Slim Landgebruik

Effecten van koolstofvastleggende maatregelen op de (BLN)-bodemkwaliteit indicatoren - Deel 4

Vervuurt, W. en van Acquoij, A.

Colofon

Dit project is tot stand gekomen binnen het project meekoppelen van koolstof vastleggende maatregelen met duurzaam bodembeheer uitgevoerd door Wageningen University & Research en Louis Bolk Intituut met subsidie van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend Programma Slim Landgebruik (BO-43.10-003-033).

Review: Lyanne van den Berg, Paulien van Asperen, Hilfred Huiting

Maart, 2026

Contact: wieke.vervuurt@wur.nl

Deze publicatie is beschikbaar via www.slimlandgebruik.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting 5
1 Inleiding 8
1.1 Doelstelling 9
1.2 Leeswijzer 9
2 Werkwijze 10
2.1 Algemeen 10
2.2 Beschrijving LTE's en selectie bedrijfspercelen 10
2.2.1 Grondbewerking en groenbemesters 10
2.2.2 Aandeel graszaad in de gewasrotatie 11
2.2.3 Aandeel luzerne in de gewasrotatie 11
2.2.4 Aandeel hennep in de gewasrotatie 11
2.2.5 Leeftijd grasland 12
2.2.6 Mais-gras wisselteelt 12
2.3 Metingen aan koolstofvastlegging en BLN-indicatoren 12
2.4 Statistiek 13
3 Resultaten en discussie per maatregel 14
3.1 Groenbemesters en grondbewerking 14
3.2 Aandeel graszaad in de rotatie 18
3.3 Aandeel luzerne in de rotatie 20
3.4 Aandeel hennep in de rotatie 22
3.5 Leeftijd grasland 24
3.6 Mais-gras wisselteelt 27
4 Conclusie 30
Referenties 32
Bijlagen 1: Toelichting op de gemeten (BLN) indicatoren 36

Afkortingen

Afkorting	Volledig
BD	Bulkdichtheid
BLN	Bodemindicatoren voor landbouwgronden in Nederland
CEC	*Cation exchange capacity*
HWC	*Hot water extractable carbon*
LTE	Lange termijn experiment
NIRS	*Nearly infra red*
NKG	Niet-kerende grondbewerking
Nmin	Minerale stikstof
NPL	Nationaal programma landbouwbodems
OS	Organische stof
PAE	*Plant available elements*
PLFA	*Phospholipid fatty acids*
PMN	Potentieel mineraliseerbare stikstof
SL	Slim Landgebruik

Samenvatting

Binnen Slim Landgebruik worden sinds 2018 maatregelen geëvalueerd om vast te stellen wat het effect van landbouwkundige maatregelen aan koolstofvastlegging in de bodem is. Met de opgedane kennis wordt bijgedragen aan de in het Klimaatakkoord vastgestelde doelstelling om vanaf 2030 jaarlijks 0,5 Mton CO_2-equivalenten te reduceren door de vastlegging van koolstof in minerale gronden. Binnen Slim Landgebruik wordt tevens onderzocht in hoeverre koolstofvastleggende maatregelen gepaard gaan met het behouden van- of verbeteren van de bodemkwaliteit en daarmee bijdragen aan duurzaam bodembeheer, zoals ten doel is gesteld in het Nationaal Programma Landbouwbodems.

In deze studie is de BLN-indicatorset (1.0) gebruikt om veranderingen in de bodemkwaliteit als gevolg van koolstofvastleggende maatregelen te analyseren. Er zijn verschillende maatregelen in de akkerbouw en veehouderij onderzocht op verschillende locaties, met elk hun eigen opzet. De combinatie van grondbewerking en groenbemesters is getest in een langjarig veldexperiment in Lelystad. De grondbewerkingen bestonden uit ploegen, NKG en directzaai en als groenbemesters zijn rogge, rogge-wintererwt en grasklaver onderzaai getest. Een hoger aandeel rustgewassen in rotatie is getest op praktijkpercelen, door percelen te selecteren met veel rustgewassen en weinig rustgewassen. Om het effect van graszaad vast te stellen zijn er percelen bemonsterd in Zeeland, voor luzerne in Flevoland en voor hennep in Groningen. Om het effect van de leeftijd van grasland te toetsen zijn er praktijkpercelen in Noord-Brabant geselecteerd en bemonsterd in vier categorieën: bouwland, jong grasland (1-5 jaar), ouder grasland (6-10 jaar) en oud grasland (>10 jaar). Om de maatregel gras-mais-wisselteelt te onderzoeken zijn praktijkpercelen in Noord-Brabant bemonsterd in de categorieën permanent bouwland, gras na mais, mais na gras en permanent grasland. In Tabel 10 worden de resultaten van deze maatregelen samengevat.

Gereduceerde grondbewerking in combinatie met groenbemesters

De combinatie van gereduceerde grondbewerking en groenbemesters leek van invloed te zijn op de bodemkwaliteit. In vergelijking tot ploegen leidde geen oppervlakkige grondbewerking in combinatie met grasklaver als groenbemester tot een hoger koolstofgehalte in de bodem. Dit komt waarschijnlijk door het onderzaaien van grasklaver onder mais, waardoor het een lange groeiperiode had ten opzichte van andere groenbemesters. Een hogere aanvoer van koolstof in combinatie met minder verstoring leidde ook tot meer microbiële biomassa. Ook leidde gereduceerde grondbewerking tot een hogere indringingsweerstand, terwijl de combinatie van grasklaver als groenbemester met ploegen juist gepaard ging met een beter watervasthoudend vermogen. Gereduceerde grondbewerking ging ook gepaard met een hogere voorraad aan stikstof dan ploegen, wat waarschijnlijk komt doordat ploegen organische resten verkleint en zuurstof in de bodem brengt en daarmee mineralisatie stimuleert. Door het meten tijdens de groei- en opnameperiode, ging grasklaver als groenbemester gepaard met een lagere hoeveelheid minerale stikstof in de bodem.

Rustgewassen in rotatie

Het aanpassen van de gewasrotatie (meer graszaad, luzerne of hennep) in de akkerbouw ging niet gepaard met een verhoging van het bodem organische koolstofgehalte, dit komt mogelijk doordat het verschil in gewasresten met andere akkerbouwgewassen niet groot genoeg is om binnen een aantal jaar een significant effect aan te tonen. Deze maatregelen waren overigens wel van invloed op andere aspecten van de bodemkwaliteit. Een hoger aandeel graszaad in de rotatie ging gepaard met een beter watervasthoudend vermogen van de bodem en meer minerale stikstof in de bodem. Een hoger aandeel luzerne in de rotatie ging gepaard met een hogere

indringingsweerstand, dat komt mogelijk doordat het een meerjarige teelt is waarbij de bodem niet jaarlijks wordt losgemaakt. Bij een hoger aandeel hennep in de rotatie was dit niet het geval, mogelijk doordat hennep geen meerjarig gewas is en daardoor een andere bodembewerking behoeft. Meer luzerne leidde tot minder beschikbare kali in de bodem, terwijl hennep juist leidde tot een hogere hoeveelheid. Dit komt mogelijk door de hoge kalibehoefte van luzerne, voor hennep is het niet duidelijk wat leidde tot een hogere beschikbare hoeveelheid kalium. Het verschil bestond wellicht al tussen de praktijkpercelen wat los staat van de hennep aanwezigheid in de gewasrotatie. De verwachtingen wat betreft de effecten van een extensiever bouwplan op de bodemkwaliteit zijn groot, de resultaten van deze studie bevestigen dit beeld niet. Mogelijk komt dit doordat er gemeten is aan praktijkpercelen, door de grote variatie is het lastig significante effecten aan te tonen.

Leeftijd grasland en gras-mais-wisselteelt

Ten opzichte van bouwland ging permanent grasland gepaard met een hoger bodem organisch (kool)stof gehalte, een compactere bodem, een hogere stikstofvoorraad in de bodem en meer bodembiologie. Jong en middeloud grasland lieten dit ook zien, maar alleen bij de bulkdichtheid was het verschil ten opzichte van continu bouwland significant. Mais na grasland liet ook meer bodem organische (kool)stof, een grotere stikstofvoorraad en meer bodembiologie zien ten opzichte van continu bouwland, maar deze verschillen alleen voor de gemiddelde indringingsweerstand significant.

Elk van de getoetste maatregelen had een effect op aspecten van de bodemkwaliteit. De grootste effecten werden gevonden bij het omzetten van bouwland naar grasland, terwijl grote effecten bij de overige maatregelen beperkt waren tot de beschikbaarheid van kali, de indringingsweerstand en de stikstofdynamiek.

Tabel 1: Resultatenoverzicht per maatregel. In de tabel worden symbolen gebruikt om effecten aan te duiden: '+ +' geeft een significant positief effect aan (p<0,05), '+' een trendmatig positief effect (p<0,10), '- -' een significant negatief effect (p<0,05) en '-' een trendmatig negatief effect (p<0,10).

		Groenbemesters en grondbewerking*											Gewasrotatie			Leeftijd grasland			Wissel-teelt**
	Meting	Ploegen			Geen oppervlakkige grondbewerking				NKG										
		gras-klaver	rogge-erwt	rogge	geen	gras-klaver	rogge-erwt	rogge	geen	gras-klaver	rogge-erwt	rogge	Meer graszaad	Meer luzerne	Meer hennep	0-5	6-10	>10	
Organische stof	C-ele																	+ +	+ +
	OS-gloei																	+ +	+ +
	OS - N																	+ +	+ +
	HWC																	+ +	+ +
Fysisch	Klei														-				
	Indr Max													+ +					+ +
	Indr gem													+ +		+ +	+ +	+ +	+ +
	bd															+ +	+ +		+ +
	WVV												+						+ +
	% Scherpb																		
	Beworteling																		+ +
Chemisch	pH-$CaCl_2$					- -									- -				
	N-tot N																	+ +	+ +
	N-tot K																	+ +	+ +
	N-min	- -								- -			+ +						+ +
	P-PAE																		+ +
	Pw																		+ +
	PAL																		+ +
	K-PAE													- -	+ +		- -		
	K-voor N																		
Biologisch	PMN N					+ +									+			+ +	+ +
	Microb biom																	+ +	+ +
	Bact biom																	+ +	+ +
	Schim biom																	+ +	+ +

* Effect ten opzichte van ploegen zonder groenbemester. ** Significante verschillen tussen permanent grasland en continu maisland overgenomen, omdat met name maisland en tijdelijk grasland wordt omgezet naar permanent grasland.

1 Inleiding

Als onderdeel van het Klimaatakkoord uit 2018 heeft de landbouwsector zich gecommitteerd aan klimaatdoelstellingen. Een onderdeel daarvan is het doel om 0,5 Mton CO_2-equivalenten extra per jaar vast te leggen in minerale landbouwbodems, met ingang van 2030. Deze doelstelling is ook één van de twee pijlers van het Nationaal Programma Landbouwbodems (NPL). De tweede pijler is dat alle landbouwbodems (1.8 miljoen hectare) in 2030 duurzaam worden beheerd.

Om de klimaatdoelstelling van de landbouw te realiseren wordt er binnen het programma Slim Landgebruik (SL) onderzoek gedaan naar landbouwkundige maatregelen die koolstofvastlegging in de bodem effectief kunnen bevorderen. Deze maatregelen hebben naar verwachting ook effecten op de bodemkwaliteit. De vraag is in hoeverre deze koolstof vastleggende maatregelen bijdragen aan duurzaam bodembeheer, aansluitend bij de beleidsdoelstelling uit het NPL om alle landbouwbodems duurzaam te beheren in 2030. Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn binnen SL koolstofbepalingen in lange termijn experimenten (LTE's) gecombineerd met metingen aan indicatoren voor bodemkwaliteit. Deze Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN) zijn beschreven in Hanegraaf et al. (2019). In 2021 is de eerste versie van het BLN geëvalueerd, en is er een BLN 1.1 verschenen, met aansluitend ook een ontwikkelpad naar een volgende versie, de BLN 2.0 (de Haan et al., 2021a; de Haan et al., 2021b). De metingen binnen dit onderzoek zijn uitgevoerd vanaf 2019 en sluiten daarom aan bij de kernset zoals beschreven door Hanegraaf (2019).

Binnen Slim Landgebruik is in 2019 middels lange termijn experimenten (LTE's) gekeken naar het effect van verschillende maatregelen op koolstofvastlegging (Koopmans et al., 2020) en het effect op de bodemkwaliteit (Hoogmoed et al., 2021) (deel 1). De focus lag op de volgende maatregelen: niet-kerende grondbewerking, verbeteren gewasrotaties, compost toevoegen, dierlijke mest toevoegen en leeftijd grasland verhogen. In 2020 is het effect van aanvullende klimaatmaatregelen op koolstofvastlegging (Koopmans et al., 2021) en bodemkwaliteit (Schepens et al., 2022b) (deel 2) onderzocht; naast de maatregel compost toevoegen en leeftijd grasland verhogen, werd aanvullend gekeken naar inzet van groenbemesters, meerjarige akkerranden, wisselteelt mais-gras(klaver) en kruidenrijk grasland.

In voorliggend rapport worden nieuwe resultaten gepresenteerd van de klimaatmaatregelen bemonsterd in het najaar van 2022 (deel 4). De volgende maatregelen zijn onderzocht en opgenomen in deze rapportage: groenbemesters, gereduceerde grondbewerking, hoger aandeel graszaad, hennep of luzerne in de gewasrotatie, leeftijd grasland en gras-mais wisselteelt. Wanneer mogelijk is er een onderscheid gemaakt tussen zand- en kleigronden op basis van de Bodemkaart van de Basisregistratie Ondergrond. Er is onderzoek gedaan naar de neveneffecten van klimaatmaatregelen op de bodemkwaliteit, ook wel bekend als "meekoppel-effecten". De meekoppel-effecten zijn beoordeeld aan de hand van kwantificering van BNL-indicatoren. Er is dus gekeken naar de meekoppel-effecten van koolstofvastleggende maatregelen, niet naar de relatie tussen het bodemorganisch koolstofgehalte en overige bodemkwaliteitsaspecten.

In het synthese-rapport van Vervuurt et al. (in voorbereiding) worden de resultaten van de bevindingen van de drie afzonderlijke verslagen (Hoogmoed et al., 2021; Schepens et al., 2022; en het huidige rapport) met betrekking tot de impact van klimaatmaatregelen op de BLN-indicatoren samengebracht. Binnen deze analyse wordt een evaluatiesysteem toegepast om vast te stellen welke maatregelen bijdragen aan een duurzaam bodembeheer.

1.1 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om de effecten van koolstofvastleggende maatregelen op bodemkwaliteitsindicatoren (meekoppel-effecten) inzichtelijk te maken. Dit biedt een inzicht in hoe maatregelen bijdragen aan verschillende “andere” bodemfuncties dan koolstofvastlegging (klimaatmitigatie).

1.2 Leeswijzer

- Hoofdstuk 2 behandelt de werkwijze en definities.
- Hoofdstuk 3behandelt de resultaten en discussie van iedere maatregel afzonderlijk.
- Hoofdstuk 4 geeft de synthese van de resultaten en een korte eindconclusie.

2 Werkwijze

2.1 Algemeen

Voor de evaluatie van het effect van bodemmaatregelen op koolstofvastlegging en andere BLN-indicatoren zijn lange termijn experimenten (LTE's) uitgevoerd in Nederland, België en Duitsland. Hoewel deze LTE's vaak niet specifiek zijn opgezet om veranderingen in koolstof of bodemkwaliteit te meten, kunnen ze wel hiervoor worden gebruikt. Dit rapport evalueert de bodemkwaliteitseffecten in LTE's aan de hand van metingen uit 2022. Dit in aanvulling op de resultaten in eerdere jaren zoals beschreven in Hoogmoed et al. (2021) en Schepens et al. (2022b). De onderzochte maatregelen en locaties van de LTE's zijn weergegeven in Tabel 2. Het gaat hier dus om metingen in één jaar waarbij een behandeling wordt vergeleken met de controle, er zijn geen tijdreeksen beschikbaar.

Voor de verschillende koolstofmaatregelen werd een LTE geselecteerd waarbij gedurende minimaal zeven jaar de maatregel vergeleken werd met een referentie behandeling. Indien er geen wetenschappelijk lange-termijn experiment voorhanden was voor een specifieke maatregel, maar er wel een potentiële bijdrage aan de koolstofvastlegging verwacht kon worden vanuit literatuuronderzoek en modelberekeningen (Lesschen et al., 2012; Lesschen et al., 2021), werd uitgeweken naar praktijkpercelen.

Tabel 2: Maatregelen en de locaties van de lange termijn experimenten of bedrijfspercelen, geanalyseerd in 2022. Voor een aantal maatregelen met praktijkpercelen is sprake van een opbouwende dataset, waarbij data is verzameld tussen 2019 en 2022. Een uitgebreide beschrijving van de locaties van de lange termijn experimenten of bedrijfspercelen staat in sectie 3.2.

Maatregel	Jaar	Klei	Zand
Akkerbouw			
Grondbewerking en groenbemesters	2022	*Lelystad*	
Aandeel graszaad in de rotatie	2022	*Zeeland*	
Aandeel luzerne in de rotatie	2022	*Flevoland*	
Aandeel hennep in de rotatie	2022	*Groningen*	
Veehouderij			
Leeftijd grasland	2019-2022		*Noord-Brabant*
Gras-mais wisselteelt	2019-2022		

2.2 Beschrijving LTE's en selectie bedrijfspercelen

2.2.1 Grondbewerking en groenbemesters

Deze proef is uitgevoerd op kleigrond op het proefbedrijf van Livestock Research in Lelystad. De proef is aangelegd in 2014 in drie herhalingen (zie Riemens et al., 2017 voor meer details). Er zijn stroken aangelegd met drie verschillende methoden van de hoofdgrondbewerking:

- Ploegen in het voorjaar op 25 cm
- Woelen op 30 cm en het frezen van de toplaag (NKG)
- Directzaai in combinatie met woelen op 30 cm (geen oppervlakkige grondbewerking)

Hierbinnen zijn veldjes aangelegd met verschillende groenbemesters:

- Geen groenbemester (controle)
- Rogge gezaaid na oogst
- Rogge-wintererwt gezaaid na oogst

- Grasklaver onderzaai

De groenbemesters zijn blijven staan tot in het voorjaar.

2.2.2 Aandeel graszaad in de gewasrotatie

Om het effect van graszaad op koolstofvastlegging en de bodemkwaliteit vast te stellen, zijn er in Zeeland percelen geselecteerd met veel of weinig graszaad in de gewasrotatie. De bodemcodes variëren van Mn12A – Mn86 (alleen kalkrijke poldervaaggronden in zeeklei). In totaal zijn er 10 percelen met veel graszaad en 10 percelen met weinig graszaad bemonsterd (Schepens et al., 2024), de percelen zijn geselecteerd aan de hand van de volgende criteria:

- Veel graszaad:
    - minimaal 3 jaar graszaad in afgelopen 10 jaar
    - maximaal 2 jaar een ander rustgewas of gras in de afgelopen 10 jaar
    - Bij voorkeur graszaad in jaar van bemonstering
- Controle (weinig graszaad):
    - Geen graszaad in afgelopen 16 jaar, zo niet maximaal 2 jaar een rust gewas of gras in de afgelopen 10 jaar

Op de percelen met veel graszaad in de gewasrotatie is er gemiddeld gezien 6 keer graszaad geteeld van 2009 tot 2022. Bij drie van de tien percelen werd graszaad geteeld in het jaar van bemonstering. Voor de percelen met weinig graszaad in de gewasrotatie is er op één perceel één enkele keer graszaad geteeld in 2009.

2.2.3 Aandeel luzerne in de gewasrotatie

Om het effect van luzerne in de gewasrotatie op koolstofvastlegging en de bodemkwaliteit vast te stellen, zijn er in Flevoland percelen geselecteerd met veel of weinig luzerne in de gewasrotatie. Er zijn percelen geselecteerd met bodemcodes Mn12A-Mn35A. In totaal zijn er 10 percelen met veel luzerne in de gewasrotatie en 10 percelen met weinig luzerne in de gewasrotatie geselecteerd (Schepens et al., 2024), de percelen zijn geselecteerd aan de hand van de volgende criteria:

- Veel luzerne:
    - Minimaal 3 keer luzerne in de afgelopen 10 jaar
    - Maximaal 1 jaar een ander rustgewas of gras in de afgelopen 10 jaar
    - Bij voorkeur luzerne in het jaar van bemonstering
- Controle (weinig luzerne):
    - Geen luzerne in de afgelopen 10 jaar
    - Maximaal 1 jaar een ander rustgewas of gras in de afgelopen 10 jaar

Op de percelen met veel luzerne is er in de afgelopen 10 jaar gemiddeld 4 jaar luzerne geteeld. Bij 5 van de 10 percelen stond er luzerne in het jaar van bemonsteren.

2.2.4 Aandeel hennep in de gewasrotatie

Voor het onderzoeken van het aandeel hennep in het bouwplan zijn in provincie Groningen percelen bemonsterd met veel hennep en weinig hennep in de gewasrotatie. Er zijn percelen geselecteerd en bemonsterd met de bodemcode Hn21 (veldpodzolgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand). Er zijn 10 percelen bemonsterd met veel hennep in de rotatie en 10 percelen met weinig hennep in de rotatie (Schepens et al., 2024), de percelen zijn geselecteerd aan de hand van de volgende criteria:

- Veel hennep:
    - Minimaal 4 keer hennep in de afgelopen 10 jaar
    - Geen andere rustgewassen of gras in de afgelopen 10 jaar

- Controle (weinig hennep):
    - Geen hennep in de afgelopen 10 jaar
    - Maximaal 2 keer een ander rustgewas of gras in de afgelopen 10 jaar

Op de percelen met veel hennep in de rotatie is er in de afgelopen 10 jaar gemiddeld 4 jaar hennep geteeld. Bij geen van de 10 percelen werd hennep geteeld in het jaar van de bemonstering. Er werd een trend aangetoond tussen het kleigehalte en de behandelingen met de huidige data. Hierbij was het kleigehalte lager bij gewasrotaties met veel hennep ten opzichte van gewasrotaties met weinig hennep. Aangezien het geen significant verschil was, is dit niet meegenomen as co-variabele in de statistische analyse.

2.2.5 Leeftijd grasland

Voor de maatregel 'leeftijd grasland verhogen' op zand wordt gekeken naar omzetting van bouwland naar grasland. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen bouwland, jong grasland (1-5 jaar), ouder grasland (6-10 jaar) en oud grasland (>10 jaar). Bij de categorieën bouwland, jong grasland en ouder grasland zijn enkel percelen geselecteerd zonder langdurig graslandverleden. In 2022 zijn enkel bemonsteringen uitgevoerd op zandgronden in Noord-Brabant, deze zijn toegevoegd aan de dataset van 2019-2021. In totaal zijn er 63 percelen op zandgrond bemonsterd en geanalyseerd.

2.2.6 Mais-gras wisselteelt

De maatregel mais-gras wisselteelt is onderzocht op percelen op zandgrond in Noord-Brabant in 2022. De percelen zijn geselecteerd in vier categorieën: mais na gras, permanent grasland, gras na mais en continue bouwland. Hierbij is erop gelet dat de percelen in de categorie gras na mais op het moment van bemonsteren niet langer dan 4 jaar grasland waren. Bij de categorie mais na gras gold dat er op het moment van bemonsteren maximaal 5 jaar mais heeft gestaan, met daarvoor overwegend grasland. Bij de continue maisteelt is er op het moment van bemonsteren minimaal 16 jaar geen grasland geweest, percelen met een aantal teelten zoals gerst zijn niet uitgesloten. De percelen bij continu grasland zijn op het moment van meten minimaal 6 jaar grasland geweest. Voor meer informatie zie Schepens et al., 2024. In de periode 2019-2022 zijn er 91 percelen bemonsterd op zandpercelen in Noord-Brabant. Het wisselsysteem gaat uit van een verdeling van 60% permanent grasland, 20% tijdelijk grasland en 20% tijdelijk bouwland. Enkel op 40% van de grond wordt dus gewisseld tussen gras en mais, met een interval van drie jaar. Dit systeem is vergeleken met de huidige praktijk. Bedrijven waar op dat moment al meer dan 60% in gebruik is voor permanent grasland komen niet in aanmerking voor een wisselteelt systeem. Op basis van cijfers van RVO bleek bij de overige bedrijven het grondgebruik als volgt verdeeld was in Noord-Brabant: 25% was in gebruik als permanent grasland, 43% als tijdelijk grasland, 18% als tijdelijk bouwland en 13% als permanent bouwland (Hoogmoed et al., 2023).

2.3 Metingen aan koolstofvastlegging en BLN-indicatoren

De bemonsteringen zijn uitgevoerd in de 0-30 cm bodemlaag volgens de gestandaardiseerde protocollen binnen Slim Landgebruik zoals beschreven in Koopmans *et al.*, (2020). Voor de analyses is aangesloten bij de BLN bepalingen zoals beschreven in Hanegraaf et al., (2019). Op enkele punten is afgeweken van de BLN1.0 om kosten te beperken. Er is daarom gekozen om de aggregaatstabiliteit, (plantparasitaire) aaltjes en regenwormen niet te meten. Tabel 3 geeft een overzicht van de gemeten (BLN1.0) indicatoren, de desbetreffende analysemethode en afkortingen zoals gebruikt in de figuren in dit rapport. De analyses zijn uitgevoerd bij laboratoria van Eurofins Agro, Louis Bolk Instituut, Wageningen Environmental Research en de Bodemkundige Dienst van België (BDB). Voor de analyse van de meeste indicatoren is de traditionele chemische methode gebruikt. Vanuit kostenoptiek is in sommige gevallen een wat nieuwere methode gebruikt, namelijk NIRS. Een toelichting op de NIRS-methode

en de gemeten indicatoren is opgenomen in Bijlage 1. Voor de microbiële biomassa is deze methode niet geaccrediteerd, maar de PLFA-analyse wordt wel als referentiemethode gebruikt.

Tabel 3: Koolstof en BLN-indicatormetingen verricht binnen de studie welke aansluiten bij de metingen en protocollen van Koopmans et al. (2019) en Hanegraaf et al. (2019).

Categorie	Afkorting	Volledige naam	Analyse methode	Eenheid
Organische stof	C-ele	C-elementair	Dumas	%
	OS-gloei	Organisch stofgehalte	Gloeiverlies	%
	OS-N	Organisch stofgehalte	NIRS	%
	HWC	Hot water extractable carbon	Heetwater extractie	mg kg^{-1}
Fysisch	Klei	Kleifractie (Lutum, <2 µm),	NIRS	%
	Indr Max	Maximale indringingsweerstand	Penetrometer	MPa
	Indr gem	Gemiddelde indringingsweerstand	Penetrometer	MPa
	bd	Droge bulkdichtheid	Steekringmethode	kg m^{-3}
	WVV	Watervasthoudend vermogen	Berekend op basis van pF curve (pF 4,2 – pF 2)	%
	% Scherpb	Scherpblokkige structuurdelen	Visueel, bodemscan	%
	Beworteling	Hoeveelheid wortels	Visueel, bodemscan	index 0-2
Chemisch	pH-$CaCl_2$	Zuurgraad	$CaCl_2$ extractie	
	N-tot N	N-totaal	NIRS	mg N kg^{-1}
	N-tot K	N-totaal	Kjeldahl	mg N kg^{-1}
	N-min	N-mineraal in het najaar	$CaCl_2$ extractie	kg ha^{-1}
	P-PAE	P-beschikbaar	$CaCl_2$ extractie	mg P kg^{-1}
	Pw	P-beschikbaar	Water extractie	mg P_2O_5 L^{-1}
	PAL	P-voorraad	Ammoniumlactaat extractie	mg P_2O_5 $100g^{-1}$
	K-PAE	K-beschikbaar	$CaCl_2$ extractie	mg K kg^{-1}
	K-voor N	K-voorraad	NIRS	mmol K kg^{-1}
Biologisch	PMN N	Potentieel mineraliseerbare stikstof	NIRS	mg N kg^{-1}
	Microb biom	Microbiële biomassa	NIRS	mg C kg^{-1}
	Bact biom	Bacteriebiomassa	NIRS	mg C kg^{-1}
	Schim biom	Schimmelbiomassa	NIRS	mg C kg^{-1}

2.4 Statistiek

De statistiek in dit onderzoek is uitgevoerd met behulp van het programma Rstudio. Een sterretje (*) betekent een trend met P<0,10 en twee sterretjes (**) is een significant verschil met P<0,05. De proef met groenbemesters en NKG is aangelegd als een split-plot, hiervoor is gecorrigeerd in de statistische analyse. Er is een REML toegepast waarbij de herhaling als random effect is meegenomen. Bij de *residuals* van enkele indicatoren was er geen sprake van een normaalverdeling, hier is een logtransformatie toegepast. Bij enkele parameters was sprake van een interactie-effect, de resultaten zijn daarom per behandeling weergegeven. Bij de percelen met verschillende leeftijden grasland en mais-gras-wisselteelt was sprake van een ongebalanceerde dataset waarbij het kleigehalte een significant effect had. Het kleigehalte is daarom meegenomen als *fixed effect* en er is een ANCOVA toegepast.

3 Resultaten en discussie per maatregel

Dit hoofdstuk biedt een gedetailleerde bespreking van de resultaten die zijn verkregen voor elke afzonderlijke onderzochte maatregel.

3.1 Groenbemesters en grondbewerking

In een proef met mais in Lelystad is de inzet van groenbemesters bij verschillende grondbewerkingen onderzocht.

Resultaat

De resultaten worden weergegeven in Tabel 4. Er was een interactie-effect tussen de grondbewerkings- en groenbemesterbehandelingen voor de gemiddelde indringingsweerstand, het watervasthoudend vermogen, Nmin en de microbiële biomassa. De resultaten zijn daarom per behandeling weergegeven.

De volgende resultaten zijn gevonden:

- Er werd een significant effect gevonden op het koolstofgehalte van de bodem in de laag 0-30 cm. Met name de grondbewerking was hierop van invloed. Geen oppervlakkige grondbewerking ging gepaard met een hoger koolstofgehalte in de bodem dan bij ploegen. Dit werd vooral zichtbaar in combinatie met het telen van gras als groenbemester. Het niet inwerken van gras als groenbemester leidde tot een hoger koolstofgehalte dan het telen en onderploegen van rogge.
- Er werd een significant effect gevonden van de geteelde groenbemester op het bodem organisch stofgehalte, zowel bij de klassieke als alternatieve meetmethode. Uit de paarsgewijze vergelijking kwam echter geen significant verschil naar voren.
- Er werd een significant hogere HWC gevonden in de bodemlaag 0-30 cm zonder oppervlakkige grondbewerking in vergelijking met ploegen. Er kwam geen interactie met het wel of niet telen van een groenbemester naar voren.
- Er werd een significant hogere indringingsweerstand gevonden zonder oppervlakkige grondbewerking dan bij ploegen. Ook werd een interactie-effect gevonden. De combinatie van rogge zonder oppervlakkige grondbewerking leidde tot een hogere indringingsweerstand dan rogge of geen groenbemester bij ploegen.
- Het type grondbewerking en groenbemester of de combinatie daarvan had geen significant effect op de bulkdichtheid.
- Er was sprake van een significant interactie-effect op het watervasthoudend vermogen. De combinatie van grasklaver met ploegen ging gepaard met een hoger watervasthoudend vermogen dan rogge met ploegen en gras met NKG of zonder oppervlakkige grondbewerking.
- De beworteling is beoordeeld tijdens de maisteelt. Er werd een significant effect gevonden van de groenbemesters op de bewortelingsdiepte van de mais. De mais wortelde dieper na gras dan na andere groenbemesters of de controle.
- Er was een significant verschil in de pH tussen de behandelingen met gras en de controle.
- Wat betreft N-totaal werd er een significant verschil gevonden tussen de grondbewerkingen. De N-totaal was significant hoger bij geen oppervlakkige grondbewerking ten opzichte van ploegen. Bij de bepaling met NIRS leek er sprake van significante verschillen, deze waren echter niet relevant. Gras als groenbemester leidde tot een lagere Nmin bij ploegen en NKG dan rogge en rogge-erwt zonder oppervlakkige grondbewerking en de controle bij ploegen.

- Wat betreft fosfaat was het effect beperkt. Er leek sprake van verschillen in het Pw-getal tussen de grondbewerkingen. Het Pw-getal leek hoger bij de behandelingen zonder oppervlakkige grondbewerking, gevolgd door NKG en de laagste getallen werden gevonden bij ploegen. In de paarsgewijze vergelijking bleken deze verschillen toch niet significant.
- De kali-voorraad in de bodem was significant hoger bij geen oppervlakkige grondbewerking dan bij ploegen, voor de kali-beschikbaarheid gold dit niet. De beschikbaarheid van kali was wel significant hoger na grasklaver en rogge-erwt dan bij alleen rogge.
- De PMN was significant hoger na gras dan bij de controle. In de paarsgewijze vergelijking kwam geen significant effect naar voren tussen de grondbewerkingen.
- Wat betreft de bodembiologie werden enkele significante, maar niet eenduidige, verschillen gevonden tussen de behandelingen. De totale microbiële biomassa was hoger na gras dan na rogge. Zonder oppervlakkige grondbewerking ging rogge-erwt ook gepaard met meer microbiële biomassa dan bij rogge in combinatie met ploegen. Dit lag in lijn met de resultaten bij bacteriën. Bij gras werd significant meer bacteriële biomassa gevonden dan bij de controle en rogge, ook bij rogge-erwt werd significant meer biomassa gevonden dan bij de controle. Bij schimmels werden geen significante verschillen gevonden.

Discussie

Bij het object zonder oppervlakkige grondbewerking werd een significant hoger koolstofgehalte in de bodem gevonden dan bij ploegen en NKG, met name in de combinatie met grasklaver. Dat het hoogste koolstofgehalte werd gevonden in het object met grasklaver zonder oppervlakkige grondbewerking is niet opvallend. De grasklaver wordt onder de mais gezaaid, terwijl de overige groenbemesters na de oogst van de mais pas worden gezaaid. Het grasklaverobject heeft daarom een langere groeiduur dan de andere groenbemesters. Alle groenbemesters worden op hetzelfde moment vernietigd. Bij alle behandelingen met groenbemesters werden hoger koolstofgehalte gevonden zonder oppervlakkige grondbewerking ten opzichte van ploegen. Uit eerdere proeven blijkt dat het effect van gereduceerde grondbewerking op het bodemorganisch koolstofgehalte niet eenduidig is (e.g. Selin-Norén et al., 2022; Cooper et al., 2016; van Groenigen et al., 2011; Schouten et al., 2018; Hoek et al., 2019; Dekkers et al., 2023a; Vervuurt et al., 2024). In de Nederlandse context werd over het algemeen geen effect vastgesteld in de laag 0-30 cm (Selin-Norén et al., 2022; Dekkers et al., 2023a; Vervuurt et al., 2024). Een mogelijke reden waarom in deze proef wel effect werd gevonden is dat het, in tegenstelling tot andere studies, om en een vruchtwisseling met maaigewassen en zeer extensieve vorm van grondbewerking gaat, waardoor de verstoring in de bodem minimaal is. Het verschil tussen deze twee uiterste vormen van grondbewerking komen beter naar voren dan wanneer er tussendoor veel verstoring plaatsvindt door de teelt van rooivruchten. Ook de HWC was hoger bij het object zonder oppervlakkige grondbewerking ten opzichte van ploegen, dit is in lijn met de interpretatie van HWC als voorbode van de verandering van bodem organische stof (Bloem et al., 2017; Hoogmoed et al., 2021).

De geploegde veldjes gingen gepaard met een lagere indringingsweerstand dan de veldjes zonder oppervlakkige grondbewerking. Dit komt doordat de bodem van nature na verloop van tijd compacter wordt en in het systeem zonder oppervlakkige grondbewerking niet losgemaakt wordt (Dekkers et al., 2023). De gemiddelde indringingsweerstand was overigens bij alle objecten laag. Dat gereduceerde grondbewerking gepaard ging met een hogere indringingsweerstand werd ook in andere proeven vastgesteld (Crittenden, 2015; Dekkers et al., 2023a; Vervuurt et al., 2024). Het is daarom opvallend dat er geen effect werd vastgesteld van de grondbewerking op de bulkdichtheid. Dit komt mogelijk doordat de bulkdichtheid op een andere plek en op minder plekken wordt gemeten dan de indringingsweerstand. Het effect van groenbemesters op de

bodemstructuur hing samen met de grondbewerking. Binnen dezelfde grondbewerking had een groenbemester geen of nauwelijks effect op de bodemstructuur. Enkel grasklaver leidde, bij ploegen, tot een hoger watervasthoudend vermogen ten opzichte van de situatie zonder groenbemester. In een internationale meta-analyse van 98 studies werden in wisselende mate effecten van groenbemesters op bulkdichtheid (31%), indringingsweerstand (65%) en watervasthoudend vermogen (30%) gevonden (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Gewassen met een penwortel geven hierbij grotere effecten dan bijvoorbeeld rogge (Chen & Weil, 2010; Materechera et al., 1991), wat mogelijk verklaart waarom er in deze studie nauwelijks een effect werd gevonden. Daarnaast is het opvallend is dat Blanco-Canqui en Ruis (2020) noemen dat het effect van groenbemesters op het watervasthoudend vermogen beperkt is, maar toe zou nemen in situaties zonder grondbewerking. In deze studie werd dat niet gevonden, mogelijk doordat er in het systeem zonder oppervlakkige grondbewerking wel gewoeld werd en daarmee opgebouwde structuren weer teniet gedaan werden. Bovendien werd er in de Nederlandse context ook niet of nauwelijks een effect vastgesteld van groenbemesters op de bodemstructuur (Selin-Norén et al., 2022; van Geel et al., 2007; Vervuurt et al., 2024).

De veldjes zonder oppervlakkige grondbewerking hadden een hogere totale stikstofvoorraad dan de geploegde veldjes. Een hogere stikstofvoorraad bij gereduceerde grondbewerking wordt vaker vastgesteld (Dekkers et al., 2023a; Wesselink et al., 2023). Dit komt vermoedelijk doordat een meer intensieve grondbewerking organische resten verkleint en lucht in de bodem brengt, wat de afbraak van organische stof en mineralisatie van stikstof versnelt (Castro & Whalen, 2019). Een andere mogelijke verklaring is dat de opbrengst bij de veldjes zonder oppervlakkige grondbewerking de opbrengst sterk achterbleef, waardoor de afvoer lager was. Er werd een lagere Nmin gemeten in de veldjes met grasklaver ten opzichte van braak. De Nmin is bepaald toen de groenbemesters er nog stonden. De verwachting is dat de stikstof nog in de groenbemesters zit, wat gepaard gaat met een lagere Nmin. Bij rogge en rogge-erwt werd dit niet gevonden, mogelijk komt dit doordat de grasklaver eerder is gezaaid dan de rogge(-erwt) en daardoor een langere opnameperiode heeft gehad. Wat betreft de overige nutriënten werd significant meer beschikbare kali gemeten bij de groenbemesters ten opzichte van braak. Dit is opvallend, gezien vlinderbloemigen veel kali kunnen opnemen en er is bemonsterd terwijl de groenbemesters nog groeiden. Mogelijk is dit effect door de jaren opgebouwd, het is namelijk bekend dat groenbemesters de beschikbaarheid van kali kunnen verhogen (Hoogmoed et al., 2023).

Grasklaver als groenbemester ging gepaard met significant meer microbiële biomassa dan bij rogge als groenbemester. Ook was er sprake van een interactie-effect tussen de groenbemester en grondbewerking, het effect gold met name in combinatie zonder oppervlakkige grondbewerking. Mogelijk komt dit door de combinatie van een langere groeiduur van grasklaver dan rogge, het laten liggen van gewasresten op de bodem en het minder verstoren van de bodem. Bij bacteriën werd enkel een effect gevonden van de groenbemesters, gras als groenbemester leidde tot meer bacteriële biomassa in vergelijking met de controle, een vergelijkbaar effect werd gevonden voor de PMN. Dit is niet vreemd, aangezien PMN voor een deel uit microbiële biomassa bestaat (Bloem et al., 2017). Op de schimmel biomassa had zowel de groenbemesters als grondbewerkingen geen aantoonbaar effect. Dit is tegenstrijdig met resultaten uit eerdere studies met niet-kerende grondbewerking op een vergelijkbare grondsoort, waarin wel meer schimmel- en bacteriebiomassa werd gevonden bij niet-kerende grondbewerking (Hoek et al., 2019; Kurm et al., 2022; Hoogmoed et al., 2021). De combinatie met groenbemesters versterkte dit effect niet (Bloem et al., 2017). Dit kwam mogelijk doordat in die proef verschillende laat gezaaide en/of vorstgevoelige groenbemesters zijn opgenomen. Ook in onze proef werd zichtbaar dat juist een vroeggezaaide grasklaver als groenbemester een effect had op de schimmel- en bacteriebiomassa en dat dit effect bij bijvoorbeeld een laatgezaaide rogge beperkt was.

*Tabel 4: Effect van (de interactie tussen) drie grondbewerking- en vier groenbemesterstrategieën op verschillende bodemindicatoren gemeten in de laag 0-30 cm in 2022 op een proefveld te Lelystad. Een asterisk (*) geeft een trend met p<0,10 aan en ** geeft een significant verschil met p<0,05 aan.*

	Meting	Eenheid	Ploegen								Geen oppervlakkige grondbewerking								NKG								Sig.		
			geen		gras-klaver		rogge-erwt		rogge		geen		gras-klaver		rogge-erwt		rogge		geen		gras-klaver		rogge-erwt		rogge		Grond-bewerking	Groen-bemester	Interactie effect
Organische stof	C-ele	%	1,4	ab	1,5	1	1,4	ab	1,3	a	1,6	ab	1,7	b	1,7	ab	1,7	ab	1,6	ab	1,6	ab	1,7	ab	1,5	ab	**	*	
	OS-gloei	%	2,8		3,0		2,9		2,7		3,2		3,4		3,3		3,5		3,0		3,5		3,2		3,1		*	**	
	OS - N	%	2,5		2,8		2,7		2,5		2,6		3,2		3,0		2,9		3,0		3,2		3,1		2,7			**	
	HWC	mg kg^{-1}	592		582		587		588		724		747		870		769		637		661		712		765		**		
Fysisch	Klei	%	19		19		19		19		20		18		19		20		20		19		20		20				
	Indr Max	MPa	0,9	a	1,0	ab	1,3	ab	1,1	ab	1,2	ab	1,2	ab	1,2	ab	1,2	ab	1,6	b	1,4	ab	1,4	ab	1,3	ab	*		
	Indr gem	MPa	0,7	a	0,7	ab	0,8	ab	0,7	a	0,9	ab	0,9	ab	0,9	ab	1,0	b	0,9	ab	0,9	ab	0,9	ab	0,7	ab	**	*	**
	bd	kg m^{-3}	1,36		1,28		1,39		1,36		1,30		1,36		1,35		1,32		1,36		1,36		1,35		1,32				
	WVV	%	28	ab	31	b	24	ab	23	a	24	ab	23	a	29	ab	27	ab	28	ab	22	a	27	ab	26	ab			**
	% Scherpb	%	25		23		32		22		23		15		17		28		30		28		38		25				
	Be-worteling	index 0-2	0,7	a	1,7	ab	1,0	ab	0,7	a	1,0	ab	2,0	b	1,0	ab	0,7	ab	1,0	ab	1,3	ab	0,7	a	1,0	ab		**	
Chemisch	pH-$CaCl_2$		7,6	b	7,5	ab	7,5	ab	7,5	ab	7,5	ab	7,4	a	7,5	ab	7,5	ab	7,6	b	7,5	ab	7,5	ab	7,5	ab	*	**	
	N-tot N	mg N kg^{-1}	1307		1430		1283		1203		1440		1630		1560		1533		1503		1577		1563		1520		*	**	
	N-tot K	mg N kg^{-1}	1683		1537		1677		1537		1840		1957		1957		1987		1853		1893		1827		1750		**		
	N-min	kg ha^{-1}	13	b	6	a	8	ab	9	ab	9	ab	7	ab	13	b	13	b	9	ab	6	a	10	ab	12	ab		**	**
	P-PAE	mg P kg^{-1}	0,4		0,3		0,4		0,4		0,5		0,6		2,0		0,6		0,4		0,4		0,9		0,4				
	Pw	mg P_2O_5 L^{-1}	17	ab	16	ab	18	ab	15	a	20	ab	21	ab	29	b	20	ab	18	ab	18	ab	21	ab	17	ab	**	*	
	PAL	mg P_2O_5 $100g^{-1}$	24		24		27		22		33		32		34		32		28		28		29		26		*		
	K-PAE	mg K kg^{-1}	45	ab	48	ab	49	ab	45	ab	57	ab	65	ab	67	b	44	ab	45	ab	50	ab	49	ab	40	a	**	**	
	K-voor N	mmol+ K kg^{-1}	4		4		4		4		5		5		5		5		4		4		4		5		**		
Biologisch	PMN N	mg N kg^{-1}	20	a	25	ab	30	ab	21	a	24	a	42	b	28	ab	29	ab	26	ab	29	ab	30	ab	29	ab	**	**	*
	Microb biom	mg C kg^{-1}	242	ab	304	b	227	ab	196	a	270	ab	309	b	321	b	271	ab	291	ab	281	ab	293	ab	292	ab	*	**	**
	Bact biom	mg C kg^{-1}	89		107		103		84		92		134		123		100		99		119		123		110			**	
	Schim biom	mg C kg^{-1}	60		89		66		68		89		82		83		76		81		73		74		83				

3.2 Aandeel graszaad in de rotatie

Door middel van praktijkpercelen in Zeeland is het effect van het aandeel graszaad op bodemkwaliteitsindicatoren in het bouwplan onderzocht.

Resultaat

De resultaten worden weergegeven in Tabel 5. Bij een enkele indicator is er een significant verschil aangetoond tussen de behandelingen weinig en veel graszaad in de rotatie.

De volgende resultaten zijn aangetoond:

- Er werd een trend gevonden in het watervasthoudend vermogen van de bodem. De bodem van de percelen waar het aandeel graszaad in de rotatie hoger was, lijkt hierdoor een iets hoger watervasthoudend vermogen te hebben.
- Er werd een significant verschil gevonden in de hoeveelheid Nmin in de bodem. Een hoger aandeel graszaad in het bouwplan ging gepaard met een hogere Nmin in de bodem.
- Er zijn voor de andere indicatoren geen relevante verschillen aangetoond.

Discussie

Tussen de behandelingen met een hoog en laag aandeel graszaad in de rotatie is voor één indicator een significant verschil aangetoond. In de behandelingen met een hoog aandeel graszaad werd een hogere Nmin-concentratie gemeten dan in de behandelingen met een laag aandeel graszaad. Dit resultaat komt overeen met bevindingen uit de literatuur (Hoving & Velthof, 2006; van Dijk et al., 2021; Trippe et al., 2022). Het onderwerken van grasland, zoals ook gebeurt bij graszaadteelten, leidt tot mineralisatie van organische stof uit de ondergeploegde zode, waardoor aanzienlijke hoeveelheden minerale stikstof vrijkomen. Dit effect kan versterkt worden wanneer na een meerjarige graszaadteelt een gewas zoals aardappelen wordt geteeld (van Dijk & de Boer, 2024). Opvallend is echter dat dit effect slechts op één van de tien bemonsterde percelen werd waargenomen. Daarnaast zijn er binnen de percelen met een laag aandeel graszaad meerdere gewassen geteeld die bekend staan om een hoge resthoeveelheid minerale stikstof na de oogst. Zo werden op drie van de tien percelen aardappelen geteeld, op één perceel uien en op één perceel knolselderij in het jaar van bemonstering. Op basis van de literatuur zou verwacht mogen worden dat deze gewassen, met name op kleigronden, leiden tot verhoogde Nmin-gehalten in de bodem na de oogst. Deze gewassen kunnen namelijk ruwweg twee- tot driemaal hogere Nmin achterlaten in vergelijking met andere akkerbouwgewassen (van Enckevoort et al., 2002). Dit verwachte effect is echter niet teruggevonden in de resultaten. Het blijft onduidelijk waarom juist in de percelen met een hoog aandeel graszaad hogere Nmin-gehalten zijn gemeten dan in percelen met een laag aandeel graszaad.

Er zijn geen significante verschillen in andere parameters, naast Nmin, van de BLN aangetoond tussen de praktijkpercelen met veel graszaad in de rotatie en praktijkpercelen met weinig graszaad in de rotatie. Wat betreft de bodemstructuur is dit opvallend. De beworteling van gras biedt namelijk voedsel en leefruimte voor het bodemleven, waardoor een betere bodemstructuur en nutriëntenvoorziening worden gerealiseerd (Deru et al., 2010). Zelfs na het een- of tweejarig telen van gras, zoals bij graszaadteelt gebruikelijk is, kan dit effect optreden, aangezien graswortels na 14 maanden al een diepte van 80 cm kunnen bereiken en dus in korte tijd een intensief wortelstelsel kunnen opbouwen (Kutschera & Lichtenegger, 1982). Een mogelijke verklaring is dat het effect weer verdwijnt wanneer het gras wordt ondergewerkt, zoals bij 4 van de 10 percelen het geval was.

Ook op het gebied van de organische stof parameters is het gebrek aan een effect opvallend. Bij de controlepercelen werden voornamelijk gewassen geteeld die weinig organische stof nalaten, zoals aardappelen,

suikerbieten, uien en knolselderij (de aanvoer van effectieve organische stof bedraagt respectievelijk 450, 850, 300 en 1000 kg/ha; HBB, n.d.). De teelt van graszaad daarentegen laat veel organische stof na (1000 en 1200 kg effectieve organische stof bij respectievelijk het eerste en tweede jaar), met name wanneer het hooi wordt achtergelaten (respectievelijk 1900 en 2100 kg effectieve organische stof bij het eerste en tweede jaar; HBB, n.d.). Binnen 10 jaar zou er op basis van deze cijfers een significant verschil in het organische stof gehalte van de bodem kunnen optreden. Deze kwam echter niet tot uiting in de metingen, mogelijk door de grote variatie tussen de percelen.

*Tabel 5: Effect van weinig en veel graszaad in de gewasrotatie op verschillende bodemindicatoren gemeten in de laag 0-30 cm in 2022 in Zeeland. Een asterisk (*) geeft een trend met p<0,10 aan en ** geeft een significant verschil met p<0,05 aan.*

	Meting	Eenheid	Graszaad				Sig.
			Veel		Weinig		
			n=10		n=10		
Organische stof	C-ele	%	1,1	a	1,3	a	
	OS-gloei	%	2,0	a	2,2	a	
	OS - N	%	2,2	a	2,3	a	
	HWC	mg kg^{-1}	478	a	491	a	
Fysisch	Klei	%	15,9	a	12,3	a	
	Indr Max	MPa	2,2	a	2,4	a	
	Indr gem	MPa	1,2	a	1,2	a	
	bd	kg m^{-3}	1,57	a	1,59	a	
	WVV	%	0,24	a	0,22	a	*
	% Scherpb	%	6	a	11	a	
	Beworteling	index 0-2	1,9	a	1,5	a	
Chemisch	pH-$CaCl_2$		7,5	a	7,5	a	
	N-tot N	mg N kg^{-1}	1199	a	1198	a	
	N-tot K	mg N kg^{-1}	1298	a	1339	a	
	N-min	kg ha^{-1}	13	a	8	b	**
	P-PAE	mg P kg^{-1}	1,2	a	1,5	a	
	Pw	mg P_2O_5 L^{-1}	47	a	56	a	
	PAL	mg P_2O_5 $100g^{-1}$	69	a	79	a	
	K-PAE	mg K kg^{-1}	83	a	143	a	
	K-voor N	mmol+ K kg^{-1}	4,5	a	5,6	a	
Biologisch	PMN N	mg N kg^{-1}	33	a	39	a	
	Microb biom	mg C kg^{-1}	206	a	242	a	
	Bact biom	mg C kg^{-1}	91	a	94	a	
	Schim biom	mg C kg^{-1}	87	a	86	a	

3.3 Aandeel luzerne in de rotatie

Met praktijkpercelen in Flevoland is het effect van het aandeel luzerne in de gewasrotatie op verschillende bodemkwaliteitsindicatoren onderzocht.

Resultaat

De resultaten worden weergegeven in Tabel 6. Bij drie indicatoren is er een significant verschil aangetoond tussen percelen met veel of weinig luzerne in de gewasrotatie.

De volgende resultaten zijn aangetoond:

- Er is een significant verschil aangetoond in de maximale en gemiddelde indringingsweerstand tussen weinig en veel luzerne het bouwplan. In de behandelingen met veel luzerne in het bouwplan is er een hogere indringingsweerstand aangetoond ten opzichte van de behandelingen met weinig luzerne in het bouwplan.
- De hoeveelheid plant beschikbare kalium verschilde significant tussen de behandelingen. Hierbij is er meer kalium beschikbaar voor planten bij behandelingen met weinig luzerne in het bouwplan ten opzichte van veel luzerne in de rotatie.

Discussie

De luzerneplant beschikt over een penwortel die na enkele jaren tot drie meter diep in de bodem kan doordringen. Vanuit deze penwortel ontwikkelen zich zijwortels, waardoor bij een voldoende dichte beplanting een intensief bewortelingssysteem ontstaat (PR, 1999). Luzerne heeft daarmee de potentie om dieper en intensiever te wortelen dan gewassen binnen een conventionele gewasrotatie. Er zijn waarnemingen gedaan dat luzerne de potentie heeft om de beworteling van het volggewas, zoals maïs, te verbeteren op percelen waar diepe beworteling reeds mogelijk was (Van der Schans et al., 1998). Desondanks is er geen significant verschil aangetoond in de bewortelingsparameters tussen praktijkpercelen met een hoog en laag aandeel van luzerne in de gewasrotatie. Op basis van de literatuur (Van der Schans et al., 1998) zou bovendien worden verwacht dat de gemiddelde en maximale indringingsweerstand lager is op percelen met veel luzerne in de rotatie. Dit zou komen door de verbetering van de bodemstructuur en ontsluiting van het bodemprofiel. In tegenstelling tot deze verwachting is echter een significant hogere gemiddelde en maximale indringingsweerstand waargenomen op percelen met veel luzerne in de gewasrotatie ten opzichte van percelen met weinig luzerne. Deze verschillen worden mogelijk verklaard doordat er minder geploegd wordt in rotaties met een groter aandeel van een meerjarig gewas als luzerne. Hierdoor verdicht de bodem, wat nog versterkt kan worden door het meermaals maaien en oogsten per jaar met een zware machine.

Vlinderbloemigen, zoals luzerne, hebben een hoge behoefte aan voedingselementen zoals kalium en nemen deze relatief snel op (Abts et al., 2016). De meeste praktijkpercelen met veel luzerne in de gewasrotatie hadden zowel in het jaar voorafgaand aan de bemonstering als tijdens de bemonstering luzerne staan. Dit kan verklaren waarom op deze percelen significant minder plant beschikbaar kalium in de bodem is aangetoond ten opzichte van de praktijkpercelen met weinig luzerne in de gewasrotatie.

Tijdens de teelt van luzerne vindt opbouw van organische stof plaats. In het eerste teeltjaar bedraagt deze opbouw circa 1.350 kg organische stof per hectare. In het tweede en derde teeltjaar neemt dit toe tot ongeveer 2.050 kg organische stof per hectare per jaar (Leendertse et al., 2020). Aangezien luzerne een meerjarig gewas is, zorgt het voor extensivering van de gewasrotatie. Voor de onderzochte praktijkpercelen geldt vooral dat er minder aardappelen, uien en bieten worden geteeld. De effectieve organische stof aanvoer voor deze gewassen

is 650 kg/ha voor pootaardappel (CBAV, z.d.), 375 kg/ha voor suikerbieten zonder loof achterlaten, met loof achterlaten is dit 900 kg/ha (Ruijter et al., 2009) en voor uien is dit 300 kg/ha. Er wordt verwacht om een verschil in organische stof te zien in de bodem na het telen van luzerne. Het uitblijven hiervan is waarschijnlijk te verklaren door de korte duur van het toepassen van de maatregel

*Tabel 6: Effect van weinig en veel luzerne in de gewasrotatie op verschillende bodemindicatoren gemeten in de laag 0-30 cm in 2022 in Flevoland. Een asterisk (*) geeft een trend met p<0,10 aan en ** geeft een significant verschil met p<0,05 aan.*

	Meting	Eenheid	Luzerne				Sig.
			Veel		Weinig		
			n=10		n=11		
Organische stof	C-ele	%	2,0	a	1,9	a	
	OS-gloei	%	3,49	a	3,3	a	
	OS - N	%	3,20	a	3,2	a	
	HWC	mg kg^{-1}	497	a	460	a	
Fysisch	Klei	%	17,7	a	20,6	a	
	Indr Max	MPa	2,6	a	1,6	b	**
	Indr gem	MPa	1,7	a	1,1	b	**
	bd	kg m^{-3}	1,49	a	1,43	a	
	WVV	%	21	a	20	a	
	% Scherpb	%	8	a	11	a	
	Beworteling	index 0-2	1,6	a	1,5	a	
Chemisch	pH-$CaCl_2$		7,4	a	7,6	a	
	N-tot N	mg N kg^{-1}	1434	a	1406	a	
	N-tot K	mg N kg^{-1}	1472	a	1492	a	
	N-min	kg ha^{-1}	23	a	19	a	
	P-PAE	mg P kg^{-1}	1,3	a	1,0	a	
	Pw	mg P_2O_5 L^{-1}	30	a	27	a	
	PAL	mg P_2O_5 $100g^{-1}$	43	a	42	a	
	K-PAE	mg K kg^{-1}	56	a	103	b	**
	K-voor N	mmol+ K kg^{-1}	4,2	a	5,3	a	
Biologisch	PMN N	mg N kg^{-1}	35	a	30	a	
	Microb biom	mg C kg^{-1}	264	a	249	a	
	Bact biom	mg C kg^{-1}	102	a	100	a	
	Schim biom	mg C kg^{-1}	90	a	86	a	

3.4 Aandeel hennep in de rotatie

Door middel van praktijkpercelen in de provincie Groningen is het effect van het aandeel hennep in de gewasrotatie op verschillende bodemkwaliteit parameters onderzocht.

Resultaat

De resultaten worden weergegeven in Tabel 7. Bij twee indicatoren is er een significant verschil aangetoond tussen percelen met veel en weinig hennep in de gewasrotatie. Daarnaast is er bij twee indicatoren een trend aangetoond.

De volgende resultaten zijn aangetoond:

- Er is een significant verschil in de pH ($CaCl_2$) waardes tussen behandelingen met veel en weinig hennep. Hierbij is er een hogere pH aangetoond in de behandelingen met weinig hennep dan bij veel hennep in de gewasrotatie.
- De hoeveelheid plant beschikbare kalium is significant hoger in de behandelingen met veel hennep dan bij weinig hennep.
- Het kleigehalte vertoont een trend tussen de behandelingen. Hierbij is het kleigehalte lager bij bouwplannen met veel hennep ten opzichte van bouwplannen met weinig hennep.
- Er is een trend in de potentieel mineraliseerbare stikstof (PMN) tussen de behandelingen, waarbij de behandelingen met veel hennep een hogere hoeveelheid PMN hebben dan de behandelingen met weinig hennep.

Discussie

Voor optimale groei van hennep is een bodem-pH tussen 6 en 7,5 gewenst (Van den Oever et al., 2023; Amaducci et al., 2015). Over het algemeen verzuren planten de bodem in de rhizosfeer. Dit effect is het sterkst bij een initiële bodem-pH tussen 6,5 en 7,5 en resulteert doorgaans in een verandering van circa 1–3% (Tang et al., 2025). Aangezien dit effect zich uitsluitend in de rhizosfeer voordoet en niet in het volledige bodemmonster, en gezien het aangetoonde verschil van 0,9 pH-eenheid, is het aannemelijk dat het waargenomen verschil reeds vooraf aanwezig was tussen de praktijkpercelen. Het verschil in pH is daarom waarschijnlijk niet toe te schrijven aan de teelt van hennep. Daarnaast is in eerder onderzoek onder gecontroleerde omstandigheden aangetoond dat opname van hennep in de gewasrotatie geen significant effect heeft op de bodem-pH (Tang et al., 2022).

In eerder wetenschappelijk onderzoek (Jesmin et al., 2025) is na twee jaar hennepteelt een significante toename van het organische-stofgehalte en een afname van bodem NO_3^--N (nitraat) vastgesteld. De toename in organische stof is in het huidige onderzoek echter niet aangetoond. De afname in nitraat kan worden verklaard door het feit dat hennep efficiënt is in het opnemen van nitraat (Yang et al., 2021). Hennep lijkt minder specifiek te reageren op kaliumbeschikbaarheid. In het huidige onderzoek is er een significant verschil gevonden in plant beschikbare kalium, waar dat eigenlijk is te verwachten in de stikstof parameters o.b.v. voorgenoemd onderzoek. Daarom is het aannemelijk dat naast pH, ook voor de hoeveelheid plant beschikbare kalium verschillen bestonden tussen de praktijkpercelen. Er is tot op heden te weinig bekend over de invloed van hennep op de parameters van de BLN.

Het uitblijven van significante verschillen kan mogelijk tevens worden verklaard door suboptimale groeiomstandigheden op de praktijkpercelen met veel hennep. De penwortel van hennep kan theoretisch tot 2 meter diep wortelen (Amaducci et al., 2008), maar deze bewortelingsdiepte wordt in de praktijk zelden bereikt. In een experiment in Kentucky werd bijvoorbeeld een gemiddelde bewortelingsdiepte van 13,5–16,7 cm

vastgesteld (McGrail et al., 2025). In het huidige onderzoek zijn echter geen significante verschillen aangetoond in zowel de bewortelingsparameters als de parameters voor indringingsweerstand. Dit onderstreept de noodzaak van aanvullend praktijkonderzoek naar de effecten van hennepteelt op BLN-parameters.

*Tabel 7: Effect van weinig en veel hennep in de gewasrotatie op verschillende bodemindicatoren gemeten in de laag 0-30 cm in 2022 in Groningen. Een asterisk (*) geeft een trend met p<0,10 aan en ** geeft een significant verschil met p<0,05 aan.*

	Meting	Eenheid	Hennep				Sig.
			Veel		Weinig		
			n=11		n=11		
Organische stof	C-ele	%	3,9	a	4,1	a	
	OS-gloei	%	8,0	a	6,3	a	
	OS – N	%	8,8	a	6,4	a	
	HWC	mg kg^{-1}	1310	a	1099	a	
Fysisch	Klei	%	2,2	a	6,90	a	*
	Indr Max	MPa	2,7	a	2,6	a	
	Indr gem	MPa	1,5	a	1,3	a	
	bd	kg m^{-3}	1,29	a	1,34	a	
	WVV	%	20	a	18	a	
	% Scherpb	%	14	a	8	a	
	Beworteling	index 0-2	1,5	a	1,8	a	
Chemisch	pH-$CaCl_2$		5,0	a	5,9	b	**
	N-tot N	mg N kg^{-1}	2534	a	1645	a	
	N-tot K	mg N kg^{-1}	2293	a	1686	a	
	N-min	kg ha^{-1}	23	a	25	a	
	P-PAE	mg P kg^{-1}	3,7	a	3,2	a	
	Pw	mg P_2O_5 L^{-1}	47	a	43	a	
	PAL	mg P_2O_5 $100g^{-1}$	42	a	41	a	
	K-PAE	mg K kg^{-1}	90	a	53	b	**
	K-voor N	mmol+ K kg^{-1}	2,5	a	2,1	a	
Biologisch	PMN N	mg N kg^{-1}	43	a	29	a	*
	Microb biom	mg C kg^{-1}	396	a	268	a	
	Bact biom	mg C kg^{-1}	155	a	101	a	
	Schim biom	mg C kg^{-1}	85	a	55	a	

3.5 Leeftijd grasland

Om het effect van het verlengen van de periode van grasland op de bodemkwaliteit te bepalen, zijn percelen met oud grasland (>10 jaar) vergeleken met middeloud grasland (6-10 jaar), jong grasland (1-5 jaar) en continu bouwland.

Resultaat

De meetresultaten worden weergegeven in Tabel 8. Bij het merendeel van de indicatoren werd een significant effect gevonden van de leeftijd van het grasland.

De volgende resultaten zijn gevonden:

- Er werd duidelijk zichtbaar dat het bodem organisch (kool)stof gehalte hoger was naarmate de leeftijd van het grasland toe neemt. Enkel het verschil tussen oud grasland en bouwland was significant. Bij de HWC gold dat er bij oud grasland een significant hogere waarde werd gevonden ten opzichte van alle andere categorieën.
- Wat betreft de bodemstructuur werd enkel een effect gevonden op de gemiddelde indringingsweerstand en de bulkdichtheid. De indringingsweerstand was aanzienlijk hoger bij grasland dan bij bouwland, tussen de verschillende categorieën grasland werd geen significant effect gevonden. Bij de bulkdichtheid werd enkel een significant lagere bulkdichtheid gevonden bij continu bouwland ten opzichte van jong en middeloud grasland.
- Het effect op de stikstofvoorraad is vergelijkbaar met het bodem organisch stof gehalte, er werd een significant grotere stikstofvoorraad gevonden in de bodem bij oud grasland dan bij jonger grasland en bouwland. Dit gold zowel voor de meting met NIRS als klassiek. Hoewel er ook een hogere Nmin werd gemeten bij oud grasland ten opzichte van jonger grasland, was dit verschil niet significant.
- De verschillen in de overige bodemnutriënten tussen de landgebruikscategorieën waren niet eenduidig. Zichtbaar is dat de beschikbaarheid van fosfaat afneemt van bouwland naar ouder grasland, al waren de verschillen tussen de categorieën niet significant. Dit gold in mindere mate ook bij de voorraad van fosfaat in de bodem, de fosfaattoestand bij oud grasland was significant lager dan bij jong grasland. De kalivoorraad verschilde niet significant tussen de landgebruikscategorieën, de beschikbaarheid van kali was significant lager bij middeloud grasland ten opzichte van jonger grasland en bouwland.
- Er werd significant meer bodemleven gevonden bij oud grasland ten opzichte van jonger grasland of bouwland. Bovendien gold dat er voor alle bodembiologische indicatoren hogere waarden werden gevonden bij jong en middeloud grasland dan bij bouwland, deze verschillen waren echter niet significant.

Discussie

Er werden opbouwende trends zichtbaar voor een aantal indicatoren met het verhogen van de leeftijd van grasland, zoals het bodem organisch (kool)stof gehalte en de bulkdichtheid. De verschillen tussen bouwland en jong grasland waren veelal niet significant. Uit deze data is het daarom niet met zekerheid te zeggen dat het omzetten van bouwland naar grasland al binnen 10 jaar effect heeft. Dit kwam ook uit de vorige data-analyse naar voren en het toevoegen van data verandert dit beeld dus niet (Hoogmoed et al., 2023). Ook Vertès et al. (2007) en van Eekeren et al. (2008) lieten zien dat het omzetten van bouwland naar grasland gepaard gaat met meer organische stof aanvoer, maar dat het meer dan vijf jaar kan duren totdat dit zichtbaar wordt in het bodem organisch (kool)stof gehalte. Naast het bodem organisch (kool)stof gehalte nam ook de stikstofbodemvoorraad toe. Dit werd ook in eerdere studies gevonden, en komt omdat C en N sterk gelinkt zijn (Vèrtes et al., 2007; van Eekeren et al., 2008). Uit verschillende studies komt naar voren dat de stikstofbodemvoorraad in de eerste tien

jaar lineair toeneemt met tussen de 20 en 180 kg N ha-1 jr-1 (Vèrtes et al., 2007; van Dijk et al., 2021). In onze resultaten was deze toename zelfs nog sterker (data niet weergegeven). Oud grasland ging ook gepaard met meer microbiële biomassa dan bouwland, zowel voor schimmels als bacteriën. Dit komt waarschijnlijk door de samenhang tussen bodem organisch (kool)stof en het bodemleven (van Eekeren et al., 2008; Hoogmoed et al., 2023), en mogelijk door een lagere intensiteit aan bodembewerkingen.

Er werd een hogere gemiddelde indringingsweerstand gevonden bij grasland dan bij bouwland. Een mogelijke verklaring is dat het bouwland vaker bewerkt wordt dan grasland. Met een grondbewerking wordt de bodem losgemaakt, wat vermoedelijk leidt tot een lagere indringingsweerstand (Vervuurt et al., 2024). Hoewel het aannemelijk is dat de hogere indringingsweerstand samenhangt met de manier van het bepalen van de indringingsweerstand met de penetrologger. Het is namelijk, vooral in het najaar, minder zwaar om een penetrologger in bouwland in de toplaag te duwen dan door een grasmat. Een hogere gemiddelde indringingsweerstand betekent in dit geval niet per se dat de bodems onder grasland meer verdicht waren. Uit de profielkuilbeoordelingen kwam een sterke variatie naar voren binnen de behandelingen. Bij grasland, net als bij continu bouwland, waren er zowel percelen met een rulle structuur en veel bodemleven als percelen met een compacte laag of ploegzool. Tussen de verschillende leeftijden grasland werd geen significant verschil gevonden. Ook de bulkdichtheid was lager bij bouwland dan bij grasland, de verschillen waren echter klein.

Naast stikstof werden er ook effecten zichtbaar voor fosfaat en kali. Hoewel alleen significant voor PAL, werd er bij (ouder) grasland een lagere fosfaattoestand en -beschikbaarheid gevonden dan bij bouwland. Dit komt vermoedelijk door de toe- en afvoer van fosfaat. Bij eenzelfde bodemtoestand is de fosfaatgebruiksruimte op bouwland hoger dan op grasland, terwijl er op grasland meer fosfaat wordt afgevoerd dan bij een akkerbouwrotatie (Ehlert et al., 2008; RVO, 2025; Vervuurt et al., 2023). De verwachting is dan dat de fosfaattoestand langzaam daalt (Ehlert et al., 2008; 2018). De kalibeschikbaarheid was bij middeloud grasland significant lager dan bij jong grasland of bouwland. Het is onduidelijk waardoor dit komt, maar houdt mogelijk verband met de CEC van de bodem of de lagere kalibemesting en -afvoer bij grasland in vergelijking tot bouwland.

*Tabel 8: Verschil in verschillende bodemindicatoren gemeten in de laag 0-30 cm tussen verschillende categorieën van leeftijd grasland op zandgronden. Data is verzameld in de periode 2019-2022. Een * geeft een trend met p<0,10 aan en ** geeft een significant verschil met p<0,05 aan.*

	Meting	Eenheid	Continu bouwland		Jong grasland (1-5 jaar)		Middel grasland (6-10 jaar)		Oud grasland (ouder dan 10 jaar)		Sig.
			n=18		n=19		n=10		n=16		
Organische stof	C-ele	%	1,5	a	1,6	ab	1,7	ab	1,9	b	**
	OS-gloei	%	2,8	a	3,1	ab	3,2	ab	3,6	b	**
	OS - N	%	2,9	a	3,2	ab	3,6	ab	3,7	b	**
	HWC	mg kg^{-1}	650	a	720	a	795	a	973	b	**
Fysisch	Klei	%	2,2		2,2		3,8		2,7		
	Indr Max	MPa	2,9		3,4		3,2		3,7		
	Indr gem	MPa	1,3	a	2,1	b	2,3	b	2,2	b	**
	bd	kg m^{-3}	1,4	a	1,5	b	1,5	b	1,4	ab	**
	WVV	%	21		19		23		20		
	% Scherpb	%	15		13		15		20		
	Beworteling	index 0-2	1,7		1,8		1,8		1,6		
Chemisch	pH-$CaCl_2$		5,5		5,3		5,6		5,2		*
	N-tot N	mg N kg^{-1}	1178	a	1270	a	1463	ab	1631	b	**
	N-tot K	mg N kg^{-1}	1126	a	1231	a	1394	ab	1603	b	**
	N-min	kg ha^{-1}	12		13		14		15		
	P-PAE	mg P kg^{-1}	4,2		4,7		1,7		2,9		
	Pw	mg P_2O_5 L^{-1}	67		72		37		47		*
	PAL	mg P_2O_5 $100g^{-1}$	72	ab	78	b	50	ab	52	a	**
	K-PAE	mg K kg^{-1}	72	b	71	b	31	a	67	ab	**
	K-voor N	mmol+ K kg^{-1}	2,2		2,3		2,5		2,2		
Biologisch	PMN N	mg N kg^{-1}	36	a	37	a	45	a	61	b	**
	Microb biom	mg C kg^{-1}	215	a	258	a	288	ab	362	b	**
	Bact biom	mg C kg^{-1}	85	a	100	a	115	ab	144	b	**
	Schim biom	mg C kg^{-1}	63	a	73	a	90	ab	116	b	**

3.6 Mais-gras wisselteelt

Deze maatregel is onderzocht op praktijkpercelen. Metingen in de periode 2019-2023 worden gerapporteerd in Hoogmoed et al. (2023). De aanvullende metingen verricht in 2022 zijn toegevoegd aan de bestaande dataset en geanalyseerd. Het aantal datapunten nam daarmee toe van 40 tot 91.

Resultaat

De resultaten worden weergegeven in Tabel 9. Bij de meeste indicatoren werd een significant verschil gevonden tussen de categorieën. De volgende resultaten werden gevonden:

- Wat betreft de bodemorganische stof indicatoren werden er significant hogere waarden gevonden bij *permanent grasland* dan bij *continu maisland*. De waarden gemeten bij *gras na mais* en *mais na gras* lagen hier tussenin en verschilden niet significant van de andere categorieën.
- Ook wat betreft de bodemstructuur verschilden *permanent grasland* en *continu maisland* van elkaar. Bij *permanent grasland* werd een significant hogere gemiddelde en maximale indringingsweerstand gevonden dan bij *continu maisland* en *gras na mais*. Ook bij de bulkdichtheid, het watervasthoudend vermogen en de beworteling gold dat er hogere waarden werden gevonden bij *permanent grasland* dan bij *continu maisland*, het verschil ten opzichte van *gras na mais* was voor deze indicatoren niet significant.
- De stikstofvoorraad was significant hoger bij *permanent grasland* dan bij *continu maisland*. Wat betreft fosfaat werd het tegenovergestelde gevonden. De fosfaatvoorraad en -beschikbaarheid was lager bij *permanent grasland* dan bij *continu maisland* en *gras na mais*. Op de kalivoorraad en -beschikbaarheid werden geen significante effecten vastgesteld.
- Bij de bodembiologie werden significant hogere waarden gevonden bij *permanent grasland* dan bij *continu maisland*, en in het geval van PMN ook bij *gras na mais* ten opzichte van *continu maisland*.

Discussie

De resultaten van de metingen van de periode 2019-2021 zijn uitvoerig beschreven in Vervuurt et al. (2024). Het toevoegen van datapunten leidde ertoe dat er bij meer indicatoren een significant effect op de indicatoren zichtbaar werd.

Er zat een duidelijke opbouw in de waarden van vrijwel alle indicatoren, waarbij in het geval van organische stof, de indringingsweerstand, de stikstofvoorraad en de bodembiologie de hoogste waarde werd gevonden voor *permanent grasland*, gevolgd door *mais na gras*, *gras na mais* en tot slot *continu maisland*. Dit zou betekenen dat de historie een grote invloed heeft op de meetwaarden. Een hoge N-voorraad opgebouwd onder grasland zou minder snel afnemen onder een aantal jaar mais dan er onder een aantal jaar gras wordt opgebouwd na langjarig maisland. Opvallend is echter dat het verschil tussen *gras na mais* en *mais na gras*, met uitzondering van de gemiddelde indringingsweerstand, niet significant was.

Volgens de theorie zou het hoogste organisch stof gehalte in de bodem worden gemeten bij *permanent grasland*, gevolgd door *gras na mais* en *mais na gras* (afhankelijk van het meetmoment) en tot slot door *permanent bouwland* (Schils et al., 2002). De verschillen in kool- en stikstof tussen *permanent grasland* en *continu maisland* lagen in lijn der verwachting. Van grasland is namelijk bekend dat de continue, jaarronde aanvoer van organisch materiaal uit gewasresten en wortels leidt tot meer organische (kool)stof en stikstof in de bodem (Hoogmoed et al., 2023). De verwachting is dat het organisch stof gehalte in de bodem bij het telen van gras na mais langzaam toeneemt en het organisch stof gehalte in de bodem dus hoger is bij *gras na mais* dan bij *permanent bouwland.* Dit effect werd echter niet gevonden. In lange termijn experimenten werd dit wel gevonden (van Eekeren et al., 2008; Jarvis et al., 2017). Daarnaast zagen van Eekeren et al. (2008) een significant hoger bodem organisch stof

gehalte en stikstofbodemvoorraad bij bouwland met graslandhistorie ten opzichte van continu maisland, een significant verschil werd in onze metingen niet gevonden. Van Eekeren et al. (2008) vonden overigens, in lijn met onze resultaten, geen significant verschil tussen *gras na mais* en *mais na gras*. Dit komt waarschijnlijk doordat opbouw en afbraak met elkaar wordt afgewisseld waarbij het moment van bemonsteren een belangrijke rol speelt en de meetfout die gepaard gaat met het bepalen van koolstof het aantonen van verschillen lastig maakt (van Dijk et al., 2021).

Er werd een compactere bodemstructuur gevonden bij *permanent grasland* ten opzichte van *continu maisland*. Dit effect wordt toegeschreven aan minder bodembewerkingen die de grond losmaken in grasland dan in bouwland (Vervuurt et al., 2024). Het tegenovergestelde werd echter gevonden in de literatuur, waarbij permanent grasland gepaard ging met een lagere bulkdichtheid dan continu bouwland (van Eekeren et al., 2008; Jarvis et al., 2017). Opvallend is dat van Eekeren et al. (2008) wel een hogere bulkdichtheid vonden bij tijdelijk grasland dan bij tijdelijk bouwland, terwijl er in onze metingen geen significant verschil werd gevonden tussen deze categorieën. Het vermoeden is dat de periode met tijdelijk gras door de afwisseling met bouwland te kort is om de functionele biodiversiteit (e.g. pendelaars) te herstellen om voldoende bodemstructuur op te bouwen (van Eekeren et al., 2008).

Wat betreft de bodembiologie werd met name een significant verschil gevonden tussen *permanent grasland* en *permanent maisland*, de verschillen met *gras na mais* en *mais na gras* waren niet significant. Ook van Eekeren et al. (2008) vonden een duidelijk verschil tussen permanent grasland en permanent maisland, waarbij met name de bacteriële biomassa samenhangt met de continue aanvoer van organische stof onder grasland.

Tot slot moet vermeld worden dat er is gemeten aan praktijkpercelen. Er zijn percelen geselecteerd die zo goed mogelijk binnen de categorieën vallen. Voor continu maisland en grasland was dat eenvoudig, voor de categorieën *mais na gras* en *gras na mais* gold dit niet omdat het strikt elke drie jaar afwisselen van mais met gras in de praktijk niet veel voorkomt. Binnen de selectiecriteria zijn bijvoorbeeld ook percelen meegenomen waarop de afgelopen drie jaar mais is geteeld, de vier jaar daarvoor gras en de vier jaar daarvoor mais en luzerne. De resultaten worden mogelijk beïnvloed doordat niet alle perioden van afwisseling even lang waren.

*Tabel 9: Effect van mais-gras wisselteelt op zuidelijk zand (bedrijven in Brabant), in de laag 0-30 cm, gemeten in de periode 2019-2022. Een * geeft een trend met p<0,10 aan en ** geeft een significant verschil met p<0,05 aan.*

	Meting	Eenheid	Continu maisland		Gras na mais		Mais na gras		Permanent grasland		Sig
			n=19		n=20		n=20		n=32		
Organische stof	C-ele	%	1,5	a	1,6	ab	1,7	ab	1,9	b	**
	OS-gloei	%	2,8	a	3,2	ab	3,1	ab	3,5	b	**
	OS - N	%	3,0	a	3,2	ab	3,4	ab	3,7	b	**
	HWC	mg kg^{-1}	655	a	750	a	782	ab	904	b	**
Fysisch	Klei	%	2,3		3,0		2,6		3,0		
	Indr Max	MPa	2,7	a	3,3	a	2,4	ab	3,6	b	**
	Indr gem	MPa	1,3	a	2,0	a	1,2	b	2,2	b	**
	bd	kg m^{-3}	1,4	a	1,5	ab	1,4	ab	1,4	b	**
	WVV	%	21	a	16	ab	19	b	21	b	**
	% Scherpb	%	15		13		13		17		
	Beworteling	index 0-2	2	a	2	ab	1	ab	2	b	**
Chemisch	pH-$CaCl_2$		6		5		5		5		*
	N-tot N	mg N kg^{-1}	1195	a	1336	ab	1419	ab	1565	b	**
	N-tot K	mg N kg^{-1}	1142	a	1293	a	1324	ab	1526	b	**
	N-min	kg ha^{-1}	12	a	13	a	18	a	15	a	**
	P-PAE	mg P kg^{-1}	4,0	a	5,1	ab	2,8	ab	2,3	b	**
	Pw	mg P_2O_5 L^{-1}	64	a	75	a	48	ab	43	b	**
	PAL	mg P_2O_5 $100g^{-1}$	70	a	78	a	55	ab	51	b	**
	K-PAE	mg K kg^{-1}	71		75		57		54		
	K-voor N	mmol+ K kg^{-1}	2,3		2,3		2,3		2,3		
Biologisch	PMN N	mg N kg^{-1}	36	a	40	a	45	ab	55	b	**
	Microb biom	mg C kg^{-1}	208	a	291	ab	288	ab	324	b	**
	Bact biom	mg C kg^{-1}	84	a	113	ab	113	ab	129	b	**
	Schim biom	mg C kg^{-1}	60	a	88	ab	85	ab	102	b	**

4 Conclusie

In deze studie is de BLN-indicatorset (1.0) gebruikt om veranderingen in de bodemkwaliteit als gevolg van koolstofvastleggende maatregelen te analyseren. Er zijn verschillende maatregelen in de akkerbouw en veehouderij onderzocht op verschillende locaties, met elk hun eigen opzet. In Tabel 10 worden de resultaten samengevat.

Uit de resultaten wordt zichtbaar dat met name het omzetten van bouwland naar (permanent) grasland, zoals bij de maatregelen leeftijd grasland en wisselteelt het geval is, aantoonbare effecten heeft op de bodemkwaliteit. Ten opzichte van bouwland gaat permanent grasland gepaard met een hoger bodem organisch (kool)stof gehalte, een compactere bodem, een hogere stikstofvoorraad in de bodem en meer bodembiologie.

Daarnaast leek de combinatie van gereduceerde grondbewerking en groenbemesters van invloed te zijn op de bodemkwaliteit. In vergelijking tot ploegen leidde geen oppervlakkige grondbewerking in combinatie met grasklaver als groenbemester tot een hoger koolstofgehalte in de bodem. Dit komt waarschijnlijk door het onderzaaien van grasklaver onder mais, waardoor het een lange groeiperiode had ten opzichte van andere groenbemesters. Een hogere aanvoer van koolstof in combinatie met minder verstoring leidde ook tot meer microbiële biomassa. Ook leidde gereduceerde grondbewerking tot een hogere indringingsweerstand, terwijl de combinatie van grasklaver als groenbemester met ploegen juist gepaard ging met een beter watervasthoudend vermogen. Gereduceerde grondbewerking ging ook gepaard met een hogere voorraad aan stikstof dan ploegen, wat waarschijnlijk komt doordat ploegen organische resten verkleint en zuurstof in de bodem brengt en daarmee mineralisatie stimuleert. Door het meten tijdens de groei- en opnameperiode, ging grasklaver als groenbemester gepaard met een lagere hoeveelheid minerale stikstof in de bodem.

Het aanpassen van de gewasrotatie (meer graszaad, luzerne of hennep) in de akkerbouw ging niet gepaard met een verhoging van het bodem organische koolstofgehalte, dit komt mogelijk doordat het verschil in gewasresten met andere akkerbouwgewassen niet groot genoeg is om binnen een aantal jaar een significant effect aan te tonen. Deze maatregelen waren overigens wel van invloed op andere aspecten van de bodemkwaliteit. Een hoger aandeel graszaad in de rotatie ging gepaard met een beter watervasthoudend vermogen van de bodem en meer minerale stikstof in de bodem. Een hoger aandeel luzerne in de rotatie ging gepaard met een hogere indringingsweerstand, dat komt mogelijk doordat het een meerjarige teelt is waarbij de bodem niet jaarlijks wordt losgemaakt. Bij een hoger aandeel hennep in de rotatie was dit niet het geval, mogelijk doordat hennep geen meerjarig gewas is en daardoor een andere bodembewerking behoeft. Meer luzerne leidde tot minder beschikbare kali in de bodem, terwijl hennep juist leidde tot een hogere hoeveelheid. Dit komt mogelijk door de hoge kalibehoefte van luzerne, voor hennep is het niet duidelijk wat leidde tot een hogere beschikbare hoeveelheid kalium. Het verschil bestond wellicht al tussen de praktijkpercelen wat los staat van de hennep aanwezigheid in de gewasrotatie. De verwachtingen wat betreft de effecten van een extensiever bouwplan op de bodemkwaliteit zijn groot, de resultaten van deze studie bevestigen dit beeld niet. Mogelijk komt dit doordat er gemeten is aan praktijkpercelen, door de grote variatie is het lastig significante effecten aan te tonen.

Elk van de getoetste maatregelen had een effect op aspecten van de bodemkwaliteit. De grootste effecten werden gevonden bij het omzetten van bouwland naar grasland, terwijl grote effecten bij de overige maatregelen beperkt waren tot de beschikbaarheid van kali, de indringingsweerstand en de stikstofdynamiek.

Tabel 10 Resultatenoverzicht per maatregel. In de tabel worden symbolen gebruikt om effecten aan te duiden: '+ +' geeft een significant positief effect aan (p<0,05), '+' een trendmatig positief effect (p<0,10), '- -' een significant negatief effect (p<0,05) en '-' een trendmatig negatief effect (p<0,10).

		Groenbemesters en grondbewerking*											Gewasrotatie			Leeftijd grasland			Wissel-teelt**
	Meting	Ploegen			Geen oppervlakkige grondbewerking				NKG										
		gras-klaver	rogge-erwt	rogge	geen	gras-klaver	rogge-erwt	rogge	geen	gras-klaver	rogge-erwt	rogge	Meer graszaad	Meer luzerne	Meer hennep	0-5	6-10	>10	
Organische stof	C-ele																	+ +	+ +
	OS-gloei																	+ +	+ +
	OS - N																	+ +	+ +
	HWC																	+ +	+ +
Fysisch	Klei														-				
	Indr Max													+ +					+ +
	Indr gem													+ +		+ +	+ +	+ +	+ +
	bd															+ +	+ +		+ +
	WVV												+						+ +
	% Scherpb																		
	Beworteling																		+ +
Chemisch	pH-$CaCl_2$					- -									- -				
	N-tot N																	+ +	+ +
	N-tot K																	+ +	+ +
	N-min	- -								- -			+ +						+ +
	P-PAE																		+ +
	Pw																		+ +
	PAL																		+ +
	K-PAE													- -	+ +		- -		
	K-voor N																		
Biologisch	PMN N					+ +									+			+ +	+ +
	Microb biom																	+ +	+ +
	Bact biom																	+ +	+ +
	Schim biom																	+ +	+ +

* Effect ten opzichte van ploegen zonder groenbemester. ** Significante verschillen tussen permanent grasland en continu maisland overgenomen, omdat met name maisland en tijdelijk grasland wordt omgezet naar permanent grasland.

Referenties

Abts, M., Anthonissen, A., Hubrecht, L., Rombouts, G., Ryckaert, I. (2016). Praktijkgids bemesting: Grasland en voedergewassen. Beschikbaar via: https://www.rundveeloket.be/sites/default/files/inline-files/Praktijkgids%20bemesting%20-%20Grasland%20en%20voedergewassen.pdf

Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. Industrial Crops and Products, 68, 2-16.

Amaducci, S., Zatta, A., Raffanini, M., & Venturi, G. (2008). Characterisation of hemp (Cannabis sativa L.) roots under different growing conditions. Plant and soil, 313(1), 227-235.

Blanco-Canqui, H. en Ruis, S.J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: a review. Soil science society of America Journal, 84, pp. 1527-1576. doi: 10.1002/saj2.20129

Borm, G. E. L., Wander, J. G. N., & Zwanepol, S. (1995). Teelt van graszaad. PAGV.

Boxem, Tj. (1999). Luzerne als voedergewas. Research institute for Cattle, Sheep and Horse Husbandry.

Castro, L.X.L. en Whalen, J.K. (2019). Nitrogen supply from green manure enhanced with increased tillage frequency: a note. Agronomy Journal, III(2), pp. 935-941. doi: 10.2134/agronj2017.08.0471

CBAV. (z.d.) Aanvoerbronnen effectieve organische stof. Geraadpleegd op 3 december 2025, van Aanvoerbronnen effectieve organische stof - Handboek bodem en bemesting

Chen, G. and Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. Plant and Soil, 331, 31–43. doi: 10.1007/s11104-009-0223-7

Cooper, J., Baranski, M., Stewart, G., Nobel-de Lange, M., Bàrberi, P., Fließbach, A., … Mäder, P. (2016). Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. Agronomy for Sustainable Development, 36(1). doi: 10.1007/s13593-016-0354-1

Crittenden, S. J., Poot, N., Heinen, M., van Balen, D. J. M., & Pulleman, M. M. (2015). Soil physicalquality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. Soil and Tillage Research,154, 136–144. doi: 10.1016/j.still.2015.06.018

De Ruijter, F. J., Brooijmans, P. W. A. M., Wilting, P., Huijbregts, A. W. M., Raap, J. F. M., & Corré, W. J. (2009). Afvoer en vergisting van bietenloof. Wageningen University & Research. https://edepot.wur.nl/5357

de Ruijter, F.J. en Huijsmans, J.F.M. (2019). A methodology for estimating the ammonia emissions from crop residues at a national scale. Atmospheric environment, 2, pp. 2590-1621.doi: 10.1016/j.aeaoa.2019.100028

de Wit, J., van Eekeren, N. en van der Burgt, G.J. (2006). Optimalisatie van stikstofbenutting na het scheuren van grasklaver. Bioveem, rapport 15. Beschikbaar via: https://www.louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/1875.pdf

Dekkers, M. S., Trip, M., van Balen, D., Huizinga, K., Haagsma, W., Sprangers, T., & Wesselink, M. (2023a). Effects of reduced tillage on (cash) crop yields, soil quality and other ecosystem services: results from 2009 till 2022 of the long term experiment BASIS, the Netherlands. Wageningen University & Research, No. WPR-OT-1033. doi: 10.18174/635821

Dekkers, M-F., Haagsma, W., van Geel, W., van den Berg, W., & de Haan, J. (2023b). Groenbemesters en groenbemestermengsels bij niet-kerende grondbewerking. Wageningen University & Research, No. WPR-OT 975. doi: 10.18174/583355

Deru, J., Eekeren, N. V., & Boer, H. D. (2010). Beworteling van grasland-een literatuurstudie: Nutriëntenopname in relatie tot bewortelingsdiepte en-intensiteit; factoren en potentiële maatregelen die de beworteling beïnvloeden.

Ehlert, P.A.I., van Middelkoop, J.C., van der Salm, C. en Dekker, P.H.M. (2008). Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op lange termijn: stand van zaken 2007. Alterra-rapport 1665. Beschikbaar via: https://edepot.wur.nl/42397

Ehlert, P.A.I., van Middelkoop, J.C., van Geel, W.C.A., de Haan, J.J. en Regelink, I. (2018). Veeljarige fosfaatveldproeven op gras- en bouwland: syntheserapport. Wageningen University & Research, nr. 2906. Beschikbaar via: https://edepot.wur.nl/460816

Hanegraaf, M.C, van den Elsen, H.G.M., de Haan, J.J. en Visser, S.M. (2019). Bodemkwaliteitsbeoordeling van landbouwgronden in Nederland – Indicatorset en systematiek, versie 1.0. Wageningen Research, Rapport WPR-795, 34 p. https://edepot.wur.nl/498307

Hoogmoed, M., Timmermans, B.G.H., Bloem, J., van Asperen, P., Cruijsen, J., De Haan, J., Selin Norén, I., Slier, T., Wagenaar, J.P., Elsen, A., Martens, S., Koopmans, C.J. (2021). Verschillen in bodemkwaliteit door koolstofmaatregelen; In beeld gebracht aan de hand van de BLNindicatorenset. Louis Bolk Instituut en Wageningen Research, 37

Hoving, I. E., & Velthof, G. L. (2006). Landbouw-en milieukundige effecten van graslandvernieuwing op zand-en kleigrond. Animal Sciences Group.

Inagro. (z.d.). Kaliumbemesting in aardappelen. Geraadpleegd op 30 december van https://inagro.be/teelt-en-dier/akkerbouw/aardappelen/bemesting-van-aardappelen/kaliumbemesting-aardappelen

Jarvis, N., Forkman, J., Koestel, J., Kätterer, T., Larsbo, M. en Taylor, A. (2017). Long-term effects of grass-clover leys on the structure of a silt loam soil in a cold climate. Agriculture, ecosystems & environment, 247, pp. 319-328. doi: 10.1016/j.agee.2017.06.042

Jesmin, T., Rabbany, A., Sharma, L., Griffin, W., Upadhyaya, Y. R., Singh, H., .. & Bhadha, J. H. (2025). Evaluating the effects of industrial hemp cultivation on soil quality in Florida. Agrosystems, Geosciences & Environment, 8(4), e70231.

Koopmans, C.J, Timmermans, B., de Haan, J., van Opheusden M., Selin Norén, I., Slier, T., Wagenaar, J.P. (2020). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023: voortgangsrapportage april 2020. Louis Bolk Instituut en Wageningen Research.

Koopmans (2021). Koopmans, C.J, Timmermans, B.G.H., Hoogmoed, M., Heupink, D., Cruijsen, J.J.P. Cruijsen, de Haan, J., Selin Norén, I., Slier, T., Wagenaar, J.P. (2020). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023: Voortgangsrapportage juni 2021. Louis Bolk Instituut en Wageningen Research, 48 p.

Kutschera, L., Lichtenegger, E., & Sobotik, M. (1982). Root atlas of central European grassland plants. Volume I. Monoctyledoneae.

Leendertse, P., Lageschaar, L., Hees, E., Well, E. V., & Rietberg, P. (2020). Bijdrage van vlas en hennep aan milieu-en klimaatdoelstellingen van het toekomstig EU-landbouwbeleid.

Lesschen, J. P., Heesmans, H. I. M., Mol-Dijkstra, J. P., van Doorn, A. M., Verkaik, E., van den Wyngaert, I. J. J., & Kuikman, P. J. (2012). Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur (No. 2396). Alterra.

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., & Rietra, R. (2021). De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw. (No3130). Wageningen Research.

Materechera, S. A., Dexter, A. R., & Alston, A. M. (1991). Penetration resistance of very strong soils by seedling roots of different plant-species. Plant and Soil, 135, 31–41. doi: 10.1007/BF00014776

McGrail, R. K., Nelson, J. A., Pearce, R. C., & McCulley, R. L. (2025). Hemp root system architecture and allometric relationships vary between monoecious and dioecious cultivars. Agrosystems, Geosciences & Environment, 8(2), e70123.

Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., ... & Verheyen, K. (2017). Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 247, 98-111.

Riemens et al. (2017): https://edepot.wur.nl/412083

Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland [RVO]. (2025). Fosfaatdifferentiatie. Beschikbaar via: https://www.rvo.nl/onderwerpen/mest/gebruiken-en-uitrijden/gebruiksnormen-gebruiksruimte/fosfaatdifferentiatie#bemonsteringsprotocol-fosfaattoestand-bepalen

Schepens, J.A.B., Timmermans, B.G.H., Herbert, Z.G.J., Hoogmoed, M., Fuchs, L.M., Heupink, D.T., Slier, T., Wagenaar, J.P. en Koopmans, C.J. (2022b). Effecten van koolstofvastleggende maatregelen op de (BLN)-bodemkwaliteit indicatoren - Deel 2. 34 pagina's

Schepens, J.A.B., Timmermans, B.G.H., Fuchs, L.M., Peters, R., Bloem, J., Heupink, D.T., Wagenaar, J.P., Slier, T. en Koopmans, C.J. (2022a). Meerjarige evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden: integrale analyse over de jaren 2018-2020. Louis Bolk Instituut, nr. 2022-016 LbP.

Schils, R.L.M., Aarts, H.F.M., Bussink, D.W., Conijn, J.G., Corré, W.J., van Dam, A.M., Hoving, I.E., van der Meer, H.G., Velthof, G.L. (2002). Grassland renovation in the Netherlands; agronomic, environmental and economic issues. In: Conijn, J.G., G.L. Velthof & F. Taube, 2002. Grassland resowing and grass-arable rotations. International workshop on Agricultural and Environmental issues, Wageningen, The Netherlands, 18 & 19 April 2002, Plant Research International report 47, EGF Working Group "Grassland resowing and grass-arable rotations" Report 1.

Selin Norén, I., Vervuurt, W., Bakker, N., Koopmans, C., Verstand, D., en de Haan, J. (2022). Analyse van bodemmaatregelen: effecten op bodemfuncties en toepasbaarheid: Integrale analyse van de resultaten uit de PPS Beter Bodembeheer. Wageningen University and Research, No. WPR-OT-898). doi: 10.18174/558794

Tang, L., Fan, C., Yuan, H., Wu, G., Sun, J., & Zhang, S. (2022). The effect of rotational cropping of industrial hemp (Cannabis sativa L.) on rhizosphere soil microbial communities. Agronomy, 12(10), 2293.

Tang, S., Han, T., Wang, B., Zhang, J., Zhu, J., Hassan, W., .. & Cai, A. (2025). Rhizosphere effect decreases soil pH in arid but not humid areas across global agricultural ecosystems. Farming System, 100171.

Trippe, K., Mateu, M. G., Moore, A., Anderson, N., & Verhoeven, E. (2022). Soil Carbon Storage in Willamette Valley Grass Seed Systems: A review. Authorea Preprints.

van den Oever, M., de Wagenaar, D., Hosper, G., & Reinders, M. (2023). Handboek vezelhennepteelt,-verwerking en-toepassingen. Wageningen Food & Biobased Research

Van der Schans, D. A., Zwanepol, S., Jukema, A., Boxem, T., & Nijssen, K. (1998). Teelt van luzerne: teelthandleiding nr. 84.

Van der Schoot, J. R., & Wander, J. (2021). Actualisatie N-bemestingsrichtlijnen graszaden (No. WPR-871). Wageningen UR.

van Dijk, W. en de Boer, H. (2024). Het effect van tijdstip en methode van vernietiging van gras op hergroei van gras en wortelonkruiden, gewasproductie en risico's van N-verliezen bij de teelt van het volggewas pootaardappelen: resultaten veldonderzoek 2020-2023. Wageningen Research, Rapport WPR-1337. Beschikbaar via: https://edepot.wur.nl/658394

van Dijk, W., van Eekeren, N., van Middelkoop, J., & Velthof, G. (2021). Stikstofdynamiek bij vruchtwisseling van grasland en bouwland. Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. Beschikbaar via: https://edepot.wur.nl/544471

van Eekeren, N., Bommelé, L., Bloem, J., Schouten, T., Rutgers, M., de Goede, R., Reheul, D. en Brussaard, L. (2008). Soil biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping. Applied soil ecology, 40(3), pp. 432-446. doi: 10.1016/j.apsoil.2008.06.010

van Enckevort, P. L. A., van der Schoot, J. R., & van den Berg, W. (2002). Relatie tussen N-overschot en N-uitspoeling: Op gewasniveau voor de akkerbouw en vollegrondsgroenteteelt.

van Groenigen, K. J., Hastings, A., Forristal, D., Roth, B., Jones, M. en Smith, P. (2011). Soil C storage as affected by tillage and straw management: An assessment using field measurements and model predictions. Agriculture, Ecosystems and Environment, 140(1–2), 218–225. doi: 10.1016/j.agee.2010.12.008

Vervuurt, W., Schepens, J.A.B., Ros, G.H., Hoogmoed, M. en Koopmans, C. (2024). Effecten van maatregelen voor koolstofvastlegging op de bodemkwaliteit: synthese van de resultaten van de jaren 2019, 2020 en 2021. Beschikbaar via: https://slimlandgebruik.nl/sites/default/files/2025-07/meekoppel_synthese_slimlandgebruik_2024_0.pdf

Vervuurt, W., van Geel, W.C.A., Regelink, I. en de Haan, J.J. (2023). Lange termijn effecten fosfaatbemesting op een bouwlandproef in Lelystad: meetresultaten van de periode 2005-2020. Wageningen University & Research, nr. WPR-OT 1000. Beschikbaar via: https://edepot.wur.nl/588813

Wesselink, M., van Gestel, S., Uyttendaele, S. A. L., Saarloos, A., Brinkman, E. P., Kurm, V., Sprangers, T., Visser, J. H. M., Verstegen, H. en de Haan, J. J. (2023). Effects of non-inversion tillage on ecosystem services on a sandy soil: Results of the period 2011-2021 of the long-term experiment Soil quality on sandy soil in Vredepeel, the Netherlands. Wageningen University & Research, No. WPR-OT-1040. doi: 10.18174/638690

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., .. & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. Geoderma, 333, 149-162.

Yang, Y., Zha, W., Tang, K., Deng, G., Du, G., & Liu, F. (2021). Effect of nitrogen supply on growth and nitrogen utilization in hemp (Cannabis sativa L.). Agronomy, 11(11), 2310.

Bijlagen 1: Toelichting op de gemeten (BLN) indicatoren

Methoden:

Voor de meeste indicatoren is de klassieke chemische analyse uitgevoerd. Voor een aantal indicatoren zijn zowel de klassiek chemische analyse als een nieuwe, in de praktijk vaak gebruikte, analysemethode gebruikt, namelijk NIRS (Near Infrared Spectroscopy). Bij NIRS wordt nabij infrarood licht gebruikt om een reflectiepatroon van een grondmonster te maken. Hieruit kan de samenstelling van het monster worden herleid, op basis van vergelijkingen in een grote database van andere reflectiepatronen. De NIRS-methode heeft als voordelen dat het snel en relatief goedkoop is, maar deze methode is nog niet voor alle indicatoren wetenschappelijk gevalideerd. O.a. de microbiologische indicatoren zijn nog zeer beperkt gevalideerd. Ter vergelijking zijn voor een aantal indicatoren zowel de klassieke als de NIRS-methode gebruikt.

Organische stof

Koolstof gehalte (C-ele)

Het koolstof gehalte bepaald met de C-elementair methode is de meest betrouwbare methode om het koolstofgehalte in de bodem te bepalen. De bodemorganische stof bestaat voor ongeveer 50% uit koolstof. Om de koolstof voorraad in de bodem vast te stellen is het C-gehalte belangrijk. Daarnaast moet de bulkdichtheid van de bodem bekend. C-elementair wordt gemeten volgens Dumas.

Organische stofgehalte

Organische stof speelt een centrale rol in de bodemkwaliteit. Het bepaald bodemeigenschappen rond nutriënten huishouden, water- en luchtbalans en structuur. Organische stof is voedsel voor bodemleven en daarmee de motor voor bodem biologische processen. Bepaling van het organisch stofgehalte verloopt via een klassieke methode met bepaling van het gleiverlies en de afgeleide nieuwe en goedkopere methode met NIRS.

Hot Water extractable Carbon (HWC)

Dit betreft de koolstof die oplost in heet water (80 °C). HWC is een maat voor gemakkelijk beschikbare organische stof en daarmee tevens een relatieve simpele indicator voor de activiteit van het bodemleven. HWC is een indicator die in een vroeg stadium veranderingen in organische stof kan weergeven.

Fysisch

Klei (textuur)

Klei is een bepalend bestanddeel van de minerale samenstelling van een bodem. De samenstelling wordt wel textuur genoemd. Deze wordt bepaald door de korrelgrootte verdeling van klei (lutum < 2 µm), silt (2-50 µm) en zand (50-2000 µm). De textuur bepaald vele fysische en chemische eigenschappen van de bodem en is daarmee van groot belang hoe processen in de bodem verlopen. De koolstofvastlegging en organische stof voorraad wordt voor een groot deel door de textuur (kleigehalte) van een bodem bepaald.

Indringingsweerstand

De indringingsweerstand is een indicatie van de weerstand die een wortel zou ondervinden bij groei in de bodem. Met de indringingsweerstand kan worden vastgesteld wat de gemiddelde weerstand van de bodem is en geeft daarmee ook inzicht in de doorlaatbaarheid (bijv. waterinfiltratie) en doordringbaarheid (bijv. bewortelbaarheid)

van de bodem. De maximale indringingsweerstand geeft aan of een ondoordringbare laag de beworteling naar dieper lagen belemmert.

Bulkdichtheid

De droge bulkdichtheid geeft de droge massa van de vaste fractie (gronddeeltjes en organische stof) weer per volume grond in een onverstoorde natuurlijke toestand. Deze indicator is essentieel om het C-gehalte van een bodem (%) om te rekenend naar de totale koolstof voorraad en daarmee vast te kunnen stellen of er sprake is van verandering in de totale koolstof voorraad.

Watervasthoudend vermogen

Het watervasthoudend vermogen van de bodem is een maat voor de hoeveelheid vocht dat de bodem kan vasthouden in de poriën van een bepaalde laag. Deze indicator geeft inzicht in de hoeveelheid vocht dat beschikbaar is voor een gewas. Watervasthoudend vermogen wordt berekend op basis van een pF bepaling in het laboratorium. Het verschil tussen pF2 (veldcapaciteit) en pF 4,2 (verwelkingspunt, overeenkomend met ca 160 cm afstand van het maaiveld tot het grondwater) is een maat voor het watervasthoudend vermogen.

Scherpblokkige structuurdelen

De bodemstructuur wordt visueel beoordeeld op basis van een gestandaardiseerd protocol (Koopmans et al., 2019) voor de visuele bodembeoordeling waarbij de aggregaat grootte verdeling en de vorm van de aggregaten (scherphoekig, afgerond, kruimel) worden ingeschat. Het % scherpblokkige structuurdelen is een maat voor de structuur van de bodem. Scherpblokkige structuurdelen zijn niet doorwortelbaar en organische stof en nutriënten zijn vrijwel niet toegankelijk voor gewasopname.

Beworteling

De beworteling van een gewas kan vastgesteld worden door de visuele bodembeoordeling. Bij een visuele bodemscan wordt o.a. de bewortelingsdiepte en bewortelingsintensiteit vastgesteld. Op basis van een vergelijking tussen de potentiële bewortelingsintensiteit en de waargenomen bewortelingsintensiteit wordt een indexwaarde toegekend, waarbij de waarde 0 staat voor lichte beworteling, 1 voor redelijke beworteling en 2 voor intensieve beworteling.

Chemisch

pH

pH geeft de zuurgraad van een bodem weer. Dat is de absolute waarde van de negatieve logaritme van de concentratie H+ ionen. De zuurgraad is van invloed op onder andere de beschikbaarheid van nutriënten in de bodem voor opname door een gewas. Daarnaast beïnvloedt de zuurgraad ook het bodemleven (o.a. activiteit), afbraak van organische stof en de structuur van de bodem. De pH-$CaCl_2$ is de pH gemeten in een $CaCl_2$ extract vergelijkbaar met de condities rond plantenwortels in een bodem.

Stikstof (N)

Stikstof is een essentieel nutriënt voor de plantengroei. N-totaal bestaat uit organische stikstof (in organische stof) en anorganische stikstof (N-mineraal: NH4-N en NO3-N) in de bodemoplossing. N-totaal is gemeten met de klassieke Kjeldahl methode en de nieuwe, goedkopere variant volgens NIRS. N-mineraal is bepaald in een $CaCl_2$ extract.

Fosfaat (P)

Fosfor is ook een essentieel nutriënt voor plantengroei. Bij bemestingsadviezen voor het bepalen van de fosfaatgift wordt rekening gehouden met de fosfaattoestand (fosfaatstatus) in de bouwvoor van de bodem en

de gewasbehoefte. Onderscheid is gemaakt in de plant beschikbare fosfaat ($CaCl_2$ extract of P-PAE) en de bodemvoorraad (P-AL).
Daarnaast is het wateroplosbare fosfaat bepaald (Pw).

Kalium (K)

Kalium is, net zoals fosfor en stikstof een essentieel nutriënt voor plantengroei. Er bestaan verschillende chemische extractiemethoden om de kaliumtoestand van de bodem te bepalen. Onderscheid is gemaakt in voor de plant beschikbare kalium ($CaCl_2$ extract: K-PAE) en de kalium bodemvoorraad volgens NIRS.

Biologisch

Potentieel mineraliseerbare N (PMN)

PMN is een maat voor gemakkelijk afbreekbare, mineraliseerbare stikstof. De PMN wijst op de bodemleven activiteit in de bodem. Een hoger organisch stofgehalte correleert met een hogere PMN. Meer PMN is een aanwijzing voor meer C- en N-mineralisatie en vaak ook voor een betere bodemstructuur. De PMN is gemeten volgens NIRS die correleert met een klassieke incubatietechniek.

Microbiële biomassa

Het microbiële bodemleven is bepalend voor de snelheid waarmee processen zich in de bodem kunnen voltrekken. Zo is de afbraak van organische stof afhankelijk van dit bodemleven. Er is nog veel onbekend over de exacte werking van het bodemleven en voedselweb. De microbiële biomassa volgens NIRS in een snelle en goedkope analyse voor een overall indicatie van het bodemleven.

Bacteriebiomassa

Bacteriën zijn belangrijke afbrekers van organische stof, en vormen de basis van het bodemvoedselweb. De hoeveelheid en activiteit van bacteriën wordt bevorderd door organische stof in de bodem. De bacteriële biomassa is volgens NIRS gemeten en correleert met de klassieke meting van bacterie-vetzuren in de bodem (PLFA's).

Schimmelbiomassa

Schimmels vormen samen met bacteriën de basis van het voedselweb. Schimmeldraden vormen netwerken rond organisch materiaal en gronddeeltjes en dragen zo bij aan een goede kruimelige structuur. De schimmel biomassa omvat vele typen schimmels waaronder ook mycorrhiza schimmels die in symbiose leven met plantenwortels. De schimmelbiomassa is volgens NIRS gemeten en correleert met klassieke meting van schimmel-vetzuren in de bodem (PLFA's).