvee per 10 melkkoeien. Er wordt jaarlijks 850.000 kg melk op dit bedrijf geproduceerd. Hiervoor bewerkt het bedrijf 47,2 ha grond zodat de intensiteit uitkomt op 18.000 kg melk per ha. Het bouwplan bestaat uit 37,8 ha gras en 9,4 ha maïs in continueelt (20% maïs als maximum binnen derogatie). Het herinzaaipercentage van het grasland is 12,5% (eens in de 8 jaar vernieuwen) zodat de gemiddelde levensduur van de grasmat uitkomt op 4 jaar. De koeien weiden in de zomer alleen overdag en krijgen tijdens de weideperiode 8 kg ds uit ruwvoer (graskuil en maïskuil) bijgevoerd. Vanwege de intensieve bedrijfsvoering kan niet al het ruwvoer zelf worden geteeld, daarom koopt het bedrijf naast krachtvoer ook snijmaïs aan. De zelfvoorzieningsgraad van ruwvoer ligt op dit bedrijf onder de 85%.

Voor de koolstofvastlegging:

- 37.8 ha grasland en 9.4 ha maïs continueelt
- Het grasland wordt 1x per 8 jaar vernieuwd
- De opbrengst van het grasland in de berekeningen was: 12.8 ton DS/ha per jaar

2.5.2 Kenmerken kleibedrijf – referentie

Het referentie kleibedrijf waarvoor we de combinatie van maatregelen doorrekenen is op basis van expertkennis afgeleid van een gemiddeld kleibedrijf uit tabel 4 van Timmerman et al., 2019. Binnen de groep kleibedrijven verschilt het aandeel maïs sterk, gemiddeld is het 8%. Hoewel op de noordelijke klei (Friesland) nauwelijks maïs wordt geteeld door melkveehouders, is dat in andere klei regio's (Flevoland, Noord-Holland) anders. Daar hebben veel bedrijven een hoger dan gemiddeld aandeel maïs in het bouwplan. Omdat we in deze studie willen kijken welke combinatie van maatregelen bedrijven die maïs telen kunnen nemen is uitgegaan van een typisch melkveebedrijf in Flevoland/Noord-Holland. Omdat in deze kleiregio meer maïs wordt geteeld dan het gemiddelde, rekenen we de combinatie van maatregelen door voor een kleibedrijf met 15% maïs in het bouwplan. Het kleibedrijf in deze studie heeft een bovengemiddeld aantal koeien (115 stuks) die gemiddeld 8500 kg melk per jaar produceren. De jongveebezetting is 6 stuks jongvee per 10 melkkoeien. Er wordt jaarlijks 977.500 kg melk op dit bedrijf geproduceerd. Hiervoor bewerkt het bedrijf 62,7 ha grond zodat de intensiteit uitkomt op 15.600 kg melk per ha. Het bouwplan bestaat uit 53,3 ha gras en 9,4 ha maïs in continueelt. Het herinzaaipercentage van het grasland is 10% dus eens in de 10 jaar wordt het vernieuwd. De koeien weiden in de zomer alleen overdag en krijgen tijdens de weideperiode 6 kg ds uit ruwvoer (graskuil en maïskuil) bijgevoerd. Dit bedrijf is net niet zelfvoorzienend voor ruwvoer en voert daarom naast krachtvoer ook snijmaïs aan. De zelfvoorzieningsgraad voor ruwvoer ligt op dit bedrijf boven de 90%.

Voor de koolstofvastlegging:

- 53,3 ha gras en 9,4 ha maïs in continueelt
- Het grasland wordt 1x per 10 jaar vernieuwd

2.5.3 Pakket zand

De melkveehouderij op zandgrond ondervindt over het algemeen veel beperkingen door zowel het nutriënt- als vocht leverend vermogen van de bodem. Het moeder materiaal van de bodem (zand) kan zelf weinig vocht en nutriënten binden, waardoor het gewas grotendeels afhankelijk is van binding aan opgeslagen organische stof of bemesting en neerslag c.q. beregning. Aanhoudende droogte de afgelopen jaren heeft veel schade berokkend aan grasland en veehouders er toe gedwongen meer grasland te vernieuwen dan gewenst. Om op zandgronden de leeftijd van grasland te verhogen moet daarom eerst de weerbaarheid tegen droogte verbeterd worden. Het verhogen van de diversiteit van grasland met gebruik van dieper wortelende vegetatie kan de droogte gevoeligheid doen afnemen (om dat vocht uit diepere lagen kan worden gehaald). Wanneer dit diverse grasland zorgt voor productiebehoud of zelfs (relatieve) productieverhoging heeft dit een positief effect op koolstof vastlegging in de bodem. Het organisch materiaal waarin deze koolstof is opgeslagen kan wel vocht binden, waardoor de droogteresistentie verbetert.

Voor het referentie-zandbedrijf met 20% maïs in het bouwplan is daarom de volgende combinatie van maatregelen doorgerekend:

- Verhogen leeftijd grasland, 1x per 16 jaar vernieuwen.
- Een deel van het normale grasland omzetten in productief kruidenrijk grasland (15% bestaand grasland wordt productief kruidenrijk grasland (5,67 ha). Conform onderzoeksresultaten van het LBI (Jansen et al., 2020) wordt voor productief kruidenrijk grasland met een opbrengst van 10,7 ton ds per ha gerekend. In de berekeningen levert dit geen extra koolstof op (dit moet nl. nog getoetst worden in de praktijk) maar deze aanvullende maatregel is nodig om de leeftijd van het grasland te kunnen verhogen.

2.5.4 Pakket klei

Omdat onder grasland meer koolstof wordt vastgelegd dan op bouwland, kan het kleibedrijf meer koolstof opslaan door het aandeel maisland te verkleinen. Het bouwland kan worden omgezet in normaal grasland, maar omzetten naar

kruidenrijk grasland zal de vastlegging van koolstof verder vergroten. Naast minder maïs telen kan de koolstofvastlegging in de maïssteelt zelf ook verbeterd worden door een vanggewas te telen. Wettelijk gezien is toepassen van een vanggewas na maïs op klei bedrijven niet verplicht, maar kan dit toch helpen om meer koolstof vast te leggen.

Voor het referentie-kleibedrijf met 15% maïs in het bouwplan is daarom de volgende combinatie van maatregelen doorgerekend:

- Helpt van het areaal gebruikt voor maïs omzetten in productief kruidenrijk grasland (dus van 15% maïs in continueelt naar 7,5% maïs en 7,5% productief kruidenrijk grasland in vruchtwisseling waarbij 3 jaar maïs na 3 jaar productief-kruidenrijk grasland wordt geteeld). Conform onderzoeksresultaten van het LBI (Jansen et al., 2020) wordt voor productief kruidenrijk grasland met een opbrengst van 10,7 ton ds per ha gerekend.
- De leeftijd van de rest van het grasland blijft gelijk
- In de 2 jaar dat maïs na maïs wordt geteeld, wordt in het najaar Italiaans raaigras als vanggewas ingezaaid, dit in tegenstelling tot de referentie, waar geen vanggewas op maisland wordt ingezaaid (is op klei wettelijk niet verplicht).

2.6 Berekeningen aan de pakketten

Bij het berekenen van de effecten van koolstofvastlegging in de pakketten is vervolgens een richttermijn van 15 jaar aangehouden. Opbrengsten en van de gewassen en financiële kosten zijn, met uitzondering van in het bovenstaande expliciet genoemde, afkomstig uit de KWIN-AGV en KWIN-veehouderij. Dit betekende een looptijd van vruchtwisseling van 15 tot 16 jaar voor de akkerbouw bouwplannen, met uitzondering van de bouwplannen van 6 jaar. Deze zijn doorgerekend voor een looptijd van 12 en van 18 jaar, en de effecten zijn vervolgens gemiddeld (dit zou moeten overeenkomen met 15 jaar). Voor Roth-C is er steeds het veelvoud van cycli genomen dat het dichtst bij 15 lag. Dit betekent lengtes van 14, 15, 16 en 18. Hiervan is steeds de gemiddelde balans over de jaren genomen. Koolstofbalansen van de pakketten zijn vervolgens steeds vergeleken met die van de referentiebouwplannen in elke regio. De berekeningen zijn gemaakt met de modellen NDICEA en Roth-C, met uitzondering van de veehouderij pakketten, die alleen met NDICEA berekend zijn omdat dit voor Roth-C (nog) niet mogelijk was (grasland dat een hogere leeftijd bereikt doordat het minder vaak gescheurd wordt zit tot nog toe niet in dit model).

Initialisatie is van belang voor het berekenen van een goede koolstofbalans (maar niet speciaal voor vergelijking van maatregelenpakketten). Dit betekent dat de beginkwaliteit van de bodemorganische stof moet worden ingesteld. Immers, een bodem met veel jong snel afbreekbaar materiaal in de organische stof zal een grotere afbraak hiervan laten zien dan een bodem die veel oud en minder snel afbreekbaar organisch materiaal heeft. In NDICEA is dit gedaan door de beginkwaliteit van de organische stof in te stellen zoals die na drie maal roteren van het referentiebouwplan zou zijn. Dit betekent initialisatie over een periode van 9 tot 24 jaar afhankelijk van de lengte van elk bouwplan. Over het algemeen is een dergelijke periode lang genoeg om tot stabiliteit in het actieve gedeelte van de reeds aanwezige bodemorganische stof te leiden. Voor Roth-C is er een poolverdeling gebaseerd op de input van het eerste jaar en een temperatuur-, vocht- en, bodembedekkingsfactor. In essentie zou de initialisatie echter niet heel veel effecten mogen hebben op de vergelijking van de pakketten met maatregelen. Immers, een verkeerde initialisatie zou voor zowel referentie als maatregelenpakket tot ongeveer dezelfde fout in de balans moeten leiden.

2.7 Groenbemesters en gewasresten achterlaten: losse effecten met nieuwe kengetallen

Voor het projectonderdeel A5 is doorgerekend wat de effecten van de losse maatregelen groenbemesters en achterlaten gewasresten is, met de vernieuwde kengetallen van input van droge biomassa en droge organische stof die bepaald zijn binnen het programma Slim Landgebruik (Selin Noren et al., 2021). Met name voor gewasresten kwamen de laatste data pas in de loop van het voorjaar van 2022 beschikbaar. Deze doorrekening is gemaakt voor klei en zand. Voor beide bodemtypen is daartoe één referentiebouwplan gebruikt met een standaard vruchtwisseling (Tabel 2.4). Dit bouwplan is opnieuw gekwantificeerd volgens de voorlopige vernieuwde kengetallen (in een later stadium worden deze nogmaals aangepast door de commissie bemesting alvorens ze helemaal definitief worden). De gebruikte kengetallen in de berekeningen zijn weergegeven in Tabellen 2.5 en 2.6. Hier is expliciet aangegeven wat in de berekeningen genomen is als maatregel: namelijk de bovengrondse en ondergrondse biomassa van de groenbemesters, en die gewasresten waarvoor inwerken daadwerkelijk een keuze is die gemaakt moet worden, omdat ze ook kunnen worden afgevoerd.

Tabel 2.4. Bouwplannen waarmee is gerekend op klei en op zand, om de effecten van de losse maatregelen groenbemesters in het bouwplan en gewasresten achterlaten te kwantificeren. Afkortingen uit Tabel 2.2.

Klei	Zand
Centrale zeeklei Flevoland CZKF	Zuidoostelijk zandgebied ZOZ
CA	CA
SB	SN+VG
UI	WASP
WT*	CE+SSB
	CA
	SB
	SN+VG
	LE

Tabel 2.5 Het bouwplan op kleigrond, waaraan de effecten van de losse maatregelen gewasrest achterlaten en inzet van groenbemester zijn berekend. De maatregelen zijn in vet aangegeven. Een input werd daarbij alleen als mogelijke maatregel beschouwd als er praktisch gezien de mogelijkheid bestond deze ook af te voeren uit het systeem, dus daar waar de keuze is de maatregel al dan niet toe te passen.

Mogelijke maatregel	Gewas	Component	DS (kg/ha)	OS (kg/ha)
	Aardappel	bovengrond	1630	1467
	Aardappel	wortels	710	639
Gewasrest	Suikerbiet	bovengrond	3220	2898
	Suikerbiet	wortels	370	333
	Zaaiui	bovengrond	930	837
	Zaaiui	wortels	1610	1449
Gewasrest (stro)	Wintertarwe	bovengrond	2960	2664
	Wintertarwe	wortels	6030	5427
Groenbemester	Gele mosterd	bovengrond	2680	2412
Groenbemester	Gele mosterd	wortels	670	603

Tabel 2.6 Het bouwplan op zandgrond, waaraan de effecten van de losse maatregelen gewasrest achterlaten en groenbemester zijn berekend. De maatregelen zijn in vet aangegeven. Een input werd daarbij alleen als mogelijke maatregel beschouwd als er praktisch gezien de mogelijkheid bestond deze ook af te voeren uit het systeem, dus daar waar de keuze is de maatregel al dan niet toe te passen.

Mogelijke maatregel	Gewas	Component	DS (kg/ha)	OS (kg/ha)
	Aardappel	bovengronds	1630	1467
	Aardappel	wortels	710	639
	Snijmais	bovengronds	1425	1283
Gewasrest extra bij oogst mais als CCM	CCM	bovengronds	2746	2471
	Snijmais	wortels	891	802
Groenbemester	Rogge GB	bovengronds	1800	1620
Groenbemester	Rogge GB	wortels	538	484
	Bospeen	bovengronds	3453	3108
	Bospeen	wortels	1328	1195
	Doperwt	bovengronds	5096	4586
	Doperwt	wortels	728	655
	Stamslaboon	bovengronds	1912	1721
	Stamslaboon	wortels	341	307
	Aardappel	bovengronds	1630	1467
	Aardappel	wortels	710	639
	Snijmais	bovengronds	1425	1283
Gewasrest extra bij oogst mais als CCM	CCM	bovengronds	2746	2471
	Snijmais	wortels	891	802
Groenbemester	Rogge GB	bovengronds	1800	1620
Groenbemester	Rogge GB	wortels	538	484
Gewasrest	Suikerbiet	bovengronds	3220	2898
	Suikerbiet	wortels	370	333
	Lely	bovengronds	1670	1503

	Lely	wortels	597	537
--	------	---------	-----	-----

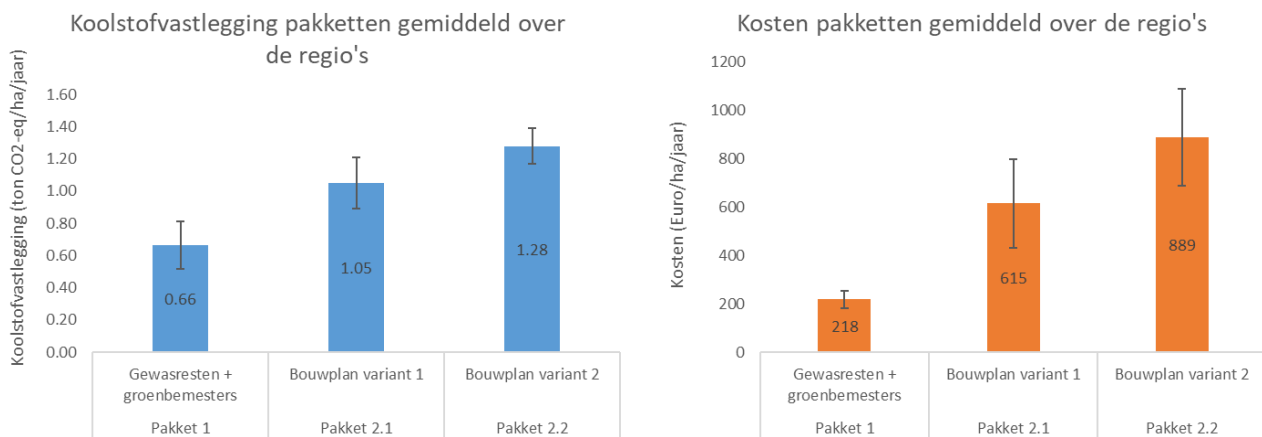
2.8 Aanpak berekeningen groenbemesters en gewasresten achterlaten

De bovenstaande getallen geven vernieuwde input van de maatregelen groenbemesters en gewasresten achterlaten. Om een realistisch effect voor beide maatregelen voor het zand en klei bouwplan uit te rekenen, is de extra koolstofvastlegging berekend voor elke maatregel tot het moment waarop deze opnieuw in het betreffende bouwplan werd toegepast. Dus als een input plaatsvindt kon dit organisch materiaal 'afbreken' in de betreffende bodem en onder de betreffende condities en managementstrategie, totdat het moment er zou zijn dat deze input opnieuw herhaald zou worden in het bouwplan. Wat er dan nog van over was, is beschouwd als de netto koolstofvastlegging die de maatregel als effect had. Deze berekening is uitgevoerd door alle bovenstaande input als extra toevoer van organisch materiaal in het begin van de vruchtwisseling in te voegen, en het netto-effect te vergelijken met de vruchtwisseling zonder de specifieke input. Zo kan het netto-effect van alle organische input op de totale organische stof balans worden uitgerekend. Opnieuw is deze berekening uitgevoerd met zowel het NDICEA-model als met Roth-C. Beide modellen zijn daarbij geïnitieerd zoals beschreven in 2.6, en effecten zijn omgerekend naar ton C/ha/jaar.

3 Resultaten

3.1 Koolstofvastlegging door pakketten voor de akkerbouw

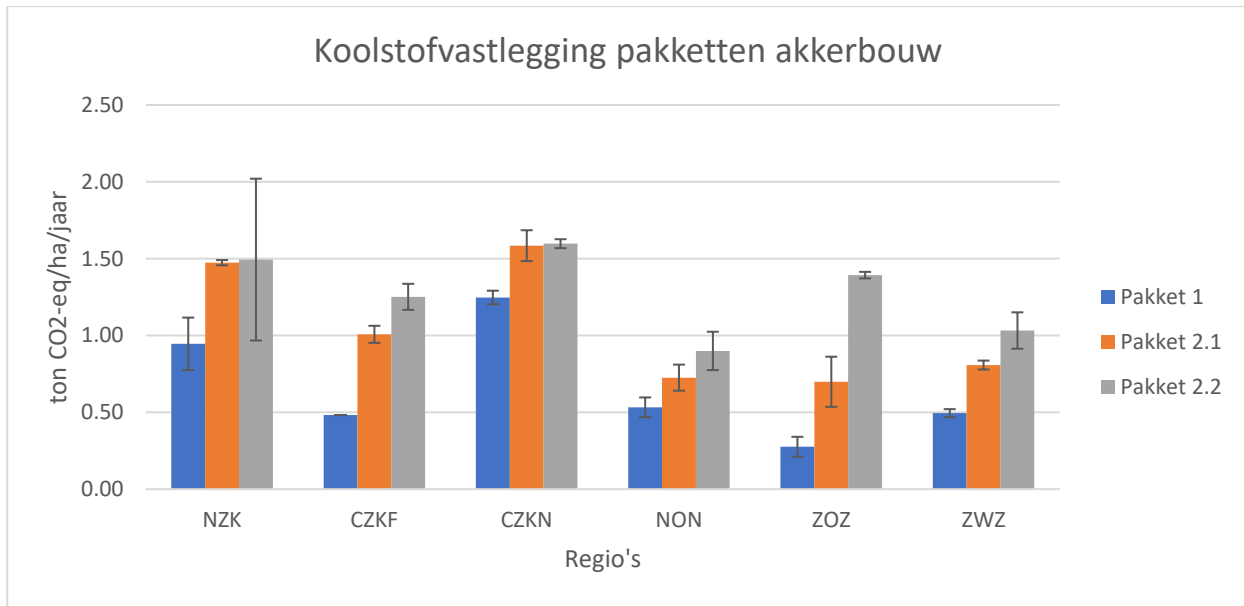
Figuur 3.1 toont de koolstofvastlegging voor de akkerbouwpakketten zoals deze is doorgerekend met de twee modellen. We zien dat Pakket 1, wat het achterlaten van gewasresten en de inzet van groenbemesters binnen de huidige vruchtwisseling omvat, toch nog een behoorlijke koolstofvastlegging oplevert van gemiddeld 0,66 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar. Toch kan er meer koolstof worden vastgelegd zoals de berekeningen van Pakket 2.1 en 2.2 laten zien (tot bijna dubbel zoveel). Het rechterdeel van figuur 3.1 toont de bijbehorende kosten van een dergelijk pakket, zoals uitgerekend in het aanpalende project B4 (Verstand *et al.*, 2022). We zien dat de kosten voor Pakket 1 gemiddeld 218 Euro/ha/jaar bedroegen, maar deze ongeveer driemaal zo hoog en viermaal zo hoog waren voor Pakketten 2.1 en 2.2, respectievelijk. Inderdaad leveren veranderingen in het bouwplan extra koolstof vastlegging op, maar tenzij de afzetprijzen voor gewassen zoals graan flink toenemen, betekent dit ook veel grotere kosten.



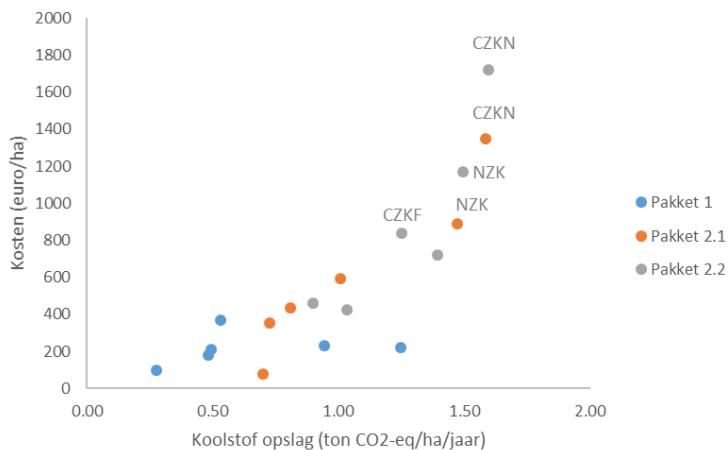
Figuur 3.1. Koolstofvastlegging van de drie pakketten voor de akkerbouw gemiddeld over de regio's (links) en kosten van de drie pakketten gemiddeld over de regio's (rechts, bron: Verstand *et al.*, 2022). Foutbalken geven de standaard fout weer.

Figuur 3.2 toont de koolstofvastlegging van de doorgerekende pakketten voor de akkerbouw uitgesplitst over de verschillende regio's met hun specifieke condities (bodentype, bouwplan). De regio's verschillen behoorlijk in hoeveelheid koolstofvastlegging. Pakket 1 gaf in ZOZ slechts een koolstofvastlegging van 0,28 ton CO₂-eq/ha/jaar, door het ontbreken van graan in het referentiebouwplan (graan geeft veel gewasrest) en doordat er veel laat geoogste gewassen in zitten, wat leidt tot korte groeiduurtijd voor groenbemesters. Daarentegen in CZKN gaf dit pakket maar liefst 1,25 ton CO₂-eq/ha/jaar, door relatief vroeg geoogste gewassen (bv. poot aardappels en graan) met een lange groeiduurtijd voor groenbemesters en stro dat ingewerkt kan worden.

De twee varianten van Pakket 2, met daarin de aanpassingen in het bouwplan, zorgden in alle regio's voor een behoorlijke hoeveelheid extra koolstofvastlegging, zodat deze uiteenliep voor Pakket 2.1 van 0,70 (ZOZ) tot 1,58 (CZKN) ton CO₂-eq/ha/jaar, en voor Pakket 2.2 van 0,9 (NON) ton CO₂-eq/ha/jaar tot 1,60 (CZKN) ton CO₂-eq/ha/jaar. Figuur 3.3 laat echter zien dat de bouwplan aanpassingen niet overal even efficiënt zijn. Hier zien we de koolstofopslag voor de verschillende pakketten uitgezet tegen de kosten van de pakketten. De figuur toont een enigszins hyperbolisch verband. Het valt op dat de koolstofvastlegging in de huidige pakketten een soort maximum vertoont van zo'n 1,6 ton CO₂-eq/ha/jaar. Eigenlijk heeft Pakket 1 overal, maar Pakket 2 in een gedeelte van de regio's relatief beperkte kosten. Voor een aantal regio's, namelijk CZKN, NZK en toch ook wel in CZKF worden de kosten voor de pakketten met bouwplanveranderingen (Pakket 2.1 en 2.2) met de recente saldi echter zeer hoog, en dit staat niet in verhouding met een toename in koolstofvastlegging aldaar. Dit komt doordat CZKN (saldo €4248), NZK (saldo €3285) en CZKF (saldo €2869) in die volgorde ook de drie regionale bouwplannen met de hoogste saldi zijn (Verstand *et al.*, 2022).



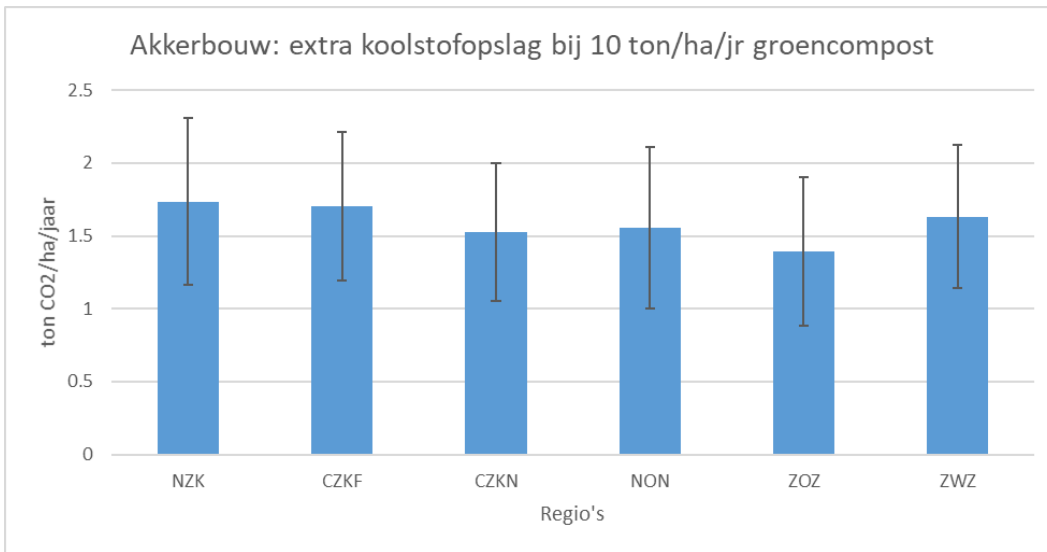
Figuur 3.2. Koolstofvastlegging (in ton CO₂-equivalenten/ha/jaar) voor de drie pakketten voor de verschillende regio's uitgesplitst, zoals berekend met beide modellen. Foutbalken geven de standaardfout weer.



Figuur 3.3. Kosten van de verschillende pakketten in de 6 regio's uitgezet tegen de koolstofvastlegging die deze tot gevolg hebben. Afkortingen in de figuur geven voor een aantal punten de regio weer.

3.2 Koolstofvastlegging door extra compost

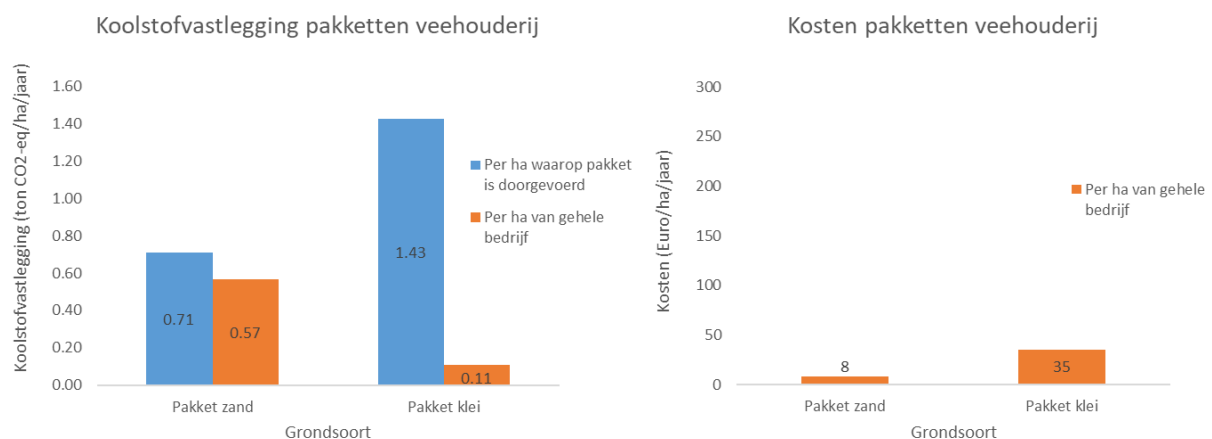
Figuur 3.4 toont de koolstofvastlegging in de doorgerekende scenario's met extra compost. Hierbij is gerekend met gemiddeld genomen 10 ton/ha/jaar groencompost (Tabel 2.3 voor de exacte hoeveelheid en frequentie). We zien dat deze hoeveelheid compost tot een gemiddelde koolstofvastlegging van 1,6 ton CO₂-eq/ha/jaar leidde, met slechts beperkte variatie over regio's (van 1,4 ton CO₂-eq/ha/jaar in ZOZ tot 1,7 ton CO₂-eq/ha/jaar in NZK). Dit zijn behoorlijke effecten, die nog net wat hoger zijn dan het maximale aan koolstofvastlegging die de pakketten aan maatregelen in de berekeningen behalen. De kosten van de inzet van compost zijn niet meegenomen in B4, maar kunnen worden ingeschat als zo'n 250 euro/ha/jaar (20 euro/ton groencompost, 50 euro/ha voor het uitrijden). Daarmee is het toevoegen van extra compost een van de goedkopere maatregelen, aangezien de kosten vergelijkbaar of net wat hoger zijn dan die van Pakket 1, maar de koolstofvastlegging per ha gemiddeld genomen groter is, en minder varieert voor de regio's.



Figuur 3.4. Koolstofvastlegging door toedienen van extra compost, in de vorm van gemiddeld 10 ton/ha/jaar groencompost, zoals berekend met beide modellen. Foutbalken geven de standaardfout weer.

3.3 Koolstofvastlegging door pakketten voor de veehouderij

Figuur 3.5 toont de koolstofvastlegging in de pakketten voor de veehouderij, op zand en op kleigrond, en de kosten daarvan zoals berekend in Verstand *et al.*, 2022. De berekeningen van de koolstofvastlegging hebben daarbij geen foutbalken, aangezien ze maar met één van de modellen (NDICEA) konden worden doorgerekend. We zien dat het pakket op zandgrond, wat voornamelijk het minder vaak scheuren van bestaand grasland betreft (1x per 8 jaar scheuren wordt 1x per 16 jaar scheuren, in combinatie met het omzetten van een deel van het grasland naar kruidenrijk grasland) per hectare waarop dit werd toegepast volgens de berekeningen leidde tot een koolstofvastlegging van 0,71 ton CO₂-eq/ha/jaar. Verrekend met de overige hectares van het bedrijf bedroeg dit bijna evenveel, nl. 0,57 ton CO₂-eq/ha/jaar aangezien het pakket op een groot gedeelte van het areaal van het bedrijf kan worden toegepast.



Figuur 3.5. Koolstofvastlegging in de veehouderij pakketten op zand en klei, per hectare waarop het pakket werd toegepast en per hectare van het bedrijf (links), en de kosten van de pakketten per hectare van het bedrijf (rechts, bron: Verstand *et al.*, 2022). Let op dat de y-as van de rechterfiguur minder lang is dan die in Fig. 3.1.

Voor het pakket op kleigrond is dit anders. Dit betreft omzetten van mais naar mais gras wisselteelten, en hiervan was de koolstofvastlegging per hectare waarop het pakket werd toegepast met 1,43 ton CO₂-eq/ha/jaar veel hoger. Echter

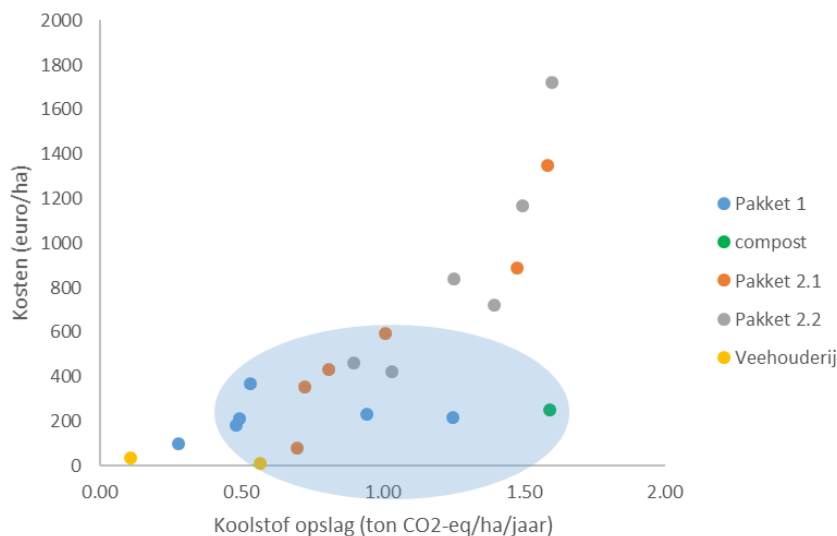
deze maatregel kan slechts op een klein gedeelte van het bedrijf (nl. die hectares met maisteelt op klei) en daardoor is de koolstofvastlegging per hectare van het gehele bedrijf veel kleiner: slechts 0,11 ton CO₂-eq/ha/jaar.

Het rechterdeel van Fig. 3.5 toont de kosten van de pakketten voor veehouderij. We zien dat deze veel lager liggen dan de kosten van de verschillende akkerbouwpakketten, met 8 euro/ton CO₂-eq en 35 euro/ton CO₂-eq, respectievelijk.

3.4 Overzicht kosten en effecten van alle doorgerekende pakketten

Figuur 3.6 toont ten slotte van alle in deze studie doorgerekende pakketten de kosten (in euro/ha) uitgezet tegen de effectiviteit (in ton CO₂-eq/ha/jaar). In de figuur is een blauwe zone aangegeven, van pakketten die eigenlijk het meest gunstig uitpakken: ze hebben een behoorlijke koolstofvastlegging, maar de kosten vallen nog enigszins mee. We zien daarin de volgende Pakketten:

- Pakket 1 gewasresten en groenbemesters, bijna alle regio's (uitzondering ZOZ waar geen graan en allen vanggewassen met korte groeidiur in het bouwplan zitten)
- Veehouderij Pakket zand. Hier gaat het om het verlagen van de frequentie van scheuren van blijven grasland, in combinatie met maatregelen die dat praktisch haalbaar maken.
- Pakket 2.1 (extra graan) in ZOZ, NON, ZWZ en eventueel CZKF maar niet in de twee regio's met hoogste bouwplansaldi.
- Pakket 2.2 in NON (extra graan andere frequentie) en ZWZ (graszaad erbij)
- Compost toevoegen in de akkerbouw regio's



weergegeven in de CO₂ bodem tabel. Daarvoor is echter wel een omrekening nodig naar koolstofvastlegging *per hectare* waarop de maatregel wordt toegepast (derde kolom van links).

- Na inpassingen in een klei- en zandbouwplan zoals beschreven in Tabellen 2.6 en 2.7, zien we dat het effect van gewasresten achterlaten in het bouwplan op zand vergelijkbaar is met de koolstofvastlegging zoals weergegeven in de huidige CO₂ bodem tabel. In het bouwplan op klei was de koolstofvastlegging van gewasresten achterlaten zelfs wat hoger. Daarbij kan worden opgemerkt dat de gewasrest van suikerbiet achterlaten eigenlijk in veel gevallen al gebeurt, en dat de koolstofvastlegging van deze maatregelen ten opzichte van de huidige praktijk dus vrij beperkt zal zijn. Deze maatregel is niet in de vergelijking met de huidige CO₂ bodem tabel meegenomen.

Voor het effect van groenbemesters/vanggewassen vinden we in deze doorrekening ook een behoorlijke koolstofvastlegging, maar deze is voor zowel klei als op zandgrond voor de bouwplannen in onze berekeningen en met de herziene kengetallen wat lager dan in de CO₂ bodem tabel: 0,96 CO₂-eq/ha/jaar per hectare groenbemesters op klei tot 0,47 ton CO₂-eq/ha/jaar per hectare groenbemesters op zand.

•

Tabel 3.1. Berekeningen van koolstofvastlegging op kleigrond, door de maatregelen gewasresten achterlaten en groenbemesters/vanggewassen, met de nieuwe kengetallen van organische stof (bron: Selin Noren et al., 2021) en met inpassing van de maatregelen in een bouwplan voor kleigrond (zie hoofdstuk 2 voor bouwplan). De onzekerheid is de standaardfout van het gemiddelde.

Mogelijke maatregel	Berekening nieuwe kengetallen per ha kleigrond (over hele bouwplan) in dit rapport	Onzekerheid door modelverschillen	Omrekening naar vastlegging per ha maatregel*	Huidig getal CO ₂ bodem tabel, per ha maatregel
	kg CO ₂ /ha/jaar	kg CO ₂ /ha/jaar	kg CO ₂ /ha/jaar	kg CO ₂ /ha/jaar
Gewasrest suikerbiet	197	94		
Gewasrest stro	232	36	927	660
Gewasresten totaal	429	131		
Groenbemesters	239	97	956	1440

*suikerbiet-gewasrest is niet meegenomen omdat dit ook niet in de onderliggende berekeningen van de CO₂ bodem tabel zit

Tabel 3.2. Berekeningen van koolstofvastlegging op zandgrond, door de maatregelen gewasresten achterlaten en groenbemesters/vanggewassen, met de nieuwe kengetallen van organische stof (bron: Selin Noren et al., 2021) en met inpassing van de maatregelen in een bouwplan voor zandgrond (zie hoofdstuk 2 voor bouwplan). De onzekerheid is de standaardfout van het gemiddelde.

Mogelijke maatregel	Berekening nieuwe kengetallen per ha zandgrond (over hele bouwplan) in dit rapport	Onzekerheid door modelverschillen	Omrekening naar vastlegging per ha maatregel*	Huidig getal CO ₂ bodem tabel, per ha maatregel
	kg CO ₂ /ha/jaar	kg CO ₂ /ha/jaar	kg CO ₂ /ha/jaar	kg CO ₂ /ha/jaar
Gewasrest suikerbiet	66	112		
Gewasrest mais CCM	78	101	311	330
Gewasresten totaal	144	213		0
Groenbemesters	118	233	474	830

*suikerbiet-gewasrest is niet meegenomen omdat dit ook niet in de onderliggende berekeningen van de CO₂ bodem tabel zit

4 Algemene conclusies

Het belangrijkste doel van deze modelberekeningen was om de koolstofvastlegging door pakketten van maatregelen te kwantificeren. Hiertoe zijn in nauwe samenwerking een aanpalend project "Kosten en baten van koolstofmaatregelpakketten" (Verstand *et al.*, 2022) voor de akkerbouw praktijkrelevante pakketten van maatregelen opgesteld voor 6 verschillende, regio specifieke bouwplannen zoals benoemd door van Dijk (2012). Voor de veehouderij is een pakket opgesteld per bodemsoort (zand en klei) dat ook op bedrijfsniveau is doorgerekend aangezien de kosten en baten van het gehele bedrijf met elkaar samenhangen.

Voor de akkerbouw toonden de berekeningen gemiddeld 0,66 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar voor Pakket 1 met inzet van groenbemesters en gewasresten achterlaten, maar binnen het huidige regiospecifieke bouwplan. De gemiddelde kosten hiervan waren 218 euro/ha/jaar. Voor Pakket 2.1 en 2.2, die aanpassingen aan het bestaande bouwplan omvatten (in de meeste gevallen door extra graan) toonden de berekeningen hogere koolstofvastlegging van 1,05 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar en 1,28 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar respectievelijk. Deze Pakketten kosten echter meer het dubbele per hectare (615 en 899 euro/ha/jaar). Tussen de verschillende regio's laten de berekeningen behoorlijke verschillen zien in vastlegging en kosten. We zien een hyperbolisch verband, met maximaal zo'n 1,6 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar koolstofvastlegging door varianten van Pakket 2 met bouwplanverandering, maar met name in de regio's met hoge bouwplansaldi (Noordelijke Zeeklei, Centrale Zeeklei Noordoostpolder) leidt dit tot relatief hoge kosten. Ten slotte is de koolstofvastlegging voor 10 ton/ha/jaar groencompost uitgerekend. Deze is ook zo'n 1,6 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar, maar de kosten hiervan zijn relatief beperkt. Uiteraard kan bij deze maatregel de vraag gesteld worden of deze op grote schaal kan worden toegepast gezien de beschikbaarheid van compost en de plaatsingsruimte voor fosfaat.

Voor de veehouderijpakketten is voor zand een pakket doorgerekend met blijvend grasland dat minder vaak gescheurd wordt (1x per 16 jaar i.p.v. 1x per 8 jaar) wat gecompenseerd wordt door o.a. productief kruidenrijk grasland. Op klei is een pakket doorgerekend met het omzetten van continue maisteelt (redelijk beperkt areaal op klei) naar wisselteelten mais grasklaver, in combinatie met vanggewassen. De berekeningen laten zien dat per hectare waarop de pakketten werden toegepast de koolstofvastlegging op zand 0,71 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar bedraagt, en die op klei 1,43 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar. Echter verrekend naar bedrijfsniveau wordt dit voor zand 0,57 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar en voor klei slechts 0,11 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar. Dit komt omdat het grootste gedeelte van de oppervlakte van de referentiebedrijven uit grasland bestaat. De kosten van beide pakketten waren veel lager dan voor de akkerbouwpakketten, namelijk op zand 8 euro/ha/jaar en op klei 35 eur/ha/jaar (Verstand *et al.*, 2022).

Het overzicht van alle in dit onderdeel doorgerekende pakketten van maatregelen laat zien dat er goedkope pakketten zijn, die ook bijna niets vastleggen, en pakketten die behoorlijke vastleggingen hebben (richting de 1,6 ton CO₂-equivalenten/ha/jaar) maar die relatief heel erg duur zijn. Er zijn echter ook pakketten die behoorlijke koolstofvastlegging hebben, maar zonder extreme kosten. Dit waren:

- Gewasresten en groenbemesters inzetten in bijna alle regio's (uitzondering Zuid Oostelijke Zandgronden waar geen graan en allen vanggewassen met korte groeiduur in het bouwplan zitten)
- Veehouderij Pakket zand. Hier gaat het om het verlagen van de frequentie van scheuren van blijven grasland, in combinatie met maatregelen die dat praktisch haalbaar maken.
- Pakket 2.1 (extra graan), maar niet in de regio's met hoogste bouwplansaldi waar dit te duur is.
- Pakket 2.2 in Noord Oost Nederland (extra graan andere frequentie) en Zuid Westelijke Zeeklei (graszaad erbij)
- Compost toevoegen in de akkerbouw regio's

Ten slotte zijn er ook modelberekeningen gemaakt met de nieuwe kengetallen van groenbemesters en gewasresten, die in het eerste kwartaal van 2022 beschikbaar kwamen. Dit is gedaan voor de losse maatregelen inzet van groenbemesters en achterlaten van gewasresten een goede praktijkrelevante berekening van de koolstofvastlegging te maken. Dit is gedaan voor twee bouwplannen (zand en klei) waarin de maatregelen op een praktisch haalbare manier zijn toegepast.

Na inpassingen in de bouwplannen zoals beschreven in Tabellen 2.6 en 2.7, zien we dat het effect van gewasresten achterlaten per hectare zand-/kleigrond vergelijkbaar is met of zelfs iets hoger is dan de koolstofvastlegging zoals weergegeven in de huidige CO₂ bodem tabel.

Voor het effect van groenbemesters/vanggewassen is dit met de herziene kengetallen en de huidige bouwplannen op klei en zand juist andersom: hier zien we wat lagere vastlegging, van 0,96 CO₂-eq/ha/jaar per hectare groenbemesters op klei tot 0,47 ton CO₂-eq/ha/jaar per hectare groenbemesters op zand.

Referenties

Alem, van G.A.A. en A.T.J. van Scheppingen, (1993). The development of a farm budgeting program for dairy farm. Proceedings XXV CIOSTA-CIGR v congress, P. 326-331. PR Lelystad.

Hoogmoed, M., Janmaat, L., Verstand, D., Bijker, B., Schurer, B.L.M., Timmermans, B.G.H., Heesmans, H. I.M., Specken, J., Westerhof, H., Michielsen, C., Colombijn-van der Wende, K., en Koopmans, C. (2021). *Bodem & Klimaat Netwerk Akkerbouw - Voortgangsrapportage juni 2021*. Louis Bolk Instituut, Wageningen University & Research, SPNA, ZLTO.

Janmaat, Leen en Chris Koopmans (2020). Met bijdragen van Hanneke Heesmans, Johan Specken, Daan Verstand Mieke van Opheusden, Bart Timmermans, Dennis Heupink, Henk Westerhof en Karola Colombijn-van der Wende. *Bodem & Klimaat Netwerk – Akkerbouw, voortgangsrapport 2020*. Louis Bolk Instituut, Wageningen University & Research, SPNA, ZLTO.

Jansen, P., J.P. Wagenaar, N. van Eekeren & H. Antonissen (2020). Productief kruidenrijk grasland biedt kansen. Artikel Ekoland april 2020.

KWIN-Veehouderij, 2020-2021. Wageningen University and Research.

Lesschen 2021. CO₂Bodem, tussenresultaten Slim Landgebruik.

Timmerman, M., Plomp, M., en de Haan, M.H.A. (2019). Mineralenprestaties van de melkveehouderij in Noord-Nederland. Rapport 1173. Wageningen Livestock Research. Wageningen.

Koopmans, C.J., B.G.H. Timmermans, M. Hoogmoed, D. Heupink, J.J.P. Cruijssen, J. De Haan, I. Selin Norén, T. Slier en J.P. Wagenaar (2021). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023. Voortgangsrapportage juni 2021.

Schils, R.L.M., de Haan, M.H.A., Hemmer, J.G.A., van den Pol-van Dasselaar, A., de Boer, J.A., Evers, A.G., Holshof, G., van Middelkoop, J.C., & Zom, R.L.G. (2007). Dairy Wise, a whole farm model. Artikel in Journal of Dairy Science.

Selin Noren, I., van Geel, W., de Haan, J. (2021) Cover crop reference values: effective organic matter and nitrogen uptake, Wageningen Research, Report WPR 877. 98 p.

Slier, T., J.P. Lesschen, B. Stout, R. Porre, H. Agricola, J. de Haan & C. Koopmans. 2021. CO₂ Bodem tabel. Tussenresultaten Slim Landgebruik. Versie augustus 2021. [CO2Bodem Tussenresultaten Slim Landgebruik \(wur.nl\)](https://www.slimlandgebruik.nl/sites/default/files/2022-01/2021_wagenaar_etal_bodem_en_klimaat-netwerk_veehouderij_voortgangsrapportage20.pdf).

van der Voort, M. (2018). KWIN AGV. Wageningen University and Research.

Van Dijk, W., J. Spruijt, w. Runia en W. van Geel (2012). Verruiming vruchtwisseling in relatie tot mineralenbenutting, bodemkwaliteit en bedrijfseconomie op akkerbouwbedrijven. PPO nr. 527. Wageningen UR. 77 p.

Van Hal, O. & J.P. Wagenaar. (2021). Bodem & Klimaat Netwerk Veehouderij. Tussenrapportage 2020. Slim Landgebruik (BO-53-002), https://www.slimlandgebruik.nl/sites/default/files/2022-01/2021_wagenaar_etal_bodem_en_klimaat-netwerk_veehouderij_voortgangsrapportage20.pdf. 59 p.

Verstand, D., W. Bijker, A. Evers, E. van der Burgt, O. van Hal, J.P. Wagenaar, B. Smit, M. de Haan (2022). Kosten en Baten van Koolstofmaatregelpakketten. Slim Landgebruik (BO-53-002), 49 p.