

Effecten van maatregelen voor koolstofvastlegging op de bodemkwaliteit

Synthese van de resultaten van de jaren 2019, 2020 en 2021

Vervuurt, W., Schepens, J.A.B., Ros, G.H., Hoogmoed, M. en Koopmans, C.

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 Instituut met subsidie van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleids-ondersteunend Programma Slim Landgebruik (BO-43.10-003-006).

Review: Isabella Selin Norén¹, Jack Faber¹, Anna Edlinger¹

december, 2024

Contact: wieke.vervuurt@wur.nl

Wieke Vervuurt¹, Jonas Schepens¹, Gerard Ros¹, Marianne Hoogmoed², Chris Koopmans² (2024). Effecten van de maatregelen voor koolstofvastlegging op de bodemkwaliteit - Synthese van de resultaten van de jaren 2019, 2020 en 2021.

¹ Wageningen University & Research ² Louis Bolk Instituut

© 2024 Wageningen University & Research

55 pagina's

Deze publicatie is beschikbaar via www.slimlandgebruik.nl

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	5
1 Inleiding	11
1.1 Beoordelen van bodemkwaliteit	11
1.2 Doelstelling.....	12
1.3 Leeswijzer.....	13
2 Werkwijze	14
2.1 Metingen aan BLN 1.0-indicatoren	14
2.2 Metingen aan de bodemkwaliteit in lange termijn experimenten	14
2.3 Statistiek.....	18
2.4 Verkenning BLN 2.0	19
3 Resultaten en discussie.....	20
3.1 BLN 1.0 metingen	20
3.1.1 Meetresultaten	20
3.1.2 Discussie	24
3.2 BLN 2.0 doorrekening.....	37
3.2.1 Resultaten modelberekening.....	37
3.2.2 Discussie	41
4 Conclusie en aanbevelingen	43
4.1 Conclusies.....	43
4.1.1 Het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op de BLN 1.0 metingen	43
4.1.2 Het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op ecosysteemdiensten.....	43
4.1.3 De bruikbaarheid van BLN 2.0 voor het beoordelen van maatregelen	43
4.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek.....	44
4.2.1 Effect van maatregelen vaststellen.....	44
4.2.2 Doorontwikkeling beoordelingskader duurzaam bodembeheer	44
Referenties	45
Bijlage 1: Toelichting op de gemeten (BLN) indicatoren	52

Afkortingen

Afkorting	Volledig
ANLb	Agrarisch natuur- en landschapsbeheer
BASIS	<i>Broekemahoeve applied soil innovation systems</i>
BD	Bulkdichtheid
BFW	Biodivers functioneel weidevogelmengsel
BPW	Biodivers primair weidevogelmengsel
BLN	Bodemindicatoren voor landbouwgronden in Nederland
CEC	<i>Cation exchange capacity</i>
GFT	Groente-, fruit- en tuinafval
HWC	<i>Hot water extractable carbon</i>
KPI	Kritieke prestatie-indicator
LTE	Lange termijn experiment
MAK	Mest als kans
NIRS	<i>Nearly infra red</i>
NKG	Niet-kerende grondbewerking
Nmin	Minerale stikstof
NPL	Nationaal programma landbouwbodems
OBI	Open bodem index
OS	Organische stof
PAE	<i>Plant available elements</i>
PLFA	<i>Phospholipid fatty acids</i>
PMN	Potentieel mineraliseerbare stikstof
SL	Slim Landgebruik

Samenvatting

Aanleiding en opzet

Met de beleidsdoelstellingen om koolstofopslag in de bodem te vergroten en alle Nederlandse landbouwbodems duurzaam te beheren in 2030 is het relevant om te onderzoeken in hoeverre maatregelen voor koolstofvastlegging bijdragen aan duurzaam bodembeheer danwel bodemkwaliteit. Binnen het programma Slim Landgebruik (SL) is data verzameld uit bodemmetingen volgens de bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN 1.0) in verschillende lange termijn experimenten (LTEs). De BLN1.0 bestaat uit een selectie van indicatoren met betrekking tot organische stof, de bodemstructuur, de bodemchemie, bodembioïologie en een visuele beoordeling. Metingen aan deze indicatoren geven een betrouwbaar beeld van de integrale bodemkwaliteit. Op basis van de bodemmetingen is bekeken in hoeverre de maatregelen voor koolstofopslag een effect hebben op bodemkwaliteitsindicatoren. Dit is aangevuld met inzichten uit de literatuur. Daarnaast zijn de maatregelen voor koolstofvastlegging doorgekeken met de BLN 2.0. De BLN 2.0 bouwt voort op de BLN 1.0 en is een systematiek om een integrale beoordeling te maken van de bodemkwaliteit in het licht van de belangrijkste maatschappelijke opgaves. De BLN 2.0 is gebruikt om te bezien in hoeverre de maatregelen de bodemkwaliteit verbeteren in relatie tot vier ecosysteemdiensten: 1) primaire productie, 2) waterregulatie en zelfreinigend vermogen, 3) koolstofvastlegging en klimaatmitigatie, en 4) het faciliteren van de nutriëntenkringloop. Wegens het gebrek aan streefwaarden wordt de vijfde ecosysteemdienst, bodembiodiversiteit en habitatvoorziening, niet meegenomen in de BLN2.0 berekeningen.

Resultaten en discussie

In Tabel 1 en Tabel 2 worden de resultaten van de bodemmetingen en doorrekening met de BLN 2.0 indicatoren voor respectievelijk de akkerbouw en veehouderij weergegeven. De grootste effecten werden gevonden bij het aanvoeren van compost, het aandeel graan in rotatie, akkerranden, het verhogen van de leeftijd van grasland, wisselteelt en agroforestry. Hieronder worden de resultaten op basis van de bodemmetingen (BLN 1.0), de berekende scores op ecosysteemdiensten (BLN 2.0) en de literatuur per maatregel samengevat. De literatuurstudie was primair gericht op effecten van maatregelen op de bodemkwaliteit, ook is er gekeken in hoeverre de maatregelen een effect hadden op ecosysteemdiensten en hebben geleid tot hogere opbrengsten.

Aanvoer organische stof

Bij de aanvoer van organische stof in de vorm van compost of dierlijke mest werden effecten gevonden op bodemorganische stof indicatoren, bodemnutriënten en de bodembioïologie. Op basis van de resultaten is het aannemelijk dat de aanvoer van organische stof, met name de aanvoer van compost, het bodem organisch (kool)stof gehalte verhoogt. De dosering is hierbij van belang, bij een gift van 15 ton compost ha⁻¹ jr⁻¹ kan het enkele jaren duren voordat het effect zichtbaar wordt. Een verhoging van de koolstofvastlegging kwam niet altijd tot uiting in de BLN 2.0 doorrekening, vanwege het effect van de fosfaattoestand op de berekende maximale vastlegging. De microbiële biomassa leek te profiteren van de aanvoer van organisch materiaal, al verschilde het effect per proef en dosering. Schimmels reageerden minder sterk op de toediening van organische stof. In hoeverre de aanvoer van compost of dierlijke mest bijdraagt aan de bodemvruchtbaarheid hangt af van de nutriëntenaanvoer en in hoeverre de basisbemesting hiervoor wordt gecorrigeerd. Maar zelfs bij een hoge aanvoer van nutriënten met compost wordt dit niet altijd teruggevonden in de bodemtoestand. Voor stikstof was dit meestal wel het geval, er werd echter geen hogere minerale stikstof (N_{min}) in het najaar gemeten. In hoeverre organische bemesting leidt tot een hoger risico op uitspoeling staat ter discussie, uit de doorrekening met de BLN 2.0 kwam dit niet naar voren omdat de effecten op het N-leverend vermogen van de bodem nihil waren. Het effect van de aanvoer van organisch materiaal op de bodemstructuur blijkt niet eenduidig en vooralsnog lijken de effecten beperkt. In sommige gevallen werd een lagere bulkdichtheid gemeten, ook is het mogelijk dat de aanvoer van organische stof de aggregaatstabiliteit en

watervasthoudend vermogen beïnvloedt. De effecten zijn vanwege de relatief hoge uitgangssituatie qua organische stof echter beperkt.

Aandeel graangewassen in het bouwplan

Op basis van modelberekeningen kan worden aangenomen dat een hoger aandeel graan in het bouwplan bijdraagt aan de opbouw van organische (kool)stof in de bodem. Met metingen in praktijkpercelen bleek dit echter lastig aan te tonen. Met name op zand bleek het lastig om (significante) verschillen aan te tonen door het beperkt aantal bemeten percelen en de grote variatie tussen de percelen en de relatief korte looptijd. Ook op andere bodemkwaliteitsaspecten werden geen verschillen aangetoond tussen percelen met een hoog of laag aandeel graan in rotatie. Op kleipercelen werden wel significante verschillen aangetoond. Er werd een lagere indringingsweerstand gevonden bij een hoger aandeel graan in de rotatie. Er werd er veelal een effect gevonden van het geteelde gewas op de bodemstructuur, het is echter de vraag of dit effect over het bouwplan blijft bestaan. Ook werd er bij veel graan in het bouwplan een hogere *hot water extractable carbon* (HWC) en een hogere microbiële biomassa gevonden, zowel voor schimmels als bacteriën. Het is aannemelijk dat de hoge organische stof aanvoer door graan ten opzichte van de meeste andere akkerbouwgewassen heeft geleid tot een toename van de microbiële biomassa. Met een ander bouwplan verschuift ook de aan- en afvoer van nutriënten. Op de kleipercelen gaat een hoger aandeel graan in het bouwplan gepaard met een hogere bodemstikstofvoorraad in de bodem. In hoeverre er meer stikstof aangevoerd mag worden bij meer graan in het bouwplan hangt af van het type graan dat wordt geteeld en welke gewassen worden vervangen door graan. Al met al waren de effecten op de ecosysteemdiensten beperkt. Een iets hogere score op de productiedienst was toe te schrijven aan een hogere potentieel mineraliseerbare stikstof (PMN), bodemorganisch stofgehalte en enkele nutriënten, een hogere bodemstikstofvoorraad geeft mogelijk een hoger risico op uitspoeling.

Meerjarige akkerranden

Het is aannemelijk dat meerjarige akkerranden leiden tot een hoger bodemorganisch (kool)stofgehalte in de rand ten opzichte van het referentieperceel. Het effect is echter wel afhankelijk van de teelt op het referentieperceel, de organische bemesting in het referentieperceel en of het maaisel van de meerjarige akkerrand wordt afgevoerd. Zelfs op een perceel waar het maaisel werd afgevoerd, werd een hoger bodemorganisch (kool)stofgehalte gevonden, wanneer er op het referentieperceel hennep wordt verbouwd was dit niet het geval. Een hoger bodemorganisch (kool)stofgehalte ging ook gepaard met een hogere microbiële biomassa. Bij de akkerranden werd voornamelijk een hogere indringingsweerstand gevonden. Dit kan worden verklaard doordat er minder tot geen bodembewerkingen plaatsvinden in de meerjarige akkerranden en omdat deze waarschijnlijk worden gebruikt als rijpad. In hoeverre de nutriëntengehalten in de akkerrand veranderen, hangt onder meer af van of het maaisel van de akkerrand wordt afgevoerd of niet en de nutriënten aan- en afvoer van het referentieperceel. Bij de afvoer van het maaisel is het aannemelijk dat er verschraling optreedt. Ook is het mogelijk dat akkerranden stikstof en fosfaat door boven- en ondergrondse laterale afspoeling onderscheppen. Omdat de beschikbaarheid van nutriënten afnam, was het effect op de nutriëntenkringloop en gewasproductiedienst negatief.

Groenbemesters

Bij de twee groenbemesterproeven werden nauwelijks effecten op de bodemkwaliteit vastgesteld. Het gebrek aan effect komt waarschijnlijk door de beperkte looptijd van de proef. Binnen vijf jaar na de start van het jaarlijks telen van groenbemesters kan nog geen effect op het bodemorganisch (kool)stofgehalte worden verwacht. Het is onduidelijk waarom de verhoogde aanvoer van organische stof niet heeft geleid tot een hogere microbiële biomassa. Hoewel het aannemelijk is dat de groenbemesters de stikstofverliezen naar het grondwater hebben beperkt, werd er geen lagere N_{min} gemeten in het najaar. Ook is het aannemelijk dat groenbemesters de beschikbaarheid van nutriënten voor het volggewas hebben verhoogd, in de metingen werd dit alleen voor kalium vastgesteld. Het effect van een

groenbemesterteelt op de bodemstructuur was beperkt, enkel op een locatie leidde één object tot een beter watervasthoudend vermogen. Ook het effect op de ecosysteemdiensten was beperkt, en sluit daarmee aan bij de metingen.

Niet-kerende grondbewerking

Het effect van niet-kerende grondbewerking (NKG) op de bodem hangt onder andere af van het type machine dat wordt gebruikt, de omstandigheden waaronder de werkzaamheden worden uitgevoerd en het bodemtype. In een rotatie met veel rooivruchten werd geen effect vastgesteld op de bodemstructuur, terwijl dit op andere locaties met minder rooivruchten wel het geval was. Daar werd bij NKG een hogere bulkdichtheid en indringingsweerstand gemeten, wat in sommige gevallen gepaard ging met een beter watervasthoudend vermogen. In de berekende score voor de waterdienst werd geen verschil gevonden. Het is aannemelijk dat NKG leidt tot een andere verdeling van organische (kool)stof door het bodemprofiel. Bezien over de laag 0-30 cm werd er in de meeste gevallen geen significant hoger bodemorganisch (kool)stofgehalte gevonden bij NKG ten opzichte van de controle. Het effect van NKG op de microbiële biomassa in de bodem is niet eenduidig, maar NKG lijkt gepaard te gaan met meer microbiële biomassa ten opzichte van ploegen. Dit hangt overigens voor een groot deel samen met de verdeling van organische stof door het bodemprofiel. Ook het effect op de stikstofhuishouding is niet eenduidig, net als bij organische stof lijkt ook de stikstof anders door het profiel verdeeld te zijn. Mogelijk spelen, vanwege een andere bodemstructuur, ook mineralisatiesnelheden en verliezen naar de lucht een rol. NKG ging wel gepaard met een hogere kringloopdienst ten opzichte van de controle, dit kwam met name door een (niet significant) verschil in de K-beschikbaarheid. Op de overige nutriënten werd geen effect gevonden.

Kruidenrijk grasland

Er werd nauwelijks een effect vastgesteld van kruidenrijk grasland op de bodemkwaliteit. Enkel bij één object in één proef werd een significant hoger bodemorganisch (kool)stof gehalte vastgesteld. Dit effect wordt toegeschreven aan de productiviteit van het kruidenmengsel, deze was productiever dan de controle, waardoor er meer organische (kool)stof in de bodem is gekomen. Dat het mengsel productiever was dan de controle is waarschijnlijk ook de reden dat er een lagere N_{min} in het najaar werd gevonden. Dit kwam niet tot uiting in de berekende score voor de waterdienst. In de andere proef en op de praktijkpercelen werden de kruidenmengsels of extensieve graslanden minder bemest dan de controle, en werd er geen effect vastgesteld op het totale stikstofgehalte in de bodem, terwijl de kruidenmengsels productiever waren. Een hogere stikstofefficiëntie bij kruidenrijk grasland ten opzichte van de controle komt mogelijk doordat er vlinderbloemigen in het kruidenrijk grasland zitten. Dit vertaalde zich niet in een hogere productie- of kringloopdienst. Op de bodemstructuur en de bodembioologie werd geen effect vastgesteld, ondanks de aanname dat een meer diverse soortensamenstelling een effect heeft op de bodembiodiversiteit en een meer divers wortelstelsel de bodemstructuur zou beïnvloeden.

Leeftijd van grasland

Op de kleigronden gaat deze maatregel om het wel of niet scheuren van grasland. Er werd enkel een effect gevonden op het watervasthoudend vermogen. Op zandgronden gaat het om het aantal jaar nadat bouwland omgezet is naar grasland en zijn er grotere verschillen gevonden. Bodems onder oud grasland bevatten meer organische (kool)stof dan jong grasland en continu bouwland. Dit komt omdat er bij ouder grasland, ten opzichte van jong grasland, meer tijd geweest is voor de accumulatie van organische stof in de bodem. De hogere aanvoer van organische stof had ook een effect op het bodemleven. Ook werd er een effect gevonden op de bodemstructuur, bij oud grasland hebben bodembewerkingen minder recent plaatsgevonden, waardoor een hogere indringingsweerstand werd gevonden. Ook was er een effect op de bodemnutriënten, oud grasland ging gepaard met een significant hogere stikstofbodemvoorraad. Dit hangt samen met het verhoogde bodemorganisch stofgehalte, maar ook omdat grasland een hoger stikstofbodemoverschot heeft ten opzichte van bouwland, waardoor er meer accumulatie van stikstof heeft

plaatsgevonden onder ouder grasland. Dit vertaalde zich, samen met een hogere beschikbaarheid van kalium en magnesium in een hogere productie- en kringloopdienst. Doordat ook de C/N ratio onder oud grasland hoger was, nam het risico op uitspoeling niet toe.

Wisselteelt

Met de overstap op een wisselteelt verschuiven de verhoudingen van het landgebruikstype ten opzichte van de huidige situatie. Deze situatie is echter per bedrijf verschillend. Ten opzichte van de huidige situatie is bij wisselteelt het aandeel permanent grasland hoger, is er minder tijdelijk gras, meer tijdelijk bouwland, en wordt permanent bouwland vermeden. Bij de overstap op een wisselsysteem ontstaat naar verwachting een toename van het bodemorganisch (kool)stofgehalte, omdat het aandeel landgebruikstypes dat gepaard gaat met een hoog bodemorganisch (kool)stofgehalte toeneemt. Ook neemt de bodemstikstofvoorraad in dit systeem toe. Bij de wisselpercelen dient rekening gehouden te worden met de stikstofdynamiek die hoort bij het omzetten van grasland naar bouwland en andersom. Omdat de microbiële biomassa onder grasland hoger is dan bij bouwland, en er bij een wisselteeltsysteem meer grasland is ten opzichte van de huidige situatie, neemt de microbiële biomassa toe. Bij een overstap op een wisselsysteem zal ook de indringingsweerstand en bulkdichtheid van de bodem toenemen, wanneer er machinaal geoogst wordt, bij begrazing zal dit niet het geval zijn. In lijn met de maatregel leeftijd grasland werd er een verbetering van de ecosysteemdiensten gevonden.

Agroforestry

Aan de kant van percelen met bomenrijen werden hogere gehalten aan organische stof en nutriënten gemeten. Het effect was groter dicht bij de bomenrij dan richting het midden van het perceel. Toch werden de verschillen ook op 20 meter afstand van de bomenrij nog vastgesteld. Het is aannemelijk dat dit komt door extra input van organisch materiaal uit blad en takjes, en ook wortels dragen bij aan een verhoogde koolstof aanvoer in diepere lagen. Dat er meer nutriënten in het systeem bleven kan komen door een verhoogde interne kringloop of doordat de gewasgroei aan de kant van de bomenrij achterbleef waardoor er minder nutriënten werden afgevoerd. De verhoging van de nutriëntgehalten leverden een verhoogde productiedienst op in de BLN 2.0 berekeningen. Op fysische en biologische aspecten werden geen significante effecten aangetoond. Ook op de waterdienst werd geen effect vastgesteld. Waarom er geen effect was op de bodembioologie is onbekend. Een gebrek aan een effect op de fysische indicatoren betekent echter niet dat agroforestry geen breder effect heeft op de waterhuishouding, maar dat is in deze studie niet onderzocht.

Conclusie

Bezien over alle locaties hadden de maatregelen zowel positieve als negatieve effecten op de BLN 1.0 metingen en de BLN 2.0 ecosysteemdiensten en hing dit erg af van de locatie en van de specifieke maatregel. De grootste effecten werden gevonden bij het aanvoeren van compost, het aandeel graan in rotatie, akkerranden, het verhogen van de leeftijd van grasland, wisselteelt en agroforestry. De effecten bij groenbemesters, niet-kerende grondbewerking en kruidenrijk grasland waren beperkt. Alleen aandeel graan en leeftijd grasland verhogen op zand hadden enkel positieve effecten op de BLN 2.0 ecosysteemdiensten.

Met de BLN 2.0 was het mogelijk om de meetresultaten te integreren en te vergelijken met de streefwaarden. De effecten op de bodemkwaliteit in relatie tot een verhoogde bijdrage aan verschillende ecosysteemdiensten was na aggregatie van de verschillende bodemindicatoren beperkt. Meetbare effecten op bodemparameters zorgen ook voor meetbare veranderingen in gekoppelde bodemindicatoren zoals berekend door de BLN 2.0. Een analyse in welke mate de "afstand tot de streefwaarden" werd verkleind voor de onderzochte bodemindicatoren als gevolg van de maatregelen is hier niet in detail onderzocht.

Tabel 1. Het effect van maatregelen in de akkerbouw op bodemkwaliteitsparameters ten opzichte van de controle (boven) en de BLN 2.0 doorrekening voor de geaggregeerde beoordeling in relatie tot de vier ecosysteemdiensten (onder): -- is een afname van >10%, - is een afname <10%, 0 is neutraal, + is een toename <10% en ++ is een toename >10%. Wanneer er sprake is van verschillende behandelingen is er een range weergegeven, aangegeven met een /.

	Meting	Eenheid	NKG			Aanvoer organische stof			Groenbemesters		Aandeel graan		Akkerranden	
			Klei	Klei	Zand	Klei	Klei	Klei	Zand	Zand	Klei	Zand	Klei	Zand
			Lelystad	Vlaanderen*		BASIS	MAK	Vlaanderen*	Nederland	Duitsland*				
Organische stof	C-ele	%				++	0 / ++	++					++	
	OS-gloeï	%				0 / ++	0 / ++	++					++	
	OS - N	%				0 / ++	0 / ++	++					++	
	HWC	mg kg ⁻¹				0 / ++	0 / ++	0 / ++			++		++	
Fysisch	Indr max	MPa			++								++	
	Indr gem.	MPa			++						--		++	++
	bd	kg m ⁻³		+	+									
	WVV	%			++					0 / +				
	% Scherpb	%												
	Bewortelin g	index 0-2											++	++
Chemisch	pH-CaCl ₂	-		-									-	
	N-tot N	g N kg ⁻¹					0 / ++	++			++		++	
	N-tot K	g N kg ⁻¹				0 / ++	0 / ++	++			++			
	N-min	kg ha ⁻¹												
	P-PAE	mg P kg ⁻¹						0 / ++						--
	Pw	mg P ₂ O ₅ L ⁻¹						0 / ++						--
	PAL	mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹			+			0 / ++						
	K-PAE	mg K kg ⁻¹						++	0 / ++	0 / ++			--	
	K-voor N	Mmol+ K kg ⁻¹						0 / ++					++	
Biologisch	PMN N	mg N kg ⁻¹									++			
	Microb bio	mg C kg ⁻¹				0 / ++		++			++		++	
	Bact bio	mg C kg ⁻¹				0 / ++		++			++			
	Schim bio	mg C kg ⁻¹						0 / ++			++		++	
Gewasproductie			+		+	0 / +	+		+		+	+		-
Waterkwaliteit en waterregulatie						- / 0	- / 0		0 / +		-	+	-	-
Koolstofvastlegging						+	- / +		- / 0		+	+	-	+
Faciliteren van de nutriëntenkringloop					++	- / +	0 / ++		- / +		+	++	-	--

* Van deze locatie is geen BLN 2.0 doorrekening gemaakt.

Tabel 2. Het effect van maatregelen in de veehouderij op de bodemkwaliteitsparameters ten opzichte van de controle (boven) en de BLN 2.0 doorrekening voor de geaggregeerde beoordeling in relatie tot de vier ecosysteemdiensten (onder): -- is een afname van >10%, - is een afname <10%, 0 is neutraal, + is een toename <10% en ++ is een toename >10%. Wanneer er sprake is van verschillende behandelingen is er een range weergegeven, aangegeven met een /.

			Kruidenrijk grasland			Leeftijd grasland		Wisselteelt	Agroforestry
			Klei	Zuidelijk zand	Centraal zand	Klei	Zand	Zand*	Zand
	Meting	Eenheid							
Organische stof	C-ele	%	0 / ++				++	+	++
	OS-gloei	%					++	+	++
	OS - N	%					++	+	++
	HWC	mg kg ⁻¹	-- / 0		- / 0		++	+	++
Fysisch	Indr max	MPa							
	Indr gem.	MPa					--	+	
	bd	kg m ⁻³						+	
	WVV	%				+			
	% Scherpb	%		0 / ++					
	Beworteling	index 0-2							
Chemisch	pH-CaCl ₂	-			- / 0				
	N-tot N	g N kg ⁻¹					++	+	
	N-tot K	g N kg ⁻¹					++	+	++
	N-min	kg ha ⁻¹	-- / 0					+	
	P-PAE	mg P kg ⁻¹						--	++
	Pw	mg P ₂ O ₅ L ⁻¹						--	++
	PAL	mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹						--	++
	K-PAE	mg K kg ⁻¹			-- / 0			-	++
	K-voor N	Mmol+ K kg ⁻¹							++
Biologisch	PMN N	mg N kg ⁻¹					++	++	
	Microb bio	mg C kg ⁻¹					++	+	
	Bact bio	mg C kg ⁻¹					++	++	
	Schim bio	mg C kg ⁻¹					++	+	
Gewasproductie			0 / +		-- / -	-	+		+
Waterkwaliteit en waterregulatie				+	0 / +	+	+	+	-
Koolstofvastlegging					-	+	++	+	+
Faciliteren van de nutriëntenkringloop			-- / ++	- / 0	-- / -	++	+	-	+

* Voor de BLN 2.0 doorrekening geldt dat deze alleen gebaseerd is op de percelen in Noord-Brabant.

1 Inleiding

Met het Klimaatakkoord uit 2018 heeft de landbouwsector zich gecommitteerd aan klimaatdoelstellingen. Een onderdeel daarvan is het doel om 0,5 Mton CO₂-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 SL onderzoek gedaan naar landbouwkundige maatregelen die koolstofvastlegging in de bodem effectief kunnen bevorderen. Deze maatregelen hebben naar verwachting ook positieve effecten op de bodemkwaliteit. De vraag kan worden gesteld 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. Met de data verzameld uit de SL bodemmetingen in LTEs wordt in deze studie deze vraag beantwoord.

Binnen de PPS Beter Bodembeheer (BBB) is eerder onderzocht welke set van bodemindicatoren breed toepasbaar is om verschillen in bodemkwaliteit te onderscheiden en te beoordelen. Dit vormde de basis voor de SL bodemmetingen. Ook is er een inventarisatie gemaakt van referentiewaarden. Een eerste versie (1.0) van deze indicatorset is beschreven in Hanegraaf et al. (2019) en wordt de BLN-indicatorset genoemd. De metingen binnen SL zijn op deze set gebaseerd. 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., 2021; Ros et al., 2023). De BLN 2.0 is recentelijk gepubliceerd, welke voort bouwt voort op de Open Bodem Index (OBI; Ros et al., 2023) en de systematiek van bodemboordeling verbreedt van landbouwkundige productie naar meerdere ecosysteemdiensten inclusief waterregulatie en zelfreinigend vermogen, koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en het faciliteren van de nutriëntenkringloop. Wegens het gebrek aan streefwaarden wordt de vijfde ecosysteemdienst, bodembiodiversiteit en habitatvoorziening, niet meegenomen in de BLN2.0 berekeningen.

Er is in verschillende jaren gemeten aan maatregelen binnen de akkerbouw en de veehouderij. Het effect van deze maatregelen op koolstofvastlegging en de bodemkwaliteit zijn per jaar gerapporteerd in verschillende rapporten. In 2019 is gemeten aan verschillende maatregelen, het effect van deze maatregelen op koolstofvastlegging is gerapporteerd door Koopmans et al. (2020) en het effect op de bodemkwaliteit door Hoogmoed et al. (2021). In 2020 is er aanvullend gemeten, waarbij de resultaten met betrekking tot koolstofvastlegging zijn te vinden in het rapport van Koopmans et al. (2021) en voor de bodemkwaliteit in Schepens et al. (2022). In 2021 is er gemeten op extra locaties voor verschillende maatregelen, en de resultaten hiervan zijn gerapporteerd door Hoogmoed et al. (2023). Inmiddels is er gedurende drie jaar gemeten aan negen maatregelen verdeeld over de akkerbouw en veehouderij op zand- en kleigronden. Nu is het tijd om de balans op te maken via een integrale analyse van alle resultaten van de afgelopen drie jaar. In deze integrale analyse wordt enerzijds toegewerkt naar kwantitatieve samenvatting van resultaten van drie jaar metingen van BLN-indicatoren bij verschillende maatregelen. Daarnaast wordt er toegewerkt naar een kwalitatieve evaluatie van deze maatregelen. Dit geeft inzicht in welke maatregelen bijdragen aan duurzaam bodembeheer.

1.1 Beoordelen van bodemkwaliteit

Om vast te kunnen stellen in hoeverre maatregelen voor koolstofvastlegging bijdragen aan duurzaam bodembeheer, is een scherpe definitie van 'duurzaam bodembeheer' en bijbehorend beoordelingskader nodig (Blom et al., 2022). Duurzaam bodembeheer wordt in het NPL omschreven als het duurzaam beheer van landbouwbodems zodat alle bodemfuncties optimaal kunnen werken (van Dijk, 2020). Een goede kwaliteit van landbouwbodems draagt dan bij aan bodemvruchtbaarheid, waterkwaliteit, klimaatadaptatie en waterbuffering, biodiversiteit en klimaatmitigatie en CO₂

vastleggen (LNV, 2019). Een beoordelingskader om de optimale werking van bodemfuncties te evalueren zou aan een aantal eisen moeten voldoen.

Het is noodzakelijk dat de beoordelingssystematiek de relatie legt tussen bodemanalyses, bodemindicatoren, bodemfuncties en ecosysteemdiensten. Een systematiek moet de causale en kwantificeerbare relaties tussen bodemindicatoren en daaruit voortvloeiende bodemfuncties omvatten, zodanig dat bodemgegevens kunnen worden geïntegreerd tot een inschatting van de potentiële levering van ecosysteemdiensten (Faber et al., 2022). Idealiter hebben indicatoren een direct en duidelijk verband met bepaalde bodemprocessen en reageren zij op veranderingen in beheer of milieuomstandigheden (Yang et al., 2020), en geven daarmee een beeld van de actuele toestand van de bodem en de potentiële levering van ecosysteemdiensten. Het bepalen van bodemfuncties op basis van directe meetgegevens aan bodemparameters kan worden gedaan met eenvoudige rekenregels of meer complexe modellen. Er is geen volledige set aan rekenregels voorhanden waarmee alle aan bodem gerelateerde ecosysteemdiensten zijn te herleiden, zelfs niet voor alle daaraan ten grondslag liggende bodemfuncties. Enerzijds ontbreekt een volledige inventarisatie per ecosysteemdienst van alle belangrijke relaties tussen indicatoren-bodemfuncties-ecosysteemdienst. Anderzijds is er nog weinig aan dergelijke relaties gekwantificeerd voor een daadwerkelijke toepassing.

Een robuuste beoordelingssystematiek van landbouwbodems moet meerdere beoordelingscriteria omvatten, zo mogelijk gebaseerd op relevante achtergrondgegevens. Het vaststellen van streef- en drempelwaarden voor bodemkwaliteitsindicatoren met het oog op ecosysteemdiensten zou alle relevante, van de bodem afgeleide ecosysteemdiensten moeten omvatten, niet alleen de allerbelangrijkste dienst(en) die van direct belang zijn voor het primaire landgebruik. Dit is nodig om de afwegingen en synergiën tussen bundels van diensten te vergemakkelijken.

Er is veel onderzoek gedaan naar het beoordelen en monitoren van de bodemkwaliteit, bodemfuncties en ecosysteemdiensten, en er zijn daarvoor verschillende systematieken ontwikkeld en geëvalueerd (e.g. Faber et al., 2022; Bünemann et al., 2018; van Leeuwen et al., 2017; Orgiazzi et al., 2017; Lehmann et al., 2020; Zwetsloot et al., 2022; Ros et al., 2022). Sommige daarvan zijn op het niveau van bodemindicatoren (e.g. BLN 1.0), andere op het niveau van ecosysteemdiensten (e.g. Soil Navigator of BLN 2.0) en een andere mogelijkheid is om het management te beoordelen (e.g. kritische prestatie-indicator; KPI's). Faber et al. (2022) geven toelichting op de plus- en minpunten van de verschillende beoordelingskaders. Alle kritiek bijeengenomen komt het erop neer dat geen van de gepubliceerde kaders op zichzelf voldoende geschikt of compleet is voor de evaluatie van bodemgezondheid in termen van ecosysteemdiensten zoals bedoeld onder de EU Bodemstrategie afgaande op de *Soil Mission* rapporten (Veerman et al., 2020; Giuffré et al., 2021) en het voorstel voor een EU Soil Monitoring Law (EC, 2023). In onze studie wordt gewerkt met de BLN2.0, waarmee teeltondersteunende bodemfuncties kunnen worden beoordeeld op basis van chemische, fysische en biologische indicatorwaarden. Daarmee wordt gedeeltelijk tegemoet gekomen aan de NPL benadering van bodemkwaliteit, die stelt dat alle bodemfuncties optimaal werken bij duurzaam beheer. Het BLN raamwerk zou in de toekomst verder kunnen worden ontwikkeld richting integrale afweging van ook niet-agrarisch belangrijke ecosysteemdiensten. Daarmee zal evaluatie van bodemkwaliteit en duurzaam bodembeheer mogelijk worden.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is om inzichtelijk te maken wat het effect is van maatregelen voor koolstofvastlegging op bodemmetingen en ecosysteemdiensten (meekoppel-effecten). De basis hiervoor zijn de metingen aan de BLN-indicatoren die zijn verricht in 2019, 2020 en 2021. De focus van dit project ligt op het kwantificeren van het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op een brede set aan bodemindicatoren. Hiermee zal worden aangetoond of en in hoeverre maatregelen voor koolstofvastlegging een effect hebben op de bodemkwaliteitsaspecten (welke BLN-indicatoren). Deze studie is uniek in de zin dat er aan verschillende maatregelen op uniforme wijze is gemeten aan

verschillende bodemkwaliteitsaspecten. Van enkele maatregelen zijn resultaten van additionele metingen of tijdreeksen beschikbaar in de literatuur, deze worden meegenomen in de interpretatie van de meetresultaten uitgevoerd in dit project. Ook wordt er een doorrekening gemaakt met de BLN 2.0. Samen geeft dit inzicht in hoeverre maatregelen passen binnen het bredere kader van duurzaam bodembeheer. Daarmee wordt een aanzet gegeven hoe maatregelen bijdragen aan ‘andere’ ecosysteemdiensten dan klimaatmitigatie, zoals bodemvruchtbaarheid, bodembiodiversiteit, klimaatadaptatie en waterkwaliteit.

In dit rapport worden de volgende vragen beantwoord:

- Wat is het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op de gemeten BLN 1.0 indicatoren?
- Wat is het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op de ecosysteemdiensten volgens de BLN 2.0 systematiek?

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 worden de LTE's en de meetmethoden omschreven. In Hoofdstuk 3 worden de resultaten en discussie gepresenteerd. Dit hoofdstuk bestaat uit twee onderdelen. Eerst worden de meetresultaten van de BLN1.0 kort toegelicht, deze worden vervolgens aangevuld en vergeleken met resultaten uit de literatuur. Dan worden de resultaten van de BLN 2.0 kort toegelicht en bekeken in hoeverre deze systematiek additionele inzichten oplevert. Hoofdstuk 4 omvat de conclusie en aanbevelingen.

2 Werkwijze

2.1 Metingen aan BLN 1.0-indicatoren

In de BLN 1.0 verwijzen indicatoren naar bodemeigenschappen die gemeten kunnen worden door middel van verschillende analyse methoden bij het bemonsteren van de bodem. De definitie van ‘indicator’ wijkt hier af van de definitie bij de BLN 2.0 systematiek, zie paragraaf 0. De bemonsteringen zijn uitgevoerd in de 0-30 cm bodemlaag volgens de gestandaardiseerde protocollen binnen SL die staan beschreven in Koopmans et al. (2020). Voor de analyses is aangesloten bij de bepalingen zoals beschreven in Hanegraaf et al. (2019). Tabel 3 geeft een overzicht van de gemeten (BLN 1.0) indicatoren, de desbetreffende analysemethode en afkortingen zoals gebruikt in de tabellen in dit rapport. De analyses zijn uitgevoerd bij laboratoria van Eurofins Agro, Louis Bolk Instituut, Wageningen Environmental Research en de bodemkundige dienst van België. Voor de analyse van de meeste indicatoren is de traditionele chemische methode gebruikt. Vanuit kosten optiek is in sommige gevallen is een alternatieve methode gebruikt, namelijk met *nearly infra red* (NIRS). Een toelichting op de NIRS-methode en de gemeten indicatoren is opgenomen in Bijlage 1. Op enkele punten is afgeweken van de BLN 1.0 om kosten te beperken. Er is daarom gekozen om de aggregaatstabiliteit, (plantparasitaire) aaltjes en regenwormen niet te meten.

Tabel 3. Koolstof en BLN 1.0-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 ₂ O ₅ L ⁻¹
	PAL	P-voorraad	Ammoniumlactaat extractie	mg P ₂ O 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

2.2 Metingen aan de bodemkwaliteit in lange termijn experimenten

Er is gemeten aan 9 verschillende maatregelen, in 11 LTE's en praktijkpercelen in 7 provincies. In Tabel 2 wordt een overzicht gepresenteerd van de maatregelen en in welke lange termijn experimenten de bodemkwaliteit is gemeten. Een beschrijving van de lange termijn experimenten wordt hieronder per maatregel gegeven, waarbij de details worden gepresenteerd in Hoogmoed et al. (2021), Schepens et al. (2022) en Hoogmoed et al. (2023).

Compost en dierlijke mest

Aan de effecten van compost en dierlijke mest is gemeten in drie verschillende experimenten. Twee daarvan zijn gelegen op centrale klei in Lelystad (BASIS en MAK) en één in Vlaanderen. In het experiment Broekemahoeve applied soil innovation systems (BASIS) is sinds 2011 compost toegediend, in doseringen van 20 en 40 ton compost per hectare per jaar, aangevuld met kunstmest. Dit is toegediend in een gangbare akkerbouwrotatie met zomergerst, zaaui/doperwt, pootaardappelen en suikerbieten. In het jaar van meten (2019) stonden er doperwten. Bij mest als kans (MAK) zijn er verschillende bemestingsregimes toegepast. Hier werd kunstmest vergeleken met drijfmest, kippenmest, potstalmest, GFT-compost, groencompost, natuurcompost en de combinatie van GFT-compost met drijfmest. De aanvoer van nutriënten verschilde tussen de objecten, een preciezere omschrijving van de aanvoer met de bemestingsstrategieën staat omschreven in Hoogmoed et al. (2021). Deze proef is gestart in 1999 op een biologisch perceel. De jaren voorafgaand aan de meting is er suikermis, pastinaak, zomergerst en zoete aardappel verbouwd, met gerst of rogge als groenbemester. De proef in Bierbeek, België, is gestart in 1997 en er worden verschillende doseringen compost (15 – 30 – 45 ton compost) vergeleken met de bemesting met kunstmest. De compostgiften worden aangevuld met kunstmest. De proef ligt in een akkerbouwrotatie met suikerbiet, aardappelen, wortelen, uien en wintertarwe met gele mosterd als groenbemester, en is aangelegd in een gewarde proef met vier herhalingen. Er is gemeten aan de objecten met de jaarlijkse toediening van compost en de controle met de toepassing van kunstmest.

Aandeel graan

De metingen aan deze maatregel zijn uitgevoerd op percelen in Zeeland, Flevoland en Noord-Brabant. Er zijn percelen bemonsterd met relatief veel graan in de vruchtopvolging en percelen met relatief weinig of geen graan in de vruchtopvolging. Er is gekeken naar een periode van 13 jaar. In Zeeland zijn 2 percelen bemonsterd met weinig graan (maximaal 10%) en 3 percelen met veel graan (minimaal 40%). In Flevoland zijn er 5 percelen bemonsterd met weinig graan (maximaal 15%) en 12 percelen met veel graan (minimaal 38%). In Noord-Brabant zijn er 15 percelen bemonsterd zonder graan in de vruchtopvolging en 5 percelen met veel graan (minimaal 23%). De percelen binnen een regio hebben hetzelfde bodemtype, zoals gedefinieerd door de gedetailleerde bodemkaart in PDOK. Het aantal bemonsterde percelen is daarmee beperkt, hier dient rekening mee gehouden te worden bij de interpretatie.

Inzet groenbemesters

Er is gemeten aan twee groenbemesterproeven: één op centraal zand en één op Duitse leem. Het experiment op centraal zand (Wageningen) is gestart in 2016 en metingen zijn verricht in 2020. De proef ligt in een gangbare gewasrotatie met wintertarwe, mais, aardappelen, zomergerst en erwten. Na elke hoofdteelt is een groenbemester geteeld, welke is ondergewerkt in februari. Er is gemeten aan vijf objecten: bladrammenas, Japanse haver, bladrammenas + Japanse haver, bladrammenas + Japanse haver + wikke, en de controle (zwarte braak). Er is gemeten aan vijf herhalingen per object. De groenbemesters zijn bemest met kunstmest (30 kg N ha⁻¹ jr⁻¹). De proef in Duitsland is ook in 2016 gestart en metingen zijn verricht in 2021, er heeft dan drie keer een groenbemester gestaan. Er is gemeten aan vier objecten: gele mosterd, een mengsel van vier soorten, een mengsel van 12 soorten en de controle (zwarte braak). De groenbemesters zijn ingezaaid na de wintertarwe (half augustus) en zijn pas na de winter ondergewerkt, dit wordt met een niet-kerende grondbewerking gedaan. De groenbemesters zijn bemest met 47 kg N ha⁻¹ jr⁻¹. De groenbemesterproef ligt in twee rotaties: één met veldboon (tarwe-veldboon-tarwe-mais) en één met mais (tarwe-mais-tarwe-mais). Omdat deze rotaties niet geward zijn, zijn ze per rotatie geanalyseerd.

Meerjarige akkerranden

Voor deze maatregel is gemeten in meerjarige akkerranden en het aangrenzende (akkerbouw)perceel als controle. Er is gemeten op een zandgrond in Groningen (2020), een kleigrond in Flevoland (2021) en een zandgrond Drenthe (2021). De meerjarige akkerranden in Groningen zijn in 2009 aangelegd, in 2016 en 2017 is er nog wel een gewas geteeld. De akkerranden bestonden uit grasachtigen, deze worden elk jaar geklepeld en er vindt geen bemesting plaats. De referentiepercelen hebben een vruchtwisseling met hennep, aardappelen, gerst en suikerbieten (Schepens et al., 2022). Bij de objecten in Drenthe zijn de akkerranden niet bemest. De akkerranden zijn wel geklepeld, maar het organisch materiaal is niet afgevoerd (Hoogmoed et al., 2023). Op de referentiepercelen werden suikerbieten, aardappelen en tarwe geteeld. De referentiepercelen werden bemest met 20 ton varkensdrijfmest ha-1 jr-1, aangevuld met kunstmest. Bij de objecten in Flevoland werd de akkerrand na half augustus gemaaid en het maaisel werd afgevoerd. Op de referentiepercelen werden uien, aardappelen, tarwe, bonen en tulpen verbouwd. Alle meerjarige akkerranden vielen onder agrarisch natuurbeheer. Er is dus gemeten op drie locaties, hier dient rekening mee gehouden te worden bij de interpretatie.

Niet-kerende grondbewerking

De metingen aan deze maatregel zijn verricht in 2019 drie verschillende experimenten, twee op klei en één op zand (Hoogmoed et al., 2021). Het betrof de experimenten BASIS (zavelgrond - Lelystad), bodemkwaliteit op zand (BKZ; zuidelijk zand - Vredepeel) en een experiment van Inagro (Vlaamse klei - Rumbeke-Beitem). Het experiment BASIS is gestart in 2009, waarin een vergelijking wordt gemaakt tussen een kerende grondbewerking met ploegen (23-25 cm) en een niet-kerende grondbewerking met woelen (17 cm). Het bouwplan bestond uit zomergerst, zaaiui/doperwt, pootaardappelen en suikerbieten, in 2019 stonden er aardappelen. Voor beide behandelingen is gemeten in vier herhalingen. In het experiment BKZ is er gestart met een vergelijking tussen een kerende grondbewerking en een niet-kerende grondbewerking in 2011. De kerende grondbewerking is uitgevoerd met een ploeg op 20 cm met ondergronders tot 30 cm, de niet-kerende grondbewerking is uitgevoerd met een cultivator op 15 cm en een woeler op 30 cm. Dit is getest in een gangbaar systeem met een zesjarige gewasrotatie bestaande uit aardappelen, conservenerwt, prei, zomergerst, peen en snijmais. In 2019 is gemeten in de percelen met erwt en prei. Er is gemeten aan 16 semi-herhalingen per grondbewerking. Bij de proef in Vlaanderen is een kerende grondbewerking met ploegen (25 cm) vergeleken met een niet-kerende grondbewerking met woelen (25-35 cm). Dit is getest in een biologische akkerbouwrotatie met een zesjarige gewasrotatie met grasklaver, prei, knolselderij/peen, granen, kolen en aardappel. Dit experiment is gestart in 2006. In 2019 stond er peen. Er is gemeten aan vier semi-herhalingen per behandeling omdat de proef in twee stroken was aangelegd.

Leeftijd grasland en mais-gras wisselteelt

Voor deze maatregelen is er gemeten aan percelen in Friesland (2019 en 2020), percelen in Brabant (2019, 2020 en 2021) en percelen in Overijssel (2021). In Friesland is er gemeten aan een aantal dichtbij elkaar gelegen praktijk percelen (Hoogmoed et al., 2021). Er zijn percelen bemonsterd uit twee categorieën: recent gescheurd grasland (0-3 jaar geleden) en niet gescheurd grasland (>10 jaar geleden). Er is gekeken naar de periode vanaf 2009.

Voor de percelen in Brabant zijn percelen geselecteerd uit het veehouderijnetwerk Duinboeren. 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 voor de inzaai van gras in ieder geval sinds 2009 bouwland waren. Voor meer informatie zie Schepens et al., 2024). In 2021 is er ook gemeten aan percelen in Overijssel, hierbij is eenzelfde aanpak gehanteerd als voor Brabant (Hoogmoed et al., 2023). Er is gemeten aan percelen op eerdgrond en podzol, hiervoor is gecorrigeerd in de data-analyse (Hoogmoed et al., 2023).

Voor de maatregel 'leeftijd grasland verhogen' wordt een onderscheid gemaakt naar klei- en zandgronden. Op klei wordt gekeken naar graslandvernieuwing (Hoogmoed et al., 2021; Koopmans et al., 2021). Op zand wordt gekeken naar omzetting van bouwland naar grasland, er wordt een vergelijking gemaakt tussen jong grasland (1-5 jaar) en oud grasland (>10 jaar). 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: in Noord-Brabant was 25% in gebruik als permanent grasland, 43% als tijdelijk grasland, 18% als tijdelijk bouwland en 13% als permanent bouwland. In Overijssel was 46% in gebruik als permanent grasland, 34% als tijdelijk grasland, 13% als tijdelijk bouwland en 7% als permanent bouwland (Hoogmoed et al., 2023).

Kruidenrijk grasland

In 2020 is er gemeten in twee proeven: één op klei (Dairy campus – Friesland) en één op zand (Kelpen Oler, Limburg). De proef op klei is in 2017 ingezaaid en de proef op zand in 2018. Bij de proef op zand is er gemeten aan een biodivers primair weidevogelmengsel (BPW), biodivers functioneel weidevogelmengsel (BFW) en een referentieperceel met Engels raaigras (controle). Op alle objecten is drijfmest toegepast, en op het referentieperceel is aanvullend kunstmest toegediend (Schepens et al., 2022). Bij de proef op klei is er gemeten aan het biodivers primair weidevogelmengsel, biodivers functioneel weidevogelmengsel en de controle met drijfmestbemesting en deze behandelingen bemest met stalmest (Schepens et al., 2022). In 2021 is er ook gemeten aan praktijkpercelen op centraal zand (Gelderland). Er zijn percelen bemonsterd met productief kruidenrijk grasland, extensief kruidenrijk grasland en Engels raaigras (controle). De productieve kruidenrijke graslanden zijn in 2018, 2019 of 2020 ingezaaid. Het beheer is vergelijkbaar met de percelen met Engels raaigras (controle), maar er is geen kunstmest toegepast. De Extensieve kruidenrijke graslanden zijn semi-natuurlijke percelen met een geschiedenis van kruidenrijk grasland en vallen onder agrarisch natuur- en landschapsbeheer (ANLb) pakketten. Deze extensieve kruidenrijke graslanden kennen een extensief beheer met een uitgestelde maaidatum van 1 of 15 juni. De eerste snede is gemaaid waarna er daarna beperkt is beweide of gemaaid (Hoogmoed et al., 2023).

Agroforestry veehouderij

Agroforestry is bekeken binnen de veehouderij. De metingen hebben plaatsgevonden in graslandpercelen die aan één zijde werd begrensd door een volwassen houtwal. Een volwassen houtwal heeft de opgaande structuur van lijnvormige beplantingen zoals die nu worden geplant onder de noemer agroforestry. Door langs de bestaande houtwal te meten hebben we een indicatie van wat de jonge agroforestry-systemen op grasland in de toekomst op kunnen leveren aan ondergrondse koolstofvastlegging. Op elk perceel is in twee transecten bemonsterd van de rand richting het midden van het perceel, telkens gemeten van een rand met bomen en een rand zonder bomen (voor meer uitleg zie Hoogmoed et al., 2023). Er is gemeten op 0, 2, 5, 10 en 20 meter van de bomenrij om een breder beeld te krijgen van de reikwijdte van het effect van de boomstrook. Deze opzet van deze bemonstering is gebaseerd op de studie van Pardon et al. (2017) in België.

Tabel 4. Metingen aan lange termijn experimenten in de periode 2019 – 2021

Maatregel	Jaar	Klei	Zand
Akkerbouw			
NKG	2019	Centrale klei (Lelystad, Wageningen University & Research)	Zuidelijk zand (Vredepeel, Wageningen University & Research)
	2019	Vlaamse klei (Rumbeke-Beitem)	
Aandeel graan	2019	Zeeuwse klei (bedrijven - Zeeland)	Zuidelijk zand (Bedrijven - Brabant)
	2019	Centrale klei (bedrijven - Flevoland)	
	2020	Centrale klei (bedrijven - Flevoland)	
	2021	Centrale klei (bedrijven - Flevoland)	Zuidelijk zand (Bedrijven - Brabant)
Compost en dierlijke mest	2019	Centrale klei (Lelystad, WUR)	
	2019	Centrale klei (Lelystad, Louis Bolk Instituut)	
	2020	Vlaamse klei (Bierbeek, Bodemkundige Dienst België)	
Inzet groenbemesters	2020		Centraal zand (Wageningen, Wageningen University & Research)
	2021		Duitse leem (Asendorf, Catchy 2)
Meerjarige akkerranden	2020		Noordelijk zand (bedrijven - Groningen)
	2021	Centrale klei (bedrijven - Flevoland)	Noordoostelijk zand (bedrijven - Drenthe)
Veehouderij			
Agroforestry	2021	Centrale klei (Lelystad, WUR)	
Leeftijd grasland	2019	Noordelijke klei (bedrijven - Friesland)	Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)
	2020	Noordelijke klei (bedrijven - Friesland)	Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)
	2021		Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)
Kruidenrijk grasland	2020	Noordelijke klei (Leeuwarden, Dairy Campus)	Zuidelijk zand (Kelpen-Oler, kruidenproef Limburg)
	2021		Centraal zand (bedrijven - Gelderland)
Mais-gras-wisselteelt	2020		Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)
	2021		Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)
Agroforestry	2021		Zuidelijk zand (bedrijven - Brabant)

2.3 Statistiek

Data-analyse is uitgevoerd met het programma Rstudio (RStudio, 2018; R Development Core Team, 2013). De data-analyse is per maatregel en per LTE uitgevoerd op de metingen in de 0-30 cm bodemlaag. Vanwege de verschillende opzet van de proeven zijn verschillende analyses uitgevoerd. Voor de geblokte proeven met herhalingen is eerst getoetst of de data normaal verdeeld zijn. Bij een normale verdeling is een ANOVA-test uitgevoerd. Indien de data niet normaal verdeeld waren is een log-transformatie uitgevoerd waarna de verdeling in veel gevallen normaal bleek en alsnog een ANOVA-test kon worden uitgevoerd. Enkele parameters bleken niet normaal verdeeld. Hiervoor werd een Kruskal-Wallistest uitgevoerd. Bij een significant resultaat van een ANOVA is een *least significant difference* post-hoc test uitgevoerd om de verschillen tussen de behandelingen te bepalen.

Voor de maatregel leeftijd van grasland zijn de percelen onderverdeeld in de volgende categorieën: 0 jaar oud, 1-3 jaar oud en meer dan 12 jaar oud grasland. Hier is voor de statistische toets gekozen voor een *unbalanced* ANOVA-test doordat de categorieën niet uit hetzelfde aantal percelen bestond, met de leeftijdscategorie als behandeling.

De resultaten zijn weergegeven als respons-ratio's in tabelvorm, waarbij de waarde van de maatregel is gedeeld door de controle. In de samenvatting is dit vereenvoudigd tot een visualisatie met symbolen welke een toe- of afname vertegenwoordigen. Hier is gekozen voor een arbitraire grens van 10%.

2.4 Verkenning BLN 2.0

Elk van de systemen heeft plus- en minpunten als het gaat om het berekenen van de bijdrage van maatregelen aan ecosysteemdiensten. De BLN 2.0 werd voor dit project als een bruikbare systematiek gezien voor een eerste verkenning, ondanks enkele beperkingen die kunnen worden geconstateerd. In de systematiek van de BLN 2.0 is de bestaande kennis samengebracht van de relaties tussen bodemindicatoren – bodemfuncties – ecosysteemdiensten. Er zijn circa 40 relaties vastgesteld die het mogelijk maken de bijdrage van de bodem aan meerdere ecosysteemdiensten te kwantificeren. De BLN 2.0 systematiek wordt toegelicht door Ros et al. (2023).

Op basis van de verzamelde data is er, per maatregel, een doorrekening gemaakt met de BLN 2.0. Een beoordeling is gedaan op zowel gemeten waarden als data verkregen uit kaartmateriaal (zoals de grondwatertrap). Er is een beoordeling gemaakt voor vijf ecosysteemdiensten, daarvoor zijn in dit rapport afkortingen gebruikt: productiedienst (ecosysteemdienst primaire productie), waterdienst (ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen), koolstofdienst (ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie), kringloopdienst (ecosysteemdienst faciliteren van de nutriënten kringloop), biologiedienst (ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening). Achter elke ecosysteemdienst zitten bodemfuncties, waarmee een bodemproces of een combinatie van processen in beeld wordt gebracht (Ros et al., 2023). Bodemfuncties worden beoordeeld door middel van indicatoren, dit is een waarde, klasse of index waarmee de bijdrage dan wel relevantie van een bodemfunctie voor een ecosysteemdienst wordt beoordeeld (Ros et al., 2023). Achter de productiefunctie zitten zowel chemische, fysische als biologische functies. Gemeten waarden van bodemmetingen worden (alleen of in combinatie met elkaar) hier vergeleken met agronomische streefwaarde voor de landbouwkundige productiefunctie. De kringloopfunctie is gelijk aan de chemische functie van de productiefunctie, waarbij streefwaarden zijn gedefinieerd voor een optimale inzet van meststoffen en een goede bodemkwaliteit. Voor biologische bodemparameters zijn geen streefwaarden bekend voor het optimaliseren van de biodiversiteit en habitatvoorziening, en deze indicatoren zijn daarom in dit rapport niet meegenomen. Voor de waterdienst en koolstofdienst zijn specifieke streefwaarden gedefinieerd in relatie tot de opgaven voor waterkwaliteit van grondwater en oppervlaktewater, voortbouwend op de (regionale) doelen van de KRW en Nitraatrichtlijn. Voor de klimaatdienst zijn streefwaarden gedefinieerd die uitgaan van een maximale koolstofvastlegging in minerale bodems. Daarnaast hebben er twee proeven in het buitenland gelegen, hier kon geen BLN 2.0 doorrekening van worden gemaakt. Ook de maatregel gras-mais-wisselteelt in Overijssel is niet met de BLN 2.0 doorgerekend, omdat er geen statistische analyse is gedaan over de BLN 2.0 resultaten en de verschillen in grondsoort niet als factor meegenomen zijn, zoals dat wel bij de statistische analyse van de BLN 1.0 indicatoren is gedaan. De score op de BLN 2.0 indicatoren en ecosysteemdiensten lopen uiteen tussen 0 (laag) en 1 (optimaal), waarbij de beoordeling de maximale waarde krijgt zodra de streefwaarde voor een specifieke ecosysteemdienst wordt bereikt. Met andere woorden, bodems met een kwaliteit die ver afwijkt van de streefwaarden hebben een slechtere kwaliteit dan bodems waarbij de streefwaarden worden gerealiseerd (Ros et al., 2023). De BLN 2.0 scores zijn niet getoetst op significantie.

3 Resultaten en discussie

3.1 BLN 1.0 metingen

3.1.1 Meetresultaten

Het effect van alle maatregelen gemeten in de periode 2019-2021 op de bodemkwaliteit wordt weergegeven door middel van de relatieve respons in Tabel 5 voor klei en in Tabel 6 voor zand. Een relatieve respons geeft het effect van een maatregel weer ten opzichte van de controle, en geeft daarmee met één getal inzicht in de effectgrootte van een maatregel. Bijvoorbeeld een relatieve respons van 1 betekent dat er geen verschil is gevonden, terwijl een relatieve respons van 1,5 betekent dat de gemeten waarde in de behandeling 50% groter was dan in de controle. De relatieve respons geeft enkel de effectgrootte weer, en staat niet gelijk aan een verbetering of verslechtering. Er is geen aggregatie naar ecosysteemdiensten gemaakt, het beschrijft slechts het optreden van een verandering op de afzonderlijke bodemindicatoren.

Aanvoer organische stof

Op de kleigronden in Lelystad werd een effect gevonden op verschillende indicatoren. De aanvoer van organische mest of compost had een neutraal tot verhogend effect op de verschillende organische stof indicatoren, op N-totaal en de bacteriebiomassa. De effecten traden met name op bij een hoge dosering van compost, bij dierlijke mest werd dit minder zichtbaar. Met compost zijn grote hoeveelheden stikstof aangevoerd. Dit werd zichtbaar in de bodemvoorraad, maar niet in de Nmin. Bovendien leidde de aanvoer van potstalmest tot een lagere bulkdichtheid. Ook bij de proef in Vlaanderen werden er veel effecten waargenomen. De aanvoer van compost leidde tot een verhoging van de organische stof indicatoren, tot een wat lagere bulkdichtheid, zorgde voor een toename van bodemnutriënten (behalve Nmin) en bacteriën en schimmels in de bodem.

Aandeel graan

Op kleigronden werd een verschil gemeten in de bodemkwaliteit tussen percelen met veel en weinig graan. Bij percelen met veel graan werd een hogere HWC, een lagere indringingsweerstand, een grotere bodemvoorraad aan stikstof en meer microbiële biomassa gemeten. Op de overige nutriënten en organische stof indicatoren had deze maatregel geen meetbaar effect. Op de zandgronden werd geen enkel significant effect gevonden.

Meerjarige akkerranden

Bij de meerjarige akkerranden op klei werd op een aantal vlakken een significant verschil gemeten ten opzichte van het aangrenzende perceel. Er werd een significante verhoging gevonden van de organische stof indicatoren. Ook werd er een significant hogere indringingsweerstand gevonden. Daarnaast werden er significant hogere concentraties aan nutriënten gemeten, waaronder N-totaal (NIRS), de K-voorraad en plantbeschikbare K. Ook werd er significant meer microbiële biomassa gemeten, waaronder meer schimmels. Op zand werden minder significante verschillen gevonden, er werd bij akkerranden een significant hogere indringingsweerstand gemeten en een lagere beschikbaarheid van fosfaat.

Groenbemesters

Bij de proef op zand is slechts een significant effect gevonden op de plantbeschikbare kalium, dit was het geval voor de bladrammenas en de bladrammenas + Japanse haver. Op de overige bodemaspecten werden geen significante effecten gevonden. Bij de proef op leem werden geen effecten gevonden in de rotatie met mais. In de rotatie met veldboon had

de teelt van gele mosterd een significant effect op de plantbeschikbare kalium en hadden alle groenbemesterobjecten een verhogend effect op het watervasthoudend vermogen.

Niet-kerende grondbewerking

Op de kleigronden werd nauwelijks een effect gemeten. Enkel op de Vlaamse klei werd een significant hogere bulkdichtheid en een significant lagere pH gemeten. Op de zuidelijke zandgrond werd wel een duidelijk effect van NKG gevonden. Bij niet-kerende grondbewerking werd een significant hogere indringingsweerstand en bulkdichtheid gemeten. Ook werd er een significant hogere hoeveelheid beschikbaar kali gemeten.

Kruidenrijk grasland

Bij de proef op noordelijke klei werden met name effecten vastgesteld wanneer er gebruik was gemaakt van vaste mest en uitgestelde maaidatum (Schepens et al., 2022). Bij het biodivers primair weidevogelmengsel werd een hoger organisch koolstofgehalte vastgesteld en bij biodivers functioneel weidevogelmengsel een lagere HWC. Bij de objecten met drijfmest werd een lagere Nmin vastgesteld bij biodivers primair weidevogelmengsel ten opzichte van de controle (Schepens et al., 2022). Op zuidelijk zand werden meer scherpblokkige delen aangetroffen bij het biodivers functioneel weidevogelmengsel (Schepens et al., 2022). Op centraal zand werd bij extensief kruidenrijk grasland een lagere HWC, lagere pH en lagere beschikbaarheid van kalium vastgesteld ten opzichte van de controle (Hoogmoed et al., 2023).

Leeftijd grasland verhogen

Op de kleigronden gaat het om het wel of niet scheuren van grasland. Er werd enkel een effect gevonden op het watervasthoudend vermogen. Op zandgronden gaat het om het aantal jaar nadat bouwland omgezet is naar grasland. Hier zijn grote verschillen gevonden. In ouder grasland was het bodemorganisch (kool)stofgehalte hoger dan bij jonger grasland, ook werd er een iets lagere indringingsweerstand en bulkdichtheid gemeten. Daarnaast hadden de percelen met oud grasland een hogere stikstofvoorraad, en werd er een hogere PMN, microbiële biomassa, bacteriële- en schimmelbiomassa gemeten (Hoogmoed et al., 2023).

Gras-mais-wisselteelt

Bij een gras-mais-wisselteelt werden hogere waarden gevonden voor de bodemorganisch stof indicatoren, een hogere indringingsweerstand, een iets hogere bulkdichtheid, een hoger bodemstikstofgehalte, een lagere fosfaat en kali en meer microbiële biomassa, zowel voor bacteriën en schimmels. De effecten op de bodemorganische stof werden alleen op de zuidelijke zandgrond gevonden, en niet op de centrale zandgrond.

Agroforestry

Er werden significante verschillen gevonden in het bodemorganisch stofgehalte, HWC, scherpblokkige delen en bodemnutriënten. Het effect was groter dicht bij de bomenrij dan richting het midden van het perceel. Toch werden de verschillen ook op 20 meter afstand van de bomenrij nog vastgesteld (Hoogmoed et al., 2023). Ook voor de biologische bodemindicatoren werden hogere waarden gevonden bij de bomenrij ten opzichte van de controle, de verschillen waren echter niet significant.

Tabel 5. Relatieve responsen voor maatregelen gericht op koolstofvastlegging op kleipercelen bemeten in de periode 2019-2021, een significant verschil ten opzichte van de controle ($P < 0,05$) is dikgedrukt.

	Meting	Eenheid	Akkerbouw							Veehouderij	
			NKG		Aanvoer organische stof*			Aandeel graan	Akkerranden	Kruidenrijk grasland	Leeftijd grasland verhogen**
			Centrale klei	Vlaamse klei	BASIS	MAK	België				
Organische stof	C-ele	%	1,05	0,97	1,12 - 1,25	0,99 - 1,28	1,43 - 2,08	1,36	1,29	0,97 - 1,16	1,04
	OS-gloei	%	1,07	0,98	1,05 - 1,35	1,07 - 1,34	1,35 - 1,89	1,33	1,32	0,96 - 1,05	1,05
	OS - N	%	1,01	1,02	1,03 - 1,17	1,07 - 1,29	1,33 - 1,88	1,35	1,36	0,95 - 1,05	1,04
	HWC	mg kg ⁻¹	1,03	1,00	1,08 - 1,20	1,00 - 1,31	1,18 - 1,76	1,29	1,26	0,85 - 1,13	1,18
Fysisch	Indr max	MPa	1,60	1,32	0,77 - 0,86	0,93 - 2,86	0,85 - 1,16	-0,55	1,79	0,95 - 1,14	0,86
	Indr gem.	MPa	1,94	1,39	0,69 - 1,10	0,67 - 1,83	0,81 - 1,21	0,50	1,92	1,00 - 1,09	0,86
	bd	kg Cl ⁻³	1,05	1,03	0,99 - 1,01	0,94 - 1,00	0,91 - 0,96	-0,91	1,02	1,00 - 1,06	0,94
	WVV	%	0,96	0,97	1,03 - 1,07	0,70 - 1,10	1,02 - 1,06	1,00	1,13	0,89 - 1,02	1,10
	% Scherpb	%	0,89	1,20	0,00 - 0,63	0,67 - 1,07	0,96 - 1,11	-1,09	1,04	0,97 - 1,14	0,75
	Beworteling	index 0-2	1,00	1,00	1,75 - 1,75	0,50 - 2,00	1,00 - 1,00	1,21	2,00	1,00 - 1,00	0,91
Chemisch	pH-CaCl ₂	-	1,00	0,98	0,99 - 1,00	1,00 - 1,01	1,04 - 1,06	1,00	0,99	0,97 - 1,02	0,97
	N-tot N	g N kg ⁻¹	1,04	0,96	1,01 - 1,16	1,00 - 1,26	1,33 - 1,83	1,36	1,37	0,95 - 1,03	1,06
	N-tot K	g N kg ⁻¹	1,05	0,98	1,15 - 1,16	1,05 - 1,33	1,41 - 2,11	1,41	1,22	0,96 - 1,05	1,09
	N-min	kg ha ⁻¹	1,03	0,81	0,90 - 1,02	1,04 - 2,06	1,08 - 1,32	0,99	0,68	0,71 - 1,06	0,80
	P-PAE	mg P kg ⁻¹	1,22	1,30	0,48 - 0,51	1,00 - 1,78	0,98 - 2,25	1,30	0,61	0,80 - 0,84	0,88
	Pw	mg P ₂ O ₅ L ⁻¹	1,01	1,00	0,85 - 1,02	0,94 - 1,23	1,08 - 1,96	1,22	1,02	0,88 - 0,95	0,94
	PAL	mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹	0,96	0,90	0,99 - 1,09	0,92 - 1,19	1,26 - 2,12	1,28	1,15	0,81 - 0,99	0,90
	K-PAE	mg K kg ⁻¹	0,91	0,95	0,82 - 1,13	0,93 - 2,00	2,04 - 4,67	1,30	0,84	0,85 - 0,93	1,09
	K-voor N	Mmol+ K kg ⁻¹	1,12	1,14	1,14 - 1,26	1,00 - 1,16	1,35 - 1,81	1,39	1,16	0,91 - 1,08	1,10
Biologisch	PMN N	mg N kg ⁻¹	0,95	1,00	1,00 - 1,06	0,82 - 1,22	0,95 - 1,27	1,65	1,18	1,00 - 1,10	1,07
	Microb bio	mg C kg ⁻¹	1,25	0,86	1,31 - 1,93	0,66 - 0,99	1,47 - 1,85	1,61	1,48	0,96 - 1,11	1,10
	Bact bio	mg C kg ⁻¹	1,22	1,04	1,32 - 1,46	0,84 - 1,38	1,54 - 1,81	1,68	1,24	0,94 - 1,06	1,05
	Schim bio	mg C kg ⁻¹	1,52	0,93	0,86 - 1,28	0,39 - 1,02	1,41 - 1,70	1,56	1,73	0,93 - 1,26	1,13

* Hier wordt een vergelijking gemaakt tussen organisch bemesten (dierlijke mest en/of compost) en kunstmest. ** geen graslandvernieuwing.

Tabel 6. Relatieve responsen voor maatregelen gericht op koolstofvastlegging op zandpercelen bemeten in de periode 2019-2021, een significant verschil ten opzichte van de controle ($P < 0,05$) is dikgedrukt.

	Meting	Eenheid	Akkerbouw					Veehouderij			
			NKG	Groenbemesters		Aandeel graan	Akker randen	Kruidenrijk grasland	Leeftijd grasland verhogen**	Mais-gras wisselteelt***	Agroforestry
				Centraal zand	Duitse leem						
Organische stof	C-ele	%	0,90	0,94 - 1,06	0,98 - 1,05	0,98	0,84	0,87 - 1,06	1,30	1,06	1,23
	OS-gloeï	%	0,90	0,95 - 1,03	0,93 - 1,01	0,99	0,86	0,90 - 1,02	1,29	1,04	1,26
	OS - N	%	0,93	0,97 - 1,22	0,95 - 1,06	1,06	0,90	0,86 - 1,05	1,29	1,05	1,27
	HWC	mg kg ⁻¹	0,94	1,00 - 1,09	0,95 - 1,07	0,87	0,98	0,97 - 1,01	1,44	1,08	1,39
Fysisch	Indr max	MPa	1,32	1,60 - 2,23	0,86 - 1,01	0,95	1,26	0,95 - 1,14	0,83	1,02	0,96
	Indr gem.	MPa	1,24	1,49 - 2,04	0,82 - 1,09	1,05	1,39	0,88 - 1,08	0,90	1,02	0,89
	bd	kg m ⁻³	1,06	1,00 - 1,02	0,96 - 1,02	1,01	1,02	0,97 - 0,99	0,95	1,00	0,98
	WV	%	4,47	1,01 - 1,10	0,99 - 1,10	1,30	0,92	0,96 - 1,06	1,24	1,02	1,02
	% Scherpb	%	0,43	0,79 - 1,00	0,78 - 0,90	0,78	1,14	1,06 - 1,50	1,76	1,04	0,64
	Beworteling	index 0-2	1,00	1,00 - 1,67	0,00 - 1,00	1,00	1,92	1,00 - 1,40	1,00	0,99	1,00
Chemisch	pH-CaCl ₂	-	1,00	1,00 - 1,01	0,99 - 1,06	0,95	0,97	0,97 - 1,00	0,91	0,99	1,00
	N-tot N	g N kg ⁻¹	0,96	1,06 - 1,27	0,97 - 1,07	1,15	0,95	0,92 - 1,05	1,38	1,07	1,23
	N-tot K	g N kg ⁻¹	0,86	-	0,91 - 1,05	0,96	0,88	0,94 - 1,01	1,35	1,06	1,70
	N-min	kg ha ⁻¹	0,96	0,99 - 1,31	1,08 - 1,18	1,02	0,69	0,90 - 1,10	1,36	1,08	1,47
	P-PAE	mg P kg ⁻¹	1,06	0,93 - 1,12	1,17 - 1,38	1,90	0,37	1,03 - 1,13	0,74	0,84	1,92
	Pw	mg P ₂ O ₅ L ⁻¹	1,02	0,90 - 1,05	1,07 - 1,19	1,53	0,61	0,95 - 1,03	0,55	0,87	1,53
	PAL	mg P ₂ O ₅ 100g ⁻¹	1,02	0,88 - 1,05	1,04 - 1,25	1,21	0,80	0,93 - 1,03	0,48	0,88	1,33
	K-PAE	mg K kg ⁻¹	1,09	1,15 - 1,34	0,87 - 1,11	0,99	0,79	0,52 - 1,09	0,69	0,97	1,67
	K-voor N	Mmol+ K kg ⁻¹	0,98	0,98 - 1,27	0,99 - 1,20	1,02	1,12	0,83 - 1,04	1,06	1,02	1,17
Biologisch	PMN N	mg N kg ⁻¹	0,95	1,08 - 1,35	0,91 - 1,33	1,27	1,02	0,86 - 1,26	1,84	1,13	1,18
	Microb bio	mg C kg ⁻¹	1,46	0,97 - 1,27	0,91 - 1,01	1,10	0,95	1,00 - 1,15	1,85	1,10	1,21
	Bact bio	mg C kg ⁻¹	1,10	0,78 - 1,35	0,86 - 1,13	1,36	1,10	0,97 - 1,19	1,63	1,11	1,11
	Schim bio	mg C kg ⁻¹	1,18	0,75 - 1,38	0,95 - 1,24	1,19	0,73	0,83 - 1,36	2,03	1,10	1,71

* Hier wordt een vergelijking gemaakt tussen compost aanvoeren en kunstmest. ** Het niet of later omzetten van grasland naar bouwland. *** Op de organische stof indicatoren werd enkel bij de proef op zuidelijk zand een significant effect vastgesteld, voor P-PAE, Pw, PAL en K-PAE gold dat alleen voor de proef op centraal zand.

3.1.2 Discussie

De meetresultaten zijn vergeleken met proefresultaten zoals beschreven in de literatuur. De lange termijnproeven zijn met verschillende onderzoeksvragen opgestart. Waar mogelijk worden resultaten uit dezelfde lange termijnproeven, maar uitgevoerd binnen andere onderzoeksprojecten, hier vergeleken. De literatuurstudie was primair gericht op effecten van maatregelen op de bodemkwaliteit, ook is er gekeken in hoeverre de maatregelen een effect hadden op ecosysteemdiensten en hebben geleid tot hogere opbrengsten.

Aanvoer organische stof

Organische stof

Op de bodemorganische stof indicatoren werden effecten gemeten. Bij MAK bleef het effect hierop beperkt tot de aanvoer van natuurcompost (dosering van $\sim 15 \text{ ton ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$), met een gehalte van 2,3%. Dit kwam waarschijnlijk doordat er met natuurcompost de meeste organische stof werd aangevoerd (Hoogmoed et al., 2021). Op basis van tijdreeksen werd voor deze proef vastgesteld dat het bodemorganisch stofgehalte het sterkst gestegen was als gevolg van de natuurcompost (een stijging van 41% tot een gehalte van 2,3%), dit gold ook voor de HWC (Bokhorst et al., 2008; Koopmans en Bloem, 2018). Het is onduidelijk waarom er in deze studie geen significant effect werd gevonden voor de potstalmest en de combinatie van GFT-compost en drijfmest, omdat door Koopmans en Bloem (2018) in eerdere studie namelijk wel een effect was vastgesteld (een toename van 22% tot een gehalte van 1,95%). Mogelijk komt dit verschil doordat er in dit project is gemeten in de laag 0-30 cm en Koopmans en Bloem (2018) hebben gemeten in de laag 0-20 cm. Daarnaast is de dosering van belang (Koopmans en Bloem, 2018). Bij de proef in Vlaanderen en BASIS werden aanzienlijk hogere doseringen gehanteerd. In Vlaanderen werd al vanaf 15 ton een verhoging van het bodemorganisch (kool)stofgehalte gevonden ten opzichte van de controle, bij een hogere dosering werd een hoger bodemorganisch (kool)stofgehalte gevonden. De HWC was hoger vanaf 30 ton compost $\text{ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$. Dit is lijn met de resultaten van De Clercq et al. (2016) en Pangea et al. (2021; 2022), enkel was het verschil tussen de dosering met 15 ton $\text{ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ten opzichte van de controle niet significant. Bij BASIS werd alleen een significant effect gemeten op het bodemorganisch koolstofgehalte bij de dosering van 20 ton compost $\text{ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ten opzichte van de controle en niet voor de andere parameters, dit komt mogelijk door de kortere looptijd ten opzichte van de andere proeven (8 ten opzichte van 20 en 23 jaar). Bij de dosering van 40 ton compost $\text{ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ werd wel voor alle bodemorganische stof indicatoren een verhoging gevonden.

Het effect van organische stof aanvoer op het verhogen van de bodem-C is veelvuldig onderzocht (Willekens et al., 2014; D'hose et al., 2016; Leroy, 2008; Cougnon et al., 2010). Kort samengevat is het aannemelijk dat de aanvoer van compost het bodemorganisch koolstofgehalte laat stijgen, bij een gift van 15 ton compost $\text{ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ kan het enkele jaren duren voordat het effect zichtbaar wordt.

Bodemstructuur

Op de bodemstructuur werd beperkt effect gemeten door de aanvoer van organische stof. Enkel bij de aanvoer van potstalmest (MAK) en compost (Vlaanderen) werd een verlaging van de bulkdichtheid vastgesteld. Het gemeten effect in Vlaanderen komt overeen met eerdere metingen. Ook werd er bij een hoge dosering een betere infiltratiecapaciteit, meer grote aggregaten, een hogere aggregaatstabiliteit en een beter watervasthoudend vermogen gemeten (De Clercq et al., 2016; Pangea et al., 2021; 2022). Bij BASIS werd geen effect gemeten of visueel effect waargenomen, de reden daarvan is onbekend (Selin Norén et al., 2022). In MAK werd geen effect van compost gevonden maar wel van potstalmest. Koopmans en Bloem (2018) hebben in dezelfde proef aan de bodemstructuur gemeten, en vonden bij geen enkel materiaal een effect. Het effect van de aanvoer van organisch materiaal op de bodemstructuur blijkt niet eenduidig (D'Hose et al., 2016; Willekens et al., 2014; Leroy, 2008). In enkele studies werd al na vier jaar bij een dosering van 15 ton compost $\text{ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ een verbetering van de bodemstructuur gevonden, terwijl dit in andere proeven zelfs bij hogere doseringen niet het geval was.

Nutriënten

Het effect op de nutriënten in de bodem hangt sterk af van de toegevoegde hoeveelheid nutriënten ten opzichte van de controle. Bij BASIS is er in de bemesting met kunstmest nauwelijks gecorrigeerd voor de nutriënten in compost, in de compost objecten werden daarom meer nutriënten aangevoerd. Dit verschil in aanvoer werd in de bodemvoorraad van K en P niet terug gemeten. Dit komt mogelijk doordat de bouwvoor grote hoeveelheden P bevat, extra giften komen daarom mogelijk beperkt tot uiting of vallen binnen de meetfout. Waarom de aanvoer van kalium niet wordt teruggevonden in de bodem is onduidelijk. Voor stikstof werd de hogere aanvoer wel teruggevonden in de totale stikstofvoorraad, in de Nmin gemeten in het najaar in de laag 0-30 cm niet. Dit betekent dat de organische stikstof in de compost (nog) beperkt is gemineraliseerd (Timmermans et al., 2023). Selin Norén et al. (2022) vonden in dezelfde proef wel een hogere Nmin in het najaar bij de hoge dosering, maar de resultaten waren niet eenduidig. Mogelijk is er dus een risico op uitspoeling, zoals voor een proef op zand is gevonden (Selin Noren et al., 2022). Ook bij MAK verschilde de aanvoer van nutriënten tussen de behandelingen: hier werd slechts een effect gevonden op de totale N voorraad en enkel bij de natuurcompost. Koopmans en Bloem (2018) vonden dit effect ook voor de potstalmest (gemeten in de laag 0-20 cm). Bakker et al. (2020) geven, op basis van een model-analyse, aan dat het risico op uitspoeling bij toevoeging van natuurcompost niet is toegenomen maar bij de potstalmest en de combinatie tussen GFT-compost en drijfmest wel. Bij de proef in Vlaanderen is geprobeerd de aanvoer van werkzame stikstof bij de compost aanvoer gelijk te houden aan de controle (De Clercq et al., 2016). Ook hier werd een hogere N-totaal gemeten na het toedienen van compost, en ook hier werd geen effect op de Nmin gevonden (Schepens et al., 2022). Blijkbaar speelde in het jaar van monsternamen geen ontijdige mineralisatie. Bij hogere doseringen compost (30-45 ton ha⁻¹ jr⁻¹) werd een effect gevonden op de voorraden en beschikbaarheid van P en K.

Bodembiologie

De bodembiologie leek te profiteren van de aanvoer van organisch materiaal. Op basis van een meta-analyse uitgevoerd op Europese proeven werd een significante toename van de microbiële biomassa vastgesteld (D'Hose et al., 2018). Bij BASIS gold dit overigens enkel voor de toediening met 40 ton compost ha⁻¹ jr⁻¹ (Hoogmoed et al., 2021). Bij de proef in Vlaanderen werd daarentegen wel al een effect gevonden bij de dosering van 15 ton ha⁻¹ jr⁻¹: enkel de schimmels profiteerden pas van een gift van 30 ton ha⁻¹ jr⁻¹ (Schepens et al., 2022). Hier werd ook een meer diverse soortensamenstelling van schimmels gevonden (Hannula et al., 2021). Bij MAK profiteerde de bodembiologie niet. Omdat er een relatie bestaat tussen het bodemorganisch koolstofgehalte en de microbiële biomassa (D'Hose et al., 2016; Leroy, 2008), is het opvallend dat het toedienen van natuurcompost in MAK wel heeft geleid tot een hoger bodem koolstofgehalte, maar niet tot een significante toename van de microbiële biomassa. Koopmans en Bloem (2018) vonden in deze proef significant meer bodemschimmels (gemeten in 0-20 cm) bij de controle. Mogelijk zou dit door de lagere nutriëntgehalten in de bodem komen, waardoor mycorrhiza's een actievere rol zijn gaan spelen. Dit lijkt niet bevestigd te worden op basis van andere proeven (Hannula et al., 2021; Willekens et al., 2014). De effecten van maatregelen op bodemschimmels zijn erg locatiespecifiek, en hangen voor een groot deel samen met het geteelde gewas en klimaat (Hannula et al., 2021). Mogelijk speelt ook de kwaliteit van de compost een rol.

Gewasopbrengsten

Bij BASIS werd een positief effect gevonden op de opbrengst van graan (+14% en +24% bij resp. 20 en 40 ton compost), op erwten (+8% bij 20 ton compost) en op pootaardappel (+1% bij 40 ton compost; Selin Norén et al., 2022). Bij MAK leidde elke organische bemesting tot een hogere opbrengst in vergelijking met de controle (minerale bemesting). De hoogste opbrengsten werden gevonden voor de bemesting met kippenmest, potstalmest en de combinatie van GFT-compost en drijfmest (Koopmans & Bloem, 2018). Er werd hier gestreefd naar eenzelfde beschikbaarheid van minerale stikstof voor het gewas, wat (mede door de fosfaatsnormen) leidde tot verschillen in totale aanvoer van stikstof fosfaat. In Vlaanderen werd geen significant effect gevonden van het toedienen van compost op de gewasopbrengsten (De Clercq et al., 2016).

Aandeel graan

Organische stof

Door de grote variatie tussen percelen, met name op zand, werd geen significant effect vastgesteld van een hoger aandeel graan op het bodemorganisch (kool)stof gehalte. Er is wel data beschikbaar van enkele proeven op kleigronden. Bij een vergelijking tussen rotaties met of zonder graan was het bodemorganisch stof gehalte, na 12 jaar, hoger bij de rotaties met dan zonder graan (Flood et al., 1992). Ook bij een hoger percentage graszaadteelt in de rotatie werd een hoger bodemorganisch stofgehalte gemeten (Hoekstra & Lamers, 1993). Bij een andere proef met verschillende frequenties van aardappel werd geen verschil vastgesteld (Hoekstra & Lamers, 1993). In een andere proef werd een vruchtwisseling met 100% rooivuchten vergeleken met een vruchtwisseling met wintertarwe en een groenbemester. Na 9 jaar werd geen effect gevonden op het bodemorganisch stofgehalte, dit kwam waarschijnlijk door de hogere organische bemesting in de rotatie met veel rooivuchten (Rops et al., 1996). Ook op de bemonsterde praktijkpercelen zijn dit soort effecten niet uit te sluiten. De bijdrage van graangewassen aan het bodemorganisch (kool)stofgehalte wordt op basis van modelberekeningen en experimentele gegevens verder onderbouwd door Slier et al. (2021).

Nutriënten

Met een ander bouwplan verschuift ook de aan- en afvoer van nutriënten. In hoeverre er meer nutriënten aan- en afgevoerd worden hangt af van het type graan dat wordt geteeld, of het stro wordt ondergewerkt of afgevoerd en welke gewassen er worden vervangen door graan. Op basis van de praktijkpercelen is het lastig vast te stellen wat de oorzaak is van een hogere bodemstikstofvoorraad bij veel ten opzichte van weinig graan op de kleipercelen.

Bodemstructuur

In de bemonsterde praktijkpercelen werd nauwelijks een effect van het aandeel graan op de bodemstructuur gevonden. Enkel op de kleipercelen werd er bij een hoger aandeel graan in rotatie een lagere indringingsweerstand gevonden. Een lagere indringingsweerstand na graan werd ook gevonden door Hoekstra en Lamers (1989). In meerdere proeven werd een effect van het geteelde gewas op de bodemstructuur vastgesteld (Hoekstra en Lamers, 1989; 1993). Gezien over de vruchtwisseling bleef dit verschil niet bestaan. Over de gehele vruchtwisseling was het effect op de bodemstructuur beperkt (Hoekstra en Lamers, 1993; Rops et al., 1996).

Bodembiologie

Bij de percelen op klei werd meer microbiële biomassa gemeten met meer graan in het bouwplan. Dit komt mogelijk door een hogere organische stof aanvoer bij een extensiever bouwplan. Wijnholds et al. (2004) hebben niet direct aan bacteriën en schimmels gemeten, maar wel aan saprofytten nematoden. Deze aantallen waren hoger bij een ruimer bouwplan. Zij schreven dat effect toe aan een hogere organische stof aanvoer bij een extensiever bouwplan, wat heeft geleid tot meer bacteriën en dus een hogere voedselbeschikbaarheid voor de saprofytten nematoden.

Opbrengst

In een aantal studies is er gekeken naar het effect van de vruchtwisseling op de gewasopbrengst. Het effect op de aardappelopbrengst was niet eenduidig. Bij een proef op klei en zand werd een significant hogere opbrengst gevonden bij een ruimere vruchtwisseling (Flood et al., 1992; Wijnholds en van den Berg, 1995; Wijnholds et al., 2004). Bij proeven op klei en dalgronden werd geen significant effect gevonden op de aardappelopbrengsten (Rops et al., 1996; Wijnholds en van den Berg, 1995; Wijnholds et al., 2004). Dit komt deels door het toepassen van resistente rassen, waardoor het effect van ziekten minder tot uiting komt. Op een klei- en dalgrond had de vruchtwisseling geen effect op de opbrengst van suikerbieten (Flood et al., 1992; Wijnholds en van den Berg, 1995; Wijnholds et al., 2004). Op een zandgrond werd wel een hogere suikerbiet opbrengst gevonden bij een teelt van 1:3 of 1:4 ten opzichte van 1:2 (Wijnholds en van den Berg, 1995; Wijnholds et al., 2004). Ook tulpen profiteerden van meer graan in het bouwplan (Rops et al., 1996).

Meerjarige akkerranden

Organische stof

Enkel in Flevoland werden significant hogere organische stof indicatoren gemeten in de akkerrand, dit terwijl de bovengrondse biomassa werd afgevoerd. Vermoedelijk komt dit door verhoogde organische stof aanvoer door gewasresten, zoals wortels (Hoogmoed et al., 2023). Opvallend is dat in Groningen geen hogere organische stof gehalten werden gemeten in de akkerranden, aangezien hier grasachtigen werden geteeld. In grasachtige akkerranden wordt namelijk doorgaans een hoger bodemorganisch koolstofgehalte gemeten dan in het aangrenzende perceel (van Vooren et al., 2017). Mogelijk komt het gebrek aan een effect doordat er op de helft van de referentiepercelen gerst en hennep werd verbouwd, welke ook veel organische stof achterlaten. Een mogelijke andere verklaring voor het ontbreken van een effect is dat er gemeten is op een veenkoloniale bodem, waardoor significante verschillen lastig aan te tonen zijn als gevolg van grote ruimtelijke variatie en daarmee samenhangende meetfout (Schepens et al., 2022).

Bodemstructuur

Op elk van de drie meerjarige akkerranden werd een hogere indringingsweerstand gemeten. Dit komt vermoedelijk doordat er minder tot geen bodembewerkingen plaatsvinden in de meerjarige akkerranden, waardoor de bodem niet of minder losgemaakt wordt (Hoogmoed et al., 2023). De akkerranden in Groningen werden daarentegen wel regelmatig ondergewerkt en opnieuw ingezaaid. Het is aannemelijk dat de meerjarige akkerranden, op alle locaties, gebruikt zijn als rijpad (Schepens et al., 2022; Hoogmoed et al., 2023). Hierdoor is waarschijnlijk verdichting opgetreden waardoor de indringingsweerstand toenam.

Nutriënten

Het is de verwachting dat er bij meerjarige akkerranden welke niet worden bemest verschraling optreedt, met name als het maaisel wordt afgevoerd. Bij de afvoer van maaisel is de afvoer van bijvoorbeeld stikstof ca. $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$, welke kan oplopen tot $175 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ (Clevering et al., 2005). In Drenthe werd de biomassa niet afgevoerd, er werd geen verschraling in de bodemnutriënten gemeten. Significante verschillen zijn voor deze locatie lastig vast te stellen, gezien het beperkt aantal metingen (Hoogmoed et al., 2023). In Groningen leek wel verschraling op te treden in de bodemnutriënten, er werd een significant lagere voorraad en beschikbaarheid aan fosfaat gemeten (Schepens et al., 2022). Het is mogelijk dat dit komt doordat er op de aangrenzende percelen nutriënten zijn aangevoerd met bemesting, terwijl dit voor de akkerranden niet het geval was. In Flevoland werd de biomassa afgevoerd, er werden echter geen lagere nutriëntgehalten gemeten dan bij het aangrenzende perceel. Omdat er geen aan- en afvoergegevens van de nutriënten van het aangrenzende perceel bekend zijn, is het lastig te beoordelen of een verschil in nutriëntgehalten tussen de akkerrand en het aangrenzende perceel verwacht kon worden. In de akkerrand werd een hogere voorraad aan stikstof en kalium gemeten, maar een lagere beschikbaarheid. Een mogelijke verklaring kan zijn dat de stikstof organisch gebonden was en de kalium sterk gebonden was aan de organische stof (Hoogmoed et al., 2023). Een andere verklaring kan zijn dat nutriënten uit het aangrenzende perceel in de akkerrand terecht zijn gekomen. Uit eerder onderzoek bleek dat akkerranden met gras een groot deel van de stikstof en fosfaat door boven- en ondergrondse laterale afspoeling onderscheppen (van Vooren et al., 2017; Bos et al., 2014; Clevering et al., 2005).

Bodembiologie

Bij de akkerranden op zand werd geen effect op de bodembiologie vastgesteld. Dit valt samen met de afwezigheid van een hoger bodemorganisch stofgehalte. Daarbij werden de akkerranden in Groningen geregeld bewerkt en opnieuw ingezaaid (Schepens et al., 2022). Deze verstoring kan het bodemleven, met name schimmels, in de weg staan. Op klei werd wel meer microbiële biomassa en schimmels gevonden in de meerjarige akkerranden ten opzichte van het aangrenzende perceel. Dit valt samen met een hoger bodem organische stof gehalte, wat een voedingsbron is voor

micro-organismen (Hoogmoed et al., 2023). Bovendien vonden er geen bodembewerkingen plaats in deze meerjarige akkerranden, waar vooral schimmels van profiteren.

Opbrengst

De aanleg van meerjarige akkerranden op landbouwpercelen gaat ten koste van productieve grond. In de eerste plaats betekent dit dus een verlies aan opbrengst. De bijdrage aan een betere gewasgroei in het perceel, bijvoorbeeld door natuurlijke plaagbestrijding, is niet eenduidig. Van Voren et al. (2017) vonden meer soorten en aantallen natuurlijke vijanden in grasstroken en aangrenzende percelen ten opzichte van percelen zonder grasstroken. Op opbrengst werd geen effect verwacht. Ook Bos et al. (2014), Clevering et al. (2005), van Alebeek en van Kruistum (2004) en van Rijn (2018) vonden een hogere biodiversiteit en in enkele gevallen meer natuurlijke vijanden in percelen met een akkerrand. Een optimale plaagbestrijding is van vele factoren afhankelijk, zo moet de akkerrand op het juiste moment en voor de juiste soorten onderdak of voeding bieden (van Rijn & Wäckers, 2007). Daarnaast is het hele landschapsniveau van belang wanneer het om plaagonderdrukking gaat.

Groenbemesters

Organische stof

In beide proeven werd geen effect gevonden van de groenbemesterteelten op de bodemorganische stof. Voor de proef op zand is dat in lijn met eerdere metingen (Porre, 2020; Barrel et al., 2017). Ook in koolstoffracties, zoals *dissolved organic carbon* en *permanganate oxidisable carbon* werden geen verschillen aangetoond (Porre, 2020). Ook in de proef in Duitsland werden geen significante effecten gevonden (Gentsch et al., 2023). Het gebrek aan effect van de groenbemesterteelt op het bodemorganisch koolstofgehalte komt waarschijnlijk door de beperkte looptijd van de proef (Schepens et al., 2021). In andere studies werden wel al binnen vijf jaar na de start van de proef effecten gevonden van groenbemesters op het bodemorganisch koolstofgehalte (Jian et al., 2020). Het is daarom niet met zekerheid te zeggen waarom er bij de proef op zand en Duitse leem geen effecten zijn gevonden. Mogelijke andere verklaringen zijn het relatief hoge initiële bodemorganische stofgehalte (3,5%) of eventuele verzadiging.

Bodemstructuur

Er werd nauwelijks een effect vastgesteld van de groenbemesters op de bodemstructuur, enkel in één rotatie hadden de groenbemesterobjecten een positief effect op het watervasthoudend vermogen. In deze proef in Duitsland werd ook een hogere aggregaatstabiliteit gemeten (Gentsch et al., 2023). Elk type groenbemester droeg op een andere manier bij aan de vorming van aggregaten. Uit de literatuur blijkt dat er verschillen zijn in het effect van groenbemesters op de bodemstructuur tussen groenbemestertypen en locaties. Op een lichte zavelgrond werd na drie teelten bladrammenas een significant lagere indringingsweerstand en hogere aggregaatstabiliteit gevonden (Grunwald et al., 2022). Bij proeven op twee kleilocaties werd daarentegen geen effect gevonden van een eenjarige geslaagde teelt van bladrammenas en Engels raaigras op het vochtgehalte, dichtheid en indringingsweerstand (van Geel et al., 2007). Ook in de proef op zand werd bladrammenas geteeld, en ook hier werd geen effect vastgesteld op de bodemstructuur. In proeven op klei en lichte zavel werd een positief effect vastgesteld van groenbemesters op het volggewas door een betere vochtvoorziening (Grunwald et al., 2022; van Geel et al., 2007). Ook bij de proef in Duitsland werd een beter watervasthoudend vermogen vastgesteld. Het blijft onduidelijk waarom dit effect wel optrad in de ene rotatie maar niet in de andere (Hoogmoed et al., 2023).

Nutriënten

Bij de proef op zand werd geen lagere N_{min} gemeten in het najaar, ondanks de ruime N-opname bij bladrammenas en Japanse haver (Porre, 2020). Ten opzichte van de braak was de nitraatconcentratie in het bovenste grondwater bij de groenbemesters wel lager (Porre, 2020; ElHakeem et al., 2023), met name bij de bladrammenas. Het is daarom

aannemelijk dat de groenbemesters de stikstofverliezen naar het grondwater hebben beperkt, ondanks het bemesten van de groenbemesters. Ook Vos en van der Putten (2004), Schröder et al. (1992), van Dijk et al. (1995), van Dam (2006), Smit et al. (2005) en van Geel et al. (2023) vonden een lagere stikstofuitspoeling na de teelt van een groenbemester. Het effect hangt echter sterk samen met het moment van zaaien en het type groenbemester (van Geel et al., 2023; van Dam, 2006; Dekkers et al., 2023). De teelt van een groenbemester leidt in veel gevallen tot een hogere beschikbaarheid van stikstof voor het volggewas (Schröder et al., 1992; Barel et al., 2017), en de beschikbaarheid neemt toe door de tijd wat wijst op cumulatieve effecten (van Dijk et al., 1995). In de proef op centraal zand was er na de teelt van groenbemesters meer stikstof beschikbaar voor het hoofdgewas (Porre et al., 2020; ElHakeem et al., 2023). Een hogere beschikbaarheid van nutriënten voor het volggewas werd in onze metingen enkel voor kalium gevonden. Dit komt mogelijk doordat kalium relatief snel vrijkomt uit de gewasresten omdat het zich bevindt in het celvocht van de plant (Hoogmoed et al., 2023). In deze studie is slechts gemeten aan de bodemnutriënten in het najaar, waardoor het niet met zekerheid vast te stellen is of de groenbemesterteelten hebben geleid tot een hogere beschikbaarheid aan nutriënten in het voorjaar voor het volggewas. In de proef op zand werd, in een potproef, een hogere stikstofopname vastgesteld bij het volggewas na het onderwerken van de groenbemesters (Porre, 2020). In hoeverre stikstof daadwerkelijk wordt overgedragen naar de volgteelt is echter afhankelijk van het type groenbemester, het moment van onderwerken en de bodem stikstofvoorraad (Selin Norén et al., 2022). Het is namelijk ook mogelijk dat de stikstof al aan het eind van de winter vrijkomt uit afgevroren groenbemesters (van Geel et al., 2023; Dekkers et al., 2023).

Bodembioologie

In beide proeven werd geen effect van groenbemesters op de bodembioologie gevonden. Metingen door middel van *Phospholipid fatty acids* (PLFA) aan de proef in Duitsland in de laag 0-10 cm lieten meer microbiële biomassa, schimmels en actinobacteriën zien bij de uitgebreide mengsels, maar niet bij de gele mosterd (Gentsch et al., 2020). Metingen in de proef op zand in maart en april, direct na het onderwerken van de groenbemesters, lieten geen verhoogde microbiële biomassa zien (Porre, 2020; Barel et al., 2019). Het blijft onduidelijk waarom de aanvoer van organisch materiaal niet heeft geleid tot meer microbiële biomassa.

Opbrengst

Naar het effect van groenbemesters op gewasproductie zijn verschillende studies gedaan. Een neutraal tot positief effect van groenbemesters op de gewasopbrengst in de volgteelt werd in verschillende studies gevonden, dit kwam met name door een betere vochtvoorziening en een hogere stikstofmineralisatie (van Geel et al., 2007; Grunwald et al., 2022; Barel et al., 2017; El Hakeem et al., 2023; Dekkers et al., 2023). Er zijn ook studies bekend waarin groenbemesters een negatief effect hadden op het volggewas, bijvoorbeeld door het stimuleren van plantparasitaire aaltjes (Barel et al., 2017) of door mogelijke negatieve effecten van groenbemesterresten op de kieming (Dekkers et al., 2023). Bij het effect van groenbemesters op het hoofdgewas is het type groenbemester, moment en manier van zaaien, en het moment en manier van onderwerken van groot belang (Grootenhuis en te Velde, 1975; Barel et al., 2017).

Niet-kerende grondbewerking

Organische stof

In de huidige studie werd in de proef op centrale klei, op basis van de laag 0-30 cm, een hoger gehalte aan bodem organische stof gemeten bij niet-kerende grondbewerking, maar dit verschil was niet significant. Dekkers et al. (2023) onderzochten in dezelfde proef het organisch stofgehaltes in de laag 0-15 cm en 15-30 cm apart. Niet-kerende grondbewerking leidde tot een hoger organisch stofgehalte in de bovenste, maar niet in de onderste laag. Dit wordt verklaard doordat de organische stof uit mest en gewasresten bij niet-kerende grondbewerking in de bovenste bodemlaag blijft. Hoek et al. (2019) vonden in dezelfde proef een significant hogere HWC bij niet-kerende grondbewerking. Ook in onze studie werden hogere waarden gemeten, maar deze waren niet significant. In de proef

op zand werd geen significant verschil vastgesteld op het bodemorganisch stofgehalte. Wesselink et al. (2023) vonden, op basis van een meetreeks, in dezelfde proef daarentegen wel een significant effect van niet-kerende grondbewerking op de bodemorganische stof. In het systeem met een lage organische stof aanvoer was het bodem organisch stof gehalte hoger bij niet-kerende grondbewerking. Bij een standaard aanvoer van organische stof vonden zij geen verschil. Dat er in onze studie geen significant verschil werd gevonden komt mogelijk doordat de resultaten van de beide systemen met betrekking tot de organische stof aanvoer zijn samengevoegd en er in totaal minder veldjes gemeten zijn. Ook in andere studies is er gekeken naar de effecten van bodembewerking op bodem organische stof. D'Hose et al. (2016), Hofbauer et al. (2022) en Dekkers et al. (2023) vergeleken het bodemorganisch koolstofgehalte bij niet-kerende grondbewerking ten opzichte van ploegen in de laag 0-10 cm, 0-8 cm en 0-15 cm respectievelijk. Zij vonden een significant hoger organisch (kool)stofgehalte bij niet-kerende grondbewerking. Mogelijk is er dus wel sprake geweest van een andere verdeling van bodemorganische stof door de bouwvoor.

Bodemstructuur

Op klei werd er nauwelijks een effect gemeten op de indicatoren voor bodemstructuur. Enkel de bulkdichtheid op de Vlaamse klei was hoger bij niet-kerende grondbewerking. Ook in eerdere metingen aan de proef op centrale klei werd geen effect gevonden op de bulkdichtheid (Dekkers et al., 2023). Dekkers et al. (2023) geven als mogelijke verklaring voor het ontbreken van het effect van niet-kerende grondbewerking op de bulkdichtheid dat de toplaag van de bodem in beide systemen wordt verstoord door het creëren van ruggen voor de teelt van aardappel en het rooien van de aardappel en de suikerbiet. Dit lijkt bevestigd te worden door een onderzoek uitgevoerd in Frankrijk (Dekkers et al., 2023). Dat er bij de huidige metingen geen significant effect op de indringingsweerstand werd gevonden komt mogelijk door het beperkt aantal monsters dat is genomen, gezien de ruimtelijke variatie en de meetfout is een significant verschil makkelijker aan te tonen met meer metingen (Hoogmoed et al., 2021). Op basis van meer meetpunten werd een verhoogde indringingsweerstand, aggregaatstabiliteit en vochtgehalte vastgesteld bij niet-kerende grondbewerking (Crittenden, 2015; Dekkers et al., 2023). Een hogere indringingsweerstand bij niet-kerende grondbewerking wordt verklaard door geleidelijke natuurlijke compactie door onder andere de inslag van regen, en doordat de grond minder losgemaakt wordt (Dekkers et al., 2023). In de lange termijn experimenten op Vlaamse klei en zand werden minder rooivruchten geteeld dan op centrale klei, waardoor mogelijk het effect van niet-kerende bewerking op de bodemstructuur beter tot uiting komt. Op zand werd naast een hogere bulkdichtheid ook een hogere indringingsweerstand gemeten. Dit hoeft niet te betekenen dat de bodemstructuur is verslechterd, aangezien het watervasthoudend vermogen verbeterd is. Dit kan duiden op een andere poriënverdeling (Hoogmoed et al., 2021). Visueel waren er echter weinig verschillen tussen de grondbewerkingsmethoden, enkel bij niet-kerende grondbewerking werden meer scherpblokkige delen waargenomen (Wesselink et al., 2023). Wat betreft de bodemstructuur werd er op de Vlaamse klei een hogere bulkdichtheid gemeten.

De effecten van niet-kerende grondbewerking ten opzichte van ploegen op de bodemstructuur zijn veelvuldig onderzocht. In verschillende proeven werd bij niet-kerende grondbewerking ten opzichte van ploegen een hogere indringingsweerstand, een betere aggregaatstabiliteit en een hogere bulkdichtheid gemeten (D'Hose et al., 2016; Hofbauer et al., 2022). Dit kan gepaard gaan met een verandering in de poriënstructuur, maar hoeft niet gepaard te gaan met een verbeterd watervasthoudend vermogen (D'Hose et al., 2016; Hofbauer et al., 2022). Kort gezegd verschillen de effecten van niet-kerende grondbewerking behoorlijk tussen proeven.

Nutriënten

Onze metingen lieten nauwelijks een effect van bodembewerking op bodemnutriënten zien. In dezelfde proeven op centrale klei en zand vonden Wesselink et al. (2023) en Dekkers et al. (2023) echter wel effecten van de grondbewerking op de stikstofhuishouding. Op zand gold dat er in de minerale en totale stikstofvoorraad geen significant verschil werd

gevonden tussen de typen grondbewerking, net als in de huidige studie (zie Tabel 6). Er werd echter wel een lagere nitraatconcentratie in het grondwater gemeten bij niet-kerende grondbewerking. In een vergelijkbare proef op lemig zand werd dit niet gevonden (D'Hose et al., 2016). Bij de proef op centrale klei vonden Dekkers et al. (2023) een significant hogere stikstofvoorraad in de laag 0-15 cm bij een niet-kerende grondbewerking ten opzichte van ploegen, mogelijk komt dit doordat de aangevoerde nutriënten bij een niet-kerende grondbewerking in de bovenlaag bleven. Andere mogelijke verklaringen voor effecten van grondbewerking op de stikstofdynamiek zijn de mineralisatiesnelheden of de verliezen naar de lucht. D'Haene et al. (2008) vonden, in de bovenste 15 cm van leemgronden, dat niet-kerende grondbewerking leidde tot een hogere stikstofmineralisatie ten opzichte van ploegen, wat samenviel met verhoogde microbiologische activiteit.

Bodemleven

Er werd geen significant effect gevonden van niet-kerende grondbewerking op de microbiële biomassa. Voor de proef op centrale klei werd wel meer microbiële biomassa gemeten, maar dit was niet significant. Dit komt overeen met een eerdere meting (Hoek et al., 2019). Er werd wel een hoger aantal en meer biomassa van regenwormen gevonden (Crittenden, 2015). Bij de proef op zand werd door Wesselink et al. (2023) bij een meting in 2021 significant meer microbiële biomassa en aantallen schimmels en bacteriën. Ook dit werd in onze studie vastgesteld, maar het verschil was niet significant. Een mogelijke verklaring is dat zij in een groter aantal veldjes hebben gemeten dan wij. Ook D'Haene et al. (2008) en D'Hose et al. (2016) vonden bij niet-kerende grondbewerking ten opzichte van ploegen meer microbiële biomassa. Al met al lijkt niet-kerende grondbewerking in vergelijking tot ploegen dus te leiden tot een toename van microbiële biomassa. Ook hier speelt de verdeling van organische stof door de bouwvoor een rol. D'Haene et al. (2008) vonden namelijk meer biomassa in de laag 0-10 cm maar minder in de laag 10-30 cm, wat overeen kwam met de verdeling van organische stof door de bodem.

Gewasopbrengsten

Wat betreft de gewasopbrengst gaven Dekkers et al. (2023) aan dat, ondanks verschillen tussen gewassen, het effect van niet-kerende grondbewerking op de gewasopbrengst beperkt was. Wesselink et al. (2023) gaven aan dat er geen duidelijke significante verschillen waren in de gewasopbrengst tussen de verschillende grondbewerkingsvarianten.

Kruidenrijk grasland

Organische stof

Op de kleigrond werd een hoger koolstofgehalte gevonden bij het biodivers primair weidevogelmengsel. Het kruidenmengsel was productiever, waardoor er meer koolstof in de bodem is gekomen (Jansema et al., 2021; Schepens et al., 2022). Dit effect werd alleen vastgesteld op het perceel waar vaste mest werd toegediend met uitgestelde maaidatum, mogelijk is hier een interactie-effect (Schepens et al., 2022). Bij het biodivers functioneel weidevogelmengsel (BFW) werd geen effect vastgesteld op het koolstofgehalte, maar wel een lagere HWC gevonden. Hiervoor is geen verklaring, aangezien BFW een vergelijkbare tot hogere biomassa opleverde, waardoor de input van koolstof naar de bodem gelijk was (Jansema et al., 2021). Ook bij het extensief kruidenrijk grasland op de praktijkpercelen in Gelderland werd een lagere HWC gevonden, een mogelijke reden zou zijn dat extensief kruidenrijk grasland minder productief zou zijn en daarom een lagere organische stof input heeft (Hoogmoed et al., 2023).

Bodemstructuur

Op de bodemstructuur werd nauwelijks een effect vastgesteld, enkel op zuidelijk zand werden meer scherpblokkige delen vastgesteld. Dat er nauwelijks een effect werd vastgesteld bij de proef op klei is opvallend, aangezien het biodivers functioneel weidevogelmengsel een intensiever wortelstelsel in de bovengrond had ten opzichte van de controle (Jansema et al., 2021).

Nutriënten

Bij de proef op klei was het biodivers primair weidevogelmengsel productiever, waardoor er meer N is opgenomen. Dit heeft geresulteerd in een lagere N_{min} in het najaar (Schepens et al., 2022). Bij de praktijkpercelen in Gelderland werd een lagere pH vastgesteld bij extensief kruidenrijk grasland. Dit zou het resultaat zijn van minder bekalking, ook een lagere beschikbare kalium kan daarvan het gevolg zijn (Hoogmoed et al., 2023). Bij de proef op zuidelijk zand zijn de kruidenrijke graslanden enkel bemest met rundveedrijfmest, de controle heeft aanvullend stikstofkunstmest gehad (Janssen et al., 2020). De kruidenrijke graslanden bevatten vlinderbloemigen, zoals witte en rode klaver. Er werd geen effect vastgesteld op het stikstofgehalte in de bodem, terwijl de opname bij het kruidenrijk grasland hoger was. Er wordt daarom geconcludeerd dat de stikstofefficiëntie hoger is bij kruidenrijk grasland en bespaard kan worden op stikstof kunstmest (van Eekeren et al., 2023; Janssen & Bongers, 2022).

Bodembiologie

Aangenomen wordt dat biodiversiteit bovengronds leidt tot meer bodemleven ondergronds (Manhoudt et al., 2020). Op de bodembiologie werd echter nauwelijks een effect vastgesteld. Bij de proef op klei is ook het aantal regenwormen geteld. Bij biodivers primair weidevogelmengsel werden significant minder wormen gevonden, ook was er een verschuiving in groepen (Jansema et al., 2021). Mogelijk heeft dit te maken met de aanwezigheid van vogels, maar dit is niet vastgesteld.

Opbrengst

Bij de proef op klei is de opbrengst van de kruidenmengsels en de controle bepaald. In 2018 werd de hoogste opbrengst gehaald bij de controle, dit kwam mogelijk door het koude en natte voorjaar waardoor de mengsels langzamer van start gingen dan het gras (Janssen et al., 2019). In 2020 werd daarentegen de hoogste opbrengst behaald bij biodivers primair weidevogelmengsel, de verteerbaarheid bij deze samenstelling is wel een aandachtspunt (Jansema et al., 2021). Ook op de proef op de zuidelijke zandgrond bleek de totale drogestof productie hoger bij het kruidenrijk grasland in vergelijking met Engels raaigras (Koopman, 2020; Janssen et al., 2020). Met name als de omstandigheden niet optimaal zijn is kruidenrijk grasland in het voordeel (Koopman, 2020). Van de percelen in Gelderland zijn geen gegevens bekend.

Leeftijd grasland verhogen

Organische stof

Het ploegen van grasland leidt tot een versnelde afbraak van organische stof (Schils et al., 2007). Bij herinzaai is de verwachting dat het bodemorganisch stofgehalte na enkele jaren weer terug op het oorspronkelijke niveau is (Vèrtes et al., 2007). Zandbodems onder oud grasland bevatten meer organische stof dan jong grasland. Grasland gaat gepaard met een hogere aanvoer van organische stof in vergelijking met bouwland. Bij ouder grasland is er, ten opzichte van jong grasland, meer tijd geweest voor de accumulatie van organische (kool)stof in de bodem (Hoogmoed et al., 2023). Een hoger organisch (kool)stofgehalte bij oud grasland ten opzichte van jong grasland werd ook gevonden door van Eekeren et al. (2008) en Vèrtes et al. (2007).

Bodemstructuur

Een hogere gemiddelde indringingsweerstand in oud grasland ten opzichte van jong grasland kan verklaard worden doordat er in oud grasland minder recent grondbewerkingen hebben plaatsgevonden dan in jong grasland (Hoogmoed et al., 2023). Met grondbewerking wordt de bodem losgemaakt, wat gepaard gaat met een lagere indringingsweerstand. Daarbij wortelt jong grasland dieper en heeft het een hogere worteldichtheid (Schils et al., 2007; van Eekeren et al., 2008), wat geleid kan hebben tot een lossere bodemstructuur. Op kleigrond heeft graslandvernieuwing doorgaans een negatief effect op de bodemstructuur (Schils et al., 2007), wat een hoger watervasthoudend vermogen bij oud grasland ten opzichte van jong grasland kan verklaren. Daarentegen wortelt jong grasland dieper, waardoor het effect op

waterbeschikbaarheid voor het gras beperkt kan zijn (Schils et al., 2007). Daarbij is het aannemelijk dat droogtegevoelige graslanden vaker gescheurd worden, wat het verschil in het watervasthoudend vermogen kan verklaren.

Nutriënten

Het scheuren van grasland versnelt de mineralisatie van organische stikstof, na graslandvernieuwing is er minder organische stikstof in de bodem aanwezig (Schils et al., 2007). Indien de minerale stikstof niet goed wordt opgenomen door het volggewas kan dit leiden tot verliezen (Schils et al., 2007). Bij de herinzaai van gras herstelt het bodem stikstofgehalte zich snel (Velthof et al., 2000), waardoor een effect mogelijk beperkt is. Bij de percelen op klei is er geen verschil in de stikstofvoorraad vastgesteld tussen wel en niet gescheurd grasland. Op zand werd een hogere stikstofvoorraad gevonden bij ouder grasland. Dit kan verschillende oorzaken hebben. Mogelijk hangt een hogere stikstofvoorraad samen met een verhoogde organisch stofgehalte, aangezien een groot deel van de bodemstikstof zich in organische stof bevindt (Hoogmoed et al., 2023; van Dijk et al., 2021). Een andere reden kan zijn dat er op grasland doorgaans meer stikstof wordt bemest dan op bouwland, waardoor er accumulatie van stikstof heeft plaatsgevonden onder ouder grasland. Doorgaans is het stikstofoverschot hoger bij grasland dan bij bouwland en bouwt er dus (organisch gebonden) stikstof op onder gras (Schils et al., 2007; van Eekeren et al., 2008). Er is echter geen meerjarige nutriëntenbalans beschikbaar voor jong en oud grasland van de bemonsterde percelen, waardoor de exacte oorzaak niet vast te stellen is.

Bodembiologie

In oud grasland werd meer microbiële biomassa, schimmels en bacteriën gemeten dan in jong grasland. Dit hangt voor een deel samen met een hoger bodemorganisch (kool)stofgehalte onder oud grasland (van Eekeren et al., 2008). Hoewel oud grasland gepaard gaat met meer bacteriële biomassa, zijn bacteriën in staat snel te herstellen (van Eekeren et al., 2008). Ook bijvoorbeeld regenwormen hebben drie jaar na omschakeling naar grasland de tijd nodig om op het niveau te komen van permanent grasland (van Eekeren et al., 2008). Het herstellen van het gehele voedselweb kan jaren duren (van Eekeren et al., 2007).

Opbrengst

De opbrengst van eenjarig grasland dat is ingezaaid in het voorjaar ligt 20% lager dan van meerjarig grasland. In het tweede jaar is de opbrengst van grasland het hoogst. In de jaren daarop volgend neemt de opbrengst jaarlijks af, hoeveel dat is, hangt af van de kwaliteit van het grasland (Schils et al., 2007). Het is lastig vast te stellen of de opbrengst bij langjarig grasland hoger of lager is dan bij jong grasland, omdat slecht grasland gescheurd wordt. Daarbij komt dat de meeste experimenten zijn uitgevoerd op kwalitatief goed grasland, waardoor verschillen lastig vast te stellen zijn (Schils et al., 2007).

Gras-mais-wisselteelt

Organische stof

Bij de percelen op centrale zandgrond werd geen effect vastgesteld van het gebruikstype op de bodem organische stof. Dit komt mogelijk doordat een deel van de percelen op eerdgrond was, welke gekenmerkt worden door een hoog bodemorganisch stofgehalte. Op zuidelijk zand werd wel een effect vastgesteld. Permanent grasland en tijdelijk bouwland gingen gepaard met het hoogste gehalte aan bodemorganische stof, gevolgd door tijdelijk grasland en continu bouwland (Hoogmoed et al., 2023). Op basis van de resultaten is bij een overstap op een wisselsysteem de verwachting dat er naar verloop van tijd een toename ontstaat in de organische stof indicatoren. Dit omdat de landsgebruikstypen met hogere waarden (permanent grasland en tijdelijk bouwland) in aandeel zullen toenemen, en de landsgebruikstypen met lagere waarden (continu bouwland en tijdelijk grasland) in aandeel zullen afnemen (Hoogmoed et al., 2023). Op basis van cijfers uit een lange termijn proef zou het verschil in het bodemorganisch stofgehalte tussen het huidige en

het wisselsysteem nog groter zijn (van Eekeren et al., 2008). In deze proef werd wel een significant verschil gevonden in het bodemorganisch stofgehalte tussen permanent grasland en tijdelijk bouwland. Ook was het bodem organisch stof gehalte bij permanent bouwland significant lager dan bij tijdelijk grasland (van Eekeren et al., 2008). Dit is logisch omdat het omzetten van tijdelijk grasland naar bouwland gepaard gaat met een versnelde afbraak van bodemorganische stof, en bij (continu) bouwland de aanvoer van organische stof lager is dan bij (tijdelijk) grasland (Vèrtes et al., 2007; van Eekeren et al., 2011).

Bodemstructuur

Zowel op centraal als zuidelijk zand werd een hogere indringingsweerstand gevonden bij permanent en tijdelijk grasland dan bij permanent en tijdelijk bouwland. Wat betreft de bulkdichtheid werd bij continu en tijdelijk bouwland een lagere waarde gevonden dan bij tijdelijk en permanent grasland (Hoogmoed et al., 2023). Een lagere indringingsweerstand en bulkdichtheid bij (tijdelijk) bouwland kan worden verklaard doordat hier meer grondbewerkingen plaatsvinden dan bij (permanent) grasland, waarbij de grond losgemaakt wordt. Op grasland wordt daarentegen zware mechanisatie ingezet en vinden minder bodembewerkingen plaats. De metingen laten zien dat bij een overstap op een wisselsysteem de indringingsweerstand en bulkdichtheid van de bodem op bedrijfsniveau wat zal toenemen (Hoogmoed et al., 2023). Dit had echter geen effect op het watervasthoudend vermogen. Van Eekeren et al. (2008) vonden daarentegen de laagste bulkdichtheid bij permanent grasland, gevolgd door tijdelijk bouwland en tijdelijk grasland, en permanent bouwland. Ook vonden zij bij de grasteelten minder scherpblokkige delen, terwijl er bij de percelen op zuidelijk zand juist meer scherpblokkige delen werden gevonden onder grasland (Hoogmoed et al., 2023). Het verschil in resultaten tussen de percelen kan komen door verschillend management. Op de percelen van de proef van van Eekeren et al. (2008) werd gegraasd, waarbij nauwelijks verdichting optreedt (met name in de bodemlaag >10 cm). Mogelijk is er op de praktijkpercelen op centraal en zuidelijk zand op verschillende momenten geoogst met zware machines, waardoor hier juist wel verdichting heeft plaatsgevonden.

Nutriënten

De stikstofdynamiek van het omzetten van grasland en bouwland is uitvoerig onderzocht (Schils et al., 2007; Vèrtes et al., 2007; van Eekeren, 2007; Velthof et al., 2000; van Dijk et al., 2021). De opbouw van organische stikstof onder grasland is hoog, als grasland gescheurd wordt komt de opgebouwde N weer vrij (van Dijk et al., 2021). Onder bouwland neemt de stikstof voorraad geleidelijk af, wanneer er gras wordt ingezaaid neemt deze weer toe, vooral in het begin (van Dijk et al., 2021). Bij het afwisselen van tijdelijk gras met tijdelijk bouwland ontstaat er een opvolging van opbouw en afbraak, de bijbehorende stikstofvoorraad ligt tussen die van permanent grasland en permanent bouwland in (Schils et al., 2007). De overstap naar een wisselsysteem zal waarschijnlijk resulteren in een hogere gemiddelde stikstof voorraad, dit werd bevestigd door onze metingen (zie Tabel 6). Hier dient rekening mee worden gehouden in de bemesting (Hoogmoed et al., 2023). Het mais na gras hoeft minder bemest te worden, door de stikstofmineralisatie uit het gescheurde tijdelijke grasland. Voor het tijdelijk grasland na bouwland geldt het omgekeerde, de inzaai met klaver kan hierbij helpen (van Eekeren et al., 2011). Op basis van een proefbedrijf werd vastgesteld dat de productiviteit van zowel gras als mais hoger is in een wisselteelt ten opzichte van continue teelt, wat leidt tot een lager mineralenoverschot (Aarst et al., 2002).

Bodembiologie

Bij zowel de percelen op centraal als zuidelijk zand was de bacterie en schimmel biomassa hoger bij permanent grasland dan bij tijdelijk bouwland, tijdelijk grasland en permanent bouwland (Hoogmoed et al., 2023). Wat betreft de bacteriën is dit in lijn met de bevindingen uit proeven en andere metingen (van Eekeren et al., 2007; 2008). Dat er meer bodemleven wordt gevonden onder permanent grasland komt door de beschikbaarheid van voedsel (bodemorganisch stofgehalte en levende wortels) en door minder (mechanische) verstoring (van Eekeren et al., 2007). Aangezien

permanent bouwland niet voorkomt in een wisselteeltsysteem, kan er bij de overstap naar een wisselteeltsysteem een grotere microbiële biomassa worden verwacht (Hoogmoed et al., 2023). Met name omdat het meeste bodemleven zich binnen één jaar grasteelt weer herstelt (van Eekeren et al., 2007).

Opbrengst

Doorgaans is de kwaliteit en opbrengst van jong grasland hoger dan bij oud grasland, wat afhankelijk is van weersomstandigheden en management. In een langjarige proef werd echter geen verschil vastgesteld in de opbrengst van gras per hectare tussen permanent grasland en het grasland wat met mais wordt afgewisseld (Nevens & Reheul, 2003). Een reden daartoe kan zijn dat het permanente grasland ruim werd bemest (Nevens & Reheul, 2003). Nog belangrijker dan een vergelijking van de hectare opbrengst van jong en oud grasland is het aandeel mais en gras bij het wisselsysteem. Bij de overstap naar een wisselsysteem wordt relatief meer hectares grasland en minder gras geteeld, wat leidt tot een lagere totale productie omdat de droge stof opbrengst van grasland lager ligt dan bij mais.

Agroforestry

Organische stof

Het bodemorganisch stofgehalte was significant hoger aan de zijde met een houtwal ten opzichte van de zijde zonder houtwal. Dicht bij de bomenrij was het bodemorganisch stofgehalte het hoogst. Maar ook op 10 en 20 meter afstand van de houtwal werd een hoger bodem organisch stof gehalte gemeten ten opzichte van de referentie (Hoogmoed et al., 2023). Het is aannemelijk dat dit komt door extra input van organisch materiaal uit blad en takjes, wortels dragen bij aan een verhoogde koolstof aanvoer in diepere lagen (Hoogmoed et al., 2023; Nelissen et al., 2018). Dit effect komt ook uit andere studies naar voren, vooral in akkerbouw situaties (Pardon et al., 2017; Reubens et al., 2019). Op grasland is het effect minder groot doordat het bodem organisch stof gehalte al hoog is onder grasland percelen of omdat er koolstofverzadiging heeft opgetreden (Mayer et al., 2022). In het geval dat er (stroken) grasland gescheurd zijn ten behoeve van de aanplant kan het effect op het bodemorganisch koolstofgehalte, in de eerste jaren na aanplant, zelfs negatief zijn (Mayer et al., 2022). Blijkbaar was er in de bemonsterde percelen in deze studie geen sprake van verzadiging, waardoor de houtwal bij kon dragen aan een hoger bodemorganisch koolstofgehalte. Daarnaast is het mogelijk dat de koeien gebruik maken van de schaduw die de houtwal biedt, waardoor er meer mest op dit deel van het perceel komt (Hoogmoed et al., 2023).

Bodemstructuur

Er werd geen significant verschil gevonden in de indringingsweerstand, bulkdichtheid of watervasthoudend vermogen tussen de zijde met en zonder houtwal. Er werd wel een verschil vastgesteld in het aandeel scherpblokkige delen. Minder scherpblokkige delen aan de zijde van de houtwal kan duiden op een biologisch gevormde bodemstructuur (Hoogmoed et al., 2023). Een verhoogde hoeveelheid microbiële biomassa werd echter niet vastgesteld. In een vergelijkbare studie werd wel een effect op de indringingsweerstand gevonden, de indringingsweerstand in de bomenrij was lager dan onder het grasland (Prins et al., 2022). Dit wordt verklaard doordat er onder de bomen geen zware machines rijden, of door doordat boomwortels fysieke poriën creëren (Prins et al., 2022). Naar het effect op verschillende afstanden van de bomenrij is niet gekeken. Het verschil in resultaat met onze studie komt mogelijk doordat Prins et al. (2022) hebben bemonsterd in een 3,5 jaar oude bomenrij welke voor aanplant nog is bewerkt, ten opzichte van een bestaande houtwal in deze studie. Ook op het watervasthoudend vermogen en infiltratie heeft agroforestry mogelijk een effect, direct door het wortelstelsel of indirect door een verhoogd bodemorganisch stofgehalte (Fuchs & van Leeuwen, 2022), al wordt dit in de praktijk niet altijd waargenomen (Coussement et al., 2019; Jacobs et al., 2022). Ook in deze studie werd geen effect gemeten op het watervasthoudend vermogen. Het is aannemelijk dat een houtwal een breder effect heeft op de waterhuishouding (Fuchs & Leeuwen, 2022). Agroforestry kan leiden tot een lager vochtgehalte bij de bomenrij, doordat zowel de boom als het gras vocht onttrekken (Prins et al., 2022; Coussement et

al., 2019). Daarnaast heeft een bomenrij effect op de beschikbaarheid van water door neerslagonderschepping, windremming, een veranderd microklimaat en *hydraulic lift* (Fuchs & van Leeuwen, 2022).

Nutriënten

Er werden hogere concentraties aan bodemnutriënten gevonden aan de zijde met een houtwal ten opzichte van de zijde zonder houtwal. Dicht bij de houtwal waren deze het hoogst, dit was het geval voor alle nutriënten het geval met uitzondering van de K-voorraad. Ook op 10 en 20 meter afstand van de houtwal werden hogere gehalten gemeten ten opzichte van de referentie. Dit duidt erop dat er bij agroforestry meer nutriënten in het systeem blijven. Een verhoogde interne kringloop aan nutriënten werd ook in andere studies gevonden (Pardon et al., 2017). Dit kan direct door de bomen komen, bomen kunnen nutriënten uit (diepere) bodemlagen halen welke via bladafval weer in de bodem terecht komen (Fuchs et al., 2021; Fuchs et al., 2023; Pardon et al., 2017). Of doordat de gewasgroei aan de kant van de bomenrij achterblijft, waardoor minder nutriënten worden afgevoerd (Pardon et al., 2017; Pent et al., 2020). Bij een jonge aanplant is dit effect nog beperkt (Prins et al., 2022), bij de bestaande houtwal speelde dit mogelijk wel een rol. Op de productiviteit van het vee heeft agroforestry geen effect (Teklehaimanot et al., 2002; Pent et al., 2020). Daarnaast is het mogelijk dat er dicht bij de houtwal meer mest terecht komt, van vee dat zich in de schaduw begeeft (Hoogmoed et al., 2023).

Bodembiologie

In deze studie werden hogere waarden voor biologische bodemparameters gevonden dicht bij de bomenrij en dit liep af naarmate de afstand tot de bomen toenam. Ook waren deze waarden hoger ten opzichte van de controle. De verschillen waren echter niet significant. In andere studies werden wel significante effecten gevonden van bomenstroken op de totale microbiële biomassa en schimmel/bacterie verhouding, al ligt de focus van deze studies veelal op agroforestry in combinatie met bouwland en in tropische systemen (e.g. Nelissen et al., 2018; Beule et al., 2022; Marsden et al., 2020). Het effect zou wel grotendeels beperkt blijven tot de bomenrij (Beule et al., 2022) en daarbij vonden Bainard et al. (2011) dat het effect, voor mycorrhiza schimmels, ook sterk afhangt van het type boom. Het is mogelijk dat het effect anders is in combinatie met graslandpercelen, vanwege de hogere input van organische stof in vergelijking met bouwland. Naast de biologische bodemparameters kan een agroforestry systeem ook bijdragen aan bovengrondse functionele agrobiodiversiteit, al hangt het effect af van het systeem en de locatie (Fuchs & van Leeuwen, 2022).

Opbrengst

Het effect van de combinatie van verschillende gewassen op de opbrengst wordt veelal uitgedrukt in de Land Equivalent Ratio (LER), de hoeveelheid land die nodig is om met enkelvoudige teelten dezelfde opbrengst te behalen als bij de gecombineerde teelt. De LER van agroforestry-systemen is veelvuldig onderzocht en er worden waarden gevonden tussen de 1,36 en 2,00 (Sollen-Norrin et al., 2020). Deze berekening gaat er echter wel vanuit dat de bomen productief zijn, terwijl er in deze studie is gekeken naar een bestaande houtwal. De grasproductie in een agroforestry-systeem neemt meestal af, met name bij oudere bomen (Pardon et al., 2018; Reubens et al., 2019). De opbrengstverliezen hangen af van de hoeveelheid schaduw (Pardon et al., 2018).

Algemene discussiepunten ten aanzien van de BLN1.0 metingen

Het uitgangspunt van de metingen was de BLN1.0, hier is op een aantal punten van afgeweken omwille van de praktische uitvoering en budget. Wat betreft de microbiële biomassa is er gekozen voor de NIRS methode in plaats van PLFA. Voor de microbiële biomassa is de NIRS methode niet geaccrediteerd, maar de PLFA-analyse wordt wel als referentiemethode gebruikt. Daarnaast zijn de (plantparasitaire) nematoden en regenwormen niet bepaald. Het effect van de maatregelen

op de bodembiologie is daarmee beperkt in kaart gebracht, mogelijk zijn daardoor niet alle effecten op de bodembiologie tot uiting gekomen in de resultaten.

Bij enkele maatregelen is er gemeten aan praktijkpercelen omdat hiervoor geen experimenten beschikbaar waren. Meten aan praktijkpercelen brengt enkele uitdagingen met zich mee. Voor een aantal maatregelen was het aantal bemonsterde percelen beperkt, zoals bij het aandeel graan in rotatie. In combinatie met de grote variatie tussen percelen maakt dit het lastig om statistische verschillen aan te tonen (Hoogmoed et al., 2023). Een andere uitdaging is het verzamelen van managementgegevens. Managementgegevens helpen bij het interpreteren van resultaten en vinden van een verklaring. Deze gegevens zijn niet altijd bekend, zoals de toegepaste bemesting op percelen met veel of weinig graan, wat het vinden van een verklaring voor de gevonden resultaten bemoeilijkt.

Daarnaast geldt bij de percelen met veel en weinig graan nog een ander aandachtspunt. Indicatoren met betrekking tot de bodemstructuur worden sterk beïnvloed door het geteelde gewas. Het is daarom cruciaal dat bij een vergelijking van percelen met veel en weinig graan in hetzelfde gewas is gemeten. In de metingen binnen deze studie is er in verschillende rooivruchten gemeten (aardappel, suikerbiet, ui en waspeen), mogelijk is dit van invloed geweest op de resultaten.

3.2 BLN 2.0 doorrekening

3.2.1 Resultaten modelberekening

De resultaten van de BLN 2.0 doorrekening staan weergegeven in Tabel 7 voor de maatregelen binnen de akkerbouw en in Tabel 8 voor de maatregelen binnen de veehouderij. De scores op de verschillende ecosysteemdiensten waren redelijk tot goed (0,50 - 0,94) voor alle proefvelden en zowel voor de maatregelen als de controle. Als gevolg van de redelijk tot goede uitgangssituatie leidde een verandering van één of meerdere bodemeigenschappen slechts tot een kleine aanpassing van de bodemkwaliteit in het licht van meerdere ecosysteemdiensten. Enkel de percelen op de noordelijke klei en centraal zand waarop een proef met kruidenrijk grasland is aangelegd scoorden onvoldoende op de kringloopdienst (0,30 - 0,41). Een verandering van deze scores door deze maatregel liet zien dat de bodemkwaliteit verbeterde in het licht van de gewenste streefwaardes voor meerdere bodemindicatoren.

Aanvoer organische stof

Bezien over de twee proefvelden op centrale klei leidde een hogere aanvoer van organische stof en nutriënten tot een beperkte verhoging van de ecosysteemdiensten. Enkele objecten droegen wel bij aan een wat hogere productie- en kringloopdienst. De aanvoer van compost verhoogde de productiedienst, maar enkel bij een hoge dosering. Dit gold ook voor de aanvoer van kippen- en potstalmest, bij drijfmest was dit in mindere mate ook het geval.

Aandeel graan

Bij veel graan werd er in beide regio's een hogere productie-, koolstof en kringloopdienst gevonden ten opzichte van weinig graan, maar een lagere waterdienst. Bij veel graan was de productiedienst met drie procentpunten hoger dan bij weinig graan, dit hangt deels samen met een hogere kringloopfunctie bij veel graan. Een hogere voorraad en beschikbaarheid aan nutriënten leidde, in combinatie met perceelseigenschappen, ook tot een lagere waterdienst. Bij veel ten opzichte van weinig graan werd ook een hogere koolstofdienst gevonden, dat was met name voor de zuidelijke zandgronden aanzienlijk.

Meerjarige akkerranden

Op noordelijk zand leidde de akkerrand tot een lagere productie-, water- en kringloopdienst, maar tot een betere koolstofdienst. Ook op klei werd er bij de akkerrand een lagere waterfunctie gevonden. Op beide locaties kwam dit zowel door een verhoogd uitspoelingsrisico als een lager berekend watervasthoudend vermogen. Ook werd er een lagere kringloopfunctie gevonden bij meerjarige akkerranden ten opzichte van het referentieperceel. Op de productie- en koolstofdienst werd nauwelijks een effect gevonden.

Groenbemesters

Wat betreft de groenbemesterproeven is enkel de proef in Nederland doorgerekend. Het telen van een groenbemester had een beperkt effect op de water-, kringloop- en productiedienst, al werd er bij de mengsels een beperkt hogere productiefunctie gevonden ten opzichte van de controle (2-3 procentpunten). Enkel de bladrammenas had een effect op de koolstofdienst, deze was lager dan bij de controle.

Niet-kerende grondbewerking

Het toepassen van NKG leidde niet tot nauwelijks tot een verandering van de ecosysteemdiensten. Dit hangt mogelijk samen met de gebruikte metingen: metingen van de bodemdichtheid zijn voor de huidige studie niet meegenomen in de beoordeling van de bodemkwaliteit. Enkel bij de proef op zand werd een iets hogere kringloopdienst gevonden, wat kwam door een hogere K-beschikbaarheid.

Kruidenrijk grasland

Op de productiedienst had kruidenrijk grasland nauwelijks effect, enkel het natuurgrasland scoorde minder goed (10 procentpunten). Dit gold ook voor de kringloopdienst. Op de waterdienst werd enkel een effect gevonden bij het productief kruidenrijk grasland op centraal zand. Op de koolstofdienst werd geen effect gevonden van kruidenrijk grasland.

Leeftijd grasland verhogen

Op zand ging oud(er) grasland gepaard met een hogere score op alle diensten. Met name bij de koolstofdienst was het verschil groot, oud grasland scoorde 12 procentpunten hoger dan continu bouwland. Op de kleipercelen werd nauwelijks een verschil gevonden, enkel bij de kringloopdienst. Ten opzichte van jong grasland scoorde middeloud grasland lager op de kringloopdienst, terwijl oud grasland juist hoger scoorde.

Gras-mais-wisselteelt

Bij een gras-mais-wisselteelt systeem werd vooral een hogere score op de productie-, water- en koolstofdienst gevonden. Het grootste verschil werd gevonden op de koolstofdienst (5 procentpunten). Bij de kringloopdienst werd een lagere score gevonden voor het wisselteelt systeem ten opzichte van de controle. Dit komt omdat er in het wisselteeltsysteem geen continu bouwland is, welke hoger scoorde dan tijdelijk bouwland, waarvan het aandeel toeneemt in het wisselsysteem.

Agroforestry

De percelen aangrenzend aan een bomenrij scoorden hoger op de productie-, ten opzichte van de controle. Op de waterdienst was het effect beperkt. Wat betreft de koolstofdienst is het opvallend dat de score toeneemt naarmate de afstand tot de bomenrij groter is. Ook valt op dat de score gelijk of lager is bij de bomenrij ten opzichte van de controle. Bij de kringloopfunctie valt juist op dat de kringloopfunctie hoger is dan bij de controle dicht bij de bomenrij en dat dit verder van de bomenrij niet het geval is.

Tabel 7. Resultaten BLN 2.0 doorrekening voor de maatregelen binnen de akkerbouw. De ecosysteemdiensten zijn gewaardeerd op een schaal van 0 (laag) tot 1 (optimaal), waarbij de score de maximale waarde krijgt zodra de streefwaarde wordt bereikt.

Locatie	Behandeling	Gewas-productie	Waterkwaliteit en waterregulatie	Koolstof-vastlegging	Faciliteren van de nutriënten kringloop
Aanvoer organisch materiaal					
BASIS	Controle	0,77	0,84	0,63	0,67
	Compost 20t	0,77	0,83	0,65	0,63
	Compost 40t	0,81	0,84	0,64	0,72
MAK	kunstmest	0,79	0,68	0,64	0,63
	GFT	0,81	0,68	0,66	0,65
	GFT + drijfmest	0,84	0,68	0,63	0,69
	drijfmest	0,80	0,68	0,67	0,63
	groencompost	0,81	0,68	0,66	0,63
	kippenmest	0,84	0,68	0,62	0,71
	natuurcompost	0,84	0,68	0,63	0,68
	potstalmest	0,83	0,68	0,63	0,69
Aandeel graan					
Centrale klei	Weinig graan	0,81	0,82	0,64	0,75
	Veel graan	0,84	0,80	0,65	0,77
Zuidelijk zand	Weinig graan	0,75	0,79	0,68	0,54
	Veel graan	0,78	0,76	0,80	0,71
Meerjarige akkerranden					
Noordelijk zand	Referentie	0,78	0,81	0,80	0,65
	Meerjarige akkerrand	0,76	0,73	0,84	0,57
Centrale klei	Referentie	0,83	0,84	0,65	0,76
	Meerjarige akkerrand	0,83	0,80	0,64	0,50
Groenbemesters					
Centraal zand	Zwarte braak	0,73	0,76	0,71	0,70
	Bladrammenas	0,74	0,77	0,66	0,68
	Japanse haver	0,75	0,76	0,71	0,71
	Bladrammenas + Japanse haver	0,76	0,76	0,71	0,71
	Bladrammenas + Wikke + Japanse haver	0,75	0,76	0,71	0,71
Niet-kerende grondbewerking					
Centrale klei	Standaard	0,78	0,84	0,63	0,68
	NKG	0,79	0,84	0,63	0,68
Zuidelijk zand	Standaard	0,72	0,79	0,69	0,52
	NKG	0,73	0,79	0,69	0,58

Tabel 8. Resultaten BLN 2.0 doorrekening voor de maatregelen binnen de veehouderij.

Locatie	Behandeling	Gewasproductie	Waterkwaliteit en waterregulatie	Koolstof-vastlegging	Faciliteren van de nutriënten kringloop
Kruidenrijk grasland					
Zuidelijk zand	Controle, gras	0,82	0,69	0,85	0,70
	BFW-graskruiden-mengsel	0,82	0,70	0,85	0,70
	BPW-graskruiden-mengsel	0,82	0,70	0,85	0,69
Centraal zand	A Referentie Engels raaigras	0,79	0,73	0,90	0,59
	Productief kruidenrijk grasland	0,77	0,77	0,88	0,58
	Referentie ANLb	0,69	0,73	0,87	0,48
Noordelijke klei	Controle, gras, drijfmest	0,80	0,74	0,81	0,35
	BFW-graskruiden-mengsel, drijfmest	0,81	0,74	0,81	0,39
	BPW-graskruiden-mengsel, stalmest	0,80	0,74	0,81	0,30
	Controle, gras, stalmest	0,82	0,74	0,81	0,41
	BFW-graskruiden-mengsel, stalmest	0,80	0,74	0,81	0,35
	BPW-graskruiden-mengsel, drijfmest	0,81	0,74	0,81	0,39
Verhogen leeftijd grasland					
Zuidelijk zand	Continu bouwland	0,76	0,65	0,70	0,64
	Jong grasland	0,76	0,73	0,79	0,70
	Oud grasland	0,80	0,70	0,92	0,68
Noordelijke klei	Jong grasland	0,84	0,73	0,92	0,49
	Middeloud grasland	0,84	0,73	0,92	0,49
	Middeloud grasland	0,84	0,71	0,94	0,46
	Oud grasland	0,83	0,77	0,93	0,55
Gras-mais-wisselteelt					
Zuidelijk zand	Continu mais	0,76	0,65	0,70	0,64
	Mais na gras	0,80	0,73	0,82	0,59
	Gras na mais	0,76	0,73	0,80	0,70
	Continu gras	0,80	0,70	0,92	0,68
Agroforestry					
Zuidelijk zand	bomen, 0m afstand	0,72	0,66	0,73	0,70
	bomen, 2m afstand	0,79	0,65	0,74	0,73
	bomen, 5m afstand	0,79	0,68	0,73	0,76
	bomen, 10m afstand	0,76	0,71	0,89	0,64
	bomen, 20m afstand	0,75	0,66	0,89	0,56
	geen bomen, 0m afstand	0,72	0,66	0,79	0,63
	geen bomen, 2m afstand	0,72	0,69	0,78	0,63
	geen bomen, 5m afstand	0,74	0,68	0,79	0,65
	geen bomen, 10m afstand	0,74	0,70	0,76	0,67
	geen bomen, 20m afstand	0,73	0,68	0,76	0,67

3.2.2 Discussie

Met de BLN 2.0 is het mogelijk om veel informatie over bodemmetingen te integreren met kaartmateriaal voor veel verschillende locaties tegelijkertijd. Een beoordeling wordt gemaakt ten opzichte van streefwaarden die zijn opgesteld voor verschillende ecosysteemdiensten. Dit is een belangrijke stap van bodemmetingen naar een meer integrale beoordeling van het functioneren van de bodem.

Dit levert verschillende inzichten op. Bijvoorbeeld, bij de aanvoer van compost werd inzichtelijk welke nutriënten bijdragen aan een hogere productiedienst. Bij het proefveld BASIS kwam de hogere productiedienst voornamelijk door een hogere N-totaal, K-CEC en organisch stofgehalte bij de compost objecten. Het feit dat er een hogere P-AI werd gemeten had geen invloed op deze dienst omdat de fosfaatlevering al prima op orde was. Bij het proefveld MAK leidde een organische bemesting ten opzichte van kunstmest tot een beperkt hogere productiedienst, welke hier juist kwam door een hogere N-totaal, K-beschikbaarheid, Mg-beschikbaarheid en in sommige gevallen een hogere PMN.

Bij het verhogen van de leeftijd van grasland werd inzichtelijk dat een hoger bodemorganisch stofgehalte niet alleen bijdraagt aan een verhoogde koolstof functie, en een hogere N-totaal aan een hogere productie- en kringloop functie, maar ook dat de verhoogde C/N ratio het risico op uitspoeling beperkt. Daarmee worden via de BLN 2.0 de synergiën en *trade-offs* tussen verschillende functies inzichtelijk.

De doorrekening met de BLN 2.0 liet zien dat de meeste objecten redelijk tot goed scoorden op de ecosysteemdiensten. Ook liet de doorrekening zien dat er ruimte voor verbetering is, de hoogst mogelijke score op ecosysteemdiensten werd door de geanalyseerde percelen niet behaald. Dit betekent dat er beperkende factoren waren om tot optimaal functionerende ecosysteemdiensten te komen, en dat de aangelegde behandelingen deze beperkende factoren (nog) niet wegnamen.

Met de BLN 2.0 kwamen er maar weinig grote verschillen tussen de behandelingen naar voren. Het is hierbij de vraag of er daadwerkelijk nauwelijks veranderingen plaatsvonden in het functioneren van de bodem. De relatief kleine veranderingen in de scores heeft voor een deel te maken met de goede Ausgangssituatie en logistische beoordeling van de bodemindicatoren (een verbetering van een slechte bodemkwaliteit resulteert in een grotere stijging van de score dan een verbetering van een al goede bodemkwaliteit) én het feit dat de bodemkwaliteit wordt beoordeeld in het licht van een meerjarig bouwplan, waarbij jaar-tot-jaar verschillen optreden (en uitmiddelen) als gevolg van de gewaskeuze. Daarnaast is in de huidige analyse vooral gefocust op de integrale score van meerdere ecosysteemdiensten, waarbij wijzigingen van een individuele bodemfunctie minder zichtbaar is. Als laatste zijn voor de niet-landbouwkundige functies ook gebiedsspecifieke doelen aanwezig waarbij de getoetste maatregelen maar een heel beperkte invloed hebben op de aanwezige risico's en bijdrage van de bodem aan de ecosysteemdienst, zoals bijvoorbeeld de reductie van stikstof- en fosforafspoeling naar het oppervlaktewater.

Ook kan het zijn dat de BLN 2.0 niet voldoende gevoelig is om verschillen te laten zien. In deze studie zijn de mogelijke oorzaken niet uitgebreid geanalyseerd. Wel zagen we ditzelfde in grote lijnen terug in de bodem metingen. Bij de metingen werden bijvoorbeeld de grootste effecten gevonden bij het verhogen van de leeftijd van grasland, dit was ook bij de BLN 2.0 doorrekening het geval. Ook bij maatregelen waarbij nauwelijks een effect werd gevonden in de metingen kwam het resultaat overeen met de BLN 2.0 doorrekening, zoals bij de proef met groenbemesters en kruidenrijk grasland. Echter kwam het ook voor dat de resultaten niet op één lijn lagen. Op zand werd bij percelen met veel graan in de rotatie hogere scores gevonden bij verschillende ecosysteemdiensten ten opzichte van weinig graan, terwijl er in de bodemmetingen geen significante verschillen waren. Dit suggereert dat de combinatie van metingen en

perceelseigenschappen in een indicator meerwaarde kan bieden voor de beoordeling van de effecten van maatregelen. We merken hierbij op dat we voor de huidige analyse geen statistische analyse hebben uitgevoerd op de BLN 2.0 doorrekening. Ook werd bij de aanvoer van compost nauwelijks een effect gevonden in de koolstoffunctie, terwijl er wel hogere gehalten aan koolstof werden gemeten in de bodem. Dit hangt mede samen met de gebruikte streefwaarden en de aannames daarbij, en het onderliggende berekening met RothC-model.

De beoordeling van de ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie aan de hand van de berekende organische stof balans lijkt geen goede indicator voor dit type analyses. De fosfaatindicatoren spelen in de hier uitgevoerde berekening van de BLN indicatoren een grote rol in het berekenen van de maximale potentiële koolstofvastlegging en de beoordeling van het huidige bodem koolstof gehalte. Dit terwijl de aanvoer van organische koolstof niet enkel wordt bepaald door de mestplaatsingsruimte en de gewasresten van de huidige teelt, maar ook door het toepassen van bijvoorbeeld groenbemesters, compost of agroforestry. Bij de maatregel agroforestry was, op basis van de BLN 2.0, de score op de koolstofdienst hoger naarmate de afstand van de bomenrij groter was. Ook was de score lager bij de bomenrij ten opzichte van de controle. Beide observaties zijn tegenovergesteld aan de bodemmetingen. Doordat de fosfaattoestand hoger was (dichter bij) de bomenrij ten opzichte van de controle, werd een lagere kringloopfunctie berekend. Het mee laten wegen van de fosfaattoestand in de koolstoffunctie sluit de bijdrage van andere bronnen dan organische mest aan de (maximale potentiële) koolstofvastlegging gedeeltelijk uit. Een andere benadering voor het berekenen van de maximale potentiële koolstofvastlegging voor dit type analyses is dus gewenst.

Een hoger aandeel graan in het bouwplan en het zaaien van meerjarige akkerranden had een negatieve impact op de waterkwaliteit en -regulatie zoals berekend met de BLN 2.0, waarbij de effecten op zowel grondwater als oppervlaktewater zijn samengevoegd. Met betrekking tot stikstof gaat dit in tegen de algemene opvattingen. Het verhoogde risico op N-uitspoeling is vooral gebaseerd op een hogere stikstofvoorraad in de bodem, maar dat hoeft nog geen hogere N-uitspoeling te betekenen. De BLN 2.0 brengt een potentieel risico in kaart als gevolg van de hogere stikstofvoorraad in de bodem. Meerdere proeven laten zien dat een verhoging van de stikstofvoorraad in de bodem op lange termijn leidt tot een hogere uit- en afspoelingsrisico. Dat er andere (teelt)aspecten in dit geval een grotere rol spelen in het voorkomen van uitspoeling, zoals immobilisatie van stikstof door de graanstoppel en de grotere kans op een geslaagde groenbemester, wordt in de BLN 2.0 niet meegenomen. Dit komt doordat de BLN 2.0 focust op een beoordeling van de kwaliteit van de bodem, en niet op het gevoerde management en de impact daarvan.

De ecosysteemdienst rond de bodembioïecologie in de BLN 2.0 is nog niet volledig uitgewerkt, door het gebrek aan streefwaarden voor deze indicatoren vanuit de BLN 1.1 als ook in de wetenschappelijke literatuur. Het vaststellen van streefwaarden is volgens Ros et al. (2023) nodig om de BLN 2.0 beoordeling compleet te maken.

Verder is het belangrijk om te kijken welke bodemmetingen waar relevant zijn en of de geselecteerde BLN-metingen voldoende zijn. Mogelijk zijn metingen nodig die een meer directe relatie leggen met processen zoals de water-infiltratiesnelheid of de bodemrespiratie voor betere inschattingen van bodemfuncties. Verder is de rol van bodembioïecologie bij de beoordeling van bodemprocessen en bodemfuncties maar beperkt geïntegreerd in de BLN 2.0, terwijl deze bij talloze bodemprocessen de aandrijver zijn (Creamer et al., 2022; Zwetsloot et al., 2022).

4 Conclusie en aanbevelingen

4.1 Conclusies

4.1.1 Het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op de BLN 1.0 metingen

De meeste maatregelen hebben een neutraal tot verhogend effect op de bodemkwaliteitsindicatoren. In de akkerbouw werden de grootste effecten gevonden bij de aanvoer van organische stof, het aandeel graan en de akkerranden, al waren er grote verschillen tussen de locaties waarop de maatregelen zijn getest. De meeste effecten werden gevonden op bodemorganische stof indicatoren, bodemnutriënten en de bodembioologie. De fysische indicatoren werden beïnvloed door NKG en akkerranden, andere maatregelen hadden hierop nauwelijks invloed. Het effect van groenbemesters op de bodemkwaliteit was beperkt, dit komt waarschijnlijk door de beperkte looptijd van de proef. In de veehouderij heeft met name het verhogen van de leeftijd van grasland of het verhogen van het aandeel grasland effect op de bodemkwaliteit. Wanneer het al gaat om grasland heeft met name agroforestry een positieve impact op de bodemkwaliteit. Het effect van kruidenrijk grasland lijkt beperkt.

4.1.2 Het effect van maatregelen voor koolstofvastlegging op ecosysteemdiensten

Afgaand op de resultaten uit de doorrekening met de BLN 2.0 leidden de meeste maatregelen tot een verbetering van de ecosysteemdiensten. De grootste positieve impact werd gevonden bij de organische bemesting, een hoog aandeel graan, het verhogen van de leeftijd van grasland en agroforestry op de gewasproductie, faciliteren van de nutriëntenkringloop en koolstofvastlegging. Het verhogen van de leeftijd van grasland droeg ook bij aan een betere waterkwaliteit en -regulatie. Een aanzienlijke verlaging van de ecosysteemdiensten werd gevonden bij meerjarige akkerranden, welke leidde tot een verlaagde waterkwaliteit en -regulatie en het faciliteren van de nutriëntenkringloop. Daarnaast leidde enkele objecten met kruidenrijk grasland tot een verlaagde gewasproductie en het faciliteren van de nutriëntenkringloop. Bezien over alle maatregelen en locaties waren de gevonden effecten op de ecosysteemdiensten echter klein, wat betekent dat de maatregelen beperkt bijdroegen aan het verbeteren van de ecosysteemdiensten dan wel dat andere bodemeigenschappen die relevant zijn voor deze ecosysteemdiensten maar weinig beïnvloed werden. Een integrale beoordeling van meerdere bodemfuncties is daarom cruciaal. De uitgevoerde doorrekening liet zien dat er wel mogelijkheid is voor het verbeteren van meerdere bodemfuncties. Mogelijke (grote) verschillen in meetwaarden van indicatoren droegen in het grotere geheel niet bij aan het verbeteren van de ecosysteemdiensten. Dit hangt mogelijk samen met de goede uitgangssituatie en de gebruikte aggregatiemethode over tijd (bouwplan) en bodemfuncties om tot een integrale beoordeling te komen per ecosysteemdienst.

4.1.3 De bruikbaarheid van BLN 2.0 voor het beoordelen van maatregelen

De doorrekening met de BLN 2.0 droeg beperkt bij aan aanvullende inzichten in hoeverre maatregelen van invloed zijn op duurzaam bodembeheer. Met de systematiek is een beoordeling gemaakt van de meetwaarden ten opzichte van de streefwaarden, wat een belangrijke stap is naar een integrale beoordeling van het functioneren van de bodem. Een hogere score op een functie was conform de verwachting gekoppeld aan de observaties in de metingen. Het zou nuttig zijn om de gevoeligheid van de systematiek nader te bekijken. Een evaluatie van de gebruikte streefwaarden als ook een meer gedetailleerde doorrekening van de koolstoffuncties is aan te bevelen. De integratie van metingen en beoordeling binnen de BLN 2.0 heeft bovendien een ‘samenvattende’ functie, waardoor de resultaten eenvoudiger te interpreteren zijn in termen van duurzaam bodembeheer waarbij effecten op verschillende ecosysteemdiensten op een uniforme manier in kaart worden gebracht.

4.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

4.2.1 *Effect van maatregelen vaststellen*

Het effect van maatregelen op de bodemkwaliteit is vastgesteld op basis van proefvelden en praktijkpercelen. Het aantal proeven is beperkt, waardoor de resultaten van sommige maatregelen maar op twee locaties zijn gebaseerd, terwijl de effecten mogelijk op een andere locatie anders uitpakken. Het aantal locaties is dus beperkt, wat de opschaling van de resultaten lastig maakt. Het bemonsteren van praktijkpercelen kan de spreiding vergroten, maar bemoeilijkt de interpretatie. Ook maakt de grote variatie het lastig om (significante) verschillen vast te stellen. Aanbevolen wordt om een methodiek te ontwikkelen om de resultaten op te schalen naar andere locaties. Ook wordt aanbevolen om meetlocaties te selecteren op langlopende toepassing van de te onderzoeken maatregel.

4.2.2 *Doorontwikkeling beoordelingskader duurzaam bodembeheer*

Voor het kwantificeren of beoordelen van “effecten van klimaatmaatregelen op ecosysteemdiensten” moet een gedegen beoordelingskader beschikbaar zijn. In bestaande systematieken zijn de kwantitatieve relaties tussen bodemindicatoren, bodemfuncties en ecosysteemdiensten, inclusief bijbehorende drempel- en streefwaarden nog niet volledig (Faber et al., 2022). Aanbevolen wordt om de (fundamentele) kennis over bodemprocessen te versterken en de relatie met bodemindicatoren, bodemfuncties en ecosysteemdiensten verder te ontwikkelen. Aan de ontwikkeling van een dergelijke systematiek is en wordt op verschillende vlakken gewerkt (e.g. BLN 2.0, OBI, LANDMARK, EJP SOIL, Sensorisch Landschap). Binnen SL zijn we afhankelijk van deze ontwikkelingen en in hoeverre deze worden geaccepteerd door beleid om deze als systeem te gebruiken.

Ontwikkeling is specifiek gewenst met betrekking tot:

- Kwantificeren van de relaties tussen indicatoren, bodemfuncties en ecosysteemdiensten (causaal en robuust).
- Ontwikkelen van robuuste referenties voor normale waarden, streef- en drempelwaarden voor het beoordelen van meetwaarden, waar nodig specifiek voor de context van grondsoort, landgebruik en beheer (transparante beoordeling t.b.v. monitoring en beleidsmatige evaluatie gezonde bodems).
- Uitbreiding van bodemfuncties en ecosysteemdiensten voorbij teeltondersteuning en andere landbouw-georiënteerde bodemfuncties (herkennen van trade-offs en win-wins); hierbij ook de mogelijkheid ontwikkelen tot maatschappelijke verwaardiging (ontwikkeling van nieuwe waardeketens en financieringsmodellen voor agrariërs, faciliteren van transitie landbouw).
- Integratie van bodemkwaliteitsbeoordeling met water en lucht, en met landschap en natuur (integraal beleid en management).

Referenties

- Aarst, H.F.M., Hilhorst, G.J., Nevens, F. en Schröder, J.J. (2003). Betekenis wisselbouw voor melkveebedrijf op lichte zandgrond: analyse van resultaten proefbedrijf 'De Marke'. Wageningen University and Research, nr. 36. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/42921>
- Bainard, L.D., Koch, A.M., Gordon, A.M., Newmaster, S.G., Thevathasan, N.V. en Klironomos, J.N. (2011). Influence of trees on the spatial structure of arbuscular mycorrhizal communities in a temperate tree-based intercropping system. *Agriculture, ecosystems and environment*, 144(1), pp. 13-20. doi: 10.1016/j.agee.2011.07.014
- Bakker, N.L., van der Burgt, G.J. en Koopmans, C.J. (2020). Evaluatie van de méérjarige effecten van verschillende typen op de opbrengststabiliteit, mineralenbalansen en uitspoelingsverliezen: resultaten van 20 jaar Mest als Kans. Louis Bolk Instituut, nr. 2020-041.
- Barel, J.M., Kuyper, T.W., de Boer, W., Douma, J.C. en de Deyn, G.B. (2017). Legacy effects of diversity in space and time driven by winter cover crop biomass and nitrogen concentration. *Journal of Applied Ecology*, 55(1). doi: 10.1111/1365-2664.12929
- Barel, J.M., Kuyper, T.W., Paul, J., de Boer, W., Cornelissen, J.H.C. en de Deyn, G.B. (2019). Winter cover crop legacy effects on litter decomposition act through litter quality and microbial community changes. *Journal of Applied Ecology*, 56(1), pp. 132-143. doi: 10.1111/1365-2664.13261
- Beule, L., Vaupel, A., Moran-Rodas, V.E. (2022). Abundance, Diversity, and Function of Soil Microorganisms in Temperate Alley-Cropping Agroforestry Systems: A Review. *Microorganisms*, 10(3), pp.616. doi: 10.3390/microorganisms10030616
- Blom, M., Bachaus, A., de Vries, J., in 't Veld, M., Frambach, M. en Naus, M. (2022). Evaluatie Nationaal programma landbouwbodems: tussenevaluatie periode 2019-2021. Beschikbaar via: https://ce.nl/wp-content/uploads/2022/03/CE_Delft_210359_Evaluatie_Nationaal_programma_landbouwbodems_Def.pdf
- Bokhorst, J., ter Berg, C., Zanen, M. en Koopmans, C. (2008). Mest, compost en bodemvruchtbaarheid: 8 jaar proefveld Mest als Kans. Louis Bolk Instituut, nr. LD-10. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/115986>
- Bos, M.M., Mosters, C.J.M., en de Snoo, G.R. (2014). De effectiviteit van akkerranden in het vervullen van maatschappelijke diensten. Een overzicht uit wetenschappelijke literatuur en praktijkervaringen. CLM rapport nr. 188, Department Conservation Biology, Institute of Environmental Sciences, Leiden University.
- Bünemann, E. K., G. Bongiorno, Z. G. Bai, R. Creamer, G. B. d. Deyn, R. G. M. d. Goede, L. Flesskens, V. Geissen, T. W. M. Kuijper, P. Mäder, M. M. Pulleman, W. Sukkel, J. W. v. Groenigen, & L. Brussaard (2018). Soil quality - A critical review. *Soil Biology & Biochemistry* 120:105-125. DOI:10.1016/j.soilbio.2018.01.030.
- Clevering, O.A., Hopster, G.K., van Beek, A.J.C.M., Spruijt, J. en Visser, A.J. (2005). Natuurontwikkeling langs akkers: evaluatie van zes jaar onderzoek naar het beheer van akkerranden en slootkanten op proefbedrijven. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, nr. 530055.
- Cougnon, M., Reheul, D., D'Hose, T. en Vandaele, E. (2010). Het gebruik van gft-compost in de maisteelt. *Landbouw & Techniek*, 18, pp. 18-21. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/300925>
- Coussement, T., Janssens, P., Elsen, A., Pardon, P., Reubens, B. en Mertens, J. (2019). Effect van agroforestry op de waterhuishouding. Beschikbaar via: https://pure.ilvo.be/ws/portalfiles/portal/7611596/Projectrapport_Bodemwaterhuishouding.pdf
- Creamer, R. E., J. M. Barel, G. Bongiorno & M. J. Zwetsloot (2022). The life of soils: Integrating the who & how of multifunctionality. *Soil Biology & Biochemistry* 166: 108561. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108561
- Crittenden, S.J. (2015). Biophysical soil quality of tillage systems in conventional and organic farming [PhD thesis]. Wageningen University and Research. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/364181>

- D'Haene, K., Vandenbruwane, J., De Neve, S., Gabriels, D., Salomez, J. en Hofman, G. (2008). The effect of reduced tillage on nitrogen dynamics in silt loam soils. *European Journal Agronomy*, 28, pp. 449-460. doi: 10.1016/j.eja.2007.11.007
- D'Hose, T., Ruysschaert, G., Viaene, N., Debode, J., Vanden Nest, T., van Vaerenbergh, J., Cornelis, W., Willekens, K. en Vandecasteele, B. (2016). Farm compost amendment and non-inversion tillage improve soil quality without increasing the risk for N and P leaching.
- De Clercq, T., Merckx, R., Elsen, A. en Vandendriessche, H. (2016). Impact of long-term compost amendments on soil fertility, soil organic matter fractions and nitrogen mineralization. *Acta Horti*, pp. 1146. doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1146.10
- De Clercq, T., Merckx, R., Elsen, A., & Vandendriessche, H. (2016). Impact of long-term compost amendments on soil fertility, soil organic matter fractions and nitrogen mineralization. *Acta Horticulturae*, 1146, 79–86.
- de Haan, J.J., van den Elsen, H.G.M., Hanegraaf, M.C., en Visser, S.M. (2021). Bodemindicatoren voor landbouwgronden in Nederland (BLN versie 1.1). Wageningen Plant Research. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/550065>
- Dekkers, M.F., Trip, M., van Balen, D., Huizinga, K., Haagsma, W. en Sprangers, T. (2023). 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 and Research, WPR-1033. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/635821>
doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1146.10
- Elhakeem, A., Porre, R.J., Hoffland, E., van Dam, J.C., Drost, S.M., en De Deyn, G.B. (2023). Radish-based cover crop mixtures mitigate leaching and increase availability of nitrogen to the cash crop. *Field Crops Research*, 292. doi: 10.1016/j.fcr.2022.108803
- Faber, J.H., Cousin, I., K.H.E. Meurer, C.M.J. Hendriks, A. Bispo, M. Viketoft, L. ten Damme, D. Montagne, M.C. Hanegraaf, A. Gillikin, P. Kuikman, G. Obiang-Ndong, J. Bengtsson & Astrid Taylor (2022). Stocktaking for Agricultural Soil Quality & Ecosystem Services Indicators & their Reference Values. EJP SOIL Internal Project SIREN Deliverable 2. Report, 153 pp.
https://ejpsoil.eu/fileadmin/projects/ejpsoil/1st_call_projects/SIREN/SIREN_D2_final_report.pdf
- Floot, H.W.G., Lamers, J.G., en van den Berg, W. (1992). De invloed van de intensiteit van het bouwplan op poot aardappelen, suikerbieten en wintertarwe (vruchtwisselingsproef FH 82). Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, nr. 139. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/354050>
- Fuchs, L. en van Leeuwen, S. (2022). Effecten van agroforestry op de waterhuishouding en functionele agrobiodiversiteit. Wageningen University & Research, nr. WPR-OT 961. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/580955>
- Fuchs, L., van der Meer, F., Schoutsen, M. en Smit, E. (2021). Verkenning naar de potentie van agroforestry als oplossingsrichting voor de stikstofproblematiek in de provincie Zeeland. Wageningen University and Research, nr. WPR-OT-879. doi: 10.18174/568426
- Fuchs, L., Vijn, M. en Schoutsen, M. (2023). Factsheet Agroforestry 11: Hoe kan agroforestry bijdragen aan een oplossing van de stikstofproblematiek? Wageningen University and Research. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/638797>
- Gentsch, N., Boy, J., Batalla, J.D.K., Heuermann, D., von Wirén, N., Schweneker, D., Feuerstein, U., Gross, J., Bauer, B., Reinhold-Hurek, B., Hurek, T., Céspedes, F.C. en Guggenberger, G. (2020). Catch crop diversity increases rhizosphere carbon inputs and soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*, 56, 943-957. doi: 10.1007/s00374-020-01475-8

- Gentsch, N., Riechers, F.L., Boy, J., Schwenker, D., Feuerstein, U., Heuermann, D. en Guggenberger, G. (2023). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *EGUsphere*. doi: 10.5194/egusphere-2023-1885
- Grootenhuis, J.A. en te Velde, H.A. (1975). Groenbemesting en opbrengst van suikerbieten op zavelgrond. *Bedrijfsontwikkeling*, jaargang 6, pp. 621-626. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/217351>
- Grunwald, D., Stracke, A. en Koch, H.J. (2022). Cover crop effects on soil structure and early sugar beet growth. *Soil Use and Management*, 39(1), pp. 209-217. doi: 10.1111/sum.12800
- Hannula, S.E., Di Lonardo, D.P., Christensen, B.T., Crotty, F.V., Elsen, A., van Erp, P.J., Hansen, E.M., Rubaek, G.H., Tits, M., Toth, Z. en Termorshuizen, A.J. (2021). Inconsistent effects of agricultural practices on soil fungal communities across 12 European long-term experiments. *European Journal of Soil Science*, pp. 1-22. doi: 10.1111/ejss.13090
- Hoek, J., van Balen, D., Haagsma, W., van den Berg, W., van Asperen, P., Sukkel, W., de Haan, J., Bloem, J. (2019). Bodemindicatoren in BASIS: Identificatie van de belangrijkste biologische en chemische bodemparameters ("bodemindicatoren") in het project BASIS over de periode 2009-2016. Wageningen University & Research. doi: 10.18174/511496
- Hoekstra, O. en Lamers, J.G. (1993). 28 jaar De Schreef. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, nr. 67. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/345375>
- Hofbauer, M., Bloch, R., Bachinger, J. en Gerke, H.H. (2022). Effects of shallow non-inversion tillage on sandy loam soil properties and winter rye yield in organic farming. *Soil and tillage research*, 105435. doi: 10.1016/j.still.2022.105435.
- Hoogmoed, M., den Toonder, J., Schepens, J.A.B., Vervuurt, W. en Koopmans, C. (2023). Effecten van koolstofvastleggende maatregelen op de (BLN)-bodemkwaliteit indicatoren – Deel 3. Beschikbaar via: https://slimlandgebruik.nl/sites/default/files/2024-04/vervuurt_et_al_2023_-effecten-van-koolstofvastleggende-maatregelen-op-de-bodemkwaliteit-indicatoren-deel-3_v2.pdf
- Hoogmoed, M., Timmermans, B.G.H., Bloem, J. van Asperen, P., Cruijssen, J., De Haan, J.J., Selin Norén, I., Slier, T., Wagenaar, J.P., Elsen, A., Martens, S. en Koopmans, C.J. (2021). Verschillen in bodemkwaliteit door koolstofmaatregelen; in beeld gebracht aan de hand van de BLN-indicatorenset. Beschikbaar via: https://slimlandgebruik.nl/sites/default/files/2021-09/2021_hoogmoed_et_al_verschillen_in_bodemkwaliteit_door-koolstofmaatregelen_0.pdf
- Jacobs, S. R., Webber, H., Niether, W., Grahmann, K., Lüttschwager, D., Schwartz, C., ... & Bellingrath-Kimura, S. D. (2022). Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into
- Jansema, A., Hoekstra, N., van Eekeren, N., Stip, A., Iepema, G. en Manhoudt, A. (2021). Koeien en kruiden: de meerwaarde van kruidenrijk grasland voor weidevogel, koe en boer. Hogeschool Van Hall Larenstein. doi: 10.31715/2021.5
- Janssen, P. en Bongers, T. (2022). Kunstmest besparen met kruidenrijk grasland. *Vfocus*, pp. 28-30. Beschikbaar via: <https://www.louisbolck.nl/publicaties/kunstmest-besparen-met-kruidenrijk-grasland>
- Janssen, P., Hoekstra, N., van Eekeren, N., Jansma, A., Iepema, G. en Verhoeff, T. (2020). Inzaaien van kruiden in grasland. *Ekoland*, pp. 56-57. Beschikbaar via: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/476917>
- Janssen, P., Wagenaar, J.P., van Eekeren, N. en Antonissen, H. (2020). Productief kruidenrijk grasland biedt kans. *Vfocus*, pp. 32-35. Beschikbaar via: <https://www.louisbolck.nl/publicaties/productief-kruidenrijk-grasland-biedt-kans>
- Jian, J., Du, X., Reiter, M.S. en Stewart, R.D. (2020). A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biology and Biochemistry*. doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107735
- Koopman, W. (2020). Droogte speelt kruidenrijk grasland in de kaart. *Veeteeltvlees*, pp. 26-28. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/529286>

- Koopmans, C. en Bloem, J. (2018). Soil quality effects of compost and manure in arable cropping: results from using soil improvers for 17 years in the MAC trial. Louis Bolk Instituut, nr. 2018-001.
- 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, K., Timmermans, B., Wagenaar, J.P., van 't Hull, J., Hanegraaf, M. en de Haan, J. (2019). Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof: resultaten uit lange termijn experimenten (LTE's). Beschikbaar via: https://slimlandgebruik.nl/sites/default/files/2022-06/2.2a_lange_termijn_experimenten_2018_definitief_rapport.pdf
- Lamers, J.G. en Hoekstra, O. (1989). Beperkingen en mogelijkheden van (nauwe) rotaties in de akkerbouw. In: Themadag 'Vruchtwisseling grenzen aan nauwe rotaties'. Themaboekje nr. 9, 24 november 1989. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/275033>
- Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I., and Rillig, M.C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nat Rev Earth Environ* 1, 544–553. doi: 10.1038/s43017-020-0080-8
- Leroy, B. (2008). Soil food web, C and N transformations and soil structure: interactions and feedback mechanisms as a function of the quality of exogenous organic matter [PhD thesis]. ISBN nummer: 978-90-5989-241-5.
- Manhoudt, A., Jansma, A., Iepema, G. en Wagenaar, J.P. (2020). Kruidenrijke graslanden als onderdeel van natuurinclusieve landbouw. *Vakblad natuur bos landschap*, 164, pp. 20-23. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/520670>
- Marsden, C., Martin-Chave, A., Cortet, J., Hedde, M. and Yvan, C. (2020). How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. *Plant Soil*, 453(1-2), pp. 29-44. doi: 10.1007/s11104-019-04322-4.
- Mayer, S., Wiesmeier, M., Sakamoto, E., Hübner, R., Cardinael, R., Kühnel, A. en Kögel-Knabner, I. (2022). Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 323. doi: 10.1016/j.agee.2021.107689
- Ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit [LNV] (2019). Nationaal Programma Landbouwbodems: alle Nederlandse landbouwbodems duurzaam beheerd in 2030. Beschikbaar via: <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-0fc2084ae254222a45676ac50b712a576e75911f/pdf>
- Nelissen, V., Coussement, T., Pardon, P. en Reubens, B. (2018). Effect van agroforestry op organische stof en nutriënten. Beschikbaar via: https://ilvo.vlaanderen.be/uploads/images/Agroforestry/20180614-Projectrapport_Effect-van-AF-op-OS-en-nutri%C3%ABnten.pdf
- Nevens, F. en Reheul, D. (2003). Permanent grassland and 3-year leys alternating with 3 years of arable land: 31 years of comparison. *European Journal of Agronomy*, 19(1), pp. 77-90. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00021-7
- Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., Fernández-Ugalde, O. (2017). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: a review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), pp. 140-153. doi: 10.1111/ejss.12499
- Pangea, I.S., Apostolakis, A., Berti, A., Bussell, J., Cermak, P., Diels, J., Elsen, A., Kusa, H., Piccoli, I., Poesen, J., Stoate, C., Tits, M., Toth, Z. en Wyseure, G. (2022). Impact of agricultural management on soil aggregates and associated organic carbon fractions: analysis of long-term experiments in Europe. *SOIL*, 8, pp. 621-644. doi: 10.5194/soil-8-621-2022
- Pangea, I.S., Berti, A., Cermak, P., Diels, J., Elsen, A., Kusá, H., Piccoli, I., Poesen, J., Stoate, C., Tits, M., Toth, Z. en Wyseure, G. (2021). Soil water retention affected by management induced changes of soil organic carbon: analysis of long-term experiments in Europe. *Land*, 10, pp. 1362. doi: 10.3390/land10121362
- Pardon, P., Reubens, B., Mertens, J., Verheyen, K., de Frenne, P., de Smet, G., Nelissen, V., van Waes, C. en Reheul, D. (2018). Biomassproductie en kwaliteit van landbouwgewassen en bomen in lijnvormige agroforestry systemen. Beschikbaar via: https://pure.ilvo.be/ws/portalfiles/portal/7611549/20180620_Projectrapport_Gewasopbrengst.pdf

- 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.
- Pent, G.J. (2020). Over-yielding in temperate silvopastures: a meta-analysis. *Agroforestry systems*, 94, pp. 1741-1758. doi: 10.1007/s10457-020-00494-6
- Porre, R.J. (2020). Clever cover cropping: litter trait diversities and elemental flows [PhD thesis]. Wageningen University and Research. doi: 10.18174/531407
- Prins, E., Sleiderink, J., Hoekstra, N. en van Eekeren, N. (2022). Rapportage: onderzoek naar agroforestrysysteem van laanbomen in grasland van melkveehouder 2018-2021. Louis Bolk Instituut, nr. 2022-003 LbD. Beschikbaar via: <https://louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/rapportage-onderzoek-naar-agroforestrysysteem-van-laanbomen-grasland-van-melkveehouder-2018-2021.pdf>
- Reubens, B., Wauters, E., Coussement, T., van Daele, S., van Nieuwenhove, T., Balis, J.P., Pardon, P., Borremans, L., Nelissen, V., Raman, M., Elsen, A., Mertens, J., Reheul, D. en Verheyen, K. (2019). Agroforestry in Vlaanderen 2014-2019: handvatten na 5 jaar onderzoek & praktijkwerking. Beschikbaar via: https://pure.ilvo.be/ws/portalfiles/portal/7611675/Handboek_Agroforestry_Vlaanderen.pdf
- Rops, A.H.J., Schouten, C.A.M. en Alblas, J. (1996). Effecten intensieve bouwplannen op lichte zavelgronden in de Noordoostpolder (WG140). Proefstation AGV Lelystad, verslag nr. 228.
- Ros, G. H., de Haan, J. J., Fuchs, L. M., & Molendijk, L. (2023). Bodembeoordeling van landbouwgronden voor diverse ecosysteemdiensten: ontwikkeling van de BLN, versie 2.0. Wageningen University & Research, nr WPR-OT-1030. doi: 10.18174/634579
- Ros, G.H., Verwij, S.E., Janssen, S.J.C., de Haan, J. en Fujita, Y. (2022). An open health assessment framework facilitating sustainable soil management. *Environmental Science & Technology*, 56(23). doi: 10.1021/acs.est.2c04516
- Schepens, J.A.B., Timmermans, B.G.H., Bloem, J., Fuchs, L.M., Crujisen, J.J.P., Slier, T., Heupink, D.T., Wagenaar, J.P. en Koopmans, J.C. (2024). Evaluatie van maatregelen voor koolstofvastlegging na zes jaar meten op Lange Termijn Locaties. Louis Bolk Instituut, nr. 2023-031 LbP.
- 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. (2022). Effecten van koolstofvastleggende maatregelen op de (BLN)-bodemkwaliteit indicatoren – Deel 2. Beschikbaar via: https://slimlandgebruik.nl/sites/default/files/2022-04/2021_schepensetal_slimlandgebruik_effecten_van_koolstof_vastleggende_maatregelen_op_bln_indicatoren.pdf
- 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. en Velthof, G.L. (2007). Grassland renovation in the Netherlands; agronomic, environmental and economic issues. Wageningen University and Research, nr. 47. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/39748>
- Schröder, J., ten Holte, L., van Dijk, W., de Groot, W.J.M., de Boer, W.A. en Jansen, E.J. (1992). Effecten van wintergewassen op de uitspoeling van stikstof bij de teelt van snijmais. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/354110>
- 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, WPR-OT-898. doi: 10.18174/558794
- Slier, T., Lesschen, J. P., Stout, B. J. B., Porre, R. J., Agricola, H. J., de Haan, J. J., & Koopmans, C. (2021). CO2Bodem Tussenresultaten Slim Landgebruik. Slim Landgebruik. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/564620>
- Smit, A.L., de Haan, J.J. en Zwart, K.B. (2005). Kan de akkerbouw en groenteteelt op zandgrond voldoen aan de nitraatnorm? Resultaten Experimenteel Onderzoek op de Kernbedrijven Vredepeel en Meterik. Wageningen University & Research, OV0502. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/28465>

- Sollen-Norrlin, M., Ghaley, B.B., Rintoul, N.L.J. (2020). Agroforestry Benefits and Challenges for Adoption in Europe and Beyond. *Sustainability*, 12(17), pp. 7001. doi: 10.3390/su12177001
- Teklehaimanot, Z., Jones, M. en Sinclair, F.L. (2002). Tree and livestock productivity in relation to tree planting configuration in a silvopastoral system in North Wales, UK. *Agroforestry systems*, 56, pp. 47-55. doi: 10.1023/A:1021131026092
- temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109065.
- Timmermans, B., van der Burgt, G.J., Schurer, B., Bakker, N., van Asperen, P. en Hanegraaf, M. (2023). Effecten van landbouwkundige maatregelen op organische stof-, stikstof-, en fosfaatbalansen: een analyse vanuit de systeemproeven van de PPS Beter Bodembeheer. Wageningen University and Research, WPR-1032. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/637626>
- van Alebeek, F.A.N. en van Kruistum, G. (2004). Akkerranden en onkruiden als bron van natuurlijke vijanden en plagen. Kennisakker. Beschikbaar via: <https://kennisakker.nl/archief-publicaties/akkerranden-en-onkruiden-als-bron-van-natuurlijke-vijanden-en-plagen742>
- van Dam, A.M. (2006) Understanding the reduction of nitrogen leaching by catch crops [PhD thesis]. Wageningen University and Research. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/121830>
- van Dijk, J.J. (2020). Nationaal Programma Landbouwbodems. Beschikbaar via: <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-65d5a49a-480b-4c31-972c-ecdb7611d5aa/pdf>
- van Dijk, W., Schröder, J.J., ten Holte, L. en de Groot, W.J.M. (1995). Effecten van wintergewassen op verliezen en benutting van stikstof bij de teelt van snijmais: verslag van onderzoek op ROC Aver-Heino tussen voorjaar 1991 en najaar 1994. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Volleggrond, nr. 201. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/355968>
- van Dijk, W., van Eekeren, N., van Middelkoop, J. en Velthof, G. (2021). Stikstofdynamiek bij vruchtwisseling van grasland en bouwland. Bemestingsadvies Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. Beschikbaar via: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/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 Eekeren, N., de Wit, J., van der Burgt, G.J., Eriksen, J., Reheul, D. en Hoekstra, N.J. (2023). Leys in sustainable farming systems. *Grassland Science in Europe*, 28, pp. 1-13. Beschikbaar via: <https://www.louisbolck.nl/sites/default/files/publication/pdf/leys-sustainable-farming-systems.pdf>
- van Eekeren, N., Murray, P.J. en Smeding, F.W. (2007). Soil biota in grassland, its ecosystem services and the impact of management. *Grassland Science in Europe*, 12, pp. 247-258. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/577>
- van Eekeren, N., van der Burgt, G.J., Philipsen, B., van Schooten, H. en de Haan, M. (2011). Vruchtwisseling van gras en mais: effect op organische stof en kosten/baten. *Vfocus*, pp. 24-26. Beschikbaar via: <https://www.louisbolck.nl/sites/default/files/publication/pdf/2448.pdf>
- van Geel, W., Rietra, R., Verstegen, H., Duan, K., Groenendijk, P. en Verhoeven, J. (2023). Effect N-vanggewassen na aardappel op zandgrond op de nitraatuitspoeling: verslag van driejarig veldonderzoek op zuidelijk zandgrond te Vredepeel. Wageningen Plant Research, nr. WPR-OT 1018. doi: 10.18174/631358
- van Geel, W.C.A. en Verstegen, H.A.G. (2008). Wintergerst als groenbemester en stikstofvanggewas. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, PPO nr. 3253013350. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/138116>
- van Geel, W.C.A., Dekker, P.H.M., de Groot, W.J.M., van den Akker, J.J.H. en Floot, H.W.G. (2007). Structuurherstellend vermogen van groenbemesters: verslag van veldproeven in 2005-2006 te Lelystad en Kollumerwaard. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, nr. 510492. Beschikbaar via: https://kennisakker.nl/storage/1440/Rapport_510492_Structuur_Groenbemesting.pdf

- Van Leeuwen, J.P., Saby, N.P.A., Jones, A., Louwagie, G., Micheli, E., Rutgers, M., Schulte, R.P.O., Spiegel, H., Toth, G. en Creamer, R.E. (2017). Gap assessment in current soil monitoring networks across Europe for measuring soil functions. *Environmental Research Letters*, 12. doi: 10.1088/1748-9326/aa9c5c
- Van Rijn, P.C.J. (2018). Waarden van akkerranden in de Hoeksche Waard. University of Amsterdam. Beschikbaar via: https://pure.uva.nl/ws/files/31920104/Waarde_van_Akkerranden_rapport2018.pdf
- van Rijn, P.C.J. en Wäckers, F.L. (2007). Bloemrijke akkerranden voeden natuurlijke vijanden. *Entomologische Berichten*, 67(6), pp. 226-230.
- Van Vooren, L., Reubens, B., Broekx, S., De Frenne, P., Nelissen, V., Pardon, P. en Verheyen, K. (2017) Ecosystem service delivery of agrienvironment measures: A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land. *Agric. Ecosyst. Environ.* 244, 32–51. doi: 10.1016/j.agee.2017.04.015.
- Velthof, G.L., Neeteson, J.J., van der Meer, H.G. en Oenema, O. (2000). Schatting van de netto stikstofmineralisatie en biologische stikstofbinding in landbouwgronden. *Alterra*, nr. 117. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/22048>
- Vereecken, H., A. Schnepf, J.W. Hopmans, M. Javaux, D. Or, T. Roose, J. Vanderborght et al. (2016). Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, & New Perspectives. *Vadose Zone Journal* 15(5), 1-57.
- Vertès, F., Hatch, D., Velthof, G., Taube, F., Laurent, F., Loiseau, P. en Recous, S. (2007). Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. *Grassland science in Europe*, 12, pp. 227-. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/577>
- Vos, J., van der Putten, P.E.L. (2004). Nutrient cycling in a cropping system with potato, spring wheat, sugar beet, oats and nitrogen catch crops. II. Effect of catch crops on nitrate leaching in autumn and winter. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70, pp. 23-31. doi: 10.1023/B:FRES.0000049358.24431.0d
- Wesselink, M., van Gestel, S., Uyttendaele, S., 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 and Research, WPR-OT 1040. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/638690>
- Wijnholds, K.H. en van den Berg, W. (1995). Vruchtwisselingsproef AGM 600 proefboerderij A.G. Mulderhoeve Emmercompascuum 1981-1989. Effect van gewassrotaties, organische stof en sikstof op de productie van aardappelen, suikerbieten, zomertarwe en haver op een veenkoloniale grond. PAGV verslag nr. 206.
- Wijnholds, K.H., van den Berg, W., Korthals, G.W. en Lamers, J.G. (2004). Onderzoek naar geïntegreerde vruchtwisselingssystemen op de noordoostelijke zand- en dalgronden 1990-2000, en afsluitend onderzoeksjaar 2001. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving*, PPO nr. 5228458
- Willekens, K., Vandecasteele, B., Buchan, D. en De Neve, S. (2014). Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Applied Soil Ecology* 82, pp. 61-71. doi: 10.1016/j.apsoil.2014.05.009
- Yang, T, Siddique K. H. M. & K. Liu (2020). Cropping systems in agriculture & their impact on soil health - A review. *Global Ecology & Conservation* 23. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01118
- Zwetsloot, M. J., Bongiorno, G., Barel, J. M., di Lonardo, D. P., & Creamer, R. E. (2022). A flexible selection tool for the inclusion of soil biology methods in the assessment of soil multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, 108514.

Bijlage 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. Deze parameter is gemeten door Eurofins Agro.

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 gloeiverlies en de afgeleide nieuwe en goedkopere methode met NIRS. Deze parameter is gemeten door Eurofins Agro.

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. Deze parameter is gemeten door Wageningen Environmental Research.

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. Deze parameter is gemeten door Eurofins Agro.

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. Deze meting is bepaald door middel van een penetrometer.

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 rekenen naar de totale koolstof voorraad en daarmee vast te kunnen stellen of er sprake is van verandering in de totale koolstof voorraad. Deze parameter is bepaald door de Bodemkundige dienst van België.

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-CaCl₂ is de pH gemeten in een CaCl₂ extract vergelijkbaar met de condities rond plantenwortels in een bodem. Deze parameter is bepaald Eurofins Agro.

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. Deze parameter is bepaald Eurofins Agro.

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 de wateroplosbare fosfaat bepaald (Pw). Deze parameter is bepaald Eurofins Agro.

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. Deze parameter is bepaald Eurofins Agro.

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 organische 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. Deze parameter is bepaald door Eurofins Agro.

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. Deze parameter is bepaald Eurofins Agro.

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). Deze parameter is bepaald Eurofins Agro.

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). Deze parameter is bepaald Eurofins Agro.

