



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Een eerste verkennende literatuurstudie
over het effect van bodembeheer
op het behalen van
bodem-, water- en luchtdoelstellingen**

RIVM-briefrapport 2020-0033
C. Blokhuis | J.A.B. Schepens | A. van der Wal



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Een eerste verkennende literatuurstudie
over het effect van bodembeheer
op het behalen van
bodem-, water- en luchtdoelstellingen**

RIVM-briefrapport 2020-0033
C. Blokhuis | J.A.B. Schepens | A. van der Wal

Colofon

© RIVM 2020

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2020-0033

C. Blokhuis (auteur), RIVM
J.A.B. Schepens (auteur), RIVM
A. van der Wal (auteur), RIVM

Contact:
Christa Blokhuis
Onderzoek en Innovatie Milieukwaliteit
Christa.blokhuis@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in het kader van het Strategisch Onderzoeksprogramma van het RIVM.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Een eerste verkennende literatuurstudie over het effect van bodembeheer op het behalen van bodem-, water- en luchtdoelstellingen

Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) wil de kwaliteit van de Nederlandse landbouwbodems verbeteren. Daarom wil het ministerie dat alle landbouwbodems in 2030 duurzaam worden beheerd. Dit is belangrijk om voldoende gewassen te blijven produceren en minder vervuilende stoffen, zoals CO₂ en stikstof, naar lucht en water uit te stoten.

Het RIVM heeft hiervoor op een rij gezet of maatregelen voor bodembeheer alleen positieve of ook negatieve effecten hebben. Maatregelen kunnen bijvoorbeeld de uitstoot van vervuilende stoffen verminderen of de bodemfuncties verbeteren. Onbedoeld kunnen maatregelen ook de uitstoot van andere stoffen vergroten of andere bodemfuncties slechter maken. Het RIVM beveelt aan om zowel de positieve als de negatieve effecten mee te laten wegen in de keuze voor beleidsmaatregelen (systeembenadering).

Een voorbeeld van een maatregel die alleen positieve effecten heeft, is begroeide stroken land langs de akker aanleggen (akkerranden). Doordat de begroeiing stikstof en fosfor opneemt, stromen deze stoffen minder weg naar de omliggende sloten. Een voorbeeld van een maatregel met positieve en negatieve effecten is bekalken. Door deze maatregel verdwijnt er minder stikstof vanuit de bodem naar het grondwater, maar komt er wel meer CO₂ vrij. Ook mest onder de grond inspuiten heeft goede en slechte gevolgen. Door deze maatregel komt minder ammoniak in de lucht terecht, maar lekt er meer stikstof in het grondwater.

Deze studie is een verkenning van de wetenschappelijke literatuur. Sommige effecten zijn nog niet helemaal onderzocht. Vervolgonderzoek zou duidelijk moeten maken hoe goed een maatregel werkt vergeleken met een andere om de kwaliteit van de lucht, het water en de bodem te verbeteren. Ook moet duidelijk worden of een maatregel in de praktijk uit te voeren is.

Kernwoorden: bodemkwaliteit, bodembeheermaatregelen, duurzame landbouw, stikstof

Synopsis

A preliminary literature study on the effect of soil management on achieving air, water and soil targets

The Dutch Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality (LNV) is committed to improving the quality of the agricultural soils in the Netherlands and aims to have all these soils under sustainable management by 2030. This is crucial if we are to continue to produce sufficient crops and emit less pollutants, such as CO₂ and nitrogen, to the air and water.

To this end, RIVM has determined whether soil management measures only have positive effects or negative effects, too. Measures can, for example, reduce the emission of pollutants or improve soil functions. However, measures can also, unintentionally, increase the emission of other substances or reduce the effectiveness of other soil functions. RIVM recommends taking both the positive and negative effects into account when opting for policy measures (systems approach).

An example of a measure that only has positive effects is the cultivation of strips of vegetation on field margins. The vegetation takes up nitrogen and phosphorus, thus reducing the leaching of these substances to the surrounding ditches. An example of a measure that has both positive and negative effects is the application of lime. It reduces the nitrogen leaching out of the soil into the groundwater, but causes the release of more CO₂. Injecting fertilizer below the soil surface also has both good and bad effects. As a result of this measure, less ammonia is released into the air but more nitrogen leaches into the groundwater.

This information was obtained from an exploratory study of the scientific literature. Some effects have not yet been fully investigated. Future research should clarify how well a measure compares with others in terms of improving the quality of the air, water and soil. It should also define whether a particular measure is feasible in practice.

Keywords: soil quality, soil management practices measures, sustainable agriculture, nitrogen

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11

- 1.1 Aanleiding — 11
- 1.2 Afbakening — 11
- 1.3 Relevante beleidskaders — 12
- 1.4 Bodemfuncties — 13
- 1.5 De koolstof-, stikstof- en fosfor-cycli — 15
- 1.6 Probleemstelling — 17
- 1.7 Doelstelling — 17

2 Aanpak — 19

- 2.1 Selectie van bodemfuncties, bodembeheermaatregelen en emissies — 19
- 2.2 Zoeken van literatuur — 21
- 2.3 Analyse — 21
- 2.4 Synthese — 22

3 Resultaten — 23

- 3.1 Resultaten van eerdere reviews over effect van bodembeheermaatregelen op bodemindicatoren — 23
- 3.2 Effect van het type grondbewerking — 24
- 3.3 Akkerranden — 26
- 3.4 Soorten bemesting: dierlijke mest en compost — 26
- 3.5 Variaties op gewasrotatie in de akkerbouw — 27
- 3.6 Groenbemesting — 28
- 3.7 Bekalken — 28
- 3.8 Voorkomen bodemverdichting — 28
- 3.9 Samenvatting van de resultaten — 30

4 Discussie en conclusie — 33

5 Referenties — 37

6 Bijlage 1: uitgebreide tabel met resultaten — 41

Bijlage 2: voorbeeld van interacties tussen drie bodembeheermaatregelen en beleidskaders relevant voor duurzame landbouw — 43

Samenvatting

Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) wil de kwaliteit van de Nederlandse landbouwbodems verbeteren. Daarom heeft het ministerie als doel om alle landbouwbodems in 2030 duurzaam te beheren. Duurzaam bodembeheer is belangrijk om voldoende gewassen te blijven produceren en daarnaast andere functies van de bodem te verbeteren, zoals de structuur van de bodem. Ook heeft het type bodembeheer effect op de mate waarin broeikasgassen, zoals CO₂, naar de lucht worden uitgestoten en stikstof naar het water uitspoelt. Duurzaam bodembeheer draagt eraan bij dat de doelen in beleidskaders voor de bodem-, water- en luchtkwaliteit en het klimaat worden gerealiseerd. Denk aan de Nitraatrichtlijn en het Klimaatakkoord.

Maatregelen om de uitstoot van vervuilende stoffen te verminderen of de bodemfuncties te verbeteren kunnen onbedoeld de uitstoot van andere stoffen vergroten of andere bodemfuncties verslechteren. Het type bodembeheer kan dus invloed hebben op verschillende beleidsdoelen. Om inzicht te verkrijgen in de verschillende effecten van het type bodembeheer op deze doelen heeft het RIVM een verkennende literatuurstudie uitgevoerd. De scope omvat de beleidskaders voor zowel bodem, water en lucht. Vervolgens is op een rij gezet of maatregelen voor bodembeheer alleen positieve of ook negatieve effecten hebben.

Deze kwalitatieve evaluatie laat de samenhang zien tussen de effecten van bodembeheermaatregelen op emissies en bodemfuncties. Onbedoelde negatieve effecten kunnen dan in een vroeg stadium worden herkend. Dit is nuttig om te bepalen welke beleidsmaatregelen duurzaam bodembeheer stimuleren, en legt bloot waar nog verdiepend onderzoek nodig is.

Deze evaluatie maakt inzichtelijk dat niet alle bodembeheermaatregelen eraan bijdragen om de beleidsdoelen te halen. Enkele voorbeelden zijn:

- Gangbare grondbewerking heeft een negatief effect op het bodemleven, de bodemstructuur en bodemorganische stof ten opzichte van geen grondbewerking.
- Drijfmest zorgt voor meer uitstoot van de broeikasgassen CO₂ en N₂O ten opzichte van het gebruik van compost en vaste mest.
- Mestinjectie zorgt voor minder uitstoot van ammoniakgas en voor meer uitstoot van het broeikasgas N₂O dan bovengrondse aanwending van de mest.

Het RIVM beveelt aan om een systeembenadering te gebruiken die breed genoeg is om zowel de gunstige als de ongunstige effecten van bodembeheermaatregelen af te wegen in de keuze van beleid en de uitvoering in de praktijk.

Deze studie is een eerste verkenning van de wetenschappelijke literatuur. Vervolgonderzoek zou erop gericht kunnen zijn om het effect van maatregelen te kwantificeren, bijvoorbeeld met behulp van beschikbare databronnen zoals de Bodembioologische Indicator, het Landelijk Meetnet Mestbeleid en de Emissieregistratie. Andere

onderwerpen zijn de effecten van bodembeheermaatregelen in verschillende bodems meer duiden, gewasopbrengst als indicator meenemen, net als de haalbaarheid van de maatregelen binnen de bedrijfsvoering. Hierbij kan worden aangesloten bij de Soil Navigator, een beoordelingsinstrument om verschillende bodemfuncties optimaal te beheren. Ook zou de kosteneffectiviteit van de verschillende maatregelen op de bodem-, water-, lucht- en klimaatdoelen nog kunnen worden onderzocht.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Een gezonde bodem is de basis voor duurzame landbouw. Een goede bodemkwaliteit draagt bij aan het handhaven van opbrengsten op de lange termijn²⁻⁴. In de Kamerbrief Bodemstrategie van mei 2018 geeft de minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit aan dat Nederland voor uitdagende opgaven staat op het gebied van klimaat, voedselzekerheid- en veiligheid, biodiversiteit en waterkwaliteit. Bovendien heeft Nederland zich gecommitteerd aan doelen om de kwaliteit van het water en de lucht te waarborgen. Om deze uitdagingen aan te gaan heeft het Ministerie onder meer als doel gesteld dat alle landbouwbodems in Nederland in 2030 duurzaam beheerd worden⁵.

In de Brief wordt de potentie van duurzaam bodembeheer als volgt verwoord door de minister: *"Aspecten die het functioneren van de bodem vooral bepalen zijn: beheer van organische stof en bodemvruchtbaarheid, beheer van bodemstructuur en beheer van bodemleven en weerbaarheid. Daarnaast kan met duurzaam bodembeheer extra koolstofvastlegging in Nederlandse landbouwbodems worden gerealiseerd. Hiermee heeft de landbouw een sleutel in handen om een bijdrage te leveren aan de oplossing van het klimaatprobleem."*

Er zijn verschillende onderzoeken opgezet (zoals het PPS project Beter Bodembeheer⁶), voor het komen tot instrumenten om bodemkwaliteit te meten en het ontwikkelen van kennis rondom geschikte bodembeheermaatregelen voor het bevorderen van de bodemkwaliteit. Echter, maatregelen die positief bijdragen aan het halen van de bodem- en waterdoelen kunnen mogelijk een negatief effect hebben op de luchtkwaliteit. Andersom kunnen maatregelen die bedoeld zijn om de luchtkwaliteitsdoelstellingen te halen, averechts werken voor bodem- en waterdoelen. Dit worden ook wel 'trade-offs' genoemd.

Om te kunnen beoordelen wat de diverse effecten zijn van bodembeheermaatregelen op het behalen van bodem-, water- en luchtdoelstellingen, is het nodig om deze op integrale wijze in kaart te brengen. Zo ontstaat een compleet beeld van bodembeheermaatregelen die mogelijk gestimuleerd kunnen worden de bodem- water- en luchtdoelen te bereiken en de landbouwbodems duurzaam te beheren. Door middel van een verkenning van de literatuur hebben we een overzicht gemaakt van de effecten van bodembeheermaatregelen op het behalen van bodem- water- en luchtdoelstellingen.

1.2 Afbakening

Voor deze verkennende literatuurstudie is er een selectie gemaakt van:

- 1) beleidskaders die betrekking hebben op landbouwbodems en water- en luchtdoelstellingen;
- 2) drie functies van de bodem die de kwaliteit van de bodem aangeven;
- 3) relevante bodembeheermaatregelen voor Nederland.

Deze aanpak wordt hieronder verder uitgelegd.

1.3 Relevante beleidskaders

In Nederland zijn een aantal beleidskaders van kracht die relevant zijn voor landbouwbodems en emissies naar de lucht en het water vanuit landbouwbodems (Tabel 1). Hierna volgt een uitleg per beleidskader.

Tabel 1 Selectie van beleidskaders die betrekking hebben op landbouwbodems en emissies naar de lucht en het water vanuit de bodem.

Doelstellingen t.a.v.:	Beleidskader:	Heeft betrekking op:
Emissies naar lucht	Klimaatwet	Emissies van CO ₂
		Emissies van CH ₄
		Emissies van N ₂ O
	NEC/ Voormalig PAS/ Schone Lucht Akkoord	Emissies van NH ₃
		Emissies van NO _x
Emissies naar water	Nitraatrichtlijn/KRW	N-uitspoeling
		P-uitspoeling
Bodem	Fosfaatrechten	Fosfaatgebruik
	GLB	Primaire productie Klimaatfuncties Biodiversiteit Waterregulatie
	Bodemstrategie LNV (nog geen beleidskader)	Bodemstructuur en bodemorganische stof
		Nutriëntenbeschikbaarheid
		Biodiversiteit en bodemleven

De klimaatwet stelt dat Nederland in 2030 49% minder CO₂ mag uitstoten ten opzichte van 1990. In het Klimaatakkoord, waar de landbouw één van de deelnemende sectoren is, staan afspraken over de manier waarop de klimaatdoelen gehaald kunnen worden. Het Klimaatakkoord is een resultaat van de VN-klimaatop in Parijs in 2015 (COP21) ⁷.

De emissieplafonds komen voort uit de Europese National Emission Ceilings (NEC) Directive (2016/2284/EU) die van kracht is sinds 2016. Net als andere lidstaten moet Nederland zich inzetten om de uitstoot van vijf belangrijke luchtvervuilende stoffen, namelijk stikstofoxiden (NO_x), niet-methaan vluchtige organische stoffen (NM-VOC), zwaveldioxide (SO₂), ammoniak (NH₃) en fijn stof (PM₁₀ en PM_{2,5}), onder de gestelde plafonds te krijgen en/of te houden. Ten opzichte van de voorgaande regeling (2001/81/EC), wordt er binnen de huidige NEC naar gestreefd om de gezondheidseffecten door luchtkwaliteit te halveren ten opzichte van 2005 middels reductiedoelstellingen. Het Programma Aanpak Stikstof (PAS) combineerde het vergunnen van activiteiten die stikstof uitstoten met bron- en herstelmaatregelen. In mei 2019 heeft de Raad van State echter besloten dat het PAS niet meer als basis gebruikt mag worden voor toestemming van activiteiten die stikstofdepositie veroorzaken. Het PAS richtte zich, net als het mestbeleid, op emissiebeperking en -regulering, maar enkel ten behoeve van stikstofgevoelige Natura 2000-gebieden. Op dit moment wordt een nieuwe integrale emissie-aanpak opgesteld⁸.

Het mestbeleid in Nederland is gebaseerd op de Europese Nitraatrichtlijn (91/676/EEC). Het richt zich op emissiebeperking. Het ziet in hoofdlijnen toe op het verminderen van ammoniakemissies naar de lucht en het verminderen van de bodemoverschotten van stikstof en fosfor om uitspoeling naar het grond- en oppervlaktewater te voorkomen.

Daarnaast stelt de wetgeving eisen t.a.v. mestaanwending, maximalisatie van de plaatsingsruimte en stalinrichting⁹.

De Kaderrichtlijn Water is een Europese richtlijn (2000/60/EC) die kwaliteitseisen stelt aan grond- en oppervlaktewater. De richtlijn hanteert criteria om zowel de biologische, chemische als fysische kwaliteit van waterlichamen te beoordelen. In relatie tot de landbouw zijn vooral de normen voor nitraat (NO₃), totaal stikstof (N), fosfaat (PO₄) en totaal fosfor (P) van belang¹⁰.

Sinds 1 januari 2018 zijn in Nederland de Fosfaatrechten van kracht. Door het schrappen van het melkquotum in 2015 was de melkveehouderij sterk gegroeid. Dit resulteerde in het overschrijden van het fosfaat excretieplafond in datzelfde jaar. Intussen is het Schone Lucht Akkoord (SLA) vastgesteld. Het advies van de Gezondheidsraad 'Gezondheidswinst door schonere lucht' van 23 januari 2018 is de basis voor het SLA. In dit akkoord praten diverse maatschappelijke partijen mee over de gestelde afspraken en maatregelen, met als doel om toe te werken naar de streefwaarden voor luchtkwaliteit van de Wereldgezondheidsorganisatie¹².

Het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid heeft als doel duurzaam, voedsaam, veilig en betaalbaar voedsel in Europa¹³. Vanaf 2008 is er aandacht voor maatregelen rondom watermanagement en klimaatverandering en het verbeteren van de biodiversiteit in de vorm van plattelandontwikkeling¹⁴.

De Bodemstrategie van het Ministerie van LNV is nog geen beleidskader, maar er is wel de intentie uitgesproken om het functioneren van de bodem te verbeteren door middel van duurzaam beheer ten aanzien van onder andere bodemorganische stof, nutriëntenbeschikbaarheid en het bodemleven⁵. In de volgende paragraaf zal er uitleg worden gegeven over bodemfuncties. Deze kunnen een uitgangspunt vormen voor de doelen binnen de Bodemstrategie.

1.4 Bodemfuncties

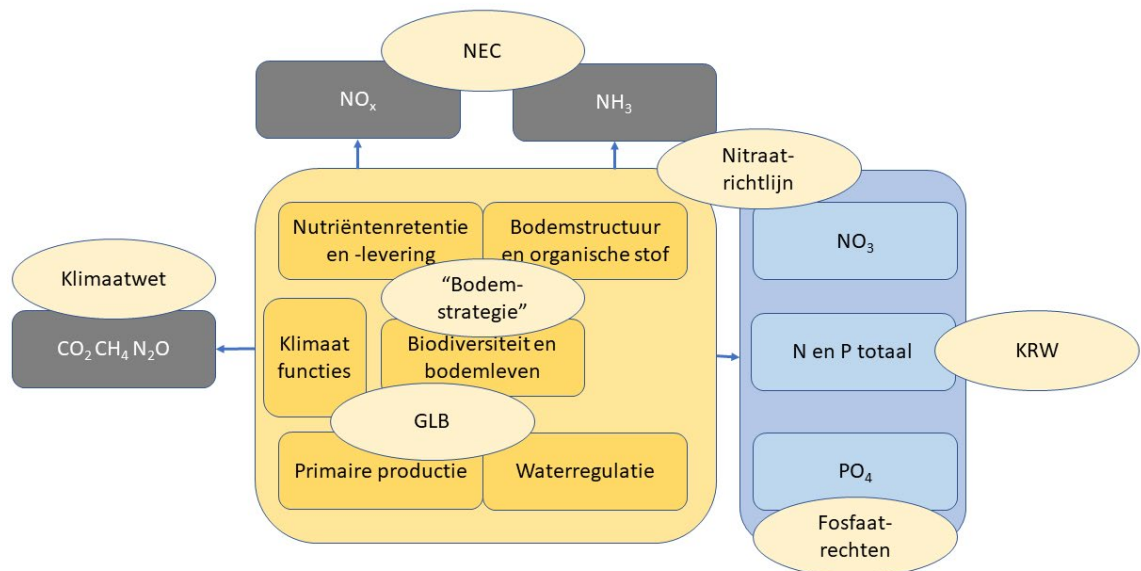
In 2003 heeft de Technische Commissie Bodem (TCB) een overzicht gemaakt van functies die relevant zijn voor de kwaliteit van de bodem. Deze werden 'ecosysteemdiensten' genoemd; functies die de bodem levert die van belang zijn voor het gewas en de mens. De belangrijkste vijf bodemfuncties zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Bodemfuncties die van belang kunnen zijn voor de kwaliteit van de bodem. Aangepast uit van der Wal et al.¹⁵ en Lima et al.¹⁶.

	Bodemfuncties
1.	Nutriëntenretentie en -levering
2.	Bodemstructuur en bodemorganische stof
3.	Biodiversiteit en bodemleven
4.	Waterregulatie
5.	Primaire productie

Met de bodemfunctie nutriëntenretentie en -levering wordt bedoeld dat de bodem voldoende nutriënten kan vasthouden en dat er voldoende nutriënten worden vrijgemaakt uit organische stof. Deze voedingsstoffen kunnen vervolgens worden opgenomen door het gewas. Bodemstructuur en bodemorganische stof zijn beide fysische kenmerken van de bodem, bodemorganische stof is ook een chemische eigenschap van de bodem. Als er meer bodemorganische stof wordt vastgelegd, bevordert dit de opslag van koolstof (C). Daarom is deze bodemfunctie ook essentieel voor de mitigatie van klimaatverandering. Bodemorganische stof kan het bodemleven en de bodembiodiversiteit stimuleren door voedsel te leveren aan bodemorganismen. Deze kunnen op hun beurt weer een positief effect hebben op andere bodemfuncties. Regenwormen kunnen bijvoorbeeld bijdragen aan een goede bodemstructuur. De capaciteit van landbouwbodems om water vast te houden is van belang om droogtestress van gewassen te vermijden, zeker met het oog op klimaatverandering die in Nederland zal leiden tot meer overmatige neerslag en droogte. Vanuit economisch oogpunt is de uiteindelijke gewasopbrengst die de bodem kan leveren van groot belang.

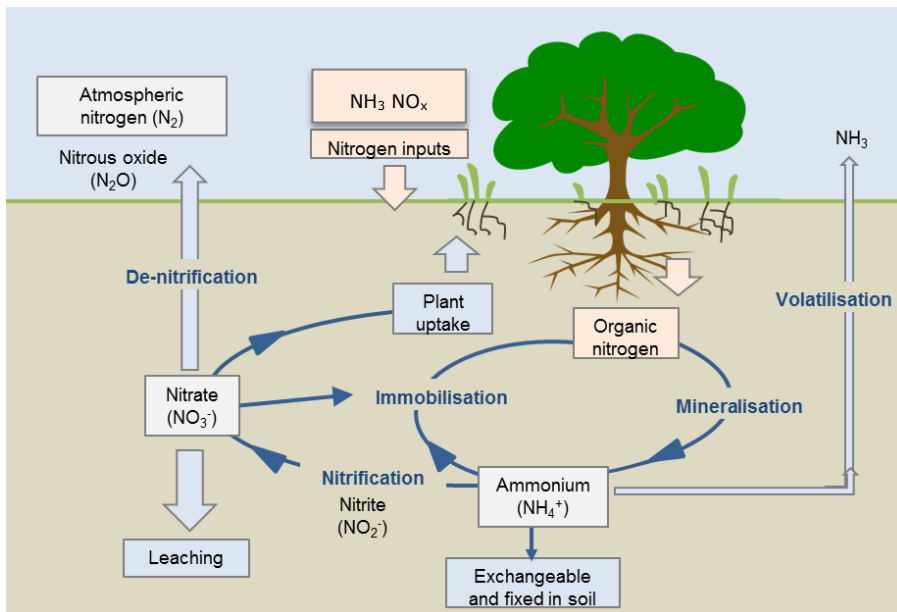
In Figuur 1 zijn paragraaf 2.3 en 2.4 samengevat in een schematisch overzicht van relevante beleidskaders, bodemfuncties en emissies naar de lucht en het water voor landbouwbodems



Figuur 1 Visualisatie van beleidskaders die relevant zijn voor bodemfuncties (geel), emissies naar lucht (grijs) en water (blauw) voor landbouwbodems. Binnen de gele rechthoek zijn bodemfuncties benoemd in de donkergele, kleine rechthoeken. In de lichtgele ovalen staan de beleidskaders vermeld. Zij zijn relevant voor de bodemfuncties of emissies die zij raken; "bodemstrategie" is formeel nog geen beleidskader. De SLA is buiten beschouwing gelaten omdat dit geen beleidskader betreft. De kleine vierkanten geven aan wat de bodem ons levert. Dit kunnen zowel producten (gewasopbrengst), diensten (o.a. bodemfuncties) als emissies (o.a. NO_x , NH_3 , CH_4) zijn.

1.5 De koolstof-, stikstof- en fosfor-cycli

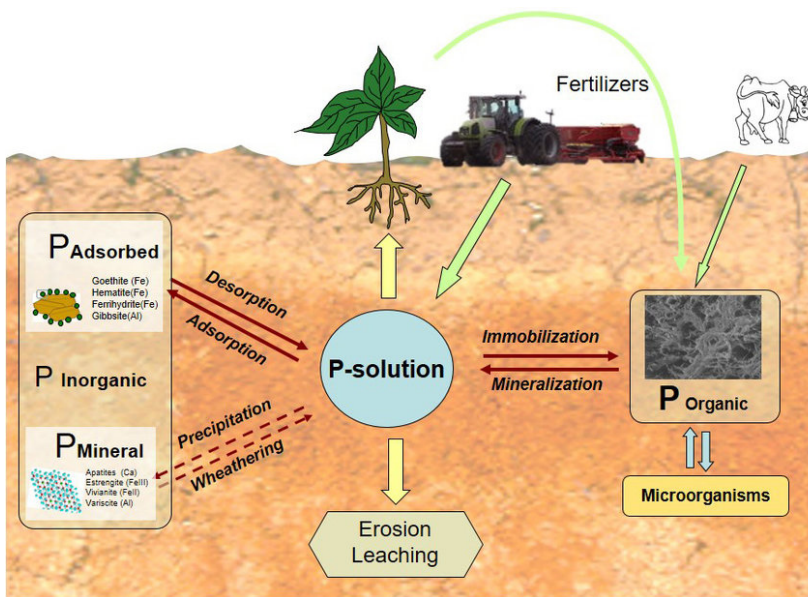
Een groot deel van de processen binnen koolstof-, stikstof- en fosforkringlopen spelen zich af in de bodem⁴. Het type beheer van de bodem kan het verloop van deze kringlopen beïnvloeden^{17, 18}, en daarmee ook de bodemkwaliteit en de emissies naar de lucht en het water. Alle omzettingen tussen de diverse vormen van de elementen zijn grotendeels afhankelijk van bodemorganismen.



Figuur 2. De stikstofcyclus. Uit: ACS Distance Education: Microbe Wiki²⁰¹⁹.

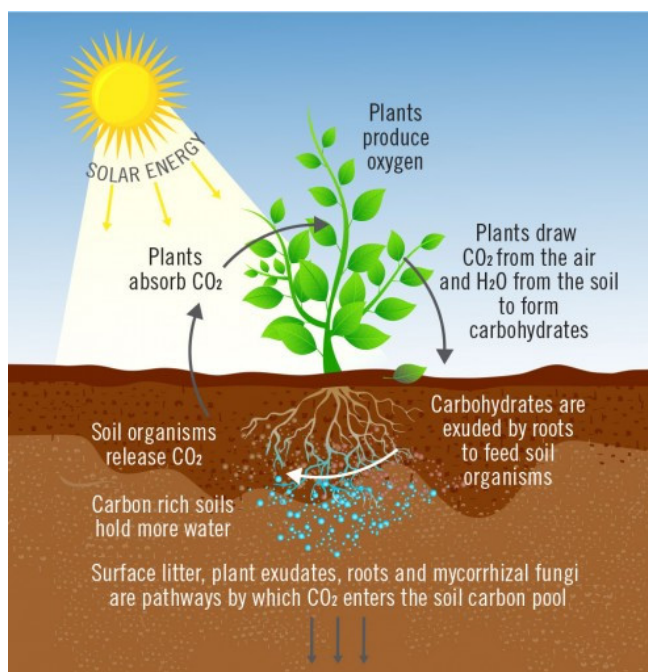
Binnen de stikstofcyclus komt het element stikstof in de bodem, lucht en het water als verschillende componenten voor (Figuur 2). Stikstof uit de lucht in de vorm van N_2 kan door stikstof-fixerende bacteriën in de bodem worden omgezet tot ammonium (NH_4^+). Vervolgens zijn er andere bacteriën in de bodem die ammonium kunnen omzetten tot nitraat (NO_3^-) of nitriet (NO_2^-). Zowel ammonium als nitraat zijn opneembaar voor planten. Deze vormen van stikstof zijn van groot belang als voedingsstoffen binnen de landbouw. Nitraat kan door organismen via assimilatie worden omgezet tot organisch stikstof; andersom kan organische stikstof worden gemineraliseerd tot ammonium en nitraat, waarna het weer beschikbaar is voor gewassen en bodemorganismen. In de bodem leven ook bacteriën die nitraat via denitrificatie kunnen omzetten tot N_2 . Bij onvolledige denitrificatie kan naast N_2 ook lachgas (N_2O) (een sterk broeikasgas) en stikstofoxiden (NO_x) vrijkomen uit de bodem. Nitraat is over het algemeen een stof die afhankelijk van het bodemtype, gevoelig is voor uitspoeling naar het grond- en oppervlaktewater²⁰. Ammonium kan ook vervluchtigen naar de lucht als ammoniakgas (NH_3).

Vervolgens kan ammoniak weer neerslaan op bodem en het water, samen met NO_x . Dit proces van neerslaan van stikstofcomponenten is bekend onder de naam stikstofdepositie²¹, en kan nadelige effecten hebben op kwetsbare natuurgebieden.



Figuur 3 De fosforcyclus. Uit: Fink et al ¹

De fosforcyclus speelt zich alleen in de bodem en het water af. Omdat voorliggende rapportage is geschreven in de context van landbouw, beperkt de beschrijving van de fosforcyclus zich tot de bodemprocessen (Figuur 3). Net als stikstof is fosfor een essentieel nutriënt voor gewassen. Fosfor komt vooral in de bodem via bemesting en via dood materiaal (bijvoorbeeld via gewasresten). Deze laatste vorm betreft organisch fosfor en kan via mineralisatie worden omgezet naar minerale fosfor (fosfaten), een vorm die kan worden opgenomen door gewassen. Fosfaten kunnen ook uitspoelen indien er niet genoeg fosfaatbindende componenten in de bodem aanwezig zijn, zoals ijzer- en aluminiumoxiden zoals het geval is in zure en kalkrijke gronden ²².



Figuur 4 De koolstofcyclus. Bron: Ecoscience Wire²³

Het element koolstof (C) kan net als stikstof en fosfor in verschillende vormen voorkomen in het milieu (Figuur 4). Tijdens fotosynthese nemen planten CO₂ (koolstofdioxide) op uit de lucht en maken hier samen met water (H₂O) onder invloed van zonlicht koolwaterstoffen (o.a. suikers) van. Planten gebruiken deze onder andere om te groeien. Via de wortels kunnen er ook koolstoffen in de bodem terecht komen, de zogenoemde wortellexudaten. Daarom is de grond rondom de wortels een hotspot voor bodemorganismen, waar ze kunnen leven van deze wortellexudaten. Bodemorganismen die dood organisch materiaal afbreken, produceren CO₂, die uiteindelijk weer in de atmosfeer terecht kan komen. CO₂ is een belangrijk broeikasgas. Een deel van het dode organisch materiaal kan worden opgeslagen in de bodem, en bijdragen aan het totale gehalte aan bodem organische koolstof. Een bodem die rijk is aan bodem organische stof, kent meestal een hoge waterretentie en een grotere biomassa en diversiteit aan bodemorganismen. Wanneer er zuurstofarme omstandigheden in de bodem zijn (bijvoorbeeld in natte veenbodems), kan er in plaats van CO₂ een ander sterker broeikasgas, namelijk methaan (CH₄), worden geproduceerd door micro-organismen. Een andere bron van methaan uit de landbouw is rundvee, waar het gas vrijkomt als een restproduct van de vertering.

1.6 Probleemstelling

In voorgaande paragrafen is toegelicht welke rol bodemfuncties en de cycli van stikstof, fosfor en koolstof spelen in landbouwbodems. Binnen de Nederlandse beleidskaders die relevant zijn voor landbouwbodems ligt de focus hoofdzakelijk op het beperken van een specifieke emissie en de maatregelen die hiervoor het meest geschikt zijn. Hierdoor bestaat er een risico dat maatregelen die gunstig zijn voor de doelen van het ene beleidskader ongunstig kunnen zijn voor de doelen van andere beleidskaders (zogenoemde 'trade-offs'). Er is behoefte aan meer inzicht in de effecten van bodembeheermaatregelen op emissies naar water en lucht en de verschillende bodemfuncties.

1.7 Doelstelling

Deze verkennende literatuurstudie heeft als doel de effecten van bodembeheermaatregelen op zowel bodemfuncties als emissies naar het water en de lucht in kaart te brengen. Deze kennis kan bijdragen bij het maken van een afweging tussen verschillende bodembeheermaatregelen om zowel lucht-, water- en bodemdoelstellingen te behalen.

2 Aanpak

We hebben de volgende stappen gezet om deze verkennende literatuurstudie uit te voeren: 1) Selectie van bodemfuncties, bodembeheermaatregelen en emissies, 2) Zoeken van literatuur, 3) Analyse en 4) Synthese.

2.1 **Selectie van bodemfuncties, bodembeheermaatregelen en emissies**

In deze studie is de bodem als uitgangspunt genomen. Centraal staan zowel de bodemfuncties (ecosysteemdiensten van de bodem) als de emissies naar het water en de lucht. Er zijn voor deze studie drie bodemfuncties geselecteerd (uit Tabel 2):

- nutriëntenretentie en -levering,
- bodemstructuur en opbouw bodemorganische stof, en
- biodiversiteit en bodemleven

De bodemfuncties waterregulatie en primaire productie zijn niet geselecteerd. Dit omdat de levering van nutriënten aan het gewas voor een groot deel de primaire productie bepaalt, en de bodemstructuur en het organische stofgehalte voor een groot deel de waterretentiecapaciteit van een bodem bepalen.

Daarnaast hebben we een selectie gemaakt van bodembeheermaatregelen op basis van twee criteria:

1. bodembeheermaatregelen die op dit moment in de praktijk het meest worden toegepast, of mogelijk worden toegepast in de toekomst (voorgenomen beleid);
2. bodembeheermaatregelen waarvan er literatuur beschikbaar is (Tabel 3)

Van de geselecteerde bodembeheermaatregelen is onderzocht wat hun mogelijke effecten zijn op de emissie van de broeikasgassen (CO_2 , CH_4 , N_2O), het effect op de emissie van vermestende stoffen naar de lucht (NH_3 en NO_x) en wat het effect is op de waterkwaliteit (N-uitspoeling en P-uitspoeling). Effecten van de maatregelen op gewasbeschermingsmiddelen en natuurherstel zijn buiten beschouwing gelaten. Ook het effect van bodembeheermaatregelen op gewasopbrengst en ziekte- en plaagwering is niet meegenomen.

Tabel 3 Geselecteerde bodembeheermaatregelen met uitleg en de referentiemaatregel waarmee de bodembeheermaatregel is vergeleken.

Bodembeheer- maatregel	Uitleg	Referentiemaatregel
Geen grondbewerking	De bovenste bodemlaag wordt niet geploegd, ook wel bekend als niet-kerende grondbewerking.	Gangbare grondbewerking
Gangbare grondbewerking	Kerende grondbewerking tot 30 cm diep (ploegen) met als doel de bodemstructuur, afwatering en ontkieming van zaden te verbeteren.	Geen/gereduceerde grondbewerking
Gereduceerde grondbewerking	Grondbewerking tot 15 cm diep met hetzelfde doel als gangbare grondbewerking, alleen minder diep om bodemverdichting op langere termijn te voorkomen.	Gangbare grondbewerking
Akkerranden	Onbewerkte stroken aan de rand van percelen, meestal kruidenrijk. Wordt o.a. toegepast om afspoeling te verminderen.	Geen akkerranden
Gebruik van drijfmest	Combinatie van urea en feces. Wordt toegepast om de hoeveelheid nutriënten te verhogen. Indien niet gespecificeerd is uitgegaan van bovengronds aanwenden (normaal in EU).	Gebruik van minerale mest ¹
Injectie van drijfmest	Ondergronds aanwenden van mest, zoals met zodebemesting, om vervluchtiging van ammoniak te verminderen.	Bovengronds aanwenden mest
Gebruik van vaste mest	Dierlijke mest gemengd met plantenresten, toegediend met als doel de bodemstructuur en nutriëntenbeschikbaarheid te verbeteren.	Gebruik van minerale mest ¹
Gebruik van compost	Gecomposteerde plantenresten, toegediend met als doel de bodemstructuur, bodemorganische stof en nutriëntenbeschikbaarheid te verbeteren.	Gebruik van minerale mest ¹
Ruime gewasrotatie	Afwisseling van gewassen in de akkerbouw in een meerjarig bouwplan, toegepast om o.a. de structuur van de bodem te waarborgen en ziekten en plagen tegen te gaan. Een beperkte gewasrotatie past bijvoorbeeld 1 op 3 rotatie toe, waarbij eens in de drie jaar een hakvrucht zoals aardappel wordt geteeld; een ruime gewasrotatie zal dan bijvoorbeeld 1 op 5 toepassen.	Beperkte of geen gewasrotatie
Groenbemesting	Groei van gewassen bedoelt als organische toevoeging aan de bodem en/of om uitspoeling van nutriënten te voorkomen.	Geen groenbemesting
Bekalken	Toevoegen van kalk aan de bodem om de pH te verhogen. Dit wordt toegepast om de nutriëntenbeschikbaarheid te verhogen.	Niet bekalken
Voorkomen bodemverdichting	Gebruik van bijvoorbeeld vaste rijpaden of lichte machines.	Geen extra maatregelen

¹ Zowel kunstmest als mineralenconcentraat wordt hier gebruikt als minerale mest.

2.2 Zoeken van literatuur

Er is gezocht naar wetenschappelijke artikelen, grijze literatuur en rapporten, die melding doen van effecten van de bodembeheermaatregelen (Tabel 3) op emissies en bodemfuncties (Tabel 4), en relevant zijn voor de Nederlandse landbouwcontext. Er is gezocht in GoogleScholar met alle combinaties van de bodembeheermaatregelen en emissies of bodemfuncties in zowel de Nederlands als Engels termen. Er is gekozen voor GoogleScholar omdat de ervaring is dat deze zoekmachine een complete toegang geeft tot zowel de wetenschappelijke als grijze literatuur en ook de mogelijkheid biedt in het Nederlands te zoeken. Omdat de voorliggende rapportage voortbouwt op eerder werk van van der Wal et al, 2008¹⁵ is in eerste instantie gefilterd op literatuur uit 2008 of later. Indien er voor een combinatie van een maatregel en emissie of bodemfunctie geen recente literatuur voor Nederlandse omstandigheden beschikbaar was, is ervoor gekozen om literatuur vanaf het jaar 2000 op te nemen in de verkenning. Enkele studies zijn uitgevoerd op een locatie met vergelijkbare bodems en klimaatomstandigheden als in Nederland, en worden om die reden wel meegenomen in deze studie. In enkele gevallen betrof de referentie een review waar de uitkomsten van een grote hoeveelheid gepubliceerde onderzoeken is geaggregeerd, vaak niet louter beperkt tot de Nederlandse context.

2.3 Analyse

In de huidige analyse is gekeken naar het effect van bodembeheermaatregelen op de bodemfuncties en de indicatoren die vallen binnen de eerdergenoemde beleidskaders. Om een koppeling tussen bodemfuncties en bodembeheermaatregelen te kunnen maken, is gebruik gemaakt van het verband tussen de bodemfuncties en bodemparameters (indicatoren) die van belang zijn voor ecologische processen (Tabel 4). Bodemparameters kunnen bodemorganismen zijn, bijvoorbeeld regenwormen, maar ook abiotische kenmerken, zoals de hoeveelheid stabiele bodemaggregaten.

Tabel 4 Relatie tussen de geselecteerde bodemfuncties en bodemindicatoren (aangepast uit Van der Wal et al. 2008¹⁵).

Geselecteerde bodemfuncties:	Bodemindicatoren:
Nutriëntenretentie en -levering	Schimmel- en bacteriebiomassa
	Bodemorganische stofgehalte
	Potentiële N-mineralisatie
	C/N ratio bodemorganische stof
	Mycorrhiza schimmels
Bodemstructuur en bodemorganische stof	Biomassa/aantal regenwormen en potwormen
	Bodemorganisch stofgehalte
	Schimmel- en bacteriebiomassa
	Stabiele bodemaggregaten
Biodiversiteit en bodemleven	Biodiversiteit bodemorganismen
	Kwantiteit/ kwaliteit bodemorganische stof
	Stabiele aggregaten
	Biomassa bodemorganismen

Vervolgens is per bodembeheermaatregel met behulp van gepubliceerde literatuur onderzocht wat de invloed is op de geselecteerde bodemfuncties en emissies naar lucht en water. Als uit een publicatie blijkt dat een maatregel een positief of negatief effect heeft op een indicator, dan wordt respectievelijk een + of – vermeld, plus de bijbehorende referentie.

Sommige relaties zijn al uitgebreid uitgezocht, van andere maatregelen zijn soms maar één of twee studies beschikbaar of is het effect zelfs onbekend. Om aan te geven op hoeveel studies het waardeoordeel is gebaseerd, wordt in de tabel ook het aantal studies aangegeven. Op deze manier is snel te zien hoe goed de relaties zijn onderbouwd. Dit geeft inzicht in de relevantie van gevonden effecten; immers, hoe meer onderzoeken tot dezelfde conclusie komen, hoe sterker deze conclusie. Als binnen meerdere publicaties de effecten van dezelfde maatregel is onderzocht, dan worden de plussen en minnen opgeteld. In het geval de referentie een review betrof van meerdere gepubliceerde rapporten of onderzoeken, dan is ervoor gekozen om de geaggregeerde bevindingen rechtstreeks over te nemen in de voorliggende rapportage en niet de gebruikte referenties los te benoemen. Hierdoor is het mogelijk dat één referentie in voorliggende rapportage meer dan één keer meetelt voor het effect van een maatregel. In de begeleidende tekst is vermeld wanneer de referentie een review betrof.

Vervolgens is per bodembeheermaatregel gescoord hoeveel positieve dan wel negatieve effecten uit de literatuur blijken.

2.4 Synthese

De eerste stap in de synthese is het samenstellen van de tabel met daarin geturfd de relaties tussen bodembeheermaatregelen en de invloed op de indicatoren of bodemfuncties per beleidskader. Van alle gebruikte literatuur is een korte toelichting toegevoegd. Als tweede is een visuele systeembenadering gebruikt met daarin de processen die spelen rondom landbouw en bodembeheer en de relevante beleidskaders. Deze geeft overzichtelijk weer welke maatregelen op welke indicatoren en op welke bodemfuncties een effect hebben en kan een opstap zijn om te identificeren waar beleidskaders elkaar het meest zouden kunnen versterken. Een dergelijke visuele systeembenadering heeft als voordeel dat de interacties tussen de maatregelen en doelstellingen meteen zichtbaar worden.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de resultaten uit de geraadpleegde literatuur. In Tabel 6 zijn alle gevonden effecten van bodembeheermaatregelen op de emissie indicatoren en de bodemfuncties weergegeven. Deze versimpelde tabel is gebaseerd op Tabel 7 in de bijlage waarin alle referenties staan.

3.1 Resultaten van eerdere reviews over effect van bodembeheermaatregelen op bodemindicatoren

In een rapport van Van der Wal¹⁵ uit 2008 is een vergelijkbare verkennende literatuurstudie gedaan over het effect van bodembeheermaatregelen op ecosysteemdiensten (bodemfuncties) als in voorliggende rapportage. De resultaten van deze studie voor de bodemfuncties nutriëntenretentie, bodemstructuur en opbouw van bodemorganische stof zijn verwerkt door de bevindingen rechtstreeks over te nemen in Tabel 6. In de tabel wordt het aantal onderzoeken waarop Van der Wal¹⁵ zich baseren wel meegenomen, maar zal er dus worden verwezen naar één referentie (dit geldt ook voor andere reviews, zie hoofdstuk 2 Aanpak.). Van der Wal et al. concludeerden dat geen grondbewerking, het voorkomen van bodemverdichting en het gebruik van organische mest positief bijdragen aan de eerdergenoemde bodemfuncties in de melkveehouderij. In de akkerbouw lijkt het gebruik van organische mest een veelbelovende maatregel voor het verbeteren van de bodemfuncties.

Bai et al²⁴ hebben een review uitgevoerd van lange termijn experimenten ter verbetering van bodemkwaliteit in Europa en China. Zij maakten onderscheid tussen alternatieve activiteiten (toevoegen van organisch materiaal, gereduceerde grondbewerking, gewasrotatie en biologische landbouw) en referentieactiviteiten (niet toevoegen van organisch materiaal, gangbare grondbewerking, monocultuur en conventionele landbouw). Met biologische landbouw wordt hier bedoeld geen gebruik van kunstmest en gewasbeschermingsmiddelen. Bai et al. hanteerden vijf bodemkwaliteitsindicatoren: bodemorganische stof, pH, bodemstructuur (stabiliteit van bodemaggregaten), aantal regenwormen en gewasopbrengst. Het resultaat van hun experiment is weergegeven in Tabel 5. Algemeen genomen leiden alle maatregelen (meer organisch materiaal, niet-kerende grondbewerking, gewasrotatie, biologische landbouw) tot meer bodemorganische stof en regenwormen. Alleen gewasrotatie heeft geen zichtbaar effect op aggregaten. Biologische landbouw leidt als enige activiteit tot een verlaging van de opbrengst.

Tabel 5 Samenvatting van effecten van maatregelen op bodemparameters uit Bai et al, 2018²⁴.

	Organische stof	pH	Bodemaggregaten	Regenwormen	Opbrengst
Meer organisch materiaal	+	+	+	+	+
Niet-kerende grondbewerking	+	n.a.	+	+ ¹	+
Gewasrotatie	+	n.a.	n.a.	+ ²	+
Biologische landbouw	+	n.a.	+	+	-

¹ Dit geldt alleen op plekken waar geen pesticiden zijn toegepast.

² Bij braakliggen.

3.2 Effect van het type grondbewerking

Uit onderzoek van Liu et al. ²⁵ blijkt dat geen grondbewerking ten opzichte van gangbare grondbewerking kan zorgen voor meer en voor minder NO_x emissie.

In de studie van Abdalla et al²⁶ is met behulp van velddata en een model de effectiviteit van gereduceerde grondbewerking met een bodembedekker op mitigatie van het huidige en toekomstige klimaat onderzocht. De referentiemaatregel was gangbare grondbewerking. De locatie was een veld met zomertarwe in Ierland. De bodem was zandig leem met een lage bodemvochtretentie. Uit de modelresultaten blijkt dat gereduceerde grondbewerking met een bodembedekker leidt tot hogere N₂O-emissies, maar ook tot een toename van het bodemorganisch stofgehalte (9 tot 17 Mg C ha⁻¹ ten opzichte van gangbare grondbewerking). Mogelijk kan dit de N₂O-emissie compenseren. Variaties in bodemrespiratie (CO₂) waren hoofdzakelijk een gevolg van veranderingen in temperatuur, de hoeveelheid poriën gevuld met water, biomassa van gewassen en grondbewerking, terwijl N₂O-emissies vooral werden beïnvloed door de toepassing van N-bemesting, temperatuur, nitraat in de bodem en neerslag.

Om het effect van de ploegintensiteit op conventionele en biologische landbouw te onderzoeken, hebben Puerta et al²⁷ een vierjarig experiment gedaan. Met biologische landbouw wordt hier bedoeld geen gebruik van kunstmest en gewasbeschermingsmiddelen. De resultaten laten zien dat continue biologische landbouw met toepassing van drijfmest en gereduceerd ploegen tot een significant betere bodemstructuur leidt. Land een periode braak laten liggen, leidt tot een net zo goede bodemstructuur bij de combinatie van intensieve landbouw en gangbare grondbewerking als bij continue biologische landbouw en gereduceerde grondbewerking.

Groenigen et al²⁷ vergeleken de effecten van gereduceerd en gangbare grondbewerking op de biomassa, groei, en residuen van schimmels en bacteriën in de bodem. Dit experiment vond plaats in Ierland op een veld met wintertarwe en duurde zeven jaar. Uit de resultaten blijkt dat gereduceerd ploegen leidt tot een toename in totale biomassa van bacteriën en schimmels en dat dit positief is voor koolstofopslag in de bodem.

Uit de gebruikte onderzoeken kan worden geconcludeerd dat geen grondbewerking het meest positief is voor het reduceren van emissies en het behoud van bodemfuncties. Gereduceerde grondbewerking is een veelbelovende middenweg.

Hoe meer de bodem wordt omgewoeld door ploegen, hoe meer de bestaande gangenstelsels van plantenwortels en bodemleven beschadigd raken. Ook poriën die zijn gecreëerd door bodemorganismen verdwijnen. Bij een afname van deze bodemstructuur is er minder beluchting, slechtere waterinfiltratie en capillaire stijging, en meer kans op bodemverdichting. In diepere bodems kan zo een zuurstoftekort ontstaan, één van de abiotische bodemeigenschappen die kan bijdragen aan de aanwezigheid van pathogene organismen ²⁸. Het ploegen van grond zorgt voor extra zuurstofaanvoer in de toplagen, waardoor organische materialen sneller worden afgebroken. Dit levert een positieve bijdrage aan het vrijmaken van nutriënten (mineralisatie), maar leidt ook tot meer CO₂-uitstoot. Door te ploegen komen de organische materialen ook sneller terecht in zuurstofarme delen van de bodem, wat kan leiden tot anaerobe afbraak en dus emissies van N₂O of CH₄. Hoe dieper er geploegd wordt, hoe meer het bodemleven, dat zich concentreert in de toplaag, wordt verstoord. Dit geldt vooral voor (regen-) wormen en schimmels ²⁹. Als er geen grondbewerking wordt uitgevoerd, ontstaat er een ondergronds milieu met voldoende voeding en neemt de bodembiodiversiteit zowel boven als onder de grond toe ³⁰. Er zijn enkele interactie-effecten, zoals verhoogde emissies bij verhoogde activiteit van (vooral) bacteriën. Vanwege betere bodemactiviteit en meer plantengroei (verhoogde assimilatie) kunnen verhoogde emissies worden geneutraliseerd.

Niet-kerende grondbewerking staat bekend als een maatregel voor het verminderen van de uitstoot van broeikasgassen, in het bijzonder lachgas (N₂O). De aanwezigheid van regenwormen in de bodem kan echter leiden tot emissies van lachgas (N₂O). Het was nog onbekend wat het effect is van regenwormen op de bodembalans van broeikasgassen (CO₂ en N₂O). Lubbers et al³¹ laten zien dat de aanwezigheid van regenwormen leidt tot net zo veel uitstoot van broeikasgassen in een bodem met niet-kerende grondbewerking, als in een bodem met gangbaar ploegen. Deze bevinding openbaart mogelijk een biologische factor voor de beperkte potentie van niet-kerende grondbewerking op mitigatie van broeikasgassen.

Giannopoulos et al³² onderzochten de precieze redenen waarom regenwormen bijdragen aan emissies van N₂O. Zij concluderen dat de N₂O-uitstoot van regenwormen samenhangt met hun eetstrategie. Regenwormen die aan het bodemoppervlakte leven (epigeic) verhogen de N₂O-uitstoot als gewasresiduen op de bodem worden geplaatst; regenwormen die in de bodem leven (endogeic) doen dit wanneer residuen via ploegen of andere wormen in de bodem wordt gebracht. Het boven- of ondergronds plaatsen van residu heeft ook andere effecten. Zo hangt dit samen met veranderingen in grootte van aggregaten en omzettingen van bodemorganisch stof, waardoor mogelijk de beschikbaarheid van koolstof, stikstof en zuurstof verandert, en daarmee het proces van denitrificatie wat o.a. kan leiden tot productie van N₂O.

Bertora et al³³ hebben de emissies van N₂O door regenwormen die verticale gangen graven in de bodem (anecic) gerelateerd aan ploegen en bodemvochtigheid. Zij ontdekten dat de N₂O-emissies niet afkomstig zijn van de wormen zelf, maar van de veranderingen die deze organismen aanbrengen aan de bodemstructuur. Zij concluderen verder dat de aanwezigheid van de wormen in combinatie met ploegen, uiteindelijk leidt tot een verlaging van de N₂O-emissies, na een initiële fase waarin de emissies verhoogd raken.

Kortom, de samenhang tussen regenwormen en N₂O-emissies is te relateren aan hun eetstrategie en de veranderingen die de wormen aanbrengen aan de bodem. De literatuur geeft nog geen eenduidig beeld over het effect van ploegen op N₂O-emissies van wormen.

Kuntz et al³⁴ hebben het langetermijneffect onderzocht van gereduceerde grondbewerking op regenwormen en bacteriën in de bodem in combinatie met bemesting via drijfmest of compost. Bij gereduceerd ploegen was er een significante toename van regenwormen en biomassa van micro-organismen. Zij concludeerden dat de toepassing van drijfmest leidt tot verminderde microbiële biomassa, maar het effect was niet sterk. Ook werden er geen interactie-effecten tussen grondbewerking en bemesting aangetoond; gereduceerde grondbewerking leidde tot de meeste toename van bodemleven (in aantallen, niet in diversiteit).

3.3 Akkerranden

Akkerranden leiden tot minder af- en uitspoeling van nutriënten en sediment door het vasthoudend vermogen van wortels en opbouw van een goede bodemstructuur, en leiden tot een grotere biodiversiteit van flora en fauna (niet louter bodemleven)³⁵.

3.4 Soorten bemesting: dierlijke mest en compost

Er bestaan verschillende soorten mest zoals kunstmest, mineralenconcentraat, drijfmest, vaste mest en compost. Iedere mestsoort heeft een andere samenstelling van stoffen. Zo bevat drijfmest over het algemeen meer vocht, minerale stikstof en minder organische stof dan vaste mest en compost³⁶. Hierdoor verschillen de mestsoorten ook in hun effect op de groei van het gewas, de bodemkwaliteit, en de emissies naar de lucht en het water. Naast de mestsoort wordt de mate waarin er emissies naar het milieu plaatsvinden ook bepaald door het weer, de grondsoort en de manier van mesttoediening. In een recente meta-analyse wordt het effect beschreven van onder andere drie type meststoffen op verschillende bodemparameters in lange-termijn proeven³⁷. Alle organische mestsoorten hadden een positief effect op de opbouw van bodemorganische stof ten opzichte van minerale mest, waarbij vaste mest en compost zorgen voor de meeste opbouw van organische stof. De CO₂ en N₂O productie was het hoogst bij drijfmest ten opzichte van vaste mest en compost. Mogelijk komt dit doordat de stikstofrijke drijfmest gemakkelijk afbreekbaar is en voor erg veel biologische activiteit zorgt in de bodem, waarbij CO₂ en N₂O vrijkomt. De biomassa van regenwormen was het hoogst bij drijfmest en vaste mest, mogelijk

doordat deze meststoffen nog 'vers' zijn en nog niet gecomposteerd zoals het geval is bij compost.

In Nederland bestaat het grootste deel van de totale hoeveelheid dierlijke mest uit drijfmest (ongeveer 96%³⁸). Deze mest wordt bijna overal ondergronds aangewend omdat dit de emissie van ammoniak reduceert³⁹. Een probleem hierbij is wel dat ondergrondse aanwending van drijfmest kan zorgen voor hogere uitstoot van het broeikasgas N₂O⁴⁰ ten opzichte van bovengrondse aanwending. Dit komt mogelijk doordat drijfmest een hoog vocht- en stikstofgehalte heeft, wat zorgt voor veel (onvolledige) denitrificatie onder het oppervlak van de bodem. Deze resultaten komen uit modelmatige berekeningen van de Commissie van Deskundigen Meststoffenwet (CDM)⁴⁰. Uit onderzoek van Miller et al.⁴¹ blijkt dat mestinjectie ten opzichte van bovengronds aanwenden van mest kan zorgen voor zowel meer en voor minder NO_x emissie. De resultaten van dit experiment bleken erg afhankelijk van de weersomstandigheden; er lijken ook nog weinig studies over dit onderwerp te zijn.

Naast emissies naar de lucht, kan stikstof ook uitspoelen naar het grondwater. Uit de modelmatige berekeningen van het CDM⁴⁰ blijkt dat ondergronds aanwenden van drijfmest tot hogere nitraatuitspoeling kan leiden dan bovengronds aanwenden van drijfmest. Uit een recent advies van het CDM blijkt dat het niet goed mogelijk is om te bepalen wat het effect is van organische meststoffen op nitraatuitspoeling zonder hier andere factoren bij te betrekken zoals de grondsoort en de stikstofgift⁴². Er zijn ook nog geen eenduidige resultaten over het effect op het bodemleven van ondergrondse aanwending van drijfmest ten opzichte van bovengronds aanwenden³⁹. Het is wel bekend dat mestinjectie ervoor kan zorgen dat het aantal regenwormen dat aan het oppervlak leeft vermindert⁴³. Mogelijk komt dit door verdroging van de bovenlaag ten gevolge van de mestinjectie⁴⁴. Het aantal regenwormen dat dieper in de bodem leeft kan juist toenemen bij mestinjectie⁴³. Uit een veldonderzoek van VandenNest et al⁴⁵ in Vlaanderen wordt geconcludeerd dat zowel vaste mest als GFT-compost bijdragen aan opbouw van bodemorganisch stof op de lange termijn. In zandleembodems met een P-voorraad die hoger ligt dan de streefzone (12 tot 18 mg P-AL/100 g luchtdroge grond) leidt vaste mest tot een hogere P-beschikbaarheid, maar ook meer P-uitspoeling dan compost. In bodems waar compost wordt toegevend is geen effect op P-uitspoeling geobserveerd.

3.5 Variaties op gewasrotatie in de akkerbouw

Een ruimere rotatie van gewassen in de akkerbouw kan beter zijn voor de bodem. Een rustgewas of veldbonen afgewisseld met bijvoorbeeld aardappelen kan de bodemorganische stofopbouw en vastlegging van stikstof (door vlinderbloemigen) sterk verbeteren³⁰. Met een minimale of niet-kerende grondbewerking wordt bodemorganisch stof behouden bij gewasrotatie. Wat het effect is van grondbewerking op bodembiodiversiteit, is niet eenduidig te zeggen, en afhankelijk van organismen en bodemtypen. Voor graslanden blijkt: hoe minder bodembewerking is toegepast, hoe ouder het grasland kan worden en hoe meer het ecosysteem intact blijft.

Gewasrotatie wordt toegepast om de bodemvruchtbaarheid op peil te houden en het risico op pathogenen en onkruiden te verminderen²⁹. Over het algemeen geldt dat een ruime rotatie met afwisseling van rooi- en rustgewassen, bij voorkeur in combinatie met groenbemesters, het beste bijdraagt aan de bodemfuncties.

3.6 Groenbemesting

Groenbemesters worden meestal ingezaaid na het groeiseizoen van het hoofdgewas om de uitspoeling van nitraat tegen te gaan. Uit een recente meta-analyse van 106 studies blijkt dat groenbemesters inderdaad leiden tot een reductie van nitraatuitspoeling, en daarnaast tot een verhoging van het gehalte bodemorganische koolstof⁴⁶. Er zijn geen significante effecten gevonden op de uitstoot van N₂O. Uit de verkennende literatuurstudie van van der Wal et al.¹⁵ blijkt dat groenbemesting zorgt voor een betere nutriëntenretentie- en levering en een grotere bodembiodiversiteit, mogelijk door het onderwerken en vervolgens het verteren van de groenbemesters in de bodem in het voorjaar.

3.7 Bekalken

Bekalken zorgt voor verhoogde CO₂ emissie uit de bodem⁴⁷, doordat er meer organische stof wordt gemineraliseerd. Een verklaring hiervoor is dat bij een neutrale of basische bodem (pH>5,5) vooral bacteriën zullen domineren ten opzichte van schimmels waardoor de decompositie wordt versneld. Op de lange termijn kan bekalken echter wel leiden tot meer koolstofopslag in de bodem, mogelijk komt dit door verhoogde excretie van labiele koolstofverbindingen door plantenwortels. Het voorkomen van regenwormen wordt ook gestimuleerd door bekalking^{47, 48} die de bodemstructuur bevordert^{29, 47}. Met bekalken kan de hoeveelheid pathogenen juist afnemen⁴⁷. Verder leidt bekalken tot een reductie van N₂O-emissies en N-uitspoeling⁴⁷. Het leidt tevens tot een toename in de emissie van NH₃⁴⁷.

3.8 Voorkomen bodemverdichting

Het voorkomen van bodemverdichting is voor de Nederlandse context erg belangrijk. Recent is er een schatting gemaakt van de bodemverdichting in de bodemlaag onder de toplaag door Brus & van den Akker⁴⁹. Hieruit bleek dat ongeveer 43% van de Nederlandse ondergrond verdicht is. Het voorkomen van bodemverdichting had in de verkennende literatuurstudie van der Wal et al.¹⁵ een positief effect op de bodemstructuur, maar ook op de levering en retentie van nutriënten en de bodembiodiversiteit.

Tabel 6 Kwalitatieve evaluatie van effecten van bodembeheermaatregelen op bodemfuncties en emissies naar de lucht en het water op basis van de literatuur. Een groene en een rode kleur geven respectievelijk een gunstig en ongunstig effect op bodemfuncties en emissie-indicatoren aan. Als er sprake is van zowel gunstige als ongunstige effecten of geen (eenduidig) effect van een maatregel, dan is dit aangegeven met de kleur geel. Een witte cel geeft aan dat er binnen deze studie geen literatuur is gevonden over het effect van een maatregel op een bepaalde indicator. Deze versimpelde tabel is gebaseerd op Tabel 7 waarin alle referenties staan. ¹OS is bodemorganisch stof

Beleidsdoel	Beleidskader	Bodembeheer-maatregel/ indicator of bodemfunctie	Geen grondbewerking	Gangbare grondbewerking	Gereduceerde grondbewerking	Akkerranden	Drijfmest (bovengronds)	Mestinjectie	Vaste mest (bovengronds)	Compost (bovengronds)	Ruimere rotatie	Groenbemesting	Bekalken	Voorkomen bodemverdichting
Reductie van emissies naar lucht	Klimaat-akkoord	Reductie van CO ₂	Geel	Rood			Rood		Geel	Geel			Rood	
	Klimaat-akkoord	Reductie van CH ₄					Geel		Geel	Geel				
	Klimaat-akkoord	Reductie van N ₂ O	Geel	Geel	Rood		Rood	Rood	Geel	Geel		Geel	Groen	
	NEC/Voormalig PAS	Reductie van NH ₃					Rood	Groen	Rood				Rood	
	NEC/Voormalig PAS	Reductie van NO _x	Geel	Geel				Geel						
Reductie van emissies naar water	Nitraat-richtlijn/ KRW	Reductie van N-uitspoeling				Geel	Geel	Rood	Geel	Geel		Geel	Geel	
	Nitraat-richtlijn/ KRW	Reductie van P-uitspoeling				Geel			Rood	Geel				
Verbeteren van bodem-functies		Bodemstructuur en OS ¹	Geel	Rood	Geel		Geel		Geel	Geel	Geel	Geel	Geel	Geel
		Nutriëntenretentie en - levering	Geel	Rood			Geel	Geel	Geel	Geel		Geel	Geel	Geel
		Biodiversiteit en bodemleven	Geel	Rood	Geel		Geel	Geel	Geel	Geel	Geel	Geel	Geel	Geel

3.9 Samenvatting van de resultaten

Na analyse van de effecten van de typen bodembeheermaatregelen in deze verkennende literatuurstudie komen de onderstaande patronen naar voren.

De maatregel "geen grondbewerking" heeft, ten opzichte van "gangbare grondbewerking", geen duidelijk effect op de vermindering van de broeikasgassen CO₂ en N₂O en op de emissie van NO_x. Geen grondbewerking heeft wel een positief effect op de bodemfuncties. De maatregel "gangbare grondbewerking" leidt tot meer uitstoot van CO₂ en verslechtert de bodemfuncties. Op het verminderen van emissies van N₂O en NO_x komt geen duidelijk effect uit de literatuur naar voren.

Gereduceerde grondbewerking leidt tot meer emissie van N₂O ten opzichte van gangbare grondbewerking, maar verbetert wel de bodemstructuur. Uit het literatuuronderzoek is geen informatie naar voren gekomen over het effect van gereduceerde grondbewerking op CO₂, NO_x en de bodemfuncties nutriëntenlevering en bodemleven. In het literatuuronderzoek is geen informatie gevonden over het effect van grondbewerking op de emissie van CH₄ en NH₃ en de uitspoeling van N en P. (Dit correspondeert met de witte cellen in de Tabel 6.)

De maatregel "akkerranden" vermindert de uitspoeling van N en P. Over het effect op andere emissies en bodemfuncties is geen literatuur gevonden.

De toepassing van drijfmest bovengronds leidt tot meer uitstoot van CO₂, N₂O en NH₃, maar wel tot een verbetering van de bodemfuncties bodemstructuur en bodemorganische stof en nutriëntenlevering ten opzichte van minerale mest. Voor de vermindering van de emissie van CH₄, uitspoeling van N en effect op bodemleven is geen duidelijk effect naar voren gekomen.

Ten opzichte van bovengrondse toepassing van drijfmest, leidt injectie van drijfmest tot minder uitstoot van NH₃, maar tot meer uitspoeling van N. Het effect van reductie van NO_x en de bodemfuncties nutriëntenlevering en bodemleven zijn op basis van de literatuur neutraal. Op basis van het huidige literatuuronderzoek is geen informatie gevonden over het effect van mestinjectie op de emissies van CO₂ en CH₄, P-uitspoeling en bodemstructuur en bodemorganische stof.

Ten opzichte van minerale mest, leidt de toepassing van vaste mest tot meer uitstoot van NH₃ en P-uitspoeling en tot een verbetering van bodemfuncties. Het effect op de uitstoot van CO₂, CH₄ en N₂O en N-uitspoeling is neutraal. Over de reductie van NO_x ten gevolge van vaste mest is geen informatie gevonden.

Compost heeft een betere bodemstructuur en nutriëntenlevering tot gevolg ten opzichte van minerale mest. Het effect op de emissies van CO₂, CH₄ en N₂O, de uitspoeling van N en P en bodemleven is neutraal. Binnen het huidige literatuuronderzoek is geen informatie gevonden over het effect van compost op de uitstoot van NH₃ en NO_x.

Een ruimere rotatie leidt tot een beter bodemleven. Er is een neutraal effect gevonden op bodemstructuur. Van het effect op emissies en andere bodemfuncties is geen literatuur gevonden.

Groenbemesting heeft een positief effect op N-uitspoeling en de bodemfuncties bodemstructuur en bodemleven ten opzichte van geen groenbemesting. Het effect op de emissie van N_2O en nutriëntenlevering lijkt neutraal. Over het effect op de uitstoot van CO_2 , CH_4 , NH_3 en NO_x en uitspoeling van P is geen literatuur gevonden.

Door te bekalken is er minder uitstoot van N_2O en uitspoeling van N en meer uitstoot van CO_2 en NH_3 . Op basis van de doorzochte literatuur is er geen duidelijk effect van bekalken op de bodemfuncties. Er is geen informatie gevonden over de uitstoot van CH_4 , NO_x en P-uitspoeling.

Het voorkomen van bodemverdichting heeft een positief effect op de bodemfuncties. Over het effect op de emissies en uitspoeling van N en P is geen literatuur gevonden.

4 Discussie en conclusie

Deze studie is uitgevoerd om meer duidelijkheid te scheppen in zowel de gunstige als ongunstige effecten van bodembeheermaatregelen op het halen van doelstellingen voor bodem-, water- en luchtkwaliteit.

Uit onze studie blijkt dat geen grondbewerking, het toepassen van bloemrijke akkerranden, ruime gewasrotatie, het toepassen van groenbemesting en het voorkomen van bodemverdichting de meest belovende bodembeheermaatregelen zijn voor zowel lucht-, water- als bodembeleidsdoelen (Tabel 6). Gangbare grondbewerking speelt negatief in op meerdere beleidsdoelen. Gereduceerde grondbewerking, de verschillende mestsoorten, mestinjectie en bekalken hebben zowel positieve als negatieve effecten op het behalen van lucht, water en/of bodemdoelen. Dit biedt een eerste handvat voor het ontwikkelen van een integraal afgewogen beleidskader. Er spelen een aantal factoren mee die invloed kunnen hebben op de relatie tussen de bodembeheermaatregel en bodem-, water- en luchtkwaliteit en die ook meegewogen dienen te worden bij vervolgonderzoek.

Het type bodem en de bijbehorende bodemeigenschappen kunnen invloed hebben op deze relatie. Aspecten als pH-waarde en bodemorganisch stofgehalte hebben invloed op bijvoorbeeld nutriëntenretentie en -uitspoeling^{50, 51}. Ook de grondwaterstand is een belangrijke factor voor onder andere het bodemleven en processen in de stikstofcyclus^{52, 53}. In een vervolgstudie zou het effect van bodembeheermaatregelen kunnen worden gespecificeerd per type bodem.

Daarnaast spelen de timing van het uitvoeren van de maatregelen en de weersomstandigheden een grote rol op het effect van een bodembeheermaatregel. Zo zal er in het geval van veel neerslag, meer af- en uitspoeling plaatsvinden. Ook speelt het risico op bodemverdichting een rol als op natte grond het land wordt bereiden met zware machines. Er gelden in Nederland regels voor de perioden waarin vaste mest en drijfmest kunnen worden toegediend. Onder een aantal omstandigheden is de toediening niet toegestaan, bijvoorbeeld bij een bevroren bodem of een bodem waarvan het bovenste deel is verzadigd met water⁵⁴, omdat dit kan leiden tot bodemverdichting en afspoeling. In een vervolgstudie kan verder uitgezocht worden wat het effect is van verschillende bodembeheermaatregelen onder wisselende weersomstandigheden.

Het effect van tijd, de periode dat een maatregel wordt toegepast, hebben we in deze studie nog niet meegenomen. Het is mogelijk dat effecten van maatregelen op langere termijn een groter of juist kleiner effect hebben dan blijkt uit de geraadpleegde onderzoeksresultaten. Dit is van belang om verder uit te zoeken zodat duidelijk wordt wanneer gewenste effecten op lucht-, water- en bodembeleidsdoelen zullen plaatsvinden. Over het algemeen geldt dat het effect van maatregelen op bodemkwaliteit lang kan duren: de opbouw van bodemorganische stof is vaak pas na jaren zichtbaar. Korte termijn effecten kunnen echter

ook plaatsvinden: de hoeveelheid regenwormen kunnen na één tot enkele maanden weer hersteld zijn na zodebemesting⁵⁵.

In de voorliggende rapportage is het aantal studies dat eenzelfde effect tussen een maatregel en een indicator vond bij elkaar opgeteld. Dit is gedaan om aan te tonen hoe goed een relatie is onderbouwd. In andere woorden, er wordt een gewicht gehangen aan het aantal studies. Deze methode kent echter een keerzijde: als onderzoek naar een bepaalde relatie populair is om enige reden, dan is het mogelijk dat er simpelweg meer studies worden gepubliceerd over dit onderwerp, wat ertoe kan leiden dat met de in deze studie gehanteerde methode, er een inherente bias ontstaat. Immers, de relaties die minder vaak worden onderzocht, zullen minder sterk kunnen scoren.

Deze studie laat zien dat er nog hiaten in de kennis zijn tussen sommige bodembeheermaatregelen en het effect op de lucht-, bodem- en waterkwaliteit. Er lijkt op basis van deze studie nog weinig onderzoek uitgevoerd op het gebied van fosforuitspoeling naar het grond- en slotwater. De reden kan echter ook zijn dat uitspoeling van fosfor niet een heel groot probleem is omdat fosfor (in de vorm van fosfaat) weinig mobiel is in de bodem, doordat het goed aan bodemdeeltjes zoals aluminium, ijzer en calcium bindt. Dit geldt vooral voor kleirijke bodems, die veel van dergelijke componenten bevatten⁵⁶. Ook is er relatief weinig informatie bekend over het effect van een ruime rotatie en het voorkomen van bodemverdichting op de lucht- en waterkwaliteit. De focus van de meeste studies bij deze maatregelen is gericht op het beheersen van ziekten en plagen in de bodem en doorworteling van gewassen. Maatregelen voor de reductie van NO_x uit de bodem is ook minder onderzocht. In een vervolgstudie moet blijken wat hier de reden van is, of dat we meer informatie boven tafel kunnen krijgen door interviews met bijvoorbeeld experts.

Naast bovengenoemde punten die het huidige onderzoek zouden kunnen verrijken, zou vervolgonderzoek zich kunnen richten op het kwantificeren van het effect van maatregelen. Dit zou kunnen met behulp van beschikbare databronnen zoals het Biologische Bodemmeetnet, Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid en de Emissieregistratie. Ook zou de kosteneffectiviteit van de verschillende maatregelen op de bodem-, water-, lucht- en klimaatdoelen nog kunnen worden onderzocht. In vervolgstappen raden wij aan om aansluiting te zoeken met de Soil Navigator, een beoordelingsinstrument voor agrariërs ontwikkeld binnen het LANDMARK project om verschillende bodemfuncties optimaal te beheren^{57, 58}.

De resultaten van deze verkennende literatuurstudie naar de effecten van de verschillende bodembeheermaatregelen op water- en luchtemissies en bodemfuncties laten zien dat bodembeheermaatregelen de volgende effecten kunnen hebben:

1. gunstige en/of geen effecten,
2. ongunstige en/of geen effecten,
3. zowel gunstige, geen en/of ongunstige effecten.

Een groot deel van de bodembeheermaatregelen heeft zowel gunstige als ongunstige effecten. Indien er een keuze moet worden gemaakt tussen verschillende bodembeheermaatregelen is het van belang om zowel de gunstige als de ongunstige effecten mee te wegen.

De huidige maatregelen die worden ingezet om lucht-, water- en bodemdoelstellingen te halen hebben een gunstig effect voor het doel waarvoor ze worden ingezet. Zo leidt injecteren van mest tot minder ammoniakemissie (NEC), leiden maatregelen als bekalken en groenbemesting tot minder nitraatuitspoeling (Nitraatrichtlijn, KRW), en lijken geen grondbewerking en het toedienen van compost positief voor het bodemleven (Bodemstrategie). Nadelen op andere vlakken kunnen echter zorgen voor een suboptimaal effect en dragen mogelijk niet bij aan duurzaam bodembeheer op de lange termijn. Zo leidt injectie van mest tot meer emissies van lachgas (Klimaatwet); leidt bekalken mogelijk tot meer uitstoot van koolstofdioxide (Klimaatwet) en ammoniak (NEC).

Kortom, het overzicht van de effecten van de diverse bodembeheermaatregelen kan bijdragen aan het maken van een integrale afweging voor beheermaatregelen om lucht-, water- en bodemdoelstellingen te behalen.

5 Referenties

1. Fink, J.R., et al., *Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability*. *Ciência e Agrotecnologia.*, 2016. **40**(4): p. 369-379.
2. Huhta, V., *The role of soil fauna in ecosystems: a historical review*. *Pedobiologia - International Journal of Soil Biology*, 2007. **50**(6): p. 489-495.
3. Franz Bender, S., C. Wagg, and M.G.A. Van der Heijden, *An Undergrond Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability*. *Trends in Ecology & Evolution*, 2016. **31**(6): p. 440-452.
4. Smith, P., et al., *Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils*. *SOIL Discussions*, 2015. **2**: p. 537-586.
5. LNV, *Kamerbrief over nationaal programma landbouwbodems*, N.e.V. Landbouw, Editor. 2019: Den Haag.
6. Bodembeheer, B.; Available from: <https://www.beterbodembeheer.nl/nl/beterbodembeheer.htm>
7. Rijksoverheid. *Klimaatbeleid*. 2019 [cited 2019 May 3]; Available from: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatbeleid>.
8. BIJ12. *Over het PAS*. 2019 [cited 2019 28 juni]; Available from: <https://www.bij12.nl/onderwerpen/programma-aanpak-stikstof/over-het-pas/>.
9. RVO. *Mest*. 2019 [cited 2019 May 3]; Available from: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mestbeleid/mest>.
10. RIVM. *Kaderrichtlijn Water (KRW)*. 2019 [cited 2019 May 3]; Available from: <https://www.rivm.nl/kaderrichtlijn-water-krw>.
11. RVO. *Fosfaatrechten - algemeen*. 2019 [cited 2019 May 3]; Available from: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mestbeleid/mest/fosfaatrechten/fosfaatrechten-algemeen>.
12. VNG. *Voorbereiding Schone Lucht Akkoord*. 2018; Available from: <https://vng.nl/onderwerpenindex/milieu-en-mobiliteit/luchtkwaliteit/nieuws/voorbereiding-schone-lucht-akkoord>.
13. RVO. *Gemeenschappelijk landbouwbeleid*. 2019 [cited 2019 May 3]; Available from: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/gemeenschappelijk-landbouwbeleid>.
14. Europa Nu. *Landbouwbeleid (GLB)*. 2019; Available from: https://www.europa-nu.nl/id/vg9pir5eze8o/landbouwbeleid_glb.
15. van der Wal, A., N.v. Eekeren, and M. Rutgers, *Een verkennende literatuurstudie over het effect van bodembeheer op ecosysteemdiensten*. 2008, RIVM.
16. Lima, A.C.R., et al., *A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality*. *Applied Soil Ecology*, 2013. **64**: p. 194-200.
17. Brussaard, L.J., *Bodemleven koesteren loont*, in *Syscope Magazine*. 2011. p. 8-9.

18. Beare, M.H., et al., *A Hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling*, in *The Significance and Regulation of Soil Biodiversity. Developments in Plant and Soil Sciences R.G.P.* In: Collins H.P., Klug M.J. (eds), Editor. 1995, Springer: Dordrecht.
19. ACS Distance Education. *The Nitrogen Cycle*. 2019 [cited 2019 May 6]; Available from: <https://www.studyacs.com/blog-nitrogen-cycle-37.aspx>.
20. LEI, *Factsheet Broeikasgassen: lachgas*, L.E. Instituut, Editor. 2012: Wageningen.
21. RIVM. *Ammoniak*. 2018 [cited 2019 26 juli]; Available from: <https://www.rivm.nl/ammoniak>.
22. Fink, J., et al., *Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability*. *Ciência e Agrotecnologia.*, 2016. **40**: p. 369-379.
23. EcoScience Wire. *The hurdles to carbon farming*. 2016 [cited 2019 May 6]; Available from: <https://ecosciencewire.com/2016/06/09/the-hurdles-to-carbon-farming/>.
24. Bai, Z., et al., *Effects of agricultural management practises on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018. **265**: p. 1-7.
25. Liu, X.J., et al., *The Impact of Nitrogen Placement and Tillage on NO, N2O, CH4 and CO2 Fluxes from a Clay Loam Soil*. 2006. **280**(1): p. 177-188.
26. Abdalla, M., et al., *Assessing the combined use of reduced tillage and cover crops for mitigating greenhouse gas emissions from arable ecosystem*. *Geoderma*, 2014. **223-225**: p. 9-20.
27. Puerta, V.L., et al., *Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grass-clover ley*. *Soil & Tillage Research*, 2018. **180**: p. 1-9.
28. Reubens, B., et al., *Bodembreed Interreg. Bodemkwaliteit en Landbouw: een literatuurstudie*, in *Technical Report*. 2010, Institute for Agricultural and Fisheries Research.
29. CBAV. *Handboek Bodem en Bemesting*. 2019 [cited 2019 5 juli]; Available from: <https://www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting/Handeling/pH-en-bekalking/Effect-pH-op-bodemleven.htm>.
30. Erisman, J.W., et al., *Maatregelen natuurinclusieve landbouw*. 2017, Louis Bolk Instituut,, Wageningen University & Research,,
31. Lubbers, I.M., et al., *Reduced greenhouse gas mitigation potential of no-tillage soils through earthworm activity*. *Scientific Reports*, 2015. **5**(13787).
32. Giannopoulos, G., M.M. Pulleman, and J.W. Groenigen, *Interactions between residue placement and earthworm ecological strategy affect aggregate turnover and N2O dynamics in agricultural soil*. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010. **42**: p. 618-625.
33. Bertora, C., et al., *Do earthworms increase N2O emissions in ploughed grassland?* *Soil Biology & Biochemistry*, 2007. **39**: p. 632-640.

34. Kuntz, M., et al., *Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming*. *Pedobiologia - International Journal of Soil Biology*, 2013. **56**: p. 251-260.
35. Bos, M.M., C.J.M. Musters, and G.R.d. Snoo, *De effectiviteit van akkerranden in het vervullen van maatschappelijke diensten. Een overzicht uit wetenschappelijke literatuur en praktijkervaringen*. . 2014, Institute of Environmental Sciences, Leiden University.
36. Boer, D.J.d., et al., *Mestsamenstelling in Adviesbasis Bemesting Grasland en Voedergewassen*. 2012, Wageningen UR Livestock Research, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen: Lelystad.
37. Sandén, T., et al., *European long-term field experiments: knowledge gained about alternative management practices*. 2018. **34**(2): p. 167-176.
38. CLO, *Mestproductie door de veestapel, 1986-2016* 2017.
39. Haan, B.J.d., et al., *Ammoniak in Nederland*. Rapport PBL : 500125003. 2008, Bilthoven: Planbureau voor de Leefomgeving.
40. CDM, *Beoordeling mestproducten op basis van het Protocol Gebruiksvoorschriften Dierlijke Mest, versie 1.0*. 2013.
41. Miller, D.J., et al., *Isotopic Composition of In Situ Soil NOx Emissions in Manure-Fertilized Cropland*. 2018. **45**(21): p. 12,058-12,066.
42. CDM, *Advies 'Organische stof in de bodem en nitraatuitspoeling'*. 2017.
43. De Goede, R.G.M., L. Brussaard, and A.D.L. Akkermans, *On-farm impact of cattle slurry manure management on biological soil quality*. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 2003. **51**(1): p. 103-133.
44. Onrust, J., et al., *Earthworm activity and availability for meadow birds is restricted in intensively managed grasslands*. *Journal of Applied Ecology*, 2019: p. 1-10.
45. VandenNest, T., et al., *LANGETERMIJN BEMESTING MET DIVERSE (ORGANISCHE) MESTTYPES EN DOSISSEN: EFFECT OP P-UITSPOELING*. ILVO mededelingen, 2014. **171**: p. 107-131.
46. Abdalla, M., et al., *A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity*. *Global Change Biology*, 2019. **25**(8): p. 2530-2543.
47. Holland, J.E., et al., *Liming impacts on soil, crops and biodiversity in the UK: a review*. *Science of the Total Environment*, 2018. **610-611**: p. 316-332.
48. Amery, F. and B. Vandecasteele, *Wat weten we over fosfor en landbouw? Deel 1. Beschikbaarheid van fosfor in bodem en bemesting*. 2015, Instituut voor Lanbouw- en Visserijonderzoek (ILVO): Merelbeke.
49. Brus, D.J. and J.J.H. van den Akker, *How serious a problem is subsoil compaction in the Netherlands? A survey based on probability sampling*. *SOIL*, 2018. **4**(1): p. 37-45.
50. Mortel, J.E.v.d., *Lang leve de bodem! Het beste moment om een boom te planten is 20 jaar geleden. Het één na beste moment is nu.* , in *Gezonde plant op een vitale en duurzame bodem*. . 2019, HAS Hogeschool Venlo: Venlo.

51. Zwart, K., et al., *Tien vragen en antwoorden over organische stof*. 2013, HLB BV, Alterra (Wageningen UR), BLGG Research, Louis Bolk Instituut.
52. de Ruijter, F.J. and A.L. Smit, *Relaties tussen nitraat in het grondwater en potentiële indicatoren voor nitraatverlies op de voorloperbedrijven van Telen met toekomst.*, in *Telen met toekomst*. 2003, Plant Research International B.V.: Wageningen
53. Paulissen, M.C.P.C., R.C. Nijboer, and P.F.M. Verdonschot, *Grondwater in perspectief. Een overzicht van hydrochemische watertypen in Nederland*. 2007, Alterra: Wageningen.
54. RVO. *Wanneer mest uitrijden*. 2019 [cited 2019 2 juli]; Available from: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/agrarisch-ondernemen/mestbeleid/mest/mest-uitrijden/wanneer-mest-uitrijden>
55. Bruggen, A.H.C.v., et al., *Relationships between greenhouse gas emissions and cultivable bacterial populations in conventional, organic and long-term grass plots as affected by environmental variables and disturbances*. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017. **114**: p. 145-159.
56. DLV plant, WUR-PRI,, NMI. *Masterplan Mineralenmanagement. Alles wat u moet weten over fosfaat. Vragen en antwoorden*. 2011 [cited 2019 November 15]; Available from: <https://edepot.wur.nl/171881>.
57. Rutgers, M., G. Sardano, and R. Schulte, *Soil Navigator. LANDMARK's beoordelingsinstrument om vijf bodemfuncties optimaal te beheren*, in *Tijdschrift Bodem*. 2019, Wolters Kluwer.
58. WUR. *Soil navigator: a tool for optimising soil usage*. 2019 [cited 2020 2 maart]; Available from: <https://www.wur.nl/en/show-longread/Soil-navigator-a-tool-for-optimising-soil-usage.htm>.
59. Spiegel, H., et al., *Impacts of soil management practices on crop Productivity, on indicators for climate change mitigation, and on the chemical, physical and biological quality of soil*. 2014.
60. Van der Hoek, K., S. Mw van, and P. Kuikman, *Direct and indirect nitrous oxide emissions from agricultural soils, 1990 - 2003. Background document on the calculation method for the Dutch National Inventory Report*. 2007.
61. Velthof, G.L. and R.P.J.J. Rietra, *Nitrogen Use Efficiency and Gaseous Nitrogen Losses from the Concentrated Liquid Fraction of Pig Slurries*. *International Journal of Agronomy*, 2019. **2019**: p. 10.
62. Nutrinorm. *Maatregelen voor een vruchtbare bodem*. xxxx [cited 2019 March 8]; Available from: <https://www.nutrinorm.nl/nl-nl/bodem/werken-aan-gezonde-bodem/maatregelen-voor-een-vruchtbare-bodem>.
63. Groenigen, K.-J.v., et al., *Abundance, production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage*. *Soil Biology & Biochemistry* 2010. **42**: p. 48–55.
64. Onrust, J. and T. Piersma, *How dairy farmers manage the interactions between organic fertilizers and earthworm ecotypes and their predators*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019. **273**: p. 80-85.

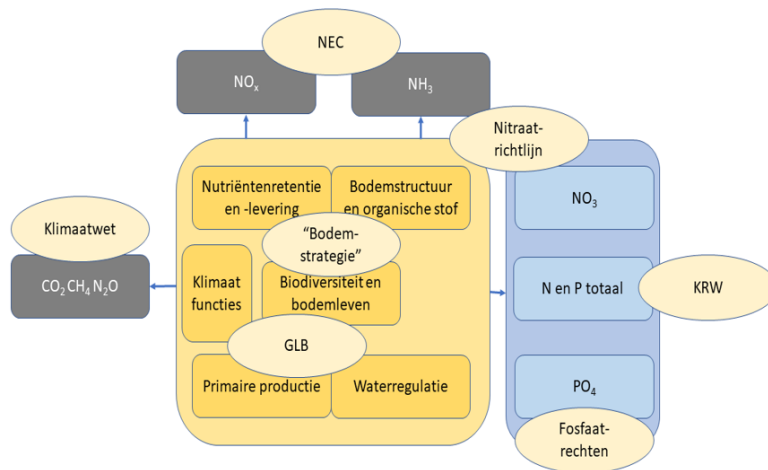
6 Bijlage 1: uitgebreide tabel met resultaten

Tabel 7 Kwalitatieve evaluatie van de effecten van bodembeheermaatregelen op bodemfuncties en emissies naar de lucht en het water. Een plus (+, groen) en min (-, rood) geven respectievelijk een gunstig en ongunstig effect op bodemfuncties en emissie-indicatoren aan. En nul (0, geel) geeft aan dat er geen (eenduidig) effect is gevonden, of zowel een gunstig als een ongunstig effect. Het getal tussen haakjes geeft het aantal studies aan waarop de kwalitatieve evaluatie is gebaseerd. De cijfers in superscript verwijzen naar de referenties

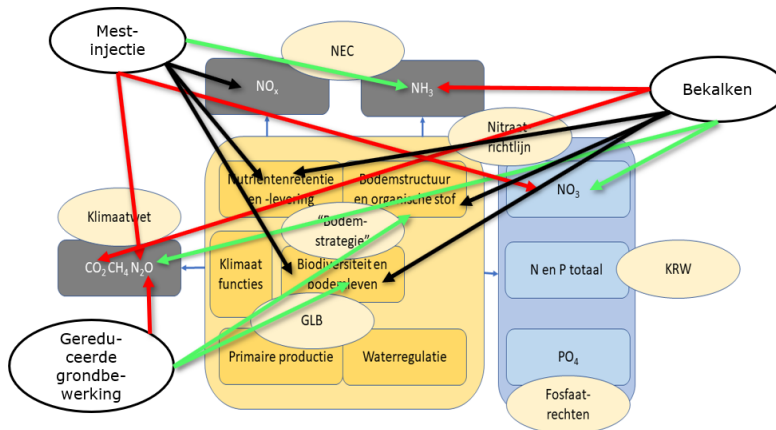
Beleidsdoel	Beleidskader	Bodembeheer-maatregel / indicator of bodem-functie	Geen grondbewerking	Gangbare grondbewerking	Gereduceerde grondbewerking	Akkerranden	Drijfmest (bovengronds)	Mestinjectie	Vaste mest (bovengronds)	Compost (bovengronds)	Ruimere rotatie	Groenbemesting	Bekalken	Voorkomen bodem- verdichting
Reductie van emissies naar lucht	Klimaatakkoord	Reductie van CO ₂	0 (1) ³¹	- (1) ¹⁵			- (3) ³⁷		0 (2) ³⁷	0 (3) ³⁷			- (1) ⁴⁷	
	Klimaatakkoord	Reductie van CH ₄					0 (3) ⁵⁹		0 (3) ⁵⁹	0 (1) ⁵⁹				
	Klimaatakkoord	Reductie van N ₂ O	0 (1) ³¹	0 (1) ³³ ; -(3) ^{15, 26, 55}	- (1) ²⁶		- (7) ^{60,37}	- (2) ^{39, 60}	0 (4) ^{60,37}	- (1) ³² ; 0 (2) ³⁷		0 (27) ⁴⁶	+ (1) ⁴⁷	
	NEC/Voormalig PAS	Reductie van NH ₃					- (3) ³⁹	+ (3) ³⁹	- (2) ⁴⁰ , 61				- (1) ⁴⁷	
	NEC/Voormalig PAS	Reductie van NO _x	0 (1) ²⁵	0 (1) ²⁵				0 (1) ⁴¹						
Reductie van emissies naar water	Nitraatrichtlijn/KRW	Reductie van N-uitspoeling				+ (1) ³⁵	0 (1) ⁴²	- (1) ⁴⁰	0 (1) ⁴²	0 (1) ⁴²		+ (27) ⁴⁶	+ (1) ⁴⁷	
	Nitraatrichtlijn/KRW	Reductie van P-uitspoeling				+ (1) ³⁵			- (1) ⁴⁵	0 (1) ⁴⁵				

Beleidsdoel	Beleidskader	Bodembeheer -maatregel / indicator of bodem- functie	Geen grondbewerking	Gangbare grondbewerking	Gereduceerde grondbewerking	Akkerranden	Drijfmest (bovengronds)	Mestinjectie	Vaste mest (bovengronds)	Compost (bovengronds)	Ruimere rotatie	Groenbesteding	Bekalken	Voorkomen bodem- verdichting
Verbeteren van bodem- functies		Bodemstruc- tuur en organisch stof	+ (6) 15, 24, 27, 30	- (5) 15, 30, 62	+ (3) 26, 27, 63		+ (33) 27, 37		+ (51) 15,37, 45	+ (17) 15, 24, 62,37, 45	0 (2) ¹⁵ + (3) ³⁰	+ (11) 30, 46 0 (5) ¹⁵	0 (3) ¹⁵ ; + (1) ⁴⁷	+ (5) 15
		Nutriëntenre- tentie en - levering	+ (3) 15	- (2) ¹⁵			+ (3) ³⁷	0 (1) 15	+ (6) ¹⁵	+ (3) ¹⁵ , 62		0 (5) ¹⁵	+ (1) ⁴⁷ ; 0 (2) ¹⁵	+ (4) 15
		Biodiversiteit en bodemleven	+ (4) 15, 24, 30	- (2) 15, 62	+ (3) 34, 48, 63	+ (1) 35	+ (3) ³⁷ ; - (1) ³⁴	0 (6) 39	+ (9) 15, 30, 64	+ (1) ²⁴ 0 (3) ¹⁵	+ (3) 15, 24, 30	+ (3) 15, 30	-(1) ¹⁵ ; +(5) ⁴⁷ , 48	+ (2) 15
		Totaal	+ (13); 0 (3)	- (12); 0 (2)	- (1); + (6)	+ (3)	- (14); 0 (4); + (39)	- (3); 0 (8); + (3)	- (3); 0 (10); + (66)	- (1); 0 (11); + (21)	0 (2); + (6)	0 (32); + (41)	- (3); 0 (5); + (9);	+ (11)

Bijlage 2: voorbeeld van interacties tussen drie bodembeheermaatregelen en beleidskaders relevant voor duurzame landbouw



Figuur 5 Weergave van de samenhang tussen beleidskaders die relevant zijn voor duurzame landbouw. Emissies en bodemfuncties worden geborgd binnen diverse kaders. Bestaand beleid richt zich hoofdzakelijk op emissies uit de bodem naar de lucht en het water. Nieuw beleid zoals het kader "bodemstrategie" richt zich op de bodemfuncties.



Figuur 6 Effecten van drie bodembeheermaatregelen, gereduceerde grondbewerking, mestinjectie en bekalken, op emissies en bodemfuncties die indicatoren zijn voor diverse beleidskaders. Deze figuur illustreert dat maatregelen positieve, negatieve of neutrale effecten kunnen hebben op emissies en bodemfuncties en dat er in de interactie tussen sommige beleidskaders sprake is van 'trade-offs'. Zo blijkt uit de literatuur dat mestinjectie leidt tot een vermindering van emissies van ammoniak en dat bekalken leidt tot een toename van deze emissie.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag