

# 30 vragen en antwoorden over koolstofvastlegging in minerale landbouwgronden



**Slim**  
Landgebruik

---

# Colofon

Deze publicatie is tot stand gekomen als onderdeel van het programma ‘Slim Landgebruik’ dat sinds 2018 wordt uitgevoerd door Wageningen University & Research, het Louis Bolk Instituut en het Centrum voor Landbouw en Milieu. Het project waarbinnen deze publicatie tot stand is gekomen is gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Deze publicatie is tot stand gekomen mede dankzij de bijdrage van Hanneke Heesmans, Peter Kuikman, Hedwig Boerrighter, Peter Knippels, Jan Peter Lesschen, Carin Rougoor, Chantal Hendriks, Martin Knotters, Dorothee van Tol-Leenders, Gerard Velthof, Daan Verstand, Rob Comans, Mathilde Hagens, Albert de Vries, Dorien Westerik en Chris Koopmans.

Wageningen Environmental Research  
Mei, 2022

## Auteurs

Loes Verdonk<sup>1</sup>, Jennie van der Kolk<sup>1</sup>, Thalisa Slier<sup>1</sup>,  
Jonas Schepens<sup>2</sup> & Wieke Vervuurt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wageningen University & Research

<sup>2</sup> Louis Bolk Instituut

Contact: [slimlandgebruik@wur.nl](mailto:slimlandgebruik@wur.nl)

---

# Voorwoord

Eén van de maatregelen die in het klimaatakkoord is voorgesteld om de klimaatdoelen van 2030 te gaan halen is het vastleggen van koolstof in minerale landbodems. Een maatregel die niet leidt tot emissiebeperking, maar zorgt voor CO<sub>2</sub> vastlegging.

Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit heeft in het kader van het onderzoek hoe de klimaatdoelen voor landbouw en landgebruik kunnen worden gehaald, gevraagd de belangrijkste vragen en antwoorden rondom koolstofvastlegging in minerale landbouwbodems op een toegankelijke manier te beschrijven. Deze publicatie geeft in 30 vragen en antwoorden de stand van het onderzoek op dit moment weer.

---

# Inhoud

Colofon .....	2
Voorwoord .....	3
Inleiding .....	6
1. Wat is koolstofvastlegging in de bodem? .....	8
2. Hoe draagt koolstofvastlegging bij aan het oplossen van de klimaatproblematiek? .....	10
3. In welke vorm wordt koolstof vastgelegd in de bodem? .....	12
4. Wat is de huidige koolstofvoorraad in Nederlandse minerale bodems? .....	14
5. Bestaat er een maximum in de koolstofvastlegging in de bodem? .....	16
6. Verschilt koolstofvastlegging tussen bodemtypen? .....	18
7. Waar in de bodem wordt koolstof vastgelegd? .....	20
8. Hoelang blijft de koolstof vastgelegd in de bodem? .....	22
9. Hoe wordt de koolstofvoorraad in de bodem vastgesteld? .....	25
10. Wat is de zekerheid bij het bepalen van koolstofvastlegging? .....	28
11. Welke rol spelen modellen bij het bepalen van koolstofvastlegging? .....	30
12. Wat is de invloed van koolstofvastlegging op emissie van lachgas? .....	32
13. Wat is de relatie tussen koolstofvastlegging en andere bodemdiensten? .....	34
14. Hoe interacteert koolstofvastlegging als onderdeel van het klimaatmitigatiebeleid met andere (bodem)beleidsterreinen? .....	37
15. Welk effect heeft het weer op koolstofvastlegging? .....	40
16. Welk effect heeft bodemverdichting op koolstofvastlegging? .....	43
17. Welk effect heeft gewaskeuze op koolstofvastlegging? .....	45
18. Welk effect heeft landgebruik op koolstofvastlegging? .....	47
19. Welk effect heeft organische bemesting op koolstofvastlegging? .....	49
20. Hoe kunnen veranderingen in het bouwplan in akkerbouwmatige teelten bijdragen aan koolstofvastlegging? ..	51
21. Hoe kunnen veranderingen in graslandbeheer bijdragen aan koolstofvastlegging? .....	55
22. Wat kan nog meer worden gedaan om koolstof vast te leggen in Nederlandse minerale landbouwbodems? ..	57
23. Wat zijn de kosten van maatregelen om koolstof vast te leggen op de korte termijn? .....	60
24. Wat zijn de effecten van maatregelen op andere bodemdiensten? .....	62
25. Wat zijn kansen en belemmeringen voor inpassing van maatregelen om koolstof vast te leggen in het bedrijf? ..	65

---

26. Op welke manier kunnen boeren gemotiveerd worden om maatregelen te nemen die koolstof vastleggen? ..	68
27. Wat zijn de mogelijkheden van koolstofcertificaten? .....	72
28. Hoe worden de koolstofvoorraad en koolstofvastlegging in Nederlandse minerale landbouwbodems gemonitord? .....	76
29. Hoe wordt koolstofvastlegging in Nederlandse minerale landbouwbodems gerapporteerd? .....	78
30. Gaan we het doel voor additionele vastlegging van 0,4 - 0,6 Mton CO <sub>2</sub> -eq per jaar vanaf 2030 in Nederlandse minerale landbouwbodems halen? .....	80
Begrippenlijst .....	82
Referenties .....	87
Illustratieverantwoording .....	101

---

# Inleiding

In 2015 heeft Nederland zich gecommitteerd aan het Klimaatakkoord van Parijs. Om de klimaatdoelen te halen, is het reduceren van broeikasgasemissies of het extra vastleggen van koolstof van essentieel belang. Landbouwbodems hebben de potentie om koolstof uit de atmosfeer vast te leggen.

In het Nederlandse klimaatakkoord is voor minerale landbouwbodems als doelstelling opgenomen dat er jaarlijks 0,4 – 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-equivalenten moet worden vastgelegd vanaf 2030. Dit doel kan worden bereikt door het nemen van maatregelen om het organische stofgehalte in de minerale landbouwbodems te verhogen.

Hoe kan de organische stof in de landbouwbodems worden verhoogd? En wat komt daar allemaal bij kijken? Dit boekje is geschreven om antwoord te geven op een dertigtal

vragen rondom koolstofvastlegging in minerale landbouwbodems. Dit boekje geeft achtergronden weer, maar geeft ook een overzicht van de laatste stand van zaken van het onderzoek dat sinds 2018 wordt uitgevoerd in het kader van het onderzoeksprogramma Slim Landgebruik. Het is de bedoeling dit boekje te updaten wanneer nieuwe inzichten vanuit het onderzoek voorhanden zijn.

Het boekje bevat vragen die inzicht geven in de basis-kennis over koolstofvastlegging. Ook zijn er vragen gericht op de monitoring van koolstofvastlegging, welke maatregelen bijdragen aan koolstofvastlegging en ook vragen die ingaan op het effect van koolstofvastlegging op andere bodemfuncties en de mogelijke incentives voor boeren om maatregelen te gaan nemen. Het boekje wordt besloten met de vraag of we de doelen voor koolstofvastlegging voor 2030 kunnen gaan halen.



# Wat is koolstofvastlegging in de bodem?



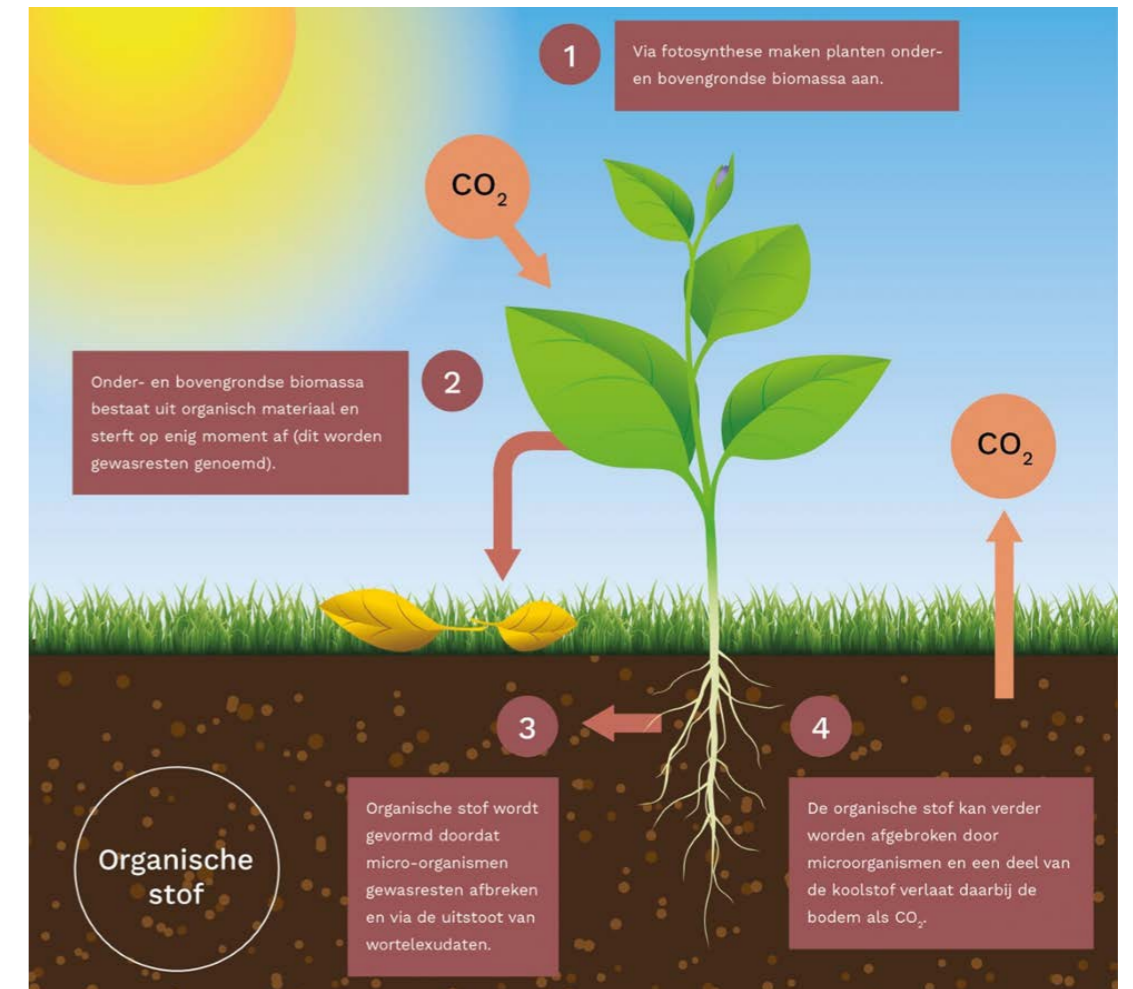
Koolstof (C) is de basis van al het menselijk, dierlijk en plantaardig leven. In de bodem komt koolstof voor in de vorm van *organische stof*. Organische stof is een verzamelnaam voor al het materiaal dat afkomstig is van planten, dieren en micro-organismen. Organische stof in de bodem bestaat voornamelijk uit dood materiaal, zoals van gewasresten, dode wortels en dierlijke mest, maar ook uit levende micro-organismen. De bouwstenen van organische stof zijn vooral koolstof, zuurstof (O) en waterstof (H) en kleine hoeveelheden van andere elementen zoals stikstof (N), fosfor (P) en/of zwavel (S). Koolstofvastlegging betekent dat de koolstof in koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) uit de lucht wordt vastgelegd in organische stof. Dit gebeurt via *fotosynthese* door planten. Fotosynthese is het onder

invloed van zonlicht omzetten van CO<sub>2</sub> en water (H<sub>2</sub>O) in zuurstof (O<sub>2</sub>) en koolwaterstofverbindingen zoals suikers (bijvoorbeeld glucose). De koolwaterstofverbindingen vormen de *biomassa* van de planten boven (bladeren en stengels) en onder de grond (wortels). Biomassa is organisch materiaal dat uit dezelfde bouwstenen bestaat als organische stof. Het bovengrondse organisch materiaal kan na het afsterven van de plant in de bodem terechtkomen waar de koolstof kan worden vastgelegd. De aanvoer van organisch materiaal kan ook ondergronds plaatsvinden via het afsterven van wortels en de uitstoot van *wortellexudaten*. Wortellexudaten zijn stoffen die wortels uitscheiden en waarmee ook koolstof in de bodem wordt gebracht. De aanvoerweg die het meest bijdraagt

aan de aanvoer van organisch materiaal in de bodem, is de aanvoer via afgestorven wortels en de wortellexudaten (zie Figuur). Dit komt doordat koolstof in diepere bodemlagen langer opgeslagen blijft en doordat het zuurstofgehalte afneemt met bodemdiepte, waardoor wortelresten langzamer worden afgebroken dan bovengrondse biomassa. Naast de koolstofvastlegging via planten, is het aanvoeren van externe organische meststoffen een manier om het organische materiaal in de bodem aan te voeren.

De dynamiek van organische stof in de bodem wordt bepaald door de balans tussen afbraak en aanvoer van organische stof. Bij de afbraak van organische stof door *micro-organismen*, zoals bacteriën en schimmels, komt onder andere koolstof vrij in de vorm van CO<sub>2</sub>, ook wel *bodemademhaling* genoemd. Indien de afbraak van organische stof kleiner is dan de aanvoer van organische stof over een bepaalde tijdsperiode, wordt de hoeveelheid organische stof in de bodem groter en zal er sprake zijn van koolstofvastlegging. Zolang het organische materiaal niet tot CO<sub>2</sub> wordt afgebroken (bijvoorbeeld door moeilijk afbreekbare plantenresten) door bodemorganismen blijft de CO<sub>2</sub>, die door de

plant is opgenomen, vastgelegd in de bodem. Dit leidt tot een nieuw evenwicht in de organische stofbalans, waarbij de opbouw van organische stof uiteindelijk gelijk is aan de afbraak daarvan. Het punt waarop dit evenwicht ontstaat is afhankelijk van het klimaat en het bodembeheer. De term koolstofvastlegging verwijst dus naar de netto vastlegging van koolstof. Onderstaand Figuur geeft schematisch en stapsgewijs weer hoe koolstofvastlegging in de bodem plaatsvindt.



Schematische en stapsgewijze weergave van koolstofvastlegging in de bodem.



# Hoe draagt koolstof-vastlegging bij aan het oplossen van de klimaatproblematiek?

2

Het verhogen van het koolstofgehalte (door het ophogen van de organische stofgehalte van de bodem) kan een bijdrage leveren aan de aanpak van het klimaatprobleem, omdat door extra koolstof vast te leggen in de bodem het gehalte koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) in de atmosfeer afneemt. Koolstofdioxide is een broeikasgas dat bijdraagt aan *klimaatverandering*. Als gevolg van de klimaatverandering stijgt de gemiddelde temperatuur op aarde doordat broeikasgassen *infraroodstraling* absorberen dat anders door de aarde terug naar de ruimte wordt uitgestraald. Klimaatverandering heeft impact op de leefbaarheid van de aarde doordat temperaturen hoger worden, de zeespiegel stijgt en droogte en hevige regenbuien vaker voor kunnen komen. In het *Klimaatakkoord van Parijs* (2015) is daarom afgesproken om de temperatuurstijging

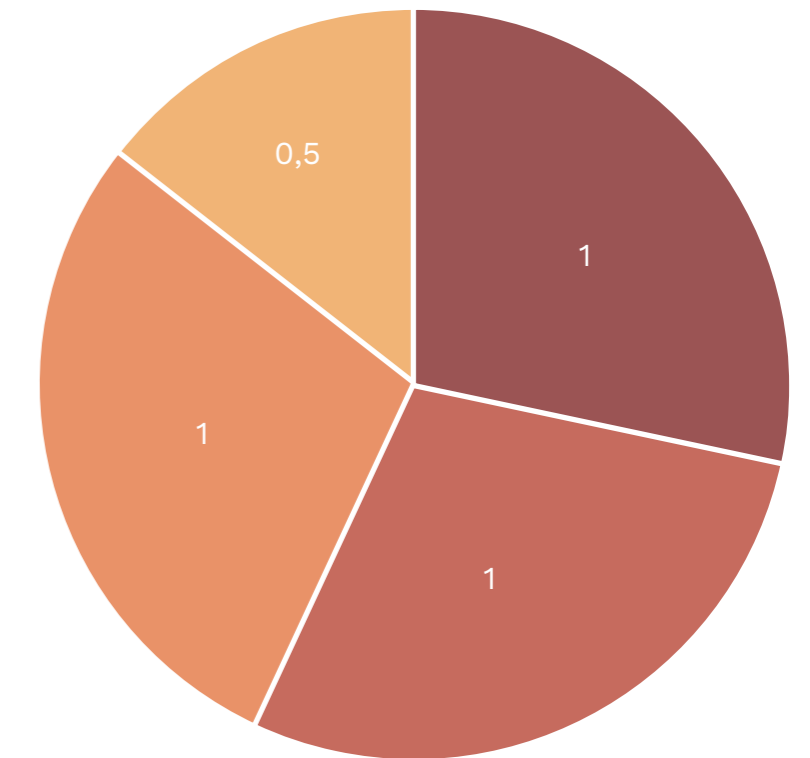
ten opzichte van de gemiddelde temperatuur in het pre-industrieel tijdperk (rond 1850) te beperken tot 1,5°C. Om te voorkomen dat de temperatuur nog verder stijgt, dient de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer stabiel te blijven of verlaagd te worden. Het inzetten van methoden om dat te bereiken wordt ook wel *klimaatmitigatie* genoemd. Enerzijds kan dit bereikt worden door een vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot (bijvoorbeeld het terugbrengen van het gebruik van fossiele brandstoffen), anderzijds door het langdurig onttrekken van CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer. Een manier om dit te doen is door koolstof vast te leggen in de bodem. De potentie van koolstofvastlegging in de bodem door de landgebruik sector, is bij het Klimaatakkoord van Parijs naar voren gebracht via het '4 per 1000 Initiatief'. Het doel hiervan is om de hoeveelheid

organische stof in de bovenste 30-40 cm van Europese bodems jaarlijks met 0,4% te verhogen. In de Nederlandse context is het Klimaatakkoord van Parijs vertaald naar het *Nederlandse Klimaatakkoord* (2019) (zie Figuur). Binnen het Nederlandse Klimaatakkoord is het doel gesteld om in 2030 49% minder broeikasgassen uit te stoten t.o.v. 1990. De landbouw- en landgebruik sector is verantwoordelijk voor ongeveer 14% van de totale Nederlandse broeikasgasemissie. Volgens het Regeerakkoord van 2017 moet de landbouw- en landgebruik sector in 2030 de emissie met 3,5 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar verminderen ten opzichte van 1990 (zie Figuur). In het nieuwe Regeerakkoord (2021) is de doelstelling verhoogd naar 6,0 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vanaf 2030 om te kunnen voldoen aan de afspraak binnen de EU om in 2050 klimaatneutraal te zijn. Dit doel moet onder andere gerealiseerd worden door vanaf 2030 een additionele hoeveelheid van 0,4 – 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vast te leggen in *minerale* landbouwbodems. Als deze 0,4 – 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq vastlegging gelijk wordt verdeeld over alle Nederlandse minerale landbouwgronden, betekent dit een toename (per jaar) van gemiddeld van minder dan 0,03%-punt in het organische stofgehalte in alle minerale landbouwbodems.

## Wat is een procentpunt (%-punt)?

Een procentpunt (%-punt) is een eenheid om de absolute verschillen in twee percentages (%) aan te duiden. Het is anders dan procent (%) omdat dit het relatieve percentageverschil uitdrukt. Een voorbeeld: tussen 10 en 20% zit 10%-punt verschil, maar is 20% een verhoging met 100% vergeleken met 10%.

## Emissiereductie per sector in Mton CO<sub>2</sub>-eq



Verdeling van de emissiereductie voor de landbouwsector op basis van het Regeerakkoord (2017).

- Methaanreductie
- Glastuinbouw
- Slimmer landgebruik Veenweide
- Slimmer landgebruik Minerale bodem



# In welke vorm wordt koolstof vastgelegd in de bodem?



Koolstof wordt in de bodem vastgelegd in de vorm van organische stof. Door afbraak van gewasresten en aanvoer van organische stof via de wortels wordt organische stof in de bodem gevormd. Organische stof komt in verschillende vormen voor in de bodem. De vormen van organische stof verschillen onder andere in grootte en stabiliteit als gevolg van de processen die de organische stof vormen. Onder andere de chemische verschillen tussen de vormen van organische stof hebben invloed op de afbraaksnelheid van organische stof en dus het netto potentieel om koolstof vast te leggen.

Moeilijk afbreekbare organische stof is stabielere dan makkelijkere afbreekbare stof doordat het niet verder afgebroken kan worden door micro-organismen. De

afbreekbaarheid wordt vooral bepaald door chemische en fysische mechanismes die beschermen tegen afbraak. Bescherming kan onder andere plaatsvinden door binding van organische stof aan mineraaloppervlakten (chemisch) of binding binnen *bodemaggregaten* (fysisch). Op deze manier kunnen relatief makkelijk afbreekbare plantenresten lang in de bodem blijven bestaan zonder afgebroken te worden. Ook is het belang van micro-organismen voor de stabiliteit van organische stof groter dan eerder gedacht, aangezien de organische stof die ontstaat uit dode micro-organismen (necromassa) een grote bijdrage levert aan de stabiliteit van organische stof. Op basis van de ontstaanswijze en de functie in de bodem kan organische stof grofweg opgedeeld worden in de vorm van:

- **Opgeloste organische stof**

(Engels: *dissolved organic matter*)

Dit is organische stof die is opgelost in het bodemvocht.

- **Particulaire organische stof**

(Engels: *particulate organic matter*)

Dit is de organische stof die nog relatief onbewerkt is door micro-organismen, zoals bladafval of kleine stukjes organisch materiaal. Hier vallen ook levende micro-organismen onder.

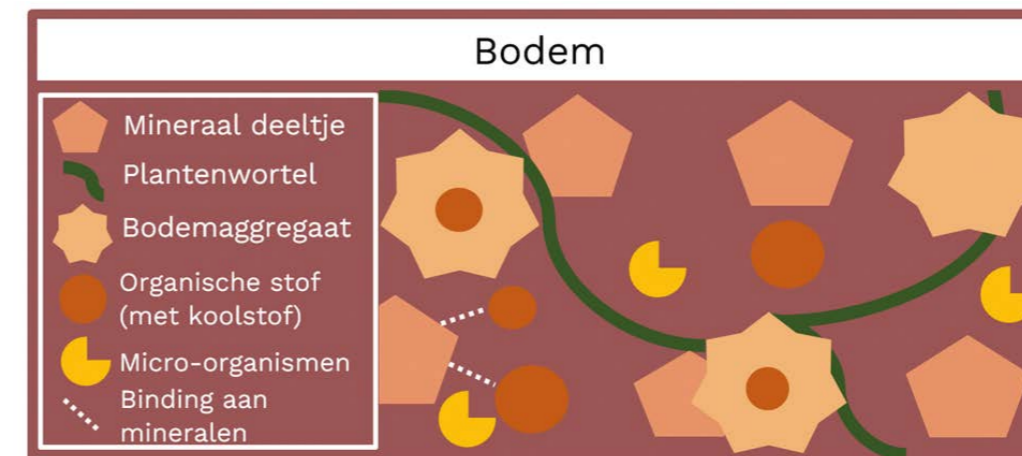
- **Mineraal-gebonden organische stof**

(Engels: *mineral-associated organic matter*)

Dit is organische stof die beschermd is van afbraak doordat het gebonden is aan mineralen. De mineraal-gebonden organische stof bestaat uit opgeloste onbewerkte organische stof of uit organische stof die al bewerkt is door micro-organismen. De resten van micro-organismen kunnen ook gebonden worden aan mineralen. De mineraal-gebonden organische stof is het meest stabiel in de bodem.

Mineraal-gebonden en particulaire organische stof kan hiernaast ingesloten worden in *bodemaggregaten*. Bodemaggregaten worden gevormd bij de verkitting van bodemdeeltjes waarin organische stof “opgesloten” kan worden. Hierdoor is de organische stof beschermt tegen zuurstof en micro-organismen, welke bijdragen aan de afbraak. Organische stof die gebonden is aan mineralen kan ook weer ontbinden en bodemaggregaten kunnen opgebroken worden, waardoor de organische stof vrij kan komen voor afbraak en omzetting in CO<sub>2</sub> of een andere vorm van organische stof. Onderstaand Figuur geeft schematisch weer hoe de verschillende vormen van organische stof samenhangen.

De precieze verdeling van organische stof over de verschillende vormen verschilt per bodemtype en landgebruik. De levende fractie waar micro- en macro-organismen (zoals regenwormen) onder vallen is wel vaak minder dan 5%.



Schematische weergave van een bodem. De bodem bestaat onder andere uit minerale deeltjes, plantenwortels, bodemaggregaten, organische stof en micro-organismen. Daartussen bevinden zich bodemporiën met lucht en/of bodemvocht. De binding van organische stof aan minerale deeltjes is hier schematisch weergegeven met de witte stippellijn.



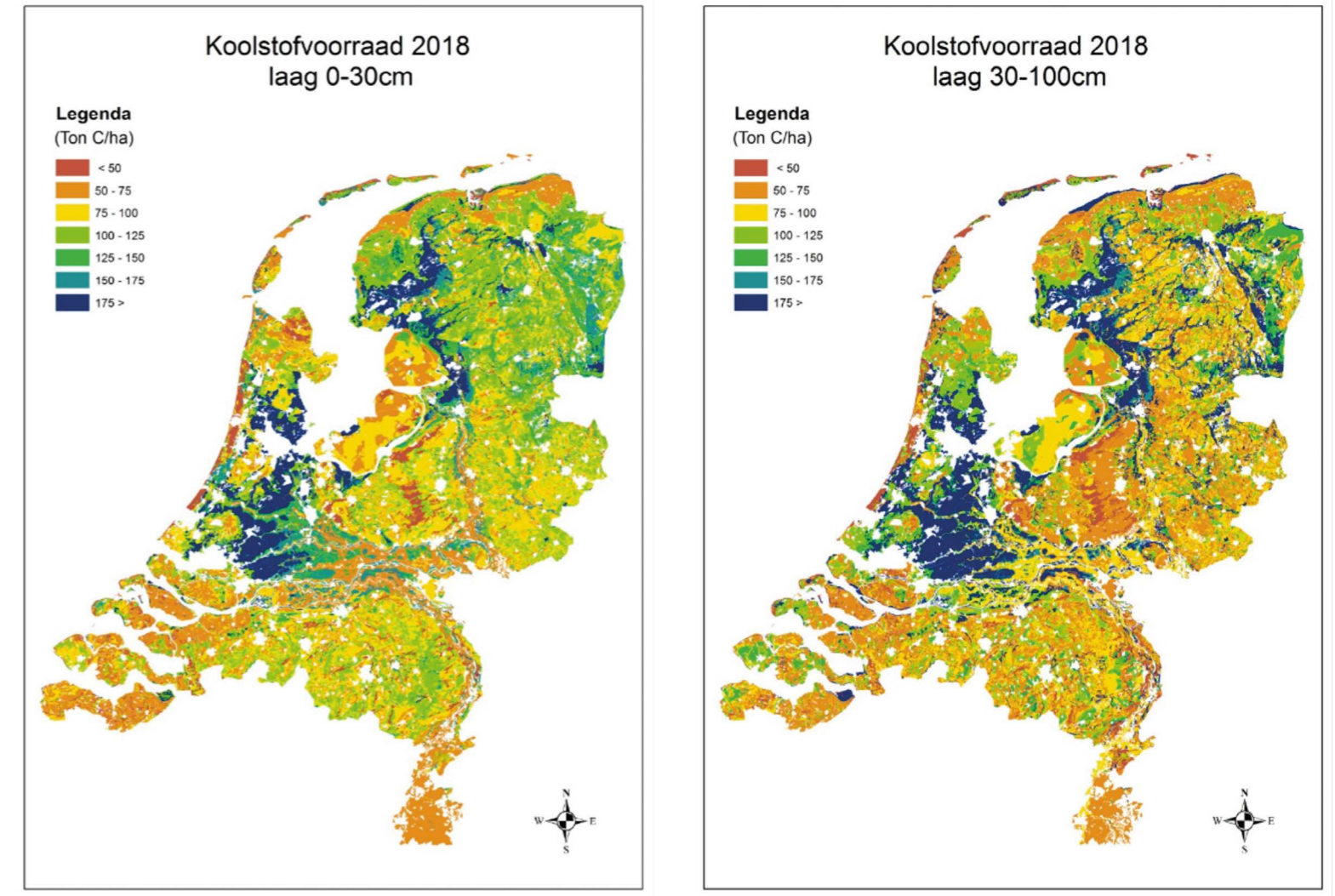
# Wat is de huidige koolstofvoorraad in Nederlandse minerale bodems?



De hoeveelheid koolstof die in de bodem zit wordt ook wel aangeduid met de *koolstofvoorraad*. In 2018 is de koolstofvoorraad in Nederlandse bodems gemeten door op 1152 locaties van het 'CC-NL netwerk' een steekproef te nemen.

Hieruit blijkt dat op basis van een areaal van 2.870.671 ha Nederlandse organische en minerale bodems de totale koolstofvoorraad 267 Mton C bedraagt in de laag 0-30 cm en 346 Mton C in de laag 30-100 cm. Dit geldt voor alle typen landgebruik op alle minerale bodems samen. Uit vergelijking van de voorraad gemeten in 1998 blijkt dat in de periode 1998-2018 de koolstofvoorraad in de Nederlandse bodems is afgenomen met 18 Mton C in de laag 0-30 cm en met 76 Mton C in de laag 30-100 cm.

De gemeten afname in de koolstofvoorraad kan duiden op een werkelijke afname, maar kan ook te wijten zijn aan het verschil in de bepaling van de dichtheden in 1998 en 2018. Deze dichtheden zijn nodig om het organische stofgehalte om te rekenen naar koolstofvoorraad. Het blijkt dat het organische stofgehalte vrijwel gelijk is gebleven. De gebruikte dichtheden kunnen afwijken in 1998 en 2018 doordat deze met verschillende methoden zijn bepaald ([vraag 9](#)). Daarnaast moet rekening gehouden worden met het veranderde landgebruik en het effect daarvan op de bodemkoolstofvoorraad: als grasland wordt omgezet naar akkerland, leidt dit tot een afname van de koolstofvoorraad. Onderstaand Figuur laat de landelijke ruimtelijke verdeling van de koolstofvoorraad in Nederlandse bodems zien.



Gemiddelde koolstofvoorraad in de Nederlandse bodems in de laag 0 – 30 cm (links) en 30 – 100 cm (rechts) (Tol-Leenders et al., 2019).



# Bestaat er een maximum in de koolstofvastlegging in de bodem?

5

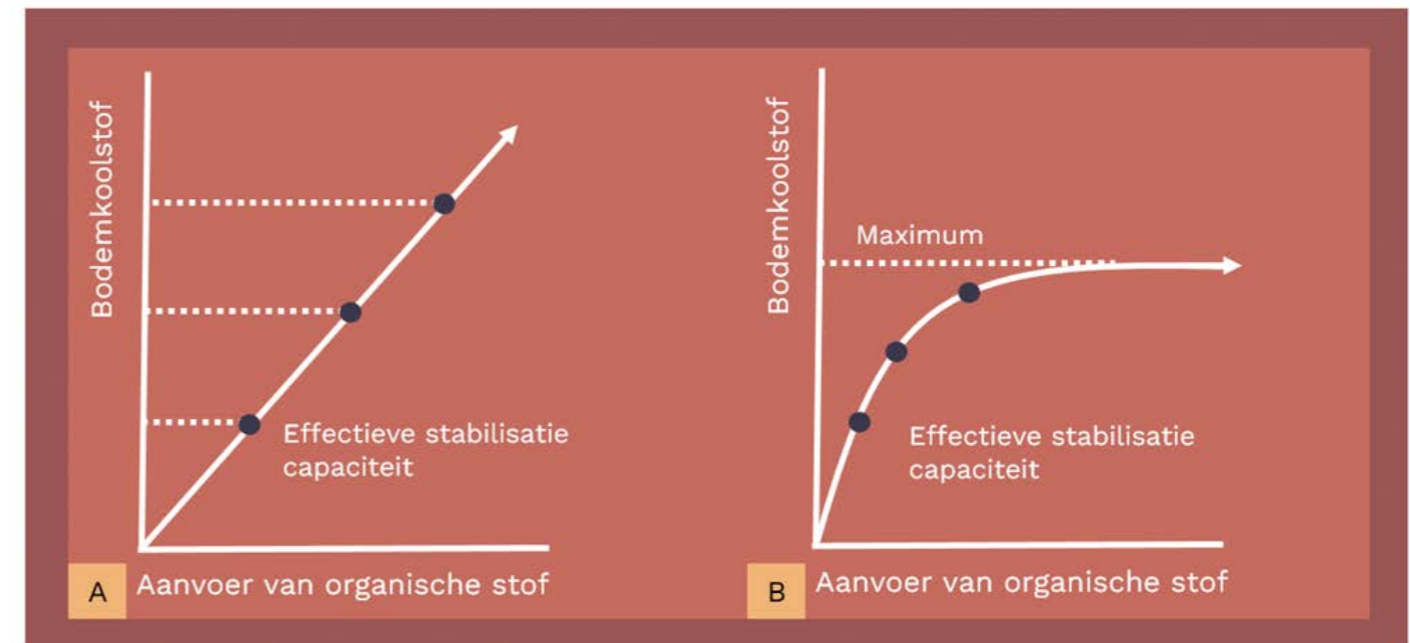
Het is belangrijk voor het behalen van de klimaatdoelen om te weten wat de potentie voor koolstofvastlegging op de lange termijn is (> tien jaar). Hierbij speelt ook het mogelijke bestaan van een plafond of *verzadigingsniveau* in de koolstof die de bodem kan vastleggen een rol. Het is namelijk niet vanzelfsprekend dat alle aanvoer van organische stof ook wordt vastgelegd in de bodem en vastgelegd blijft. Als de bodem dicht bij een potentiële maximale koolstofvoorraad zit, vindt er minder koolstofvastlegging plaats dan bij bodems die er verder van af zitten. Wetenschappers zijn het echter niet met elkaar eens of er een maximum zit aan de hoeveelheid koolstof die een bodem kan opslaan en hoe dit maximum afhankelijk is van de bodemcondities.

Een belangrijk concept hierbij is *effectieve stabilisatiecapaciteit*. Een *effectieve stabilisatiecapaciteit* is een evenwichtsniveau en geeft de balans tussen aanvoer en afbraak van organische stof weer. De bodem kan verschillende effectieve stabilisatiecapaciteiten bereiken. Hierdoor lijkt het alsof de bodem verzadigt, maar kan de bodemkoolstofvoorraad nog wel veranderen bij ander bodembeheer of een verandering in het klimaat (hogere temperatuur, extreme droogte of regenval). Figuur A laat zien dat de potentiële *effectieve stabilisatiecapaciteit* van de bodemkoolstofvoorraad bij een hogere organische stofaanvoer blijft toenemen.

Echter kan het ook mogelijk zijn dat een bodem naast de verschillende *effectieve stabilisatiecapaciteiten* ook een *absoluut verzadigingsniveau* bereikt. Een absoluut verzadigingsniveau houdt in dat er wel een limiet is aan de hoeveelheid koolstof die de bodem kan opslaan. De hoeveelheid koolstof waarmee de bodemkoolstofvoorraad toeneemt bij een hogere aanvoer van organische stof neemt dan af. De bodem kan dan ook verschillende effectieve stabilisatiecapaciteiten bereiken, maar die liggen naarmate de aanvoer van organische stof hoger wordt steeds dichter bij elkaar. Figuur B geeft het absolute verzadigingsniveau weer als

stippellijn, waarbij te zien is dat met een hogere aanvoer van organische stof de toename van de koolstofvoorraad steeds kleiner wordt en uiteindelijk niet meer toeneemt.

Het is voor het gebruik van koolstofvastlegging als klimaatmaatregel belangrijk om te weten of er in een bodem met een hoge koolstofvoorraad überhaupt een hogere koolstofvoorraad als gevolg van de extra koolstofvastlegging bereikt kan worden. Dit hangt ervan af of er sprake is van een maximum in de koolstofvoorraad. Onderzoek hiernaar is daarom van belang.



Het verschil tussen een effectief stabilisatieniveau en een maximale koolstofopslag, aangepast naar Stewart et al. (2007) en West en Six (2007). Met figuur A wordt de situatie weergegeven als er geen absoluut verzadigingsniveau is, waarbij het bodemkoolstofgehalte blijft toenemen wanneer de aanvoer van organische stof toeneemt. Figuur B geeft de situatie weer waarin er wel sprake is van een absoluut verzadigingsniveau. De zwarte punten geven de effectieve stabilisatiecapaciteiten weer waarbij aanvoer en afbraak van organische stof gelijk is.



# Verschilt koolstofvastlegging tussen bodemtypen?



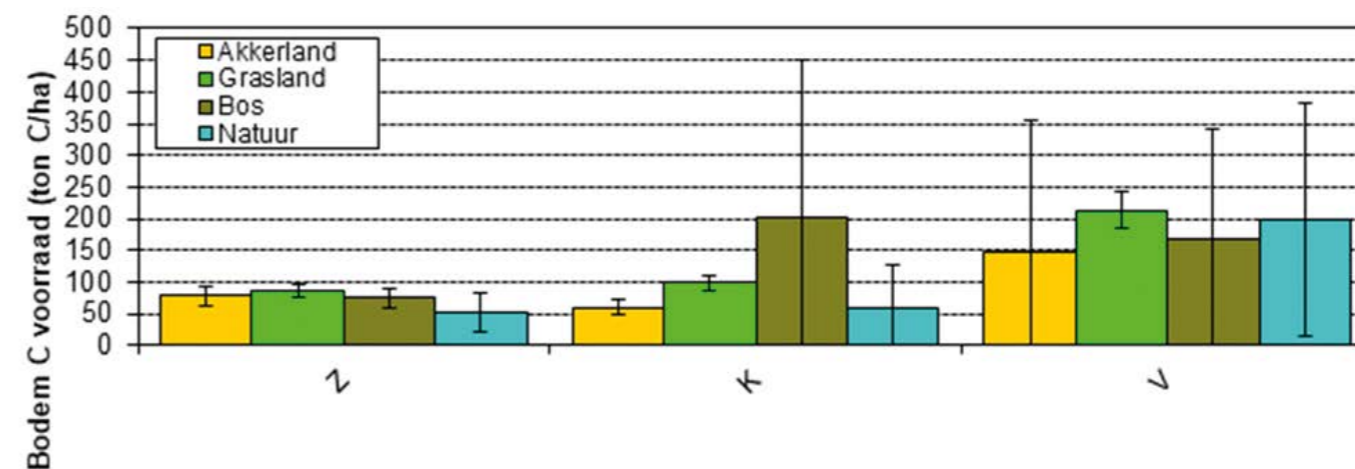
In Nederland kunnen bodems globaal opgedeeld worden in klei-, zand- en veenbodems. Deze bodemtypen verschillen in de eerste plaats op basis van de manier waarop de bodems zijn ontstaan. De oorsprong kan namelijk organisch of mineraal zijn. Bodems met een organische oorsprong ontstaan door ophoping van onverteerde en deels verteerde plantenresten als gevolg van een lagere zuurgraad en een hoge grondwaterstand (daarbij is minder zuurstof beschikbaar voor de afbraak van plantenresten). Bodems met een minerale oorsprong zijn ontstaan uit afzetting van minerale deeltjes door de wind of overstromingen vanuit de rivieren en zee. Veenbodems zijn organische bodems en klei- en zandbodems zijn minerale bodems. Veenbodems zijn natte bodems die bestaan uit

(grotendeels) onverteerde plantenresten en hebben een hoog organische stofgehalte tussen de 35-70%.

In minerale bodems kan koolstof zich binden aan het oppervlak van minerale bodemdeeltjes en dit verschilt tussen de diverse minerale bodemtypen, doordat ieder bodemtype een andere verdeling heeft van de grootte en de hoeveelheid bodemdeeltjes. De minerale bodemdeeltjes die kleiner zijn dan 2  $\mu\text{m}$  worden ook wel *lutum* genoemd en het lutumgehalte bepaalt de verschillen tussen minerale bodemtypen. Bodems met een lutumgehalte tussen de 25-100% worden gedefinieerd als kleibodems en bodems met een lutumgehalte tussen de 0-8% als zandbodems. Kleibodems hebben meestal hogere

organische stofgehalten dan zandbodems, omdat een hogere concentratie lutumdeeltjes een hogere hoeveelheid organische stof en daarmee koolstof kan binden. Klei- en zandbodems hebben organische stofgehalten van respectievelijk 0-25% en 0-15%. Hiernaast kan een hoger lutumgehalte de vorming van bodemaggregaten stimuleren, waarin organische stof afgeschermd wordt van afbraak. De potentie voor koolstofvastlegging is daarom

hogere in kleibodems dan in zandbodems. Onderstaand Figuur geeft de verschillen in koolstofvoorraad per bodemtype (klei, zand en veen) weer. Echter bepalen niet alleen de verschillen in bodemtype de potentie voor koolstofvastlegging, aangezien organische stofgehalten ook (sterk) afhankelijk zijn van factoren als de zuurtegraad van de bodem, het type bodembeheer, klimaat en gewastype (vragen 17-22).



Verschil in koolstofvoorraad per bodemtype in Nederland in de laag 0-30 cm.

De error bars geven 95%-betrouwbaarheidsintervallen aan.

ZE = zandgronden met eerdlaag >30 cm, ZO = overige zandgronden,

K = kleigronden, L = leemgronden,

M = moerige gronden en V = veengronden

(van Tol-Leenders et al. 2019).



# Waar in de bodem wordt koolstof vastgelegd?



## De koolstofverdeling over het bodemprofiel

Koolstof kan over het gehele bodemprofiel worden vastgelegd. Een bodemprofiel is een verticale doorsnede van een bodem. De totale koolstofvoorraad in een bodem is niet gelijkmatig verdeeld over een profiel. Organische stof (en daarmee koolstof) komt in de bovenste laag (0-30 cm) in de bodem via plantenwortels, het afsterven van plantenwortels, plantenresten of via het aanbrengen van mest, waarna het afgebroken wordt en/of verplaatst kan worden naar diepere lagen. In de bovenste lagen is de afbraak sneller dan in de onderste lagen, omdat er daar meer zuurstof beschikbaar is. Bodemorganismen hebben deze

zuurstof nodig bij de afbraak van vers organisch materiaal. De verplaatsing van organische stof naar diepere lagen gebeurt vooral via bodemorganismen of wortels in diepere lagen. Het bodemleven omvat onder andere mieren en regenwormen die organische stof kunnen verplaatsen bij het graven van gangetjes in de bodem. De diepte van de beworteling van het gewas bepaalt tot waar in het bodemprofiel koolstof wordt aangevoerd via wortellexudaten en wortelresten. Afhankelijk van het bodemtype, klimaat en landgebruik kan de verdeling van koolstof over het bodemprofiel ook verschillen.

## Het bodemprofiel en koolstofvastlegging

De organische stof in de diepere lagen blijft langer aanwezig, omdat daar 1) meer organische stof kan binden aan mineralen en 2) minder zuurstof en micro-organismen aanwezig zijn voor afbraak van organische stof. Daarmee zijn de diepere bodemlagen een effectieve plek om koolstof vast te leggen op de langere termijn. In de praktijk wordt de meeste koolstof vastgelegd in de laag

0-30 cm door het toebrengen van mest of plantenresten of passief doordat wortels *wortellexudaten* uitscheiden of in de bodem afsterven. Vervolgens wordt het organische materiaal door het bodemleven verder door de bodem getransporteerd of tijdens de grondbewerking onderwerkt. De hoogste organische stofgehalten bevinden zich daardoor over het algemeen in de bovenste bodemlaag.



Een bodemmonster genomen met een guts, waarmee de verschillende bodemlagen zichtbaar gemaakt kunnen worden.



# Hoelang blijft koolstof vastgelegd in de bodem?

8

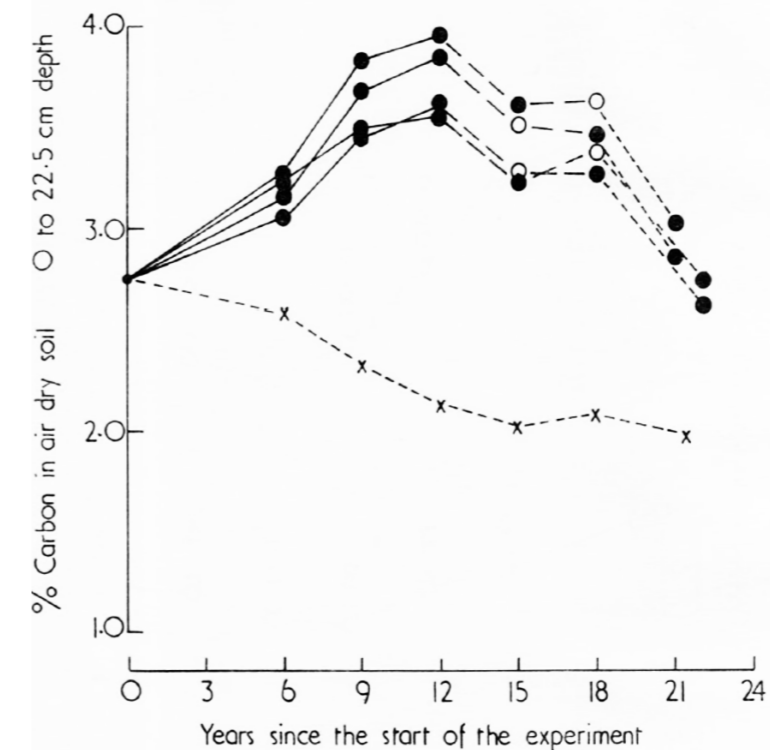
Als koolstofvastlegging een belangrijke bijdrage kan leveren aan het behalen van de doelen van het Klimaatakkoord, dan is het van belang dat de vastgelegde koolstof ook voor langere termijn opgeslagen blijft in de bodem (> 20 jaar). De afbraaksnelheid van de organische stof, en daarmee de tijd waarin de koolstof in de bodem opgeslagen blijft, hangt onder andere af van de chemische kwaliteit van de aangevoerde organische stof. Vaak wordt binnen een jaar de aangevoerde organische stof afgebroken. Daarom wordt bij koolstofvastlegging vooral gekeken naar de *effectieve organische stof* (EOS). Effectieve organische stof is de organische stof die na een jaar nog over is van de totaal aangevoerde organische stof vanuit meststoffen en/of gewasresten. De organische stof die na een jaar nog

aanwezig is, is vaak een stabiele vorm van organische stof. De effectieve organische stof wordt berekend door de aanvoer van droge stof te vermenigvuldigen met de *humificatiecoëfficiënt* (HC). De droge stof is het gewicht van de organische stof zonder het vocht. De humificatiecoëfficiënt is de fractie van de organische stof die één jaar na toediening nog in de bodem aanwezig is en geeft dus aan hoe snel de organische stof afgebroken wordt. De humificatiecoëfficiënt hangt samen met de verschillen in de koolstof/stikstof-ratio (C/N). Gewassen met een hoge C/N-ratio worden minder makkelijk afgebroken dan gewassen met een lage C/N-ratio. De humificatiecoëfficiënt is doorgaans lager voor bladeren dan voor wortels en verschilt per plantsoort.

Naast de chemische kwaliteit van de organische stof is bescherming van organische stof van invloed op de opslagtermijn van de koolstof. Bescherming kan plaatsvinden door binding aan mineralen of binnen bodemaggregaten, aangezien de bodemaggregaten de toegang van micro-organismen tot de organische stof blokkeren, waardoor micro-organismen de organische stof minder goed kunnen afbreken. Ook het bodembeheer, bodemtype en vegetatie hebben invloed op de opslagtermijn van koolstof. Afgezien van de chemische kwaliteit en bescherming van organische stof kunnen onder andere het zuurstofgehalte van de bodem en de bodemtemperatuur van invloed zijn op de afbraak van organische stof.

## Is eenmaal opgebouwde koolstof blijvend?

De vraag of eenmaal opgebouwde bodemkoolstof permanent in de bodem blijft is van meerdere factoren afhankelijk. Een van de factoren die een rol kan spelen bij de permanentie van de vastlegging is het al dan niet continueren van de maatregelen. Wanneer het toepassen van maatregelen over de tijd stopt, kan dit gevolgen hebben voor de vastgelegde koolstof. Veel onderzoek is hier echter nog niet naar gedaan. De hypothese is dat veel koolstof snel verloren zal gaan wanneer landgebruiksverandering optreedt, zoals het scheuren van grasland en/of het omzetten van grasland naar bouwland (zie Figuur A). Wanneer maatregelen die inspelen op het toevoeren van extra organische stof na jaren wordt gestopt, zal dit naar alle waarschijnlijkheid leiden tot een langzame afname van het koolstofgehalte (zie Figuur B). Het is echter nog onduidelijk of alle vastgelegde koolstof hierbij verloren zal gaan of alleen een deel.



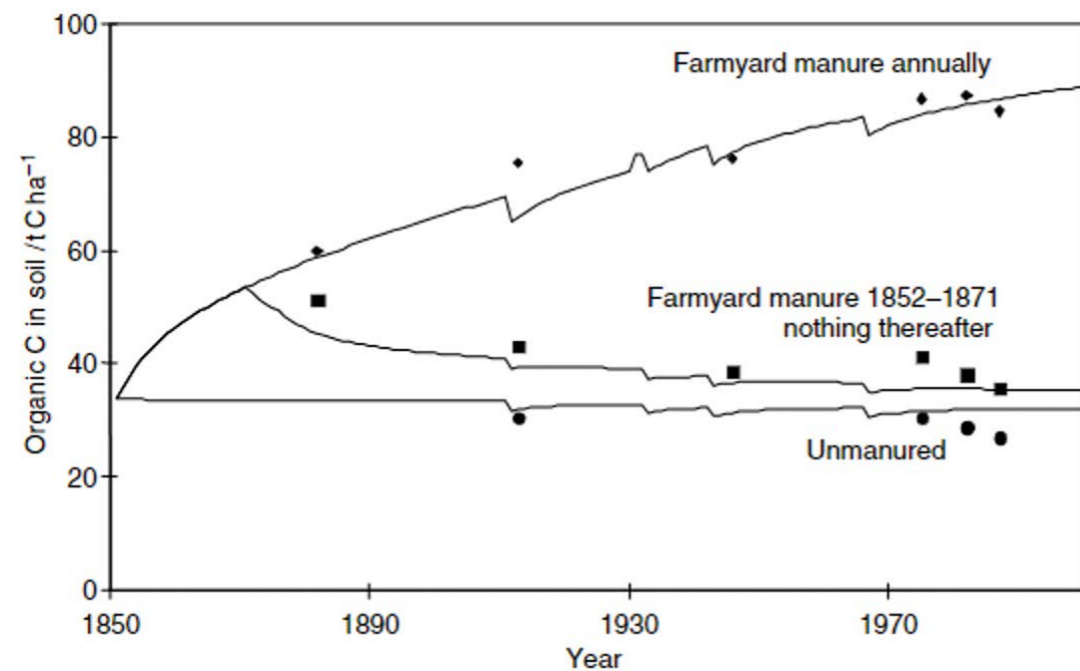
A. Verandering in bodemorganische koolstof (%) in permanent grasland (●) en continue bouwland (x). Het permanente grasland is de eerste 12 jaar beweide, vervolgens is er 6 jaar gemaaid, daarna is het omgezet naar continue bouwland (Johnston, 1973).



## Is er een kwantitatieve maat om uit te drukken hoelang koolstof in de bodem blijft?

Een belangrijke maat voor hoelang koolstof wordt opgeslagen, is de *gemiddelde verblijftijd* van bodemkoolstof (*Mean Residence Time*, GVT). Deze tijd geeft aan hoelang koolstof gemiddeld in de bodem blijft nadat de koolstof in de bodem terechtgekomen is als opgeloste organische stof in het bodemvocht of als verse organische stof aan de oppervlakte. De GVT wordt daarom berekend als de tijd tussen wanneer de koolstof wordt vastgelegd door fotosynthese en het moment dat deze vastgelegde koolstof weer via de bodemademhaling als  $\text{CO}_2$  uit de bodem verdwijnt. De GVT verschilt voor de verschillende vormen

waarin koolstof voorkomt in de bodem, maar het is belangrijker om de GVT van de totale hoeveelheid koolstof in de bodem te schatten, aangezien koolstofvastlegging over de totale hoeveelheid bodemkoolstof gaat. In de schattingen van de GVT van de totale hoeveelheid bodemkoolstof zit een grote variatie door de afhankelijkheid van bodembeheer, klimaat, vegetatie en bodemtype. Voor grasland en akkerland zijn bijvoorbeeld GVT's bepaald van gemiddeld respectievelijk 33 en 22 jaar, maar wereldwijde schattingen van de GVT voor de totale hoeveelheid koolstof in de bovenste bodemlaag (tot een diepte van 20 cm) lopen uiteen van jaren tot decennia. We kunnen aannemen dat de GVT van organische stof voor grasland en akkerland in Nederland in dezelfde orde van grootte ligt.



B. Verandering in bodemorganische koolstof (ton C/ha) wanneer i) onbemest (■); ii) bemest tijdens het gehele experiment (○) en ii) bemest in de periode 1852 tot 1871 (◊) (Smith, 2005).

## Hoe wordt de koolstofvoorraad in de bodem vastgesteld?



Om te bepalen of het doel om vanaf 2030 een additionele hoeveelheid van 0,4 - 0,6 Mton  $\text{CO}_2$ -eq per jaar vast te leggen in minerale landbouwbodems gehaald wordt, is het zinvol om de koolstofvoorraad te kunnen meten en zo veranderingen te monitoren. De koolstofvoorraad in een bodem wordt bepaald door het organische stofgehalte in de bodem te meten en deze op basis van de bulkdichtheid, bodemdiepte en het percentage koolstof in organische stof om te rekenen naar koolstofvoorraad. Het organische stofgehalte in de bodem wordt bepaald in bodemmonsters (zie Figuur). De bodemmonsters worden in een laboratorium gedroogd, gezeefd, vermalen en vervolgens geanalyseerd.

Twee veelgebruikte klassieke methoden om het organische stofgehalte te bepalen zijn de gloeiverliesmethode en de chemische-oxidatiemethode. Beide methoden zijn gevalideerd en goed toepasbaar. De gloeiverliesmethode meet het gewichtsverschil bij de verbranding van organische stof in bodemsteekproeven om zo het organische stofgehalte te bepalen. De chemische-oxidatiemethode gebruikt zwavelzuur als oxidator in plaats van zuurstof om de organische stof af te breken. Daarom worden deze methoden ook wel aangeduid als de droge en natte oxidatie methode voor respectievelijk de gloeiverlies- en chemische-oxidatiemethode.

Naast de twee klassieke methoden, worden Nabij Infrarood Reflectie (NIR) en Mid-Infrarood Reflectie (MIR) gebruikt om het organische stofgehalte te bepalen. Deze methodes meten hoeveel infraroodstraling wordt gereflecteerd als bodemonsters bestraald worden met infrarood licht. De NIR- en MIR-methode zijn goedkoper en analyses hebben een kortere doorlooptijd dan de gloeiverliesmethode of chemische-oxidatiemethode. De nauwkeurigheid en toepasbaarheid moeten echter nog verder worden onderzocht om voldoende precieze uitspraken te kunnen doen en om de resultaten te kunnen relateren aan de resultaten van klassieke methoden (zie Tabel). In de toekomst bieden NIR en MIR kansen om snel en precies de koolstofvoorraad in kaart te brengen, met ook directe metingen in het veld en mogelijk zelfs metingen door boeren zelf.

Voor het bepalen van de koolstofvoorraad is naast het organische stofgehalte de bulkdichtheid van belang. De bulkdichtheid van een bodem kan op drie manieren worden vastgesteld: 1) door bemonstering met het steken van ringen van een bekend volume, drogen en wegen van het bodemmateriaal in die ring, 2) door een pedo-transfer functie toe te passen<sup>1</sup> of 3) door schattingen van de dichtheid op basis van klei en koolstofgehalten. De bemonsteringsmethode is het meest zeker.

Voor Nederlandse minerale bodems is het percentage koolstof in de organische stof gemiddeld 54% voor de diepte 0-30 cm en 51% voor de diepte 30-100 cm. Voor het percentage koolstof in organische stof wordt er echter van uitgegaan dat 50% van de organische stof uit koolstof

bestaat. In plaats van op basis van het organische stofgehalte, kan de koolstofvoorraad ook op basis van het koolstofgehalte in bodemonsters berekend worden. Het koolstofgehalte kan bepaald worden met de elementaire analysemethode (TOC). De elementaire analysemethode is een alternatieve versie van de gloeiverliesmethode waar bij verbranding van organische stof de hoeveelheid vrijgekomen CO<sub>2</sub> wordt gemeten in plaats van het gewichtsverlies. Een voordeel van deze methode is dat er geen omrekenfactor van organische stofgehalte naar het koolstofgehalte nodig is en dat het ook mogelijk is om met de TOC het percentage koolstof in organische stof te bepalen.



Bodemonsters kunnen op meerdere manieren genomen worden, bijvoorbeeld met een guts (van Tol-Leenders et al., 2019).

<sup>1</sup> Een pedo-transfer functie berekent de bulkdichtheid aan de hand van een aantal bekende dan wel gemeten bodemeigenschappen, zoals gehalten klei en leem.

## Voor- en nadelen van verschillende methoden voor het bepalen van de koolstofvoorraad.

Methode	Gebaseerd op	Voordelen	Nadelen
Gloeiverlies OS	Gewichtsverschil bij verbranding van organische stof (zuurstof)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gevalideerd</li> <li>• Goed toepasbaar</li> <li>• Kortere doorlooptijd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief duur</li> <li>• Arbeidsintensief</li> </ul>
Gloeiverlies elementaire C (TOC)	Vrijgekomen CO <sub>2</sub> bij verbranding van OS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gevalideerd</li> <li>• Goed toepasbaar</li> <li>• Geen omrekenfactor voor het koolstofgehalte van organische stof nodig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief duur</li> <li>• Arbeidsintensief</li> </ul>
Chemische oxidatie	Gewichtsverschil bij oxidatie van organische stof (zwavelzuur)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gevalideerd</li> <li>• Goed toepasbaar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatief duur</li> <li>• Arbeidsintensief</li> </ul>
Nabij Infrarood Reflectie (NIR) en Mid-Infrarood Reflectie (MIR)	Reflectie van infraroodstraling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Goedkoper dan klassieke methoden</li> <li>• Kortere doorlooptijd</li> <li>• Mogelijk om direct in het veld te meten</li> </ul>	(Nog) onduidelijk of de methode voldoende gevalideerd en toepasbaar is voor wetenschappelijke doelen



# Wat is de zekerheid bij het bepalen van koolstofvastlegging?

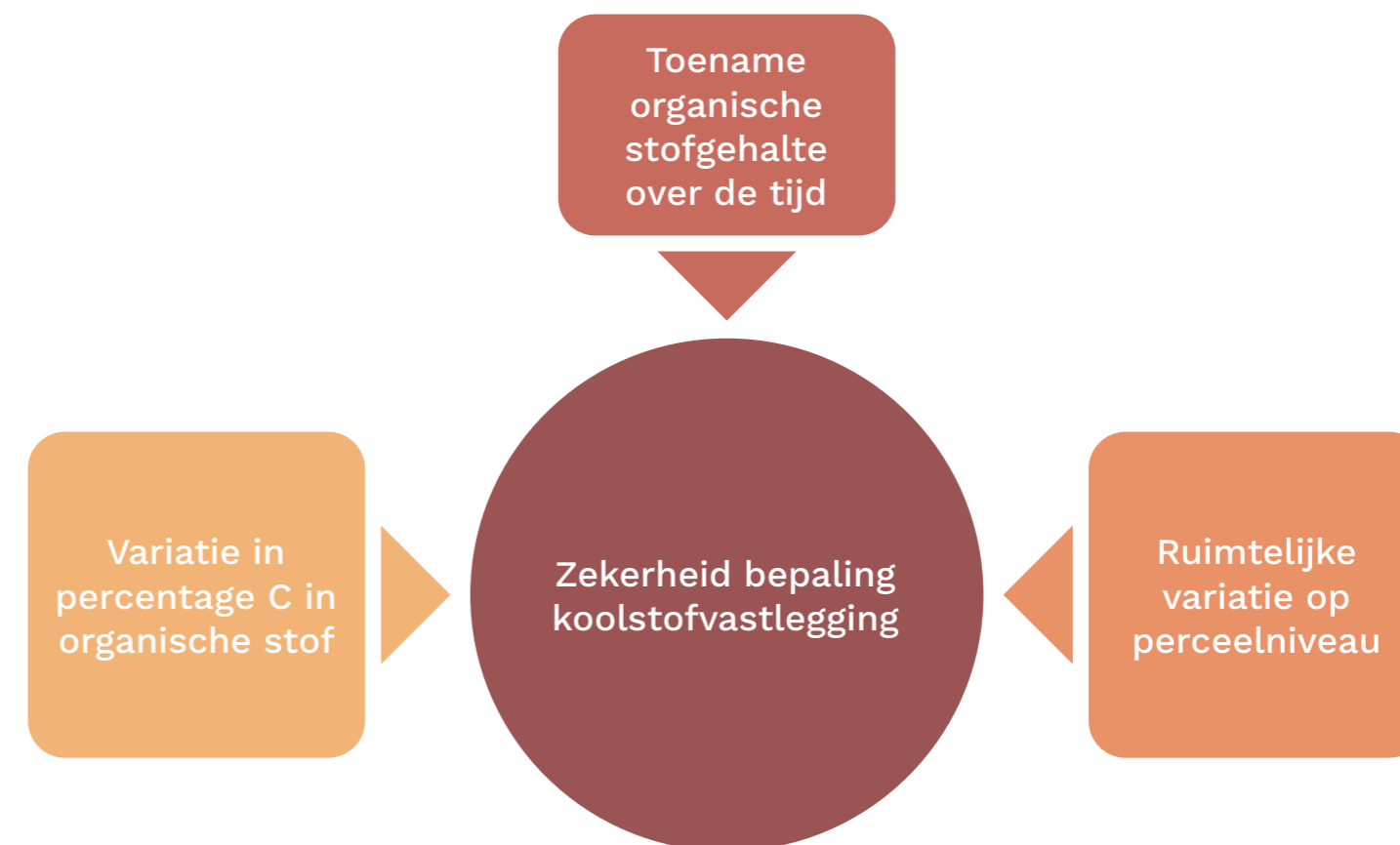
10

Voor het bepalen van koolstofvastlegging worden verschillen in de koolstofvoorraad die binnen een bepaalde periode optreden, gemeten. Om middels metingen te bepalen of een additionele hoeveelheid van 0,4 – 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar wordt vastgelegd in minerale landbouwbodems, zullen metingen moeten uitwijzen dat het gemiddelde organische stofgehalte op alle minerale landbouwbodems met bijna 0,03% punt is toegenomen. Er zijn echter drie factoren die zorgen voor een onzekerheid in de bepaling van de koolstofvoorraad:

1. Om het klimaatdoel te halen is gemiddeld over Nederland een relatief kleine toename van organische stofgehalte in de bodem nodig ten opzichte van de totale koolstofvoorraad. Hierdoor kan de toename in de koolstofvoorraad binnen de onzekerheidsmarge vallen van de variatie die in het organische stofgehalte gemeten wordt. Als bijvoorbeeld een toename van de koolstofvoorraad van 5-10% gemeten wordt, ligt dit binnen de onzekerheidsmarge van de metingen.

2. Er is een grote ruimtelijke variatie van organische stof binnen een perceel door verschillen in onder andere hoogte, drainage en eventuele aanwezigheid van veenlagen. Hierdoor moet altijd rekening gehouden worden met de representativiteit van het bodemonmonster.

3. Er is variatie in het percentage koolstof (C) in organische stof. Over de periode 2015-2018 is op basis van steekproeven die geanalyseerd zijn door laboratoria van Eurofins vastgesteld dat het percentage C in organische stof tussen de 40 en 55% ligt. Deze ruime marge in het percentage koolstof is een belangrijke onzekerheid voor de uiteindelijke bepaling van de koolstofvoorraad.



De factoren die een rol spelen in de zekerheid van de bepaling van koolstofvastlegging.



# Welke rol spelen modellen bij het bepalen van koolstofvastlegging?

11

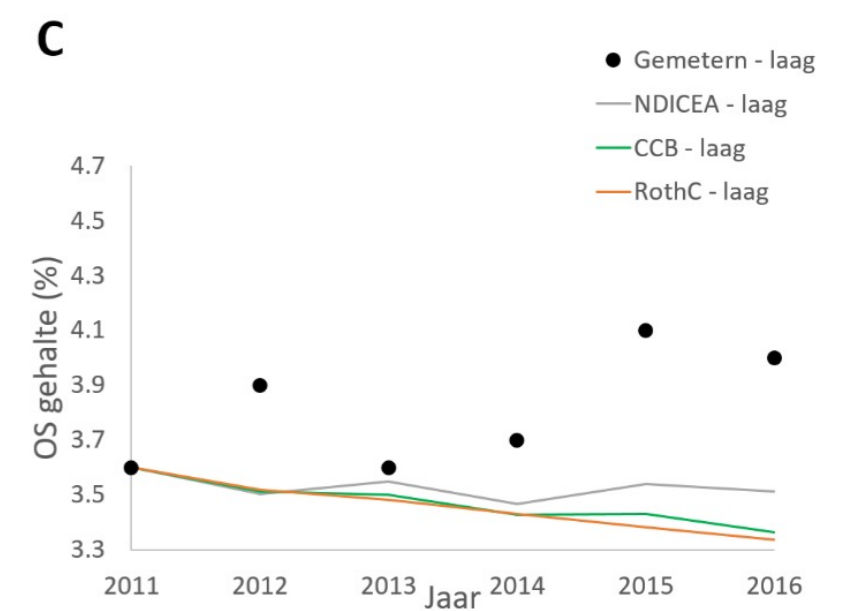
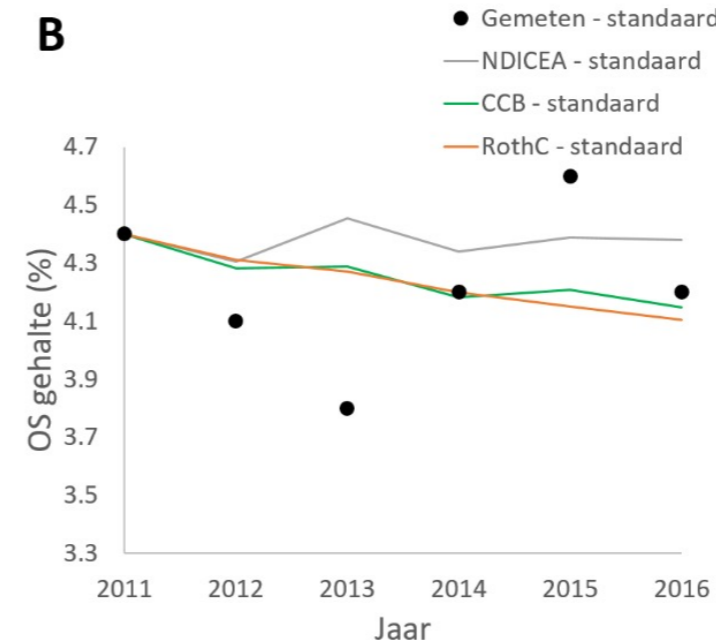
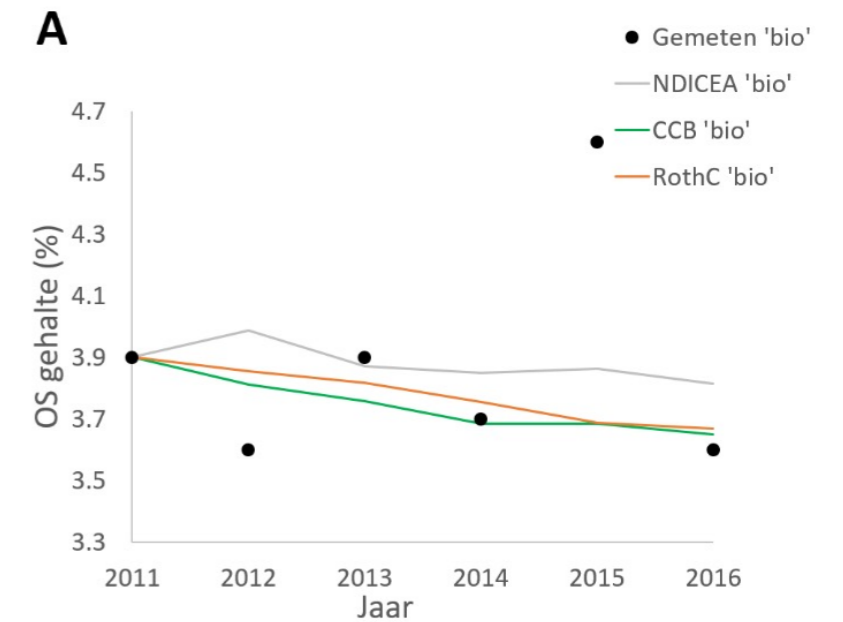
Voor het bepalen van de koolstofvastlegging zijn metingen van de koolstofvoorraad over de tijd nodig. Metingen zijn echter relatief duur vanwege de laboratoriumkosten en kosten voor het nemen van bodem monsters. Er zijn namelijk meerdere bodemmetingen nodig om het effect van de ruimtelijke variabiliteit te verlagen. Mede doordat het lang duurt voordat een verandering gemeten kan worden, wordt ook gebruik gemaakt van modellen waarmee de veranderingen in koolstofvoorraad kunnen worden gesimuleerd. De in Nederland toegepaste modellen voor het berekenen van de koolstofvoorraad zijn onder andere RothC, NDICEA, DayCent en CCB. Deze modellen berekenen niet alleen de koolstofvoorraad bij het huidige bodembeheer, maar kunnen ook worden gebruikt voor het bepalen van de potentiële

koolstofvastlegging bij toepassing van maatregelen. Dit kan zowel op perceels-/bedrijfsniveau als op regionale of nationale schaal.

Voor het bepalen van de potentiële koolstofvastlegging in Nederland wordt veel gebruik gemaakt van het RothC-model. Het RothC-model is gebaseerd op lange-termijn experimenten in Rothamsted (Verenigd Koninkrijk). Het RothC-model is gekozen omdat het wereldwijd veel gebruikt wordt en er relatief simpele gegevens nodig zijn om de koolstofvastlegging te simuleren. Het model heeft gegevens nodig over de bestaande koolstofvoorraad, bodemtype (kleigehalte), bodemdichtheid, landgebruik, temperatuur, bodemvochtgehalte, bemesting en bodembedekking om de

aanvoer en afbraak van organische stof te simuleren. Het model simuleert verschillende koolstoffracties die verschillen in afbreeksnelheid. Het model berekent de koolstofvastlegging voor de bovenste 20-30 cm van de bodem, aangezien daar de meeste aanvoer en afbraak van organische stof plaatsvindt. De diepere bodemlagen worden dus niet meegenomen in het simuleren van koolstofvastlegging. Naast dat door het gebruik van aanvullende modelberekeningen de metingen geïnterpreteerd kunnen worden en daarmee trends in koolstofvastlegging kunnen worden vastgesteld, is deze methode eenvoudig en relatief goedkoop. RothC vormt de basis voor de ontwikkeling van de Praktijktool Bodem C. Met deze online tool kunnen boeren en adviseurs zelf aan de slag met het berekenen van een koolstofbalans en het simuleren van veranderingen in de koolstofvoorraad door de tijd.

Weergave van gemeten (zwarte punten) en gesimuleerde OS-gehalten voor drie verschillende behandelingen met drie verschillende modellen (uit Lesschen et al. 2020).





# Wat is de invloed van koolstofvastlegging op emissie van lachgas?



Koolstofvastlegging in de bodem kan leiden tot de emissie van *lachgas*. Lachgas ( $N_2O$ ) is een sterker broeikasgas dan  $CO_2$ , omdat het aarde-opwarmingspotentiaal (Engels: *Global Warming Potential*) 265 keer hoger is dan dat van  $CO_2$  op een tijdschaal van 100 jaar. Lachgas draagt op dit moment voor 6% bij aan het wereldwijde totaal van broeikasemissies. De lachgasemissies komen voort uit het denitrificatie- en nitrificatieproces en hangen onder andere af van de hoeveelheid stikstof in de bodem (zie Figuur). Denitrificatie zorgt voor de grootste bijdrage aan lachgasuitstoot uit de bodem. Denitrificatie is de microbiologische omzetting van nitraat ( $NO_3^-$ ) naar de gasvormige stikstofverbindingen stikstofgas ( $N_2$ ), lachgas ( $N_2O$ )

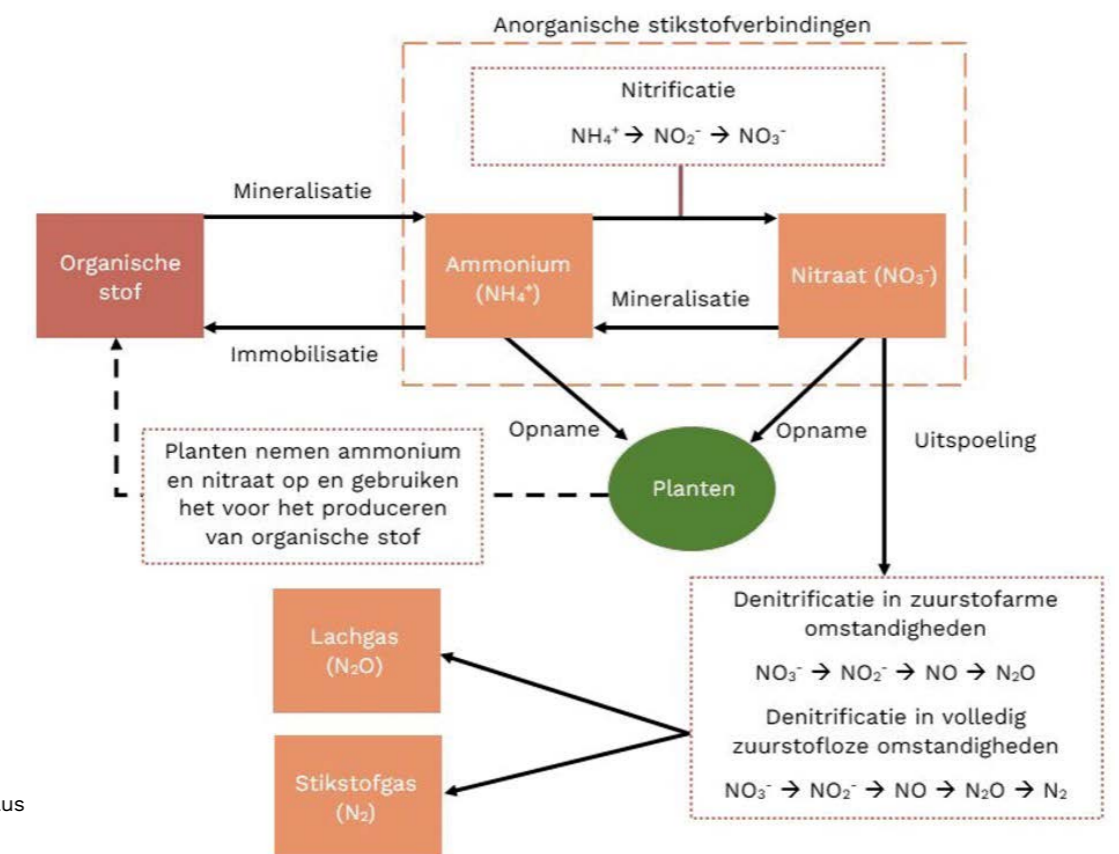
en stikstofoxide ( $NO_x$ ). Dit proces treedt op onder zuurstofarme omstandigheden. Onder compleet zuurstofloze omstandigheden wordt nitraat volledig omgezet in stikstofgas en vindt er amper of geen vorming van lachgas plaats. Gemakkelijk afbreekbare organische stof is de energiebron voor denitrificerende bacteriën. Nitrificatie is de microbiologische omzetting van ammonium ( $NH_4^+$ ) naar nitraat ( $NO_3^-$ ). Hierbij kan lachgas worden gevormd. Daarnaast kan het nitraat dat gevormd wordt bij nitrificatie via denitrificatie worden omgezet naar lachgas. Voor nitrificatie is zuurstof nodig. Onder zuurstofarme omstandigheden wordt nitrificatie geremd en onder deze omstandigheden kan er lachgas worden gevormd.

Als organische stof wordt afgebroken door micro-organismen, wordt er zuurstof verbruikt, dat de uitstoot van lachgas via (de)nitrificatie kan stimuleren. Organische stof met een lage koolstof / stikstof-ratio (C/N-ratio) is makkelijker afbreekbaar. Koolstofvastlegging in de bodem kan dus leiden tot een toename van de uitstoot van lachgas doordat 1) makkelijk afbreekbare organische stof de energiebron is voor denitrificerende bacteriën en 2) bij afbraak van organische stof zuurstof verbruikt wordt waardoor denitrificatie gestimuleerd wordt. Naast deze twee mechanismen waarmee koolstofvastlegging kan leiden tot lachgasuitstoot, kan de minerale stikstof uit organische stof vrijkomen (mineralisatie) en dit kan leiden tot een verhoogde lachgasemissie.

Er zijn echter ook manieren waarop koolstofvastlegging lachgasuitstoot kan verminderen. Een hoger organische stofgehalte zorgt namelijk voor een betere, luchtige bodemstructuur, waardoor er meer zuurstof in de bodem kan komen. Een hoger zuurstofgehalte in de bodem remt denitrificatie en daarmee de uitstoot van lachgas. Ook kan een verhoogd organische stofgehalte in de bodem leiden tot betere

Schematische weergave van de stikstofcyclus en de vorming van lachgas.

gewasgroei en stikstofopname, waarmee lachgasuitstoot geremd wordt. Aangezien koolstofvastlegging binnen het Nederlandse Klimaatakkoord (2019) bij moet gaan dragen aan het verminderen van het versterkte broeikasemissie, moet het effect van koolstofvastlegging op lachgasemissie geminimaliseerd worden. Daarom is het belangrijk inzicht te krijgen in lachgasemissies bij maatregelen om koolstof vast te leggen en bij maatregelen om lachgasemissie te beperken.





# Wat is de relatie tussen koolstofvastlegging en andere bodemdiensten?

13

Organische stof speelt een belangrijke rol bij verschillende bodemdiensten. Bodemdiensten zijn de voordelen die mensen ondervinden van de bodem, zoals bodemvruchtbaarheid en waterbuffering. Als koolstofvastlegging voor een verhoging van het organische stofgehalte zorgt, kan dat andere bodemdiensten beïnvloeden (zie Figuur). De effecten van koolstofvastlegging op bodemdiensten kunnen worden verdeeld in de volgende thema's uit het Nationaal Programma Landbouwbodems (NPL): *bodemvruchtbaarheid*, *bodembiodiversiteit*, *waterbuffercapaciteit* en *waterkwaliteit*. Hierna wordt het effect van een hoger organische stofgehalte op de bodemdiensten toegelicht.

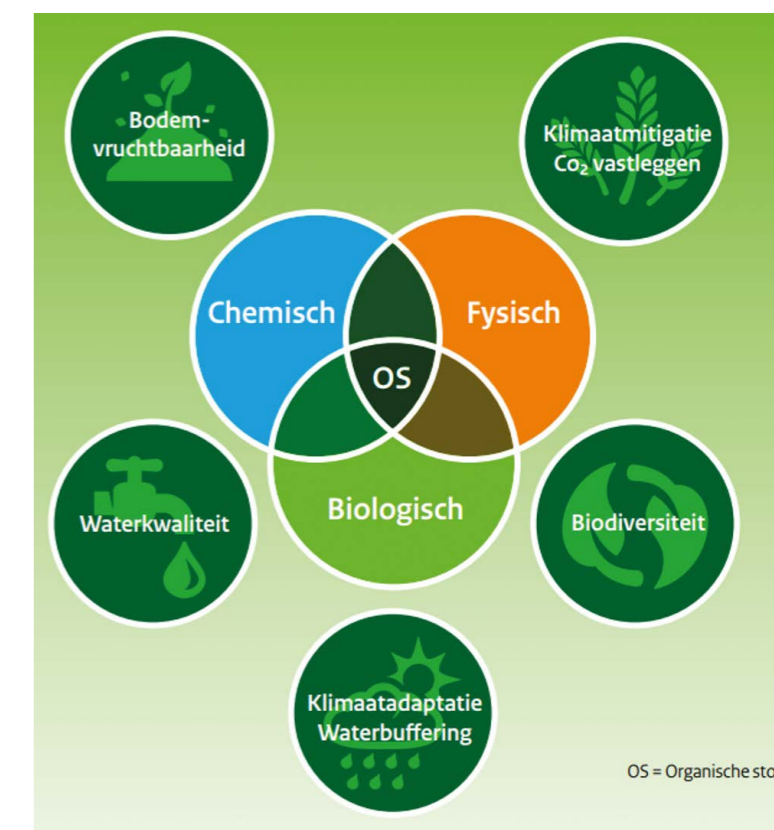
## 1. Bodembiodiversiteit

Biodiversiteit is een term die gebruikt wordt om de rijkdom van de natuur aan te duiden. Het gaat om de grote verscheidenheid aan dieren, planten, habitats en genen. In de bovenste laag van de bodem leven de meeste organismen, doordat hier de meeste zuurstof en aanvoer van organische stof is. Voor deze bodemorganismen is organische stof de belangrijkste voedselbron. In de bodem leeft een enorme diversiteit aan micro-organismen (zoals schimmels en bacteriën) en bodemdieren (zoals mijten en regenwormen). Al deze organismen samen vormen het bodemvoedselweb en zorgen voor de vertering en afbraak van gewasresten

en mest. Hierbij gaat een deel van de koolstof via de bodemademhaling weer de lucht in als CO<sub>2</sub>. Daarnaast komen gebonden voedingsstoffen zoals stikstof en fosfor uit organisch materiaal vrij en kunnen ze door de plant worden opgenomen. Door een hogere beschikbaarheid van voedingsstoffen draagt koolstofvastlegging bij aan de bodemdiversiteit doordat deze koolstof een bron van voedsel en energie is voor micro-organismen. De bodemorganismen hebben een belangrijke functie in de bodem, zoals regenwormen die bewegen tussen de boven- en ondergrond. Door de gangetjes die deze wormen graven, blijft de bodem luchtig en kunnen plantenwortels meer water en voedingsstoffen opnemen.

## 2. Waterbuffercapaciteit (klimaatadaptatie)

De waterbuffercapaciteit neemt toe bij een verhoging van het organische stofgehalte in de bodem. Dit wordt veroorzaakt doordat in de eerste plaats vocht vastgehouden wordt aan organische stof. Organische stof kan tot wel 20 keer zijn eigen gewicht aan water vasthouden. In de tweede plaats zorgt een hoger organische stofgehalte voor een betere bodemstructuur. Verbetering van de bodemstructuur houdt in dat de bodem luchtiger wordt doordat er onder andere meer bodemporiën en bodemaggregaten ontstaan. In een luchtige bodem kan water beter infiltreren, opgeslagen worden en opgenomen worden door planten. Doordat de bodem met een hogere waterbuffercapaciteit meer water kan vasthouden voor gebruik tijdens droge periodes en grote hoeveelheden water als gevolg van extreme regenval beter weg kunnen zakken, draagt de waterbuffercapaciteit bij aan klimaatadaptatie.



Duurzaam bodembeheer uitgesplitst in verschillende bodemdiensten met een centrale rol voor organische stof (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, 2019).

## 3. Bodemvruchtbaarheid

Bodemvruchtbaarheid kan omschreven worden als de capaciteit van de bodem om voldoende voedingsstoffen te leveren voor gewasgroei. Een hoger organische stofgehalte beïnvloedt deze capaciteit direct en indirect. Via mineralisatie (het vrijkomen van nutriënten uit organische stof) draagt een hoger bodemorganische stofgehalte direct bij aan de levering van nutriënten voor een gewas. Indirect draagt een hoger organische stofgehalte bij aan de *beschikbaarheid* van nutriënten voor



plantenwortels via een betere bodemstructuur, een betere vochtvoorziening en een verhoogde kationen-uitwisselingscapaciteit (CEC). Met een hogere CEC kunnen positief geladen nutriënten, waaronder ammonium en kalium, tijdelijk worden vastgehouden en weer afgegeven aan plantenwortels wanneer de concentratie van nutriënten in de bodemoplossing is gedaald als gevolg van gewasopname. Een hoger gehalte organische stof verbetert de bodemstructuur waardoor nutriënten beter in oplossing door het bodemprofiel verplaatst kunnen worden en plantenwortels beter nutriënten kunnen opnemen. Een betere bodemstructuur vermindert onder andere bodemerosie, wat belangrijk is voor het voorkomen van wegspoelen en -waaien van vruchtbare grond. Wel kan een hoger organische stofgehalte het risico op versmering verhogen (de dichtdrukking en opvulling van poriën met organische stof die verbonden is aan lutumdeeltjes).

#### 4. Waterkwaliteit

Een hoger organische stofgehalte kan helpen om stoffen in de bodem te adsorberen waardoor bijvoorbeeld voedingsstoffen, zware metalen en restanten van medicijnen minder makkelijk uitspoelen. Dit leidt tot een lagere belasting van deze stoffen op grond- en oppervlaktewater. Dit kan ook effect hebben op de beschikbaarheid van toxische stoffen voor het gewas, die door adsorptie aan organische stof lager wordt. In geval van adsorptie van voedingsstoffen is het van belang om de timing en hoeveelheid van de aanvoer van organische stof af te stemmen op de opname ervan door de gewassen. De reden hiervoor is dat de stikstof in de organische stof gemineraliseerd kan worden als er geen behoefte aan is bij de planten. In dat geval kan het aanvoeren van meststoffen juist wel leiden tot uitspoeling van voedingsstoffen.

# Hoe interacteert koolstofvastlegging als onderdeel van het klimaatmitigatiebeleid met andere (bodem)beleidsterreinen?

14

Koolstofvastlegging is in eerste instantie bedoeld om bij te dragen aan de doelen uit het Klimaatakkoord (2019), maar heeft ook impact op andere (bodem)beleidsterreinen (zie Figuur), in het bijzonder:

- **Nationaal Programma Landbouwbodems (NPL)**

Het doel van het NPL is om in 2030 alle bodems duurzaam te beheren om ecosysteemdiensten zoals bodemvruchtbaarheid, biodiversiteit en waterbufferingscapaciteit optimaal te blijven benutten. Het NPL komt voort uit de wens van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselveiligheid om kringlooplandbouw als speerpunt te nemen voor het landbouwbeleid. Bij kringloopland-

bouw staan het sluiten van nutriëntenkringlopen (dier-bodem-gewassen) en het verminderen van broeikasgasemissies centraal. Hierbij wordt gestreefd naar het optimaal benutten van de grondstoffen waarbij zo min mogelijk afval en schadelijke stoffen vrijkomen. Duurzaam bodembeheer zoals beschreven in het NPL is de basis voor de overgang naar kringlooplandbouw. Er is een indicatoren-set genaamd 'Bodemindicatoren voor Landbouwbodems in Nederland (BLN)', ontwikkeld waarin zeventien indicatoren voor bodemkwaliteit staan beschreven, opgedeeld in chemische, fysische en biologische indicatoren.

• **Actieprogramma Klimaatadaptatie landbouw**

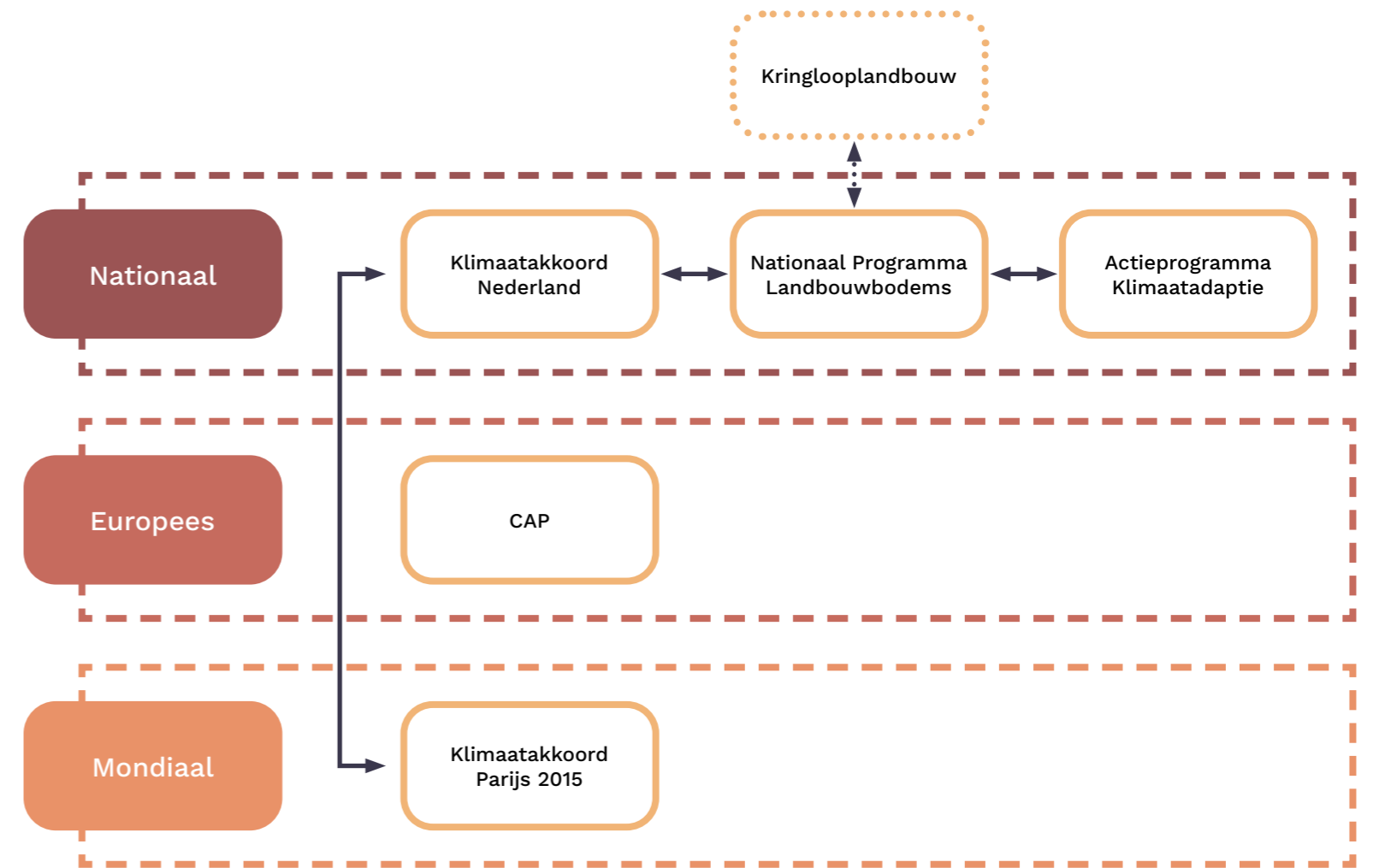
Het Actieprogramma Klimaatadaptatie landbouw heeft als doel om de landbouw klimaatbestendig te maken. Klimaatbestendigheid houdt in dat de landbouw beter bestand is tegen weersextremen zoals droogte en hevige neerslag. Een belangrijke pijler in het programma is een klimaatbestendige bodem door het verbeteren van de bodemstructuur en de waterbergingscapaciteit van bodems. Koolstofvastlegging levert een positieve bijdrage aan de doelen van het actieprogramma Klimaatadaptatie Landbouw, doordat onder andere een hoger organische stofgehalte zorgt voor een verbetering van de waterbufferingscapaciteit.

• **Gemeenschappelijk Landbouw Beleid (GLB)**

Op Europees niveau moet het Gemeenschappelijk Landbouw Beleid (GLB), in het Engels CAP, van de EU ervoor zorgen dat voldoende en op duurzame wijze voedsel wordt geproduceerd. Het GLB draagt bij aan de doelstellingen van de Europese Green Deal en daarmee aan het nemen en ondersteunen van klimaatmaatregelen. In 2022 wordt er een vernieuwing van het GLB verwacht, waarin een reële bijdrage aan klimaatmitigatie – en dus ook koolstofvastlegging – één van de pijlers zal zijn die bijdraagt aan duurzaam bodembeheer.

• **Mestbeleid**

Het mestbeleid richt zich op het verminderen van uitspoeling van nitraat en fosfaat naar oppervlaktewater en uitstoot van ammoniak naar de lucht. Dit wordt onder andere gedaan door restricties op te leggen aan de hoeveelheid meststoffen die mag worden toegevoegd aan de bodem voor de teelt van gewassen. Boeren die koolstof willen vastleggen door extra meststoffen toe te dienen, kunnen dus worden belemmerd door regelgeving in het kader van het mestbeleid. Ook zijn er in het kader van het mestbeleid regels gesteld met betrekking tot omploegen en opnieuw inzaaien van grasland. Daarnaast stelt het mestbeleid de boeren verplicht om vanggewassen te zaaien bij teelt van mais en aardappelen op zand- en lössgrond; dit om de nitraatuitspoeling te verminderen.



De verschillende beleidsterreinen die met koolstofvastlegging te maken hebben en de relaties ertussen. De ronde vormen geven de verschillende niveaus weer en de vierkante vormen geven de verschillende beleidsterreinen weer.



# Welk effect heeft het weer op koolstofvastlegging?

15

Koolstofvastlegging en de koolstofvoorraad in de bodem worden beïnvloed door verschillende weersfactoren zoals temperatuur en neerslag. Het weer bepaalt onder andere of het warm, koud, nat of droog is. Het weer is van invloed op koolstofvastlegging doordat de verblijftijd van organische stof en de koolstof daarin onder andere afhankelijk is van de (bodem)temperatuur en het bodemvochtgehalte. De (bodem)temperatuur en het bodemvochtgehalte hebben effect op plantengroei en op activiteit van micro-organismen, waardoor respectievelijk aanvoer en/of afbraak van organische stof versneld of vertraagd kan worden. Aangezien er bij klimaatverandering weersveranderingen (zoals een toename in de frequentie en de hevigheid van buien of langere periodes van droogte) op kunnen treden, is het van belang de invloed van het weer op de

afbraak van organische stof en daarmee koolstofvastlegging te kennen.

## • **Temperatuur**

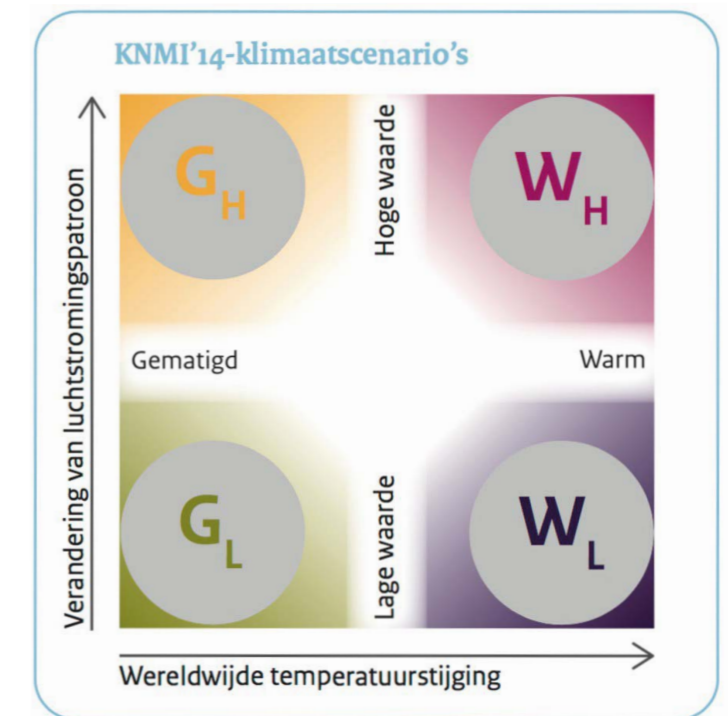
De bodemtemperatuur is van invloed op de afbraaksnelheid van organische stof doordat micro-organismen actiever worden bij hogere temperaturen en dan organische stof afbreken. Netto koolstofvastlegging is de balans tussen afbraak en aanvoer van organische stof. De aanvoer van organische stof wordt ook beïnvloed door de (bodem)temperatuur doordat planten in de Nederlandse context doorgaans beter groeien bij hogere temperaturen met een toename van de productie en aanvoer van organische stof naar de bodem als gevolg. Dit kan de verhoogde omzet- en afbraaksnelheid moge-

lijk (deels) compenseren. Te hoge temperaturen kunnen echter aanvoer, omzetting en afbraak van organische stof ook remmen. Deze remming van de plantengroei komt doordat, afgezien van het directe effect van de (bodem)temperatuur op plantengroei, hogere temperaturen de verdamping van het vocht in de planten verhogen en daarmee de fotosynthese en productie van organische stof verlagen door droogte. De (bodem)temperatuur heeft dus invloed op meerdere aspecten van de aanvoer en afbraak van organische stof. Er is dan ook nog geen wetenschappelijke consensus over het effect van hogere (bodem)temperaturen (als gevolg van klimaatverandering) op koolstofvastlegging in de bodem.

## • **Neerslag**

Het weer kan koolstofvastlegging beïnvloeden doordat regenval en periodes van droogte invloed hebben op het bodemvochtgehalte. Het bodemvochtgehalte bepaalt (deels) de hoeveelheid zuurstof in de bodem en daarmee de afbraaksnelheid van organische stof. Bij hoge regenval neemt het bodemvochtgehalte toe en daarmee nemen het zuurstofgehalte en de afbraaksnelheid van organische stof af. Hierdoor kan koolstofvastlegging hoger worden. Daarnaast stimuleren de condities in een warme, vochtige bodem met veel beschikbare voedingsstoffen de activiteit van micro-organismen waarmee de afbraaksnelheid van organische stof toeneemt. Aangezien de netto koolstofvastlegging bepaald wordt door de balans tussen afbraak en aanvoer van organische stof, is ook de invloed van het bodemvochtgehalte op de aanvoer van organische stof van belang. Net zoals het positieve effect op de activiteit van micro-organismen, stimuleren de warme en vochtige condities met veel beschikbare

voedingsstoffen ook de plantengroei en daarmee de aanvoer van organische stof. Een lager bodemvochtgehalte als gevolg van bijvoorbeeld droogte kan leiden tot een lagere aanvoer van organische stof doordat de productie van biomassa lager is. Daarnaast is de timing van de droge en natte periodes ten opzichte van de groei van planten relevant. Ook de hoeveelheid neerslag die in een korte tijd valt kan de koolstofvastlegging beïnvloeden, aangezien de productie en aanvoer van organische stof kan afnemen. Dit wordt veroorzaakt doordat als gevolg van de hevige neerslag bodemerrosie ontstaat, waarbij voedingsstoffen uit de bodem wegspoelen.



De vier klimaatscenario's, ontwikkeld door het KNMI (KNMI, 2014).



Samengevat kan het weer de verblijftijd van koolstof in de bodem beïnvloeden door de invloed van temperatuur en neerslag op de bodemtemperatuur en het bodemvochtgehalte. Een kanttekening is dat de (bodem)temperatuur ook het bodemvochtgehalte beïnvloedt doordat bij hogere temperaturen meer vocht verdampt en het bodemvochtgehalte omlaag gaat. Naast de invloed van het weer zijn er nog andere factoren zoals de aanvoer, beschikbaarheid en toegankelijkheid van organische stof die minstens zo'n grote rol spelen bij koolstofvastlegging in de bodem.

### Klimaatverandering in verschillende scenario's

In 2014 zijn door het Koninklijke Nederlandse Meteorologische Instituut (KNMI) vier klimaatscenario's ontwikkeld, genaamd 'KNMI'14-klimaatscenario's' (zie Figuur). Er zijn scenario's voor het jaar 2050 en voor 2085.

Deze scenario's worden aangeduid met de afkortingen  $G_H$ ,  $W_H$ ,  $G_L$  en  $W_L$ . De afkortingen verwijzen naar gematigd-hoge waarde ( $G_H$ ), warm-hoge waarde ( $W_H$ ), gematigd-lage waarde ( $G_L$ ) en warm-lage waarde ( $W_L$ ). Gematigd en warm verwijzen naar de verwachte wereldwijde temperatuurstijging, waarbij gematigd en warm respectievelijk een stijging van 1 en 2°C in 2050 inhoudt. De lage en hoge waarde verwijzen naar respectievelijk weinig en veel veranderingen in het luchtstromingspatroon. Het luchtstromingspatroon bepaalt onder andere de hoeveelheid en timing van neerslag. De lage en de hoge waarde staan respectievelijk voor een toename in de hoeveelheid jaarlijkse neerslag van 15-30 cm en 20-40 cm in 2050. In 2023 wordt een update van de klimaatscenario's verwacht. Er is nog niet onderzocht in hoeverre deze verschillende klimaatscenario's een specifieke invloed op de vorming en afbraak van organische stof in de bodem hebben.



Gewasschade aan snijmais door langdurige droogte.



Gewassen staan deels onder water na hevige regenval.

# Welk effect heeft bodemverdichting op koolstofvastlegging?

16

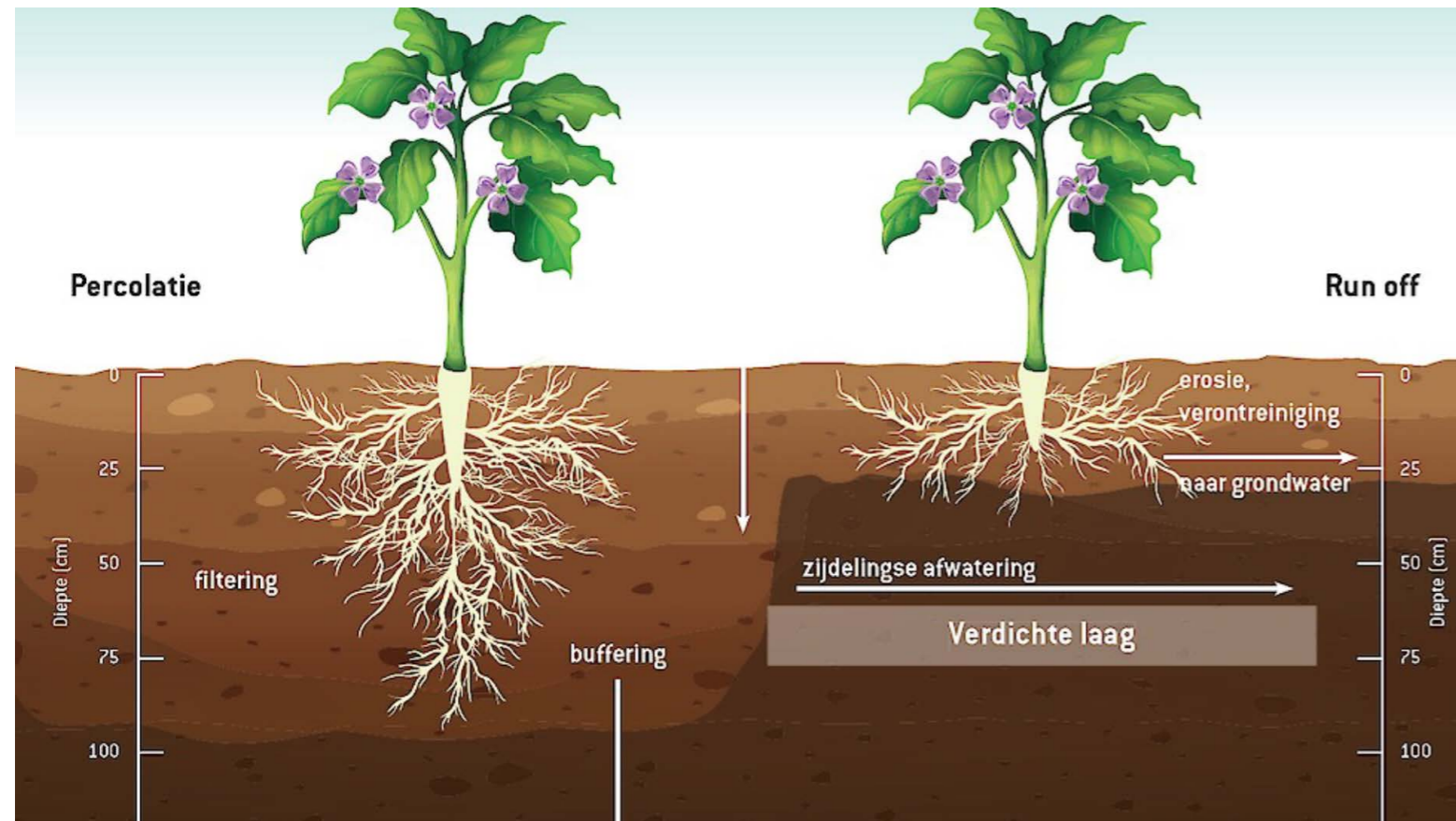
Bij *bodemverdichting* worden de poriën in de bodem kleiner en dichtgedrukt en is er minder plek voor water en zuurstof. Verdichting heeft een negatieve invloed op de bodemstructuur. Bodemverdichting komt met name voor bij het berijden van de bodem met zware machines. Bodemverdichting vindt plaats aan het oppervlak, bijvoorbeeld in de bandensporen van (zware) machines of in de diepere ondergrond. In onderstaand Figuur is schematisch weergegeven wat het verschil is tussen een bodem met een goede, luchtige bodemstructuur en een bodem waarbij bodemverdichting heeft plaatsgevonden.

Als gevolg van bodemverdichting kunnen plantenwortels zich slechter ontwikkelen doordat deze moeite hebben in de verdichte bodem te groeien. Hierdoor kunnen minder voedingstoffen en minder water worden opgenomen. Ook kan water moeilijker infiltreren in de bodem en stroomt af of blijft staan met negatieve gevolgen voor gewas en bodem. Zo kan bodemverdichting leiden tot lagere gewasopbrengsten en daarmee ook tot minder gewasresten die onder normale condities leiden tot het vormen van organische stof in de bodem en koolstofvastlegging. Daarnaast zijn akkers met een verdichte bodem moei-



lijker te bewerken en verloopt de infiltratie van water minder gemakkelijk. Dit kan leiden tot meer oppervlakkige afspoeling en bodemerrosie. Via bodemerrosie kunnen voedingsstoffen verloren gaan die het gewas nodig heeft om organische stof te produceren. Hierdoor kan bodemerrosie leiden tot minder koolstofvastlegging.

Naast de invloed van bodemverdichting op de gewasgroei, beïnvloedt de dichtheid van de bodem ook de afbraak van organische stof tot CO<sub>2</sub>. Bodemverdichting verlaagt de beschikbaarheid van zuurstof in de (diepere) bodem, waardoor de afbraak van organische stof en het verlies van koolstof verminderd worden. Er zijn verschillende factoren van bodemverdichting die een effect hebben op koolstofvastlegging en de balans tussen die factoren is vooralsnog onduidelijk.



Bodemverdichting met links een onverdichte bodem met een goede, luchtige structuur en rechts een verdichte bodem waarbij de poriën in de bodem dichtgedrukt zijn in de bovenste lagen en er op zekere diepte een vrijwel ondoordringbare laag ontstaat voor wortels en water (Akkerwijzer, 2021).

## Welk effect heeft gewaskeuze op koolstofvastlegging?



De keuze van een gewas binnen een rotatie draagt bij aan de mate waarin koolstof in de bodem wordt vastgelegd. Het soort gewas kan invloed hebben op de mate van koolstofvastlegging, omdat gewassen verschillen in de groeiwijze en daarmee in de productie van biomassa en aanvoer van organische stof. De groeiwijze verschilt onder andere in de verdeling van de organische stof over boven- en ondergrondse biomassa en groeiduur.

### • Verdeling boven- en ondergrondse biomassa

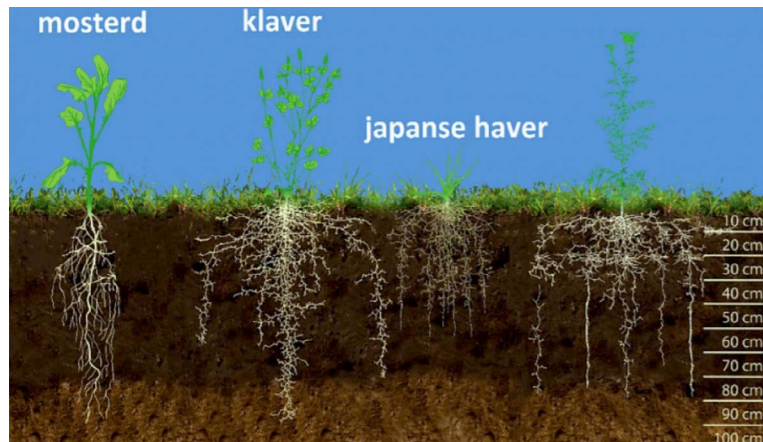
De verdeling van de organische stof over bovengrondse (bladeren, stengels) en ondergrondse biomassa (wortels) draagt bij aan verschillen in koolstofvastlegging. Gewassen waarbij veel organische stof zich in de ondergrondse biomassa (wortels) bevindt, zorgen voor meer aanvoer van

organische stof aangezien wortels de grootste aanvoerweg van organische stof vormen door middel van wortellexudaten en wortelbiomassa. De wortels brengen daarbij de organische stof naar diepere bodemlagen waarin de organische stof langer opgeslagen blijft, omdat wortels de vorming van bodemaggregaten en de binding van organische stof aan mineralen stimuleren. Hiernaast breken wortelresten langzamer af doordat er dieper in de bodem minder zuurstof is. Vergeleken met rooivruchten zoals aardappelen en suikerbieten, hebben granen de meeste aanvoer van organische stof naar de bodem omdat granen relatief veel wortels hebben. De bewortelingsdiepte kan ook een rol spelen in de hoeveelheid koolstofvastlegging. Diepere wortels dragen mogelijk extra bij aan koolstofvastlegging doordat water en voedingsstoffen beter kunnen



worden opgenomen en daarmee de productie en aanvoer van organische stof verhoogd worden. Gewassen kunnen verschillen in hun bewortelingsdiepte, zoals geïllustreerd is in onderstaand Figuur.

Verskillende dieptes van beworteling voor verschillende gewassen



(Akkerwijzer, 2018).

• **Groei duur**

De groeiduur kan de aanvoer van organische stof beïnvloeden omdat er meer biomassa kan worden aangemaakt bij een langere teelt. Een enkele twee- of meerjarige teelt

houdt de bodem langer bedekt dan twee keer een eenjarige teelt. Olifantsoor (*Miscanthus giganteus*) is bijvoorbeeld een meerjarige teelt die meer organische stofaanvoer heeft dan eenjarige aardappels. Het is echter niet per definitie zo dat meerjarige gewassen meer bijdragen aan koolstofvastlegging. Daarnaast heeft de groeiduur invloed op de C/N-ratio van de gewasresten. Naarmate het gewas ouder is, wordt de C/N-ratio over het algemeen hoger. Hierdoor verteert jong materiaal sneller dan ouder materiaal. Jong bietenblad breekt sneller af dan ouder bietenblad. De groeiduur wordt onder andere bepaald door het zaaitijdstip en het oogsttijdstip. De groeiduur op een perceel kan ook worden verlengd door groenbemesters te zaaien na het hoofdgewas. Groenbemesters houden nutriënten vast in het najaar en worden uiteindelijk ondergewerkt. Onderstaande Tabel geeft de aanvoer van effectieve organische stof bij de teelt van groenbemesters weer voor verschillende zaaimomenten.

In [vraag 20](#) wordt ingegaan op het effect van specifieke gewassen en groenbemesters op koolstofvastlegging.

De aanvoer van effectieve organische stof (kg per ha) bij verschillende groenbemesters en zaaitijdstippen (Handboek Bodem en Bemesting, n.d.).

Groenbemester	Zaaitijdstip						
	15 juli	1 aug	15 aug	1 sep	15 sep	1 okt	15 okt
Japanse haver	-	1650	1000	550	400	350	300
Bladrammenas	2050	1600	950	650	350	150	-
Gele mosterd	1800	1250	750	500	350	250	-
Tagetes	2500	1350	1200	-	-	-	-
Wikken	800	700	500	350	250	-	-

# Welk effect heeft landgebruik op koolstofvastlegging?



Uit een groot aantal verschillende studies en uit IPCC reviews komt naar voren dat landgebruik van grote invloed is op het koolstofgehalte en de potentiële koolstofvastlegging in de bodem. Wanneer we het over type landgebruik hebben, wordt er normaal gesproken onderscheid gemaakt tussen grasland, akkerland, bos en natuur. De koolstofvoorraad in deze typen landgebruik in Nederland verschilt (zie figuur A). We zien dat het koolstofgehalte in akkerland in Nederland over het algemeen lager is dan in grasland of in bos. Op zand en veen heeft grasland de grootste koolstofvoorraad en op klei geldt dat voor bos. Het type landgebruik bepaalt ook hoe lang de koolstof in de bodem aanwezig blijft, mede doordat het type landgebruik invloed heeft op de aanvoer en afbraak van organische stof. Een maat voor hoelang koolstof in de bodem

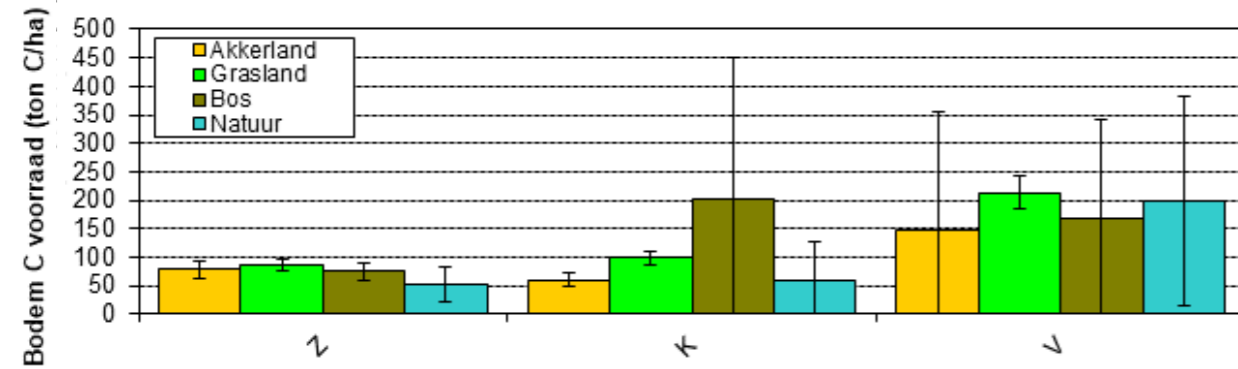
aanwezig blijft is de gemiddelde verblijftijd van koolstof (GVT). Zo zijn voor grasland en akkerland, de belangrijkste landgebruikstypen op landbouwbodems, gemiddelde verblijftijden gerapporteerd van respectievelijk 33 en 22 jaar. Dit geeft aan dat de totale omzetting van organische stof op bouwland lager is dan op grasland, waar de koolstof die wordt aangevoerd dus gemiddeld langer aanwezig blijft in de bodem.

Wanneer het type landgebruik verandert heeft deze verandering invloed op de koolstofvoorraad en de koolstofvastlegging in de bodem. Verschillende studies tonen aan dat wanneer landgebruiksverandering optreedt, de koolstofvoorraad vaker daalt dan stijgt. Dit gebeurt met name wanneer permanent grasland of bos wordt omgezet in akkerland met veelal eenjarige gewassen. Wanneer akker-

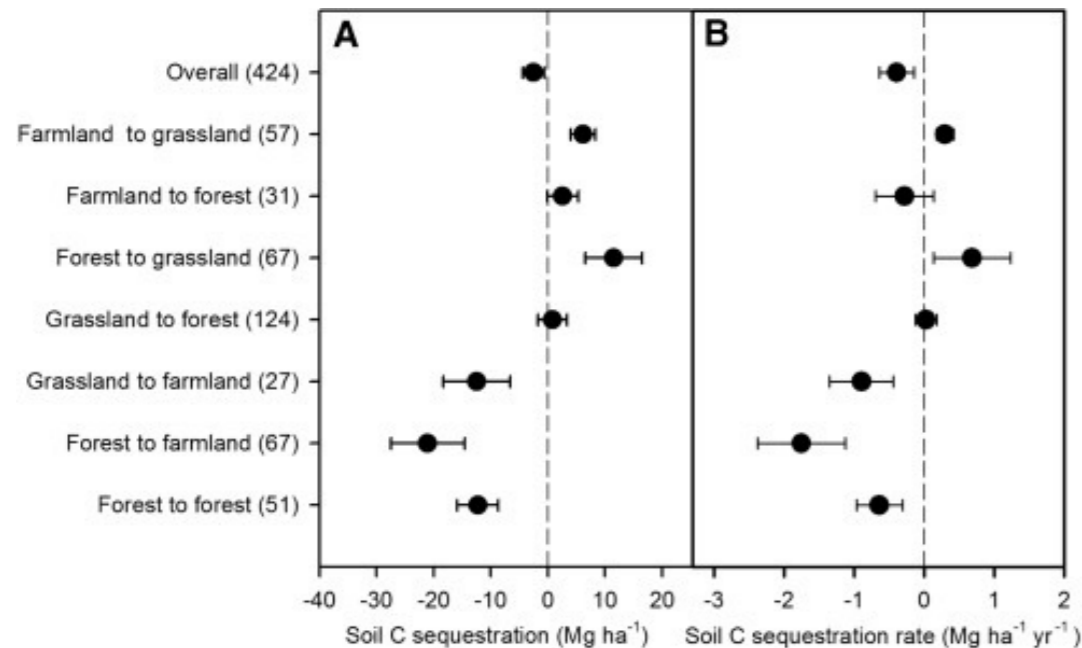


land of bos wordt omgezet naar grasland, leidt dit normaliter tot een toename van de koolstofvoorraad (zie Figuur B). In Nederland zien we echter ook dat grasland veelal in een rotatie zit met eenjarige akkerbouwgewassen, zoals snijmais. Met name op zand komt dit veel voor. Om deze reden zien we dan ook dat er relatief weinig verschil zit in

de koolstofvoorraad onder akkerland en grasland op zand (zie Figuur A). Er zijn naar verwachting vele factoren die naast het voormalige en actuele landgebruik van invloed zijn op de koolstofvastlegging bij landgebruiksverandering, zoals het klimaat, de bodemtextuur, het bodembeheer en het gewastype.



A. Koolstofvoorraad in de Nederlandse bodem in 2018 voor vier typen landgebruik in de bodemlaag 0 – 30 cm, gemeten in 2018 (Tol-Leenders et al. 2019, Finke et al., 2001 en Lesschen et al., 2012). Z: zandgronden; K: kleigronden; V: veengronden. De error bars geven de 95% betrouwbaarheidsintervallen weer.



B. Het effect van landgebruik verandering op de koolstofvoorraad (Mg C/ha, links) en de koolstofvastlegging (Mg C/ha/jaar, rechts) per type landgebruik, gemiddeld voor de hele wereld. Farmland = akkerland; grassland = grasland; forest = bos. De error bars geven de 95% betrouwbaarheidsintervallen weer. Uit Deng et al. (2016).



# Welk effect heeft organische bemesting op koolstofvastlegging?

Om koolstof vast te leggen, moet er meer organische stof worden aangevoerd dan er afbreekt. Een manier om de aanvoer van organische stof te verhogen, is het toedienen van dierlijke mest en/of compost. Compost kan bestaan uit zowel dierlijk als plantaardig materiaal, zoals groente-, fruit- en tuinafval (gft). Een voorbeeld van dierlijke mest is drijfmest of vaste mest. Doorgaans worden dierlijke mest en compost toegevoegd om de opbrengst van productiegewassen te verhogen en de bodemvruchtbaarheid op peil te houden door voedingstoffen in de bodem te brengen. De hoeveelheid organische mest die kan worden toegevoegd is afhankelijk van de beschikbare fosfaatruimte: de hoeveelheid fosfaat die mag worden aangevoerd. Buiten de beschikbare fosfaatruimte kan eventueel stikstof-kunstmest worden toegevoegd om specifiek aan de

stikstofbehoefte van het gewas te voldoen. Indien kunstmest vervangen wordt door organische mest kan meer organische stof worden aangevoerd en mogelijk koolstof worden vastgelegd. Het koolstofgehalte en de afbreekbaarheid, en daarmee de relatieve bijdrage aan koolstofvastlegging, verschilt per type organisch materiaal. Onderstaande Tabel A laat de verschillen zien in de aanvoer van effectieve organische stof (EOS) van verschillende mestsoorten. Van alle soorten organisch materiaal bevat compost het hoogste gehalte EOS, gevolgd door vaste mest. Het laagste EOS-gehalte wordt gevonden in (varkens) drijfmest. De EOS van vaste mest is hoger, omdat dit vaak gemengd is met strooisel, met name stro, waardoor de C/N-ratio hoger is en organische stof stabiel is. Ook compost bestaat uit een relatief stabiele vorm van organi-



sche stof. Dit komt enerzijds doordat micro-organismen tijdens het composteerproces de makkelijk verteerbare organische stof gedeeltelijk afbreken en omvormen tot CO<sub>2</sub>, anderzijds doordat compost doorgaans gedeeltelijk bestaat uit houtig materiaal afkomstig van snoeiafval en dat breekt minder makkelijk af. Een keuze om (een deel van) de kunstmest te vervangen door organische of dierlijke mest is goed voor vastlegging van organische stof in

de bodem. Bij voorkeur wordt er gekozen voor een meststof die moeilijker afbreekt en een hoog gehalte EOS per kg fosfaat bevat. Het is overigens belangrijk om het doel van een netto vastlegging voor alle Nederlandse landbouwgronden voor ogen te houden en daarom is het bij de aanvoer van organisch materiaal van belang dat de aanvoer van organisch materiaal niet elders in Nederland wordt beperkt.

A. De (effectieve) organische stof in kg per ton toegediende mestsoort en hoeveel er na 5 tot 10 jaar nog over is van de hoeveelheid die is toegediend in het begin (Handboek Bodem en Bemesting, n.d).

Mestsoort	Organische stof (kg / ton)	Effectieve organische stof (kg / ton)	Na 5 jaar (%)	Na 10 jaar (%)	De aanvoer van EOS per kg fosfaat (kg EOS/kg P205)
<b>Drijfmest</b>					
Rundvee	71	50	36	26	33
Vleesvarkens	79	26	9	6	7
<b>Vaste mest</b>					
Rundvee	155	109	36	26	25
Varkens	153	50	9	6	6
<b>Compost*</b>					
Gft-compost	242	218	68	56	50
Groencompost	179	161	68	56	73

\* Voor compost geldt een fosfaatvrije voet, wat inhoudt dat 50% van de fosfaat in compost niet mee telt voor de fosfaatgebruiksnorm.

Voor- en nadelen van verschillende methoden voor het bepalen van de koolstofvoorraad.

Maatregel	Gangbaar	Potentiële koolstofvastlegging in Nederland (kiloton CO <sub>2</sub> / jaar)	Nadelen
		Klei	Zand
Dierlijke mest en compost toevoegen	Uitrijden van drijfmest en kunstmest	102	59



# Hoe kunnen veranderingen in het bouwplan in akkerbouwmatige teelten bijdragen aan koolstofvastlegging?

Naast bemesting zijn er andere manieren om organische stof aan te voeren, zoals manieren die gerelateerd zijn aan veranderingen in het bouwplan, waaronder:

- **Aanpassen gewasrotaties**

In veel regio's in Nederland bestaat de vruchtwisseling voornamelijk uit rooigewassen (met name aardappels, suikerbiet, ui) of mais en relatief weinig granen omdat granen minder inkomsten genereren. Voor de oogst van rooigewassen is een intensieve grondbewerking nodig, die de afbraak van organische stof kan verhogen (zie niet-keurende grondbewerking bij [vraag 22](#)). Ook zorgen rooivruchten en mais voor minder aanvoer van organische stof via gewasresten dan granen. Daarom kan gezocht

worden naar rotaties waarbij de aanvoer van organische stof verhoogd wordt. Dit kan door het telen van rustgewassen als granen, maar ook graszaad, grasklaver of luzerne. Er lijken hierbij geen verschillen te zijn tussen klei- en zandbodems. Uit onderzoek blijkt dat de meeste verbeteringen van gewasrotaties de koolstofvastlegging verhogen, maar vanwege de vele variaties op gewasrotaties is er ook variatie in de mate waarin koolstof vastgelegd wordt. Het verbeteren van gewasrotaties hangt ook samen met de maatregel gewasresten achterlaten, aangezien meer graan of andere rustgewassen in het bouwplan leiden tot meer gewasresten van deze gewassen, welke een relatief hogere EOS hebben ten opzichte van de gewasresten van rooigewassen.



- **Groenbemesters en vanggewassen**

Groenbemesters en vanggewassen zijn gewassen die worden geteeld tussen twee productiegewassen in, dus in de tijd dat er geen hoofdgewas op het land geteeld wordt. Groenbemesters worden geteeld om de bodem te verbeteren en dienen als bron van nutriënten voor het volgende productiegewas. Gangbare groenbemesters zijn bijvoorbeeld gele mosterd en bladrammenas. Vanggewassen moeten de uitspoeling tegengaan van bijvoorbeeld stikstof die overblijft of vrijkomt na de oogst. Hiernaast kunnen ze bijdragen aan het verminderen van erosie door wind en water en verlies van bodemmateriaal en organische stof. Vanggewassen zijn in Nederland verplicht na mais, consumptie- en zetmeelaardappelteelt op zand- en lössgrond. De biomassa van groenbemesters en vanggewassen wordt na de teelt ingewerkt in de bodem en dit kan uiteindelijk voor een hoger organische stofgehalte zorgen. Er is nog weinig onderzoek gedaan naar het effect van groenbemesters



Een groenbemester (rechts) na de teelt van het hoofdgewas.

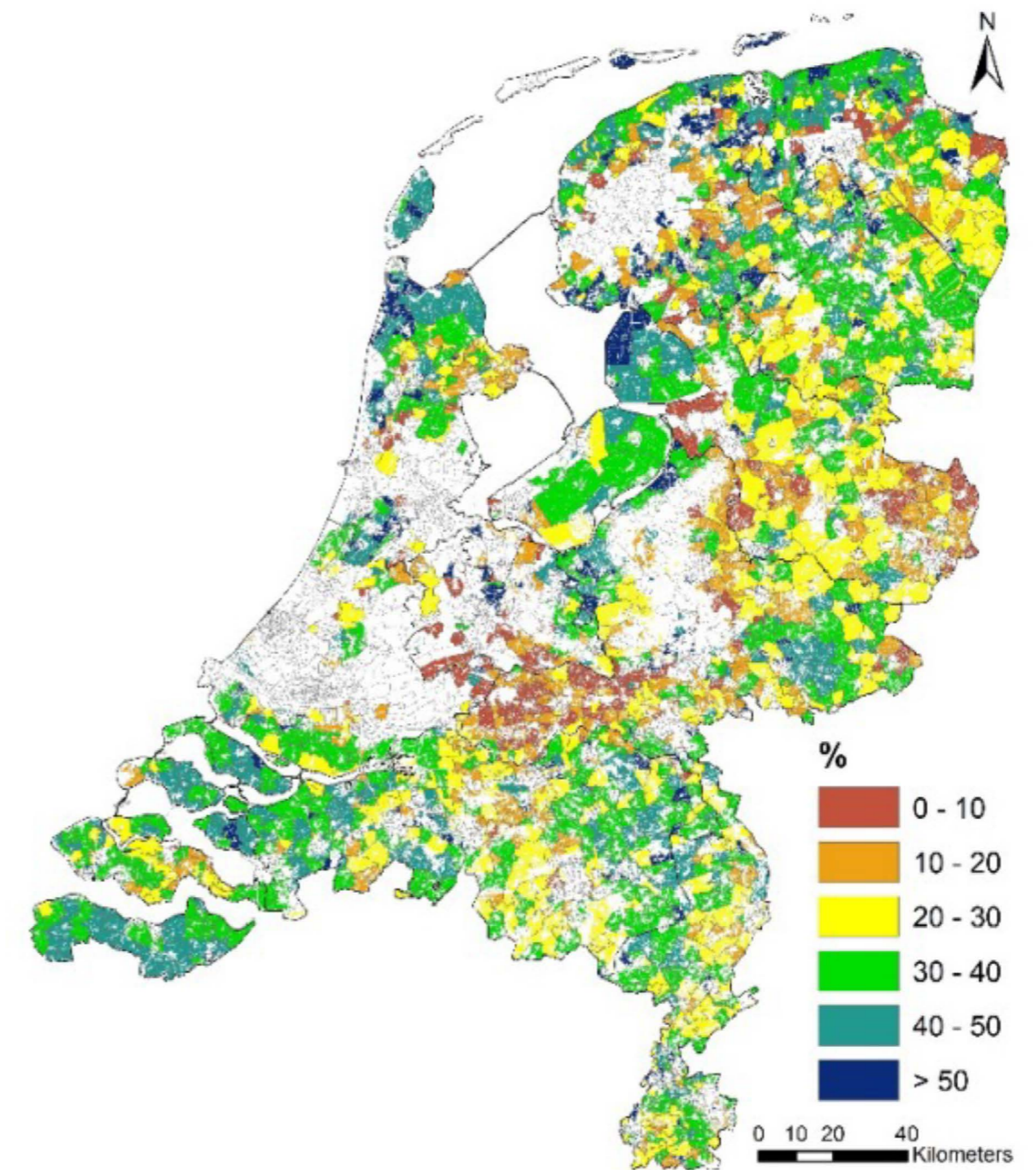
en vanggewassen op koolstofvastlegging in Nederland, maar de potentie is groot.

- **Gewasresten achterlaten**

De stengels, stoppels, bladeren en wortels vormen de gewasresten die na het telen van een gewas overblijven. Er wordt geschat dat 30-40% van de akkerbouwers de stro van tarwe achterlaat en 50-60% de stro van gerst achterlaat. De afgevoerde gewasresten worden onder andere gebruikt voor strooisel in stallen en veevoer. Het laten liggen of onderwerken van de gewasresten in de bodem kan bijdragen aan de opbouw van organische stof, maar er is nog weinig onderzoek in Nederland beschikbaar. De mate waarin bodemorganische stof opgebouwd wordt, hangt onder andere af van de hoeveelheid en vooral de kwaliteit van de gewasresten (de effectieve organische stof; Tabel B). Zo laten bijvoorbeeld suikerbieten relatief weinig gewasresten achter, maar haver relatief veel.



Achterlaten gewasresten (Akkerwijzer, 2021).



Huidige toepassing (2017) van groenbemesters als percentage van het totale areaal bouwland (Lesschen et al. 2021).

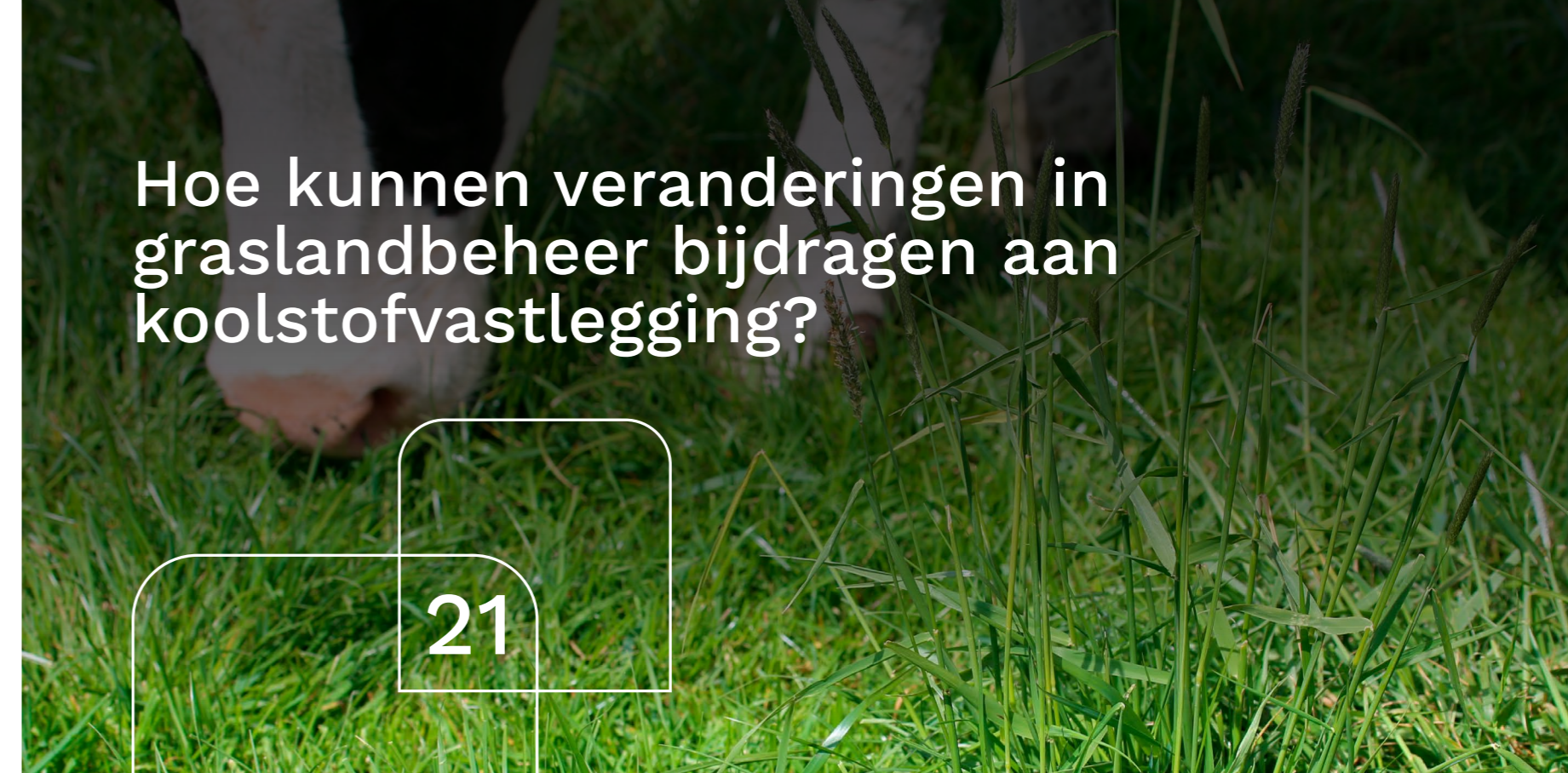


A. De potentiële koolstofvastlegging per jaar in klei- en zandbodems voor gewasresten achterlaten, groenbemesters en vanggewassen en aanpassen van gewasrotaties (Lesschen et al., 2021).

Maatregel	Gangbaar	Potentiële koolstofvastlegging per jaar (kiloton CO <sub>2</sub> / jaar)*	
		Klei	Zand
Gewasresten achterlaten	Gewasresten van granen worden afgevoerd, overige gewasresten worden achtergelaten op het land. Ter illustratie: er wordt geschat dat 30-40% van de akkerbouwers de stro van tarwe achterlaat en 50-60% de stro van gerst achterlaat.	76	11
Groenbemesters en vanggewassen	Enkel hoofdgewas, maar vanggewassen verplicht na teelt op lössgrond	128	52
Aanpassen gewasrotaties (meer granen)	Intensief bouwplan (rotaties met veel rooigewassen of mais en relatief weinig graan)	113	60

B. De (effectieve) organische stof van verschillende gewasresten en hoeveel procent organische stof er na 5 en 10 jaar nog over is van de hoeveelheid die is toegediend in het begin (Handboek Bodem en Bemesting, n.d.).

Gewasrest	Organische stof (kg / ha)	Effectieve organische stof (kg / ha)	Na 5 jaar (%)	Na 10 jaar (%)
Graszaad, 2e jaars Engels raaigras	7150	2150	8	5
Haver, stro achtergelaten	8000	2470	9	5
Luzerne, eenjarig	3000	1350	15	10
Pootaardappel	4400	955	5	3
Snijmais	2000	675	10	6
Suikerbiet (incl. kop en blad)	6000	1275	5	3



## Hoe kunnen veranderingen in graslandbeheer bijdragen aan koolstofvastlegging?

21

Manieren om het organische stofgehalte te verhogen of de afbraak van organische stof te verlagen kunnen ook gerelateerd zijn aan veranderingen in het graslandbeheer. Maatregelen die kunnen bijdragen aan een verhoogd organische stofgehalte in relatie tot veranderingen in het graslandbeheer zijn met name:

- **Leeftijd grasland verhogen**

De leeftijd van grasland kan verhoogd worden door het grasland niet te 'scheuren'. Het scheuren van grasland is het omploegen van bestaand grasland en het inzaaien van nieuw gras of een ander gewas. Dit wordt doorgaans gedaan als de opbrengst en/of kwaliteit van het gras te laag is voor gebruik in de veehouderij. Scheuren van grasland zorgt voor meer zuurstof in de bodem waardoor

organische stof wordt afgebroken. Daarnaast kan dit ook de emissie van lachgas verhogen. Als het grasland ouder is, heeft het al meer organische stof kunnen opbouwen en zal het scheuren daarvan ook grotere CO<sub>2</sub>- en lachgasemissies veroorzaken. Het effect van het verhogen van de leeftijd van grasland op koolstofvastlegging is aangetoond op zowel klei- als zandbodems.

- **Wisselteelt mais-grasklaver**

Doorgaans wordt op een agrarisch bedrijf in de veehouderij 60% permanent gras en 40% mais geteeld. In plaats van deze rotatie kan ook gekozen worden voor de wisselteelt met mais-klaver, dat ook wel de 60-20-20 rotatie wordt genoemd, aangezien hierbij het bouwplan bestaat uit 60% blijvend grasland en 20% grasklaver in rotatie



met 20% snijmais in driejarige wisselteelt. Er is nog weinig onderzoek gedaan naar de effecten van wisselteelt mais-klaver op koolstofvastlegging.



Kruidenrijk grasland.

- **Kruidenrijk grasland**

Doorgaans wordt in de veehouderij grasland gebruikt met enkel Engels raaigras. Kruidenrijk grasland houdt in dat er meerdere soorten kruiden voorkomen in het grasland. Deze bieden variatie in wortelstructuur en diepte van de beworteling. De variatie in de kruiden en daarmee de variabele diepte van de wortels bepaalt de koolstofvastlegging. Verder onderzoek naar kruidenrijk grasland in relatie met koolstofvastlegging is nodig om het effect van de maatregel te kunnen kwantificeren.



Het grasland wordt gescheurd.



Wisselteelt mais-grasklaver.

# Wat kan nog meer worden gedaan om koolstof vast te leggen in Nederlandse minerale landbouwbodems?

22

Naast maatregelen die te maken hebben met bemesting, veranderingen in het bouwplan of graslandbeheer, zijn er nog andere maatregelen die kunnen zorgen voor koolstofvastlegging in de bodem:

- **Akkerranden**

Een- of meerjarige akkerranden kunnen gebruikt worden om verschillende soorten planten zoals bloemen en kruiden te laten groeien en dragen daarmee bij aan de biodiversiteit. Hiernaast worden akkerranden gebruikt om uitspoeling van meststoffen naar naastgelegen sloten te verminderen. Op akkerranden wordt organische stof aangevoerd van diverse soorten planten die in de akkerrand groeien. Een gemiddelde akkerrand beslaat ongeveer 3% van een perceel. In lange termijn experimenten

is een positief effect aangetoond op koolstofvastlegging bij meerjarige akkerranden op klei, maar een negatief effect op zand. Het management van de akkerranden lijkt hierbij sterk van invloed te zijn. Er is nog te weinig onderzoek gedaan naar de rol van akkerranden bij koolstofvastlegging om aan te kunnen geven hoe hoog de exacte potentie van deze maatregel is.

- **Vogelakkers**

Vogelakkers zijn natuurbeheerpakketten binnen het Agrarisch Natuur- en Landschapsbeheer waarbij meerjarige stroken productiegewas afgewisseld worden met stroken natuurbraak met een mengsel van granen en kruiden. De vogelakkers zorgen voor beschutting, waardoor vogels een beschutte broedplek hebben. Hiernaast



bieden de zaden van de stroken natuurbraak in de winter voedsel voor de vogels. De vogelakkers kunnen net zoals akkerranden de aanvoer van organische stof verhogen, maar er is nog onvoldoende onderzoek gedaan naar de rol van vogelakkers in koolstofvastlegging.

- **Agroforestry**

Bij een agroforestry-systeem in de akkerbouw wordt de teelt van eenjarige gewassen aangevuld met houtachtige soorten zoals bomen en struiken op hetzelfde perceel. Binnen de veehouderij kan agroforestry gecombineerd worden met grasland en grazers. Mede door de boom-biomassa en een meer divers en dieper wortelsysteem van houtachtige gewassen wordt meer organische stof opgebouwd. Hiernaast wordt bij beplanting met bomen de vorming van bodemaggregaten gestimuleerd waarin organische stof beschermd kan worden van afbraak. Agroforestry is door de lange levensduur geschikt voor langdurige koolstofvastlegging. De combinatie van grasland met agroforestry heeft een kleiner effect op

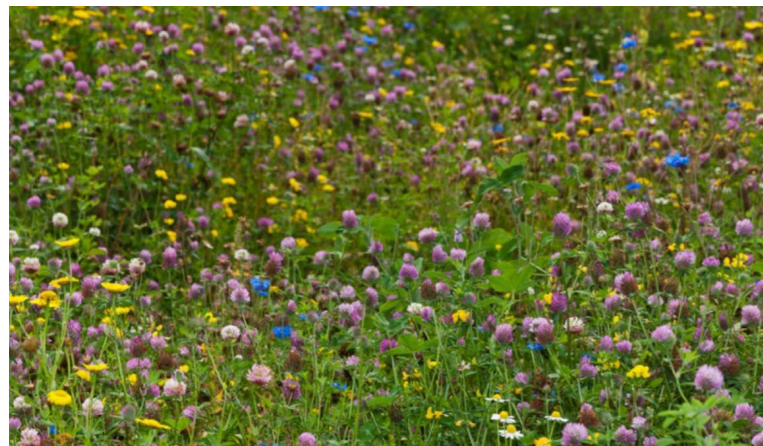
koolstofvastlegging dan de combinatie van akkerland met agroforestry, aangezien grasland al een hoge mate van koolstofvastlegging heeft. Hiernaast bestaan er meerdere soorten agroforestry door de variatie in boomsoorten en gewassen, waardoor het potentieel voor koolstofvastlegging ook verschilt. Er zijn nog weinig metingen gedaan naar koolstofvastlegging bij agroforestry in de Nederlandse context, waardoor verder onderzoek nodig is.

- **Niet - kerende grondbewerking**

De gangbare manier van grondbewerking in Nederland is ploegen. Bij niet-kerende grondbewerking (NKG), een vorm van gereduceerde grondbewerking, wordt de bodem niet meer geploegd, maar wordt de bodem met schijven, tanden of woelers oppervlakkig gescheurd en verkruid tot een maximale diepte van 15 cm, waardoor de bovengrond los en kruimelig wordt. Binnen de veehouderij kan NKG ook toegepast worden bij de maisteelt. Niet-kerende grondbewerking beïnvloedt op

verschillende manieren koolstofvastlegging. Het idee van NKG is dat de bodem minder wordt verstoord dan bij ploegen. Dat heeft ermee te maken dat bij NKG minder zuurstof beschikbaar komt in de bodem waardoor de afbraak van organische stof vermindert en koolstofvastlegging gestimuleerd wordt. Ook worden door ploegen diepere bodemlagen bovengebracht waardoor deze in contact komen met zuurstof en het koolstof uit de diepere bodemlagen kan afbreken. Ploegen kan er ook voor zorgen dat bodemaggregaten opbreken, waardoor de organische stof beschikbaar wordt om afgebroken te worden en hiermee een negatieve invloed op koolstofvastlegging heeft. Daarentegen kan ploegen er juist ook voor zorgen dat gewasresten in de toplaag dieper in de bodem terecht komen en daardoor minder snel worden afgebroken. Nederlandse onderzoeken geven verschillende resultaten over het netto-effect van de verschillende typen grondbewerkingen op de organische stof over de gehele diepte van het bodemprofiel. Het effect van NKG op koolstofvastlegging is daarom

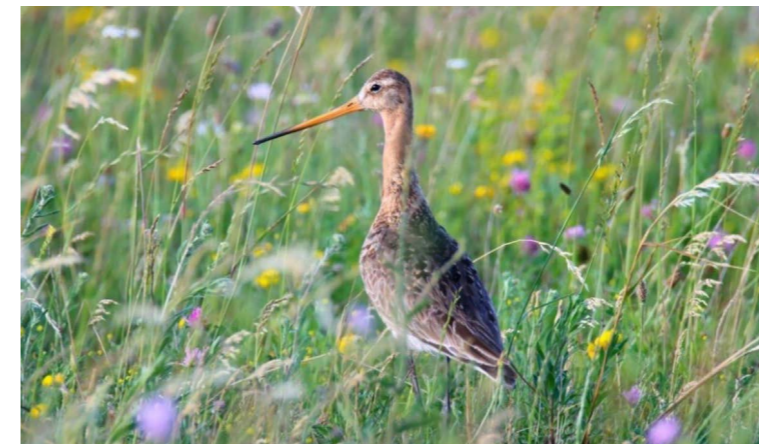
nog niet eenduidig vastgesteld voor Nederlandse landbouwbodems. Eén van de mogelijke oorzaken hiervan is dat het standaard bouwplan in de Nederlandse akkerbouw uit veel rooivruchten bestaat waarbij relatief veel grondbewerking nodig is, wat een toename in organische stof tegengaat. Het is ook mogelijk dat er bij NKG niet zozeer koolstofvastlegging plaatsvindt, maar vooral sprake is van herverdeling van de koolstof over het hele bodemprofiel en verplaatsing naar diepere lagen. Bij NKG concentreert de koolstof zich meer in de bovenste bodemlaag dan bij gangbaar ploegen het geval zou zijn. Dit kan een vertekend beeld geven van de werkelijke extra koolstofvastlegging, aangezien er dan wel een toename van de koolstofvoorraad gemeten wordt in de bovenste bodemlaag, maar een afname in de onderste lagen over het hoofd wordt gezien. Onderzoeken in Nederland of in vergelijkbare condities laten bijvoorbeeld zien dat de hoeveelheid koolstof in de bovenste laag (0-20 cm) toeneemt, maar dat in de laag 30-150 cm de hoeveelheid koolstof voornamelijk afneemt.



Bloemrijke akkerranden.



Agroforestry in Bedfordshire (Agroforestry Research Trust, 2002).



Grutto.



Niet-kerende grondbewerking.



# Wat zijn de kosten van maatregelen om koolstof vast te leggen op de korte termijn?

23

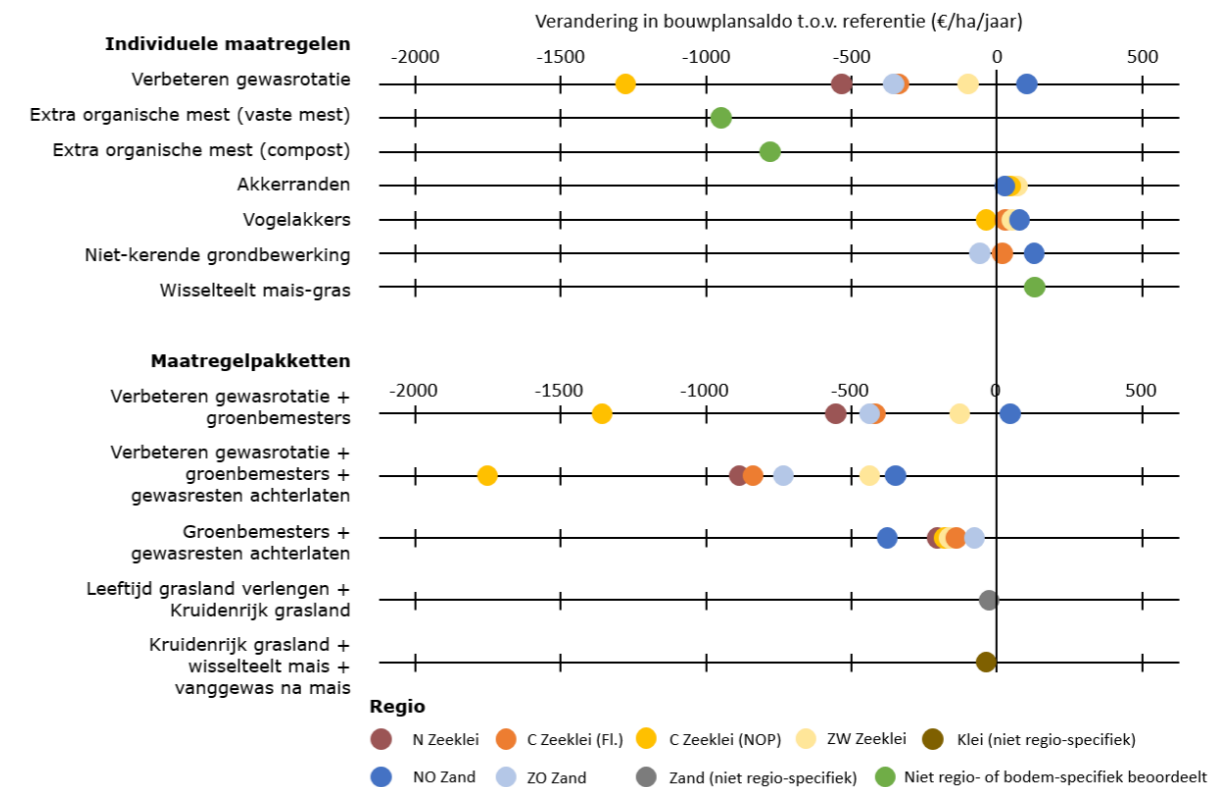
Bij het nemen van maatregelen horen ook financiële kosten en baten die mede bijdragen aan de mate waarin boeren maatregelen zullen nemen. Financiële kosten zijn de extra kosten die boeren moeten maken om een maatregel te nemen ten opzichte van de gangbare praktijk en baten zijn de extra opbrengsten of kostenbesparingen die de boer ontvangt door het nemen van een maatregel. De financiële kosten en baten op korte termijn zijn hierbij gedefinieerd als de kosten die de boer moet maken en de baten die hij daardoor ontvangt binnen één teeltjaar. Kosten kunnen op de korte termijn ontstaan doordat vergeleken met het gangbare bodembeheer extra zaaigoed nodig is, extra investeringen in machines, materieel en gebouwen nodig zijn, of

doordat er hogere onderhoudskosten zijn of er een lagere gewasopbrengst is. Baten kunnen ontstaan door een hogere gewasopbrengst of minder brandstofgebruik door landbouwmachines door minder grondbewerking.

De financiële kosten en baten op de korte termijn zijn voor meerdere maatregelen berekend op klei- en zandbodems in netwerken waaraan akkerbouwers en veehouders verspreid over Nederland hebben deelgenomen (zie Figuur). Uit deze studie blijkt dat bijna alle maatregelen op de korte termijn geld kosten, waarbij er verschillen zijn tussen de kosten- batenbalans op klei- en zandbodems en regio's. De maatregelen akkerranden, vogelakkers, niet-kerende grond-

bewerking en wisselteelt mais-grasklaver leveren in meerdere regio's meer geld op dan dat de maatregelen kosten. De overige maatregelen brengen in de meeste regio's met name extra kosten met zich mee. De kosten die nu als kosten worden gedefinieerd, kunnen echter op de langere termijn (bijvoorbeeld na tien jaar) anders zijn door veranderde wetgeving of technologische vooruitgang. Hiernaast zijn de baten op langere termijn nog niet in beeld gebracht, wat mogelijk tot andere inzichten in de kosten-batenbalansen van de maatregelen en tot aanknopingspunten voor verdienmodellen kan leiden.

Het verbeteren van gewasrotaties is voor verschillende regio's in Nederland uitgewerkt, omdat de bouwplannen per regio sterk verschillen. Meer graan in het bouwplan kost geld, omdat het saldo van granen een stuk lager ligt dan van bijvoorbeeld aardappelen. Met name in de Noordoostpolder (C Zeeklei NOP) tikt dat flink aan, omdat daar op dit moment veel hoog-salderende pootaardappelen worden geteeld die ten behoeve van koolstofvastlegging deels vervangen worden door graan. In het Noordoostelijk zand (de Veenkoloniën) worden minder hoog-salderende gewassen geteeld, waardoor het absolute kosteneffect van de maatregel positiever uitvalt.



Overzicht van de kosten en baten van individuele maatregelen en maatregelpakketten voor verschillende landbouwregio's. Een positieve balans betekent dat een maatregel per hectare geld kan opleveren voor een ondernemer in die regio. Een negatieve balans betekent dat een maatregel kosten met zich meebrengt, ten opzichte van de gangbare praktijk. Voor 'Akkerranden' en 'Vogelakkers' zijn ANLb subsidieregelingen van toepassing. Uit Slier et al. (in press).

# Wat zijn de effecten van maatregelen op andere bodemdiensten?

24



Maatregelen met de potentie om koolstof vast te leggen, kunnen effect hebben op andere bodemdiensten. Het is van belang ook het effect op deze andere bodemdiensten in beeld te hebben vanwege de doelstellingen die zijn gesteld in het Nationaal Programma Landbouwbodems (NPL). Volgens de doelstelling van het NPL moeten in 2030 alle bodems duurzaam worden beheerd om bodemdiensten zoals bodemvruchtbaarheid, biodiversiteit en waterkwaliteit optimaal te blijven benutten. Als boeren gestimuleerd gaan worden om maatregelen te nemen die gericht zijn op koolstofvastlegging, is het van belang om inzicht te hebben in hoe de maatregelen aansluiten bij het brede NPL-doel van duurzaam bodembeheer. De maatregelen kunnen namelijk gepaard gaan met baten die gerelateerd zijn aan deze bodemdiensten. De invloed

van de maatregelen op deze baten kan gerelateerd zijn aan een hoger organische stof gehalte ([vraag 13](#)), maar kan daar ook los van staan. Deze baten kunnen soms pas op de langere termijn (langer dan tien jaar) tot uiting komen. Hieronder worden de effecten van maatregelen op de vier bodemdiensten toegelicht die niet het gevolg zijn van een verhoogd organische stofgehalte:

## • Bodemvruchtbaarheid

Met de maatregel 'aanvoeren dierlijke mest en compost' wordt niet alleen organische stof, maar worden ook nutriënten aangevoerd. Deze dragen mogelijk bij aan een betere bodemvruchtbaarheid. Als gevolg van de maatregel 'groenbemesters en vanggewassen' worden nutriënten na de hoofdteelt opgenomen, die na onder-

werken in de bodem terechtkomen. Daarnaast dragen groenbemesters en vanggewassen mogelijk bij aan een betere bodemstructuur, waardoor nutriënten beter beschikbaar zijn.

## • Biodiversiteit

Een hogere (bodem)biodiversiteit speelt een belangrijke rol in de natuurlijke kringlopen en leidt tot een verbeterde bodemvruchtbaarheid. Met een verhoogd organische stofgehalte kan de bodem bij afbraak van organische stof energie bieden aan micro-organismen, voedingstoffen aan planten en kan de gewasopbrengst verhoogd worden. Naast het effect van een verhoogd organische stofgehalte op biodiversiteit, kunnen verschillende maatregelen ook op andere manieren effect hebben op de biodiversiteit. Zo kunnen niet-kerende grondbewerking en de leeftijd van het grasland verhogen het bodemleven bevorderen door een verminderde verstoring van de bodem. Groenbemesters en vanggewassen, agroforestry, akkerranden en vogelakkers stimuleren hiernaast biodiversiteit door beschutting en voedsel te bieden aan bijvoorbeeld vogels. Betere gewasrotaties kunnen hiernaast het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen verminderen, waardoor het bodemleven minder wordt geschaad. Ook kruidenrijk grasland kan de biodiversiteit verbeteren door de variatie in gras- en kruidensoorten.

## • Waterkwaliteit

De waterkwaliteit is een belangrijke bodemdienst, omdat schoon water van belang is voor mens, dier en natuur. Verschillende maatregelen kunnen invloed hebben op de waterkwaliteit doordat een bodem met

een verhoogd organische stofgehalte beter voedingsstoffen, zware metalen en andere verontreinigende stoffen vast kan houden. Naast het effect van een verhoogd organische stofgehalte kunnen de maatregelen ook op andere manieren invloed hebben op de waterkwaliteit. Groenbemesters/vanggewassen, het achterlaten van gewasresten, kruidenrijk grasland en betere gewasrotaties kunnen op korte termijn nitraatuitspoeling verminderen doordat de benodigde (kunst)mest voor de hoofdgewassen verminderd wordt. Tevens nemen groenbemesters/vanggewassen voedingstoffen zoals nitraat op. Deze maatregelen kunnen echter op langere termijn bij afbraak van de extra opgebouwde organische stof leiden tot nitraatuitspoeling in het vroege voorjaar. De aanvoer van dierlijke mest en compost kan mogelijk leiden tot meer nitraatuitspoeling, afhankelijk van de samenstelling van de mest, het moment van afbraak en de plantopname. Ook bij het verhogen van de leeftijd van grasland kan meer nitraatuitspoeling plaatsvinden doordat op ouder grasland het gras minder snel groeit.

## • Waterbuffercapaciteit

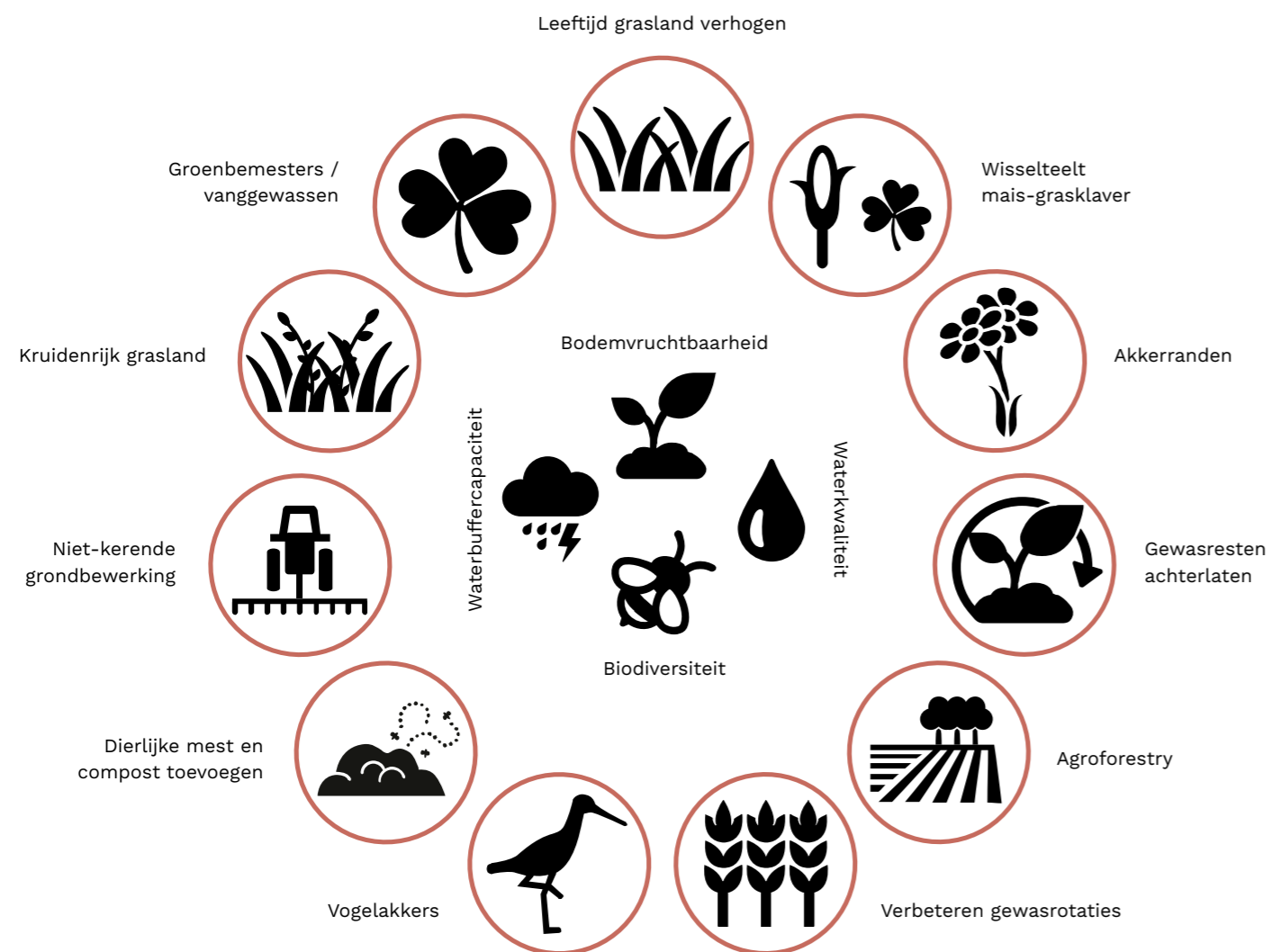
De waterbuffercapaciteit is belangrijk om beter bestand te zijn tegen droogte en extreme regenval en daarmee voor klimaatadaptie. Een verhoogd organische stofgehalte heeft invloed op het waterhoudend vermogen doordat organische stof vocht kan vasthouden en de bodemstructuur verbetert. De bodemstructuur en daarmee waterbuffercapaciteit kan verbeterd worden bij het toepassen van niet-kerende grondbewerking en de leeftijd van grasland verhogen, omdat bodemaggregaten hierbij meer intact blijven. Ook kan bij toepassing van



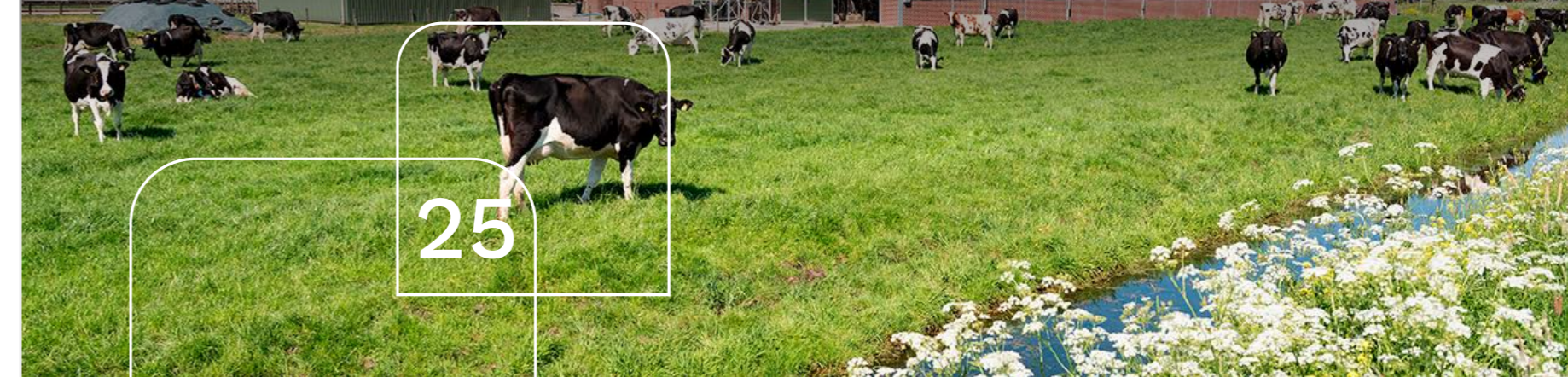
groenbemesters en vanggewassen door de wortels de bodemstructuur beter stand houden bij hevige regenval. Hiernaast kunnen diepwortelende bomen in een agroforestry-systeem de bodemstructuur verbeteren en daarmee de infiltratie van water bevorderen.

Hiernaast kunnen diepwortelende bomen in een agroforestry-systeem de bodemstructuur verbeteren en daarmee de infiltratie van water bevorderen.

De maatregelen onderzocht in het onderzoeksprogramma Slim Landgebruik en de bodemdiensten uit het Nationaal Programma Landbouwbodems.



# Wat zijn kansen en belemmeringen voor inpassing van maatregelen om koolstof vast te leggen in het bedrijf?



De totale potentie voor koolstofvastlegging in Nederlandse minerale landbouwbodems kan berekend worden op basis van de geschatte effectiviteit in koolstofvastlegging van de maatregelen en de hoeveelheid landbouwareaal waarop de maatregelen in theorie toegepast kunnen worden. Op basis van deze berekening is de potentie voor koolstofvastlegging het hoogst voor de maatregelen leeftijd grasland verhogen, verbeteren gewasrotaties, groenbemesters/vanggewassen, gewasresten achterlaten en het toevoegen van dierlijke mest en compost. Echter, de potentie voor koolstofvastlegging in Nederlandse landbouwbodems wordt mede bepaald de toepasbaarheid van maatregelen in het boerenbedrijf. Geld speelt een belangrijke rol voor een boer om maatregelen te nemen die gericht zijn op koolstofvastlegging, maar er kunnen

ook andere redenen zijn waarom een boer maatregelen al dan niet toepast. Hier zijn regionale verschillen te zien. Daarom is het van belang om inzicht te hebben in welke kansen en belemmeringen voor de inpassing van maatregelen op het bedrijf een rol spelen. De volgende aspecten hebben invloed op in hoeverre maatregelen gericht op koolstofvastlegging ook in de bedrijfsvoering passen:

## • Inpassing huidig bouwplan

De inpassing in het huidige bouwplan gaat over het gemak waarmee de maatregelen die direct betrekking hebben op veranderingen in het bouwplan of op een andere manier het bouwplan beïnvloeden, in te passen zijn.



- **Benodigde investeringen**

Met de benodigde investeringen wordt de hoeveelheid investeringen bedoeld die nodig is in landbouwmachines, materieel en gebouwen zodat de maatregelen uitgevoerd kunnen worden.

- **Arbeid en scholing**

Arbeid en scholing gaat over hoeveel extra arbeid er nodig is en of de juiste kennis en ervaring aanwezig is om de maatregelen te nemen.

- **Bewustzijn**

Boeren spelen een belangrijke rol met betrekking tot het behalen van klimaat- en duurzaamheidsdoelen. Wanneer hier bewustzijn over is, kan dit van invloed zijn op het al dan niet toepassen van maatregelen. Dit is wellicht extra belangrijk in geval van bijvoorbeeld pacht, wanneer effecten op lange termijn niet ten voordele komen van de huidige landgebruiker.

- **Extra teeltschade**

Extra teeltschade is de teeltschade die extra wordt aangebracht aan het hoofdgewas doordat het nemen van maatregelen bijvoorbeeld onkruid en aaltjes met zich meebrengt.

- **Conflict andere beleidsregels**

Conflicten met andere beleidsregels houden in dat het nemen van de maatregelen gehinderd wordt door bestaande beleidsregels.

- **Meerwaarde van producten**

De meerwaarde van producten heeft betrekking op het gemak waarmee het product af te zetten is op de markt als het volume of de prijs toeneemt bij het nemen van de maatregelen.

- **Weerbaarheid tegen klimaatverandering**

De weerbaarheid tegen klimaatverandering gaat over het effect van de maatregelen op de weerbaarheid van de bodem en de gewasteelt tegen de effecten van klimaatverandering (zoals droogtes).

- **Diversificatie van de geteelde gewassen**

Diversificatie van de geteelde gewassen houdt in dat het aantal verschillende gewassen dat momenteel geteeld wordt toeneemt bij het nemen van maatregelen, en daarmee ook de biodiversiteit.

### Conflict met andere beleidsregels

Toevoegen van mest en/of compost draagt bij aan koolstofvastlegging, maar moet wel passen binnen de kaders van het mestbeleid. Het mestbeleid richt zich op het verminderen van uitspoeling van nitraat en fosfaat naar oppervlaktewaters en uitstoot van ammoniak naar de lucht. Hiervoor wordt een limiet gesteld aan de hoeveelheid meststoffen die mag worden toegevoegd aan de bodem. Het toedienen van dierlijke mest en compost heeft te maken met de aanvoer van organische stof uit meststoffen en moet daarmee binnen het mestbeleid passen. Er is wel potentie om binnen het mestbeleid kunstmest te gaan vervangen door dierlijke mest of compost.

- **Gewassaldo (hoeveel geld levert het gewas op per ha)**

Het gewassaldo gaat over hoeveel geld een gewas per ha oplevert en hoe het gewassaldo na het nemen van de maatregelen op de korte termijn en lange termijn (bijvoorbeeld tien jaar) verandert.

Op basis van deze aspecten zullen de maatregelen dierlijke mest en compost toevoegen, groenbemesters/vanggewassen, akkerranden en onder voorwaarden ook niet-kerende grondbewerking mogelijk het meest geaccepteerd worden door akkerbouwers. Deze acceptatie wordt bijvoorbeeld geïllustreerd doordat akkerbouwers en veehouders uit praktijknetwerken gemotiveerd zijn om kunstmest te vervangen door organische meststoffen en dat er interesse is in groenbemesters, met als kanteekening dat er zorgen zijn over het risico van plant-parasitaire aaltjes. De acceptatie voor het verhogen van de leeftijd van grasland wordt bijvoorbeeld bepaald doordat het voorkomen van het scheuren van grasland vrij goed toepasbaar is, ondanks dat het wisselbouw met akkerbouwgewassen moeilijker maakt. Een ander voorbeeld van een specifieke belemmering is dat bij het toevoegen van dierlijke mest en compost de vraag naar dierlijke mest en compost groter zal zijn dan het aanbod. Ter illustratie is voor een aantal maatregelen het aspect 'conflict met andere beleidsregels' in het Kader uitgelicht.



Er worden bodemonsters genomen bij boeren die aan de slag zijn met maatregelen. Met behulp van de bodemgegevens en op basis van keukentafelgesprekken worden de kansen en belemmeringen van maatregelen in beeld gebracht.





# Op welke manier kunnen boeren gemotiveerd worden om maatregelen te nemen die koolstof vastleggen?

26

Door de kosten op de korte termijn, de onzekerheid van de baten op de lange termijn en andere belemmeringen kunnen boeren minder gemotiveerd zijn om maatregelen te nemen om koolstof vast te leggen. Daarom is het van belang om te kijken welke prikkels gebruikt kunnen worden om boeren te stimuleren maatregelen te nemen die gericht zijn op koolstofvastlegging. Boeren kunnen geholpen worden om maatregelen te nemen door intrinsieke motivatie om bij te dragen aan klimaatdoelen, leren van lokale initiatieven in de praktijk (rolmodellen), hulp bij implementatie van de maatregelen of extra beleidsruimte omtrent toediening van organische meststoffen. De overheid kan extra beleidsruimte bieden waarin van bestaande wetgeving afgeweken kan worden bij goed bodemkoolstofbeheer. Hiernaast kunnen

financiële prikkels boeren helpen om maatregelen te nemen. Daar zijn verschillende mogelijkheden voor, bijvoorbeeld via verwaarding. Verwaarding van koolstofvastlegging houdt in dat een verhoging van de bodemkoolstofvoorraad geld oplevert. De financiële prikkels kunnen grofweg binnen drie soorten verdienmodellen ontwikkeld worden: binnen de landbouwketen, buiten de landbouwketen en in samenwerking met overheidsinstanties (zie Figuur).

#### • Binnen de landbouwketen

Binnen de landbouwketen kunnen ketenafspraken worden gemaakt over bijvoorbeeld een hogere productprijs waardoor de boer compensatie krijgt voor inkomsten die de boer mogelijk mist bij het nemen van

maatregelen die gericht zijn op koolstofvastlegging. Een bedrijf dat via koolstofvastlegging in de landbouw wil verduurzamen, kan zijn producten aan de klant verkopen via duurzame marketing. Een voorbeeld in de Nederlandse context is het 'On the Way to Planet Proof'-keurmerk, dat uitgegeven wordt voor producten waarbij er aandacht is voor duurzaamheid. Als een boer direct zijn producten afzet aan consumenten kan er ook een extra prijs gevraagd worden. Hier moet dan wel een afzetmarkt voor bestaan. Er zijn momenteel geen initiatieven die zich expliciet focussen op koolstofvastlegging in landbouwbodems en monitoring en daarmee ontbreekt certificering van de werkelijke koolstofvastlegging tot nu toe.

#### • Buiten de landbouwketen

Buiten de landbouwketen kan er gekeken worden naar het koppelen van bedrijven in de industriële sector met de landbouwsector, waarbij de industriebedrijven de boeren betalen om koolstof op te slaan om zo hun eigen uitstoot te 'compenseren'. Het nadeel hiervan is dat deze compensatie die aan de industrie wordt toegekend, niet meer gebruikt kan worden als compensatie voor de landbouw. De vastgelegde koolstof telt maar één keer mee. In veel landen valt koolstofvastlegging in de landbouw binnen een vrijwillig Emission Trading Scheme (ETS). In een ETS kan vastgelegde koolstof in de bodem een monetaire waarde krijgen als de rechten om CO<sub>2</sub> uit te stoten op een vrije markt verhandeld kunnen worden. Als emissies afnemen in de landgebruik sector zoals door koolstofvastlegging in landbouwbodems, kunnen er credits gegenereerd worden die gebruikt kunnen worden om broeikasgasemissies in

de sectoren die meedoen aan de ETS te compenseren. Op deze manier is de emissiehandel in uitstootrechten van broeikasgassen een markt die via vraag en aanbod de uitstoot van broeikasgassen omlaag kan brengen. Hierbij komt ook nog eens dat elk jaar de hoeveelheid broeikasgas die uitgestoten mag worden omlaaggaat, wat extra druk geeft voor de deelnemende bedrijven om hun uitstoot omlaag te brengen of te compenseren. De ETS van de EU (EU ETS) is het grootste emissiehandelsstelsel van de wereld, maar neemt momenteel geen landbouwemissies mee, in tegenstelling tot die van Nieuw-Zeeland, Australië, Japan, Canada en de Verenigde Staten. In de toekomst wordt de landbouwsector mogelijk wel meegenomen in het EU ETS-systeem. Het is momenteel voor grote industriële bedrijven die broeikasgassen uitstoten verplicht om deel te nemen aan emissiehandel. Naast dat het ETS-systeem een verdienmodel kan vormen voor koolstofvastlegging buiten de landbouwketen, bestaan er in de Nederlandse context ook andere initiatieven voor de verwaarding van koolstofvastlegging. Een voorbeeld is het 'koolstofcertificaten'-systeem (carbon credits) dat ontwikkeld wordt om het nemen van maatregelen om koolstof vast te leggen te vergoeden ([vraag 27](#)). Koolstofcertificaten zijn certificaten die een afnemer kan kopen om een boer te betalen als er een bepaalde hoeveelheid koolstof in de bodem vastgelegd wordt. Er loopt nu een pilot van koolstofcertificaten, waarin Zeeuwse boeren gekoppeld zijn aan de windenergiecoöperaties Deltawind en Zeeuwind en tegen een vergoeding koolstof opslaan in hun bodem (zie Kader).



• **In samenwerking met overheidsinstanties**

Als derde verdienmodel kunnen overheidsinstanties certificaten en geld aan boeren geven om koolstof op te slaan omdat een hoger organisch stofgehalte bijdraagt aan het verbeteren van ecosysteemdiensten en specifiek aan klimaatmitigatie levert. Hiernaast kunnen overheidsinstanties inzetten op rentekorting, pachtkorting en GLB-toeslagen. Rentekorting houdt in dat de rente die de boer moet betalen voor het leenbedrag voor de grond omlaaggaat als hij koolstof gaat vastleggen op die grond. Ook banken kunnen korting geven op hun leningen als er aan duurzaamheidsdoelen zoals koolstofvastlegging gewerkt wordt. Pachtkorting houdt in dat de grondeigenaar (bijvoorbeeld een provincie) korting geeft op de

pacht als koolstofvastlegging gestimuleerd wordt op die grond. Aangezien koolstofvastlegging een traag proces is en investeringen in maatregelen om deze vastlegging te stimuleren vaak voor de lange termijn zijn, zou het pachtbeleid tevens langere contracten moeten toestaan. Hiernaast kunnen vanuit de GLB ook toeslagen gegeven worden. In 2022 wordt er een vernieuwing van het GLB verwacht, waarin koolstofvastlegging een van de pijlers zal zijn die bijdraagt aan duurzaam bodembeheer. Mogelijk kunnen via het nieuwe GLB maatregelen om koolstofvastlegging te stimuleren gedeeltelijk gefinancierd worden door maatregelen te erkennen als 'pluspakket'.

De verschillende verdienmodellen, opgedeeld in 'binnen de landbouwketen', 'buiten de landbouwketen' en 'in samenwerking met overheidsinstanties'. Binnen de landbouwketen is het 'On the way to Planet Proof' niet het enige keurmerk, maar een voorbeeld van een keurmerk.



## Carbon Farming in Zeeland

Het Carbon Farming project is een initiatief van ZLTO waarin vijftien Zeeuwse boeren met in totaal 670 ha landbouwgrond gekoppeld zijn aan de windenergie-coöperaties van Zeeuwind en Deltawind. Deze coöperaties belonen de boeren voor de hoeveelheid koolstof die wordt vastgelegd met de winst die ze maken met het windpark Krammer. Het doel van het project is om een methodiek te ontwikkelen voor het belonen van koolstofvastlegging, waarbij ervaringen in de praktijk worden opgedaan. Het project loopt van 2020-2050 en de totale verwachte hoeveelheid koolstofvastlegging is voor aanvang van het project berekend op basis van de maatregelen die genomen worden. Voorbeelden van maatregelen zijn onder andere niet-kerende grondbewerking, geen grondbewerking, blijvend grasland en gewasresten achterlaten.



Eén van de deelnemende percelen van het Carbon Farming project (ZLTO, 2019).



# Wat zijn de mogelijkheden van koolstofcertificaten?

27

## Wat zijn koolstofcertificaten?

Koolstofcertificaten zijn certificaten die een afnemer kan kopen om een boer te betalen voor het vastleggen van een bepaalde hoeveelheid koolstof in de bodem. Op dit moment kunnen via o.a. de Stichting Nationale Koolstofmarkt (SNK) certificaten verkregen worden voor de koolstof die in bodems vastgelegd wordt door middel van blijvend grasland. Voor de certificaten wordt een afnemer gezocht, zoals een bedrijf dat een manier zoekt om de broeikasgasuitstoot van het bedrijf (deels) te compenseren (zie Figuur). Om het certificatenstelsel

goed te laten werken moet er voldoende afzetmarkt zijn voor de certificaten (zie Kader). Het systeem werkt op projectbasis. In een vrijwillige koolstofmarkt betekent dit dat een groep boerenbedrijven samen een project kan starten door een projectplan ter goedkeuring in te dienen bij de SNK.

Er zitten op dit moment nog wel haken en ogen aan het systeem voor carbon credits vanwege onder andere de duur van het project, monitoring van de vastlegging, additionaliteit, prijs en aan welke sector de emissiereductie wordt toegekend.

## Methodiek blijvend grasland

Sinds juli 2021 heeft de SNK een methodiek beschikbaar voor koolstofcertificaten voor 'blijvend grasland' op minerale bodems. Blijvend grasland houdt in dat het grasland voor minimaal tien jaar niet gescheurd wordt en moet worden toegepast op minimaal de helft van de percelen van elk bedrijf dat meedoet aan het project. Deze methode is geaccrediteerd door de SNK en wordt door de SNK gebruikt voor de garantstelling van de kwaliteit van de koolstofcertificaten. Er zijn belangrijke voorwaarden voor verwaarding van koolstofvastlegging door middel van koolstofcertificaten, o.a. dat een project gericht op koolstofvastlegging additioneel moet zijn (zie Kader voor verdere uitleg). Er worden methodieken voor andere maatregelen om koolstof vast te leggen voorbereid.

## Hoe wordt de verwachte koolstofvastlegging door de maatregel blijvend grasland geschat?

De methode voor het verwaarden van koolstofvastlegging via koolstofcertificaten voor blijvend grasland gaat uit van een 'nulmeting'. Hiervoor wordt de hoeveelheid bodemkoolstof in de deelnemende percelen in jaar 0 bepaald. Dit gebeurt volgens een standaard meetprotocol. Om de hoeveelheid koolstof goed te kunnen bepalen wordt ook het bodemtype (o.a. door het gemiddelde kleigehalte) vastgesteld. Deze informatie wordt gebruikt om de gemiddelde initiële bodemkoolstofvoorraad te bepalen (de nulmeting). Aannee binnen de methodiek is dat zonder de maatregel 'blijvend grasland' de bodemkoolstofvoorraad constant zou blijven (dit wordt de baseline genoemd). Vervolgens wordt door middel van een model het potentieel voor koolstofvastlegging voor de komende tien jaar geschat. De geschatte potentiële vastlegging van koolstof in de bodem voor blijvend grasland is gemiddeld 2,55 ton

## Waarde van koolstofcertificaten

De waarde van koolstofcertificaten stijgt al enige tijd. Een koolstofcertificaat staat gelijk aan 1 ton CO<sub>2</sub>. De prijs van 1 ton CO<sub>2</sub> ligt momenteel tussen € 20-100. Op perceelbasis zal dit veelal hoogstens kostendekkend zijn voor de maatregelen die de boer neemt en zal het niet veel financieel bijdragen aan de inkomsten van de boer. Echter wordt verwacht dat in de toekomst een hogere prijs voor koolstofcertificaten zal worden betaald.

Bron: Boerderij, 20 Juli 2021



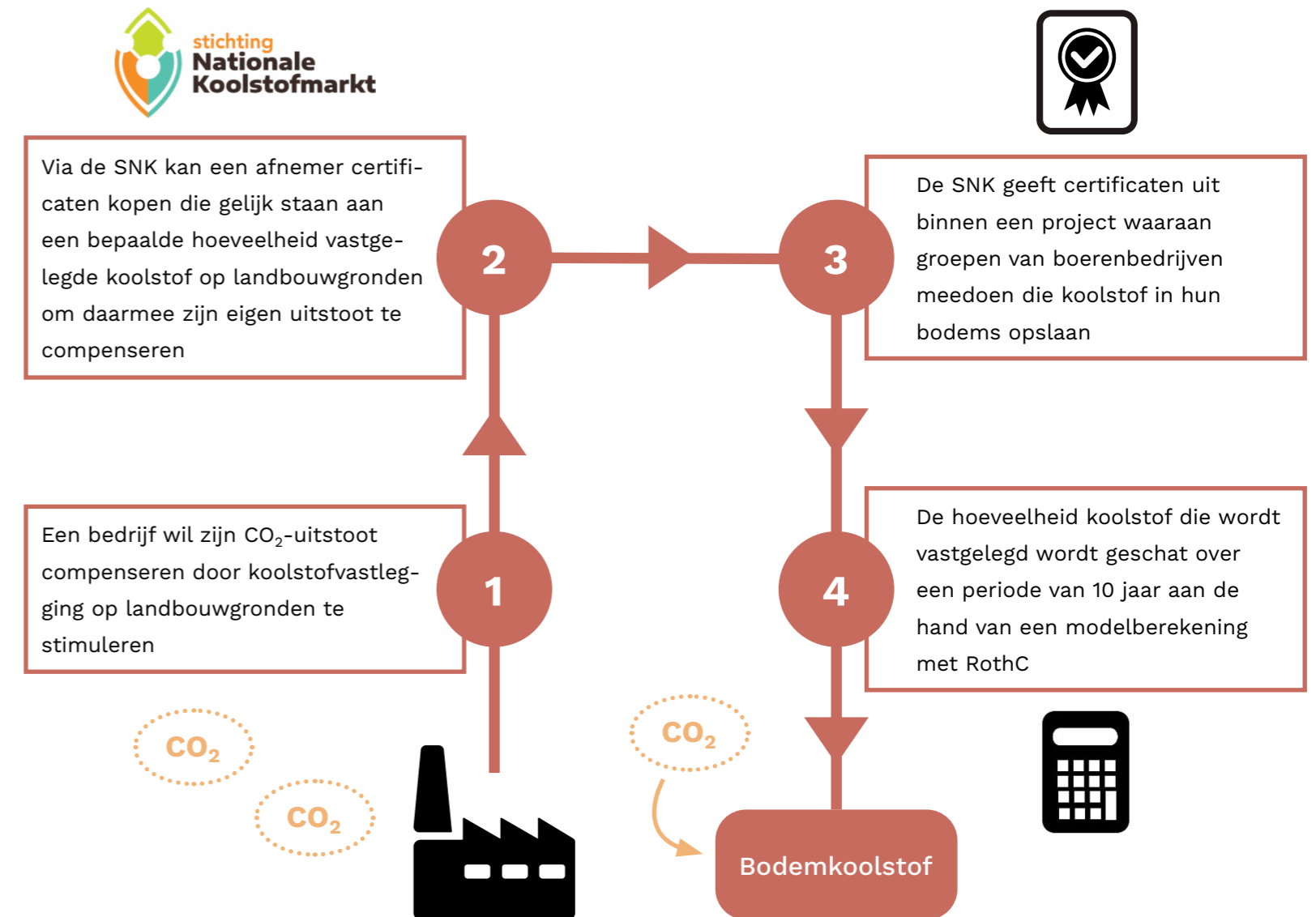
CO<sub>2</sub>/ha/jaar op zandgrond en 1,59 ton CO<sub>2</sub>/ha/jaar op klei-  
grond. Na tien jaar wordt de hoeveelheid koolstof opnieuw  
gemeten om vast te stellen hoeveel koolstof daadwerke-  
lijk is vastgelegd. De met het model in jaar 0 berekende  
hoeveelheid extra koolstofvastlegging die verwacht wordt  
over een periode van tien jaar is de basis voor de hoeveel-  
heid certificaten die uitgegeven wordt. Ieder jaar van het  
tienjarige project krijgt elk deelnemend bedrijf 5% van de  
waarde van de berekende hoeveelheid koolstofvastlegging  
die verwacht wordt na tien jaar. Na tien jaar is dus de helft

van de certificaten toegekend (10 x 5% per jaar is 50%). Als  
tien jaar aan de eis van continu blijvend grasland is voldaan,  
maar bij de eindmeting (analyse van bodemonsters in  
jaar tien) blijkt dat binnen het totale project minder dan  
50% van de initiële berekende koolstof daadwerkelijk over  
tien jaar is vastgelegd, dan wordt de tweede helft van de  
certificaten niet meer uitgegeven aan de deelnemende  
boerenbedrijven. De eerste helft van de certificaten wordt  
wel uitgegeven, mede als vergoeding voor het nemen van  
de maatregel blijvend grasland.

### Additionaliteit

Volgens de Stichting Nationale Koolstofmarkt houdt de additionaliteit van een koolstofvastleggingsproject in dat de maatregel die binnen een project genomen wordt 1) geen onderdeel is van bestaand of voorgenomen beleid van de Rijksoverheid, Europese Unie of regionale overheden en 2) de toegepaste manier van bodembeheer momenteel niet gangbaar is binnen het project. Hiermee levert het nemen van een maatregel een positieve bijdrage aan koolstofvastlegging die niet was gebeurd zonder dat de maatregel genomen zou zijn en komt deze koolstofvastlegging ook boven op de eventuele koolstofvastlegging die al plaatsgevonden zou hebben zonder de genomen maatregel. Voor het voorbeeld van blijvend grasland zijn de projecten meestal additioneel, met uitzondering van de bestaande regel dat grasland in Natura 2000-gebieden sowieso niet gescheurd mag worden.

Een schematische weergave van de methodiek achter carbon credits via SNK.





# Hoe worden de koolstofvoorraad en koolstofvastlegging in Nederlandse minerale landbouwbodems gemonitord?

28

Om het doel binnen het Klimaatakkoord om vanaf 2030 een additionele hoeveelheid van 0,4 - 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vast te leggen in minerale landbouwbodems te halen, is goede monitoring van belang. Het monitoren van de bodemkoolstofvoorraden wordt op twee manieren gedaan, namelijk 1) metingen van de bodemkoolstofvoorraad en 2) modelberekeningen.

In de periode 2018-2019 is de bodemkoolstofvoorraad van Nederlandse landbouwbodems binnen het CC-NL-netwerk op 1152 locaties gemeten (zie Figuur). De organische stofgehalten zijn hierbij gemeten met de gloeiverlies- en NIR-methoden. De CC-NL metingen van de bodemkoolstofvoorraad dienen als input voor de modelberekeningen

en als nulmeting om toekomstige veranderingen in de bodemkoolstofvoorraden waar te kunnen nemen. Het CC-NL-netwerk is hiermee de basis voor het monitoren van de voortgang van koolstofvastlegging in minerale landbouwbodems.

Om een additionele hoeveelheid van 0,4 - 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vast te leggen in minerale landbouwbodems, zal het gemiddelde organische stofgehalte op alle minerale landbouwbodems met bijna 0,03%-punt moeten toenemen. Als deze toename gemeten moet worden, moet er echter rekening gehouden worden met de onzekerheid van de metingen van de bodemkoolstofvoorraad. De kleinste verandering in het organische stofgehalte die in de bodems

kan worden waargenomen met de huidige meetmethoden is namelijk maar gemiddeld 0,14%-punt (overeenkomend met een toename in de bodemkoolstofvoorraad van 0,007 Mton koolstof per vijf jaar). De benodigde gemiddelde absolute toename van bijna 0,03%-punt op alle minerale landbouwbodems is dus lager dan de minimale hoeveelheid waarneembare verandering en valt hiermee binnen de onzekerheidsmarge. Dit betekent dat de benodigde toename lastig waar te nemen zal zijn, omdat een gemeten toename in de bodemkoolstofvoorraad ook veroorzaakt kan zijn door de onzekerheid van de meetmethode.

Om een trend te kunnen waarnemen, is er daarom een grotere hoeveelheid metingen over langere tijd nodig, ook om de effecten van maatregelen aan te tonen. Vanaf 2021 is daarom voorgesteld om vijfjaarlijks steekproeven uit te voeren om de bodemkoolstofvoorraden te meten. Daarbij is een duidelijke en constante methode voor de bepaling van de bodemdichtheden van belang om de totale bodemkoolstofvoorraad uit te rekenen op basis van te meten organische stof- of koolstofgehalten.



Overzicht CC-NL steekproef locaties welke in 2018 zijn bemonsterd (Van Tol-Leenders et al., 2019).



# Hoe wordt koolstofvastlegging in Nederlandse minerale landbouwbodems gerapporteerd?

29

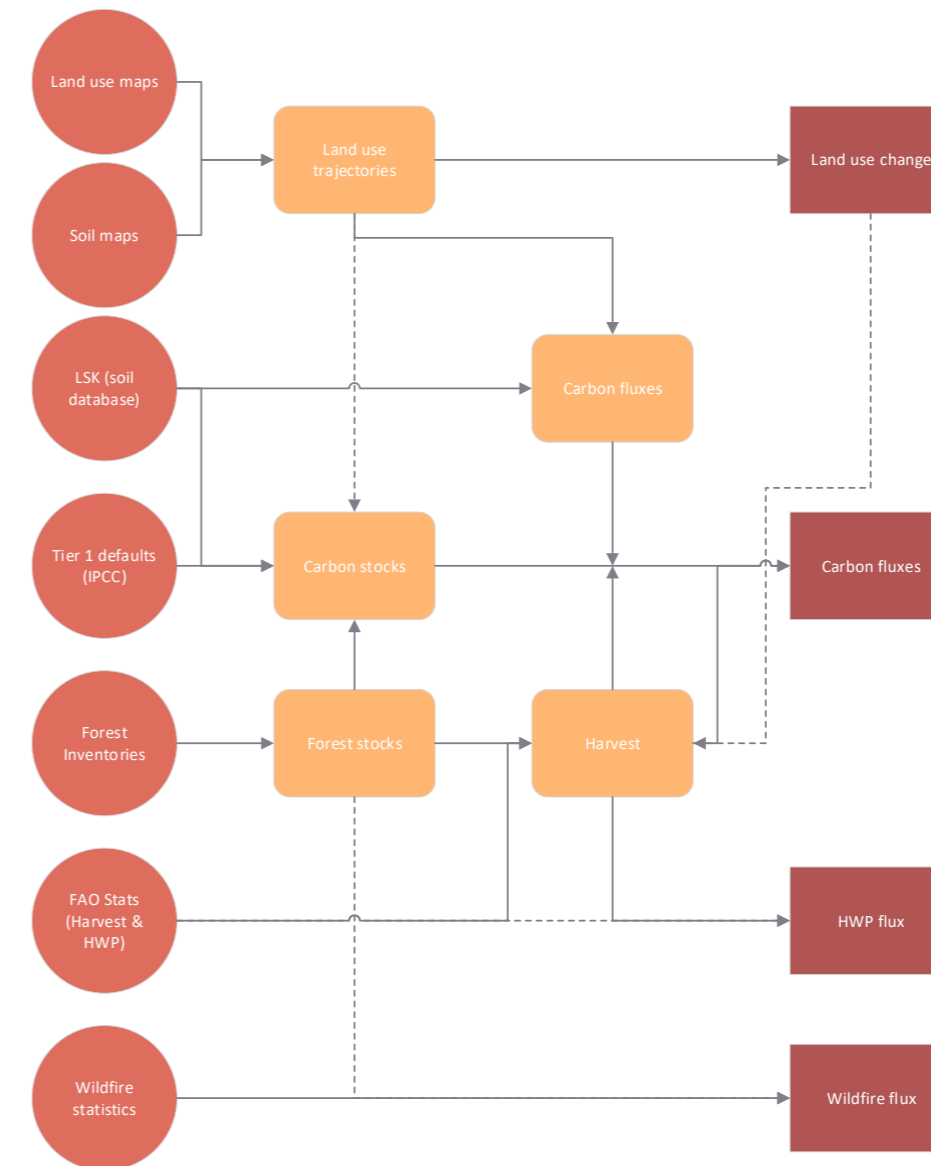
Om aan de internationale klimaatdoelstellingen zoals geformuleerd in het Klimaatakkoord van Parijs te voldoen, moeten landen hun broeikasgasemissies rapporteren aan de United Nations Framework on Combatting Climate Change (UNFCCC) in een jaarlijks Nationale Inventory Rapport (NIR). Het Nederlandse Nationale Inventory Rapport wordt opgesteld door de Emissieregistratie. De Emissieregistratie stelt jaarlijks de Nederlandse emissiecijfers vast. De rapportage van (veranderingen in) bodemkoolstofvoorraden in minerale landbouwbodems valt binnen de Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF) sector. Momenteel wordt koolstofvastlegging in minerale bodems niet meegeteld voor de klimaatdoelstellingen, maar dit verandert vanaf 2021. Met het officieel meetellen van kool-

stofvastlegging in minerale bodems zal het ook formeel gaan bijdragen aan de reductie van broeikasgassen en het behalen van de klimaatdoelstellingen.

Voor het rapporteren van de koolstofvoorraden in minerale landbouwbodems binnen LULUCF worden momenteel alleen veranderingen in bodemkoolstofvoorraden meegenomen als die het resultaat zijn van landgebruiksveranderingen, zoals omzetting van bouwland in bosland. In het huidige monitoringssysteem van LULUCF worden de effecten van maatregelen gericht op koolstofvastlegging in de minerale landbouwbodems niet meegenomen (zie Figuur). Vanaf 2030 moet het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op bodemkoolstofvoorraden en emis-

sies duidelijk zijn in de nationale rapportage, of zo mogelijk al eerder. Hiervoor zullen modelberekeningen worden gebruikt die aansluiten bij de nationale monitoringssystematiek. De huidige nationale monitoringssystematiek is gebaseerd op modelberekeningen op basis van landgebruikskaarten en bodemkoolstofvoorraden. Hiervoor

worden metingen van de koolstofvoorraad in Nederlandse minerale landbouwbodems als input gebruikt. Om het effect van koolstofvastleggende maatregelen inzichtelijk te krijgen in de nationale rapportage zal het RothC-model worden gebruikt.



Schematisch overzicht van de workflow en aggregatie van informatie voor het berekenen van de broeikasgasemissies en vastlegging uit de inputbronnen (links, cirkels), tussentijdse berekeningen (middel, gele vierkanten) en de resulterende outputs (rechts, vierkanten). Op basis van Arets et al. (2021).



# Gaan we het doel voor additionele vastlegging van 0,4 - 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vanaf 2030 in Nederlandse minerale landbouwbodems halen?

30

Binnen het Klimaatakkoord (2019) is het doel gesteld om een additionele hoeveelheid van 0,4 - 0,6, Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vanaf 2030 vast te leggen in minerale landbouwbodems. Wanneer we dat vertalen in een toename van het organische stofgehalte in de bodem komt dit overeen met een benodigde absolute toename van bijna 0,03%-punt gemiddeld over alle minerale landbouwbodems. Op basis van metingen en modelsimulaties blijkt dat een additionele vastlegging van 0,9 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vanaf 2030 theoretisch mogelijk is indien op alle percelen waar het mogelijk is ook maatregelen worden genomen. Het klimaatdoel is dus bereikbaar, maar het zal lastig zijn om deze

toename jaarlijks aan te tonen. De maatregelen die gericht zijn op koolstofvastlegging en hierbij waarschijnlijk gemiddeld het meeste gaan bijdragen aan koolstofvastlegging in Nederlandse minerale landbouwbodems zijn het niet scheuren van grasland, het verbeteren van gewasrotaties, toevoeging van dierlijke mest en compost en gebruik van groenbemesters.

Er is op dit moment geen aanleiding om aan te nemen dat een additionele vastlegging van 0,4 - 0,6 Mton CO<sub>2</sub>-eq per jaar vanaf 2030 niet mogelijk is, maar er zijn factoren die ervoor kunnen zorgen dat de daadwerkelijke hoeveelheid

koolstofvastlegging lager uitvalt dan nu verwacht wordt. Een belangrijke factor in de uiteindelijke mate van koolstofvastlegging is hoeveel boeren daadwerkelijk maatregelen nemen die gericht zijn op koolstofvastlegging. Een tweede factor is de mate waarin lachgasemissies zullen

toenemen als gevolg van het verhoogde gehalte organische stof in de bodem. Als laatste is er het risico dat de extra opgebouwde organische stof als gevolg van de maatregelen na het stoppen van de maatregel niet op de lange termijn in de bodem blijft.



Logo Klimaatakkoord (Klimaatakkoord.nl, n.d.).



# Begrippenlijst

**Aarde-opwarmingspotentiaal (of Engels: *Global Warming Potential (GWP)*)** is het potentiaal van een broeikasgas om de aarde op te warmen over een bepaalde tijdsperiode (bijvoorbeeld 20 of 100 jaar).

**Afbraak van organische stof (decompositie)** is de mineralisatie van organische stof door micro-organismen. Hierbij komen voedingsstoffen en CO<sub>2</sub> vrij.

**Agroforestry** is een landbouwsysteem in de akkerbouw en/of veehouderij waarbij de teelt van eenjarige gewassen en/of grasland aangevuld wordt met houtachtige soorten zoals bomen en struiken op hetzelfde perceel.

**Akkerranden** een- of meerjarige akkerranden kunnen gebruikt worden om verschillende soorten planten zoals bloemen en kruiden te laten groeien.

**Biomassa** bestaat uit organisch materiaal. Biomassa bestaat zowel bovengronds (bv. bladeren) als ondergronds (wortels).

**Bodem** is een fysieke omgeving die bestaat uit organisch materiaal (waaronder bodemleven), mineraal materiaal, bodemvocht en lucht.

**Bodemademhaling** of ook wel bodemrespiratie, is de CO<sub>2</sub> die vrijkomt uit de bodem bij de afbraak van organische stof.

**Bodemaggregaat** bestaat uit verkitte organische en minerale bodemdeeltjes waarin organische stof opgeslagen kan worden. Bodemaggregaten komen voor in verschillende groottes.

**Bodembiodiversiteit** is de soortenrijkdom in de bodem (inclusief dieren, planten en micro-organismen).

**Koolstofvoorraad** is de hoeveelheid koolstof in de bodem.

**Bodemkwaliteitsbeoordeling Landbouwbodems Nederland (BLN-) indicatoren** is de indicatorenset genaamd 'Bodemindicatoren voor Landbouwbodems in Nederland (BLN)' waarin zeventien indicatoren voor bodemkwaliteit zijn beschreven. Hieronder vallen bijvoorbeeld het organische stofgehalte, het watervasthoudend vermogen en het aantal en de diversiteit van regenwormen.

**Bodemprofiel** is een verticale doorsnede van een bodem.

**Bodemvruchtbaarheid** is een functie van fysische, biologische en chemische factoren en geeft weer hoe goed gewassen kunnen groeien in de bodem. Bodemvruchtbaarheid is onder andere afhankelijk van het aantal voedingsstoffen, de bodemstructuur en het bodemleven.

**Broeikasgas** is een gas dat het broeikaseffect veroorzaakt door infraroodstraling die de aarde uitzendt, terug te kaatsen. Voorbeelden van broeikasgassen zijn CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O.

**Broeikasgaseffect** is het effect dat de gemiddelde temperatuur op aarde hoger wordt doordat broeikasgassen *infraroodstraling* absorberen dat anders door de aarde naar de ruimte wordt uitgestraald.

**CC-NL** is het netwerk van locaties waarin metingen van onder andere de koolstofvoorraad worden gedaan.

**Chemische oxidatie methode** is een manier om het organische stofgehalte te bepalen en is gebaseerd op het gebruik van het di-chromaat ion in zwavelzuur als oxidator.

**Effectieve organische stof (EOS)** is de organische stof die na een jaar nog over is van wat in totaal is aangevoerd vanuit meststoffen en/of gewasresten.

**Effectieve stabilisatiecapaciteit** is een evenwichtsniveau in de bodemkoolstofvoorraad die een bodem kan bereiken en is afhankelijk van de bodemcondities zoals beheer of klimaat.

**Emissieregistratie** stelt jaarlijks de Nederlandse emissiecijfers vast ten behoeve van nationale en internationale verplichte milieu- en klimaatrapportages.

**Fotosynthese** is het onder invloed van zonlicht omzetten van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) en water (H<sub>2</sub>O) in zuurstof (O<sub>2</sub>) en koolwaterstofverbindingen.

**Gemeenschappelijk Landbouw Beleid (GLB)** is het landbouwbeleid van de EU waarin de lange termijnvisie en bijbehorend beleid op Europese akkerbouw en veehouderij geformuleerd zijn.

**Gemiddelde verblijftijd (GVT)** van koolstof is een maat voor hoelang koolstof gemiddeld in de bodem blijft. De GVT wordt berekend als de tijd tussen wanneer de koolstof wordt vastgelegd door fotosynthese en het moment dat deze vastgelegde koolstof weer via bodemademhaling als CO<sub>2</sub> uit de bodem verdwijnt.

**Gloeiverliesmethode** is een methode om het organische stofgehalte te bepalen en is gebaseerd op het gewichtsverschil na verbranding van de organische stof.

**Groenbemesters** zijn gewassen die worden geteeld tussen twee productiegewassen in, dus in de tijd dat er geen hoofdgewas op het land groeit. Groenbemesters worden geteeld om het organische stof- en het stikstofgehalte te verhogen en bodemerosie te verminderen.

**Infraroodstraling** is voor het menselijk oog niet-waarneembare straling.

**Klimaatakkoord van Parijs** is de afspraak die in 2015 in Parijs is gemaakt om inspanningen te leveren om de opwarming van de aarde het liefst minder dan 1,5, maar maximaal 2 graden te laten opwarmen. Hiervoor moet de wereldwijde broeikasgasuitstoot 55% minder zijn in 2030 t.o.v. 1990.



---

**Klimaatmitigatie** is het verlagen van de atmosferische concentratie van broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub> om de effecten op klimaatverandering te verminderen.

**Klimaatverandering** is een verandering in het klimaat waarbij het klimaat gedefinieerd is als het gemiddelde weer over een periode van dertig jaar. Klimaatverandering gaat gepaard met veranderingen in weerpatronen zoals temperatuur en extreme neerslagpatronen.

**Koolstof** is een scheikundig element en vormt samen met zuurstof, water en andere elementen CO<sub>2</sub> en koolwaterstofverbindingen in organische stof.

**Koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>)** is het belangrijkste broeikasgas en bestaat uit koolstof en zuurstof. Bij fotosynthese wordt CO<sub>2</sub> netto opgenomen door planten.

**Koolstofcertificaten** zijn kredieten die verkregen kunnen worden voor koolstofvastlegging in de bodem. Hiermee kan koolstofvastlegging worden verwaard.

**Koolstofvastlegging** is de netto-opslag van koolstof dat door middel van fotosynthese in de vorm van CO<sub>2</sub> is opgenomen. Het is de balans tussen de aanvoer en afbraak van organische stof.

**Kruidenrijk grasland** houdt in dat er meerdere soorten kruiden voorkomen in het grasland.

**Lachgas (N<sub>2</sub>O)** is een broeikasgas dat een Global Warming Potential heeft dat 265 keer hoger is dan CO<sub>2</sub>.

**Land Use, Land Use Change and Forests (LULUCF)** is de sector waarbinnen gerapporteerd wordt over broeikasgasemissies die gerelateerd zijn aan landgebruik, landgebruiksverandering en bos.

**Lutum** zijn de minerale bodemdeeltjes die kleiner zijn dan 2 µm.

**Micro-organismen** in de bodem zijn schimmels en bacteriën die bodemprocessen sturen, zoals afbraak van organische stof en denitrificatie.

**Mid-Infrarood Reflectie (MIR)** is een methode om het organische stofgehalte van een bodem te bepalen en maakt gebruik van reflectie van Mid-Infraroodstraling.

**Mineraal-gebonden organische stof** (Engels: *mineral-associated organic matter*) is organische stof die beschermd is van afbraak doordat het gebonden is aan mineralen. De mineraal-gebonden organische stof bestaat uit kleine stukjes opgeloste relatief onbewerkte organische stof of uit organische stof die al bewerkt is door micro-organismen

**Minerale bodems** zijn bodems met maximaal 20% organische stof en zonder veenlaag binnen 80 cm diepte. Minerale gronden omvatten dus de zand-, klei- en lössbodems.

**Necromassa** is de dode biomassa van micro-organismen.

---

**Nabij Infrarood Reflectie (NIR)** is een methode om het organische stofgehalte van een bodem te bepalen en maakt gebruik van reflectie van nabij-infraroodstraling.

**Nationaal Programma Landbouwbodems (NPL)** is een beleidsprogramma van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en heeft als doel om in 2030 alle bodems duurzaam te beheren om ecosysteemdiensten zoals bodemvruchtbaarheid, biodiversiteit en waterbufferingscapaciteit optimaal te blijven benutten.

**Nederlands Klimaatakkoord** is het akkoord dat in 2019 is afgesloten in navolging van het Parijsakkoord in Nederland dat is opgesteld om de broeikasgasuitstoot te verminderen.

**Niet-kerende grondbewerking (NKG)** Hierbij wordt de bodem niet meer geploegd, maar wordt de bodem met schijven, tanden of woelers oppervlakkig gescheurd en verkruid tot een maximale diepte van 15 cm, waardoor de bovengrond los en kruimelig wordt.

**Nulmeting** is een bodemanalyse van een specifiek bodemonster voor bepaling van de hoeveelheid bodemkoolstof als weergave voor de actuele hoeveelheid koolstof (tot 30 cm diepte) in de bodem die als referentie wordt gebruikt om het effect van maatregelen op de hoeveelheid vastgelegde koolstof te bepalen.

**Opgeloste organische stof** (Engels: *dissolved organic matter*) is organische stof die is opgelost in het bodemvocht.

**Organische stof** is organisch materiaal van (afgebroken) plantenresten en resten van bodemfauna. Organische stof bestaat voornamelijk uit dood materiaal, maar ook uit levende micro-organismen. De bouwstenen van organische stof zijn vooral koolstof (C), zuurstof (O) en waterstof (H) en kleine hoeveelheden van andere elementen, zoals stikstof (N), fosfor (P) en/of zwavel (S). Koolstof draagt voor ongeveer 50% bij aan organische stof.

**Particulare organische stof** (Engels: *particulate organic matter*) is de organische stof dat nog relatief onbewerkt is door micro-organismen, zoals bladafval of kleine stukjes organisch materiaal. Hier vallen ook levende micro-organismen onder.

**RothC-model** is een bodemkoolstofmodel ontwikkeld in Rothamsted (VK) voor het simuleren van koolstofvoorraden. Het wordt internationaal veel toegepast, zo ook in Nederland.

**Scheuren van grasland** is het omploegen van bestaand grasland en het inzaaien van nieuw gras. Dit wordt doorgaans gedaan als de opbrengst en/of kwaliteit van het gras te laag is voor gebruik in de veehouderij.

**Stichting Nationale Koolstofmarkt (SNK)** is een systeem voor certificering van CO<sub>2</sub>-emissiereductie via Nederlandse projecten. Via SNK kunnen op dit moment certificaten verkregen worden voor de koolstof die in bodems vastgelegd wordt door middel van blijvend grasland.

**UNFCCC** staat voor *United Nations Framework for Combatting Climate Change* en is een klimaatverdrag



---

waarbinnen afspraken gemaakt zijn om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen.

**Vanggewassen** zijn gewassen die worden geteeld tussen twee productiegewassen in, dus in de tijd dat er geen hoofdgewas op het land groeit. Vanggewassen hebben als doel om de stikstofuitspoeling te verminderen.

**Verdichting** is het indrukken en vervormen van de bodem doordat poriën in de bodem worden dichtgedrukt.

**Verzadigingsniveau** van de bodem is het mogelijk bestaan van een plafond in de hoeveelheid koolstof die de bodem kan opslaan.

**Vogelakkers** zijn natuurbeheerpakketten binnen het Agrarisch Natuur- en Landschapsbeheer waarbij meerjarige stroken productiegewas afgewisseld worden met stroken natuurbraak met een mengsel van granen en kruiden.

**Waterbuffercapaciteit** van de bodem is het vermogen van de bodem om water in tijden van droogte vast te houden of juist goed af te voeren bij hevige regenval.

**Wortellexudaten** zijn oplosbare stoffen die via de wortels van planten worden uitgestoten.

---

# Referenties

## Vraag 1

Staps, S., Rougoor, C., Lesschen, J. P., & Cozijnsen, J. (2021). *Methode voor vaststelling van CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem*.

Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, G. (2013). *Tien vragen en antwoorden over organische stof*. [www.kennisakker.nl](http://www.kennisakker.nl).

Balesdent, J., & Balabane, M. (1996). Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(9), 1261–1263. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00112-5)

Marten, H., Ed, P., & Paulsen, H. M. (2020). *Inventory of techniques for carbon sequestration in agricultural soils*.

Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., & Hunt, H. W. (2000). *Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils*. In *Biogeochemistry* (Vol. 48).

van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P. (2019). *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018)*. <https://doi.org/10.18174/509781>

Rasse, D.P., Rumpel, C., Dignac, M.-F. (2005) Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil* 269, 341-356

## Vraag 2

Rijksoverheid. (2019). *Klimaatakkoord 2019*. Den Haag: Rijksoverheid. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2019/06/28/klimaatakkoord>

Lesschen, J. P., Rietbergen, P., Stout, B., van 't Hull, J., Knotters, M., & Slier, T. (2019). *Monitoringsstrategie Bodem C naar 2030*.

Regeerakkoord, (2017) *Vertrouwen in de toekomst*. Coalitieakkoord 2017 – 2021.

Regeerakkoord, (2021) *Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst*. Coalitieakkoord 2021 – 2025.

## Vraag 3

Bell, M., & Lawrence, D. (2009). *Soil carbon sequestration-myths and mysteries*.

Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>



Cagnarini, C., Blyth, E., Emmett, B. A., Evans, C. D., Griffiths, R. I., Keith, A., Jones, L., Lebron, I., McNamara, N. P., Puissant, J., Reinsch, S., Robinson, D. A., Rowe, E. C., Thomas, A. R. C., Smart, S. M., Whitaker, J., & Cosby, B. J. (2019). Zones of influence for soil organic matter dynamics: A conceptual framework for data and models. *Global Change Biology*, 25(12), 3996–4007. <https://doi.org/10.1111/gcb.14787>

Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavelle, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Megan Steinweg, J., Wallenstein, M. D., Martin Wetterstedt, J. Å., & Bradford, M. A. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17(11), 3392–3404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>

FertSmart. (2007). *5.2 Soil Organic Matter*. <https://ferts-mart.dairyingfortomorrow.com.au/dairy-soils-and-fertiliser-manual/chapter-5-understanding-managing-soil-biology/5-2-soil-organic-matter/>

Castellano, M. J., Mueller, K. E., Olk, D. C., Sawyer, J. E., & Six, J. (2015). Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. *Global Change Biology*, 21(9), 3200–3209. <https://doi.org/10.1111/GCB.12982>

Cotrufo, M. F., Ranalli, M. G., Haddix, M. L., Six, J., & Lugato, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience* 2019 12:12, 12(12), 989–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>

Cotrufo, M. F., Soong, J. L., Horton, A. J., Campbell, E. E., Haddix, M. L., Wall, D. H., & Parton, W. J. (2015). Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience* 2015 8:10, 8(10), 776–779. <https://doi.org/10.1038/ngeo2520>

Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 2015 528:7580, 528(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>

Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 2011 478:7367, 478(7367), 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>

#### Vraag 4

van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P. (2019). *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018)*. <https://doi.org/10.18174/509781>

#### Vraag 5

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., & Six, J. (2007). Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86(1), 19–31. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0> West, T. O., & Six, J. (2007). Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*, 80(1–2), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9173-8>

#### Vraag 6

Schils, R. (2012). *Vragen en antwoorden over bodemvruchtbaarheid*.

Wageningen UR. (2016). *Handboek Melkveehouderij Bemesting*. <https://www.wur.nl/nl/show/Handboek-Melkveehouderij.htm>

Ingram, J. S. I., & Fernandes, E. C. M. (2001). Managing carbon sequestration in soils: Concepts and terminology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87(1), 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00145-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00145-1)

Lesschen, J. P., Heesmans, H. I. M., Mol-Dijkstra, J. P., Doorn, A. M. van, Verkaik, E., & Wyngaert, I.J.J. van den; Kuikman, P. J. (2012). *Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur*.

Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 2011 478:7367, 478(7367), 49–56.

#### Vraag 7

Rumpel, C., & Kögel-Knabner, I. (2011). Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 338(1), 143–158. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>

Fang, C., & Moncrieff, J. B. (2005). The variation of soil microbial respiration with depth in relation to soil carbon composition. *Plant and Soil*, 268(1), 243–253. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0278-4>

Hendrickson, O. (2003). Influences of global change on carbon sequestration by agricultural and forest soils. *In Environmental Reviews* (Vol. 11, Issue 3, pp. 161–192). NRC Research Press Ottawa, Canada. <https://doi.org/10.1139/a04-001>

Luske, B., Deru, J., Wösten, H., Faber, J. H., & Eekeren, N. van. (2012). *Beworteling van grasland en droogtetolerantie*. [www.louisbol.nl](http://www.louisbol.nl)

Hamming, C. (1971). *De bodemgesteldheid van het ruilverkavelingsgebied “Ruurlo”*. <https://edepot.wur.nl/453890>



---

## Vraag 8

Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, G. (2013). *Tien vragen en antwoorden over organische stof*. [www.kennisakker.nl](http://www.kennisakker.nl).

Koopmans, C., Timmermans, B., Wagenaar, J. P., van t Hull, J., Hanegraaf, M., & de Haan, J. (2020). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019–2023*. 50.

Chen, S., Huang, Y., Zou, J., & Shi, Y. (2013). Mean residence time of global topsoil organic carbon depends on temperature, precipitation and soil nitrogen. *Global and Planetary Change*, 100, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.006>

West, T. O., & Six, J. (2007). Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*, 80(1–2), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9173-8>

Carvalhais, N., Forkel, M., Khomik, M., Bellarby, J., Jung, M., Migliavacca, M., Mu, M., Saatchi, S., Santoro, M., Thurner, M., Weber, U., Ahrens, B., Beer, C., Cescatti, A., Randerson, J. T., & Reichstein, M. (2014). *Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems*. <https://doi.org/10.1038/nature13731>

Johnston, A. E. (1973). effects of ley and arable cropping systems on the amounts of soil organic matter in the Rothamsted and Woburn ley-arable experiments. *Rothamsted Exp Sta Rep*.

Smith, P. (2005). An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: Influence of direct human induced, indirect and natural effects. *European Journal of Soil Science*, 56(5), 673–680.

## Vraag 9

Staps, S., Rougoor, C., Lesschen, J. P., & Cozijnsen, J. (2021). *Methode voor vaststelling van CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem*.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. (2019). *Nationaal Programma Landbouwbodems*.

Stowa. (1997). *Bepaling organische stof*. 30, 58.

## Vraag 10

Staps, S., Rougoor, C., Lesschen, J. P., & Cozijnsen, J. (2021). *Methode voor vaststelling van CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem*.

Lesschen, J. P., Rietbergen, P., Stout, B., van 't Hull, J., Knotters, M., & Slier, T. (2019). *Monitoringsstrategie Bodem C naar 2030*.

## Vraag 11

Staps, S., Rougoor, C., Lesschen, J. P., & Cozijnsen, J. (2021). *Methode voor vaststelling van CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem*.

Lesschen, J. P., Rietbergen, P., Stout, B., van 't Hull, J., Knotters, M., & Slier, T. (2019). *Monitoringsstrategie Bodem C naar 2030*.

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Linden, A. van de, Timmermans, B., Keuskamp, J., Keuper, D., Hanegraaf, M., Conijn, S., & Slier, T. (2020). *Ontwikkeling praktijktool voor bodem C*. <https://doi.org/10.18174/517746>

Lesschen, J. P., Vellinga, T., Dekker, S., & Linden, Annelotte van der Schils, R. (2020). *Possibilities for monitoring CO<sub>2</sub> sequestration and decomposition of soil organic matter on dairy farms*. *Wageningen Environmental Research*. <https://doi.org/10.18174/526420>

## Vraag 12

Lesschen, J. P., Heesmans, H. I. M., Mol-Dijkstra, J. P., Doorn, A. M. van, Verkaik, E., & Wyngaert, I.J.J. van den; Kuikman, P. J. (2012). *Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur*.

Khalil, K., Mary, B., & Renault, P. (2004). Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O<sub>2</sub> concentration. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(4), 687–699. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.01.004>

Kolk, J. van der, Agricola, H., Slier, T., Smit, B., & Staps, S. (2021). *No-regret maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale landbouwbodems Colofon*. 1–65.

Kolk, J. van der, & Slier, T. (2020). *Programma Slim Landgebruik*.

Slier, T., & Velthof, G. L. (2021). *30 vragen en antwoorden over lachgasemissie uit landbouwgronden*. Wageningen Environmental Research.

## Vraag 13

Broers, H. P., & Lijzen, J. (2014). Afwegingen bij het gebruik van grondwater en de ondergrond. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607710003.pdf>

Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, G. (2013). Tien vragen en antwoorden over organische stof. [www.kennisakker.nl](http://www.kennisakker.nl).

Marten, H., Ed, P., & Paulsen, H. M. (2020). Inventory of techniques for carbon sequestration in agricultural soils.

Schils, R. (2012). Vragen en antwoorden over bodemvruchtbaarheid.

Smit, A., & Kuikman, P. (2005). Organische stof : onbemind of onbekend ? Alterra-Rapport, 1126, 39.

Wösten, H., & Groenendijk, P. (2019). Soil organic matter and its importance for water management. Deltafact, July, 18.



van Leeuwen-Haagsma, W. K., Hoek, H., Molendijk, L. P. G., Mommer, L., Ulen, J., Kroonen-Backbier, B. M. A., & de Groot, G. A. (2019). *Handboek Groenbemesters*. <https://www.handboekgroenbemesters.nl/nl/handboekgroenbemesters.htm>

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. (2019). *Nationaal Programma Landbouwbodems*.

## Vraag 14

van Dijk, J. (2020). *Bijlage Nationaal Programma Landbouwbodems*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/09/04/nationaal-programma-landbouwbodems>

Erisman, J. W., & Verhoeven, F. (2019). *Kringlooplandbouw in de praktijk*. [www.kringlooplandbouw.nl](http://www.kringlooplandbouw.nl)

Kolk, J. van der, & Slier, T. (2020). *Programma Slim Landgebruik*.

Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., & Hunt, H. W. (2000). Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *In Biogeochemistry* (Vol. 48).

Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, G. (2013). *Tien vragen en antwoorden over organische stof*. [www.kennisakker.nl](http://www.kennisakker.nl).

Kolk, J. van der, Agricola, H., Slier, T., Smit, B., & Staps, S. (2021). *No-regret maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale landbouwbodems Colofon*. 1–65.

Hanegraaf, M., van den Elsen, E., de Haan, J., & Visser, S. (2019). *Bodemkwaliteitsbeoordeling van landbouwronden in Nederland-indicatorset en systematiek, versie 1.0* (No. 795). Stichting Wageningen Research (WR).

## Vraag 15

Hendrickson, O. (2003). Influences of global change on carbon sequestration by agricultural and forest soils. *In Environmental Reviews* (Vol. 11, Issue 3, pp. 161–192). NRC Research Press Ottawa, Canada. <https://doi.org/10.1139/a04-001>

Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, *440*(7081), 165–173. <https://doi.org/10.1038/NATURE04514>

Sulman, B. N., Moore, J. A. M., Abramoff, R., Averill, C., Kivlin, S., Georgiou, K., Sridhar, B., Hartman, M. D., Wang, G., Wieder, W. R., Bradford, M. A., Luo, Y., Mayes, M. A., Morrison, E., Riley, W. J., Salazar, A., Schimel, J. P., Tang, J., & Classen, A. T. (2018). Multiple models and experiments underscore large uncertainty in soil carbon dynamics. *Biogeochemistry*, *141*(2), 109–123. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0509-z>

Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., & Hunt, H. W. (2000). Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *In Biogeochemistry* (Vol. 48).

KNMI. (2015). *KNMI'14 klimaatscenario's voor Nederland*. [https://archieff34.sitearchieff.nl/archives/sitearchieff/20200312091920/http://www.klimaatscenarios.nl/brochures/images/Brochure\\_KNMI14\\_NL\\_2015.pdf](https://archieff34.sitearchieff.nl/archives/sitearchieff/20200312091920/http://www.klimaatscenarios.nl/brochures/images/Brochure_KNMI14_NL_2015.pdf)

## Vraag 16

Luske, B., Deru, J., Wösten, H., Faber, J. H., & Eekeren, N. van. (2012). *Beworteling van grasland en droogtetolerantie*. [www.louisbolck.nl](http://www.louisbolck.nl)

Akker, J. van der. (2015). *Bodemverdichting : ondergrond en bovengrond*. 1–20.

Eekeren, N., Rietberg, P., Gerner, L., & Leeuwen, M. (2015). *Verdichting voorkomen is cruciaal : de bodem onder een vruchtbare kringloop*. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/488274>

Hoorman, J., Carlos de Moraes Sá, J., & Reeder, R. (2011). The Biology of Soil Compaction. *Soil Tillage Res*, *68*, 49-57.

van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P. (2019). *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018)*. <https://doi.org/10.18174/509781>

## Vraag 17

Jansson, C., Wullschleger, S. D., Kalluri, U. C., & Tuskan, G. A. (2010). Phytosequestration: Carbon biosequestration by plants and the prospects of genetic engineering. *BioScience*, *60*(9), 685–696. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.6>

Mathew, I., Shimelis, H., Mutema, M., & Chaplot, V. (2017). What crop type for atmospheric carbon sequestration: Results from a global data analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *243*, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.008>

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.

van Eekeren, N., Deru, J., de Boer, H., Philipsen, B. (2011). Terug naar de graswortel. Een betere nutriëntenbenutting door een intensievere en diepere beworteling. Louis Bolck Instituut.

Rasse, D.P., Rumpel, C., Dignac, M.-F. (2005) Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil* *269*, 341-356

Thorup-Kristensen, K., Halberg, N., Nicolaisen, M., Olesen, J.E., Crews, T.E., Hinsinger, P., Kirkegaard, J., Pierret, A., Dresbøll, D.B. (2020) Digging Deeper for Agricultural Resources, the Value of Deep Rooting. *Trends in Plant Science* *25*, 406-417



Poirier, V., Roumet, C., Munson, A.D. (2018) The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry* 120, 246-259.

Kell, D.B. 2011. Breeding crop plants with deep roots: Their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Annals of Botany* 108, 407-418.

Wenum, J., de Haan, J., van Geel, W., van Dijk, W., van Valen, A., Postma, R., Brinks, H., Brolsma, K., Heestermans, S., Mager, A., de Jongh, E. 2013. *Handboekbodembemesting*.

## Vraag 18

West, T. O., & Six, J. (2007). Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*, 80(1-2), 25-41. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9173-8>

Carvalhais, N., Forkel, M., Khomik, M., Bellarby, J., Jung, M., Migliavacca, M., Mu, M., Saatchi, S., Santoro, M., Thurner, M., Weber, U., Ahrens, B., Beer, C., Cescatti, A., Randerson, J. T., & Reichstein, M. (2014). *Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems*. <https://doi.org/10.1038/nature13731>

Deng, L., Zhu, G. yu, Tang, Z. sheng, & Shangguan, Z. ping. (2016). Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecology and Conservation*, 5, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.12.004>

Smit, A., & Kuikman, P. J. (2005). *Organische stof: onbemand of onbekend?* (No. 1126). Alterra.

Smith, P., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., Haberl, H., Harper, R., ... & Tubiello, F. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU).

van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P. (2019). *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018)*. <https://doi.org/10.18174/509781>

## Vraag 19

Koopmans, C., van Agtmaal, M., & van Eekeren, N. (2018). *Quick scan mest en bodemkwaliteit*. [www.louisbolk.nl/publicaties](http://www.louisbolk.nl/publicaties)

D'Hose, T., & Ruysschaert, G. (2017). *Mogelijkheden voor koolstofopslag onder gras- en akkerland in Vlaanderen*. ILVO Mededeling 231. [www.ilvo.vlaanderen.be](http://www.ilvo.vlaanderen.be)

Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B., Porre, R., Agricola, H., de Haan, J., & Koopmans, C. (2021). *CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten Slim Landgebruik*. Augustus, 2021.

Wenum, J., de Haan, J., van Geel, W., van Dijk, W., van Valen, A., Postma, R., Brinks, H., Brolsma, K., Heestermans, S., Mager, A., de Jongh, E. 2013. *Handboekbodembemesting*.

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.

## Vraag 20

Kolk, J. van der, Agricola, H., Slier, T., Smit, B., & Staps, S. (2021). *No-regret maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale landbouwbodems Colofon*. 1-65.

Smit, A., & Kuikman, P. (2005). Organische stof : onbemand of onbekend ? *Alterra-Rapport, 1126*, 39.

Slim Landgebruik. (2021). *Projecten Slim Landgebruik 2021*.

van Leeuwen-Haagsma, W. K., Hoek, H., Molendijk, L. P. G., Mommer, L., Ulen, J., Kroonen-Backbier, B. M. A., & de Groot, G. A. (2019). *Handboek Groenbemesters*. <https://www.handboekgroenbemesters.nl/nl/handboekgroenbemesters.htm>

Kolk, J. van der, & Slier, T. (2020). *Programma Slim Landgebruik*.

Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B., Porre, R., Agricola, H., de Haan, J., & Koopmans, C. (2021). *CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten Slim Landgebruik*. Augustus, 2021.

Rietberg, P., Bolck, L., & Luske, B. (2013). *Handleiding goed koolstofbeheer*. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/reports/437735>

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.

Wenum, J., de Haan, J., van Geel, W., van Dijk, W., van Valen, A., Postma, R., Brinks, H., Brolsma, K., Heestermans, S., Mager, A., de Jongh, E. 2013. *Handboekbodembemesting*.

## Vraag 21

Velthof, G. (2005). *2 Scheuren van grasland*.

Vellinga, Th. V., van den Pol-van Dasselaar, A., & Kuikman, P. J. (2004). The impact of grassland ploughing on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in the Netherlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70(1), 33-45. <https://doi.org/10.1023/b:fres.0000045981.56547.db>

Koopmans, C., Timmermans, B., Hoogmoed, M., Heupink, D., Cruijisen, J., de Haan, J., Selin Noren, I., Slier, T., & Wagenaar, J.-P. (2021). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023*. 1-65.

Koopmans, C., Timmermans, B., Wagenaar, J. P., van t Hull, J., Hanegraaf, M., & de Haan, J. (2020). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023*. 50.

Lesschen, J. P., Reijns, J., Vellinga, T., Verhagen, J., Kros, H., de Vries, M., Jongeneel, R., Slier, T., Gonzalez Martinez, A., & Vermeij, I. (2020). *Scenariostudie perspectief voor ontwikkel-richtingen Nederlandse landbouw in 2050*. <https://doi.org/10.18174/512111>



---

Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B., Porre, R., Agricola, H., de Haan, J., & Koopmans, C. (2021). *CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten Slim Landgebruik*. Augustus, 2021.

van Ruijven J., Berendse F. 2003. Positive effects of plant species diversity on productivity in the absence of legumes. *Ecology letters*, 6(3): 170-175.

van Ruijven J., Berendse F. 2005. Diversity-productivity relationships: Initial effects, long-term patterns, and underlying mechanisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102: 695-700.

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw.

## Vraag 22

Rijksoverheid. (2019). *Klimaatakkoord 2019. Den Haag: Rijksoverheid*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2019/06/28/klimaatakkoord>

Lesschen, J. P., Heesmans, H. I. M., Mol-Dijkstra, J. P., Doorn, A. M. van, Verkaik, E., & Wyngaert, I.J.J. van den; Kuikman, P. J. (2012). *Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur*.

Kolk, J. van der, Agricola, H., Slier, T., Smit, B., & Staps, S. (2021). *No-regret maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale landbouwbodems Colofon*. 1–65.

Slim Landgebruik. (2021). *Projecten Slim Landgebruik 2021*.

Wiersma, P., Luske, B., Bos, J., Hakkert, J., Ottens, H. J., Postma, M., Klaassen, R., Timmermans, B., & Zanen, M. (2019). *Vogelakkers*. [www.werkgroepgrauwekiekendief.nl](http://www.werkgroepgrauwekiekendief.nl),

Smit, B., de Lauwere, C., & Benus, M. (2021). *Slim Landgebruik Instrumenten, maatregelen en mechanismen Slim Landgebruik*.

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw. Koopmans, C., Timmermans, B., Wagenaar, J. P., van t Hull, J., Hanegraaf, M., & de Haan, J. (2020). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023*. 50.

Noren, I., Vijn, M., & Keur, J. (2019). *Koolstofopslag met agroforestry, wat is mogelijk?*

Marten, H., Ed, P., & Paulsen, H. M. (2020). *Inventory of techniques for carbon sequestration in agricultural soils*.

Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B., Porre, R., Agricola, H., de Haan, J., & Koopmans, C. (2021). *CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten Slim Landgebruik*. Augustus, 2021.

Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., & Hunt, H. W. (2000). *Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils*. In *Biogeochemistry* (Vol. 48).

---

Kolk, J. van der, & Slier, T. (2020). *Programma Slim Landgebruik*.

Koopmans, C., Timmermans, B., Hoogmoed, M., Heupink, D., Crujisen, J., de Haan, J., Selin Noren, I., Slier, T., & Wagenaar, J.-P. (2021). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023*. 1–65.

## Vraag 23

Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B., Porre, R., Agricola, H., de Haan, J., & Koopmans, C. (2021). *CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten Slim Landgebruik*. Augustus, 2021.

Wagenaar, J.-P., van Agtmaal, M., Janssen, P., Stout, B., de Klyn, M., Bijdragen Van Evert Prins, M., Verloop, K., Schils, R., & Jelsma, M. (2020). *Bodem & Klimaat Netwerk-Veehouderij*.

Janmaat, L., Koopmans, C., Heesmans, H., Specken, J., Verstand, D., van Opheusden, M., Timmermans, B., Heupink, D., Westerhof, H., & Colombijn-Van Der Wende, K. (2020). *Bodem & Klimaat Netwerk-Akkerbouw*.

Janmaat, L., Koopmans, C., Heesmans, H., Specken, J., Verstand, D., van Opheusden, M., Timmermans, B., Heupink, D., Westerhof, H., & Colombijn-Van Der Wende, K. (2020). *Bodem & Klimaat Netwerk-Akkerbouw*.

## Vraag 24

van Dijk, J. (2020). *Bijlage Nationaal Programma Landbouwbodems*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/09/04/nationaal-programma-landbouwbodems>

Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, G. (2013). *Tien vragen en antwoorden over organische stof*. [www.kennisakker.nl](http://www.kennisakker.nl).

Kolk, J. van der, Agricola, H., Slier, T., Smit, B., & Staps, S. (2021). *No-regret maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale landbouwbodems Colofon*. 1–65.

Guenet, B., Gabrielle, B., Chenu, C., Arrouays, D., Balesdent, J., Bernoux, M., Bruni, E., Caliman, J. P., Cardinael, R., Chen, S., Ciais, P., Desbois, D., Fouche, J., Frank, S., Henault, C., Lugato, E., Naipal, V., Nesme, T., Obersteiner, M., ... Zhou, F. (2021). Can N<sub>2</sub>O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? In *Global Change Biology* (Vol. 27, Issue 2, pp. 237–256). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>

de Haan, J., Wesselink, M., van Dijk, W., Verstegen, H., van Geel, W., & van den Berg, W. (2018). *Effect van organische stofbeheer op opbrengst, bodemkwaliteit en stikstofverliezen op een zuidelijke zandgrond*. <https://edepot.wur.nl/440226>



---

van Leeuwen-Haagsma, W. K., Hoek, H., Molendijk, L. P. G., Mommer, L., Ulen, J., Kroonen-Backbier, B. M. A., & de Groot, G. A. (2019). *Handboek Groenbemesters*. <https://www.handboekgroenbemesters.nl/nl/handboekgroenbemesters.htm>

## Vraag 25

Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B., Porre, R., Agricola, H., de Haan, J., & Koopmans, C. (2021). *CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten Slim Landgebruik*. Augustus, 2021.

Koopmans, C., Timmermans, B., Hoogmoed, M., Heupink, D., Cruijssen, J., de Haan, J., Selin Noren, I., Slier, T., & Wagenaar, J.-P. (2021). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023*. 1–65.

Kolk, J. van der, Agricola, H., Slier, T., Smit, B., & Staps, S. (2021). *No-regret maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale landbouwbodems Colofon*. 1–65.

Kolk, J. van der, & Slier, T. (2020). *Programma Slim Landgebruik*.

Zwart, K., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, G. (2013). *Tien vragen en antwoorden over organische stof*. [www.kennisakker.nl](http://www.kennisakker.nl).

Koopmans, C., Timmermans, B., Wagenaar, J. P., van t Hull, J., Hanegraaf, M., & de Haan, J. (2020). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023*. 50.

van Dijk, J. (2020). *Bijlage Nationaal Programma Landbouwbodems*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/09/04/nationaal-programma-landbouwbodems>

## Vraag 26

Rougoor, C., Heesmans, H., Staps, S., Kuikman, P., Hondebrink, M., Kuneman, G., & Keuper, D. (2019). *Opzet methodiek voor het verwaarden van bodemkoolstof* (Issue CLM Onderzoek en Advies).

Nriagu, J. (2019). Carbon farming. *Encyclopedia of Environmental Health*, 509–516. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11702-6>

Smit, B., de Lauwere, C., & Benus, M. (2021). *Slim Landgebruik Instrumenten, maatregelen en mechanismen Slim Landgebruik*.

Rougoor, C., Staps, S., Keuper, D., & Heesmans, H. (2021). *Incentives voor bodem-C. Clm*.

Unger, M. von, & Emmer, I. (2018). Carbon market incentives to conserve, restore and enhance soil carbon. *Silvestrum and The Nature Conservancy*, 58. [www.nature.org](http://www.nature.org)

Nederlandse Emissieautoriteit. (2021). *Wat is emissiehandel?* <https://www.emissieautoriteit.nl/onderwerpen/wat-is-emissiehandel>

---

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.

Staps, S. (2018). *Samenwerkingsconstructies en verwaardingsmogelijkheden voor koolstofvastleggend bodemmanagement*.

van Dijk, J. (2020). *Bijlage Nationaal Programma Landbouwbodems*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2020/09/04/nationaal-programma-landbouwbodems>

Bionext, & ZLTO. (n.d.). *Top 5 Carbon farming technieken*.

## Vraag 27

Smit, B., de Lauwere, C., & Benus, M. (2021). *Slim Landgebruik Instrumenten, maatregelen en mechanismen Slim Landgebruik*.

Staps, S., Rougoor, C., Lesschen, J. P., & Cozijnsen, J. (2021). *Methode voor vaststelling van CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem*.

Brummelaar, T. (2021). *Koolstofboer moet echt pionieren. Boerderij 106 - 43*, 6–9.

## Vraag 28

Lesschen, J. P., Rietbergen, P., Stout, B., van 't Hull, J., Knotters, M., & Slier, T. (2019). *Monitoringsstrategie Bodem C naar 2030*.

van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P. (2019). *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018)*. <https://doi.org/10.18174/509781>

Teuling, K., Knotters, M., Tol-Leenders, D. van, Lesschen, J. P., & Reijneveld, A. (2021). *Robuust monitoringsmeetnet : Resultaten steekproef en koolstofratio Project C.3 Naar een robuust meetnet voor monitoring koolstofvoorraad in de bodem (CC-NL)*.

## Vraag 29

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.

Lesschen, J. P., Rietbergen, P., Stout, B., van 't Hull, J., Knotters, M., & Slier, T. (2019). *Monitoringsstrategie Bodem C naar 2030*.

Arets, E. J. M. M., van der Kolk, J. W. H., Hengeveld, G. M., Lesschen, J. P., Kramer, H., Kuikman, P. J., & Schelhaas, M. J. (2020). *Greenhouse gas reporting for the LULUCF sector in the Netherlands: methodological background, update 2020*. 116. <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/533990>



---

Kolk, J. van der, & Slier, T. (2020). *Programma Slim Landgebruik*.

van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P. (2019). *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018)*. <https://doi.org/10.18174/509781>

Staps, S., Rougoor, C., Lesschen, J. P., & Cozijnsen, J. (2021). *Methode voor vaststelling van CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem*.

Emissieregistratie, (n.d.). [www.emissieregistratie.nl](http://www.emissieregistratie.nl)

### Vraag 30

Rijksoverheid. (2019). Klimaatakkoord 2019. *Den Haag: Rijksoverheid*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2019/06/28/klimaatakkoord>

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.

Lesschen, J. P., Rietbergen, P., Stout, B., van 't Hull, J., Knotters, M., & Slier, T. (2019). *Monitoringsstrategie Bodem C naar 2030*.

Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B., Porre, R., Agricola, H., de Haan, J., & Koopmans, C. (2021). *CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten Slim Landgebruik*. Augustus, 2021.

Koopmans, C., Timmermans, B., Wagenaar, J. P., van t Hull, J., Hanegraaf, M., & de Haan, J. (2020). *Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023*. 50.

Kolk, J. van der, & Slier, T. (2020). *Programma Slim Landgebruik*.

---

## Illustratieverantwoording

Agroforestry Research Trust (2002). Agroforestry in Bedfordshire [foto]. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <https://www.agroforestry.co.uk/about-agroforestry/silvoarable/>

Akkerwijzer. (2021). Achterlaten gewasresten [foto]. Geraadpleegd op 28 december 2021, van Topbodem › Organische stof, de brandstof voor uw bodem | Akkerwijzer.nl - Nieuws en kennis voor de akkerbouwers.

Akkerwijzer. (2018). Verschillende dieptes van beworteling [foto]. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <https://www.akkervijzer.nl/artikel/134436-effecten-van-groenbemesters-op-waterbergend-vermogen/>

Akkerwijzer. (2021). Voorkom opbrengstverliezen door bodemverdichting. Geraadpleegd op 28 december 2021, van De Groenbemesterdag › Voorkom opbrengstverliezen door bodemverdichting | Akkerwijzer.nl - Nieuws en kennis voor de akkerbouwers)

Arets, E. J. M. M., Van Der Kolk, J. W. H., Hengeveld, G. M., Lesschen, J. P., Kramer, H., Kuikman, P. J., & Schelhaas, N. J. (2021). *Greenhouse gas reporting for the LULUCF sector in the Netherlands: methodological background, update 2021* (No. 201). Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment.

Deng, L., Zhu, G. yu, Tang, Z. sheng, & Shangguan, Z. ping. (2016). Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecology and Conservation*, 5, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.12.004>

Finke, P.A., J.J. de Gruijter en R. Visschers, 2001. *Status 2001 Landelijke Steekproef Kaarteenheden en toepassingen. Gestructureerde bemonstering en karakterisering Nederlandse bodems*. Wageningen, Alterra, rapport 389.

Handboek Bodem en Bemesting (n.d.). Kengetallen organische stof. <https://www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting/Handeling/Organische-stofbeheer/Organische-stofbalans/Kengetallen-organische-stof.htm>

Johnston, A. E. (1973). effects of ley and arable cropping systems on the amounts of soil organic matter in the Rothamsted and Woburn ley-arable experiments. *Rothamsted Exp Sta Rep*.

Klimaatakkoord (2019). Logo. Geraadpleegd op 1 april 2022, van <https://www.klimaatakkoord.nl/actueel/nieuws/2019/11/01/wiebes-maakt-organisatie-klimaatakkoord-bekend>



---

KNMI (2015). *KNMI'14 klimaatscenario's voor Nederland*. [https://archieff34.sitearchieff.nl/archives/sitearchieff/20200312091920/http://www.klimaatscenarios.nl/brochures/images/Brochure\\_KNMI14\\_NL\\_2015.pdf](https://archieff34.sitearchieff.nl/archives/sitearchieff/20200312091920/http://www.klimaatscenarios.nl/brochures/images/Brochure_KNMI14_NL_2015.pdf)

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.

Lesschen, J. P., H. Heesmans, J. Mol-Dijkstra, A. van Doorn, E. Verkaik, I. van den Wyngaert en P. Kuikman, (2012). *Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur*. Wageningen, Alterra, rapport 2396.

Lesschen, J. P., Rietbergen, P., Stout, B., van 't Hull, J., Knotters, M., & Slier, T. (2019). *Monitoringsstrategie Bodem C naar 2030*.

Lesschen, J. P., Hendriks, C., van de Linden, A., Timmermans, B., Keuskamp, J., Keuper, D., ... & Slier, T. (2020). *Ontwikkeling praktijktool voor bodem C* (No. 2990). Wageningen Environmental Research.

Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (2019). *Nationaal Programma Landbouwbodems*.

Regeerakkoord, (2017) Vertrouwen in de toekomst. Coalitieakkoord 2017 – 2021.

Smith, P. (2005). An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: Influence of direct human induced, indirect and natural effects. *European Journal of Soil Science*, 56(5), 673-680.

Sociaal-Economische Raad. (2018). Ontwerp van het Klimaatakkoord [figuur]. Geraadpleegd op 28 december 2021, van [https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2018/12/21/ontwerp-klimaatakkoord/Ontwerp+van+het+Klimaatakkoord\\_compleet\\_web.pdf](https://www.klimaatakkoord.nl/binaries/klimaatakkoord/documenten/publicaties/2018/12/21/ontwerp-klimaatakkoord/Ontwerp+van+het+Klimaatakkoord_compleet_web.pdf)

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., & Six, J. (2007). Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 86(1), 19–31. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0>

Slier, T., Westerik, D., Lesschen, J.P., Velthof, G., Schepens, J., Vervuurt, W., & Koopmans, C. (in press). CO<sub>2</sub>Bodem – Tussenresultaten uit Slim Landgebruik. Verwacht mei, 2022.

van Tol-Leenders, D., Knotters, M., de Groot, W., Gerritsen, P., Reijneveld, A., van Egmond, F., Wösten, H., & Kuikman, P. (2019). *Koolstofvoorraad in de bodem van Nederland (1998-2018)*. <https://doi.org/10.18174/509781>

West, T. O., & Six, J. (2007). Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change*, 80(1–2), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9173-8>

---

Wikipedia Commons. (z.d.). Bodemprofiel met horizonten [figuur]. Wikipedia. Geraadpleegd op 28 december 2021, van Bodemhorizont - Wikipedia

ZLTO. (2019). Een van de deelnemende percelen van het Carbon Farming project [foto]. North Sea Region. Geraadpleegd op 28 december 2021, van <https://north-searegion.eu/carbon-farming/news/carbon-farming-fieldwork-in-zeeland-by-zlto/>



