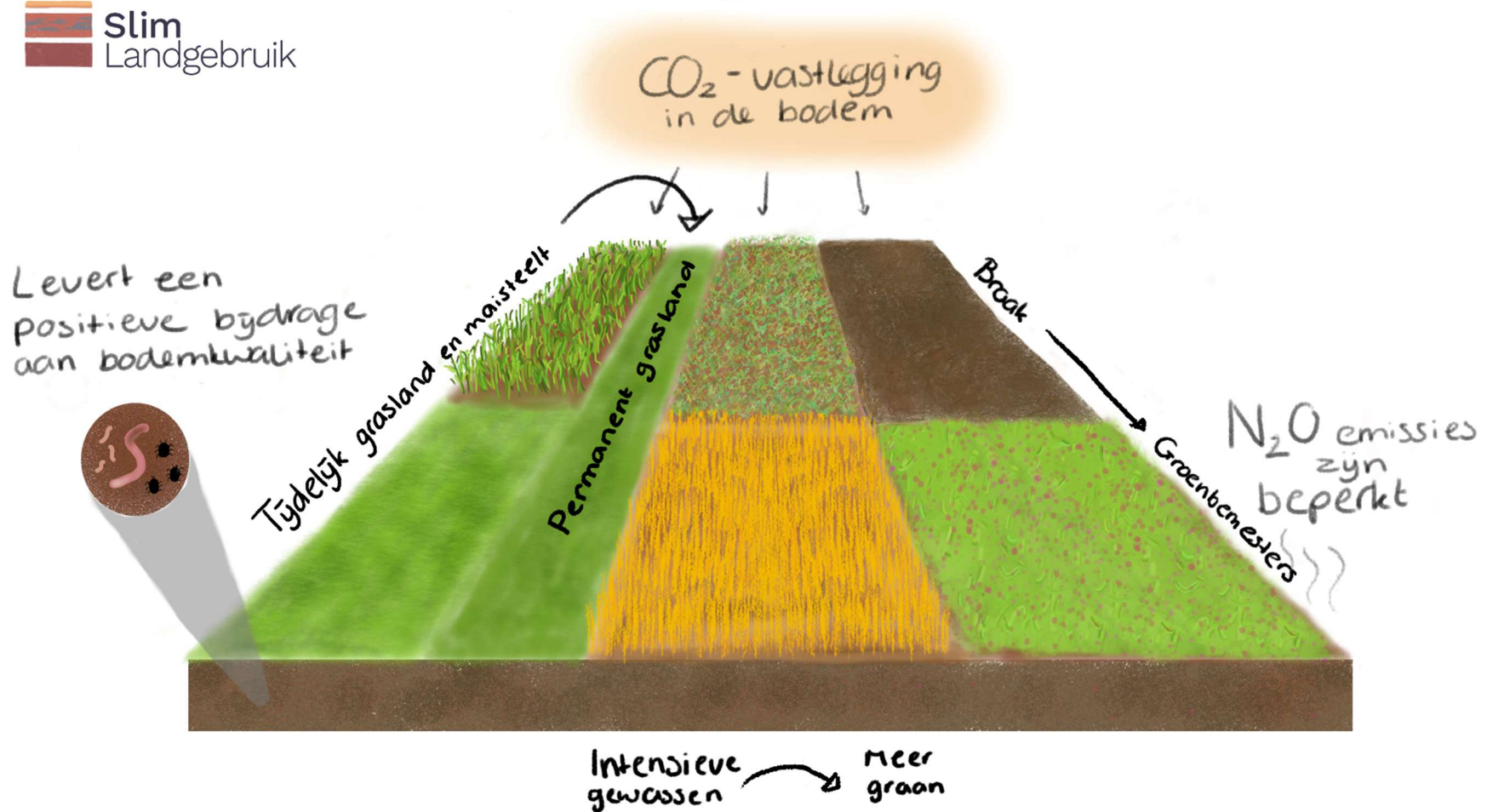


CO₂Bodem

Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in minerale landbouwbodems



Auteurs

Annemariet van der Hout, Bo Stout

Leeswijzer

Dit overzicht brengt de resultaten uit het onderzoeksprogramma Slim Landgebruik samen. Het doel van Slim Landgebruik is het leveren van kennis die nodig is om te komen tot een jaarlijkse vastlegging van 0,5 Mton CO₂-equivalenten vanaf 2030 voor minerale landbouwbodems in Nederland. Daarbij wordt tevens een bijdrage wordt geleverd aan het doel om vanaf 2030 alle landbouwbodems in Nederland duurzaam te beheren.

In Slim Landgebruik wordt onderzoek gedaan naar het effect van maatregelen op koolstofvastlegging, lachgasemissie, en bodemfuncties. Bij het vastleggen van koolstof wordt ingegaan op de hoeveelheid koolstof die vastgelegd kan worden en welke kansen & belemmeringen inclusief de kosten en baten die horen bij het implementeren van de maatregel. Dit overzichtsdokument toont het effect van de maatregelen op deze indicatoren (Tabel 1 en Tabel 2). De resultaten komen voort uit modelstudies, lange termijn experimenten (LTE's), economische analyses en expertkennis. Dit overzicht kan worden gebruikt door beleidsmakers, maar is ook geschikt voor mensen die graag meer inzicht willen verkrijgen in het effect van klimaatmaatregelen.

CO₂Bodem wordt jaarlijks geüpdatet. In deze versie zijn de zekerheden van het vastleggen van koolstof aangepast, de kosten & baten op de lange termijn toegevoegd, zijn de effecten op bodemfuncties, zogenaamde meekoppelkansen, de kansen en belemmeringen bij implementatie van de maatregelen aangepast t.o.v. de versie van februari 2024. De overige resultaten zijn gelijk gebleven.

Op de website van Slim Landgebruik is CO₂Bodem ook online beschikbaar: <https://slimlandgebruik.nl>. In een interactief overzicht staan alle onderzochte maatregelen en indicatoren. Per maatregel of per indicator wordt het resultaat weergegeven en worden de onderzoeksresultaten kort toegelicht. Daarnaast wordt de bron van het betreffende onderzoek weergegeven voor meer informatie.

Maatregelen in CO₂Bodem

Binnen Slim Landgebruik wordt onderzoek gedaan naar een brede set van maatregelen om koolstof vast te leggen. Hieronder volgt de definitie van de maatregelen:

- Meer blijvend grasland: het omzetten van tijdelijk grasland en snijmais naar permanent grasland
- Leeftijd grasland verhogen: het voorkomen dat grasland wordt gescheurd, zodat de leeftijd van grasland toeneemt
- Wisselteelt maïs-grasklaver: ook wel de 60-20-20 maatregel genoemd, waarbij het bedrijf wordt ingedeeld met 60% permanent grasland en 20% grasklaver in een driejarige rotatie met 20% maïs
- Aanpassen gewasrotatie: het verhogen van het aandeel rustgewassen in de vorm van graan naar maximaal 50%
- Groenbemesters/vanggewassen: inzet van groenbemesters/vanggewassen na de teelt van het hoofdgewas, die vervolgens worden ingewerkt in de bodem
- Extra compost: het vervangen van kunstmest of drijfmest door extra compost
- Extra vaste mest: het vervangen van kunstmest en drijfmest door extra vaste mest verkregen uit mestscheiding of -verwerking
- Gewasresten achterlaten: gewasresten van graangewassen (stro) achterlaten op het land na de oogst
- Agroforestry: het telen van meerjarige houtige gewassen (vaak bomen) in een weide of als strook tussen akkergewassen
- Vogelakkers: aanleggen van een meerjarig groenvoedergewas afgewisseld met stroken natuurbraak, waarbij de groenvoedergewassen 3 à 4 keer per seizoen worden gemaaid
- Akkerranden: het inzetten van meerjarige onbemeste akkerranden in de vorm van kruid- en grasachtigen langs sloten en/of wegen
- Niet-kerende grondbewerking: het afzien van intensief keren of mengen van de bodem, waarbij alleen de bovenlaag van de bodem wordt losgemaakt met woelers, tanden of schijven en gewasresten aan het oppervlak blijven
- Kruidenrijk grasland: het inzetten van graskruidenmengsels in het grasland in plaats van enkel Engels raaigras

Deze definities zijn een algemene leidraad voor de invulling van de maatregelen. De exacte invulling van een maatregel kan afhankelijk zijn van de context: de modelberekeningen op landelijk niveau vereisen soms een andere insteek dan de LTE's op perceelsniveau.

In Tabel 1 en Tabel 2 zijn de effecten van de verschillende koolstofmaatregelen weergegeven. Elke maatregel is individueel onderzocht. Dat betekent dat de effecten van verschillende maatregelen niet bij elkaar opgeteld kunnen worden.

Tabel 1. CO₂Bodem overzichtstabel van effecten van maatregelen op koolstofvastlegging, N₂O emissies en bodemfuncties op zandgronden.

Effect op Nederlandse zandgronden							
Maatregelen	Max. CO ₂ -vastlegging ²	Zekerheid CO ₂ -vastlegging ^{3,4}	Geschatte N ₂ O emissie ⁵	Bodemfuncties ⁶			
	kton CO ₂ /jaar	Ze ^{er} hoog/Hoog/Redelijk/Laag	kton CO ₂ -eq/jaar	Bodem-vruchtbaarheid	Bodem-biodiversiteit	Klimaat-adaptatie	Water-kwaliteit
Meer blijvend grasland	211	Hoog	-31 tot 125	0/+	+	+	-/+
Leeftijd grasland verhogen	n.b. ¹	Hoog	n.b.	0/+	+	+	-/+
Wisselteelt mais-grasklaver	96	Redelijk	-17 tot 67	-/+	+	0/-	+
Aanpassen gewasrotatie	59	Redelijk	-25 tot 25	0	0	0	+
Groenbemesters / vanggewassen	39	Hoog	10 tot 19	0/+	0	0	-/+
Extra vaste mest	35	Hoog	-5 tot 5	+	+	+	+
Extra compost	24	Hoog	1 tot 2	0/+	0/+	0	+
Gewasresten achterlaten	19	Hoog	1 tot 7	+	+	0/+	-/+
Agroforestry	46	Hoog	-3 tot 8	+	+	0/+	+
Vogelakkers	4	Redelijk	0	+	+	0	+
Akkerranden	3	Laag	-2 tot -1	-/+	0	0/-	+
Niet-kerende grondbewerking	0	Hoog	12 tot 40	0/+	0	-/+	-/+
Kruidenrijk grasland	n.b.	Laag	-27 tot -5	0/-	0	0/-	0/+

Tabel 2. CO₂Bodem overzichtstabel van effecten van maatregelen op koolstofvastlegging, N₂O emissies en bodemfuncties op kleigronden.

Effect op Nederlandse kleigronden							
Maatregelen	Max. CO ₂ -vastlegging ²	Zekerheid CO ₂ -vastlegging ^{3,4}	Geschatte N ₂ O emissie ⁵	Bodemfuncties ⁶			
	kton CO ₂ /jaar	Ze ^{er} hoog/Hoog/Redelijk/Laag	kton CO ₂ -eq/jaar	Bodem-vruchtbaarheid	Bodem-biodiversiteit	Klimaat-adaptatie	Water-kwaliteit
Meer blijvend grasland	90	Hoog	-19 tot 75	0	0	0/+	-/+
Leeftijd grasland verhogen	n.b. ¹	Ze ^{er} hoog	n.b.	0	0	0/+	-/+
Wisselteelt mais-grasklaver	37	Redelijk	-8 tot 33	+	+	0/+	+
Aanpassen gewasrotatie	61	Redelijk	-25 tot 25	+	+	+	+
Groenbemesters / vanggewassen	133	Hoog	40 tot 81	+	+	0	-/+
Extra vaste mest	42	Hoog	-5 tot 5	0	0	0/+	+
Extra compost	35	Ze ^{er} hoog	1 tot 3	+	+	0	+
Gewasresten achterlaten	79	Hoog	1 tot 15	+	+	0/+	-/+
Agroforestry	46	Hoog	-2 tot 7	+	+	0	+
Vogelakkers	5	Redelijk	-1 tot 1	+	+	0	+
Akkerranden	6	Hoog	-3 tot -1	+	+	0/-	+
Niet-kerende grondbewerking	0	Hoog	18 tot 60	0	0	0/-	-/+
Kruidenrijk grasland	n.b.	Laag	-23 tot -5	0	0	0	0/+

n.b. = niet bekend

<u>Ze^{er} hoog</u>	Aantoonbaar effect gemeten in meerdere proeven (p<0,05) [13] én in een internationale meta-analyse [8]
<u>Hoog</u>	Aantoonbaar effect gemeten in meerdere proeven (p<0,05) [13] óf in een internationale meta-analyse [8]
<u>Redelijk</u>	Aantoonbaar effect gemeten in 1 proef (p<0,05) in Nederland [13] en/of in proeven in landen met een vergelijkbaar klimaat [8]
<u>Laag</u>	Geen aantoonbaar effect gemeten o.b.v. de verschillende methode (modelsimulatie, LTE en literatuur).
+	Positieve effecten gemeten of verwacht
-	Negatieve effecten gemeten of verwacht
0	Geen effecten gemeten of verwacht
+/-	Zowel positieve als negatieve effecten gemeten of verwacht
0/+ of 0/-	Licht positieve/negatieve effecten gemeten of verwacht

¹ Uit proeven en internationale literatuur blijkt dat het verhogen van de leeftijd van grasland zorgt voor de vastlegging van koolstof en lijkt de potentie o.b.v. LTE's hoog, dit is echter nog niet goed door te rekenen. Gegevens over de maximale koolstofvastlegging ontbreken daarom.

² Maximale CO₂-vastlegging per jaar op basis van modelberekeningen en literatuuronderzoek [7, 16]. Toelichting op pagina 5.

³ Op basis van metingen in LTE's in de bodemlaag 0-30 cm [13] en beschikbare internationale meta-analyses [8]. Daarbij zijn vier verschillende groepen onderscheiden. Toelichting op pagina 7.

⁴ Zekerheid op basis van LTE proeven is hoog, waarbij consistent geen significant effect gemeten wordt. Dit is ondersteunt met literatuuronderzoek [7, 8].

⁵ Geschatte N₂O emissie in CO₂-equivalenten op de korte termijn [16]. Een negatief getal betekend een afname in N₂O emissie ten opzichte van de referentie, een positief getal betekend een toename in N₂O emissie door toepassing van de maatregel. Toelichting op pagina 13.

⁶ Het effect op een bodemfunctie op basis van gemeten BLN 2.0-indicatoren (zwart) in de LTE's [5, 12] of de PPS Beter Bodembeheer [10, 11], of van verwachte effecten op basis van expert kennis (grijs) [19]. Toelichting op pagina 9.

CO₂-vastlegging in de bodem

Op basis van modelberekeningen is aangetoond dat er jaarlijks potentieel 0,9 Mton CO₂ extra kan worden vastgelegd t.o.v. het referentiejaar 2017¹. De implementatie van maatregelen bepaald hoeveel CO₂ er uiteindelijk daadwerkelijk wordt vastgelegd in minerale landbouwbodems. Maatregelen die het meeste bijdragen aan koolstofvastlegging zijn meer blijvend grasland, groenbemesters/vanggewassen, het aanpassen van de gewasrotatie (verhogen van het aandeel rustgewassen) en wisselteelt tussen maïs en grasklaver. De potentie is hoog door een hoge vastlegging per hectare of een grote mogelijkheid voor implementatie of een combinatie van beide.

In het programma Slim Landgebruik is de effectiviteit van maatregelen voor CO₂-vastlegging bepaald aan de hand van lange termijn experimenten (LTE's) en modelberekeningen. De LTE's geven inzicht in de effectiviteit van een maatregel op perceelsniveau, maar hoeven daarmee niet representatief te zijn voor heel Nederland. Om de potentiële CO₂-vastlegging voor heel Nederland te bepalen wordt het model RothC gebruikt. Het RothC-model is een model dat de koolstofdynamiek in minerale bodems kan simuleren op basis van het bouwplan en maatregelen ten behoeve van bodemkoolstofbeheer [1]. Het model houdt rekening met de effecten van bodemtype, temperatuur, vochtgehalte en bodembedekking op de afbraak van organische koolstof. Maandelijkse tijdstappen worden gebruikt om veranderingen in de organische koolstofvoorraad te berekenen op een tijdschaal van één jaar tot eeuwen. Met behulp van RothC is, op basis van input data over bodem, gewasarealen, gewasopbrengst en bemesting, voor het jaar 2017 de potentie voor koolstofvastlegging door het nemen van maatregelen bepaald op 4-cijferig postcodeniveau [7, 16].

De potentiële CO₂-vastlegging is berekend als een gemiddelde voor Nederland. Lokaal zal de potentie per hectare hoger of lager kunnen zijn door verschillen in de bodem en het huidige bodembeheer. Om de totale potentie te bepalen wordt er eerst bepaald op welk areaal een maatregel geïmplementeerd kan worden. Hierbij is gecorrigeerd voor het areaal waarop een maatregel op dit moment al wordt toegepast. De implementatie geeft in dit geval aan op hoeveel hectare de maatregel maximaal kan worden toegepast en geeft géén inzicht in het aantal hectares waarop een maatregel ook daadwerkelijk zal worden toegepast [7, 16]. Daarnaast kan de potentiële koolstofvastlegging niet volledig bij elkaar worden opgeteld. De maatregelen meer blijvend grasland en wisselteelt maïs-grasklaver kunnen namelijk beide worden toegepast op (een deel van) het areaal tijdelijk grasland en snijmaïs, waardoor een dubbeltelling ontstaat wanneer deze bij elkaar worden opgeteld.

Tabel 3. Potentiële CO₂-vastlegging (totaal en per hectare) en additioneel areaal waarop de maatregel kan worden toegepast, uitgesplitst naar zand- en kleigrond [16]. Het betreft hier alleen de CO₂-vastlegging, er is niet gecorrigeerd voor N₂O emissies.⁷

Maatregelen	Totale vastlegging		Areaal		Vastlegging per hectare	
	kton CO ₂ /jaar		1000 ha		ton CO ₂ /ha/jaar	
	Zand	Klei	Zand	Klei	Zand	Klei
Meer blijvend grasland	211	90	80	49	2,62	1,85
Groenbemesters/ vanggewassen	39	133	17	72	2,30	1,86
Aanpassen gewasrotatie	59	61	31	31	1,91	1,99
Wisselteelt maïs-grasklaver	96	37	45	22	2,12	1,68
Extra vaste mest	35	42	661	742	0,05	0,06
Achterlaten gewasresten	19	79	24	48	0,77	1,65
Extra compost	24	35	287	381	0,08	0,09
Vogelakkers	4	5	2	3	1,86	1,43
Akkerranden	3	6	6	8	0,52	0,78

Enkele maatregelen uit CO₂Bodem ontbreken in de modelberekeningen. Dit geldt voor de maatregelen Niet-kerende grondbewerking, Kruidenrijk grasland, Leeftijd grasland verhogen en Agroforestry. Uit onderzoek in lange termijn experimenten en uit literatuuronderzoek blijkt dat de maatregel Niet-kerende grondbewerking in Nederland geen eenduidig effect heeft op koolstofvastlegging [7, 13]. Om deze reden is de CO₂-vastlegging van deze maatregel in CO₂Bodem dan ook aangegeven met 0 kton CO₂/jaar.

Voor de maatregel Kruidenrijk grasland ontbreekt het op dit moment nog aan wetenschappelijk verkregen data om uitspraken te kunnen doen over mogelijke koolstofvastlegging. In de LTE's zijn in de periode 2018 – 2023 metingen uitgevoerd. Er zijn geen significante verschillen aangetoond tussen verschillende typen grasland [13].

Voor de maatregel Leeftijd grasland verhogen is het op dit moment nog niet mogelijk deze door te rekenen met het

⁷ Bij het bepalen van de jaarlijkse potentie voor koolstofvastlegging op Nederlandse minerale landbouwbodems is geen rekening gehouden met het effect van het afschaffen van de derogatie op de koolstofvastlegging. Naar verwachting leidt de afschaffing van de derogatie tot een lagere potentie voor koolstofvastlegging doordat minder mest uitgereden kan worden.

RothC model. Op basis van lange termijn experimenten lijkt de potentie van deze maatregel echter hoog, met een gemiddelde significante vastlegging van 12,8 ton CO₂/ha/jaar op klei ($p < 0,005$) en een vastlegging van 1,9 ton CO₂/ha/jaar op zand ($p < 0,23$) [13].

Voor de maatregel Agroforestry is een literatuurstudie uitgevoerd [7]. De resultaten laten zien dat wanneer er aan de doelstelling geformuleerd in het Masterplan Agroforestry uit 2020 van het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselkwaliteit en Natuur wordt voldaan en er 25.000 hectare agroforestry wordt gerealiseerd in Nederland, dit een totale jaarlijkse vastlegging kan opleveren van 0,1 Mton CO₂. Deze vastlegging wordt gerealiseerd in zowel bodemkoolstof als in biomassa.

Zekerheid van de CO₂-vastlegging

De zekerheid van het vastleggen van koolstof als gevolg van de maatregelen varieert. Voor veel maatregelen is de zekerheid (zeer) hoog op basis van LTE's en literatuuronderzoek. Maatregelen die minder gangbaar zijn voor koolstofvastlegging of die lastig meetbaar zijn scoren lager op zekerheid. De LTE's tonen tevens aan dat de zekerheid hoger is voor maatregelen op klei dan op zand.

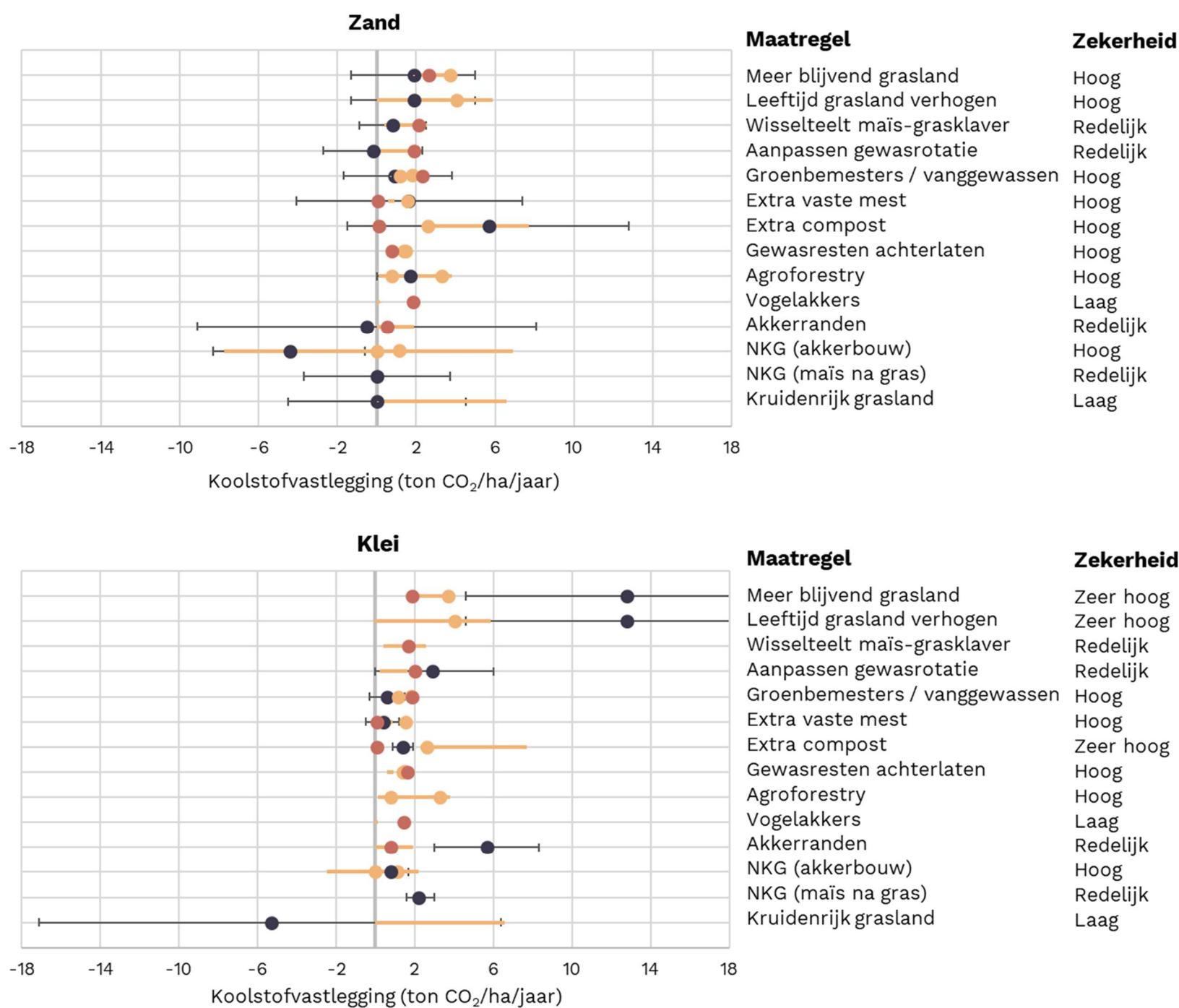
Sinds 2018 zijn gegevens verzameld over de potentiële koolstofvastlegging door maatregelen aan de hand van metingen aan bodemkoolstof in LTE's. Veel van deze maatregelen zijn gedurende meerdere jaren en/of op meerdere proeflocaties gemeten. De verzamelde gegevens zijn samengevoegd en een analyse is uitgevoerd naar de gemiddelde effecten van de maatregelen op CO₂-vastlegging [13].

Daarnaast is voor alle maatregelen uit CO₂Bodem een literatuurstudie uitgevoerd naar het effect op koolstofvastlegging [8]. Hierbij is met name gekeken naar meta-analyses over het effect van de maatregel op koolstofvastlegging. Bij een gebrek aan meta-analyses is er ook gekeken naar studies met veldproeven in Europese landen met een vergelijkbaar klimaat als Nederland.

Door de resultaten uit LTE's [13] en literatuuronderzoek [8] te combineren kan er een duiding worden gegeven aan de zekerheid van het verwachte effect van maatregelen op koolstofvastlegging. Per maatregel is een kwalitatieve beoordeling weergegeven met betrekking tot de zekerheid van het vastleggen van koolstof.

Indeling beoordeling:

<u>Ze</u> er hoog	Aantoonbaar effect gemeten in meerdere proeven (p<0,05) én in een internationale meta-analyse
<u>Ho</u> og	Aantoonbaar effect gemeten in meerdere proeven (p<0,05) óf in een internationale meta-analyse
<u>Re</u> delijk	Aantoonbaar effect gemeten in 1 proef (p<0,05) in Nederland en/of in veldproeven in landen met een vergelijkbaar klimaat
<u>La</u> ag	Geen aantoonbaar positief effect gemeten en/of geen overeenstemming tussen resultaten o.b.v. de verschillende methode (modelsimulatie, LTE en literatuur).



Figuur 1. Zekerheid van de koolstofvastlegging door maatregelen op zand en klei. ● = gemeten in de LTE's, waarbij de horizontale zwarte lijnen het 95% betrouwbaarheidsinterval aangeven [13]; ● = op basis van literatuuronderzoek, waarbij de gele balken de range weergeven op basis veldmetingen en de bolletjes resultaten op basis van internationale meta-analyses tonen [8] ● = de gemodelleerde waarde [7].

Op basis van literatuuronderzoek in meta-analyses en resultaten uit de LTE's kan voor veel maatregelen een hoge zekerheid worden toegekend. Voor de maatregelen Leeftijd grasland verhogen en Extra compost op klei is de zekerheid

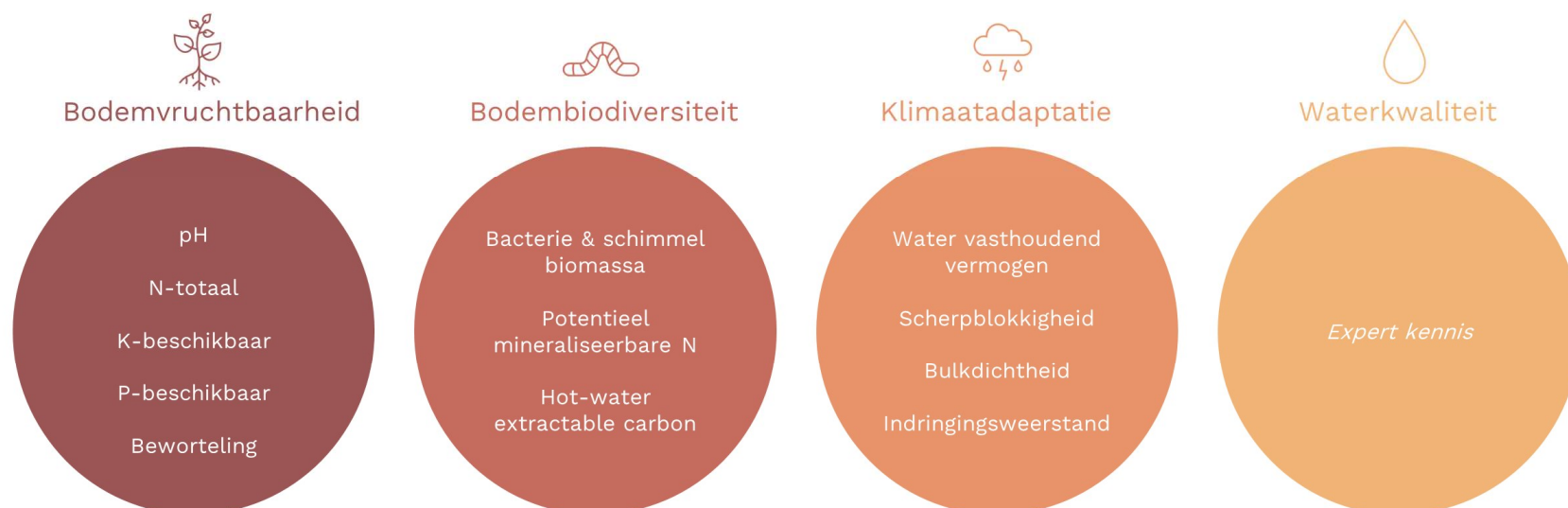
zelfs zeer hoog, waarbij een positief effect wordt gevonden in meta-analyses en in meerdere LTE's. Maatregelen waarvan de zekerheid redelijk tot laag is, zijn over het algemeen maatregelen die minder vaak worden toegepast voor koolstofvastlegging, zoals vogelakkers en akkerranden of die enkel in Nederland worden toegepast (Wisselteelt maïs-grasklaver). Voor het aanpassen van de gewasrotatie is de zekerheid eveneens redelijk, terwijl op basis van modelberekeningen wel een hoge vastlegging wordt verwacht. Dit is te verklaren door het feit dat het zeer lastig is om het effect van een gewasrotatie te meten in de bodem. Daarom ontbreekt het aan onderbouwende proeven, zowel in Nederland als internationaal.

Daarnaast blijkt uit de meerjarige analyse [13] dat de zekerheid van koolstofvastlegging het grootst is op kleibodems. Op zandbodems is de spreiding van de CO₂-vastlegging hoog voor alle gemeten maatregelen, waardoor de gemiddelde vastlegging op basis van de driejarige analyse weinig significant positieve resultaten toont. Het is vooralsnog onduidelijk of dit aan de bodemprocessen in zandgronden kan worden toegeschreven of inherent is aan de LTE proeven op zand.

Effect op bodemfuncties

Het effect van de koolstofmaatregelen op de bodemfuncties is over het algemeen positief tot neutraal (Tabel 1 en Tabel 2). Er is op basis van de kwalitatieve beoordeling geen reden om aan te nemen dat er door CO₂-vastlegging negatieve effecten op de bodemfuncties ontstaan. Echter bieden de resultaten op basis van de BLN-indicatoren 2.0 (Bodemindicatoren voor Landbouwgronden Nederland) niet voor iedere bodemfunctie een volledig beeld van het effect van de maatregel op deze functie [22].

Het doel van het Nationaal Programma Landbouwbodems is alle landbouwbodems duurzaam beheerd in 2030. Landbouwbodems met een goede kwaliteit dragen naast koolstofvastlegging bij aan de 1) bodemvruchtbaarheid, 2) biodiversiteit, 3) klimaatadaptatie en 4) waterkwaliteit. Om dit effect te toetsen is met behulp van BLN2.0-indicatoren [2] bepaald wat het effect van koolstofmaatregelen op deze vier bodemfuncties is. [3, 9, 14, 24]. In Figuur 2 is aangegeven welke indicatoren zijn opgenomen voor de verschillende bodemfuncties.⁸



Figuur 2. Overzicht van bodemfuncties en bijbehorende BLN-indicatoren, gebaseerd op de beschrijving uit het NPL en de beschikbaarheid vanuit de LTE's.

De BLN-indicatoren zijn gemeten in de lange termijn experimenten binnen Slim Landgebruik [5, 12] en proeven uit de PPS Beter Bodembeheer [10, 11].

Voorzichtigheid bij de implementatie van het effect van maatregelen op de bodemfuncties is geboden. De BLN-indicatorset is ontwikkeld om de integrale bodemkwaliteit te kunnen bepalen en gericht te werken aan het versterken van bodemfuncties. De indicatorset is niet direct gekoppeld aan de verschillende bodemfuncties. Dat wil zeggen dat er geen specifieke indicatoren en streefwaarden aan de bodemfuncties zijn gekoppeld. In deze studie is de BLN2.0 gebruik waarmee teeltondersteunende bodemfuncties kunnen worden beoordeeld. Wanneer er voor maatregelen beperkte/geen meetdata beschikbaar was zijn de effecten op bodemfuncties met expert kennis beoordeeld [19].

Een +, - en 0 geven respectievelijk een positief, negatief of neutraal effect van een maatregel op een bodemfunctie aan. Wanneer de indicatoren tegenstrijdig zijn, bijvoorbeeld bij verschillen tussen proeven of varianten van een maatregel, en het effect op een bodemfunctie dus niet eenduidig is, is dat aangegeven met -/+. Wanneer de effecten niet overwegend positief of negatief zijn (bijvoorbeeld overwegend neutraal met slechts één positieve of negatieve indicator) wordt het effect op een bodemfunctie aangeduid met 0/+ of 0/-. De BLN-indicatoren bieden onvoldoende onderbouwing voor het scoren van het effect op waterkwaliteit, waardoor dit effect is gebaseerd op expert kennis [19]. Voor de maatregel Meer blijvend grasland is aangenomen dat de effecten op de bodemfuncties vergelijkbaar zijn met de maatregelen Leeftijd grasland verhogen, aangezien deze maatregel niet is beoordeeld op basis van expert kennis [19] of is gemeten in LTE's. Voor de maatregelen Aanpassen gewasrotatie en Leeftijd grasland verhogen is geen onderscheidt gemaakt tussen zand en klei [5], waardoor er in Tabel 1 en 2 is aangenomen dat het effect op zand en klei vergelijkbaar is.

Uit deze analyse blijkt dat de koolstofmaatregelen een overwegend positief of neutraal effect hebben op de verschillende bodemfuncties. De effecten van maatregelen op de verschillende indicatoren binnen één bodemfunctie zijn niet in alle gevallen éénduidig positief, wat voornamelijk komt door onderlinge verschillen tussen de indicatoren van één bodemfunctie. Er zijn geen (overwegend) negatieve effecten op een bodemfunctie gemeten of verwacht [22].

⁸ Voor het koppelen van de BLN-indicatoren aan de bodemfuncties is aangesloten bij het Landmark-project (Europees project gericht op duurzaam beheer van bodems), waar per bodemfunctie is bepaald welke indicatoren bijdragen aan de bodemfunctie.

Kosten en baten van maatregelen

De financiële kosten en baten balans voor bedrijven als gevolg van het toepassen van maatregelen verschillen sterk per regio. Maatregelen waarin een aanpassing in het bouwplan vereist is, leiden relatief vaak tot (financiële) kosten op de korte termijn, evenals het aanwenden van extra vaste mest of compost. Maatregelen waarvoor subsidies voorhanden zijn of die betrekking hebben op graslandmanagement leveren vaker financiële baten op.

Om inzichtelijk te maken welke financiële gevolgen maatregelen meebrengen, zijn kosten en baten analyses uitgevoerd [4, 6, 18, 20, 21]. De kosten zijn gedefinieerd als de extra kosten die een maatregel met zich meebrengt t.o.v. de referentie behandeling/bouwplan op de korte en lange termijn. De baten zijn gedefinieerd als de extra opbrengsten of kostenbesparingen die het toepassen van de maatregel op de korte en lange termijn oplevert. De baten zijn hierbij uitgedrukt in financiële baten op de korte termijn, zoals bijvoorbeeld lagere kosten voor kunstmest. Overige baten, zoals een verbeterde bodemstructuur of toenemende gewasopbrengsten op de lange termijn zijn hierbij niet meegenomen. De effecten op de bodemfuncties geven echter wel een indicatie van mogelijke lange termijn baten van maatregelen, zie In Tabel 1 en Tabel 2 zijn de effecten van de verschillende koolstofmaatregelen weergegeven. Elke maatregel is individueel onderzocht. Dat betekent dat de effecten van verschillende maatregelen niet bij elkaar opgeteld kunnen worden.

Tabel 1 en Tabel 2.

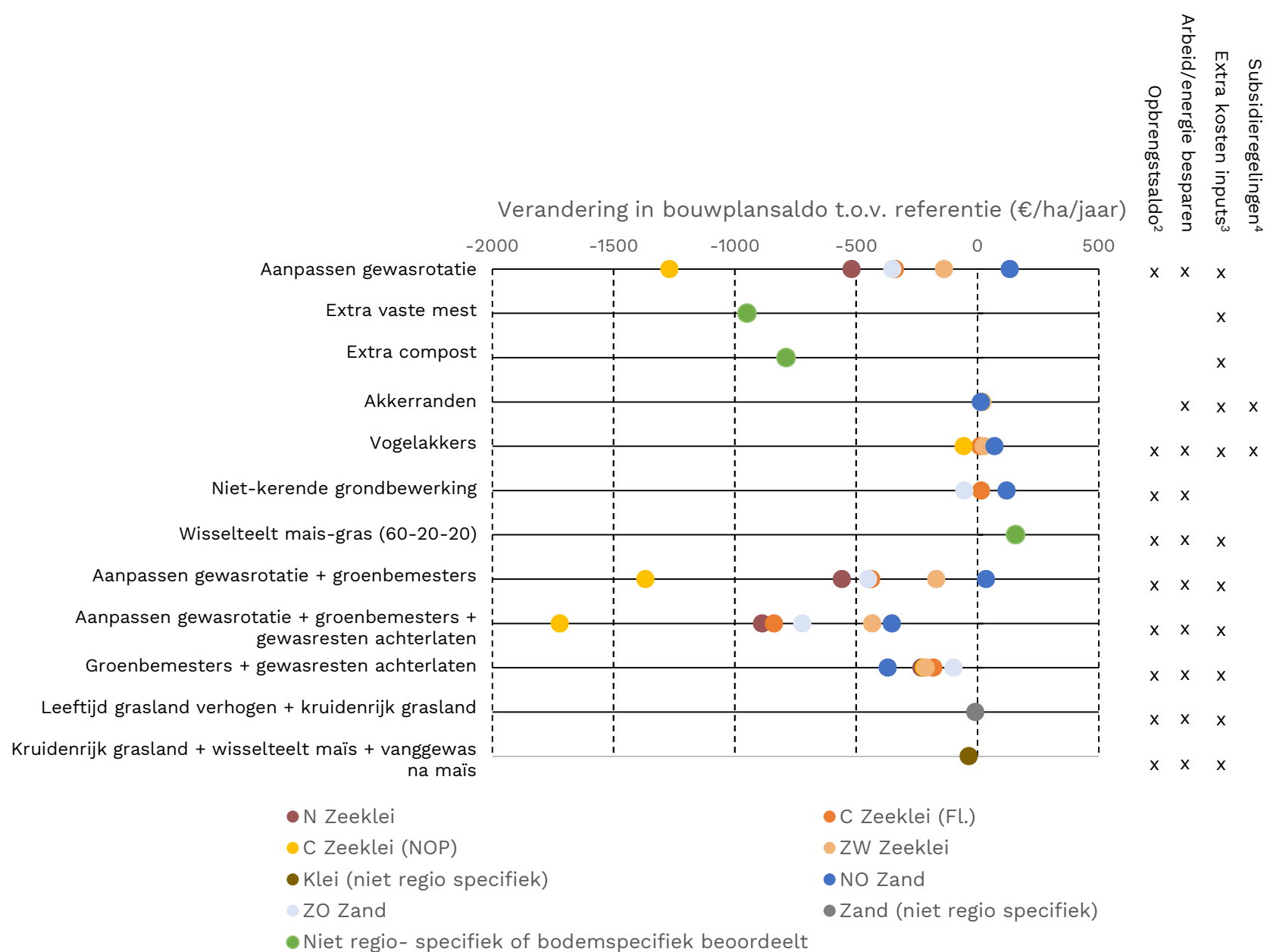
Korte termijn:

De balans zoals gepresenteerd in Figuur 3 is gebaseerd op onderzoek in de netwerken Veehouderij en Akkerbouw uit het programma Slim Landgebruik in de periode 2018—2021. Prijsveranderingen door inflatie in 2023 zijn hierbij niet meegenomen, maar zullen naar verwachting wel impact hebben. Bij een positieve balans levert de maatregel per hectare land op de korte termijn jaarlijks meer inkomsten op dan bij de referentie behandeling. Bij een negatieve balans kost de maatregel op de korte termijn jaarlijks per hectare meer dan de referentie behandeling.

Uit deze economische analyses voor de korte termijn blijkt dat Niet-kerende grondbewerking, Wisselteelt mais-grasklaver, en combinaties van Leeftijd grasland verhogen + Kruidenrijk grasland en Kruidenrijk grasland + Wisselteelt mais + Vanggewas na mais een neutraal effect hebben op het bouwplansaldo in verschillende regio's. Akkerranden en Vogelakkers leiden ook niet tot extra kosten, maar dat is voornamelijk dankzij de subsidieregelingen die hierbij voorhanden zijn. De kosten en baten balans van maatregelen die leiden tot een aanpassing in het bouwplan zijn sterk regio-afhankelijk. Het aanpassen van de gewasrotatie door de implementatie van meer rustgewassen veroorzaakt (ook in combinatie met andere maatregelen) een verlaagd bouwplansaldo, met name in regio's met intensieve en hoog-salderende bouwplannen zoals de Centrale Zeeklei. Ook het toepassen van extra organische mest is een relatief dure maatregel, met name ten opzichte van de referentie waar varkensdrijfmest wordt toegepast, waar de akkerbouwer geld op toe krijgt, Figuur 3 [21].

Lange termijn:

Het toepassen van maatregelpakket groenbemesters en gewasresten achterlaten kan leiden gelijkblijvende tot een toename in gewasopbrengst. De gerapporteerde variatie wordt verzaakt door verschillen in onder andere het hoofdgewas, de groenbemesters, teeltmanagement en stikstofgift. De nalevering van stikstof en een betere vochtvoorziening kan bijvoorbeeld leiden tot een hogere opbrengst van zomergerst als hoofdgewas in combinatie met de groenbemester bladrammenas [11, 18]. Voor de kosten en baten op de lange termijn is daarom gerekend met scenario's met verschillen in opbrengstverhoging. In de meeste regio's is een opbrengstverhoging van 10% of meer benodigd voor een positieve balans. In de regio Zuidoostelijk zandgebied is een opbrengstverhoging van 5% voldoende voor een positieve balans [18].



Figuur 3. Overzicht van de verandering in bouwplansaldo op de korte termijn door toepassing van verschillende maatregelen en maatregelpakketten, geaggregeerd per regio.¹

Van de volgende individuele maatregelen zijn (nog) geen inschattingen van de verandering in bouwplansaldo gemaakt: Gewasresten achterlaten; Vanggewassen/Groenbemesters; Agroforestry; Leeftijd grasland verhogen; Kruidenrijk grasland.

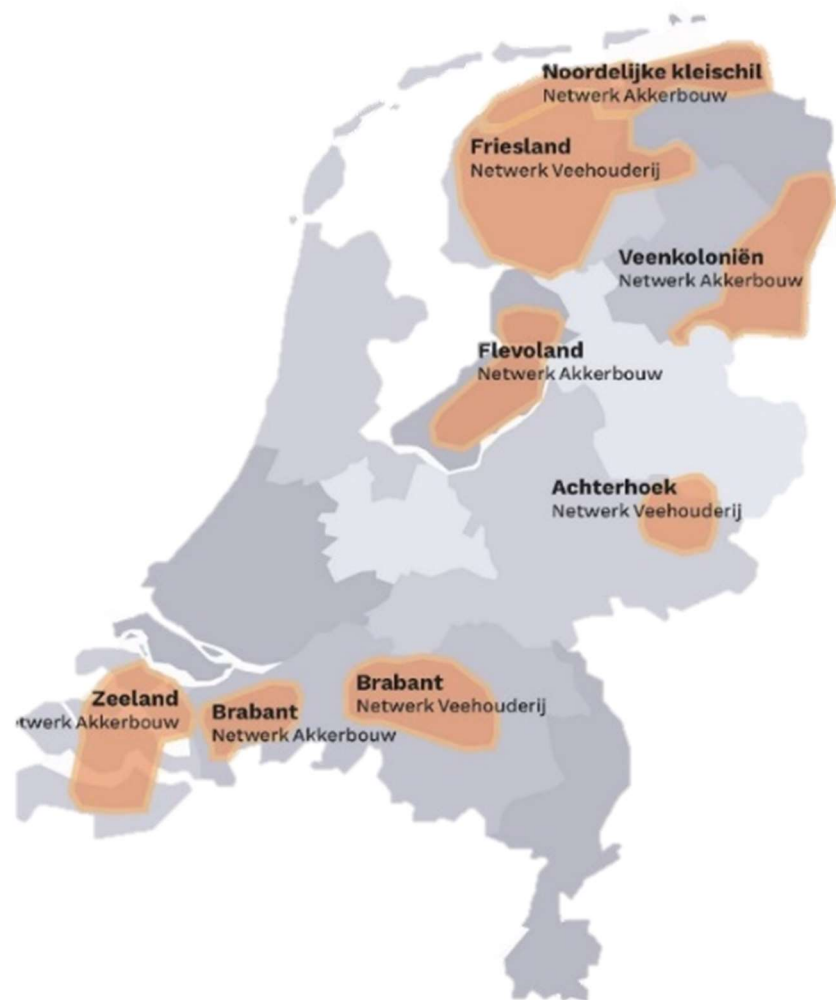
² Gewasopbrengsten volgens KWIN-AGV 2018; Melkopbrengsten volgens rekenprogramma's DairyWise en BBRP.

³ Extra kosten voor inputs als bemesting; zaaigoed; krachtvoer en gewasbeschermingsmiddelen.

⁴ Op Vogelakkers en Akkerranden zijn ANLb subsidieregelingen van toepassing, in dit geval vanuit het Flevolands Agrarisch Collectief; Agrarische Natuur Drenthe en ANB Brabant.

Kansen en belemmeringen

Het toepassen van klimaatmaatregelen brengt kansen met zich mee, maar kent ook belemmeringen. Kansen en belemmeringen kunnen bijvoorbeeld ontstaan door een verandering in opbrengst, door bestaande wetgeving of door beheersing van ziekten en plagen. In een meerjarig onderzoek zijn in de periode van 2018 – 2021 interviews gehouden met verschillende regionale netwerken in de akkerbouw en veehouderij. In 2023 zijn in deze netwerken evaluerende gesprekken gevoerd om verschillende klimaatmaatregelen te bespreken en daarbij de kansen en belemmeringen te inventariseren, Figuur 4.



Figuur 4. Kaart met regionale netwerken van Slim Landgebruik

In de evaluerende gesprekken in 2023 zijn 62 akkerbouwers en 47 melkveehouders gesproken. De genoemde kansen en belemmeringen zijn opgenomen in Tabel 4 [24].

Tabel 4. Kansen en belemmeringen benoemd in de regionale netwerken

Kansen en belemmeringen									
Maatregelen	Bodem	Teelt				Sociaal-economisch			
	Bodem-kwaliteit	Gewas opbrengst	Droogte resistentie	Onkruid ⁹	Plagen en ziekten	Arbeid	Saldo	Brandstof	Kennis
Meer blijvend grasland					+	+			
Leeftijd grasland verhogen	+		+	–	–	+	+		–
Kruidenrijk grasland	+		+	–		+			
Wisselteelt mais-grasklaver		+		–		–			
Extra vaste mest		+	+				–		
Extra compost	+		¹⁰	–	+		–		
Aanpassen gewasrotatie	+				+		–	+	
Groenbemesters / vanggewassen					–				
Gewasresten achterlaten	+	–							
Vogelakkers							–		
Akkerranden				–	+		–		
Niet-kerende grondbewerking	+			–	–	+		+	
+ Benoemde kansen									
– Benoemde belemmeringen									

⁹ Onkruid: het gaat hierbij om meer onkruiden zoals bij compost en lastigere onkruidbeheersing zoals bij kruidenrijk grasland

¹⁰ Het opbrengen van compost zorgt waarschijnlijk voor betere droogte resistentie. In de netwerken wordt benoemd dat het areaal met compost langer groen bleef.

Lachgasemissie door klimaatmaatregelen

Hoewel sommige maatregelen kunnen leiden tot verhoogde lachgasemissies, kan op basis van een eerste kwalitatieve inschatting van de lachgasemissie als gevolg van klimaatmaatregelen kan worden geconcludeerd dat deze niet hoger is dan de CO₂-vastlegging (uitgedrukt in CO₂-equivalenten). Onzekerheden rondom effecten van maatregelen op de benodigde bemesting en emissiefactoren vragen echter verder onderzoek.

Om te bepalen of het doel van 0,5 Mton CO₂-eq vastlegging wordt behaald, dient de vastlegging van CO₂ te worden gecorrigeerd voor mogelijk toenemende lachgasemissies (N₂O-emissie) als gevolg van een hoger aandeel organische stof in de bodem. N₂O-emissies kunnen toenemen wanneer het bodemkoolstofgehalte toeneemt, doordat de organische stof waarin de koolstof zit, een energiebron is voor denitrificerende bacteriën. Deze bacteriën zijn verantwoordelijk voor N₂O-emissies. N₂O-emissies zijn van nature zeer variabel door onder andere weersinvloeden, wat het bepalen van de gemiddelde N₂O-emissie lastig maakt. De eerste resultaten uit Slim Landgebruik tonen dat verschillende emissiefactoren voor N₂O achterhaald zijn. Bovendien heeft bemesting een grote invloed op de N₂O-emissie en het is nog onduidelijk welke bemestingsnormen er straks zullen gelden bij de toepassing van verschillende maatregelen. Om deze reden is het enkel mogelijk een eerste grove inschatting te maken van het effect van maatregelen op de N₂O-emissie. De inschatting uit 2022 [16] is gebaseerd op eerste resultaten van de N₂O-metingen uit Slim Landgebruik, getallen uit de nationale emissieregistratie (NEMA), literatuuronderzoek en expert kennis.

Uit deze inschatting blijkt dat de (directe) N₂O-emissie (in CO₂-eq) door toepassing van een maatregel niet hoger zal zijn dan de gemodelleerde landelijke CO₂-vastlegging. Er bestaat dus weliswaar een risico op afwenteling van N₂O-emissies, maar deze resulteert op de korte termijn niet tot een netto toename van broeikasgasemissies. Enkel voor de maatregel niet-kerende grondbewerking is de verwachting dat de N₂O-emissie toeneemt, terwijl uit onderzoek blijkt dat de CO₂-vastlegging uitblijft. Op de lange termijn (>50 jaar) bestaat er een risico dat de CO₂-vastlegging stabiliseert, terwijl de N₂O-emissie hoog blijft.

Uit onderzoek blijkt dat er reden is om aan te nemen dat de N₂O-emissie als gevolg van maatregelen verschilt op zand- of kleibodems door bijvoorbeeld het zuurstofgehalte in de bodem het gehalte aan afbreekbaar organisch stof, zuurgraad en het water- en gastransport in de bodem [17]. Op basis van het areaal zand en klei uit Tabel 3 is de lachgasemissie per grondsoort bepaald.

Op basis van literatuuronderzoek in meta-analyses en resultaten uit de LTE's kan voor veel maatregelen een hoge zekerheid worden toegekend. Voor de maatregelen Leeftijd grasland verhogen en Extra compost op klei is de zekerheid zelfs zeer hoog, waarbij een positief effect wordt gevonden in meta-analyses en in meerdere LTE's. Maatregelen waarvan de zekerheid redelijk tot laag is, zijn over het algemeen maatregelen die minder vaak worden toegepast voor koolstofvastlegging, zoals vogelakkers en akkerranden of die enkel in Nederland worden toegepast (Wisselteelt mais-grasklaver). Voor het aanpassen van de gewasrotatie is de zekerheid eveneens redelijk, terwijl op basis van modelberekeningen wel een hoge vastlegging wordt verwacht. Dit is te verklaren door het feit dat het zeer lastig is om het effect van een gewasrotatie te meten in de bodem. Daarom ontbreekt het aan onderbouwende proeven, zowel in Nederland als internationaal.

Daarnaast blijkt uit de meerjarige analyse [13] dat de zekerheid van koolstofvastlegging het grootst is op kleibodems. Op zandbodems is de spreiding van de CO₂-vastlegging hoog voor alle gemeten maatregelen, waardoor de gemiddelde vastlegging op basis van de driejarige analyse weinig significant positieve resultaten toont. Het is vooralsnog onduidelijk of dit aan de bodemprocessen in zandgronden kan worden toegeschreven of inherent is aan de LTE proeven op zand.

Referenties

- [1] Coleman, K., & Jenkinson, D. S. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. In of soil organic matter models (pp. 237-246). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] de Haan, J. J., van den Elsen, E., & Visser, S. M. (2021). Evaluatie van de Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN), versie 1.0: BLN, versie 1.1 en de schets van een ontwikkelpad naar een BLN, versie 2.0 (No. WPR-883). Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research (WPR), Business unit Open Teelten.
- [3] Henriksen, C. B., Six, J., Van de Broek, M., Lugato, E., Debeljak, A., Ghaley, B. B., ... & Creamer, R. E. (2018). Key indicators and management strategies for carbon sequestration and climate regulation.
- [4] Hoogmoed, M., Janmaat, L., Verstand, D., Bijker, J.W., Schurer, B., Timmermans, B., Heesmans, H., Specken, J., Westerhof, H., Michielsen, C., Colombijn-van der Wende, K., & Koopmans, C. (2021a). Bodem en Klimaat Netwerk Akkerbouw: Voortgangsrapportage maart 2021. Louis Bolk Instituut, Bunnik.
- [5] Hoogmoed, M., Timmermans, B., Bloem, J., van Asperen, P., Cruijisen, J., de Haan, J., Norén, I.S., Slier, T., Wagenaar, J.P., Elsen, A., Martens, S., & Koopmans, C. (2021b). Verschillen in bodemkwaliteit door koolstofmaatregelen: In beeld gebracht aan de hand van de BLN-indicatorset. Louis Bolk Instituut, Bunnik.
- [6] Janmaat, L., & Koopmans, C. 2019. Bodem & Klimaat Netwerk – Akkerbouw. Bolk Instituut, Bunnik.
- [7] Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw.
- [8] Martinez Garcia, L.B., Herbert, Z.G.J., Westerik, D., Schepens, J.A.B. (2023). Carbon sequestration through agricultural practices—a review of international literature. Wageningen Environmental Research.
- [9] Rutgers, M., Trinsoutrot Gattin, I., Van Leeuwen, J., Menta, C., Gatti, F., Visioli, G., ... & Creamer, R. (2018). Key indicators and management strategies for soil biodiversity and habitat provisioning.
- [10] Selin Norén, I., Verstand, D., & de Haan, J. (2021). van bodemmaatregelen op bodemfuncties en bodemkwaliteit: integrale analyse van de resultaten uit de PPS Beter Bodembeheer en eerste vertaalslag naar praktische boodschappen (No. WPR-856). Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research (WPR), Business unit Open Teelten.
- [11] Selin Norén, I., Vervuurt, W., Bakker, N., Koopmans, C., Verstand, D., de Haan, J. (2022). Kwantitatieve effecten van bodemmaatregelen op bodemfuncties. Wageningen Research, Rapport WPR-OT 898.
- [12] Schepens, J.A.B., Timmermans, B.G.H., Herbert, Z.G.J., Hoogmoed, M., Fuchs, L., Heupink, D.T., Slier, T., Wagenaar, J.P., & Koopmans, C.J. (2022a). Effecten van koolstofvastleggende maatregelen op de (BLN)-bodemkwaliteit indicatoren—Deel 2. 34 pagina's.
- [13] Schepens, J.A.B., Timmermans, B.G.H., Bloem, J., Fuchs, L.M., Cruijisen, J.J.P., Slier, T., Heupink, D.T., Wagenaar, J.P., & Koopmans, C.J. (2024). Evaluatie van maatregelen voor koolstofvastlegging na zes jaar meten op Lange Termijn Locaties.
- [14] Schröder, J., Debeljak, M., Trajanov, A., Creamer, R. E., Delgado, T., Spiegel, H., ... & Wall, D. (2018). Key indicators and management strategies for nutrient cycling.
- [15] Schurer, B., Herbert, Z., van Hal, O., Wagenaar, J. P., Koopmans, C., Janmaat, L., & Schepens, J. (2022). Maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale bodems: ervaringen uit de praktijknetwerken van Slim Landgebruik. Louis Bolk Instituut.
- [16] Slier, T., Stout, B., Vervuurt, W., Schepens, J., Martinez Garcia, L., Velthof, G., Lesschen, J.P., Agricola, H., Westerik, D., Koopmans, C., & van Middelaar, J. (2022). Integratierapport Slim Landgebruik. Verdieping op de effecten van maatregelen binnen Slim Landgebruik. Wageningen Environmental Research.
- [17] Slier, T., & Velthof, G., (2021). 30 vragen en antwoorden over lachgasemissies uit landbouwgronden. Wageningen, Wageningen Environmental Research.
- [18] Smit, A.B., Daatselaar, C.H.G., Knol, E.E., Bijker, J.W., Van der Burgt, E.A.P., Vervuurt, W., Janmaat, L., Wagenaar, J.P., van den Berg, L., Oltmer, K., Raoult, J.E. Geerling-Eiff, F.A., (2024). Langetermijn kosten en opbrengsten van koolstofvastlegging
- [19] Van der Kolk, J., Agricola, H., te Pas, E., Slier, T., Smit, B., & Staps, S. (2021). No-regret maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale landbouwbodems: Een verkennende studie. Wageningen, Wageningen Environmental Research.
- [20] Van Eekeren, N., de Wit, J., Evers, A., & de Haan, M. (2018). Verandering land gebruik voor bodemkwaliteit ook winst gevend voor intensieve bedrijven., 33.
- [21] Verstand, D., Bijker, W., Evers, A., van der Burgt, E., van Hal, O., Wagenaar, J.P., Smit, B., & de Haan, M. (2022) Kosten en baten van koolstofmaatregelpakketten.
- [22] Vervuurt, W., Schepens, J.A.B., Ros., G.H., Hoogmoed, M., Koopmans, C., (2024). Effecten van maatregelen voor koolstofvastlegging op de bodemkwaliteit, synthese van de resultaten van de jaren 2019, 2020 en 2021.
- [23] Wagenaar, J.P., Wattel, E., Thissen, W., Hoefnagels, F., Hoogmoed, M., van Schie, T., Heesmans, H., Specken, J., Spriensma, W., Colombijn-van der Wende, K., van Middelaar, J., Jelsma, M., Ansems, E., Antonissen, H., Janmaat, L., (2024). Koolstofvastlegging op minerale landbouwbodems in de praktijk, netwerken akkerbouw en veehouderij, overzichtsrappportage 2018 – 2023.
- [24] Wall, D., O'Sullivan, L., Debeljak, M., Trajanov, A., Schröder, J. E., & Bugge Henriksen, C., (2018). Key indicators and management strategies for water purification and regulation.