

## Enkeerd 2.0 literatuurstudie

Merijn van den Hout, Robin Walvoort, Gerard Oomen,  
Nick van Eekeren



© 2022 Louis Bolk Instituut

Enkeerd 2.0 literatuurstudie

Merijn van den Hout<sup>1</sup>, Robin Walvoort<sup>2</sup>, Gerard Oomen<sup>2</sup>,  
Nick van Eekeren<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Louis Bolk Instituut* <sup>2</sup> *Wageningen University & Research*

Publicatienummer 2022-024 LbD

16 pagina's

Deze publicatie is beschikbaar via  
[www.louisbolk.nl/publicaties](http://www.louisbolk.nl/publicaties)

[www.louisbolk.nl](http://www.louisbolk.nl)

[info@louisbolk.nl](mailto:info@louisbolk.nl)

T 0343 523 860

Kosterijland 3-5

3981 AJ Bunnik

 @LouisBolk

Louis Bolk Instituut: Onderzoek en advies ter bevordering van  
duurzame landbouw, voeding en gezondheid

## Voorwoord

Voor u ligt de literatuurstudie van het project Voorverkenning Enkeerd 2.0. Dit project wordt gefinancierd door De Innovatie Coöperatie en het Agro-Innovatiecentrum De Marke van Livestock Research WUR. Dank gaat uit naar de verschillende betrokkenen bij het project Pieter Brouwer als initiatiefnemer, Erik Koldewij, Alfons van den Belt en Carel de Vries van De Innovatie Coöperatie, en Coen ter Berg, Joost Sleiderink en Pieter Struijk van het Louis Bolk Instituut.

**DE MARKE**  
AGRO-INNOVATIECENTRUM

 **de innovatie**  
**coöperatie**  
Vooruitboeren in de regio!

# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Koolstof opslag in de bodem door toepassing van blijvend grasland</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Onderzoeken naar diepe bodembewerking voor CO<sub>2</sub>-opslag</b>	<b>7</b>
3.1	Hoeveel koolstof kan worden vastgelegd?	7
3.2	Diepere bewerking remt afbraak van OS	8
3.3	Opbouw van toplaag OS na diepe bodembewerking	8
<b>4</b>	<b>Landbouwkundige waarde van diepe bodembewerkingen</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Afbraakmechanisme van organisch materiaal</b>	<b>12</b>
5.1	Mechanisme	12
5.2	Priming effect verminderen	13
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>14</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>15</b>



# 1 Inleiding

Om de temperatuurstijging op aarde te temperen (klimaatmitigatie) komt er steeds meer aandacht voor het idee om CO<sub>2</sub> via koolstof langer vast te leggen in de bodem. De landbouw zou een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan het vastleggen van deze koolstof d.m.v. het verhogen van de organische stof (OS) in de bodem. In de praktijk blijkt dat na een aantal jaren (afhankelijk van grondsoort, bouwplan etc.) een evenwicht in de bodem ontstaat, dan is de opbouw van OS in de bodem gelijk aan de afbraak. Door de OS dieper in de bodem te mengen (bijvoorbeeld op 60cm diepte), verschraalt de bovenlaag, waardoor daar weer ruimte ontstaat voor het opslaan van CO<sub>2</sub> in nieuwe OS.

Belangrijk voordeel hiervan is tevens dat de planten beschikken over een dieper doorwortelbare 'bouwvoor' en dat de toename van OS leidt tot een toename van het vochtbergend vermogen. Zeker op droge zandgronden verwachten we dat de droogtegevoeligheid zal afnemen en deze maatregel zal bijdragen aan klimaatadaptatie.

In deze literatuurstudie wordt nader ingegaan op de verwachte effecten van een diepe bodembewerking voor opslag van CO<sub>2</sub> in OS en voor gewasopbrengsten. Allereerst wordt uitgelicht hoe door middel van blijvend grasland OS opgebouwd kan worden. Vervolgens wordt ingegaan op de huidige kennis rondom bodembewerking voor opslag van koolstof in diepere bodemlagen. Tevens zal aandacht zijn voor de landbouwkundige waarde en wederopbouw van OS, alsook het verwachte effect op gewasopbrengst en droogtetolerantie. Tot slot worden de mechanismen achter de opslag en afbraak van koolstof in de bodem nader toegelicht.

De focus is op het vergelijken van diepploegen en diepmengen als mogelijke methoden voor opslag van OS in zandgronden. Daarbij wordt uitgegaan van de teelt van grasland om zo effectief mogelijk CO<sub>2</sub> te binden uit de lucht maar dit niet ten kosten gaat van de landbouwkundige waarde.

## 2 Koolstof opslag in de bodem door toepassing van blijvend grasland

Blijvend grasland is een goede manier om OS op te bouwen omdat er veel biomassa en een groot wortelstelsel ontstaat. Echter stabiliseert en verzadigt de OS in de bodem van het grasland na een langere tijd (Chenu et al., 2019; Stewart et al., 2007). Afbraak en aanvoer van OS zijn dan in evenwicht en er kan redelijkerwijs geen extra binding van CO<sub>2</sub> plaatsvinden in de bodem. Hoe lager het percentage OS in de bodem, hoe hoger de potentie om nog extra CO<sub>2</sub> vast te kunnen leggen. Op zandgrond met <3% OS is de verwachte CO<sub>2</sub>-opname wel 3 ton/ha/jaar (Staps et al., 2021). Bij 5-8% OS is dit echter nog maar een toename van 0,1 ton/ha/jaar. Vanaf 5% begint de potentie voor CO<sub>2</sub>-binding dus af te nemen, en met 8% kan de bodem op zandgrond als verzadigd beschouwd worden en vindt er netto weinig CO<sub>2</sub>-binding meer plaats.

Er bevindt zich op dat moment in het grasland echter wel een rijke toplaag met veel OS. De diepte van deze toplaag kan variëren maar beperkt zich vaak tot de bovenste 30cm. Op veel Nederlandse zandgronden is daaronder zand dat erg arm is aan OS en voedingsstoffen. De beworteling van grasland op zandgrond beperkt zich vaak ook tot deze diepte omdat er in diepere lagen weinig voeding of water aanwezig is (van Eekeren, 2009). Om na verzadiging van de toplaag toch nog meer CO<sub>2</sub> op te kunnen slaan kan gebruik gemaakt worden van diepere bodemlagen die nog niet verzadigd zijn met OS. De OS-rijke toplaag wordt dan via een diepe grondbewerking weggestopt in de bodem. Daarmee neemt het percentage OS in de (nieuwe) teeltlaag af, waardoor het met nieuw blijvend grasland weer opgebouwd kan worden en daarmee extra CO<sub>2</sub> vastlegt (Lawrence-Smith et al., 2021).

## 3 Onderzoeken naar diepe bodembewerking voor CO<sub>2</sub>-opslag

### 3.1 Hoeveel koolstof kan worden vastgelegd?

Er zijn diverse proeven die succes hebben behaald met de opslag van OS door de toplaag onder te ploegen in diepere bodemlagen. Een voorbeeld van een erg diepe bodembewerking is te vinden in Nieuw-Zeeland. Schiedung et al. (2019) hebben onderzoek gedaan naar opslag van OS in grond die in het verleden omgekeerd is. Om de waterafvoer te verbeteren zijn de afgelopen 30 jaar totaal 2.000ha aan grond gekeerd met een graafmachine. Daarbij is een nieuwe toplaag gecreëerd die arm was aan OS en is het land gebruikt voor grasland. Na analyse van de bodem blijkt er 20 jaar na het omkeren van de bodem gemiddeld 69% meer koolstof vastgelegd in het gehele bodemprofiel.

Alcántara et al. (2016) hebben zand- en leemgronden in Duitsland geanalyseerd. De bodems waren 35-50 jaar geleden op een diepte van 55-90cm geploegd en vervolgens regulier gebruikt als akkerland. In vergelijking met de referentiepercelen bevatten de diep geploegde gronden gemiddeld 42% meer koolstof in het gehele bodemprofiel. Uit de bodemanalyses blijkt dat meer dan de helft van de koolstof uit de begraven toplaag bewaard is gebleven in de diepere bodemlagen.

In Nieuw-Zeeland zijn in 2016 twee proeven uitgevoerd waarbij grasland op 30cm diepte geploegd is om de toplaag dieper weg te stoppen (Calvelo Pereira et al., 2019; McNally et al., 2019). Dit gaf het gewenste resultaat dat de bodemkoolstof inderdaad begraven kan worden en daarmee in potentie bij kan dragen aan langdurige CO<sub>2</sub>-opslag. Omdat het experiment slechts 2 jaar duurde kunnen echter over de lange termijn nog weinig conclusies getrokken worden.

Recent is in Duitsland een speciale ploeg ontwikkeld voor koolstofopslag in de akkerbouw. Deze ploeg, ontwikkeld door Lemken, heeft afwisselend normale en verdiepte ploegscharen waardoor verdiepte sleuven ontstaan waar de toplaag dieper weggestopt wordt (Lemken GmbH, 2022). Door onderzoek van Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) is deze ploeg getest en is dit concept van CO<sub>2</sub>-opslag bewezen (Sommer et al., 2019). Aanvullend is de theorie dat de draagkracht beter behouden blijft en herverdichting voorkomen kan worden omdat niet het gehele grondoppervlak diep wordt geploegd. Er is ingeschat dat met deze methode van ploegen over een periode van 10 jaar 1,2ton CO<sub>2</sub>/ha extra opgeslagen kan worden in de bodem (Topagrar, 2022).

Naast bovengenoemde proeven zijn er ook meer theoretische studies gedaan naar de potentie en de schaal waarop het begraven van de toplaag bij kan dragen aan CO<sub>2</sub>-opslag. Lawrence-Smith et al. (2021) hebben op basis van data van 247 graslandpercelen in Nieuw-Zeeland een model gebruikt om de CO<sub>2</sub>-opslag na het ploegen te voorspellen. De verwachting is dat ploegen op minimaal 30cm diepte gemiddeld (en éénmalig) 7,3-12,7ton koolstof/ha vast zou kunnen leggen in de diepere bodemlaag. Een vergelijkbare conclusie

is gegeven door Madigan et al, (2021) die onderschrijven dat er ook in Ierland veel kansen zijn voor opslag van CO<sub>2</sub> door diepploegen. Bijna een kwart van het grasland in Ierland zou geschikt zijn voor diepploegen en daarmee 1-2 ton koolstof/ha/jaar extra vast kunnen leggen in de nieuwe toplaag.

### **3.2 Diepere bewerking remt afbraak van OS**

Bovenstaande onderzoeken geven een gedegen onderbouwing van de mechanismen voor CO<sub>2</sub>-opslag in de bodem. Echter zijn deze voorbeelden niet altijd representatief voor de Nederlandse situatie. In Nieuw-Zeeland en Ierland is meer blijvend grasland waarbij het land nog nooit geploegd is (Madigan et al., 2021; Whitehead et al., 2018). Het grasland wortelt dan niet dieper dan 25cm. Het ploegen op 30cm diepte kan dan effectief zijn om de organische stof weg te stoppen in de ondergrond. In Nederland zijn de meeste percelen op zandgrond wel eens bewerkt geweest en vaak ook geploegd. Het is dan ook de verwachting dat 30cm diep ploegen relatief ondiep is voor de Nederlandse situatie.

Er zijn bovendien aanwijzingen dat de vastlegging van OS op de lange termijn effectiever is wanneer het dieper in de bodem weggestopt wordt. Kirschbaum et al. (2021) hebben onderzocht welke mechanismen verantwoordelijk zijn voor afbraak van organische stof en geven aan dat ploegen op 25cm diepte mogelijk niet leidt tot de gewenste bescherming tegen afbraak. Regulier ploegen van grasland (op 25-30cm diepte) leidt volgens Reinsch et al. (2018) in de meeste gevallen dan ook tot een afbraak van de organische stof in het gehele bodemprofiel. Echter zijn er ook aanwijzingen dat het éénmalig ploegen van de bodem geen negatieve effecten heeft op de afbraak van OS en juist de bodem lossener kan maken en de gewasproductie kan verbeteren (Kuhwald et al., 2017). Ook Whitehead et al. (2018) geven aanwijzingen dat het éénmalig onderploegen van de toplaag minder afbraak geeft dan het jaarlijks ploegen van akkerland en dat de versnelde afbraak van OS mogelijk gecompenseerd wordt door extra vastlegging van OS in diepere lagen.

In diepere bodemlagen is de OS stabiel en breekt minder snel af, voornamelijk doordat het bodemleven minder actief is (Hicks Pries et al., 2018). De eerder genoemde praktijkproeven over de opslag van CO<sub>2</sub> door diep ploegen bewijzen dat langdurige opslag in diepere bodemlagen (>55cm diep) effectief is (Alcántara et al., 2016; Schiedung et al., 2019), terwijl de proeven die uitgaan van 30cm diepte meestal gebruik hebben gemaakt van modellen en een meer theoretische benadering (Lawrence-Smith et al., 2021; Madigan et al., 2021). De bewijslast dat OS minder snel afbreekt in diepere bodemlagen is aanzienlijk en geeft aanleiding tot de keuze om in de Nederlandse situatie de focus te leggen op diepere (>60cm diep) grondbewerking.

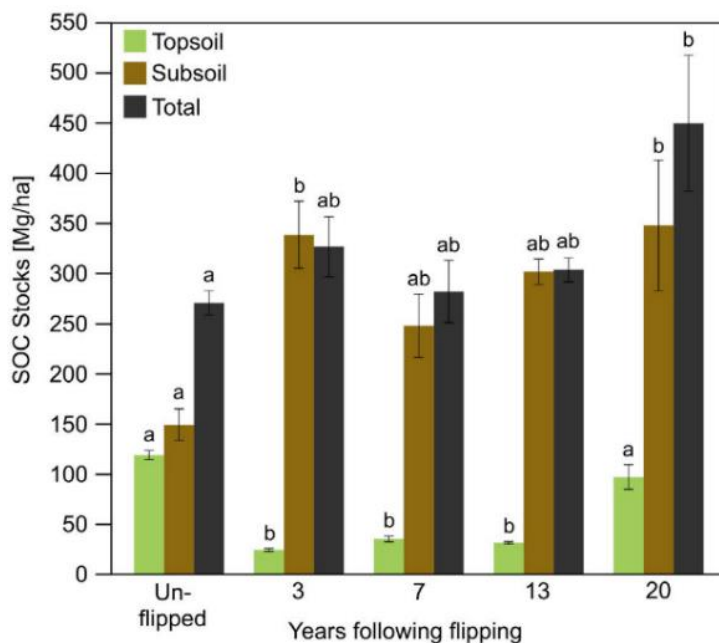
### **3.3 Opbouw van toplaag OS na diepe bodembewerking**

Doordat het OS diep weggestopt wordt zal het minder snel afbreken en dus voor lange termijn opgeslagen worden en daarmee bijdragen aan klimaatmitigatie. Het diep



wegstoppen van de rijke toplaag kan echter wel nadelig zijn voor de landbouwkundige waarde van de grond. OS heeft een belangrijke waarde in onder andere het vasthouden van water, het leveren van nutriënten en het voeden van het bodemleven (Hoogsteen et al., 2020). Bij diepploegen wordt de arme ondergrond naar boven gebracht en vormt daarmee nieuwe teeltlaag. Voor zowel CO<sub>2</sub>-binding als een goede bodemkwaliteit en gewasproductie is het belangrijk dat de nieuwe toplaag weer verrijkt wordt met nieuwe OS.

In de eerder vermelde proeven over diepe grondkering is ook de opbouw van koolstof in de nieuwe toplaag onderzocht. In akkerland was de voorraad koolstof in de toplaag 45 jaar na diepploegen nog 6-22% lager dan in de referentiepercelen die niet diep geploegd waren (Alcántara et al., 2016). Bij de diep-gekeerde percelen was er na 20 jaar nog 36% minder koolstof in de bovenste 15cm aanwezig dan bij percelen die niet gekeerd waren (Schiedung et al., 2019) Echter was de eerste jaren na het keren de toplaag nog arm aan koolstof (figuur 1). Een bodemanalyse toonde aan dat de voorraad koolstof toegenomen van 7g/kg (net na keren) tot 35g/kg na 10 jaar (Thomas et al., 2007). De onderzoekers schatten in dat het 16-25 jaar duurt om in de toplaag hetzelfde niveau aan koolstof te bereiken als voor het keren, mits gebruik gemaakt wordt van blijvend grasland (Schiedung et al., 2019).



Figuur 1. Overgenomen van Schiedung et al. (2019). De koolstofvoorraad (SOC stocks) in de toplaag (groene balk) nemen af na het keren. "Unflipped" data zijn referentiepercelen die niet gekeerd zijn. De koolstofvoorraad in de toplaag bouwt langzaam op 3, 7 en 13 jaar na het keren. Na 20 jaar is het weer op een vergelijkbaar niveau als bij de niet-gekeerde percelen, maar nog altijd 36% minder. Ten alle tijden is de koolstofvoorraad in de diepere lagen (bruine balk) en de totale voorraad in het gehele bodemprofiel (zwarte balk) hoger bij de gekeerde gronden.

Het is te verwachten dat de opbouw van nieuwe OS een langjarig proces is. Dit proces kan wel versneld worden door het gebruik van blijvend grasland, zoals besproken in hoofdstuk 2.

Een voordeel is dat een relatief OS-arme toplaag juist extra veel koolstof vastlegt omdat de verzadiging nog laag is (Hoofdstuk 2; Staps et al., 2021). Het is te verwachten dat bij diepmengen relatief meer organische stof in de toplaag aanwezig blijft dan bij diepploegen. De tijd dat het kost om de teeltlaag weer te verrijken na diepmengen is echter onbekend vanuit de huidige literatuur en vergt nader onderzoek.

Dat de toplaag na een diepe bodembewerking armer is aan OS is inherent aan het doel om die OS vast te leggen in diepere lagen. Dit is dan ook niet persé een negatieve factor zolang het de landbouwkundige waarde en gewasopbrengst niet te veel schaadt.

## 4 Landbouwkundige waarde van diepe bodembewerkingen

De eerdergenoemde onderzoeken keken voornamelijk naar de (langjarige) opslag van OS na een diepe bodembewerking. Slechts één van de onderzoeken keek daarnaast ook naar de gewasopbrengst en geeft aan dat deze op peil bleef terwijl de OS effectief opgeslagen werd in diepere bodemlagen (Calvelo Pereira et al., 2019; McNally et al., 2019).

De meeste onderzoeken naar diepe bodembewerking zijn gedaan in de akkerbouw waarbij over het algemeen positieve resultaten behaald worden mits juist toegepast. Bijvoorbeeld bij de teelt van graan gaf de toepassing van een diepe bodembewerking meer wortels die ook dieper wortelde (Cai et al., 2014). Het ligt in de lijn der verwachting dat dezelfde conclusies getrokken kunnen worden voor (blijvend) grasland ondanks het gebrek aan studies met een specifieke focus op grasland. In de huidige literatuurstudie is daarom meer algemeen gekeken naar de effecten van diepe bewerkingen.

Uit een uitgebreide meta-analyse blijkt dat diepe bodembewerking over het algemeen positief is voor de landbouwkundige waarde en de opbrengst verhoogt met gemiddeld 6% (Schneider et al., 2017). Als er storende lagen zijn dan helpt een diepere bodembewerking bijna altijd om de gewasopbrengst te verhogen. Om opbrengstverliezen te voorkomen na de bewerking moet aandacht gegeven worden aan voldoende rijke bemesting voor het gewas, omdat de toplaag na de diepe bodembewerking minder nutriënten levert. Aan de andere kant wordt juist het beeld geschetst dat dankzij de bewerking er meer nutriënten uit de diepere bodemlagen benut kunnen worden door het gewas. Uit de analyse blijkt bovendien dat een diepe bodembewerking meestal een positief effect heeft op de waterhuishouding en bij kan dragen aan het verminderen van droogtestress. Door de bewerking ontstaat een diepere teeltlaag en daarmee een grotere waterbuffer waar de wortels gebruik van kunnen maken. Deze meta-analyse geeft daarmee een solide onderbouwing dat een diepe bodembewerking positief is voor de waterhuishouding en het tegengaan van droogtestress (Schneider et al., 2017). Dit vertaalt zich, zeker op de lange termijn, naar een stabielere en mogelijk hogere gewasopbrengst.

Bij diepploegen op zandgrond is de verwachting dat de OS-rijke toplaag zo diep weggestopt wordt dat het buiten bereik van de plantenwortels komt en dus weinig landbouwkundige waarde meer heeft. Ondanks dat deze koolstof dan langdurig opgeslagen wordt in de bodem kan dit negatieve gevolgen hebben voor de gewasopbrengst. Diepmengen lijkt een betere methode om de OS nog binnen bereik van de planten te houden en daarmee nog gebruik te kunnen maken van meer waterbuffering en nutriëntenlevering. Dit zal de droogteresistentie en de gewasopbrengst ten goede komen. De vraag is dan of deze bewerking net zo effectief is voor de langdurige opslag van OS. Aangezien alle onderzoeken naar diepe bodembewerking voor OS-opslag de focus leggen op ploegen is er vanuit de huidige literatuur hier geen duidelijk antwoord op. Echter kan wel gekeken worden naar de mechanismen achter de opslag en afbraak van OS in diepere bodemlagen.

## 5 Afbraakmechanisme van organisch materiaal

### 5.1 Mechanisme

Onderzoek wijst uit dat de afbraaksnelheid van OS afneemt in de diepere bodemlagen, waardoor langdurige opslag plaats kan vinden (Hicks Pries et al., 2018). Kirschbaum et al., (2021) hebben via een modelstudie gekeken naar welke mechanismen verantwoordelijk zijn voor de afbraak van OS in diepere bodemlagen. De temperatuur en zuurstof hadden maar weinig invloed op de afbraaksnelheid. De hoeveelheid actief bodemleven (voornamelijk micro-organismen) had het meeste invloed op afbraak van OS. Als er veel gemakkelijk afbreekbare OS aanwezig is dan zal dat ook veel bodemleven aantrekken. Het bodemleven breekt het organisch materiaal af, wat onwenselijk is voor de opslag van OS op de lange termijn. Na verloop van tijd zal de voorraad van OS dat makkelijk afbreekbaar is op zijn en zal het bodemleven minder actief worden. De moeilijk afbreekbare OS-delen zullen dan beschermd blijven van afbraak en langdurig opgeslagen worden. Als er echter steeds nieuwe voeding voor het bodemleven de bodem ingebracht wordt (in de vorm van verse wortelgroei) zal dat de afbraak van OS weer aanjagen, waarbij ook het moeilijk afbreekbare OS afgebroken kan worden. Dit wordt het "priming" effect genoemd en kan nadelig zijn voor de lange termijn opslag van OS.

Daarbij is er tussen diepploegen en diepmengen een wezenlijk verschil te verwachten wat betreft de afbraak van de ondergewerkte OS en de landbouwkundige waarde. Bij diepploegen wordt de rijke toplaag volledig weggestopt in de ondergrond. Nadat de makkelijk afbreekbare OS is afgebroken is te verwachten dat de moeilijk afbreekbare delen voor lange tijd opgeslagen zullen worden. Het bodemleven neemt op die diepte af en er komt geen nieuwe input van voeding omdat de wortels niet tot de diepte van de oude toplaag zullen groeien. Er zijn immers in de bodem weinig nutriënten te vinden voor de wortels, waardoor de groei naar verwachting vooral in de toplaag zal blijven. Het nadeel hiervan is dat de nieuwe teeltlaag erg arm is en daarmee een slechte landbouwkundige waarde heeft wat betreft waterhuishouding en nutriëntenvoorziening. Ook zijn er weinig voordelen te verwachten wat betreft diepere beworteling en de daarmee samenhangende wateropname en weerbaarheid tegen droogte.

Daartegenover staat dat bij diepmengen de verwachting is dat de OS-rijke toplaag door het gehele profiel zal verspreiden. Daarmee is een betere landbouwkundige waarde te verwachten. Waterbuffering en nutriëntenlevering zullen naar verwachting beter zijn dan bij het diepploegen. De wortels zullen naar verwachting ook dieper reiken omdat er over het gehele profiel nutriënten aanwezig zijn. Hierdoor is ook een betere wateropname en meer droogteresistentie te verwachten. Echter is de langdurige opslag van OS minder zeker, voornamelijk door het priming effect. Doordat de wortels continue verse voeding afzetten zal het bodemleven extra actief worden en ook de moeilijk afbreekbare OS af gaan breken.

Er zijn nog geen praktijkproeven uitgevoerd waarbij de langdurige opslag van OS na diepmengen is onderzocht. Aangezien diepmengen meer potentie heeft dan diepploegen om de landbouwkundige waarde van de bodem te verbeteren is het belangrijk om ook de potentie voor (langdurige) koolstofopslag duidelijker te krijgen.

## 5.2 Priming effect verminderen

Bij diepmengen voor langdurige opslag van OS is het belangrijk om het effect van priming te minimaliseren zodat de oudere, moeilijk afbreekbare OS behouden blijft. Er is een grote bandbreedte in hoeverre de afbraak beïnvloed wordt door het priming effect. De afbraak kan tot wel 380% versneld worden door het priming effect, wat duidelijk ongewenst is wanneer opslag van koolstof het doel is (Cheng et al., 2014). Echter blijkt uit hetzelfde onderzoek dat ook 0% of zelfs een negatief (-50%) priming effect mogelijk is. De aanvoer van nieuwe OS door wortelresten en bemesting kan dus ook groter zijn dan de mineralisatie van de al aanwezige OS, waardoor netto toch een opbouw van OS plaats kan vinden. Via een modelstudie hebben (Liang et al., 2018) aangetoond dat het effect van aanvoer van verse C door plantenwortels waarschijnlijk groter is dan de afbraak van oude C, waardoor er netto 32% van de toegevoegde C opgeslagen wordt in de bodem. Ze geven echter ook aan dat op sommige gronden wel een nettoverlies op kan treden en dat er ook nog veel onzekerheden zijn rondom de mechanismen achter het priming effect.

Het belangrijkste instrument om afbraak van oudere OS te remmen is de nutriëntenvoorziening voor het bodemleven, voornamelijk koolstof en stikstof. Wanneer voldoende verse voeding aanwezig is voor het bodemleven zal er prioriteit gegeven worden aan de afbraak van de verse inputs (Bailey et al., 2019). De beschikbaarheid van voldoende stikstof is mogelijk de belangrijkste factor om het priming effect af te remmen. In bodems met een hoge vruchtbaarheid en N-beschikbaarheid is er duidelijk een remming van het priming effect (Wu et al., 2020). Ook in het onderzoek van Lawrence-Smith et al. (2021) wordt het priming effect aangehaald als een belangrijke factor die geremd dient te worden als opslag van C gewenst is. Hierbij worden de behoeften aan N, P en S benoemd als belangrijke Nutriënten om het bodemleven te voeden. Wanneer deze mineralen in ruime mate en in de juiste verhouding aanwezig zijn zal het priming effect geremd worden. Tenslotte moet ook rekening gehouden worden dat na diepmengen de toplaag relatief armer is aan OS dan voorafgaand aan de bewerking. Om dat weer op te bouwen, en dus extra CO<sub>2</sub> uit de lucht te halen en op te slaan, zijn ook extra nutriënten nodig. Voor de opbouw van 1 ton koolstof in de bodem is per hectare 73kg N, 17kg P en 11kg S nodig (Richardson et al., 2014). Het is daarom aan te raden om rijkelijk te bemesten zodat er voldoende nutriënten aanwezig zijn voor goede plantengroei, remming van afbraak van de oude OS en opbouw van nieuwe OS.

## 6 Conclusies

Een diepe bodembewerking kan bijdragen aan de langdurige opslag van organische stof in diepere bodemlagen en tegelijk de landbouwkundige waarde van de bodem verbeteren dankzij een verbeterde waterhuishouding.

Om maximale opslag van CO<sub>2</sub> te verkrijgen is het raadzaam om eerst het organische stofgehalte in de toplaag van de bodem tot ongeveer 5% op te bouwen door middel van blijvend grasland. Na de bewerking kan wederom blijvend grasland aangelegd worden voor optimale binding en opslag van extra CO<sub>2</sub>.

Diepploegen is een effectieve bewerking om koolstof diep weg te stoppen en daarmee langdurig op te slaan. Echter neemt daarmee de landbouwkundige waarde van zandgronden naar verwachting erg snel af. Het witte zand dat naar boven wordt gehaald is schraal en bevat nagenoeg geen OS. Hierdoor zal de beworteling en de buffering van water naar verwachting tegenvallen.

Bij diepmengen wordt de OS-rijke toplaag meer verspreid over de gehele bouwvoor en blijft daardoor functioneel beschikbaar voor het gewas. Dit kan voordelen geven voor waterbuffering en nutriëntenlevering aan het grasland. De verwachting is dat het grasland dieper zal wortelen en beter tegen periodes van droogte bestandig zal zijn.

Over de langdurige opslag van koolstof in diepere bodemlagen na diepmengen is geen onderzoek bekend. Het is aannemelijk dat er meer afbraak plaats zal vinden dan bij diepploegen. Echter zou de aanvoer ook groter kunnen zijn doordat er meer wortelmassa ontstaat in het gehele bodemprofiel. Met een voldoende rijke bemesting en het juiste management zijn OS verliezen door afbraak waarschijnlijk te minimaliseren.

Diepmengen heeft daarmee de meeste potentie om gebruikt worden voor zowel klimaatmitigatie (koolstofopslag in diepere bodemlagen) als klimaatadaptatie (betere beworteling, waterbuffering en droogteresistentie).



## Literatuur

- Alcántara, V., Don, A., Well, R., & Nieder, R. (2016). Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Global Change Biology*, 22(8), 2939–2956.
- Bailey, V. L., Pries, C. H., & Lajtha, K. (2019). What do we know about soil carbon destabilization? *Environmental Research Letters*, 14(8).
- Cai, H., Ma, W., Zhang, X., Ping, J., Yan, X., Liu, J., Yuan, J., Wang, L., & Ren, J. (2014). Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *Crop Journal*, 2(5), 297–307.
- Calvelo Pereira, R., McNally, S. R., Beare, M. H., Tregurtha, C., Gillespie, R., Lawrence Smith, E., der Klei, G., Thomas, S., Hedley, M., & Calvelo Pereira, R. (2019). FULL INVERSION TILLAGE PASTURE RENEWAL OFFERS GREENHOUSE GAS MITIGATION OPTIONS: THE MANAWATU EXPERIENCE. *Nutrient Loss Mitigations for Compliance in Agriculture. Occasional Report No. 32.*, 32, 7.
- Cheng, W., Parton, W. J., Gonzalez-Meler, M. A., Phillips, R., Asao, S., McNickle, G. G., Brzostek, E., & Jastrow, J. D. (2014). Synthesis and modeling perspectives of rhizosphere priming. *New Phytologist*, 201(1), 31–44.
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., & Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188(May 2018), 41–52.
- Eekeren, N. van., Bokhorst, J. (2009). Beoordeling bodemkwaliteit zandgrond: Een inventarisatie van bodemindicatoren in de veehouderij. *Zorg voor Zand Rapport nr. 7*.
- Hicks Pries, C. E., Sulman, B. N., West, C., O'Neill, C., Poppleton, E., Porras, R. C., Castanha, C., Zhu, B., Wiedemeier, D. B., & Torn, M. S. (2018). Root litter decomposition slows with soil depth. *Soil Biology and Biochemistry*, 125(July), 103–114.
- Hoogsteen, M. J. J., Bakker, E. J., van Eekeren, N., Tittonell, P. A., Groot, J. C. J., van Ittersum, M. K., & Lantinga, E. A. (2020). Do grazing systems and species composition affect root biomass and soil organic matter dynamics in temperate grassland swards? *Sustainability (Switzerland)*, 12(3), 1–17.
- Kirschbaum, M. U. F., Don, A., Beare, M. H., Hedley, M. J., Pereira, R. C., Curtin, D., McNally, S. R., & Lawrence-Smith, E. J. (2021). Sequestration of soil carbon by burying it deeper within the profile: A theoretical exploration of three possible mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 163, 108432. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108432>
- Kuhwald, M., Blaschek, M., Brunotte, J., & Duttmann, R. (2017). Comparing soil physical properties from continuous conventional tillage with long-term reduced tillage affected by one-time inversion. *Soil Use and Management*, 33(4), 611–619.
- Lawrence-Smith, E. J., Curtin, D., Beare, M. H., McNally, S. R., Kelliher, F. M., Calvelo Pereira, R., & Hedley, M. J. (2021). Full inversion tillage during pasture renewal to increase soil carbon storage: New Zealand as a case study. *Global Change Biology*, 27(10), 1998–2010.
- Lemken GmbH. (2022). LEMKEN CONDUCTS CARBON FARMING RESEARCH PROJECT. Geraadpleegd op 4 april 2022 van <https://lemken.com/en-en/news/agriculture-news/detail/lemken-conducts-carbon-farming-research-project>
- Liang, J., Zhou, Z., Huo, C., Shi, Z., Cole, J. R., Huang, L., Konstantinidis, K. T., Li, X., Liu, B., Luo, Z., Penton, C. R., Schuur, E. A. G., Tiedje, J. M., Wang, Y. P., Wu, L., Xia, J., Zhou, J., & Luo, Y. (2018). More replenishment than priming loss of soil organic carbon with additional carbon input. *Nature Communications*, 9(1), 1–9.
- Madigan, A. P., Zimmermann, J., Krol, D. J., Williams, M., & Jones, M. B. (2021). Full Inversion Tillage (FIT) during pasture renewal as a potential management strategy for enhanced carbon sequestration and storage in Irish grassland soils. *Science of the Total Environment*, 805, 150342.

- McNally, S. R., Beare, M. H., Tregurtha, C., Gillespie, R., Lawrence Smith, E., der Klei, G., Thomas, S., Hedley, M., & Calvelo Pereira, R. (2019). Full inversion tillage pasture renewal offers greenhouse gas mitigation options: The canterbury experience. *Nutrient Loss Mitigations for Compliance in Agriculture. Occasional Report No. 32.*, 32, 7.
- Reinsch, T., Loges, R., Kluß, C., & Taube, F. (2018). Effect of grassland ploughing and reseeded on CO<sub>2</sub> emissions and soil carbon stocks. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265(June), 374–383.
- Richardson, A. E., Kirkby, C. A., Banerjee, S., & Kirkegaard, J. A. (2014). The inorganic nutrient cost of building soil carbon. *Carbon Management*, 5(3), 265–268.
- Schiedung, M., Tregurtha, C. S., Beare, M. H., Thomas, S. M., & Don, A. (2019). Deep soil flipping increases carbon stocks of New Zealand grasslands. *Global Change Biology*, 25(7), 2296–2309.
- Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., & Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and Tillage Research*, 174(June), 193–204.
- Sommer, M., Augustin, Jürgen. Reduction of environmental and climate impacts of agricultural crop production through the use of an optimized topsoil deepening technique (Krumensenke). Geraadpleegd op 4 april 2022 van [https://www.zalf.de/de/forschung\\_lehre/projekte/AttachmentsFoPro/RA1\\_Krumensenke\\_2019\\_en\\_1384.pdf](https://www.zalf.de/de/forschung_lehre/projekte/AttachmentsFoPro/RA1_Krumensenke_2019_en_1384.pdf)
- Staps, S., Instituut, L. B., Rougoor, C., & Lesschen, J. P. (2021). *Methode voor vaststelling van CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem Type project : CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem door toepassing van blijvend gras-land op minerale gronden ( zand , klei en löss )*. 1–36.
- 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.
- Thomas, S. M., Ford, M. H. B. C. D., & Rietveld, V. (2007). Changes in soil quality following humping/hollowing and flipping of pakihia soils on the West Coast, South Island New Zealand. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 265–270.
- Topagrar. (2022). Kohlenstoff mit dem Pflug anreichern? Geraadpleegd op 4 april 2022 van <https://www.topagrar.com/acker/news/kohlenstoff-mit-dem-pflug-anreichern-12850338.html>
- Whitehead, D., Schipper, L. A., Pronger, J., Moinet, G. Y. K., Mudge, P. L., Calvelo Pereira, R., Kirschbaum, M. U. F., McNally, S. R., Beare, M. H., & Camps-Arbestain, M. (2018). Management practices to reduce losses or increase soil carbon stocks in temperate grazed grasslands: New Zealand as a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265(December 2017), 432–443.
- Wu, L., Xu, H., Xiao, Q., Huang, Y., Suleman, M. M., Zhu, P., Kuzyakov, Y., Xu, X., Xu, M., & Zhang, W. (2020). Soil carbon balance by priming differs with single versus repeated addition of glucose and soil fertility level. *Soil Biology and Biochemistry*, 148(June).