



Kwaliteit landbouwbodems Gelderland

Analyse van knelpunten en oplossingsrichtingen

Gerard H. Ros

Brent Riechelman

Yuki Fujita

Referaat

Ros GH, Riechelman B & Y Fujita (2023). *Kwaliteit landbouwbodems Gelderland. Analyse van knelpunten en oplossingsrichtingen*, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1987.N.23, 88 pp.

Rapport in het kort

Een duurzaam beheerde en gezonde bodem is van onschatbare waarde. Het is daarom belangrijk om inzicht te hebben in de huidige als ook gewenste bodemkwaliteit. Voor alle landbouwpercelen in de provincie Gelderland wordt de huidige bodemkwaliteit in beeld gebracht en wordt een onderbouwing gegeven van locatie-specifieke streefwaarden in relatie tot de functies die de bodem levert. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het recent ontwikkelde BLN (versie 2) methodiek om de bodemkwaliteit te beoordelen. De functie van de bodem om extra koolstof vast te leggen wordt hierbij verder uitgediept waarbij inzicht wordt gegeven in de aanwezige knelpunten en kansen voor duurzaam bodembeheer. Om de uiteenlopende uitdagingen rondom bodemkwaliteit in het landbouwgebied van Gelderland aan te gaan, is een regionale aanpak nodig die rekening houdt met gebiedsspecifieke uitdagingen en mogelijkheden.

© 2023 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

Provincie Gelderland

digitaal

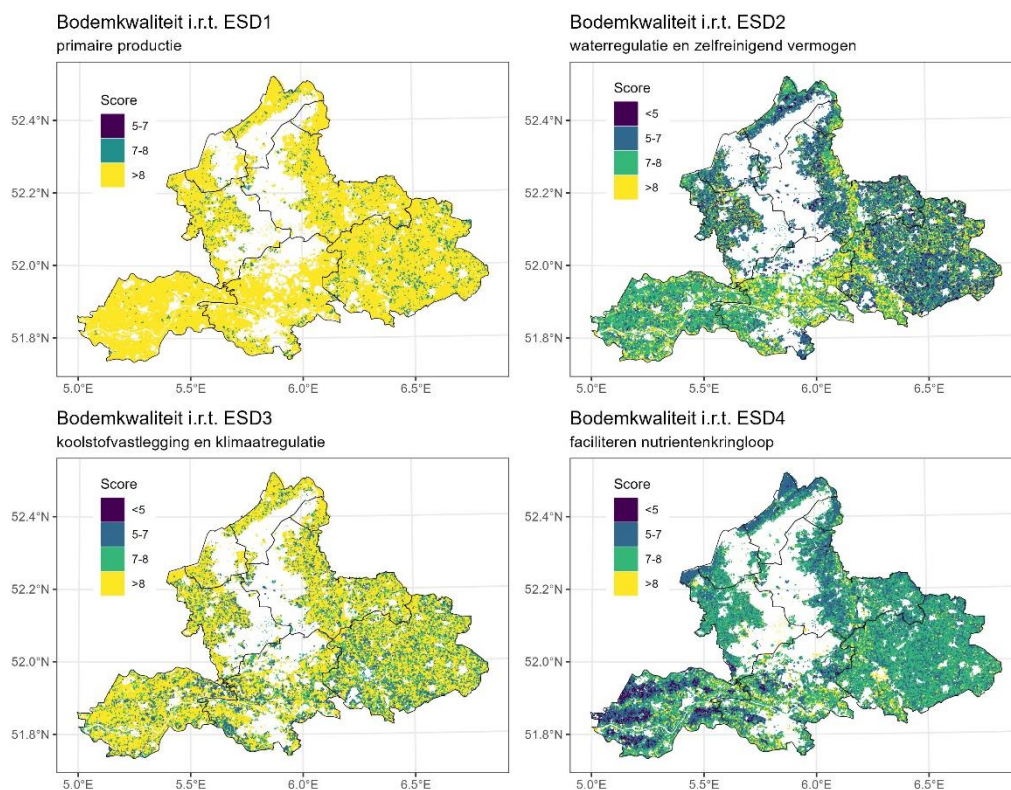
Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies		2
1	Introductie	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Doelstelling	6
1.3	Leeswijzer	6
2	Werkwijze	7
2.1	Bodemkwaliteitsbeoordeling	7
2.2	Koolstofvastlegging	10
3	Bodemkwaliteit in Gelderland	15
3.1	Streefwaardes voor goede bodemkwaliteit	15
3.2	Eigenschappen van regio's	21
3.3	Beoordeling bodemkwaliteit voor primaire productie	24
3.4	Beoordeling bodemkwaliteit voor water	33
3.5	Beoordeling bodemkwaliteit voor klimaat	39
3.6	Beoordeling bodemkwaliteit voor nutriëntenkringlopen	42
3.7	Regionale samenvatting via boxplots	45
3.8	Maatregelen voor verbetering bodemkwaliteit	52
4	Scenariostudie koolstofvastlegging	61
4.1	Mogelijkheden voor C-vastlegging	61
4.2	Potentie voor C-vastlegging	63
4.3	De opgave per regio	65
4.4	Maatregelen voor koolstof	68
5	Discussie	72
5.1	Bodemkwaliteit van landbouwgrond van Gelderland	72
5.2	Streefwaarden bodemkwaliteit	73
5.3	Bijdrage duurzaam Bodembeheer	74
5.4	Potentieel van extra koolstofvastlegging	76
6	Conclusies	79
Literatuur		86

Samenvatting en conclusies

Binnen de provincie Gelderland wordt er al jaren door agrariërs en overheden gewerkt aan verbetering van de bodem- en waterkwaliteit. Om de landelijke ambitie van het *Nationaal Programma Landbouwbodems* om alle bodems in 2030 duurzaam te beheren te concretiseren, is in de voorliggende studie de huidige als ook gewenste kwaliteit van landbouwbodems in beeld gebracht. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de systematiek van de Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN versie 2.0) met een focus op de bodemfuncties die bijdragen aan de ecosysteemdiensten “*primaire productie (ESD1)*”, “*waterregulatie en zelfreinigend vermogen (ESD2)*”, “*koolstofvastlegging en klimaatregulatie (ESD3)*” en het “*faciliteren van de nutriëntenkringloop (ESD4)*”. Voor zeven verschillende regio's binnen de provincie zijn 37 verschillende bodemindicatoren gekwantificeerd. Voor de ecosysteemdienst “*bodem biodiversiteit en habitatvoorziening*” ontbraken de meetgegevens of zijn geen streefwaarden beschikbaar om de kwaliteit van de bodem te beoordelen.

Over het algemeen blijkt dat de bodemkwaliteit hoog is in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie en koolstofvastlegging en klimaatregulatie (uitgedrukt op een schaal van 1 tot 10, waarbij elke bodem een 10 moet scoren voor een optimale kwaliteit). De grootste uitdagingen liggen er voor ESD2 en ESD4. In deze studie worden ruimtelijke kaarten gepresenteerd om inzicht te geven in de huidige bodemkwaliteit in relatie tot de vier ESDs als ook het aantal aanwezige knelpunten. Ter illustratie wordt hieronder de gemiddelde bodemkwaliteitsscore weergegeven voor de vier ESDs.



Ondanks de gemiddeld hoge bodemkwaliteitsscore komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties. Afhankelijk van het type landgebruik (akkerbouw, gras, mais of wisselbouw) zijn er op substantiële arealen knelpunten in relatie tot de levering van kalium, zwavel en fosfaat (bodemchemie), verdichting, verstuiving en droogte- en natschade (bodemstructuur). Opvallend is dat de meest voorkomende knelpunten binnen de provincie Gelderland zich focussen op de ecosysteemdiensten primaire productie en waterregulatie en zelfreinigend vermogen. Vanwege de hoge uitgangssituatie voor organische stof is de bodemkwaliteit in relatie tot koolstofvastlegging en klimaatregulatie (ESD3) namelijk al hoog. Tegelijkertijd is er nog perspectief om extra organische stof op te bouwen via aanpassingen van het bouwplan, inzet van vanggewassen, gebruik van compost en het zorgen voor een goede bodemstructuur. Door hoge nutriëntenvoorraden in de bodem komen op veel locaties situaties voor waarbij de efficiëntie van gebruikte meststoffen laag is, waardoor er knelpunten zijn voor een goede bodemkwaliteit in het licht van ESD4.

Om integraal aan bodemkwaliteit te werken, wordt in dit rapport per regio inzicht gegeven in het voorkomen van knelpunten en de daarvoor beschikbare maatregelen. Er is hierbij synergie te realiseren tussen de vier ESDs omdat veel bodembeheermaatregelen positief doorwerken op meerdere ESDs. Ter illustratie wordt hieronder voor de meest voorkomende knelpunten binnen provincie Gelderland een overzicht gegeven van de beste maatregelen.

Tabel S-1. Percentage areaal (in %) waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5), in relatie tot de vier getoetste ecosysteemdiensten uit BLN 2.0 en de beste maatregelen die inzetbaar zijn.

Bodemfuncties	ESD*	Areaal	Beste Maatregelen (zie tabel 3.6)
Areaal (ha * 100)	-	2277	
Zwavellevering	1	56	Volg bemestingsadvies, aanvoer organische stof
Verdichting	1	55	Voorkom verdichting, verruiming bouwplan, aanvoer van organische stof
Droogtestress	1	16	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	45	Inzet van akkerranden en bufferstroken, aanvoer van organische stof, verruiming bouwplan
Uitspoelingsrisico nitraat	2	30	Vanggewassen en groenbemesters, voorkom verdichting, perceel jaarrond groen, verruiming bouwplan
Grondwateraanvulling	2	73	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
EOS-balans	3	5	Aanvoer van organische stof, perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters
N-benutting	4	89	Perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters

Op basis van modelberekeningen met RothC laat deze studie zien dat het mogelijk is om de provinciale opgave om 54 kton CO₂ per jaar in de bodem vast te leggen via een goed uitgekend bouwplan en bemestingspraktijk. In de voorliggende rapportage wordt uitgewerkt hoe via een generieke aanpak en uitrol van de Goede Landbouwpraktijk deze ambitie is te realiseren. Extra koolstofopslag kan worden gerealiseerd in gebieden met een hoge potentie, dat wil zeggen percelen met een C-verzadiging lager dan 60%.

1 Introductie

1.1 Achtergrond

De bodem is de basis van een agrarisch bedrijf en de motor van een gezonde en productieve landbouw. Een duurzaam beheerde en gezonde bodem is daarom van grote waarde. Gezonde bodems leveren namelijk een groot aantal ecosysteemdiensten voor zowel agrariërs als waterbeheerders en andere landgebruikers. Zowel het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV, kamerbrief van mei 2018), als private partijen (in het Nationaal Programma Landbouwbodems, NPL) hebben als streefdoel aangegeven dat alle landbouwbodems in Nederland in 2030 daarom duurzaam worden beheerd. Tevens moet conform het Klimaatakkoord de jaarlijkse netto emissie van landbouwkundig landgebruik in 2030 zijn gereduceerd met 0,5 megaton CO₂ equivalenten (Rijksoverheid, 2019). Binnen het NPL wordt dit vertaald in een gewenste koolstofvastlegging van een 0.5 megaton per jaar in minerale landbouwbodems. Als deze opgave over de hele areaal minerale landbouwgrond (ca. 1,65 miljoen hectare) wordt verspreid, betekent dit dat er ongeveer 300 kg CO₂ per hectare per jaar moet worden vastgelegd. In veel beleidsopgaven is de bodemkwaliteit en een goed bodembeheer essentieel voor het slagen van het beleid.

Binnen de context van het Nationaal Programma Landelijk Gebied (NPLG) is het voor de provincie Gelderland belangrijk om inzicht te krijgen in de ruimtelijke variatie in bodemkwaliteit (in het bijzonder voor de landbouwkundige functies en de mogelijkheid om koolstof vast te leggen, een functie die samenhangt met de huidige variatie in organische stof). Daarnaast behoeft de provincie meer inzicht in de meest voorkomende bodemkwaliteitsknelpunten en de best passende maatregelen om de bodemkwaliteit te verbeteren. Hiermee kunnen concrete handvatten worden ontwikkeld om landbouwers inzicht te geven of, en zo ja hoe, er gewerkt kan worden aan een betere bodemkwaliteit. Denk hierbij aan gerichte maatregelen om bijvoorbeeld een tekort aan nutriënten op te lossen (binnen bestaand mestbeleid), verzuring tegen te gaan, het bufferend vermogen van de bodem te vergroten, meer biodiversiteit ondergronds te stimuleren of (impact van) ondergrond-verdichting te beperken. Door knelpunten integraal te identificeren kan ook integraal gezocht worden naar oplossingen. Ook is het gewenst om inzicht te krijgen in verschillen in bodemkwaliteit (fysisch, chemisch, biologisch) op een gewenst schaalniveau ter ondersteuning van beleidsimplementatie. Hiermee wordt ook helder hoe de provincie Gelderland een goed onderbouwde en realistische bijdrage kan leveren aan de landelijke opgaven binnen het NPLG voor wat betreft de bodemkwaliteit en de opgaven uit het Klimaatakkoord.

Om na te gaan of bodems duurzaam beheerd worden en daarmee de huidige goede bodemkwaliteit voor toekomstige generaties behouden blijft, is het nodig om eenduidig de huidige situatie als ook gewenste verbetering van de bodemkwaliteit (aan de hand van streefwaarden die aansluiten bij de situatie binnen de provincie) vast te stellen. Dit inzicht is ook nodig om effectief te kunnen sturen op maatregelen om de bodemkwaliteit te verbeteren. Alleen op basis van betrouwbare en zinvolle metingen, en een deugdelijke interpretatie van deze metingen, kan beoordeeld worden wat de kwaliteit is en welke maatregelen nodig zijn om de bodemkwaliteit te behouden of te verbeteren.

Binnen de PPS Beter Bodembeheer (en voorlopers hiervan) is de afgelopen jaren een instrument ontwikkeld om de kwaliteit van landbouwbodems inzichtelijk te maken: de Bodemindicatorenset

Landbouwgronden Nederland (BLN). In de eerste versie van de BLN wordt beschreven welke bodemeigenschappen gemeten moeten worden om inzicht te krijgen in de kwaliteit van de landbouwbodem (de Haan et al., 2021), waarbij ter inspiratie voorlopige referentiewaarden per grondsoort werden toegevoegd. Parallel aan deze ontwikkelingen hebben de kennisinstellingen in Nederland gewerkt aan een bodemwaarderingssysteem, om zo ook de metingen van bodemkwaliteit voor elk perceel (gegeven bouwplan en grondsoort) te kunnen beoordelen in relatie tot de functies die de bodem levert. Deze systematiek is bekend geworden onder de naam van de Open Bodem Index (OBI, Ros et al., 2022). Beide methodieken zijn in 2023 geïntegreerd binnen de systematiek van BLN, versie 2.0 (Ros et al., 2023).

Via deze systematiek kan de bijdrage van de bodem aan verschillende ecosysteemdiensten zoals landbouwkundige gewasproductie, waterregulatie, koolstofopslag, recycling van nutriënten en het stimuleren van biodiversiteit worden gekwantificeerd. Deze vijf ecosysteemdiensten worden in het vervolg van dit rapport als volgt benoemt:

1. **Primaire productie** (van landbouwgewassen): de capaciteit van een bodem om plantbiomassa te produceren voor humaan gebruik, en daarmee het leveren van voedsel, (dier)voer, vezels en brandstof binnen de grenzen van het natuurlijke of beheerde ecosysteem.
2. **Waterregulatie en zelfreinigend vermogen**: de capaciteit van een bodem om water te ontvangen, opslaan en geleiden voor later gebruik (en daarmee voorkomen van droogte, overstroming en erosie), en om schadelijke stoffen uit het water te verwijderen.
3. **Koolstofvastlegging en klimaatregulatie**: de capaciteit van een bodem om de negatieve impact van emissies van broeikasgassen (CO₂, CH₄ en N₂O) op het klimaat te verminderen.
4. **Faciliteren van de nutriëntenkringloop**: de capaciteit van een bodem om nutriënten te ontvangen (in de vorm van (bij)producten), te leveren (uit intrinsieke bronnen) of te onderscheppen (uit lucht of water), en deze effectief over te brengen naar planten en te oogsten producten.
5. **Bodem biodiversiteit en habitatvoorziening**: de veelheid en verscheidenheid van bodem-organismen en -processen die interacteren in een ecosysteem, een significant onderdeel zijn van het natuurlijke kapitaal van een bodem, en een brede range aan culturele en onbekende diensten leveren aan de maatschappij.

Volgens het *Functional Land Management framework* (Schulte et al., 2014) kunnen alle bodems een bijdrage leveren aan deze vijf ecosysteemdiensten, maar zullen de verhoudingen afhangen van het landgebruik. Dit betekent ook dat er, afhankelijk van het landgebruik, andere streefwaarden gesteld moeten worden wat betreft de bijdrage van de bodem aan deze ecosysteemdiensten en dus aan de bodemkwaliteit.

Voor elk perceel, bedrijf en provincie kunnen zo de knelpunten worden geïdentificeerd en bijpassende maatregelen worden gestimuleerd. De BLN 2.0 bevat streef- en referentiewaarden voor een brede set van bodemfuncties voor elk bouwplantype op perceelsniveau, waarbij o.a. grondsoort, gewasrotatie en grondwatertrap worden meegenomen. Voor de bodemfuncties die bijdragen aan de primaire productie zijn de ontwikkelde streefwaardes goed onderbouwd en getoetst in de praktijk. Voor de andere hierboven genoemde ecosysteemdiensten zijn er streefwaarden opgesteld, maar zijn deze slechts gedeeltelijk getoetst (Ros et al., 2023).

1.2 Doelstelling

Om meer inzicht te krijgen in de bodemkwaliteit binnen provincie Gelderland, is een onderzoek uitgevoerd om:

- Ruimtelijk inzicht te krijgen in de kwaliteit van de landbouwbodem in Gelderland. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de gecombineerde systematiek van BLN en OBI. Voor elk perceel in Gelderland wordt de bodemkwaliteit beoordeeld in relatie tot de chemische, biologische en fysische kwaliteit (de ecosysteemdienst primaire productie).
- Ruimtelijk inzicht te krijgen in de kwaliteit van de landbouwbodem in Gelderland in relatie tot de ecosysteemdiensten waterregulatie en zelfreinigend vermogen, koolstofopslag en klimaatregulatie, bodembiodiversiteit en habitatsvoorziening, en het faciliteren van de nutriëntenkringloop.
- Ruimtelijk inzicht te krijgen in het handelingsperspectief: met welke maatregelen is het mogelijk om gericht en effectief te sturen op verbetering van de bodemkwaliteit.
- Ruimtelijk inzicht te krijgen in het organische stofgehalte binnen provincie Gelderland als ook de mogelijkheden die er liggen om bij te dragen aan de ambitie voor koolstofvastlegging in de landbouwbodem.

1.3 Leeswijzer

Binnen de hierboven geschreven context is voor de provincie Gelderland in kaart gebracht wat de huidige bodemkwaliteit is van landbouwbodems in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten die de bodem kan leveren. Concreet gaat het hierbij om de ecosysteemdiensten i) primaire productie, ii) waterregulatie en zelfreinigend vermogen, iii) koolstofvastlegging en klimaatregulatie, iv) bodembiodiversiteit en habitatvoorziening, en v) het faciliteren van de nutriëntenkringloop.

De voorliggende rapportage beschrijft de resultaten van een gebiedsbrede studie waarin de huidige en gewenste bodemkwaliteit als ook de potentie voor koolstofopslag ruimtelijk expliciet in beeld zijn gebracht. Na deze inleiding wordt in hoofdstuk 2 de methodiek beschreven om bodemkwaliteit te beoordelen in relatie tot concrete streefwaarden voor de landbouwbodems. In hoofdstuk 3 wordt de huidige en gewenste kwaliteit (beoordeeld op basis van deze streefwaarden) in kaart gebracht. In hoofdstuk 4 wordt inzicht gegeven in de ruimtelijke variatie in organische stof, de mate van koolstofverzadiging als ook de mogelijkheden die er liggen om koolstof vast te leggen. Daarbij wordt ook inzicht gegeven in het concrete handelingsperspectief dat er ligt om gericht en effectief te sturen op verbetering van de bodemkwaliteit.

2 Werkwijze

2.1 Bodemkwaliteitsbeoordeling

2.1.1 Bodem- en perceelgegevens

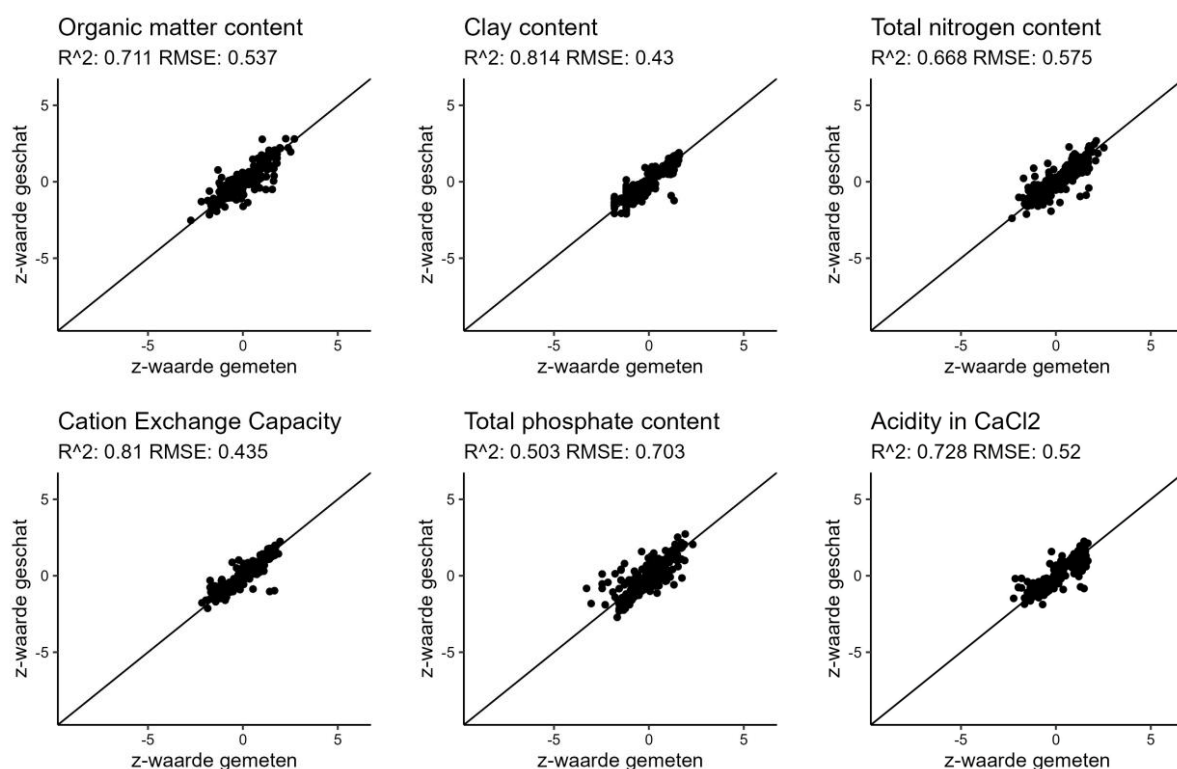
Om inzicht te geven in de kwaliteit van de landbouwbodem is het belangrijk om te meten. Voor de voorliggende studie maken we hierbij gebruik van gegevens uit private agrarische meetnetten. Deze metingen zijn verwerkt tot ruimtelijke kaarten met bodemeigenschappen per perceel om zo inzicht te krijgen in de functies die de bodem levert in relatie tot de ecosysteemdiensten:

- a) primaire productie,
- b) waterregulatie en zelfreinigend vermogen,
- c) koolstofvastlegging en klimaatregulatie,
- d) bodembiodiversiteit en habitatvoorziening, en
- e) het faciliteren van de nutriëntenkringloop

Berekeningen en bijbehorende kaarten worden gemaakt met behulp van beschikbare bodemanalyses en geschatte bodemkenmerken van de bouwvoor (0-25 cm voor bouwland en 0-10 cm voor grasland) aangevuld met informatie over de ondergrond afkomstig uit openbare meetnetten. Hiervoor is gebruik gemaakt van meetgegevens uit het *Nationaal Agrarisch Bodem Archief*, NABA (NMI, 2023). NABA bevat voor heel Nederland meer dan 300.000 bodemanalyses die zijn uitgevoerd in de periode 2018 tot 2023. Deze gegevens zijn verwerkt tot ruimtelijke kaarten waarbij inzicht wordt gegeven in de ruimtelijke variatie in bodemkenmerken tussen landbouwpercelen (waaronder het OS-gehalte, de fosfaatvoorraad en plantbeschikbaarheid en basiskenmerken als kleigehalte, CEC, zuurgraad, stikstofgehalte en de microbiële activiteit gemeten als potentieel mineraliseerbaar stikstof). Biologische indicatoren voor plantparasitaire aaltjes, wormen en schimmelbiomassa ontbreken omdat deze (nog) niet routinematig worden gemeten bij agrarische laboratoria ofwel streefwaarden ontbreken.

De informatie over het landgebruik per perceel is afkomstig uit de Basisregistratie Gewaspercelen (BRP) voor de periode 2009 tot 2022. De gegevens van 2009 tot 2022 zijn ruimtelijk gekoppeld om voor elk perceel van 2021 te bepalen welke gewassen er in de voorgaande 14 jaren geteeld zijn. De gewassen zijn daarbij onderverdeeld in de volgende gewasgroepen: aardappelen, granen, bieten, groenten en kruiden, maïs, vlinderbloemigen, grassen, peen, witlof en cichorei, uien, bollen, fruit en bomen, overig, natuur/rand/overig, sierteelt.

Voor de provincie zijn daarnaast in 2020 alle pachtpercelen van de provincie bemonsterd en geanalyseerd via een standaard bodemanalyse (de BemestingsWijzer van Eurofins). Hiervoor zijn voor 402 percelen gedetailleerde metingen beschikbaar. Deze gegevens zijn gebruikt als onafhankelijke dataset om te toetsen in welke mate de “gemeten en voorspelde” bodemparameters afgeleid van NABA overeenkomen met de praktijk. Wel wordt hierbij opgemerkt dat deze dataset niet representatief hoeft te zijn voor alle percelen binnen provincie Gelderland. Ter illustratie wordt de vergelijking tussen berekende en gemeten waarden in Figuur 2-1 weergegeven voor een aantal bodemparameters die cruciaal zijn voor deze studie.



Figuur 2-1. Betrouwbaarheid van de gebruikte bodemanalyses voor provincie Gelderland, weergegeven als 1-op-1 correlatieplot waarbij de gemeten bodempara-meter wordt vergeleken met de berekende bodempara-meter voor organische stof, kleigehalte, stikstof totaal, de CEC, de fosfaatvoorraad en de zuurgraad. De bodempara-meters zijn gestandaardiseerd als z-waarde (het aantal standaardafwijkingen dat een observatie afwijkt van het gemiddelde).

Uit deze analyse blijkt dat de gebruikte bodempara-meters betrouwbaar in kaart worden gebracht door de ruimtelijke modellen afgeleid van het NABA. De verklaarde variantie tussen gemeten en berekende parameters is overwegend hoger dan 70% en de relatieve fout kleiner dan een halve standaardfout. Dit betekent dat de voorspelde bodemeigenschappen voor alle 114.898 landbouwpercelen voldoende betrouwbaar zijn voor onderbouwing van lokaal en regionaal bodembeleid.

2.1.2 BLN 2.0

De set Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN 2.0) is een wetenschappelijk verantwoorde indicatorset die de basis vormt om de kwaliteit van de Nederlandse landbouw bodems integraal (fysisch, chemisch, biologisch), voor verschillende ecosysteemdiensten, vast te stellen. Het bestaat uit een lijst met indicatoren die relatief goedkoop en eenvoudig zijn te bepalen. De streefwaardes zijn opgesteld voor de verschillende functies die de bodem levert (Ros et al., 2023). Omdat de gewenste kwaliteit van de landbouwbodem afhangt van de specifieke omstandigheden van de percelen, zoals landgebruik en bodemtype, zijn de streefwaardes op perceelniveau bepaald met inachtneming van deze factoren. Dit betekent ook dat de bodemkwaliteit in beeld wordt gebracht voor alle gewassen in het bouwplan, en dat deze vervolgens worden geaggregeerd tot één beoordeling per perceel.

Op basis van de beschikbare kaarten met bodem- en perceeleigenschappen, wordt voor elk perceel allereerst de landbouwkundige streefwaarde vastgesteld, waarna inzicht wordt gegeven in welke mate dit optimum wordt bereikt. Dit betekent concreet dat voor elke bodemfunctie een 'distance to target' wordt berekend, waarbij de afstand tot het optimum wordt uitgedrukt op een schaal van nul (slechte bodemkwaliteit) tot tien (goede bodemkwaliteit). Dit geeft een score voor elke bodemfunctie. Als het cijfer lager is dan een 5 dan is er sprake van een serieus knelpunt. Een cijfer rond de 7 geeft aan dat er

aandacht nodig is om de bodemfunctie te verbeteren. Als er in dit rapport wordt gesproken over (bodemkwaliteit)scores dan betreft het dus deze “distance to target” waarbij een rapportcijfer 10 aangeeft dan de bodemkwaliteit optimaal is voor het te bereiken doel.

De gebruikte streefwaarden worden uitgewerkt in het volgende hoofdstuk per ecosysteemdienst. Hierbij is het belangrijk om vooraf op te merken dat de streefwaarden voor een goede bodemkwaliteit in relatie tot primaire productie goed zijn onderbouwd, en in de afgelopen jaren zijn getoetst en geëvalueerd voor alle grote grondsoort-teelt combinaties in Nederland (Ros et al., 2022). Vanuit de systematiek van het BedrijfsBodemWaterPlan zijn de streefwaarden voor waterregulatie en zelfreinigend vermogen in de praktijk getoetst en geëvalueerd (Ros et al., 2019; Thijssen et al., 2020). De bodemfuncties in relatie tot de andere ecosysteemdiensten zijn wel inhoudelijk onderbouwd op basis van bestaande kennis, maar de gebruikte streefwaarden zijn niet in de praktijk beproefd.

De bodemfuncties die in deze studie zijn geanalyseerd in relatie tot de vier eerder genoemde ecosysteemdiensten (Tabel 2-1). De bodemfuncties voor de ecosysteemdienst ‘bodembiodiversiteit en habitatvoorziening’ zijn niet geanalyseerd omdat de benodigde invoergegevens ontbraken. De bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie worden onderverdeeld in drie categorieën: i) bodemchemie en nutriënten, ii) bodemstructuur en beworteling dan wel beschikbaarheid van water, en iii) bodembiologie en ziekteverendheid. Elke bodemfunctie werd eerst beoordeeld met een score tussen 0 en 10. Vervolgens, voor elke ecosysteemdiensten afzonderlijk, werden de scores van de bodemfuncties samengevoegd tot een geïntegreerde eindscore volgens de OBI-systematiek (Ros et al., 2021), ook variërend tussen 0 en 10. Alleen voor de ecosysteemdienst primaire productie werden de scores van de bodemfuncties eerst samengevoegd tot drie subscores van chemische, fysische en biologische functies, en vervolgens samengevoegd tot een eindscore. Voor de exacte aggregatie-methode wordt verwezen naar de publicatie van Ros et al. (2022).

De scores worden gepresenteerd als ruimtelijke kaarten om zo ruimtelijk expliciet inzicht te geven of er gebieden zijn die onder, binnen of boven de streefwaardes vallen.

Tabel 2-1. Overzicht van beoordeelde bodemfuncties voor vier ecosysteemdiensten (ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop) conform de systematiek van BLN 2.0.

ESD1	ESD2	ESD3	ESD4
pH-buffering ^C	N buffering GW	C vastlegging potentie	NUE
N-leverend vermogen ^C	N buffering OW	C verzadigingsgraad	N kringloop
P-buffering ^C	P buffering OW	EOS balans	P kringloop
K-buffering ^C	Waterbuffering		K kringloop
Mg-buffering ^C	Grondwateraanvulling		
S-leverend vermogen ^C	N uitspoelingsrisico		
Verslemping ^F	N afspoelingsrisico		
Verstuivingsrisico ^F	Pesticide water		
Aggregaat stabiliteit ^F	N retentie GW		
Verkruimelbaarheid ^F	N retentie OW		
Ondergrondverdichting ^F			
Watervasthoudend vermogen ^F			
Droogteschade ^F			
Natschade ^F			
Bewerkbaarheid ^F			
Microbiële activiteit ^B			
Ziekteverendheid ^B			

C: chemische bodemfunctie; F: fysische bodemfunctie; B: biologische bodemfunctie

2.2 Koolstofvastlegging

2.2.1 Inleiding

In het kader van het Nationaal Programma Landelijk Gebied (NPLG) is de provincie Gelderland gevraagd een gebiedsprogramma aan te leveren. Het doel van het NPLG is het samenbrengen van de belangen van de boeren, natuur, water en klimaat met het oog op een vitaal platteland. Het NPLG stuurt daarbij om een integrale aanpak om beleidsmatige doelen voor natuurkwaliteit, waterkwaliteit en klimaat te realiseren. Een onderdeel hiervan is het behalen van klimaatdoelen. Ter ondersteuning hiervan is door Slier et al. (2023) een landelijke analyse uitgevoerd naar de provinciale potentie voor koolstof-vastlegging in minerale landbouwbodems. Hiervoor is gebruik gemaakt van het model MITERRA-NL dat voor de koolstofberekeningen gebruik maakt van het RothC-model. Hierbij is bepaald wat de realistische potentiële CO₂-vastlegging is en in welke mate maatregelen (zoals aanpassen gewasrotatie, extra vaste mest, compost en akkerranden) daar aan bijdragen. In Gelderland kan er in potentie totaal 93,4 kton CO₂ per jaar worden vastgelegd in minerale landbouwbodems, waarvan 40,8 kton CO₂ per jaar op zandgrond en 52,6 kton CO₂ per jaar op kleigrond (Herbert et al., 2023). Dit is met een implementatie graad van 75% van de meest effectieve maatregelen, zoals extra vaste mest, hoger aandeel blijvend grasland, leeftijd van grasland verhogen en groenbemesters.

Vanwege het grote areaal gras- en maïsland dat gebruikt wordt voor de melkveehouderij zijn in Gelderland de meest effectieve maatregelen om koolstof vast te leggen: het verhogen van het aandeel blijvend grasland, het verhogen van de gemiddelde grasland leeftijd en het toevoegen van extra vaste mest (Herbert et al., 2023). In het vervolg van deze studie zal dit verder worden gedifferentieerd en onderbouwd. Op de zandgronden van Gelderland is het belangrijk om de waterregulatie en -zuivering te verbeteren. Het stimuleren van blijvend grasland kan ten opzichte van tijdelijke gewassen het risico op nitraatuitspoeling verkleinen. Ook kan worden ingezet op het vergroten van het areaal kruidenrijk grasland, de inzet van groenbemesters en de inzet van extra (vaste) mest. Bij het toedienen van (vaste) mest is het belangrijk het tijdstip en de dosering af te stemmen of de behoefte vanuit het gewas om uitspoeling van stikstof te voorkomen.

De hoeveelheid en kwaliteit van de organische stof in de bodem hangt samen met het landgebruik, de bemestingspraktijk, het bodemtype en de manier waarop bodems worden bewerkt. Er zijn in principe twee manieren om meer koolstof op te slaan in de bodem. Allereerst kan de jaarlijkse aanvoer van koolstof worden verhoogd. Dit kan door het telen van groenbemesters en gewassen met veel gewasresten (zowel ondergronds als bovengronds), of aanvoer van (stabiele) organische meststoffen die veel koolstof nalaten in de bodem. Een ton compost zorgt bijvoorbeeld voor een sterkere verhoging dan een ton varkensdrijfmest omdat er meer koolstof zit in de ton compost en de koolstof in de compost moeilijker wordt afgebroken. Een tweede manier is het verminderen van de afbraak van organische stof. Dit kan bijvoorbeeld door grasland niet te scheuren of abiotische factoren te veranderen die de afbraak beïnvloeden, zoals de pH en vochtgehalte. In beide gevallen is de uitgangssituatie belangrijk: bodems met een hoog OS-gehalte breken jaarlijks meer af, waardoor er ook meer moet worden aangevoerd om het gehalte op peil te houden dan wel te laten stijgen.

Bodems gaan naar een nieuw evenwicht in organisch stofgehalte toe zodra het landgebruik of de bemestingspraktijk verandert. Om de potentiële impact van dergelijke veranderingen op het organische stofgehalte te evalueren, kan voor elk perceel inzicht worden gegeven in de maximale koolstofvoorraad die te realiseren is door aanpassingen van het landbouwkundig gebruik. Om hier meer inzicht te geven, wordt gebruik gemaakt van twee methoden: een empirische als ook een mechanistische methode (conform de aanpak van BLN 2.0, Ros et al., 2023), waarbij beide gebruik maken van modellen.

- De mechanistische aanpak (zie 2.2.2): op basis van de variatie in bodemkwaliteit en de gemiddelde bemestingspraktijk per groep van gewassen, kan via het koolstofmodel RothC

(Coleman and Jenkinson, 1996) in kaart worden gebracht hoe de huidige OS-gehalten zich ontwikkelen voor verschillende scenario's. Via het model kan in beeld worden gebracht wat de potentiële stijging is in het OS-gehalte als agrarische ondernemers een onderdeel van hun bouwplan dan wel hun bodembeheer of bemesting wijzigen. Dit levert hiermee een beeld op van de reële mogelijkheden die er zijn om extra koolstof vast te leggen.

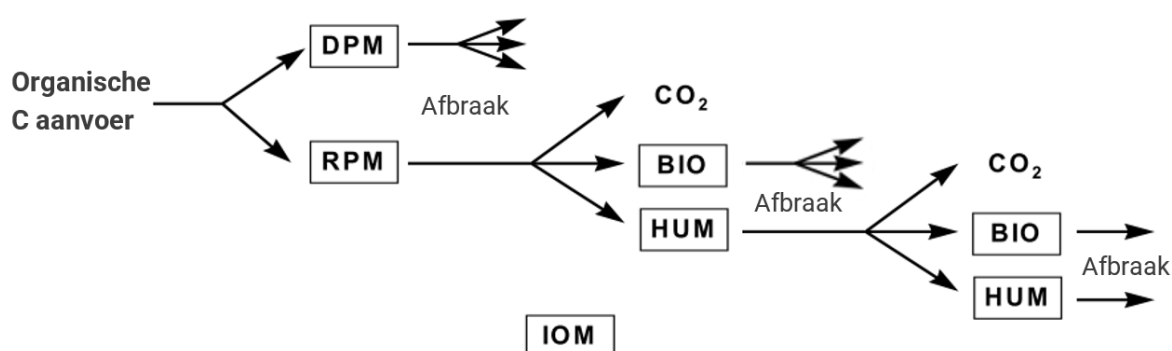
- De empirische aanpak (zie 2.2.3): op basis van de landelijke dataset van bodem- en perceelseigenschappen (NABA) kunnen statistische modellen worden ingezet om inzicht te krijgen in het maximale OS-gehalte dat te realiseren is door veranderingen in bouwplan en bemestingspraktijk. Het NMI heeft deze aanpak eerder toegepast om zo ruimtelijk expliciet de potentiële koolstofvoorraad te berekenen (Ros et al., 2023b) en op basis daarvan de mate van koolstofverzadiging vast te stellen. Dit levert een beeld op van de potentiële C-vastlegging in een bodem op lange termijn, rekening houdend met de interacties tussen bodemtextuur (klei, zand, silt), pH, organische stof, landgebruik en grondwaterstanden.

Beide methoden hebben hun voor- en nadelen waarbij de empirische methodiek heel sterk aansluit bij bestaande metingen in de praktijk (maar geen uitspraak doet over de benodigde periode of maatregelen om een verhoging te realiseren), en waarbij de mechanistische aanpak in staat is om robuust uitspraken te geven van veranderingen in de toekomst (maar minder goed in staat is om variatie op perceelsniveau betrouwbaar te simuleren), en dus complementair. Beide methodes zullen door ons worden toegepast op de agrarische percelen in provincie Gelderland. De aanpak van de twee modellen wordt hieronder nader toegelicht. Een gedetailleerde discussie over de voor- en nadelen van beide aanpakken wordt gegeven in Ros et al. (2023a).

2.2.2 Mogelijkheden voor C-vastlegging via mechanistische modellering

RothC model

Het Rothamsted koolstofmodel (RothC 26.3) is een beproefd model dat geschikt is voor toepassing wereldwijd en in Nederland (Lesschen et al., 2021). Een uitgebreide beschrijving van het model is te vinden in Coleman en Jenkinson (1996) en wordt hieronder kort beschreven. Het NMI maakt voor simulaties met RothC gebruik van een eigen implementatie van het model via de R-package 'carboncastr'.



RPM : Afbreekbaar plantmateriaal

DPM : Resistent plantmateriaal

BIO : Microbiële biomassa

HUM : Humus

IOM : Inerte organische stof

Figuur 2-2. Structuur van het RothC model (Coleman & Jenkinson, 1996).

RothC maakt gebruik van vijf organische koolstof pools (Figuur 2-2). Eén van deze pools, de inerte organische stof (IOM) pool, staat vast, hier breekt geen organische stof in af. De IOM pool kan worden bepaald aan de hand van het ^{14}C -gehalte. Wanneer het ^{14}C -gehalte niet bekend is, kan de IOM-pool worden geschat op basis van het gehalte aan organische koolstof in de bodem, met de berekening ontwikkeld door Falloon et al. (1998). De andere vier C-pools zijn actief en bestaan uit afbreekbaar plantmateriaal (DPM), resistent plantmateriaal (RPM), microbiële biomassa (BIO) en humus (HUM). Elke actieve pool heeft zijn eigen eerste-orde afbraaksnelheid, die wordt gecombineerd met correctiefactoren voor temperatuur, bodemvocht, bodembedekking en kleigehalte. Het effect van pH of koolzure kalk wordt binnen RothC niet verdisconteerd. Een overzicht van de structuur van het RothC-model is weergegeven in Figuur 2.1. Zoals in de figuur is te zien, wordt aangenomen dat organische stof (via gewasresten of dierlijke mest of compost) de bodem binnenkomt via de DPM- en RPM-pools. Bij afbraak van deze pools komt een fractie van de C in die pool vrij in de atmosfeer in de vorm van CO_2 en een fractie wordt verplaatst naar de BIO- en HUM-pool. Afbraak van de BIO- en HUM-pool zorgt vervolgens voor extra CO_2 -productie en een herverdeling van koolstof over de BIO- en HUM-pool. Bij toediening van dierlijke mest gaat ook een fractie van de organische koolstof (2%) rechtstreeks naar de HUM-pool.

Voor de verdeling van de aangevoerde organische stof over de DPM- en RPM-pools kan gebruik worden gemaakt van de humificatiecoëfficiënt (Bodemkundige Dienst België & Universiteit Gent, 2010). De gebruikte humificatiecoëfficiënten en organische stofgehaltes van de gebruikte gewassen en mestsoorten zijn afkomstig uit het Handboek Bodem en Bemesting (CBAV, 2023). In de berekeningen is ervan uitgegaan dat de fractie koolstof in het organische materiaal gelijk is aan 50%.

Scenario's voor koolstofvastlegging

Elk perceel heeft zijn eigen bodemeigenschappen en vruchtwisseling. Opvolgend op de eerdere studies van Lesschen et al. (2021) en Herbert et al. (2023) waarbij het effect van allerlei bodemmaatregelen om het organische stofgehalte te verhogen zijn doorberekend, zijn ook in deze studie zeven (hypothetische) scenario's berekend voor elk perceel. Deze scenario's zijn opgesteld om inzicht te krijgen in de mate waarin het organische stofgehalte kan worden verhoogd via managementmaatregelen. De scenario's zijn:

- **Scenario 'Huidig' (BAU)** voor het huidige bouwplan (de gewasvolgorde uit het BRP voor de periode van 10 jaar, waarbij deze volgorde vijf keer wordt herhaald): typische gewasrotatie en bemestingspraktijk die gemiddeld in de praktijk voorkomt. Hierbij wordt de fosfaatruijnte volledig opgevuld met rundveedrijfmest conform de huidige fosfaatgebruiksnormen, waarbij alle percelen een neutrale fosfaattoestand hebben. Uitzondering hierop zijn percelen met uien, wortels, witlof, graszaad en suikerbieten. Bij deze teelten wordt aangenomen dat het gewas alleen wordt bemest met kunstmest. De aanname is dat op alle percelen met aardappelen of maïs een groenbemester wordt ingezaaid rond eind oktober conform een goede landbouwpraktijk. Voor alle andere gewassen wordt aangenomen dat er geen groenbemester is ingezaaid. In dit scenario wordt stro afgevoerd en niet ondergewerkt.
- **Scenario 'Landgebruiksverandering maximaal' (POT)** betreft een *hypothetisch* bouwplan dat relatief veel potentie heeft voor C-vastlegging in vergelijking met het huidige bouwplan. Hierbij wordt op bouwland alleen gebruik gemaakt van granen (inclusief onderwerken van gewasresten) en grasland wordt volledig omgezet in permanent grasland. De volledige fosfaatruijnte wordt opgevuld met rundveedrijfmest.
- **Scenario 'Verruiming bouwplan' (S1)** betreft maatregelen waarbij de leeftijd van grasland wordt verhoogd (tot 75% van het bouwplan) en op bouwland meer granen worden geteeld (tot 40% van het bouwplan). Daarnaast wordt na maïs en aardappelen een groenbemester

gezaaid in oktober en wordt al het geoogste stro (en gewasresten) ondergewerkt na de oogst. De bemesting is conform de praktijk in scenario huidig.

- **Scenario 'Bemesting' (S2, S3)** betreft maatregelen waarbij 10% van de fosfaatgebruiksruimte wordt ingevuld met vaste mest (en het resterende deel met rundveedrijfmest, S2) of dat 5% van de fosfaatgebruiksruimte wordt opgevuld met groencompost (waarbij de fosfaat in de compost maar voor de helft meetelt, S3). Het bouwplan is gelijk aan het scenario huidig.
- **Scenario 'Groenbemester' (S4)** volgt de huidige praktijk waarbij na alle bouwlandgewassen een vanggewas of groenbemester wordt gezaaid in oktober. Voor maïs en aardappel wordt aangenomen dat het hoofdgewas op tijd wordt geoogst, en er in september al een groenbemester gezaaid kan worden. De mestpraktijk is gelijk aan het scenario huidig.
- **Scenario 'Stro onderwerken' (S5)**. Dit scenario volgt de huidige praktijk waarbij het geoogste stro en gewasresten worden ondergewerkt.
- **Scenario 'Combinatie' (ALL, S6)** bevat een combinatie van alle hierboven genoemde maatregelen (S1, S2, S3, S4 en S5) waarbij het huidig bouwplan wordt verruimd, er compost wordt ingezet, er maximaal groenbemesters worden ingezet en alle gewasresten en stro worden ondergewerkt.

Voor alle scenario's is aangenomen dat door de extra aandacht voor goed bodembeheer de gewasopbrengst met 5% hoger ligt dan de huidige situatie. Dit conform de eerdere aannames in de modelstudie voor Noord-Nederland (de Vries et al., 2018) als ook de integrale milieusysteemanalyse zoals deze is uitgevoerd voor heel Nederland (de Vries et al., 2023). Deze verhoging wordt voor een deel gerealiseerd door gewasveredeling maar ook door de toenemende aandacht voor een goede bodemkwaliteit binnen de bedrijfsadvisering dan wel door duurzaamheids-labels die gebruikt worden in de sector. Aanname is dat alle bouwlandpercelen op een conventionele manier worden geploegd (tot 30 cm diepte).

Voor de aanvoer van dierlijke mest en compost is uitgegaan van een neutrale P-klasse omdat dit de bodemtoestand is wanneer voor de komende 50 jaar de bemestingspraktijk wordt uitgevoerd conform de *huidige* mestwetgeving. Bovendien is uitgegaan van een bemestingspraktijk (meststofkeuze, hoeveelheid en timing) zoals die in de huidige landbouwpraktijk wordt vormgegeven. Bij het invullen van de gebruiksruimte voor fosfaat is uitgegaan van het bodemgericht advies op bouwplanniveau. Echter, in werkelijkheid verschillen de bemestingsregimes sterk tussen percelen.

Modelsimulatie

Bij een simulatie met RothC moet het model eerst zijn geïnitieerd om de verdeling van C over alle koolstofpools te kunnen bepalen voor het gekozen scenario. De verdeling over de pools is immers afhankelijk van het beheer. Voor elk perceel in provincie Gelderland is deze initialisatie uitgevoerd voor het scenario 'Huidig', omdat dit de uitgangssituatie is. Hiervoor is de initiële poolverdeling (d.w.z., de grootte van de DPM, RPM, BIO en HUM pools) eerst berekend op basis van de aangevoerde OS uit het bouwplan en de bemesting (een analytische berekening) en vervolgens is het model voor 20 jaar gedraaid, de zogenaamde spin-up simulatie, om de initiële poolverdeling in een evenwichtssituatie vast te stellen (Peralta et al., 2022).

Na deze spin-up periode kan het effect van maatregelen in beeld worden gebracht. Om een goed beeld te krijgen van het effect van verandering in landbouwkundig beheer op het OS-gehalte, zijn de scenario's voor 50 jaar doorgerekend. De input van de meteorologische data zijn gebaseerd op de langjarige gemiddeldes van het KNMI in de Bilt voor de periode 1991-2020. Voor OS aanvoer uit groenbemesters is uitgegaan van een gemiddelde aanvoer van 900 kg effectieve OS per hectare per jaar. Deze gemiddelde aanvoer is berekend op basis van de kengetallen voor OS aanvoer vanuit verschillende groenbemesters uit het Handboek Bodem en Bemesting (CBAV, 2023).

Voor het bepalen van de startsituatie van het organische stof- en kleigehalte is gebruik gemaakt van de bodemanalyses per perceel zoals deze verzameld zijn in NABA.

De gesimuleerde OS-gehalte onder verschillende scenario's kan per gebied, landgebruik en grondsoort worden gevisualiseerd over een periode van 50 jaar. Voor de huidige studie ligt de focus op de potentiële verhoging zoals deze na 50 jaar is te realiseren via verandering van bodembeheer, gewasbeheer en bemesting. Verandering in het OS-gehalte is uitgedrukt als absolute verandering in OS (%): d.w.z. een verandering van 3% naar 3,5% is 0,5%.

2.2.3 Potentiële koolstofverzadiging via empirische modellen

Om de potentiële koolstofverzadiging op landbouwpercelen in kaart te brengen, werd een statistisch model (Ros et al., 2023b) gebruikt dat gebruik maakt van *machine learning algoritmes* om relaties tussen de C-voorraad en perceelseigenschappen vast te stellen. Voor dit model is gebruik gemaakt van een landelijke dataset van agrarische percelen waarbij informatie beschikbaar was over de hoeveelheid koolstof in de bodem, bodemeigenschappen die de mate van koolstofvastlegging beïnvloeden, het landgebruik en (geo)hydrologische kenmerken (n = 21.123 gemeten tussen 2015 - 2021). Concreet gaat het om het gehalte klei, zand, silt, aluminiumoxide, ijzeroxide, fosfaat (via CaCl_2 , ammoniumlactaat en oxalaat), pH, grondsoort, landgebruik en gemiddelde hoogste en laagste grondwaterstand. Het model is na kalibratie en validatie in staat om de ruimtelijke verdeling van bodem organische koolstof te voorspellen op basis van bodem- en perceelseigenschappen.

Met het statistische model kan ook de maximale opslag van koolstof in een bodem worden berekend als gevolg van verandering in bodemeigenschappen. Hiervoor is allereerst onderzocht welke bodem- en perceelseigenschappen een grote invloed hebben op het OS-gehalte, waarna via een statistische analyse van onderliggende verbanden (via *Acumulated Local Effect Plots* en *Variable Importance*) voor deze eigenschappen scenario's zijn doorgerekend waarmee extra koolstof kan worden vastgelegd. Concreet gaat het hierbij om veranderingen in landgebruik (permanent graan op bouwland en permanent grasland op grasland percelen), de pH van de bodem (als effect van verzuring en bekalking), de fosfaatvoorraad (als effect van bemesting), en de beschikbaarheid van water (als effect van de diepte van de grondwaterstand). Concreet zijn de volgende wijzigingen van bodemparameters doorgerekend: de bodem-pH kan dalen of stijgen met één pH-eenheid, de hoeveelheid fosfaat kan dalen of stijgen met maximaal 30 PAL-eenheden, en de gemiddeld laagste grondwaterstand kan dalen of stijgen met maximaal 30 cm. Op basis van deze wijzigingen kan de potentiële hoogste koolstofopslag worden vastgesteld per perceel (hierna de maximale C-voorraad genoemd). Vervolgens wordt de C-verzadiging voor elk perceel berekend door de huidige C-voorraad te delen door de maximale C-voorraad als gevolg van de hierboven genoemde (aangepaste) landgebruik en bodemeigenschappen.

3 Bodemkwaliteit in Gelderland

3.1 Streefwaardes voor goede bodemkwaliteit

Om te komen tot een integrale beoordeling van bodemkwaliteit zijn verschillende stappen nodig. In de aanpak van BLN 1.0 en 1.1 was dit veelal een bottom-up aanpak, waarbij het startpunt de set aan metingen van bodemeigenschappen was. Echter, er is vaak geen directe relatie tussen bodemeigenschap en ecosysteemdienst (Rinot et al., 2019; Ros et al., 2022). In de aanpak van de BLN 2.0 wordt juist daarom een top-down aanpak gebruikt, opvolgend op de methodiek van de Open Bodemindex (Ros et al., 2023). Het startpunt hier zijn gestelde doelen, die gerelateerd kunnen worden aan de ecosysteemdiensten die de bodem levert. Dit contrasteert met de statistische bottom-up aanpak die in veel studies wordt gebruikt waarbij data wordt geanalyseerd om streefwaardes te ontwikkelen op basis van de variatie die voorkomt binnen het landschap (Rinot et al., 2019).

Bodemfuncties worden gebruikt om de bodemkwaliteit te beoordelen. Bodemfuncties zijn hierbij gedefinieerd als *‘een kwantitatieve of logische reken- of beslisregel waarmee een bodemproces of een combinatie van processen die ten grondslag ligt aan de functies die de bodem levert ten behoeve van de ecosysteemdiensten in beeld wordt gebracht’*. Zo zijn stikstoflevering, bewortelbaarheid en ziekteverendheid bodemfuncties voor het realiseren van de ecosysteemdienst ‘primaire productie’. In sommige gevallen kan een enkele bodemeigenschap ook dienen als bodemfunctie. In een geaggregeerde bodemfunctie worden een aantal bodemfuncties samengenomen om tot een deelbeoordeling van een ecosysteemdienst te komen op een specifiek deelgebied. Bodemfuncties worden berekend via (eenvoudige) rekenregels met behulp van de bodemmetingen en/of overige informatie uit historische bronnen, managementinformatie en data uit openbare bronnen zoals weerdata en bodemkaarten. Voor de ecosysteemdienst primaire productie zijn verschillende chemische, fysische en biologische functies geïdentificeerd. De indeling in chemische, fysische en biologische functies is discutabel maar ook breder gebruikt en refereert aan nutriëntenvoorziening (chemisch), structuur, beworteling en beschikbaarheid dan wel overlast van water (fysisch) en bodembiodiversiteit en ziektevering (biologisch). Voor al deze functies zijn rekenregels ontwikkeld waarbij ook streefwaarden zijn vastgesteld voor een optimale situatie (Ros et al., 2022). Voor een uitgebreide toelichting op alle bodemfuncties en bijbehorende streefwaarden, verwijzen we graag naar de publicatie van BLN 2.0 (Ros et al., 2023) en naar de meer specifieke uitwerking in secties 3.1.1 tot 3.1.5.

Een streefwaarde is de waarde voor een indicator waarboven en/of waaronder een bodemfunctie voldoende bijdraagt aan één ecosysteemdienst. In andere woorden, de streefwaarde is een minimumwaarde, een maximumwaarde, of een range waarbinnen de waarde van de bodemfunctie moet vallen om als goed beoordeeld te worden. Bij afwezigheid van streefwaarden zijn drempel- of referentiewaarden gebruikt. Drempelwaarde is een minimum- of maximumwaarde waar de indicator in ieder geval boven of onder moet blijven. Referentiewaarde is de vastgestelde waarde of bereik waarmee een indicator kan worden vergeleken, zonder oordeelsvorming in termen van goed of slecht. Bij voorkeur wordt een referentiebereik vastgesteld uit de 5% en 95% percentielen van een groot aantal bepalingen van de bodemfunctie.

3.1.1 Streefwaardes voor primaire productie

De ecosysteemdienst primaire productie is gedefinieerd als de capaciteit van een bodem om plantbiomassa te produceren voor humaan gebruik, en daarmee het leveren van voedsel, (dier)voer, vezels en brandstof binnen de grenzen van het natuurlijke of beheerde ecosysteem. Er wordt hierbij een opsplitsing gemaakt in de chemische, fysische en biologische bodemfuncties vanwege het grote aantal bodemfuncties binnen deze ecosysteemdienst en de relatie met het beoogde inzicht en handelingsperspectief. De streefwaardes voor de landbouwkundige bodemkwaliteit zijn hieronder weergegeven voor chemische (Tabel 3-1), fysische (Tabel 3-2), en biologische functies (Tabel 3-3). Voor een uitgebreidere uitleg van de streefwaardes van elke functie, zie Ros et al. (2023).

Voor de chemische bodemfuncties zijn de meest streefwaardes gebaseerd op veldproeven. Deze streef- en referentiewaarden worden ook gebruikt in de bemestingsadviezen voor akkerbouw en grasland (CBGV, 2023; CBAV, 2023). De waardes voor het stikstofleverend vermogen (NLV) en het zwavelleverend vermogen (SLV) zijn referentiewaarden. Voor deze bodemfuncties is geen onderbouwde relatie met de gewasopbrengst en kwaliteit, maar ze zijn wel dermate belangrijk dat ze zijn opgenomen in de huidige studie.

Er zijn vrijwel geen streefwaarden voor fysische bodemfuncties beschikbaar. In de meeste gevallen gaat het om drempelwaarden die zijn onderbouwd op basis van gegevens van meerjarige veldproeven. Een aantal andere zijn afgeleid van veldobservaties (o.a. verslemping en verkruijmelbaarheid) gecombineerd met expertkennis en literatuurgegevens (o.a. watervasthoudend vermogen, waterbuffering), en in sommige situaties ook in combinatie met modelberekeningen (verdichting ondergrond, opbrengst-schade door te droge of natte omstandigheden).

Biologische bodemfuncties zijn het minst robuust onderbouwd qua streefwaarden. Voor de plantparasitaire aaltjes zijn overigens wel streefwaarden beschikbaar gebaseerd op vele veldproeven, maar door het ontbreken van specifieke bodemdata voor provincie Gelderland, en het feit dat het grootste areaal wordt gebruikt voor gras en maïs, worden deze hier niet verder concreet uitgewerkt. De streefwaarde voor ziekteveredeling op basis van organische stof is een ruwe expertinschatting. De referentiewaarde voor PMN is gebaseerd op gegevens en inzichten uit het BoBI-netwerk van het RIVM.

Tabel 3-1. Streefwaarden van het BLN voor de **chemische functies** t.b.v. de landbouwkundige productiefunctie.

Bodemfunctie	Bodemeigenschappen	Streefwaarde (S) of referentiewaarde (R)	Differentiatie	Bron
pH-buffering	pH, OS%, klei	S: Zie tabellen HBB/ABGV	Landgebruik, Grondsoort	1, 2
N-leverend vermogen	N-totaal, OS%, C/N-verhouding	R: NLV van 100 kg N ha ⁻¹ voor bouwland en 140 kg N ha ⁻¹ voor grasland, op basis van veel voorkomende NLV	Landgebruik, grondsoort	1
P-buffering	P-CaCl ₂ , P-Al, P-water	S: P-index (PBI) van 4 (gras en maïs), P-water van rond 30 (bouwland).	Landgebruik, grondsoort	1,2
K-buffering	K-CaCl ₂ , K-CEC, CEC, klei, OS%, pH	S: K-index (KBI) van 2,5 (grasland) en 25 (akkerbouw)	Landgebruik, grondsoort	1, 3
Mg-buffering	Mg-CaCl ₂ , pH, OS%, lutum%, CEC, K-CEC	S: Mg-index van 45 – 132 op basis van veldproeven	Landgebruik, grondsoort	1, 2, 4
S-leverend vermogen	S-totaal, OS%, lutum%	R: SLV van 20 – 23 kg S ha ⁻¹ op basis van veldproeven of delta SLV t.o.v. veel voorkomende SLV	Landgebruik, grondsoort	1, 2

HBB = Handboek Bodem en Bemesting, ABGV = adviesbasis bemesting grasland en voedergrassen

Bronnen: 1: CBGV 2022, 2: CBAV 2022, 3: van Schöll et al., 2019, 4: Ros et al., 2019. Zie Ros et al. 2023 voor de volledige referentie.

Van de 12 indicatoren voor de fysische bodemkwaliteit uit de BLN zijn voor deze studie slechts 9 indicatoren meegenomen. Dit in verband met de beschikbaarheid van bodemgegevens in NABA. Omdat de droge bulkdichtheid niet bekend is evenals de indringingsweerstand, zijn deze twee indicatoren in relatie tot de bewortelbaarheid niet meegenomen. Wel wordt gebruik gemaakt van de indicatoren verdichtingsrisico en verslemping, twee indicatoren die ook informatie geven over de bewortelbaarheid.

Tabel 3-2. Streefwaarden van het BLN voor de **fysische functies** t.b.v. de landbouwkundige productiefunctie.

Bodemfunctie	Eigenschappen	Streefwaarde (S), drempelwaarde (D) of referentiewaarde [®]	Differentiatie	Bron
Watervasthoudend vermogen	Textuur, OS% (indirect), WHC (direct)	D: 200 mm water in 0-30 cm bouwvoor, afgeleid van expertschatting.	Grondsoort	1, 2
Waterbuffering	Textuur, OS%	D: 100 mm plant beschikbaar water (PAW) in 0-30 cm bouwvoor, afgeleid van expertschatting.	Grondsoort	1, 2
Droogteschade	Textuur	D: Opbrengstschade door droogte < 5%, afgeleid van metingen en modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort, grondwatertrap	3, 4
Natschade	Textuur	D: Opbrengstschade door natheid < 5%, afgeleid van metingen en modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort, grondwatertrap	3, 4
CEC-bezetting (%) / aggregaatstabiliteit	CEC, K-CEC, Ca-CEC, Mg-CEC	D: Afwijking van optimale CEC-bezetting (%) op basis van literatuur	Grondsoort	5, 6
Verkruijmelbaarheid	Lutum%, OS%, pH	D: Verkruijmelbaarheid index van 10, afgeleid van veldobservaties	Landgebruik	7, 8
Stuifgevoeligheid	Lutum%, silt%	D: Risico op verstuiving van de top laag < 1, afgeleid van proeven en praktijkgegevens	Landgebruik	9, 10
Bewerkbaarheid	Lutum%, silt%	D: Fractie bewerkbare dagen in groeiseizoen op basis van het verwachte vochtgehalte = 1, afgeleid van veldproeven	Landgebruik, grondsoort, grondwatertrap	11, 12
Verdichtingsrisico	Verdichtingsrisico	D: Classificatie op basis van draagkracht bodem, afgeleid van metingen en modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort	13, 14
Verslemping	Lutum%, OS%	D: Opbrengstschade is <1% afgeleid van veldproeven	Landgebruik	15, 16

Bronnen: 1: Ros et al 2019, 2: Moebius-Clune et al 2016, 3: Van Schöll et al., 2021, 4: Van Bakel et al., 2005, 5: Eurofins, 2019, 6: Bussink et al., 2012, 7: Locher en Bakker, 1992, 8: Huinink, 2011, 9: Van Kerckhoven et al., 2009, 10: Ros et al 2019, 11: Huinink, 2018, 12: Riechelman, 2021, 13: Van den Akker et al. 2012, 14: Ros et al. 2019, 15: Huinink, 2018, 16: van Schöll et al., 2019. . Zie Ros et al. 2023 voor de volledige referentie.

Tabel 3-3. Streefwaarden van het BLN voor de **biologische functies** voor de landbouwkundige productiefunctie.

Bodemfunctie	Eigenschappen	Streefwaarde (S), drempelwaarde (D) of referentiewaarde (R)	Differentiatie	Bron
Plantparasitaire aaltjes	Aantallen plantparasitaire aaltjes per soort	S: Waarde < drempel per aaltjessoort, afgeleid van veldproeven	Landgebruik, grondsoort	1
Ziektewerendheid	OS%	D: 5% OS, afgeleid van expertschatting	-	2
Potentieel mineraliseerbare stikstof	PMN	R: 40 mg N kg ⁻¹ op basis van veel voorkomende PMN	Landgebruik, grondsoort	3, 4

Bronnen: 1: Aaljeschema.nl, 2: Hanegraaf et al., 2013, 3: Van Schöll et al., 2019, 4: ; Moebius-Clune et al., 2016. Zie Ros et al. 2023 voor de volledige referentie.

De streefwaardes verschillen afhankelijk van de specifieke omstandigheden van het perceel en zijn dus niet een constante waarde voor alle percelen. Bijvoorbeeld, de streefwaardes voor de pH-waarde van de bodem hangt af van landgebruik, grondsoort en OS gehalte. Voor andere bodemfuncties wordt de streefwaardes gedefinieerd in termen van indexwaarde, die wordt berekend uit meerdere parameters, zoals de beschikbaarheidsindex van P (PBI), K (KBI) en Mg (Mg-index). Voor deze functies kunnen de streefwaardes constant zijn over percelen, maar de manier waarop de index wordt berekend hangt af van verschillende parameters zoals bodemtype en gewastype.

3.1.2 Streefwaardes voor waterregulatie en zelfreinigend vermogen

De ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen is gedefinieerd als de capaciteit van de bodem om water te ontvangen, opslaan en geleiden voor later gebruik (en daarmee voorkomen van droogte, oeverstroming en erosie) en om schadelijke stoffen uit het water te verwijderen. Hierbij wordt in BLN 2.0 een opsplitsing gemaakt in relatie tot grondwater en oppervlaktewater.

Vanuit het perspectief van de kwaliteit van grondwater en grondwateraanvulling (Geurts et al., 2021a), wordt een goede bodemkwaliteit bepaald door een hoog zelfreinigend vermogen (maximale afbraak van ongewenste stoffen), een hoge infiltratiecapaciteit (minimale afstroming van regenwater naar het oppervlaktewater en daarmee maximale grondwateraanvulling) en een goed vochtvasthoudend- en vochtleverend vermogen (minimale afhankelijkheid van irrigatie uit grond- en oppervlaktewater en maximale robuustheid tegen droogte). Deze eigenschappen worden bepaald door het samenspel van fysische, chemische en biologische processen die gedurende de bodemvorming zijn opgetreden.

Om bodems expliciet te waarderen met betrekking tot de kwantiteit en kwaliteit van het grondwater, en daarmee de grondstof voor drinkwater, stellen Geurts et al. (2021a) voor om bodemfuncties, en bijbehorende indicatoren, te ontwikkelen voor i) grondwateraanvulling, ii) stikstofefficiëntie, en iii) risico op uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen, naast de al bestaande bodemfunctie voor nitraatuitspoeling (Ros, 2019a). Let op, de beschikbaarheid van water is al verdisconteerd in de fysische functies voor de ecosysteemdienst primaire productie.

De kwaliteit van het oppervlaktewater is op veel locaties binnen Nederland nog niet op orde. De emissie van nutriënten vanuit de bodem naar het oppervlaktewater is daarbij één van de grote knelpunten, naast een goed beheer van perceelranden en sloten. Op basis van openbare data, en beschikbare gegevens vanuit agrarische laboratoria is het mogelijk om de relatieve bijdrage van percelen aan de belasting van het watersysteem met nutriënten te kwantificeren. Gezien de complexiteit van het gedrag van stikstof en fosfor in en het transport door de bodem, is het anno 2022 nog niet mogelijk om voor elk perceel de daadwerkelijke bijdrage aan de belasting van het oppervlaktewater te kwantificeren. Voor BLN 2.0 is gekozen voor het gebruik van bodemfuncties die het risico in beeld brengen dat er nutriënten naar het oppervlaktewater wegspoelen, functies zoals deze zijn geïmplementeerd in de landelijke BBWP-systematiek (Ros et al., 2019).

Tabel 3-4. Streefwaarden van het BLN 2.0 i.r.t. waterregulatie en zelfreinigend vermogen voor grondwater.

Bodemfunctie	Eigenschappen	Streefwaarde (S), drempelwaarde (D) of referentiewaarde (R)	Differentiatie	Bron
Nitraatuitspoeling	Uitspoelingsrisico, N-totaal, Gt	S: Waarde < 25 mg/L o.b.v. modelberekening	Landgebruik, grondsoort	1, 2
Grondwater aanvulling	WHC, neerslag-overschot, verdichting, drainage en verslemping	S: Index = 1, op basis van expertkennis	Landgebruik, grondsoort	3
Uitspoeling GBM	Klei, zand, silt, OS%, neerslag-overschot	S: index < 0,75, gebaseerd op modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort	3

Bronnen: 1: Groenendijk et al., 2016; 2:Fujita et al., 2019; 3: Van den Dool et al., 2021. Zie Ros et al. 2023 voor de volledige referentie.

Tabel 3-5. Streefwaarden van het BLN t i.r.t. waterregulatie en zelfreinigend vermogen voor oppervlaktewater.

Bodemfunctie	Eigenschappen	Streefwaarde (S), drempelwaarde (D) of referentiewaarde (R)	Differentiatie	Bron
Afspoelingsrisico	Morfologie	S: index = 0, afgeleid van expertkennis		1, 2
	Natte omtrek	S: index = 0, afgeleid van expertkennis		3
	Helling	S: Helling < 2%		4
	Grondwatertrap	S: Gt > 3		4
	Ondergrondverdichting	S: index = 0, afgeleid van modelstudie	Landgebruik, grondsoort	5, 2
Afspoelingsrisico voor fosfaat	AL-ox, Fe-ox, P-ox	S: meting < mediane waarde per stroomgebied	LSW	4
	P-CaCl ₂ , P-AL	S: meting < 4, afgeleid van veldproeven en expertkennis	Landgebruik	2
Afspoelingsrisico voor stikstof	N-totaal, OS%, CN-ratio en PMN	S: meting < mediane waarde per stroomgebied	Landgebruik, LSW	2

Bronnen: 1: Van Hattum, 2011; 2: Ros et al., 2019; 3: Van Gerven et al., 2019; 4: Groenendijk et al., 2021; 5: Van den Akker et al., 2012. Zie Ros et al. 2023 voor de volledige referentie.

3.1.3 Streefwaardes voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie

De ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie is gedefinieerd als de capaciteit van een bodem om de negatieve impact van emissies van broeikasgassen (CO₂, CH₄ en N₂O) op het klimaat te verminderen. Hierbij wordt in BLN 2.0 een opsplitsing gemaakt in koolstofvastlegging in de bodem en de broeikasgasemissies die kunnen optreden uit de bodem.

Op minerale gronden zijn er diverse mogelijkheden om extra koolstof in de bodem vast te leggen. Koolstofvastlegging zal alleen plaatsvinden als de aanvoer van koolstof met mest, gewasresten en groenbemesters groter is dan de afbraak van koolstof. Het potentieel van bodems om koolstof op te slaan varieert afhankelijk van het klimaat, de bodemtextuur, de ontwatering, pH, het landgebruik, de beschikbare technologieën en de huidige opbrengstniveaus. Het handelingsperspectief is vooral groot in bodems met een laag organisch stofgehalte en een beperkte afbraak.

De koolstofvoorraad neemt toe wanneer de aanvoer van koolstof groter is dan de afbraak. Om dit inzichtelijk te maken kan een organische stof balans worden opgesteld. Hierbij wordt vaak gebruik gemaakt van de 'effectieve organische stof' (EOS), wat staat voor de hoeveelheid organische stof die een jaar na toedienen nog over is in de bodem. Het opstellen van een EOS-balans biedt daarmee praktisch handelingsperspectief voor agrariërs om inzicht te krijgen in de bijdrage van de bodem aan koolstofvastlegging. Om ook inzicht te geven in de al vastgelegde koolstof in de bodem is de absolute koolstofvoorraad ook van belang. En om dit direct ook handelingsperspectief te geven wordt de huidige voorraad idealiter ook beoordeeld aan de hand van een streefdoel of maximaal haalbare koolstofvoorraad. Hiermee kan inzichtelijk worden gemaakt hoeveel potentie voor additionele vastlegging er nog is. De grote vraag hierbij is hoe de maximaal haalbare koolstofvoorraad te bepalen is op een wetenschappelijk verantwoorde en transparante manier. Idealiter wordt dit vastgesteld aan de hand van de biofysische aspecten van de bodem, waarbij rekening gehouden kan worden met o.a. grondsoort, textuur, grondwaterstanden en klimaat. Een pragmatischer alternatief kan zijn om per grondsoort naar de huidige gemeten koolstofvoorraden te kijken en dit te vergelijken met een streefwaarde gebaseerd op de maximaal haalbare koolstofvoorraad gebaseerd op modellen (bijvoorbeeld RothC; Lesschen et al., 2020) of meetsets (Ros et al., 2023).

De streefwaarde voor de EOS-balans is groter dan 0. De streefwaarde voor de koolstofvastlegging kan worden vastgesteld op basis van de ratio tussen de huidige koolstofvoorraad en een maximaal haalbare koolstofvoorraad in de bodem. Deze moet nog worden vastgesteld per bodemtype en evt. landgebruik op basis van modellen of grote datasets. Voor deze studie is dit in meer detail uitgewerkt in hoofdstuk 4. Omdat functies voor het berekenen van de afbreekbaarheid van bodemkoolstof in relatie tot emissies van lachgas of methaan nog ontbreken, is deze BLN indicator niet meegenomen in de voorliggende studie.

3.1.4 Streefwaardes voor bodembiodiversiteit en habitatvoorziening

De ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening is gedefinieerd als de veelheid en verscheidenheid van bodemorganismen en -processen die interacteren in een ecosysteem, een significant onderdeel zijn van het natuurlijke kapitaal van een bodem, en een brede range aan culturele en onbekende diensten leveren aan de maatschappij.

De inbreng van het bodemleven voor de landbouwkundige productiefunctie (primaire productie) is bekend voor het N-leverend vermogen en wordt als zodanig ook gekwantificeerd via een empirische relatie gekalibreerd op veldproeven. Er zijn nog veel onduidelijkheden over de rol van het bodemleven in relatie tot het natuurlijk vermogen van bodems om ziekten en plagen te onderdrukken. Inzicht in plant parasitaire aaltjes is evident, en deze empirische kennis is de grondslag van huidige aaltjesschema's en adviezen voor gewasopvolging en inzet van groenbemesters. Onderzoek laat zien dat de diversiteit van het bodemvoedselweb afneemt met toenemende intensiteit van landbouwproductie (Tsiafouli et al., 2015), maar het is tot op heden nog onduidelijk in welke mate een optimale gewasproductie ook samen kan gaan met een stabiel en gezonde intrinsieke biodiversiteit (Van der Putten, 2020). Ook blijkt met name de bodemkwaliteit, weer, bemesting en bodembeheer het bodemvoedselweb te beïnvloeden. Hierbij gaat het o.a. om populaties van schimmels, bacteriën, aaltjes en wormen. Dit complex samenspel bemoeilijkt de ontwikkeling van streefwaarden, en deze zijn voor het bodemleven nog grotendeels onbekend.

In de BLN 2.0 zijn zes biologische metingen opgenomen die iets (kunnen) zeggen over de rol van het bodemleven voor een gezonde gewasproductie: aantallen en diversiteit van aaltjes, aantallen en diversiteit van plantparasitaire aaltjes, bacteriële biomassa, schimmelbiomassa en aantallen en diversiteit van regenwormen. Alleen voor plantparasitaire aaltjes zijn streefwaarden bekend, terwijl voor alle overige metingen onvoldoende bekend is hoe de gewasopbrengst en gewaskwaliteit beïnvloed wordt door de hoeveelheid van en/of diversiteit in aaltjes, bacteriën, schimmels en regenwormen. Informatie over het voorkomen van plantparasitaire aaltjes binnen provincie Gelderland is echter niet aanwezig.

Om deze redenen is in de voorliggende studie geen analyse uitgevoerd van de bijdrage van de bodem aan deze ecosysteemdienst.

3.1.5 Streefwaardes voor faciliteren nutriëntenkringloop

De ecosysteemdienst faciliteren nutriëntenkringloop is gedefinieerd als de capaciteit van een bodem om nutriënten te ontvangen (in de vorm van (bij)producten), te leveren (uit intrinsieke bronnen) of te onderscheppen (uit lucht of water), en deze effectief over te brengen naar planten en te oogsten producten. Binnen een duurzaam bodembeheer is het belangrijk dat de kringlopen van nutriënten waar mogelijk op lokale en regionale schaal worden gesloten. Kringlooplandbouw streeft naar minimale verliezen door kringloopsluiting. De behoefte aan en beschikbaarheid van nutriënten wordt sterk bepaald door het landgebruik en de locatie van het perceel. De bodemkwaliteit beïnvloedt de beschikbaarheid van nutriënten voor planten, als ook de verliezen die optreden. Te hoge nutriëntengehaltes in de bodem moeten daarom ook worden voorkomen. Landbouwkundig betekent dit dat er gestreefd wordt naar een bemestingspraktijk gebaseerd op de *"build-up and maintenance*

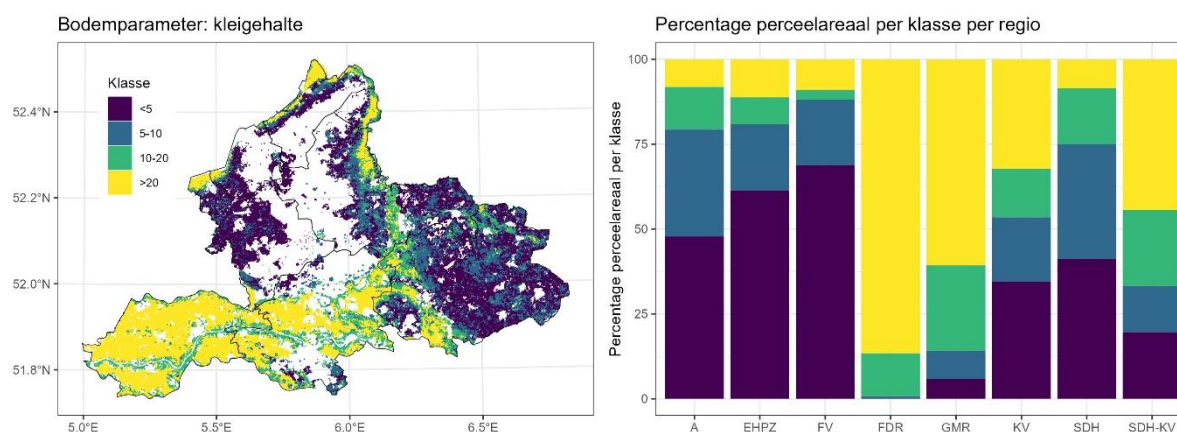
approach" (de Vries et al., 2018), een aanpak waarbij de bodemkwaliteit in een goede toestand wordt gebracht, waarna vervolgens alleen wordt bemest om aan de gewasbehoefte te voldoen. De optimale bodemkwaliteit is daarbij afgeleid van meerjarige veldproeven. In de praktijk betekent deze aanpak ook dat de benutting van mest relatief laag is op percelen die zelf heel veel nutriënten leveren.

Voor de ecosysteemdienst faciliteren van de nutriëntenkringloop zijn de relevante bodemfuncties gelijk aan de chemische bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie. Voor de huidige studie wordt hierbij gefocust op de drie belangrijkste nutriënten: stikstof, fosfaat en kalium. De streefwaarden voor beoordeling van de bodemfuncties voor de ecosysteemdienst faciliteren van de nutriënten-kringloop zijn voor de ondergrens gelijk aan de streefwaarden voor primaire productie. Dit correspondeert met de landbouwkundige beoordelingsklasse voldoende tot goed. Hogere concentraties dan deze klasse zijn in de bodem niet nodig, en voor het sluiten van kringlopen is in die situatie gewenst om minder meststoffen aan te voeren dan via de oogst worden afgevoerd.

3.2 Eigenschappen van regio's

Waar deze studie zich richt op de beoordeling van de bodemkwaliteit, wordt in deze sectie een kort overzicht gegeven van de belangrijkste bodem- en perceelseigenschappen. Naast de ruimtelijke variatie in deze bodemeigenschappen wordt per regio (deelgebieden binnen de provincie Gelderland, vastgesteld ten behoeve van het Nationaal Programma Landelijk gebied) aangegeven welk percentage van de landbouwpercelen in een bodemkwaliteitsklasse voorkomt.

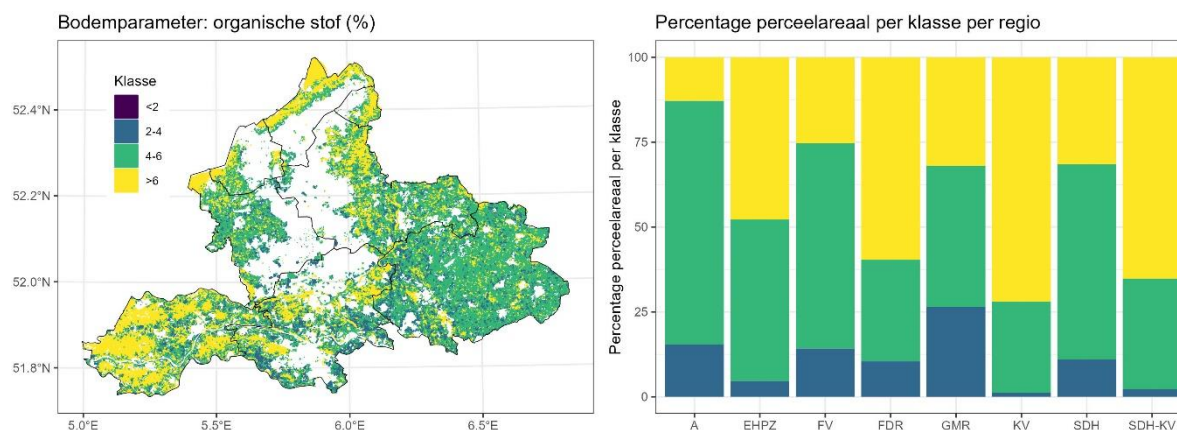
In figuur 3-1 wordt een overzicht gegeven van de variatie in het kleigehalte. Hieruit blijkt dat het oosten en noorden van provincie Gelderland vooral uit zandgronden bestaat met een kleigehalte lager dan 5%. In het zuiden van de provincie komen vooral rivierkleigronden voor. Van de zeven regio's is het merendeel rijk aan zandgronden; slechts drie regio's bevatten meer dan 50% kleigronden met meer dan 10% klei.



Figuur 3-1. Ruimtelijke variatie in het kleigehalte binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

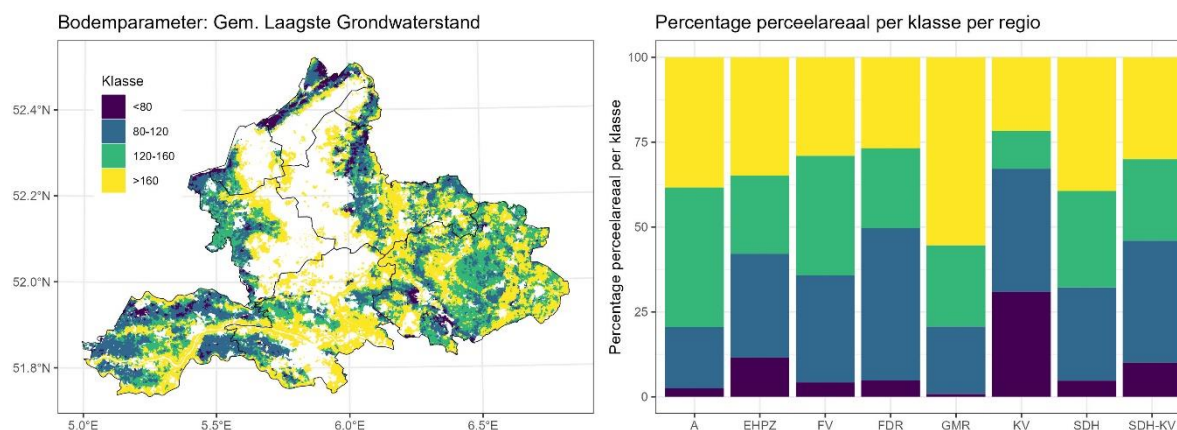
Het organische stofgehalte varieert in het overgrote deel van de landbouwpercelen van 3,6 tot 10,8%, gemiddeld over de hele provincie (Figuur 3-2). Het laagste regiogemiddelde OS-gehalte ligt in de regio Achterhoek terwijl het hoogste regiogemiddelde ligt in de regio Kop van de Veluwe. Binnen de Achterhoek varieert het OS-gehalte tussen 3,6 en 7,0% terwijl het OS-gehalte varieert van 4,3 tot 20% in

de Kop van de Veluwe. De zandgronden in het oosten hebben gemiddeld minder organische stof dan de kleirijke gronden in het zuiden en noorden van de provincie.



Figuur 3-2. Ruimtelijke variatie in het gehalte aan organische stof binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

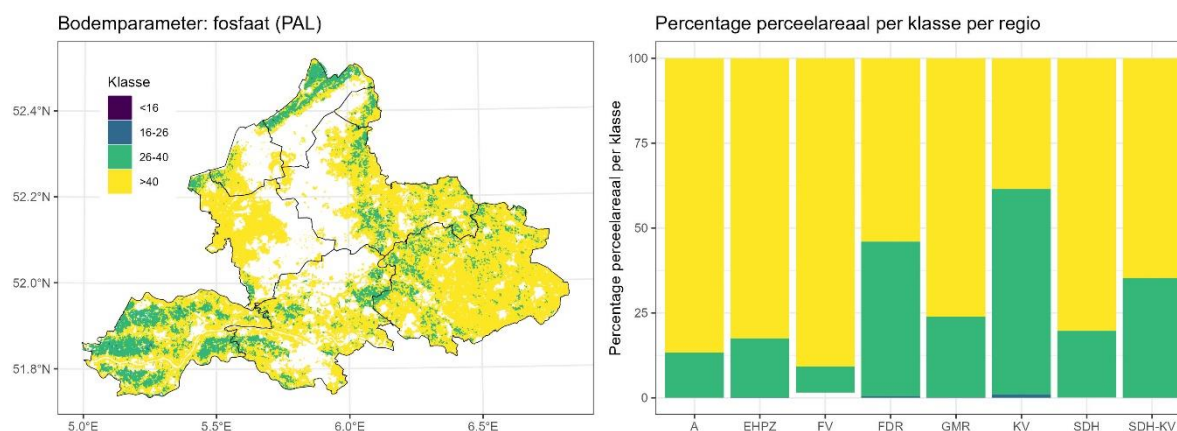
De gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) geeft een indicatie voor het voorkomen van droogte en de beschikbaarheid van water. Gemiddeld ligt in 25 tot 40% van de landbouwpercelen de GLG lager dan 160 cm onder maaiveld (Figuur 3-3). Natte percelen komen veelal voor aan de randen van de provincie, bijvoorbeeld in de Kop van de Veluwe en de regio EHPZ. De percelen in het oosten van de provincie zijn gemiddeld droger dan het westen van de provincie. Tegelijkertijd is de ruimtelijke variatie groot, mede gekoppeld aan de aanwezigheid van beek(dalen) en watergangen.



Figuur 3-3. Ruimtelijke variatie in het de Gemiddeld Laagste Grondwaterstand binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

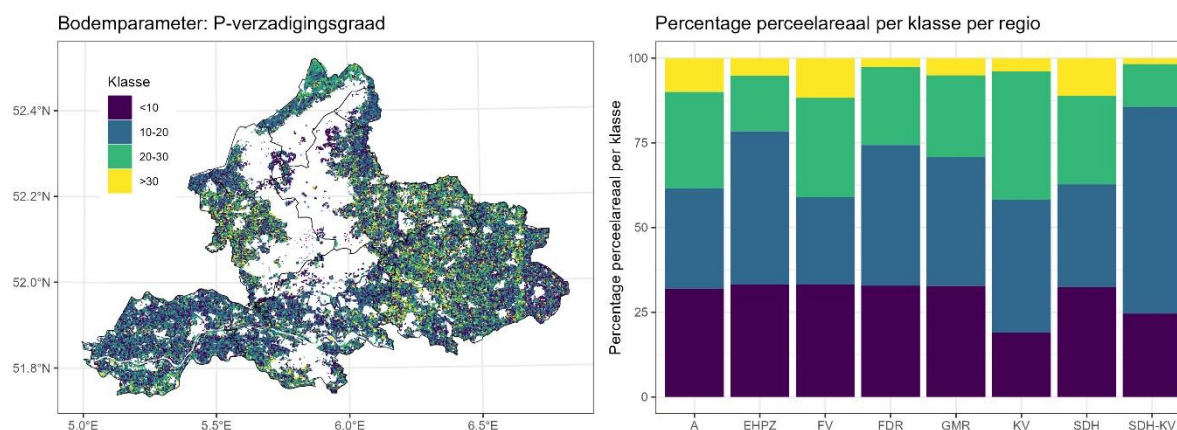
Het fosfaatgehalte in de bodem is in de afgelopen decennia toegenomen als gevolg van bemesting, waarbij de aanvoer van fosfaat hoger was dan de afvoer via het gewas. Het fosfaatgehalte (hierbij gemeten als de fosfaatvoorraad, via een ammoniumlactaat extractie van de bodem) varieert van 34

tot 74 mg P_2O_5 per 100 gram in 95% van de landbouwpercelen (Figuur 3-4). In vrijwel alle regio's is de fosfaatvoorraad groter dan 40 mg P_2O_5 per 100 gram in meer dan 75% van de percelen. Er zijn weinig situaties waarbij de fosfaatvoorraad laag is.



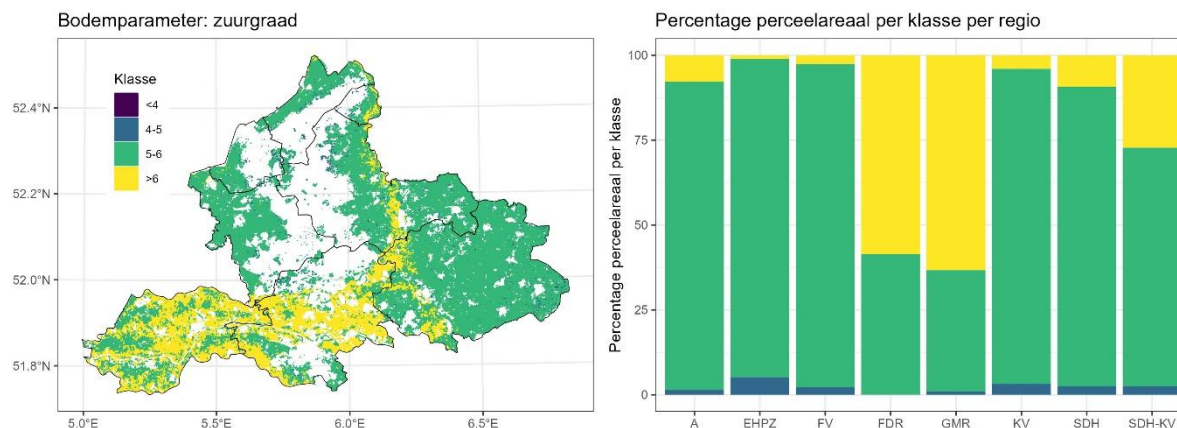
Figuur 3-4. Ruimtelijke variatie in de fosfaatvoorraad (P -ammoniumlactaat, in mg P_2O_5 100g⁻¹) binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

De capaciteit van de bodem of fosfaat te binden en vast te houden wordt sterk bepaald door het fosfaatbindend vermogen, dat afhangt van de hoeveelheid ijzer- en aluminiumoxalaat in de bodem. Door een lange historie van bemesting wordt de bodem opgeladen met fosfaat. Om dit in beeld te brengen wordt hieronder de ruimtelijke variatie in de fosfaatverzadigingsgraad (%) weergegeven (Figuur 3-5). De variatie tussen de zeven regio's zijn beperkt; het merendeel van de percelen heeft een P -verzadiging lager dan 20%. In drie regio's kunnen percelen met substantieel hogere P -verzadiging voorkomen (door ofwel een hoge historische bemesting dan wel een lage bindingscapaciteit). Dit zijn de regio's Achterhoek, de FruitVallei en Stedendriehoek.



Figuur 3-5. Ruimtelijke variatie in de fosfaatverzadigingsgraad (%) binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

Als laatste bodemeigenschap visualiseren we hier de zuurgraad van de bodem. De zuurgraad heeft indirect effect op het gedrag van vrijwel alle nutriënten en bepaalt ook de uitspoeling van kationen als ook de gewasopbrengst. Over de hele provincie varieert de pH van 5,1 tot 6,5 in 95% van alle percelen (Figuur 3-6). De kleigronden hebben van nature een hogere pH door de hogere CEC en baseverzadiging. De zuurgraad ligt in vrijwel alle gebieden tussen de 5 en 6.



Figuur 3-6. Ruimtelijke variatie in de bodem zuurgraad (pH) binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

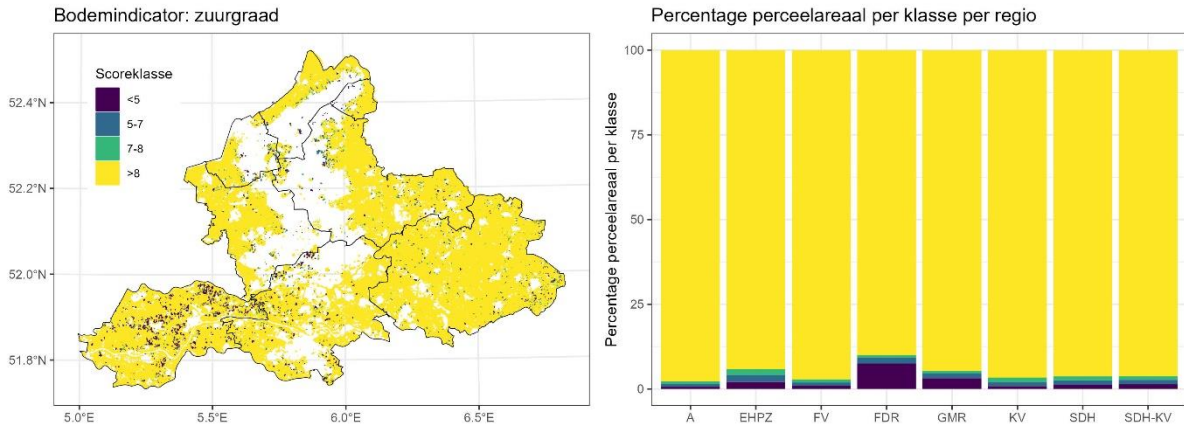
3.3 Beoordeling bodemkwaliteit voor primaire productie

De variatie in het bodemprofiel en eigenschappen van de bodems in provincie Gelderland zorgen voor verschillen in knelpunten die worden ervaren in relatie tot de productie van gezonde gewassen. De beoordeling van de bodemkwaliteit is in kaart gebracht met hulp van de BLN versie 2.0. Hierbij wordt een schaal van 0 tot 10 gehanteerd om de huidige status te indiceren ten opzichte van het agronomisch optimum (waarbij een lage score indicatief is voor het voorkomen van serieuze knelpunten, terwijl een hoge score aangeeft dat de bodemkwaliteit optimaal is voor de gewassen die er de afgelopen tien jaar zijn geteeld).

3.3.1 Chemische bodemfuncties

Zuurgraad

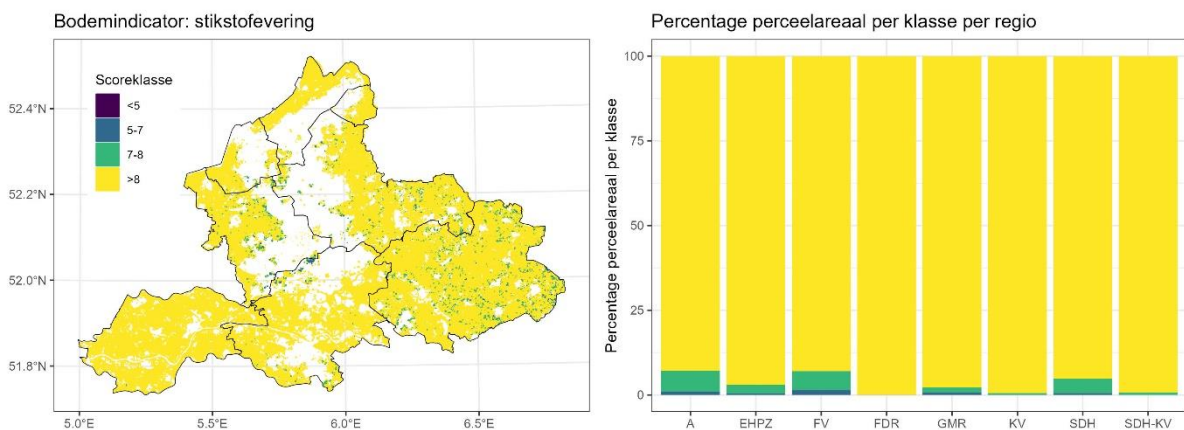
Voor vrijwel heel Gelderland wordt de pH als optimaal beoordeeld. De bodemkwaliteitsscore is gemiddeld gelijk dan 10 in alle zeven regio's. De ideale pH voor gewasgroei varieert per gewas, maar de hoge pH's op de kleigronden als ook de ruimte aanvoer van kationen (via gebruik van dierlijke mest) zorgt ervoor dat er weinig tot geen beperkingen aanwezig zijn voor de pH van de bodem.



Figuur 3-7. Ruimtelijke variatie in de bodem zuurgraad (pH) binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

N-leverend vermogen

Het N-leverend vermogen van de bodem is voor minder dan 5% van alle percelen een aandachtspunt. De beoordeling van het NLV verschilt tussen bouwland (optimale waarde van 100 kg N ha⁻¹) en grasland (140 kg N ha⁻¹). De bodemkwaliteitscore voor de N-levering varieert van 7,8 tot 10 tussen de regio's. Op de lichtere gronden is er vaker sprake van een lagere N-levering, maar deze bodemfunctie is vrijwel niet beperkend voor de landbouwkundige functie om voldoende gewassen te produceren.

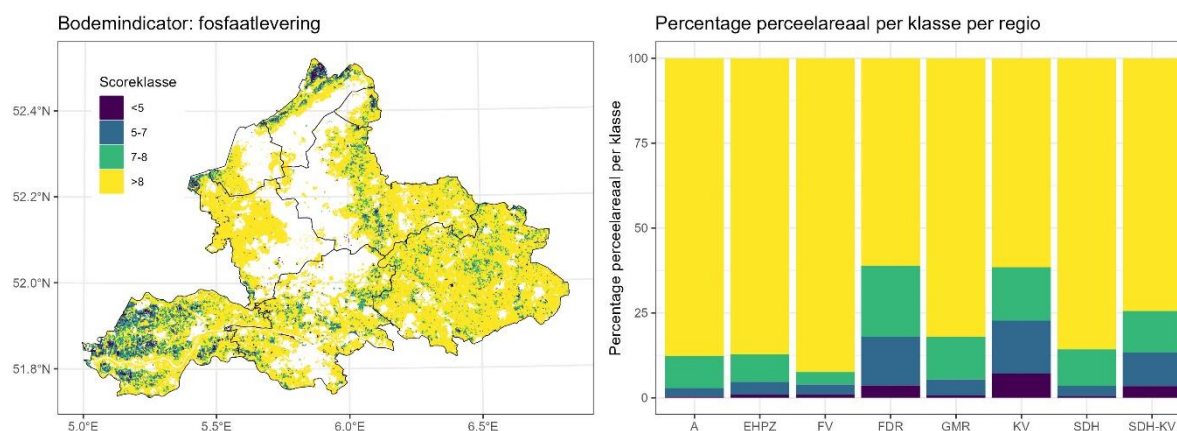


Figuur 3-8. Ruimtelijke variatie in het N-leverend vermogen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

P-beschikbaarheid

In vergelijking met stikstof is er tussen de regio's een groter verschil in de P-beschikbaarheid. De score voor de P-beschikbaarheid is gemiddeld een 9 waarbij 95% van de percelen varieert tussen een 6,1 en 9,9. Lagere waarden komen vooral voor in het zuidwesten van de provincie, waarbij er in 5% van de percelen een serieus knelpunt kan optreden voor de fosfaatvoorziening van gewassen. De

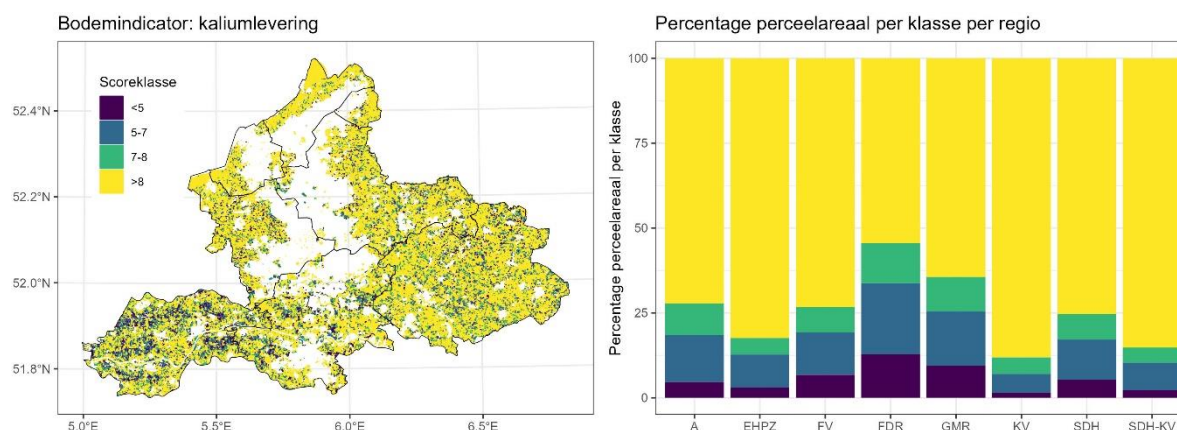
fosfaatbeschikbaarheid is een aandachtspunt in de regio's Fruitdelta Rivierenland, de Kop van de Veluwe, en de Stedendriehoek, Kop van de Veluwe. Gemiddeld genomen is de bodemkwaliteit voor wat betreft het fosfaat-bufferend vermogen goed op orde.



Figuur 3-9. Ruimtelijke variatie in het P-bufferend vermogen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

K-beschikbaarheid

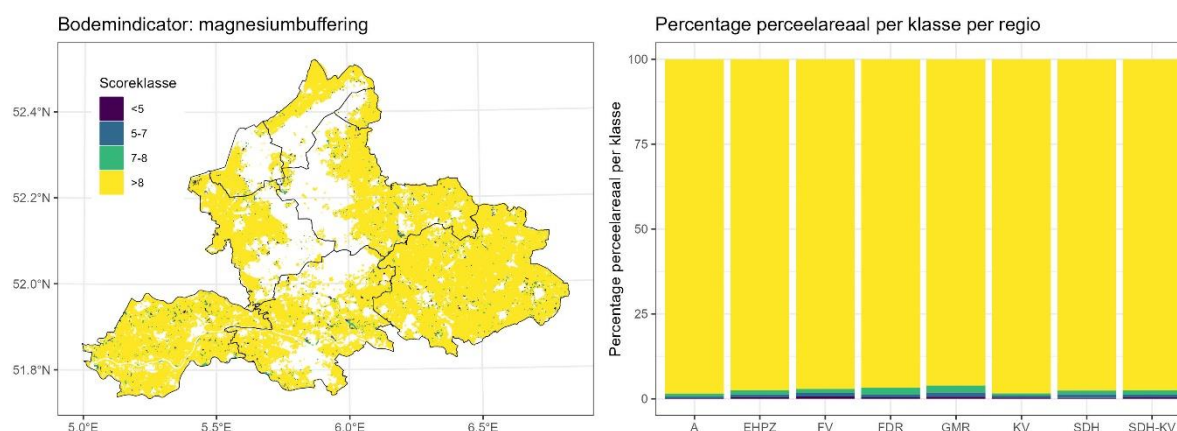
Voor kalium is de ruimtelijke variatie in bodemkwaliteit groter en komen binnen elke regio percelen met verminderde en hoge K-beschikbaarheid voor. Gemiddeld over de hele provincie varieert de kaliumindicator tussen 4,9 en een 9,7. Tegelijkertijd is de K-beschikbaarheid in vrijwel alle regio's hoog, waarbij er extra aandacht voor kalium nodig is in de regio's FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR) en de Achterhoek.



Figuur 3-10. Ruimtelijke variatie in het K-leverend vermogen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Mg-beschikbaarheid

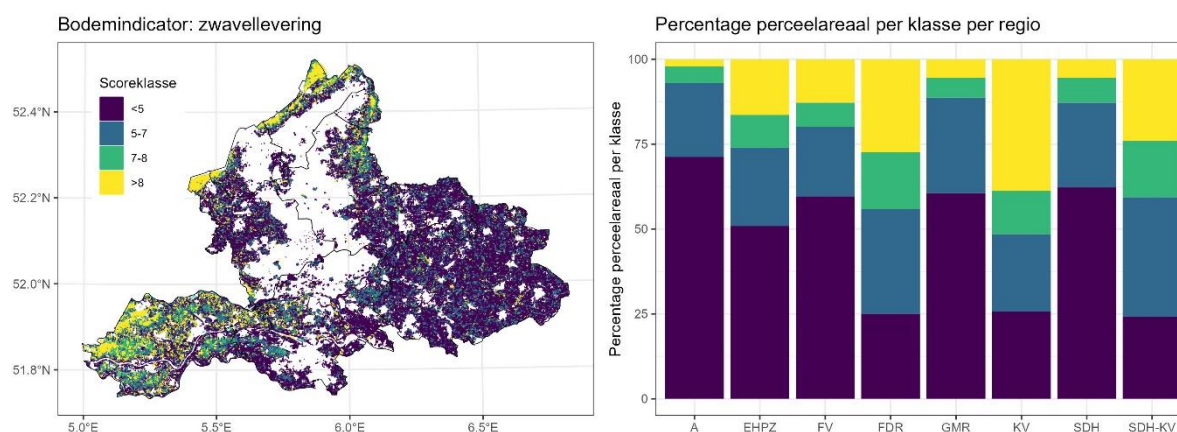
Vergelijkbaar met kalium is de beschikbaarheid en buffering van magnesium voldoende voor de bouwplannen in provincie Gelderland. De gemiddelde bodemkwaliteitsscore varieert tussen 8,6 en 9,9 voor 95% van alle landbouwpercelen. De beschikbaarheid van Mg is daarom geen knelpunt.



Figuur 3-11. Ruimtelijke variatie in het Mg-bufferend vermogen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Zwavellevering

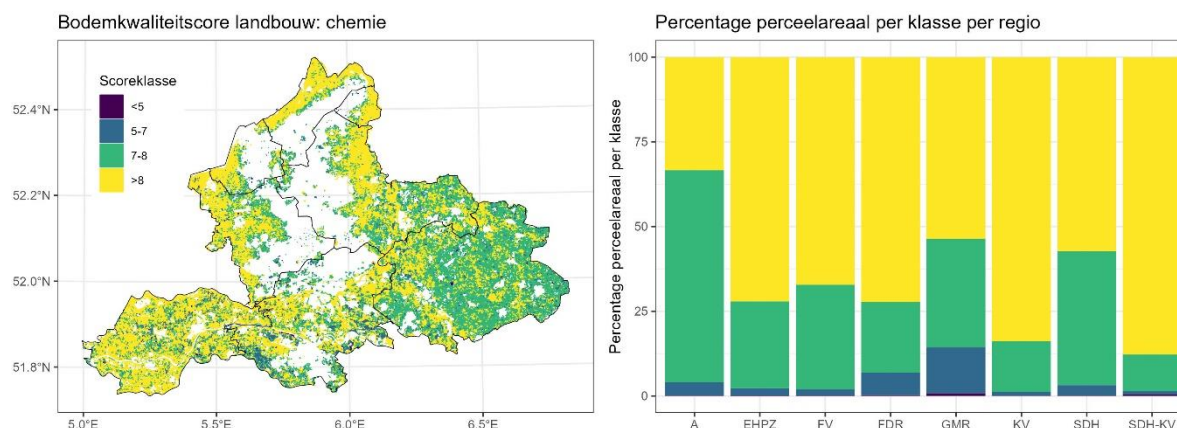
Ten opzichte van de macronutriënten stikstof, fosfaat en kalium is er een grotere variatie aanwezig in de bodemkwaliteit in relatie tot het leveren van zwavel (Figuur 3-12). De gemiddelde bodemkwaliteitscore varieert tussen 2,6 (een serieus knelpunt) tot 9,6 in de landbouwpercelen van de provincie Gelderland. Het merendeel van de percelen wordt gekenmerkt door een serieus tekort aan zwavel. Dit patroon is zichtbaar in alle regio's, maar zijn het grootst in het Oosten van de provincie.



Figuur 3-12. Ruimtelijke variatie in het zwavel leverend vermogen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Chemische bodemkwaliteit samengevat

Wanneer de chemische bodemkwaliteitsfuncties worden geaggregeerd in relatie tot de landbouwkundige functie om voldoende gewassen te produceren, dan is de gemiddelde bodemkwaliteit redelijk op orde. In 95% van de landbouwpercelen varieert de bodemkwaliteitscore tussen de 6,5 en 9,1 voor wat betreft de beschikbaarheid van nutriënten. Het Westen van de provincie heeft een gemiddeld hogere score dan het Oosten van de provincie, waarbij met name de regio Achterhoek extra aandacht behoeft.



Figuur 3-13. Ruimtelijke variatie in het de chemische bodemkwaliteit in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

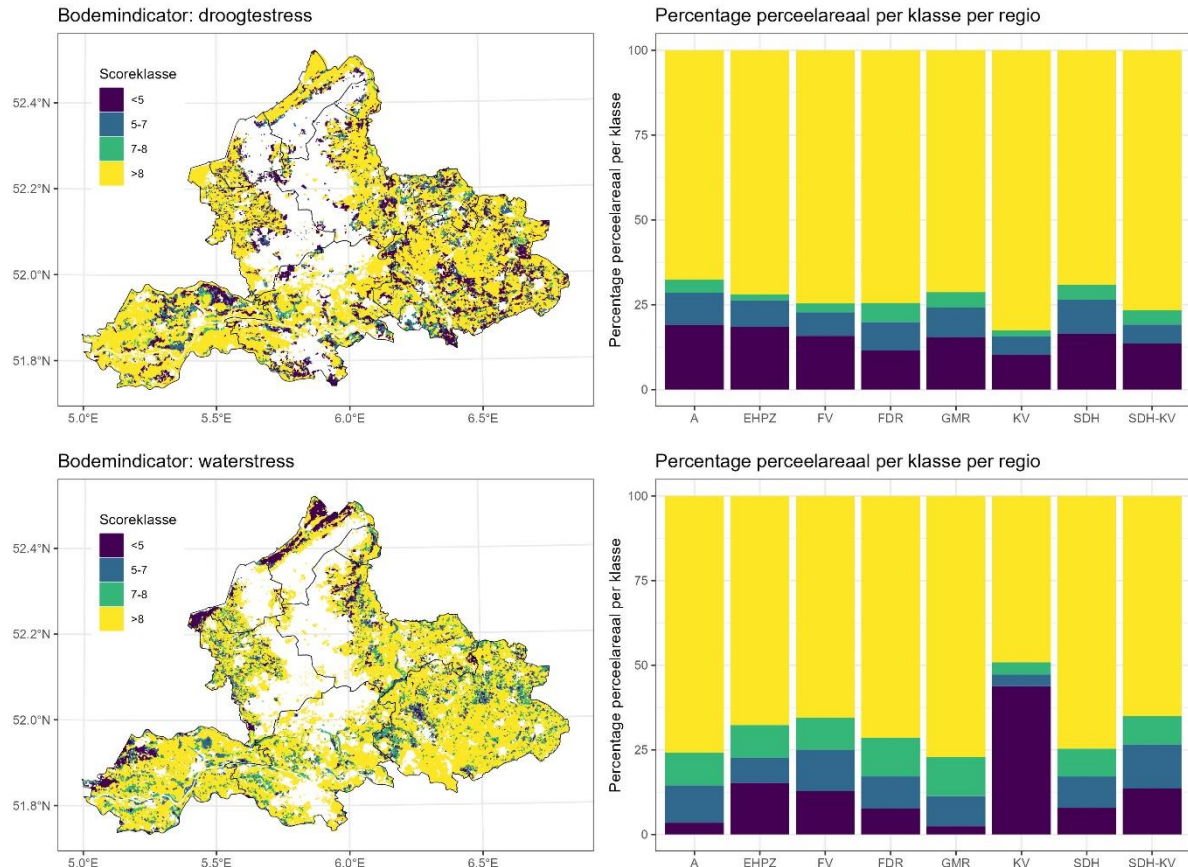
3.3.2 Fysische bodemfuncties

Naast het leveren en bufferen van nutriënten is een goede bodemstructuur cruciaal voor een gezonde gewasproductie. Een bodem met goede fysische eigenschappen is zo opgebouwd dat er zowel kleine als grote poriën aanwezig zijn. In de kleine poriën wordt het vocht vastgehouden en de grote poriën zorgen voor voldoende toevoer van lucht en voor de afvoer van overtollig water. Daarnaast is het van belang dat groeiende wortels niet te veel weerstand ondervinden in de bodem, zodat zich een wortelstelsel kan ontwikkelen dat voldoende water en nutriënten uit de bodem op kan nemen.

Door het ontbreken van een eenduidig kengetal voor de kwaliteit van bodemstructuur is het noodzakelijk meerdere kenmerken te meten om tot een gewogen uitspraak te komen over de fysische bodemkwaliteit. De volgende bodemeigenschappen zijn benodigd: textuur, organische stof en de klei en kationbezetting. In deze studie zijn negen fysische bodemfuncties beoordeeld. We visualiseren hieronder de meest relevante bodemfuncties.

Droogteschade en natschade

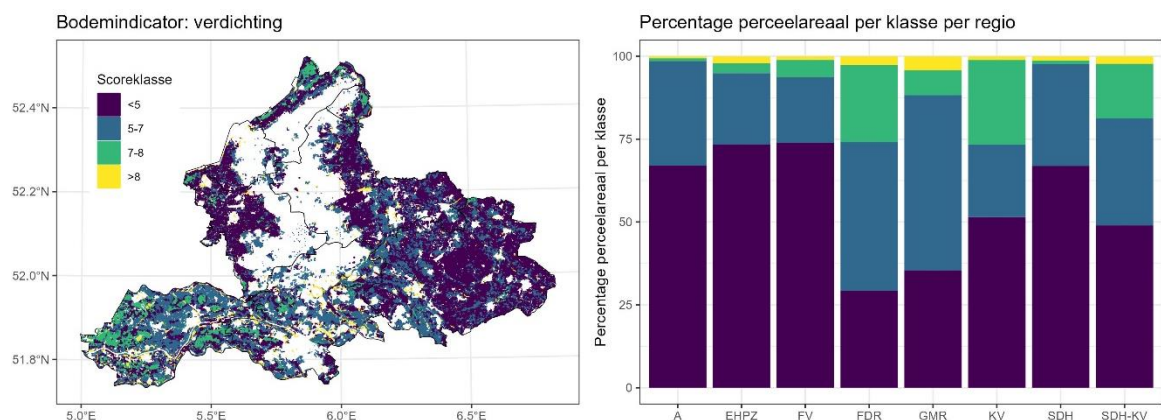
Binnen alle regio's kan er substantiële droogteschade ontstaan in droge zomermaanden. De bodemkwaliteitscore varieert van 1,9 tot 9,9 over alle landbouwpercelen in de provincie Gelderland. Natschade treedt vooral op in de Kop van de Veluwe (Figuur 3-14). Gemiddeld is de beschikbaarheid van water een groot knelpunt in 20 tot 30% van de landbouwpercelen. In vergelijking met de chemische bodemkwaliteit, zijn deze knelpunten substantieel.



Figuur 3-14. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde droogteschade (boven) en natschade (onder) als gevolg van beschikbaarheid van water en in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Ondergrondverdichting

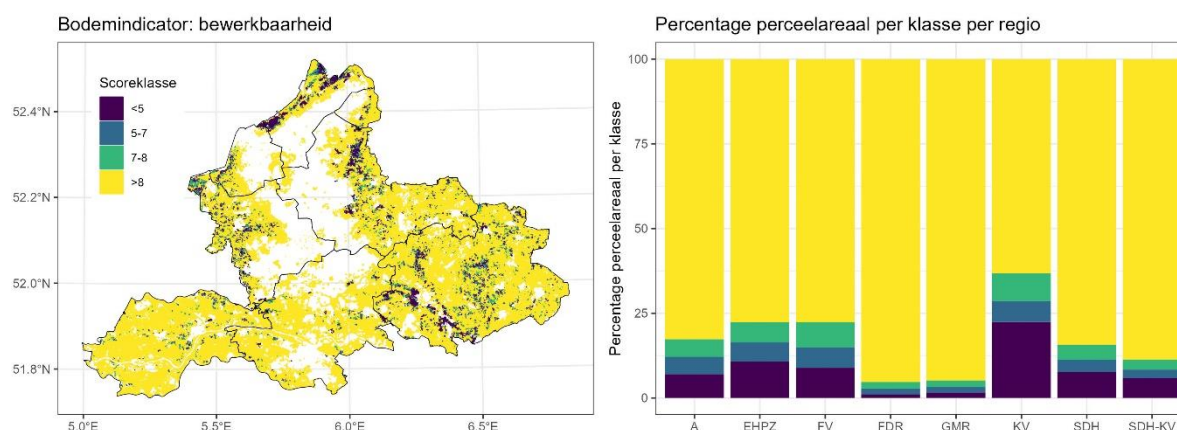
Gemiddeld is de variatie in het voorkomen van ondergrondverdichting groot. In vier regio's is er sprake van aanzienlijke risico's op ondergrondverdichting, met een gebiedsgemiddelde score kleiner dan 5. Het risico op ondergrondverdichting is afgeleid van de landelijke kaart van verdichtingsrisico's (Van der Akker et al., 2012). Er zijn slechts 5 klassen gedefinieerd (0,2, 0,4, 0,6, 0,8 en 1) waardoor de variatie niet goed in beeld is te brengen.



Figuur 3-15. Ruimtelijke variatie in het risico op ondergrondverdichting in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Bewerkbaarheid

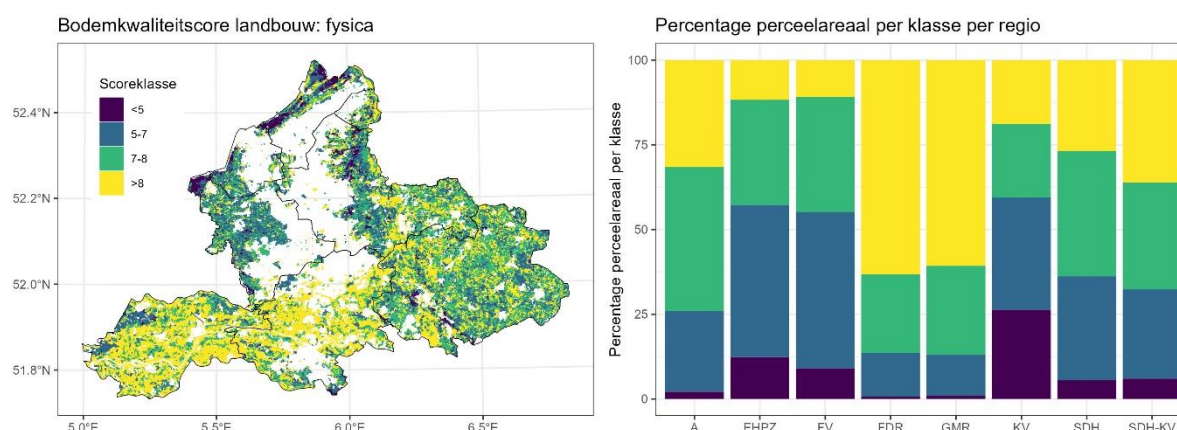
Afhankelijk van de bodemstructuur, de worteldiepte van het gewas, de gemiddelde groeiperiode en de kritieke stijghoogte kan het aantal dagen in kaart worden gebracht waarop de grond voldoende droog is om zonder risico op bodemverdichting de grond te bewerking of betreden. Dit vertaalt zich in een bewerkbaarheidsscore voor de bodemkwaliteit. Binnen de provincie Gelderland kan deze variëren van 3,9 tot 10, waarbij de bewerkbare periode in vrijwel alle regio's goed op orde is. Uitzondering is de Kop van de Veluwe waarbij het aantal bewerkbare dagen substantieel kleiner is dan in de overige gebieden.



Figuur 3-16. Ruimtelijke variatie in de bodemkwaliteitsscore voor bewerkbaarheid in relatie tot de productie van gewassen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Fysische bodemkwaliteit samengevat

Wanneer de fysische bodemkwaliteitsfuncties worden geaggregeerd in relatie tot de landbouwkundige functie om voldoende gewassen te produceren, dan is de gemiddelde bodemkwaliteit redelijk op orde. In 95% van de landbouwpercelen varieert de bodemkwaliteitsscore tussen de 5,1 en 8,9 voor wat betreft een goede bodemstructuur, bewortelbaarheid en beschikbaarheid van water. Het zuiden van de provincie heeft een gemiddeld hogere score dan het oosten van de provincie, waarbij met name de regio's in het noordwesten extra aandacht behoeven.



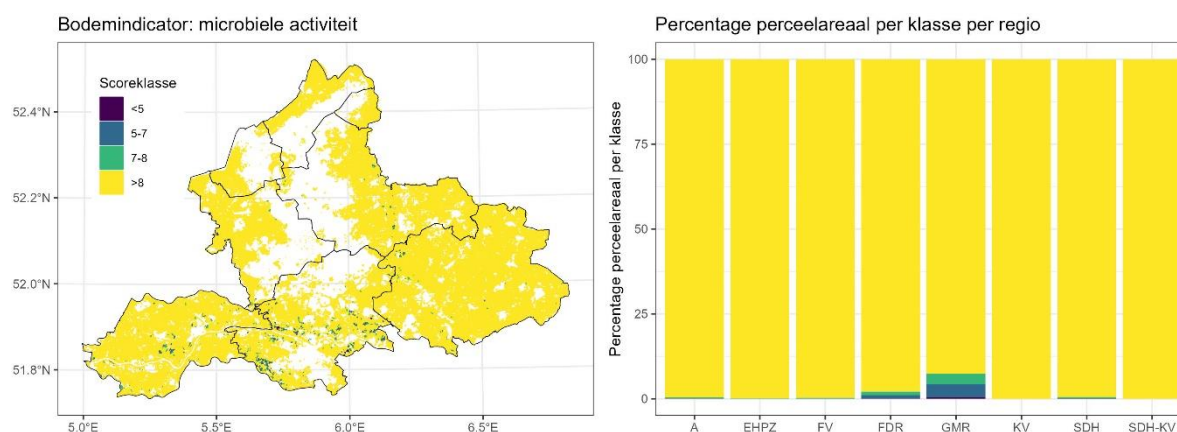
Figuur 3-17. Ruimtelijke variatie in de fysische bodemkwaliteit in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

3.3.3 Biologische bodemfuncties

Omdat streefwaarden of meetgegevens onbekend zijn, kan de rol van het bodemleven alleen in beeld worden gebracht voor de bodemfuncties microbiële activiteit en de ziekteverendheid, waarbij de laatste bodemfunctie wordt afgeleid van het organische stofgehalte.

Microbiële activiteit

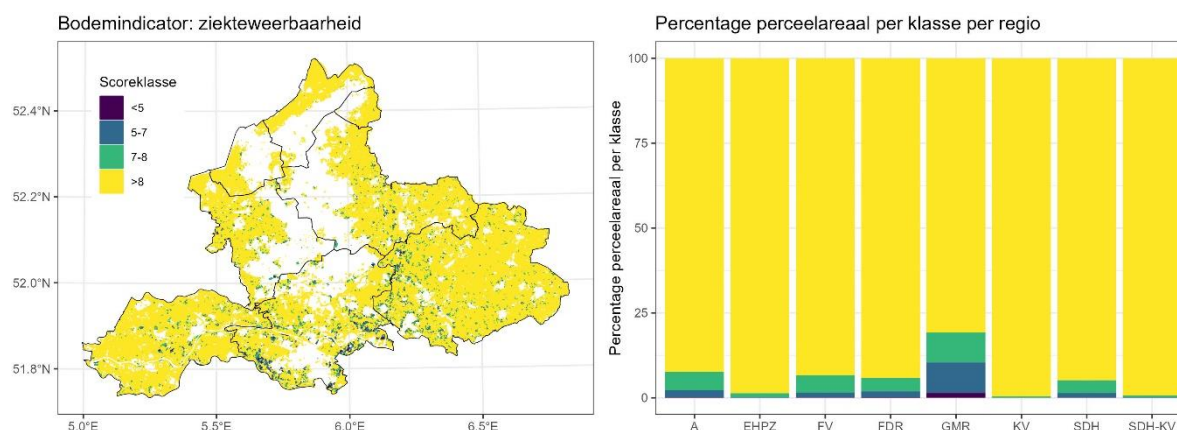
De potentiële stikstofmineralisatie varieert van 21 tot 282 mg N kg⁻¹ en wordt gebruikt als proxy voor de microbiële activiteit. Ten opzichte van de gewenste bodemkwaliteit voldoet een groot deel van de landbouwpercelen aan de ontwikkelde streefwaarden: 95% van de percelen heeft een score hoger dan 9,4 (Figuur 3-18). Dit betekent dat er weinig tot geen risico is op een te lage stikstoflevering. De bodemkwaliteit in relatie tot deze functie is daarom uitermate goed.



Figuur 3-18. Ruimtelijke variatie in de microbiële activiteit als maat voor het bodemleven in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1.

Ziekteverendheid

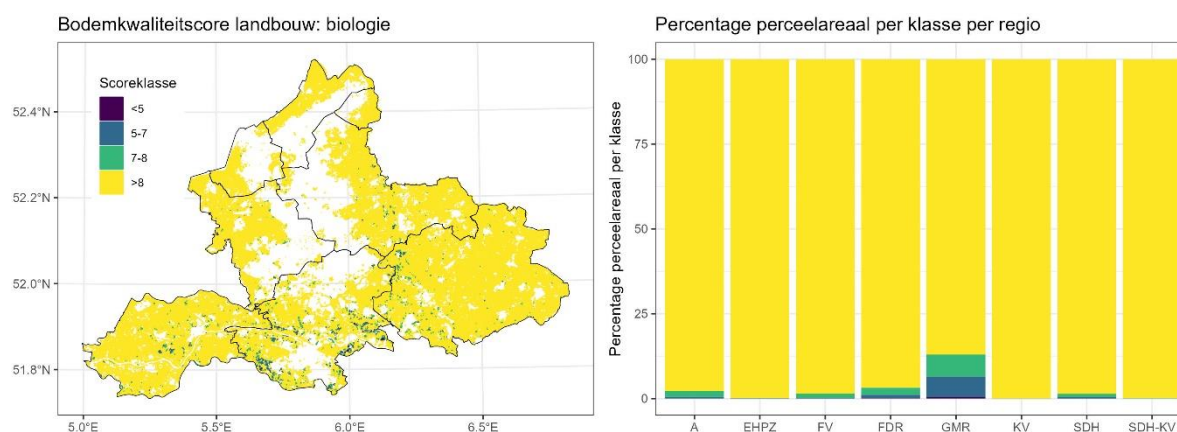
Gekoppeld aan het relatief hoge organische stofgehalte is de bodemkwaliteit in relatie tot de potentiële ziekteverendbaarheid goed op orde. In 95% van de percelen ligt de bodemkwaliteitsscore hoger dan 7,8. Dit geeft aan dat alle basiskennmerken voor een gezonde bodem aanwezig zijn.



Figuur 3-19. Ruimtelijke variatie in de ziekteverendheid in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Biologische bodemkwaliteit samengevat

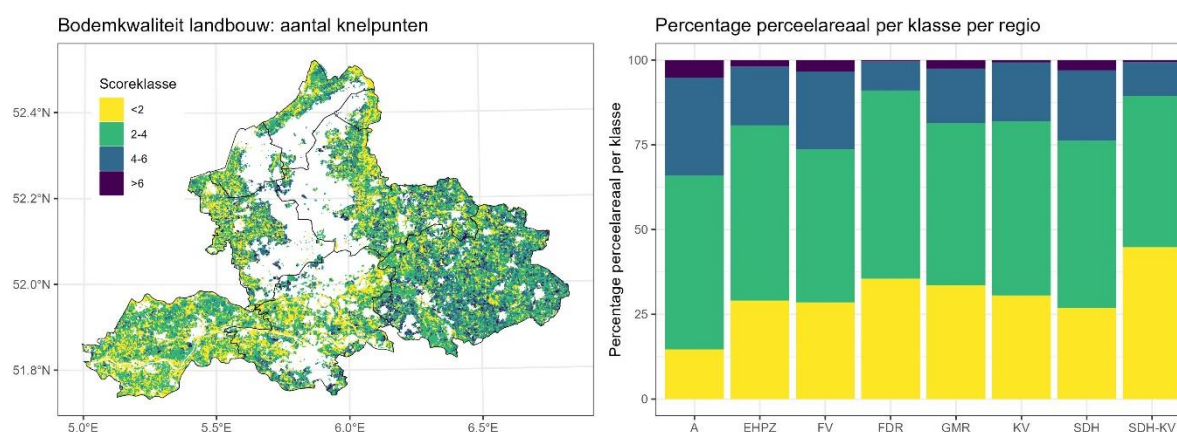
Wanneer de biologische bodemkwaliteitsfuncties worden geaggregeerd in relatie tot de landbouwkundige functie om voldoende en gezonde gewassen te produceren, dan is de gemiddelde bodemkwaliteit redelijk op orde. In 95% van de landbouwpercelen varieert de bodemkwaliteitscore tussen de 8,5 en 9,8 voor wat betreft de microbiële activiteit en de bijdrage van organische stof aan de ziekteverendigheid van bodems. Gegeven deze hoge kwaliteit als ook de huidige bemestingspraktijk met veel organische stof, compost en het vele grasland, zijn er weinig risico's te verwachten voor wat betreft de hoeveelheid bodemleven, en hun bijdrage aan een gezonde gewasproductie.



Figuur 3-20. Ruimtelijke variatie in het de biologische bodemkwaliteit in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

3.3.4 Knelpunten bodemkwaliteit voor primaire productie

Het aantal knelpunten (die we hier definiëren als scores onder 0,75) worden samengevat in Figuur 3-21. Chemische bodemfuncties zijn over het algemeen goed beoordeeld ten opzichte van de streefwaardes: 95% van de percelen heeft niet meer dan 2 knelpunten (van de in totaal 6 chemische bodemfuncties). Voor de fysische bodemfuncties komen er echter meer knelpunten voor, ook omdat deze voor een deel samenhangen met dezelfde oorzaken. Het totaal aantal knelpunten loopt maximaal op tot vier á vijf.

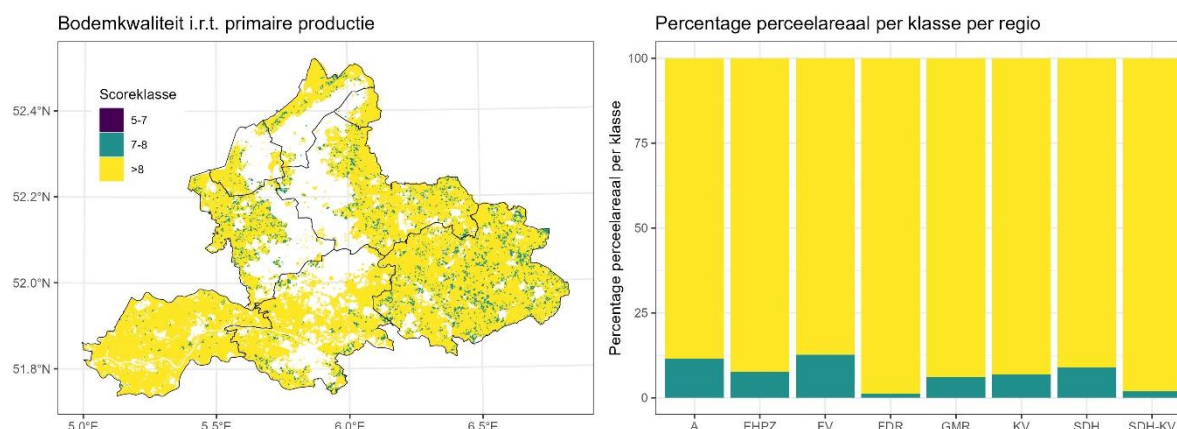


Figuur 3-21. Ruimtelijke variatie in het aantal knelpunten in de bodemkwaliteit in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. Een knelpunt is gedefinieerd als een indicator met een score lager dan 7.

Zoals eerder vermeld, weerspiegelt de beoordeling van sommige fysische bodemfuncties (bijv. verdichting) niet de lokale situatie van de percelen, wat mogelijk resulteert in een lage fysische score voor een aantal percelen.

3.3.5 Eindbeoordeling bodemkwaliteit voor primaire productie

Wanneer de onderliggende chemische, fysische en biologische bodemkwaliteitsscores worden geaggregeerd via een eenvoudige berekening van de gemiddelde score, dan blijkt dat in meer dan 90% van de landbouwpercelen de landbouwkundige bodemkwaliteit goed op orde is (Figuur 3-22). In maximaal 10% van het areaal zijn er aandachtspunten, in het bijzonder gerelateerd aan ondergrondverdensing en de beschikbaarheid van water.



Figuur 3-22. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

3.4 Beoordeling bodemkwaliteit voor water

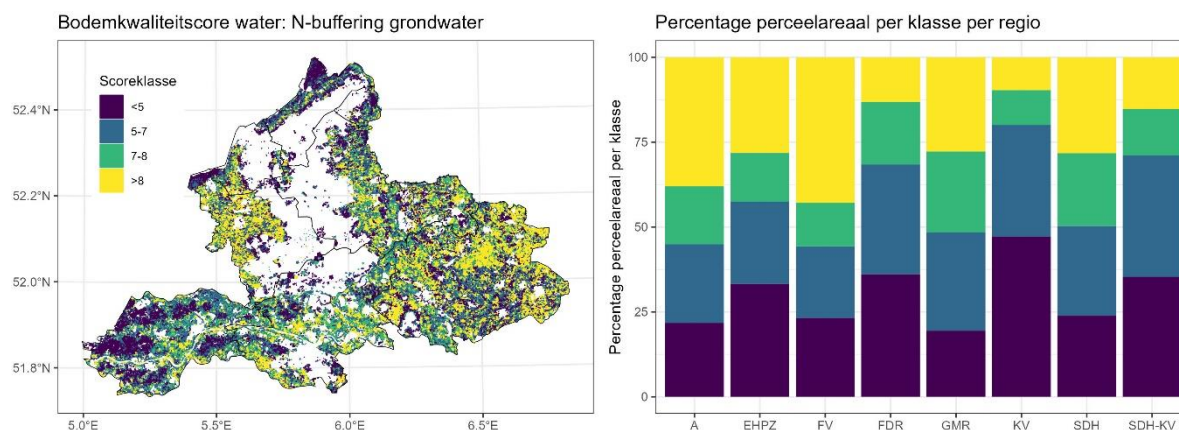
Voor de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen zijn in totaal tien (deels geaggregeerde) indicatoren in kaart gebracht. Dit zijn achtereenvolgens de capaciteit van de bodem om stikstof en/of fosfaat te bufferen in relatie tot grondwater en oppervlaktewater, de mogelijkheid om water vast te houden in de bouwvoor, de mogelijkheid tot grondwateraanvulling, het uit- en afspoelingsrisico voor stikstof of pesticiden en de mogelijkheid om stikstof vast te houden in de bodem. Let wel dat een deel van deze indicatoren inhoudelijk overlapt, maar tegelijkertijd unieke informatie levert over de bijdrage van de bodem aan deze ecosysteemdienst.

3.4.1 Bodemfuncties

Stikstofbuffering grondwater

Het bodembeheer en het bijbehorende bouwplan kan positieve bijdrage leveren aan het voorkomen van stikstofuitspoeling naar het grondwater. Rekening houdend met de regionale opgave is het risico op stikstofuitspoeling in kaart gebracht conform de BBWP-methodiek. De resulterende bodemkwaliteits-score geeft aan of er extra inzet nodig is via maatregelen om het uitspoelen van nitraat te verminderen. Gemiddeld over de provincie varieert de N-bufferingscore van 3,9 tot 8,9 met een gemiddelde van 6,9 (Figuur 3-23). Dat betekent dat er aanvullende maatregelen gewenst zijn om de grondwaterkwaliteit te verbeteren. In gemiddeld 50% van de percelen zijn deze maatregelen

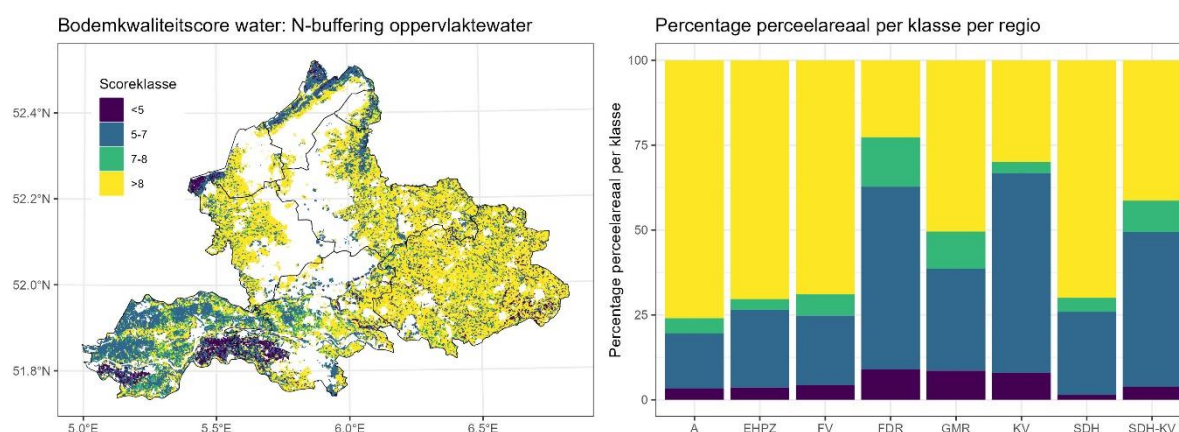
gewenst. De kleinste opgave ligt in de Achterhoek en Fruitdelta. De grootste opgaven liggen in het zuidwesten van de provincie, waarbij met name de invloed van het landgebruik groot is.



Figuur 3-23. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor N-buffering grondwater in relatie tot de ESD waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Stikstof- en fosfaatbuffering oppervlaktewater

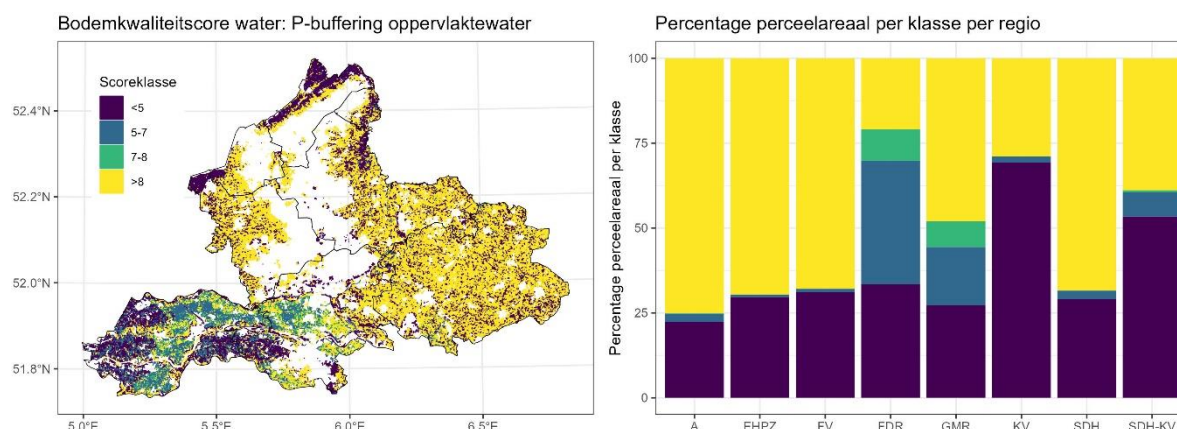
Voor de kwaliteit van het oppervlaktewater is het beeld positiever: het overgrote merendeel van de landbouwpercelen heeft een bodemkwaliteitscore hoger dan 8 (figuur 3-24). In de helft van de regio's zijn maatregelen nodig op 25% van de landbouwpercelen, voornamelijk bouwland. De laagste scores zijn te vinden op de kleigronden in het Noorden en het Zuidwesten van de provincie, vooral in de regio's FDR, KV en SDH-KV. Dit hangt samen met het grotere risico op oppervlakkige afspoeling op deze percelen.



Figuur 3-24. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor N-buffering oppervlaktewater in relatie tot de ESD waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Voor fosfaat lijkt het ruimtelijk patroon sterk op dat van stikstof, waarbij het risico op fosfaatsuutspoeling veel sterker wordt gestuurd door perceelseigenschappen dan voor stikstof. Dit zorgt ervoor dat in vrijwel alle regio's circa 25% van de landbouwpercelen een erg hoog risico heeft

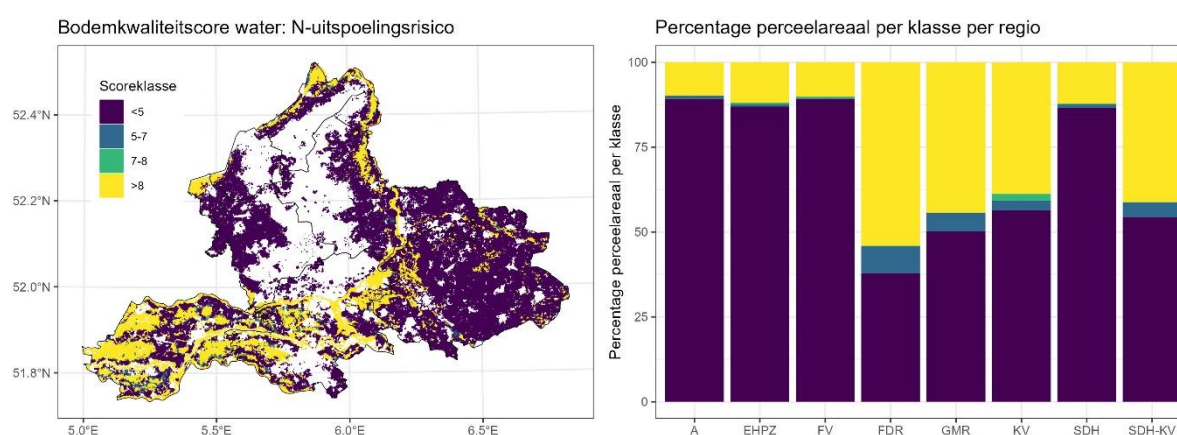
voor de af- en uitspoeling van fosfaat (Figuur 3-25). Dit resulteert in een lage bodemkwaliteitsscore voor fosfaatbuffering. De grootste risico's treden op in de gebieden Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV), en FruitDelta Rivierenland (FDR).



Figuur 3-25. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor P-buffering oppervlaktewater in relatie tot de ESD waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

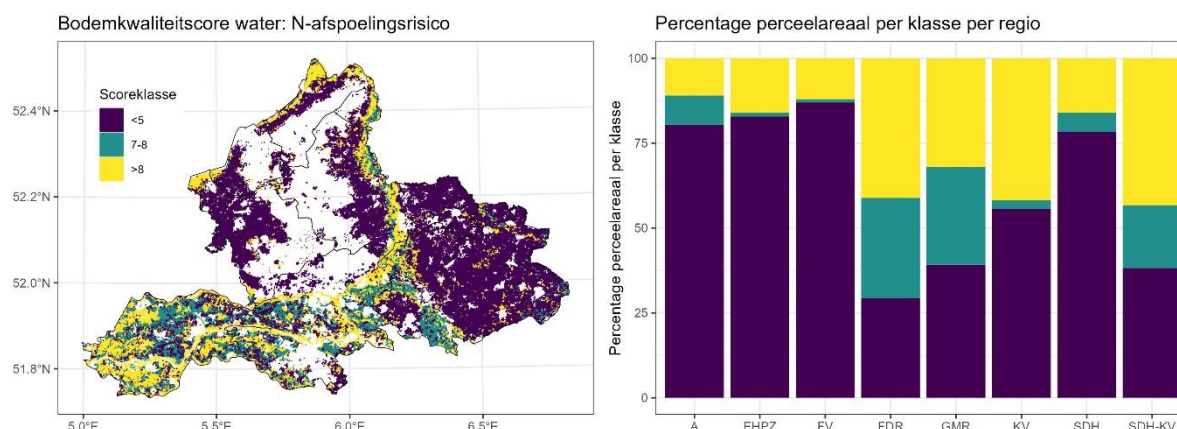
Het uit- en afspoelingsrisico voor stikstof

Als een landbouwperceel weinig stikstof vasthoudt dan wel veel stikstof nalevert, dan is het risico op uit- en afspoeling groot. Hiervoor zijn in BLN 2.0 ook twee indicatoren opgenomen. Deze focussen zich op de daadwerkelijke uitspoeling van nitraat afkomstig van het N-leverend vermogen van de bodem als ook van de gegeven stikstofbemesting. De uitspoeling van stikstof uit de bodem kan sterk variëren, van een score van <1 tot >9,9, maar gemiddeld is de uitspoeling voldoende tot goed (Figuur 3-26). Gemiddeld ligt de score voor heel provincie Gelderland op een score van 9,5. De grootste risico's op nitraatverliezen treden op in het Oosten van de provincie, en dan met name in de regio's Achterhoek, EHPZ, de Fruitvallei en de Stedendriehoek.



Figuur 3-26. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor het risico op nitraatuitspoeling naar het grondwater in relatie tot de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

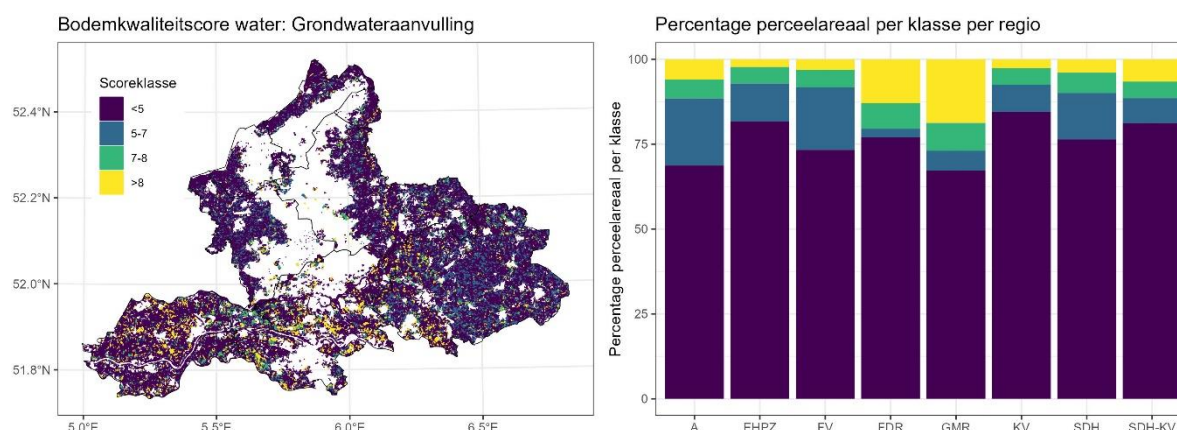
Voor het oppervlaktewater is er opnieuw sprake van een grote spreiding en is het beeld vergelijkbaar met dat voor nitraat (Figuur 3-27). In het grootste deel van de landbouwpercelen ligt er een opgave om de emissie van stikstof richting het oppervlaktewater te beperken.



Figuur 3-27. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor het risico op stikstofuitspoeling naar het oppervlaktewater in relatie tot de ESD waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Grondwateraanvulling

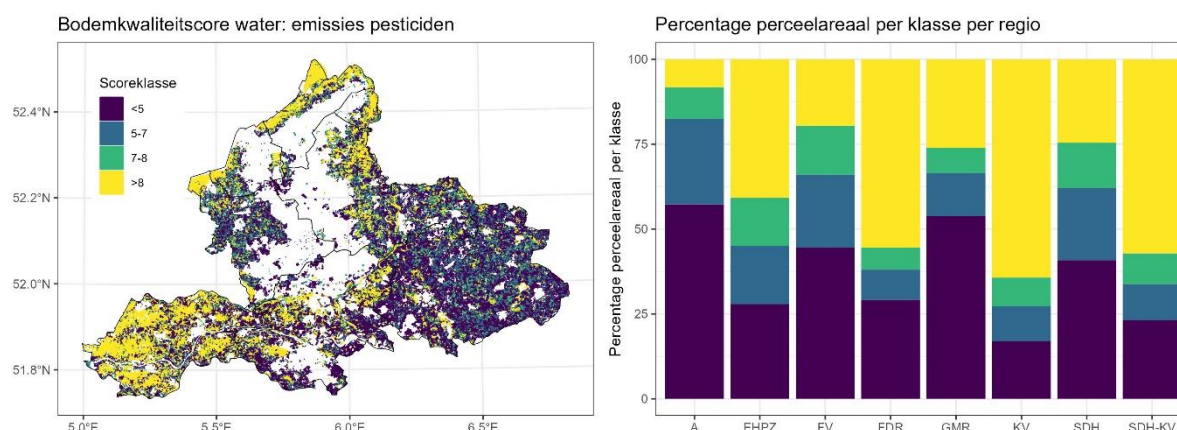
Het netto neerslagoverschot dat uit de bodem kan infiltreren naar het grondwater kan sterk variëren afhankelijk van het bouwplan, en krijgt een kwaliteitsscore van 2,1 tot 8,5. Gemiddeld is de grondwateraanvulling relatief laag (Figuur 3-28); de score voor heel provincie Gelderland ligt gemiddeld op een 3,1. Dit betekent dat er veel water verdampt en afgevoerd wordt via het oppervlaktewater, en dat een goede bodemstructuur als ook gewasvolgorde aandacht behoeven in relatie tot het vasthouden en infiltreren van water. De verschillen tussen de regio's zijn minimaal.



Figuur 3-28. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor het aanvullen van het grondwater in relatie tot de ESD waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Pesticiden

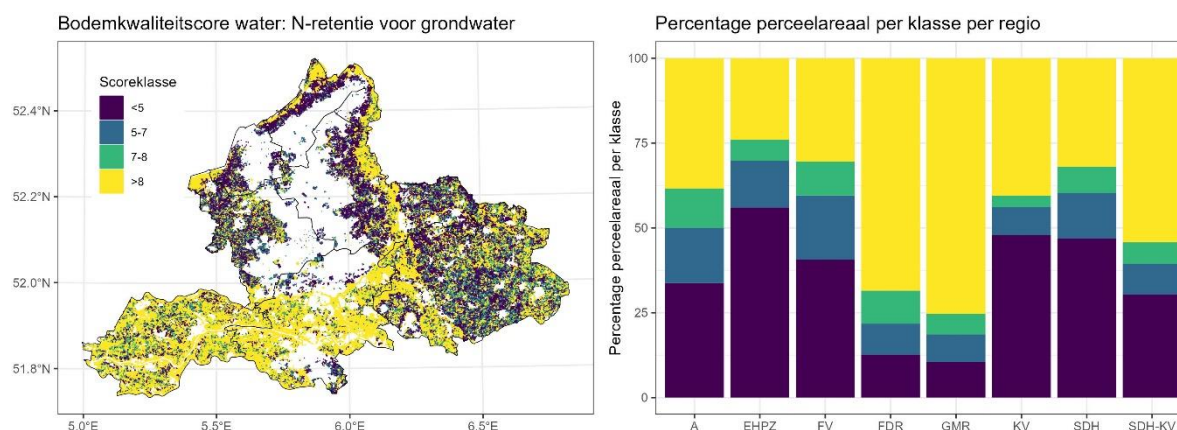
De functie voor pesticiden betreft de potentie van de bodem om pesticiden te adsorberen dan wel af te breken. Hierbij heeft een bodem met een hogere score een lager risico op uitspoeling van pesticiden. Voor deze functie is gebruik gemaakt van een worst-case berekening waarbij in beeld wordt gebracht in welke mate de bodem de uitspoeling van pesticiden kan verminderen. De bodemkwaliteitscore die hiervoor in het BLN is opgenomen varieert van <1 tot > 9,5, en ligt gemiddeld op een 5,7. De laagste scores komen voor in het Oosten van de provincie en in het zuidoosten en noorden van de provincie.



Figuur 3-29. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor het risico op uitspoeling van pesticiden naar het grondwater in relatie tot de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

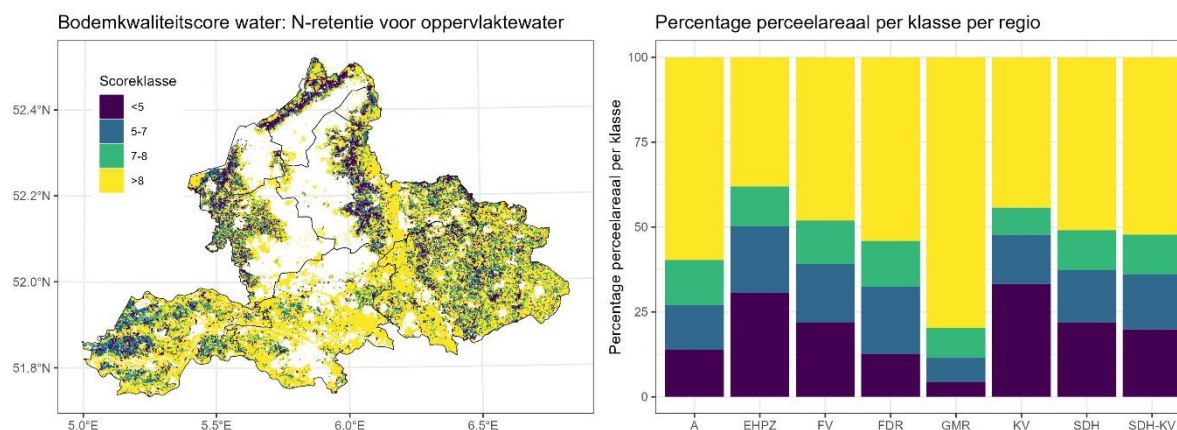
Bijdrage van NLV aan uitspoeling

Ook zonder bemesting zal er stikstof uitspoelen naar grond- en oppervlaktewater. Binnen de BLN zijn hiervoor twee indicatoren overgenomen vanuit de OBI waarbij berekend wordt of, en zo ja hoeveel, stikstof er mineraliseert in de bodem (vanuit de organische stof) en daarna uitspoelt naar het watersysteem. Deze functie heeft dus overlap met de eerdere twee functies voor het uit- en afspoelingsrisico voor nitraat en stikstof.



Figuur 3-30. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor het risico op uitspoeling van nitraat naar het grondwater in relatie tot de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

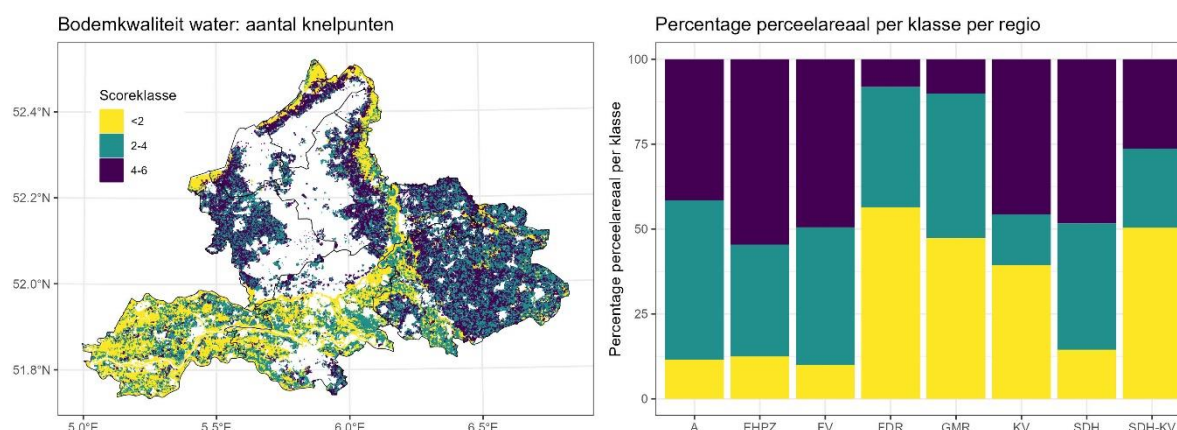
Voor het grondwater is er aanzienlijke spreiding binnen de provincie met de grootste nitraatverliezen in et oosten en noordoosten van de provincie, in het bijzonder in de regio's EHPZ, FV en SDH (Figuur 3-30). Ook hier is het beeld voor het oppervlaktewater positiever, mede gekoppeld aan grondsoort en grondwatertrap. De gemiddelde bodemkwaliteitscore voor de hele provincie is een 8,6, waarbij de score kan variëren van 1,7 tot 9,7.



Figuur 3-31. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit voor het risico op stikstofafspoeling naar het oppervlaktewater in relatie tot de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

3.4.2 Knelpunten bodemkwaliteit

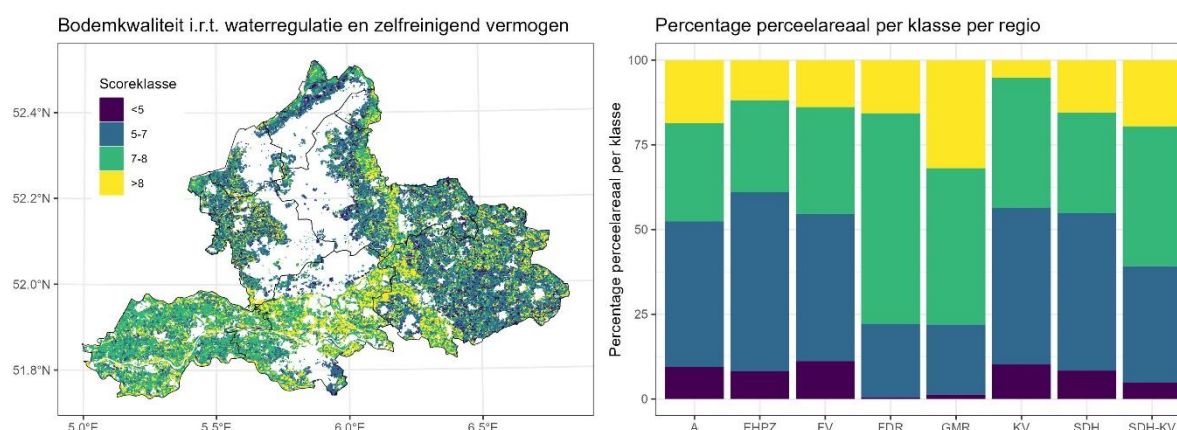
Het aantal knelpunten (die we hier definiëren als scores onder 0,75) worden samengevat in Figuur 3-32. Het overgrote deel van de percelen heeft slechts 1 tot 2 knelpunten (van de in totaal 6 bodemfuncties). Het totaal aantal knelpunten loopt maximaal op tot vier á vijf in minder dan 10% van de percelen. De minste knelpunten zijn te vinden in de regio's FDR en GMR.



Figuur 3-32. Ruimtelijke variatie in het aantal knelpunten in de bodemkwaliteit in relatie tot de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. Een knelpunt is gedefinieerd als een indicator met een score lager dan 7.

3.4.3 Eindbeoordeling bodemkwaliteit voor water

Wanneer de onderliggende bodemkwaliteitsscores voor grondwateraanvulling en buffering van nutriënten en pesticiden worden geaggregeerd via een eenvoudige berekening van de gemiddelde score, dan blijkt dat in meer dan 10-75% van de landbouwpercelen de landbouwkundige bodemkwaliteit redelijk tot goed op orde is (Figuur 3-22). In gemiddeld 20 tot 50% van het areaal zijn er aandachtspunten, in het bijzonder gerelateerd aan de beschikbaarheid van water (en gekoppelde grondwateraanvulling), en deels ook aan de verliezen van nutriënten en pesticiden naar het grondwater.



Figuur 3-33. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen binnen de provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

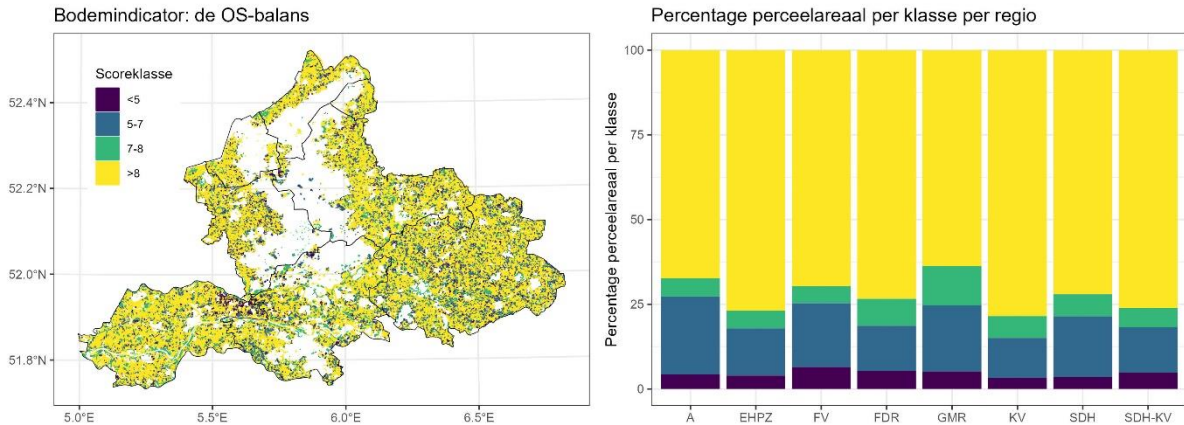
3.5 Beoordeling bodemkwaliteit voor klimaat

Voor het in beeld brengen van de bijdrage van de bodem aan de klimaatopgaves zijn er in de BLN 2.0 drie indicatoren opgenomen. De eerste betreft een eenvoudige koolstofbalans afgeleid van het bouwplan en een gemiddelde bemestingspraktijk in Nederland. De tweede en derde kwantificeren de mate van koolstofverzadiging, daarbij gebruik makend van een empirisch data-gedreven of een procesmatig model.

3.5.1 Bodemfuncties

De koolstofbalans

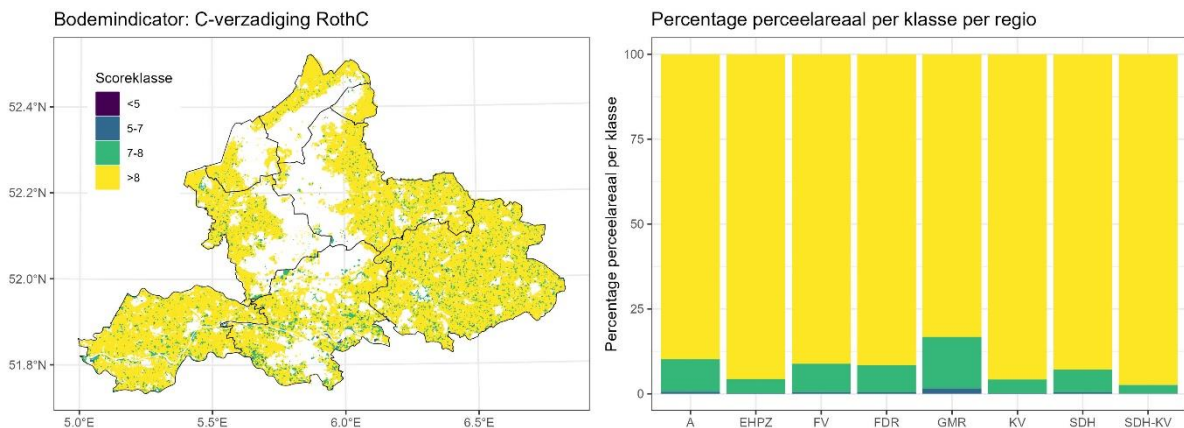
De aanvoer van koolstof wordt sterk bepaald door het bouwplan en de fosfaatruimte. Gemiddeld is de koolstofbalans in de meer dan 90% van de percelen positief, waardoor vrijwel heel de provincie een goede score krijgt voor deze indicator. Er zijn geen sterke regionale verschillen waarneembaar.



Figuur 3-34. Ruimtelijke variatie in de bodemkwaliteitsscore voor een positieve OS-balans in relatie tot de bijdrage aan klimaatdoelstellingen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

De mate van C-verzadiging (RothC)

De bodemindicatoren gerelateerd aan de maximale koolstofopslag varieert van een score van 8,1 tot 9,8, wat laat zien dat het historisch en huidig bodembeheer heeft geresulteerd in relatief hoge organische koolstof gehalten. De indicator is berekend door de verwachte C-voorraad na 50 jaar bij de huidige landbouwpraktijk te delen door de verwachte C-voorraad na 50 jaar na het nemen van de maximale set aan maatregelen. Bij het grootste deel van de landbouwpercelen (95-percentiel) varieert deze fractie tussen 0,87 en 0,96, met een gemiddelde van 0,95. Concreet betekent dit dat het gehalte organische stof *relatief* met maximaal 5 - 13% kan stijgen, waarbij de absolute stijging dus samenhangt met het initiële organische stofgehalte. De variatie tussen de verschillende regio's is niet groot, wat mede samenhangt met de diversiteit van maatregelpakketten die inzetbaar zijn om een verhoging van de koolstofvoorraad te realiseren.

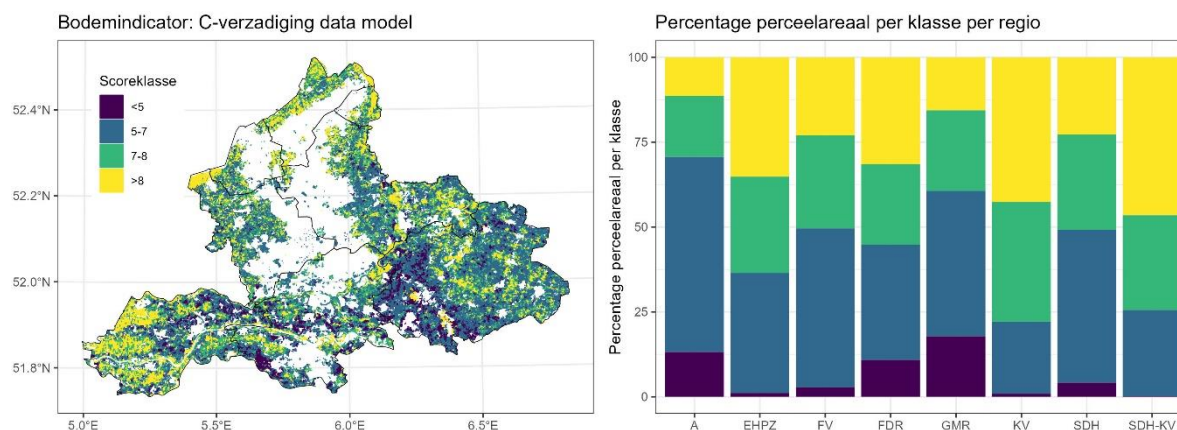


Figuur 3-35. Ruimtelijke variatie in de bodemindicator C-verzadiging in relatie tot de bijdrage aan klimaatdoelstellingen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

De mate van C-verzadiging (data-driven)

Gebruik makend van een data-model blijkt dat de huidige C-verzadiging over de provincie varieert tussen de 47 en 91% voor het merendeel van de landbouwpercelen. Deze indicator geeft niet aan wat

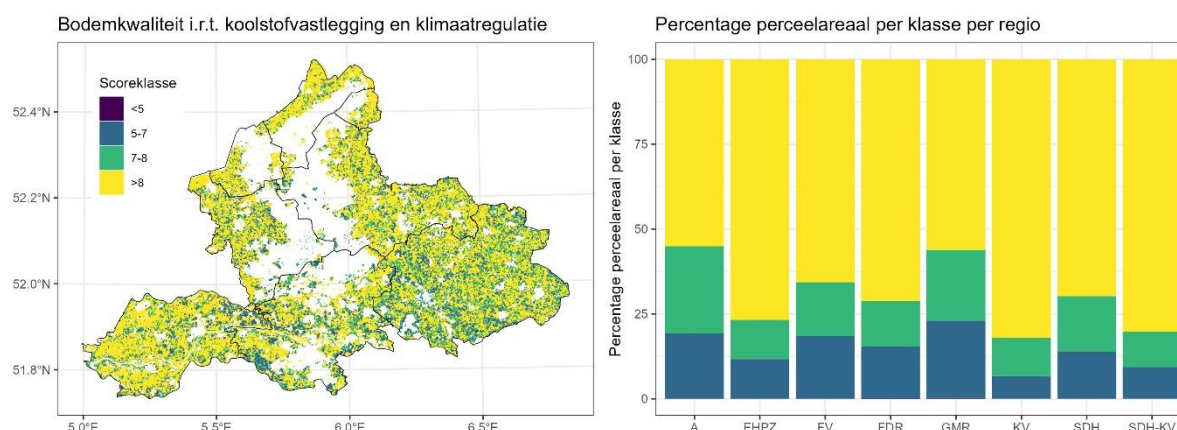
er binnen de huidige landbouwpraktijk mogelijk is via inzet van maatregelen, maar is meer gericht op het lange termijn perspectief (> 100 jaar) waarbij er geen beperkingen zijn qua mestgebruik, landgebruik en waterbeheer. Daarom levert deze indicator lagere scores op dan de indicator voor C-verzadiging afgeleid van RothC. Tegelijkertijd is het wel zo dat de daadwerkelijke vastlegging van koolstof heel beperkt zal zijn in percelen waarbij deze theoretische verzadiging hoog is. Dat is het geval in meer dan 25% tot 40% van de percelen. De potentie voor extra koolstofopslag is daar beperkt. In vrijwel elke regio is er echter nog maatwerk mogelijk omdat in zeker 50% van alle percelen nog (theoretische) mogelijkheden bestaan om extra koolstof op te slaan.



Figuur 3-36. Ruimtelijke variatie in de bodemindicator C-verzadiging in relatie tot de bijdrage aan klimaatdoelstellingen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed, hoge verzadiging) en 0 (slecht, lage verzadiging).

3.5.2 Eindbeoordeling bodemkwaliteit voor klimaat

De huidige bodemkwaliteit in relatie tot de klimaatopgave is positief omdat veel landbouwpercelen anno 2023 een positieve organische stofbalans hebben, een hoog organische stofgehalte en een hoge mate van C-verzadiging. Meer dan 50% van alle percelen heeft daarom ook een bodemkwaliteitsscore hoger dan een 8 (Figuur 3-37). De variatie binnen de provincie is echter groot. Per regio is 25 tot 45% van de percelen inzetbaar voor maatregelen om de koolstofvoorraad te verhogen.



Figuur 3-37. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

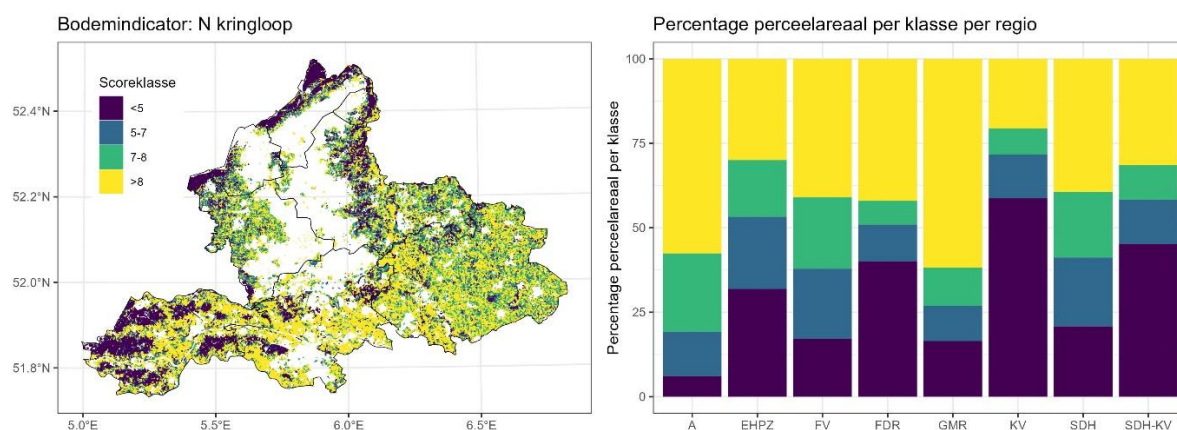
3.6 Beoordeling bodemkwaliteit voor nutriëntenkringlopen

In deze studie zijn drie bodemindicatoren gekwantificeerd in relatie tot de bijdrage die de bodem levert aan het faciliteren van de nutriëntenkringloop op het agrarische bedrijf. Als er veel nutriënten aanwezig zijn in de bodem is het risico op een lage benutting groot, en daarmee samenhangend ook de verliezen naar het milieu. Deze indicatoren zijn opgesteld voor stikstof, fosfaat en kalium.

3.6.1 Bodemfuncties

Stikstof

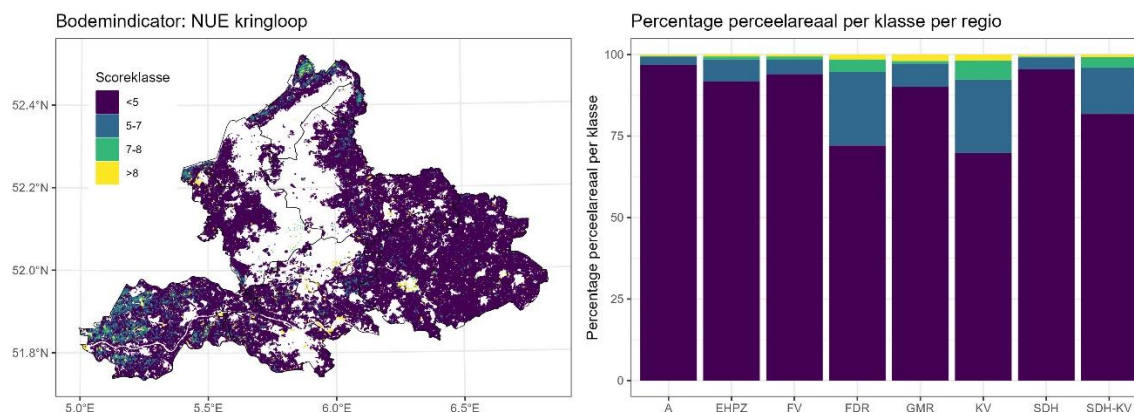
In meer dan de helft van de provincie is de bodemkwaliteit qua stikstof goed op orde. In de OS-rijke gebieden in het noordwesten en zuidoosten zijn de stikstofvoorraden in de bodem hoog. Dit is enerzijds een positief aspect van een vruchtbare bodem, maar tegelijkertijd is de benutting van de gegeven stikstofmeststoffen laag. Met andere woorden, hier is het belangrijk om de aanwezige meststoffen zo in te zetten dat de totale bemesting plus aanbod vanuit de bodem aansluit op de gewasbehoefte. Hier liggen met name kansen voor de regio's KV, FDR en SDH-KV.



Figuur 3-38. Ruimtelijke variatie in de bodemindicator N-kringloop in relatie tot de bijdrage aan de ecosysteemdienst faciliteren nutriëntenkringlopen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Nutriëntenbenutting

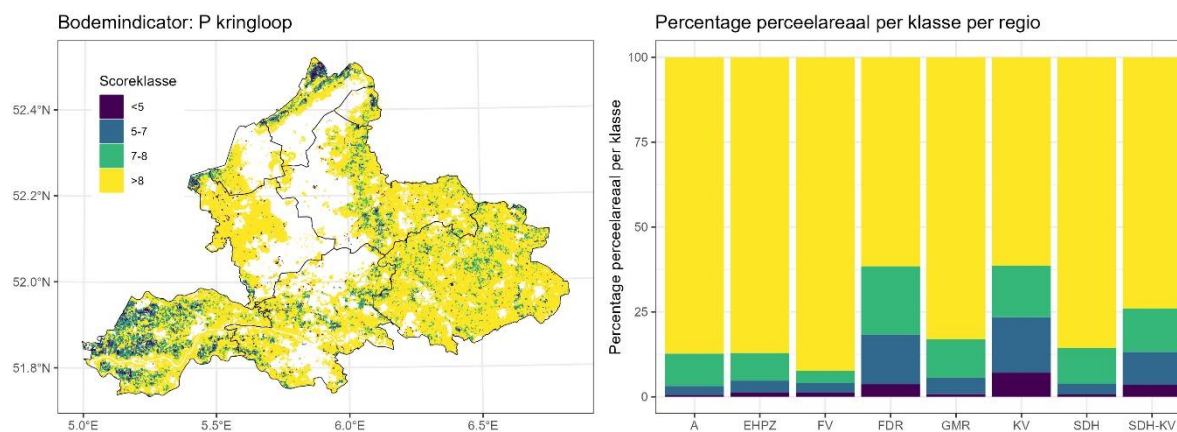
Op basis van de N- en P-levering van de bodem en de gewasbehoefte wordt ook de N-benutting in kaart gebracht conform de methodiek van het BBWP. Hieruit blijkt dat er op vrijwel alle percelen een kans ligt om de benutting te vergroten.



Figuur 3-39. Ruimtelijke variatie in de bodemindicator NUE-kringloop in relatie tot de bijdrage aan de ecosysteemdienst faciliteren nutriëntenkringlopen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Fosfaat

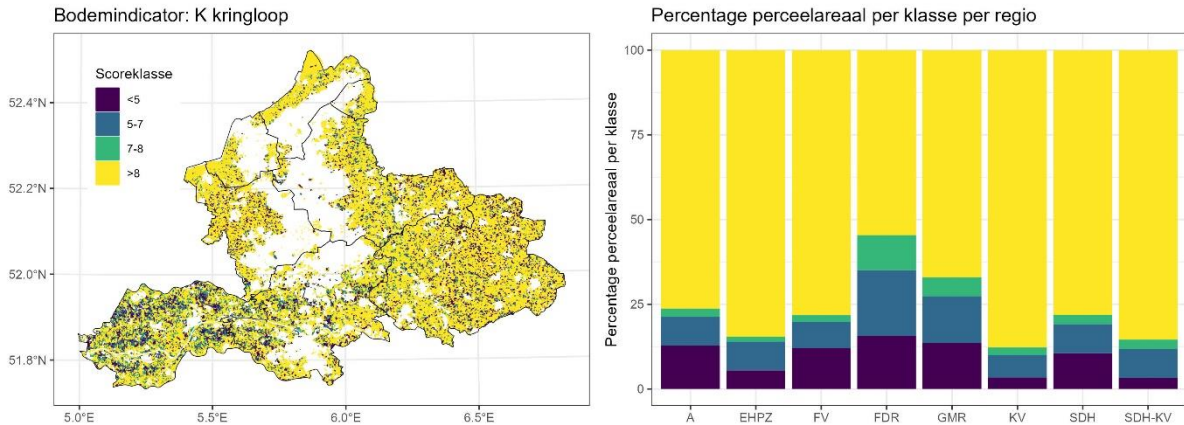
Fosfaat laat een ander beeld zien dan stikstof. Voor fosfaat heeft het merendeel van de percelen een goede fosfaatbuffering en komen erg hoge P-gehalten in de bodem niet voor. Gegeven de eerdere P-benutting is hier nog ruimte voor een goede bemestingspraktijk.



Figuur 3-40. Ruimtelijke variatie in de bodemindicator P-kringloop i.r.t. de bijdrage aan de ecosysteemdienst faciliteren nutriëntenkringlopen, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van het perceelareaal binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Kalium

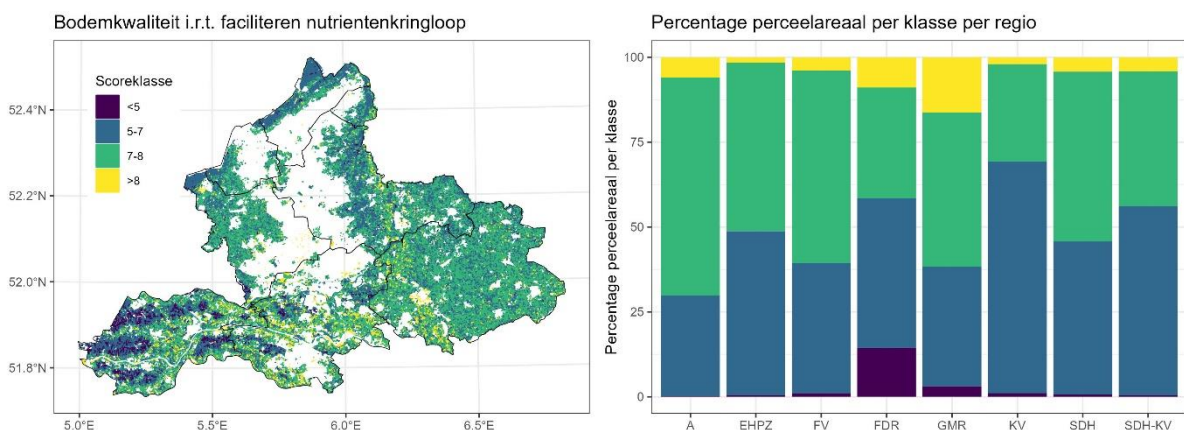
Voor de bodemindicator kalium-kringloop is een vergelijkbaar patroon waarneembaar als voor fosfaat. Wel is de ruimtelijke variatie vele malen groter (Figuur 3-41). Tegelijkertijd is de bodemtoestand optimaal in het licht van de gewenste facilitering van de nutriëntenkringloop: meer dan 75% van alle landbouwpercelen in de regio's krijgen een score hoger dan een 8.



Figuur 3-41. Ruimtelijke variatie in de bodemindicator K-kringloop in relatie tot de bijdrage aan de ecosystemedienst faciliteren nutriëntenkringlopen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

3.6.2 Eindbeoordeling bodemkwaliteit

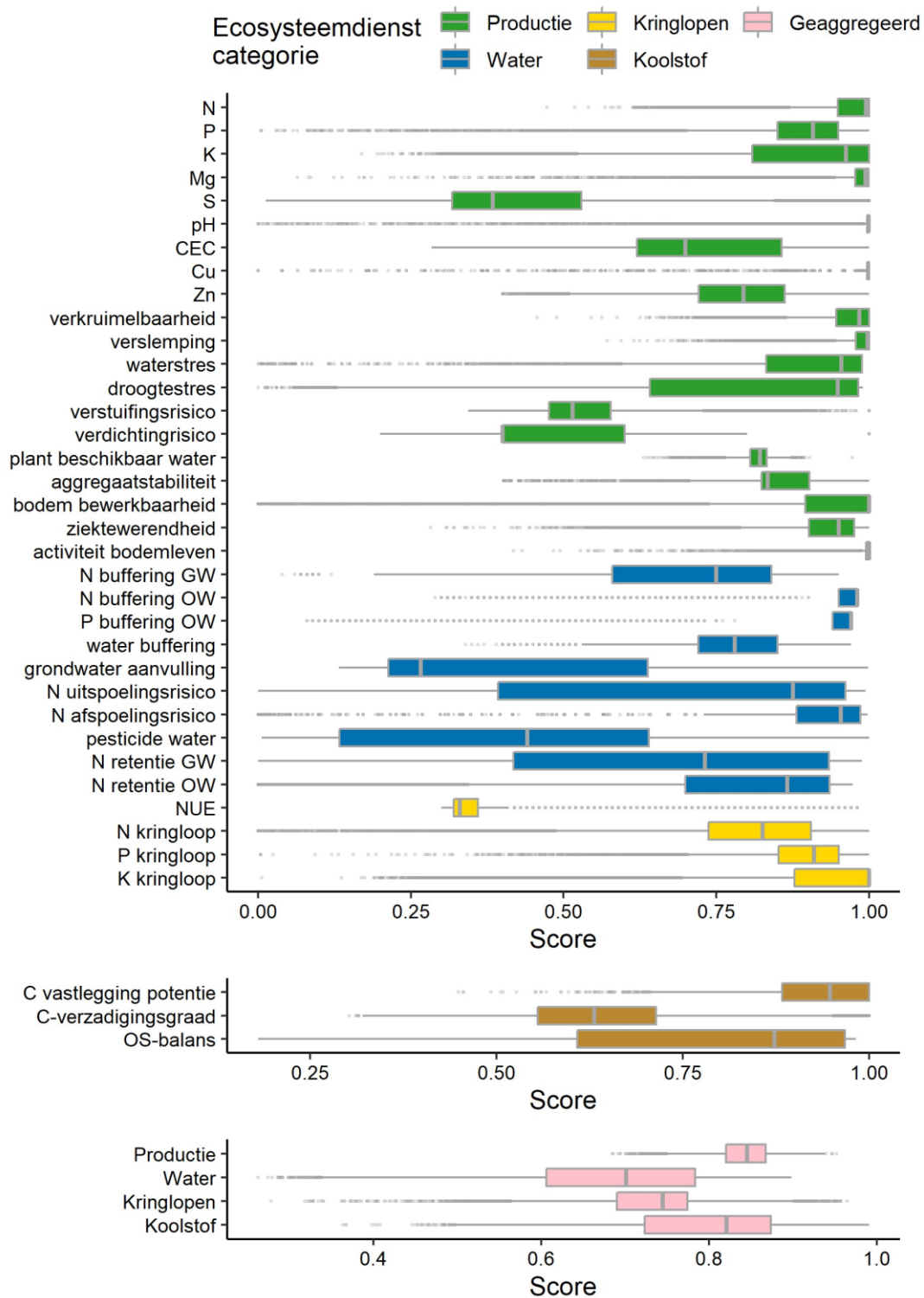
De huidige bodemkwaliteit in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop is positief omdat veel landbouwpercelen anno 2023 een goede bodemtoestand hebben die door de wetgeving rond mestbeleid richting de toestand "neutraal" bewegen. Meer dan 40% van alle percelen heeft daarom ook een bodemkwaliteitsscore hoger dan een 8 (Figuur 3-42). De variatie binnen de provincie is groot, waarbij de grootste uitdagingen in het westen van de provincie liggen.



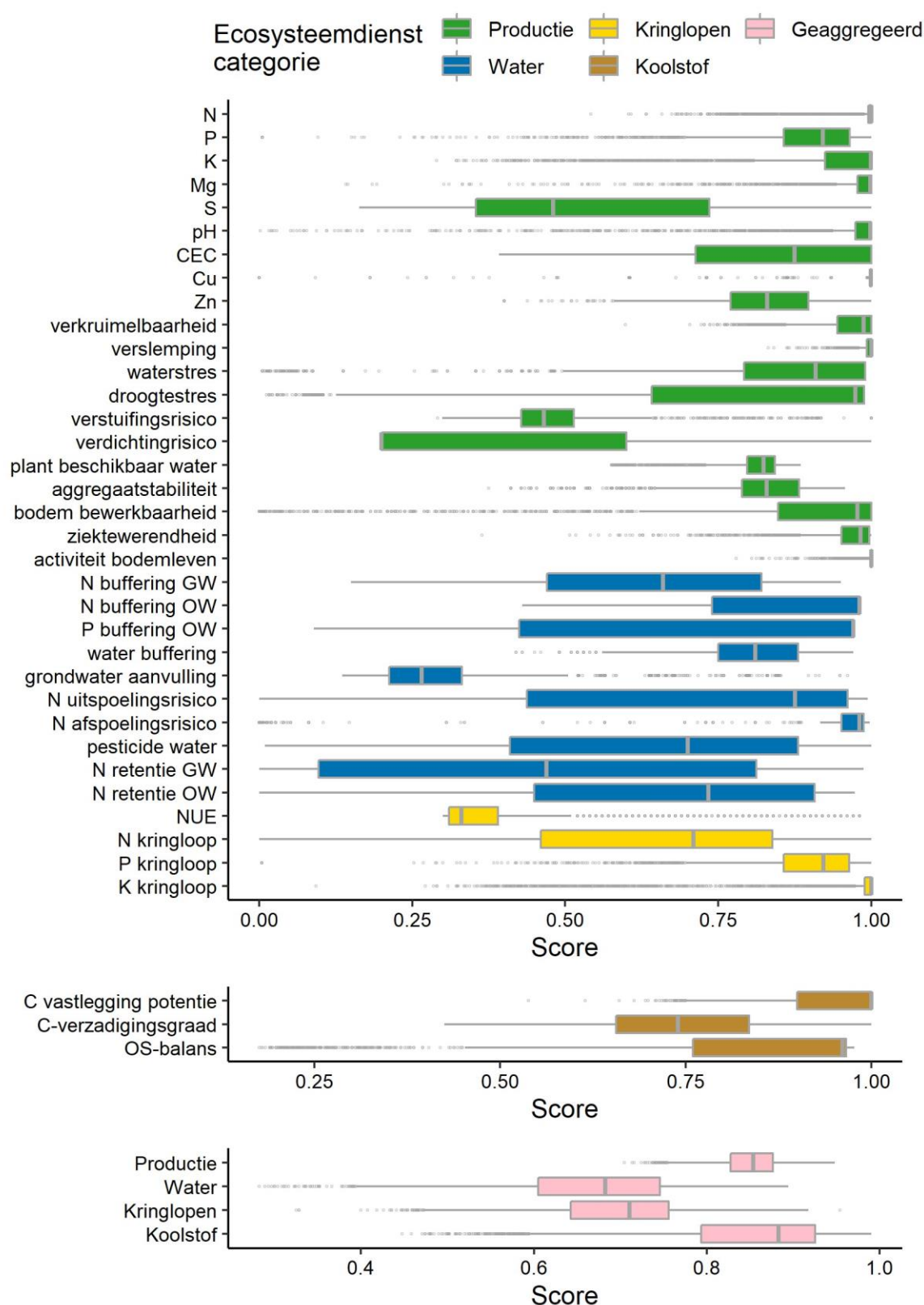
Figuur 3-42. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de ecosystemedienst faciliteren nutriëntenkringloop binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

3.7 Regionale samenvatting via boxplots

De Achterhoek

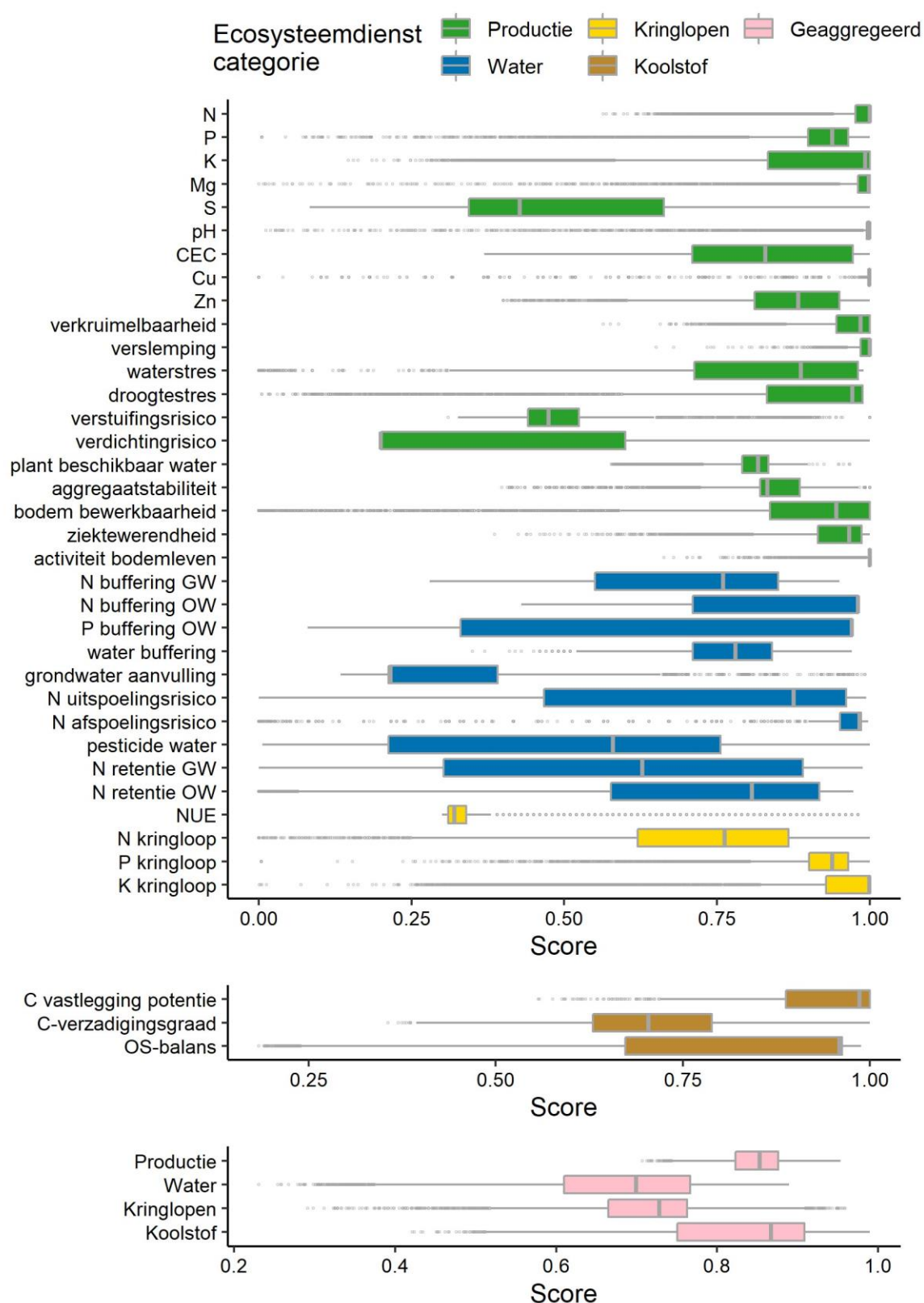


Figuur 3-43. Bodemkwaliteitsscore per indicator en ecosysteemdienst voor de regio Achterhoek. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).



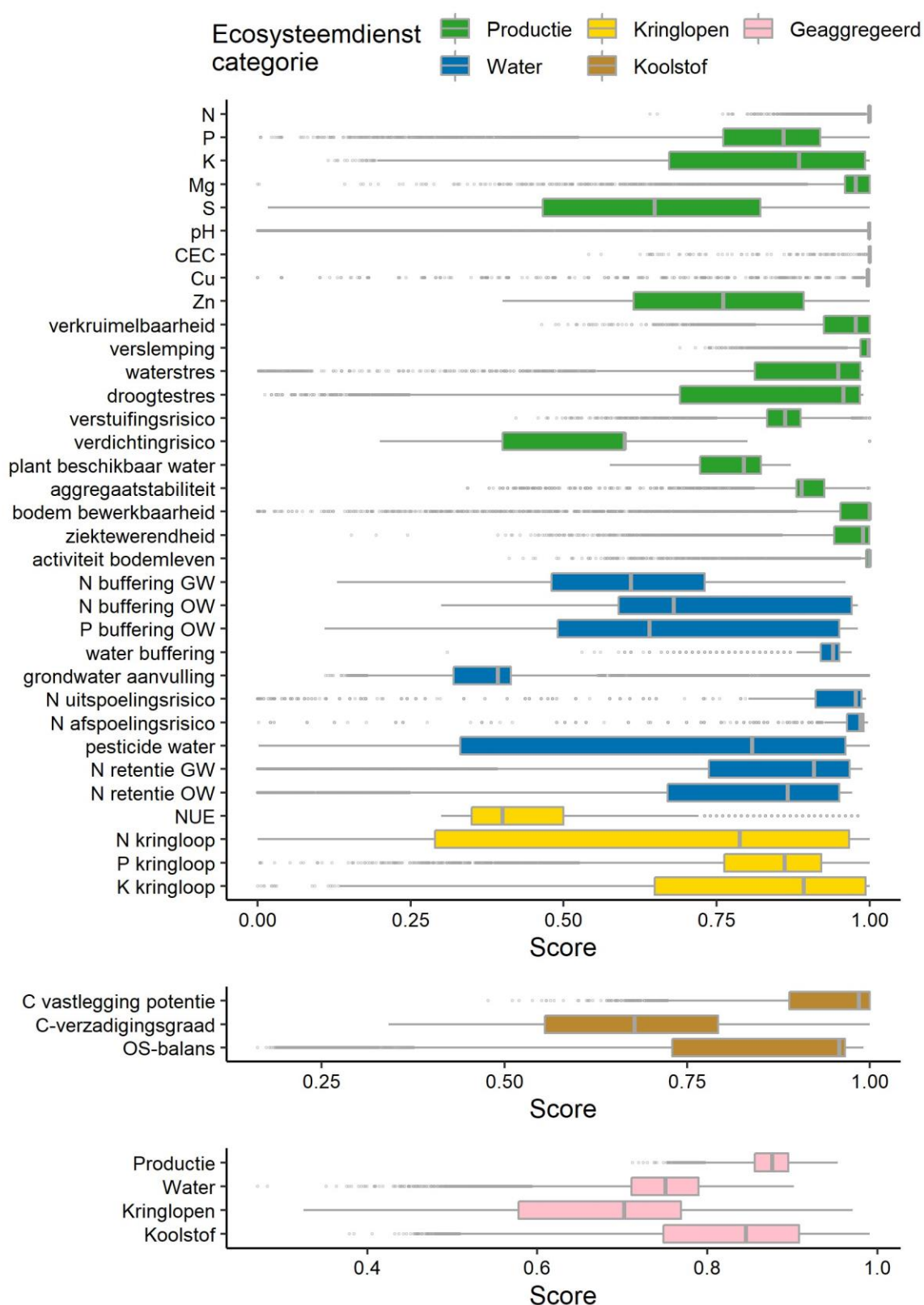
Figuur 3-44. Bodemkwaliteitsscore per indicator en ecosysteemdienst voor de regio EHPZ. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Food valley



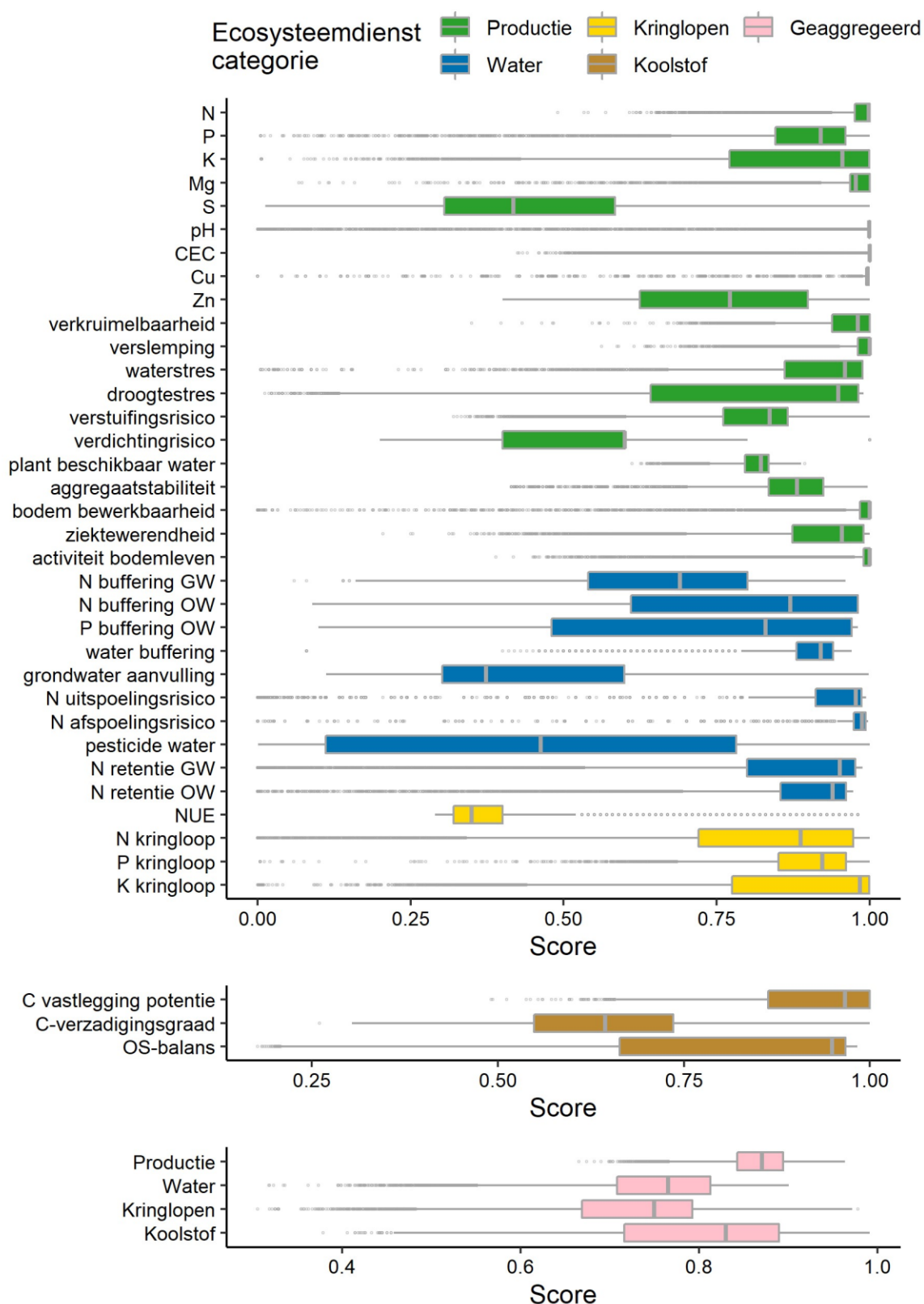
Figuur 3-45. Bodemkwaliteitsscore per indicator en ecosysteemdienst voor de regio Food valley. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

FruitDelta Rivierenland



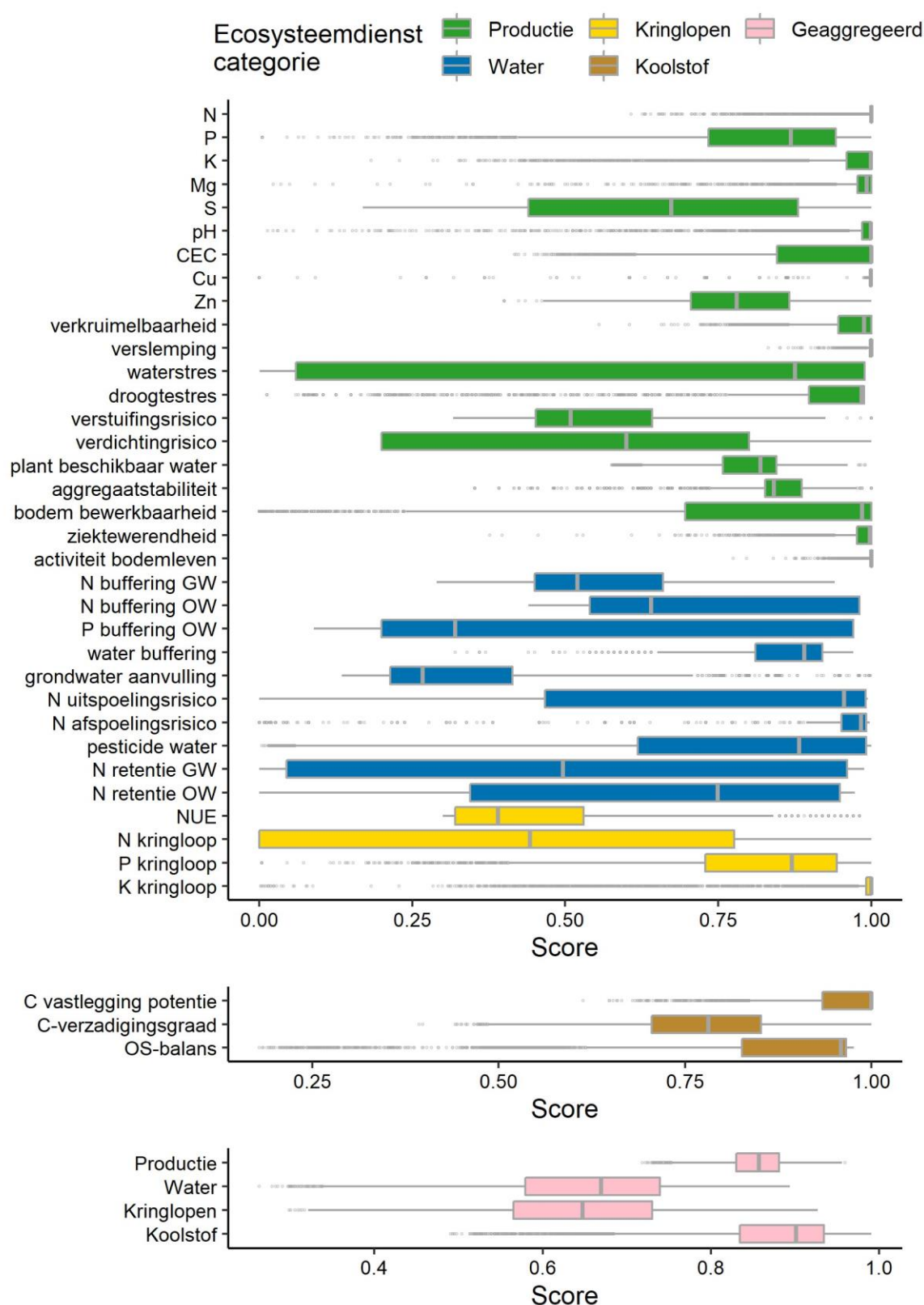
Figuur 3-46. Bodemkwaliteitsscore per indicator en ecosysteemdienst voor de regio FruitDelta Rivierenland. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen



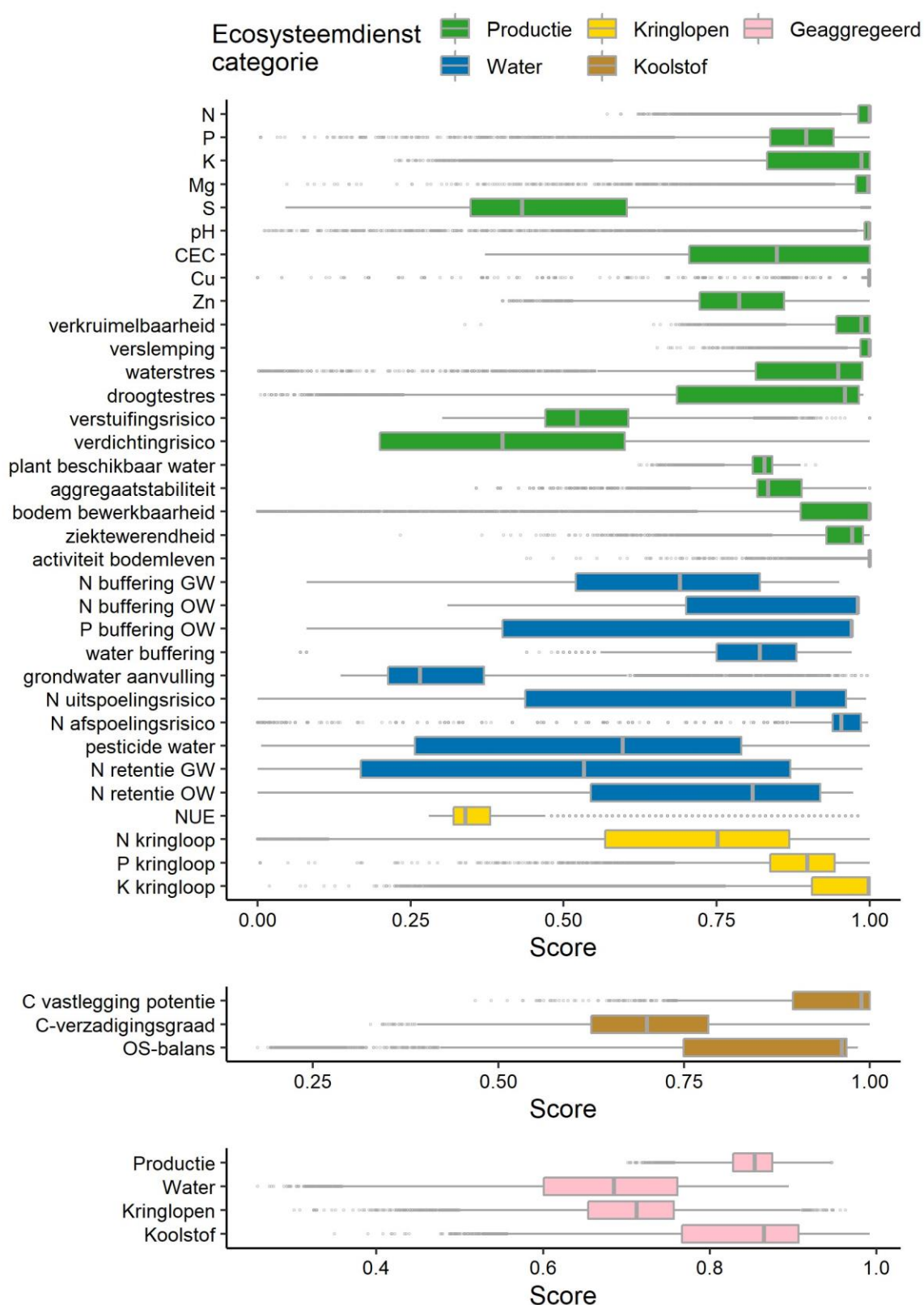
Figuur 3-47. Bodemkwaliteitsscore per indicator en ecosysteemdienst voor de regio Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Kop van de Veluwe



Figuur 3-48. Bodemkwaliteitsscore per indicator en ecosysteemdienst voor de regio Kop van de Veluwe. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Stedendriehoek



Figuur 3-49. Bodemkwaliteitsscore per indicator en ecosysteemdienst voor de regio Stedendriehoek. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

3.8 Maatregelen voor verbetering bodemkwaliteit

Het duurzaam beheren van landbouwbodems vormt de basis voor toekomstbestendige landbouw. Daarnaast is het een voorwaarde voor het realiseren van verschillende opgaven zoals voedselzekerheid en -kwaliteit, klimaat, waterkwaliteit en biodiversiteit. Duurzaam bodembeheer wordt hierbij gedefinieerd als *“als beheer waarmee de ondersteunende, voorzienende, regulerende en culturele diensten die door de bodem worden geleverd, worden gehandhaafd of verbeterd zonder de bodemfuncties die deze diensten mogelijk maken of de biodiversiteit significant te schaden. Het evenwicht tussen de ondersteunende en bevoorradingsdiensten voor plantaardige productie en de regulerende diensten die de bodem levert voor waterkwaliteit en beschikbaarheid en voor de samenstelling van broeikasgassen in de atmosfeer is een bijzondere zorg (FAO, 2017).”*

Er zijn in de literatuur lange lijsten met maatregelen bekend die op basis van expertkennis, modelberekeningen en experimentele data zijn geselecteerd als maatregelen waarmee de bodemkwaliteit kan worden verbeterd. Denk aan bestaande maatregelenlijsten die onderdeel zijn van de BOOT-lijst van DAW (Verloop et al., 2018), programma Slim Landgebruik (Slier et al., 2023), de pilot Ecoregeling, BedrijfsBodemWaterPlan (BBWP), PPS Klimaatadaptatie Open Teelten, PPS Beter BodemBeheer (Noren et al., 2022), en de Open Bodemindex (OBI). Voor een uitgebreide bespreking van maatregelen als ook een eerste werkwijze om deze maatregelen te koppelen aan de kwaliteit van de bodem (zoals deze wordt bepaald door de BLN versie 2) wordt verwezen naar de publicaties van Noren et al. (2022) en Van den Dool et al. (2023).

Op basis van expertkennis van de auteurs, en gebruik makend van de hierboven genoemde studies naar de inzetbaarheid en effectiviteit van maatregelen, is een eerste uitwerking gemaakt van de maatregelen die inzetbaar zijn om de bodemkwaliteit in Gelderland in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten te verbeteren. Deze worden samengevat in de volgende tabel.

Tabel 3-6. Mogelijke bodembeheermaatregelen om een positieve bijdrage te leveren aan de vijf ecosysteemdiensten die de bodem levert: primaire productie (ESD1), waterregulatie en zelfreinigend vermogen (ESD2), koolstofvastlegging en klimaatregulatie (ESD3), bodembiodiversiteit en habitatvoorziening (ESD4) en faciliteren nutriëntenkringloop (ESD5). Gemiddelde bijdrage is beoordeeld als negatief (-), neutraal (0) of positief (+).

Maatregel	Areaal	Bijdrage aan Ecosysteemdienst				
		ESD1	ESD2	ESD3	ESD4	ESD5
Verruiming bouwplan	Areaal waarin fractie gras en rustgewassen < 0,4	-	+	+	+	+
Volg Advies Handboek Bodem en Bemesting voor pH en bemesting	Volledig areaal	+	+	0	-	+
Pas wisselteelt toe en verleng leeftijd grasland	Areaal met continue maïs en tijdelijk grasland	+	+	+	+	+
Inzet van akkerranden en bufferstroken	4% van elk perceel	-	0	0/+	+	0
Vanggewassen en groenbemesters	Volledig areaal bouwland	+	+	+	+/-	+
Aanvoer van (extra) organische stof (compost, bokashi, etc.)	Volledig areaal bouwland	0	0/-	+	+	+
Voorkom verdichting met juiste timing van activiteiten, inzet rijpaden en aanpassing machines	Volledig areaal	+	+	0	0	+
Aanpassen drainage basis en drains	Gedraineerd areaal	0	+	0	0/-	0
Perceel jaarrond groen houden	Volledig areaal	+	+	+	0/+	+
Water vasthouden in perceelsloten	Areaal droogtegevoelige gronden	+	+	0	0	0

Op basis van de onderliggende evaluatie van de chemische, fysische en biologische bodemfuncties blijkt dat er binnen de provincie Gelderland nog verschillende mogelijkheden liggen tot verbeteringen van de bodemkwaliteit. Er zijn ook een paar intrinsieke kenmerken die verbeteringen ingewikkeld maken. Deze worden hier achtereenvolgens per regio besproken. Hierbij wordt gefocust op serieuze knelpunten waarbij de waardering van de bodemfunctie een waarde heeft lager dan 5.

Verschillende regio's in Gelderland hebben te maken met verschillende uitdagingen: de bodems in **de Achterhoek** (zie hoofdstuk 3.7) hebben vooral knelpunten (met een score lager dan 5) rond de beschikbaarheid van zwavel, het voorkomen van ondergrondverdichting, het risico op verstuiving, het tekort aan water gedurende het seizoen (leidend tot droogteschade), de aanvulling van het grondwater, de uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen en een lage stikstofbenutting en hoge uitspoeling naar grondwater. Het meest voorkomende landgebruik is grasland en wisselbouw grasland en maïs. De bodemkwaliteit in de regio is gemiddeld hoog (een score > 8) in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie, waarbij de bodemkwaliteit in relatie tot de overige ecosysteemdiensten varieert met een gemiddelde score van 7 in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen, een score van 7,5 in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop en een score rond 8,2 voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie. Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties. Het voorkomen van deze knelpunten, berekend als percentage van het aanwezige landbouwareaal per landgebruik wordt samengevat in tabel 3.7.

Tabel 3-7. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5) in de regio Achterhoek, uitgesplitst per landgebruikstype. De overige bodemfuncties hebben een score hoger dan 5 in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten.

Bodemfuncties	ESD*	Landgebruik				
		akkerbouw	maïs	gras	wisselbouw	wisselbouw gras-maïs
Areaal (ha)	-	1211	4600	37420	14112	18768
Kaliumlevering	1	3	49	0	5	2
Zwavellevering	1	53	1	94	41	67
Verstuivingsrisico	1	29	42	0	40	44
Verdichting	1	53	68	68	62	69
Droogtestress	1	20	16	18	20	21
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	96	99	28	94	76
Stikstofbuffering grondwater	2	4	42	18	24	24
Uitspoelingsrisico nitraat	2	25	86	23	56	45
Grondwateraanvulling	2	10	5	96	27	66
EOS-balans	3	34	11	1	10	4
N-benutting	4	95	98	98	96	95

* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop

Dit overzicht van knelpunten in bodemkwaliteit betekent dat in deze regio de bemestingspraktijk meer rekening moet houden met de beschikbaarheid van nutriënten in de bodem en dat een verhoging van

het organische stofgehalte positief kan bijdragen aan het watervasthoudend vermogen. Dit speelt vooral in akkerbouw, mais en wisselbouw teelten. Een verhoging van de drainagebasis is zinvol om te zorgen voor hogere grondwaterstanden. Wel blijkt dit een uitdaging in delen van de Achterhoek waarbij aanwezigheid van leemlagen in de ondergrond de opslag van water in de onverzadigde zone beperkt. In de studie van Fujita & Ros (2019) wordt in meer detail ingezoomd naar de bijdrage van maatregelen voor een betere waterkwaliteit. Hieruit bleek dat inzet van maatregelen die ingrijpen op het transport van nutriënten naar het water (denk aan bufferstroken, verbetering van bodemstructuur) als ook een betere inzet van meststoffen (verdeling van mest conform de Goede Landbouwpraktijk) veel perspectief hebben om bij te dragen aan een robuuster bodem- en watersysteem. De meest relevante bodemmaatregelen voor de Achterhoek waren het verminderd scheuren van grasland, inzet van groenbemesters en onderzaai (onder en na maïs), het herverdelen van mest over het bedrijf zodra er hoge P-toestanden voorkomen (dan wel uitmijnen van deze specifieke percelen, d.w.z. het verlagen van de fosfaattoestand) en het zorgen voor een goede bodemstructuur.

Voor de **regio EHPZ** (de gemeenten Ede, Voorst, Brummen, Apeldoorn, Zutphen en Lochem) spelen qua bodemvruchtbaarheid vergelijkbare knelpunten als in regio de Achterhoek. Het belangrijkste landgebruik in deze regio is grasland en wisselbouw gras en maïs. Er liggen in de regio knelpunten voor het faciliteren van nutriëntenkringlopen voor fosfaat en te lage aanvoer van organische stof, met name in de akkerbouw. De bijdrage van de bodem aan het faciliteren van de kringloop van nutriënten ligt hier substantieel lager voor stikstof dan in de Achterhoek. Het voorkomen van deze knelpunten wordt samengevat in tabel 3.8.

Tabel 3-8. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5) in de regio EHPZ, uitgesplitst per landgebruikstype. De overige bodemfuncties hebben een score hoger dan 5 in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten.

Bodemfuncties	ESD*	Landgebruik				
		akkerbouw	mais	gras	wisselbouw	wisselbouw gras-maïs
Areaal (ha)	-	59	514	3671	202	777
Kaliumlevering	1	0	25	0	3	3
Zwavellevering	1	43	0	63	18	39
Bodem-bewerkbaarheid	1	0	27	8	12	14
Verstuivingsrisico	1	87	78	0	61	70
Verdichting	1	30	60	76	53	78
Droogtestress	1	47	28	16	39	17
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	95	98	7	83	60
Uitspoelingsrisico nitraat	2	33	85	23	45	48
Stikstofbuffering grondwater	2	3	49	34	25	25
Grondwateraanvulling	2	5	9	99	34	67
EOS-balans	3	35	16	0	22	6
P-kringloop	4	0	1	1	0	1
N-benutting	4	0	98	90	92	93

* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop

De bodemkwaliteit in de regio is gemiddeld hoog (een score > 8) in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie, waarbij de bodemkwaliteit in relatie tot de overige ecosysteemdiensten varieert met een gemiddelde score van 6,8 in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen, een score van 7,1 in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop en een score rond 8,8 voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie. Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties (Tabel 3.8). Het beoogde maatregelenpakket om de bodemkwaliteit te verbeteren is daarmee vergelijkbaar met die van de Achterhoek, waarbij extra aandacht nodig is voor de akkerbouwmatige teelten en voor maatregelen waarmee de N-benutting wordt verhoogd. Een hogere EOS-balans (via aanvoer van gewasresten, meer granen in het bouwplan of meer wisselbouw en inzet van compost) verbetert de bewerkbaarheid, de droogtestress, de zwavel-levering en vermindert het risico op uitspoeling van pesticiden. De huidige bijdrage van bodems aan de klimaatopgave is hoger dan die in de Achterhoek, er is hierdoor minder urgentie voor extra koolstof-opslag.

Voor de **regio Food Valley** spelen ook vergelijkbare knelpunten in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie zoals de beschikbaarheid van zwavel en het voorkomen van verdichting. Ook hier is het belangrijkste landgebruik grasland en wisselbouw teelt van gras en maïs. Onder akkerbouw en maïs spelen er specifieke problemen rond de aanvoer van voldoende organische stof, hoge fosfaatvoorraden (in akkerbouw) en bodem-bewerkbaarheid (maïs). Het uitspoelingsrisico voor nitraat en pesticiden is hoog in de maisteelt als ook in wisselbouw teelten. Onder grasland speelt met name de grondwateraanvulling, de zwavellevering en ondergrondverdichting een rol. Het voorkomen van deze knelpunten, berekend als percentage van het aanwezige landbouwareaal per landgebruik wordt samengevat in tabel 3.9.

Tabel 3-9. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5) in de regio Food Valley, uitgesplitst per landgebruikstype. De overige bodemfuncties hebben een score hoger dan 5 in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten.

Bodemfuncties	ESD*	Landgebruik				
		akkerbouw	maïs	gras	wisselbouw	wisselbouw gras-maïs
Areaal (ha)		376	2173	11649	2045	3502
Kaliumlevering	1	3	50	1	3	3
Zwavellevering	1	8	0	80	29	53
Bodem-bewerkbaarheid	1	0	34	3	11	12
Verdichting	1	51	74	76	57	79
Verstuivingsrisico	1	49	76	0	63	74
Waterstress	1	10	24	14	8	6
Uitspoelingsrisico nitraat	2	25	90	13	59	42
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	96	98	15	93	77
Grondwateraanvulling	2	14	5	98	26	68
EOS-balans	3	51	13	1	24	7
P-kringloop	4	0	0	1	0	0
N-benutting	4	95	98	92	94	97

* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop

De bodemkwaliteit is gemiddeld hoog (een score > 8) in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie, waarbij de bodemkwaliteit in relatie tot de overige ecosysteem-diensten varieert met een gemiddelde score van 7,0 in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen, een score van 7,3 in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop en een score rond 8,7 voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie. Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties (Tabel 3.9).

Van de vier ecosysteem-diensten is er aandacht nodig voor waterregulatie en zelfreinigend vermogen als ook het faciliteren van de nutriëntenkringloop. Het risico op droogteschade is beperkt; wel komt bij een deel van de mais en wisselbouwpercelen natschade voor. Met name in de akkerbouw, mais en wisselbouw is er aandacht nodig voor bodemstructuur en het voorkomen van ondergrondverdichting. Dit vraagt aandacht voor het uitvoeren van bewerkingen op het goede moment (niet onder te natte omstandigheden het land op) als ook de inzet van diep-wortelende gewassen. Onder maïs is het uitspoelingsrisico voor nitraat en pesticiden hoog. Optimaliseer hier de N-bemesting conform de Goede Landbouwpraktijk en zorg voor voldoende aanvoer van organische stof. Aanvoer van zwavel is belangrijk voor de eerste snede in grasland, waarbij extra aandacht nodig is voor kalium in maïs.

In de **regio Fruitdelta Rivierenland** zijn naast een knelpunt voor zwavel ook aandachtspunten voor de pH (onder akkerbouw), zwavel (grasland en wisselbouw) en kalium (onder maïs, grasland en wisselbouw). Vergelijkbaar met de andere regio's zijn er knelpunten rondom stikstofverliezen naar het milieu. De bodemkwaliteit is gemiddeld hoog (een score > 8) in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie, waarbij de bodemkwaliteit in relatie tot de overige ecosysteem-diensten varieert met een gemiddelde score van 7,5 in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen, een score van 7,0 in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop en een score rond 8,5 voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie. Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties. Het voorkomen van deze knelpunten, berekend als percentage van het aanwezige landbouwareaal per landgebruik wordt samengevat in tabel 3.10.

Er is in vergelijking met de andere regio's een veel grotere variatie in de bijdrage van de bodem aan het faciliteren van de nutriëntenkringlopen: de N-benutting is laag terwijl het risico op af- en uitspoeling van stikstof beperkt is door het grote areaal grasland. De grootste uitdaging in deze regio ligt op het faciliteren van de nutriëntenkringlopen (met een score rond de 7, met een lage N-benutting en grote spreiding in N-kringloop indicator), terwijl de landbouwkundige bodemkwaliteit in relatie tot primaire productie op orde is (score rond 9). In deze regio is het daarom belangrijk om de bemestingspraktijk in te vullen conform de in Nederland gangbare adviezen en daarbij te sturen op de juiste meststofkeuze, het tijdstip van toedienen, de wijze van toediening en de juiste gift. Binnen akkerbouw is er aandacht nodig voor de pH van de bodem en de aanvoer van organische stof. Nitraatverliezen binnen akkerbouwmatige teelten en maïs vragen daarnaast aandacht voor de inzet van groenbemesters, gewasvolgorde en een goede bodemstructuur.

Tabel 3-10. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5) in de regio Fruitdelta Rivierenland, uitgesplitst per landgebruikstype. De overige bodemfuncties hebben een score hoger dan 5 in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten.

Bodemfuncties	ESD*	Landgebruik				
		akkerbouw	mais	gras	wisselbouw	wisselbouw gras-mais
Areaal (ha)	-	7014	1757	23427	4638	5138
Kaliumlevering	1	10	29	13	9	16
Zwavellevering	1	15	0	32	21	18
Zuurgraad	1	40	0	0	7	0
Verdichting	1	13	40	32	29	36
Droogtestress	1	21	10	9	13	10
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	40	97	8	74	44
Stikstof retentie grondwater	2	35	30	5	14	12
Uitspoelingsrisico nitraat	2	49	10	0	13	2
Grondwateraanvulling	2	61	5	98	36	65
EOS-balans	3	20	3	1	13	1
N-benutting	4	81	77	73	73	65

* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop

In de regio **Groene Metropool Arnhem – Nijmegen** is er aandacht nodig voor het uitspoelingsrisico van pesticiden en stikstof en de aanvoer van organische stof voor alle akkerbouwmatige teelten inclusief wisselbouw. Daarnaast zijn er in vrijwel alle teelten knelpunten rond de beschikbaarheid van zwavel en kalium en de verdichting van de ondergrond. De bodemkwaliteit is gemiddeld hoog (een score > 8) in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie, waarbij de bodemkwaliteit in relatie tot de overige ecosysteemdiensten varieert met een gemiddelde score van 7,7 in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen, een score van 7,5 in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop en een score rond 8,3 voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie. Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties. Het voorkomen van deze knelpunten, berekend als percentage van het aanwezige landbouwareaal per landgebruik wordt samengevat in tabel 3.11.

De relatieve bijdrage van de bodem aan de vier ecosysteemdiensten is vergelijkbaar met de Achterhoek, met de hoogste kwaliteit in relatie tot primaire productie, gevolgd door koolstofvastlegging en klimaatregulatie (beide met een score groter dan 8). De bijdrage in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen dan wel het faciliteren van de nutriëntenkringloop zijn vergelijkbaar. Het totaal aantal knelpunten is lager dan de eerder beschreven regio's. Droogte- en natschade komt vrijwel niet voor. Voor de akkerbouwmatige teelten is het belangrijk om de Goede Landbouwpraktijk te volgen qua hoeveelheid en type bemesting om zo aanwezige tekorten voor zwavel, kalium en organische stof te compenseren. Hiermee kan ook het risico op nitraatuitspoeling worden verminderd. Naast bemesting gaat het hier dan ook om de inzet van diep-wortelende gewassen en vanggewassen. Vergelijkbaar met de andere regio's treden in alle teelten risico's op rond de verdichting van de ondergrond; hiervoor zijn maatregelen inzetbaar rond de juiste timing van werkzaamheden (vermijden van activiteiten onder te natte omstandigheden), de grootte en zwaarte

van het ingezette materiaal als ook de inzet van gewassen die de impact van bodemverdichting kunnen verminderen.

Tabel 3-11. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5) in de regio Groene Metropool Arnhem - Nijmegen, uitgesplitst per landgebruikstype. De overige bodemfuncties hebben een score hoger dan 5 in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten.

Bodemfuncties	ESD*	Landgebruik				
		akkerbouw	mais	gras	wisselbouw	wisselbouw gras-mais
Areaal (ha)	-	5202	1328	18024	6855	3604
Kaliumlevering	1	18	39	5	9	10
Zwavellevering	1	56	2	69	62	43
Verdichting	1	24	36	36	39	40
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	81	99	25	92	73
Uitspoelingsrisico nitraat	2	26	21	9	22	14
Stikstof retentie grondwater	2	9	24	8	11	17
Grondwateraanvulling	2	24	6	99	32	64
EOS-balans	3	17	4	1	11	2
N-kringloop	4	0	0	30	1	6
N-benutting	4	92	85	94	83	81

* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop

In de **regio Kop van de Veluwe** zijn er verschillende uitdagingen rondom de bodemkwaliteit zowel in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie als ook de waterregulatie en zelfreinigend vermogen (Tabel 3.12). Er is hierbij een sterke relatie met het gedeelde gewas. In de akkerbouwmatige teelten is er vaak sprake van een fosfaattekort, voor mais is er sprake van een kaliumtekort en voor zwavel is er vooral een tekort op grasland. Bodemverdichting komt in vrijwel alle teelten voor met uitzondering van de akkerbouw. In tegenstelling daarmee zijn er diverse akkerbouwmatige teelten die gevoelig zijn voor verstuing. In vergelijking met de andere regio's kan er onder maïs en grasland ook natschade ontstaan in een groot aantal percelen. Onder maïs en wisselbouw is er een groot risico op uitspoeling van nitraat. De aanvoer van organische stof is vooral laag op veel akkerbouwmatige percelen.

De bodemkwaliteit is gemiddeld hoog (een score > 8) in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie, waarbij de bodemkwaliteit in relatie tot de overige ecosysteem-diensten varieert met een gemiddelde score van 6,7 in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen, een score van 6,5 in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop en een score rond 9,0 voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie. Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties. Het voorkomen van deze knelpunten, berekend als percentage van het aanwezige landbouwareaal per landgebruik wordt samengevat in tabel 3.12.

Tabel 3-12. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5) in de regio Kop van de Veluwe, uitgesplitst per landgebruikstype. De overige bodemfuncties hebben een score hoger dan 5 in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten.

Bodemfuncties	ESD*	Landgebruik				
		akkerbouw	mais	gras	wisselbouw	wisselbouw gras-mais
Areaal (ha)	-	49	490	7517	516	1332
Fosfaatlevering	1	0	0	8	2	7
Kaliumlevering	1	1	22	0	0	0
Zwavellevering	1	3	0	30	15	15
Bodem-bewerkbaarheid	1	29	28	20	25	31
Verdichting	1	50	55	49	59	63
Verstuivingsrisico	1	46	51	0	57	38
Natschade	1	24	23	48	19	40
Uitspoelingsrisico nitraat	2	44	75	17	60	35
Grondwateraanvulling	2	12	7	99	36	56
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	72	87	4	74	38
Stikstof retentie grondwater	2	36	84	43	58	58
EOS-balans	3	71	16	0	26	4
N-kringloop	4	3	4	72	6	29
P-kringloop	4	0	0	8	4	6
N-benutting	4	96	86	69	84	60

* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop

Voortbouwend op deze analyse van knelpunten betekent dit ook dat de meest geschikte maatregelen variëren binnen de regio. Voor de akkerbouwmatige teelten is het belangrijk om de inzet van dierlijke mest en compost goed te verspreiden binnen het bedrijf waarbij rekening moet worden gehouden met de fosfaatbuffering van percelen. Gecombineerd met de inzet van vanggewassen en het onderwerken van gewasresten kan de aanvoer van organische stof worden verhoogd, en daarmee een positieve bijdrage worden geleverd aan de koolstofopbouw en de afbraak van pesticiden. Op maïsland is het belangrijk om extra kalium te bemesten (na een bodemanalyse) en bij werkzaamheden rekening te houden met de bodemstructuur (voorkom werkzaamheden op te natte grond). Voorkom een te hoge stikstofbemesting (volg dus het bemestingsadvies) om zo de uit- en afspoeling van stikstof te beperken. Voor graslandpercelen is het belangrijk om in het voorjaar ook zwavel te bemesten en moet bodemverdichting worden voorkomen. Bij te natte omstandigheden kan drainage worden aangelegd om zo gewasschade te voorkomen. In de wisselbouwteelten komen meerdere knelpunten voor waarbij kennis van de bodem kan helpen om zo de juiste maatregelen te selecteren.

In de **regio Stedendriehoek** is de relatieve bijdrage van de bodem aan de vier ecosysteemdiensten vergelijkbaar met de regio's EHPZ en de Kop van de Veluwe al zijn verschillen substantieel kleiner.

Opnieuw is aandacht nodig voor verschillende bodemfuncties rond de levering van nutriënten (zwavel en fosfaat), de zuurgraad en het voorkomen van ondergrondverdichting in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie (Tabel 3.13). Er is hierbij een groot verschil tussen de verschillende soorten landgebruik: de beschikbaarheid van nutriënten en de pH zijn vooral een aandachtspunt voor de akkerbouwmatige teelten. Voor de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen is er aandacht nodig voor de impact op het grondwatersysteem qua stikstof en gewasbeschermingsmiddelen en de grondwateraanvulling. Op alle niet-graslandpercelen is het gewenst om het organische stofgehalte te verhogen om zo het risico op uitspoeling van pesticiden te verlagen en extra koolstof vast te leggen voor het klimaat. Gekoppeld aan de beschikbaarheid van nutriënten zijn in deze regio specifieke knelpunten rond te lage of te hoge voorraden van N, P en K.

De bodemkwaliteit is gemiddeld hoog (een score > 8) in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie, waarbij de bodemkwaliteit in relatie tot de overige ecosysteem-diensten varieert met een gemiddelde score van 7,2 in relatie tot waterregulatie en zelfreinigend vermogen, een score van 7,0 in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop en een score rond 8,9 voor koolstofvastlegging en klimaatregulatie. Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties. Het voorkomen van deze knelpunten, berekend als percentage van het aanwezige landbouwareaal per landgebruik wordt samengevat in tabel 3.13.

Tabel 3-13. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5) in de regio Stedendriehoek, uitgesplitst per landgebruikstype. De overige bodemfuncties hebben een score hoger dan 5 in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten.

Bodemfuncties	ESD*	Landgebruik				
		akkerbouw	mais	gras	wisselbouw	wisselbouw gras-mais
Areaal (ha)	-	65	302	2095	178	297
Zwavellevering	1	26	0	28	17	25
Fosfaatlevering	1	0	0	4	4	1
Zuurgraad	1	38	0	1	1	0
Verstuivingsrisico	1	41	32	0	10	10
Verdichtingsrisico	1	37	42	51	47	49
Uitspoelingsrisico nitraat	2	44	57	28	17	28
Grondwateraanvulling	2	23	4	99	46	66
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	77	98	4	58	47
Stikstof retentie grondwater	2	20	54	11	23	17
EOS-balans	3	67	17	0	16	6
N-kringloop	4	0	0	61	20	4
P-kringloop	4	0	0	4	6	1
K-kringloop	4	5	21	0	0	7
N-benutting	4	100	96	78	83	87

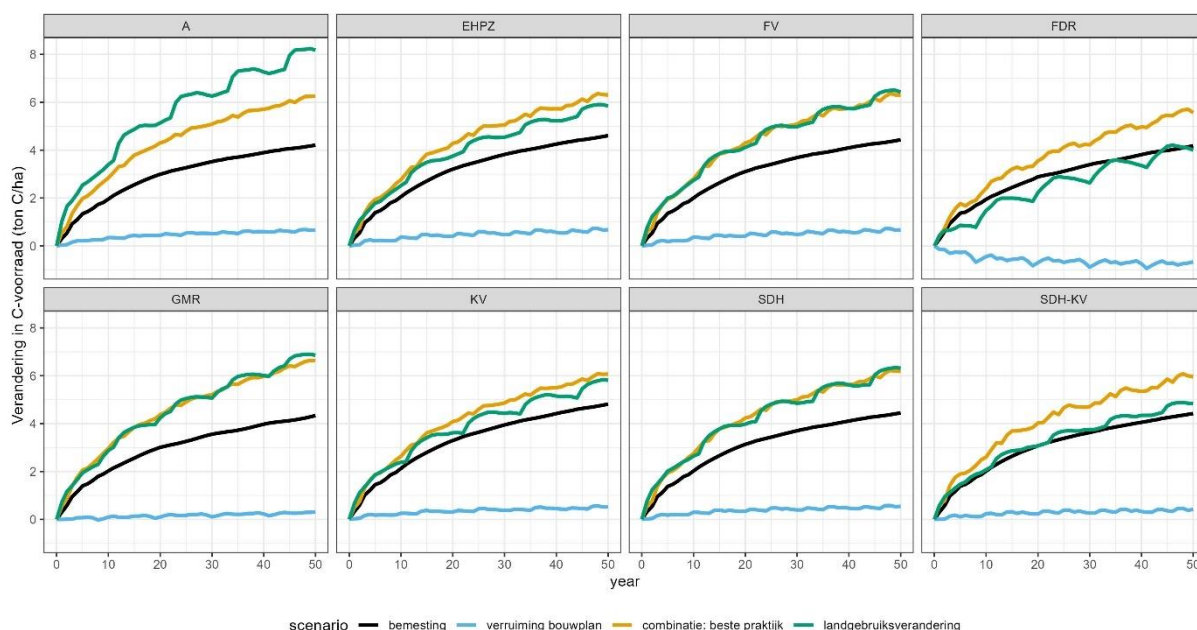
* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop

4 Scenario studie koolstofvastlegging

4.1 Mogelijkheden voor C-vastlegging

Met het RothC-model is in beeld gebracht hoeveel (extra) koolstof in de bodem kan worden opgebouwd op basis van een aangepast bouwplan en een bemestingspraktijk gericht op koolstofvastlegging. Dit is gedaan voor zeven scenario's met variatie in maatregelen om meer koolstof in de bodem op te slaan.

In Figuur 4-1 is de gemiddelde verandering in het organische stofgehalte van alle landbouwpercelen per regio weergegeven voor vier scenario's zoals berekend met het RothC model. Via deze vier scenario's wordt inzichtelijk gemaakt wat er mogelijk is via een aangepaste bemesting (scenario S3), via een verruiming van het bouwplan (scenario S1), via een combinatie van "klimaatvriendelijke praktijken" (scenario S6) en een hypothetisch scenario waarin alle percelen worden gebruikt voor de teelt van granen of grassen (scenario POT). De overige scenario's worden in de bespreking meegenomen, maar niet gevisualiseerd.

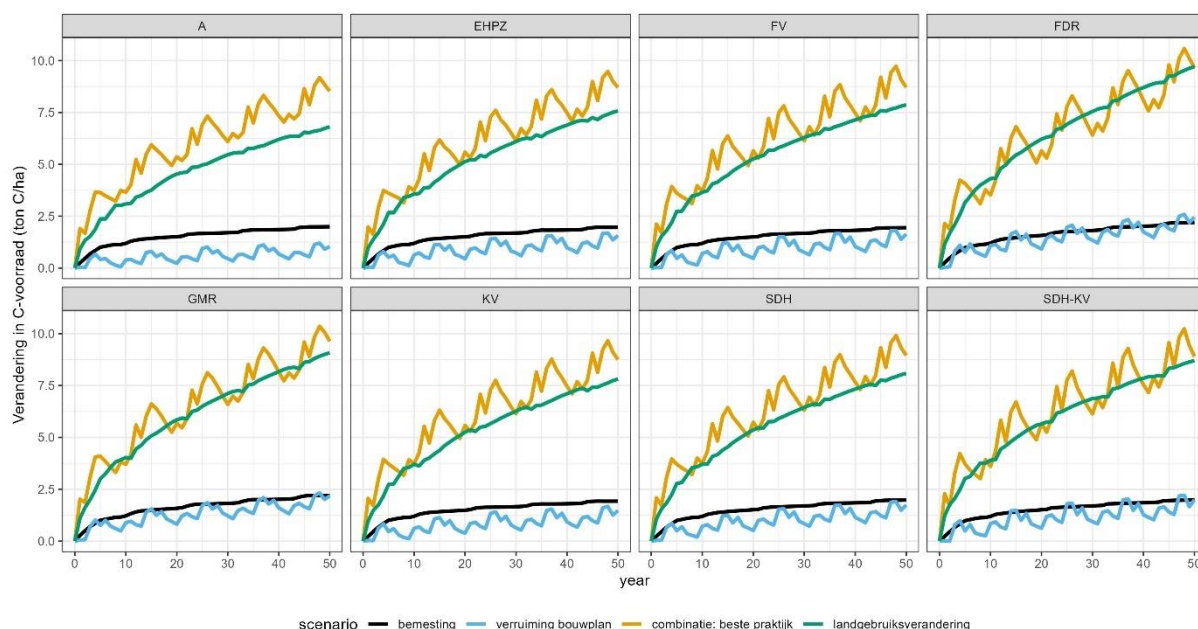


Figuur 4-1 Verloop in de C-voorraad over 50 jaar (ton C per hectare) voor vier scenario's per regio zoals berekend met het RothC-model. Berekend als de gemiddelde verandering over alle landbouwpercelen. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

In vrijwel alle situaties is er sprake van een toename van de C-voorraad in de bodem, waarbij de totale voorraad met 4 tot 8 ton C per ha kan stijgen. De grootste stijging wordt gerealiseerd door de inzet van

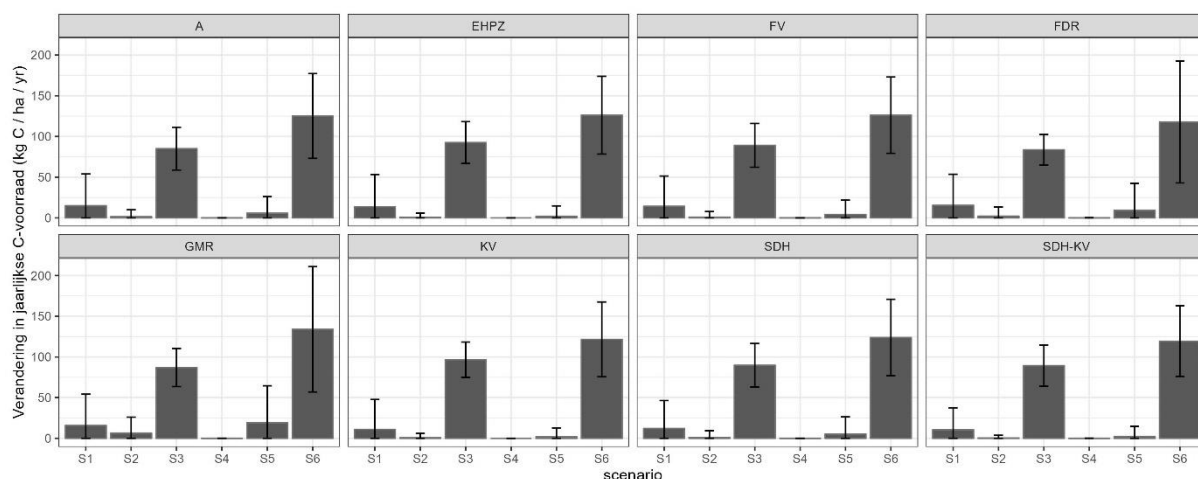
allerlei bodem-maatregelen (meer compost, meer groenbemesters, verruiming van het bouwplan) dan wel door een volledige landgebruiksverandering naar permanent grasland (voor gras) of permanente teelt van graangewassen (voor bouwland). Opvallend is dat een lichte verruiming van het bouwplan in provincie Gelderland zonder aanvullende maatregelen weinig meerwaarde biedt. Let wel, het gaat hier om een gemiddelde verandering over alle percelen, inclusief een groot aantal waarbij een lichte verruiming van het bouwplan niet mogelijk is.

Ter illustratie wordt in Figuur 4-2 voor alle continue maïspelden (waar ten opzichte van permanent grasland of wisselbouw of akkerbouw de grootste potentie ligt voor koolstofopbouw) ook de gemiddelde verandering in de C-voorraad weergegeven voor de genoemde scenario's. In vergelijking met de resultaten van een "gemiddeld landbouwperceel" is hier meer variatie zichtbaar, en kan er potentieel meer koolstof worden vastgelegd. De gemiddelde verschillen tussen de scenario's is relatief vergelijkbaar: het grootste effect is te realiseren door de inzet van een combinatie van maatregelen, gevolgd door een landgebruiksverandering, gevolgd door bemesting dan wel een lichte verruiming van het bouwplan.



Figuur 4-2. Verloop in de C-voorraad op continue maïs (ton C per hectare) voor vier scenario's per regio zoals berekend met het RothC-model. Berekend voor als de gemiddelde verandering over alle percelen met continue maïs. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

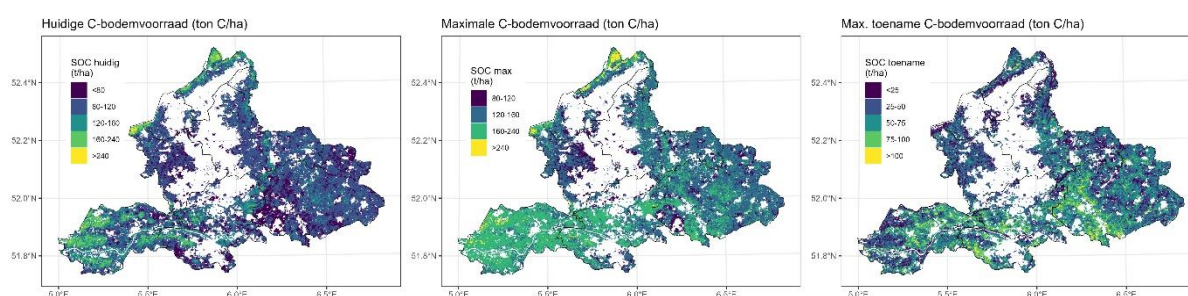
De variatie tussen percelen is groot. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 4-3 waarbij voor elk scenario het gemiddelde en de bijbehorende variatie (1 x de standaardafwijking, SD) wordt weergegeven voor de gemiddelde C-stijging per jaar (in kg C ha⁻¹ jaar⁻¹). Dit bevestigt dat de grootste stijging is te realiseren via de inzet van meerdere maatregelen als ook de inzet van meer compost en (bewerkt) natuurmaaisel.



Figuur 4-3. Absolute gemiddelde verandering in de C-voorraad na 50 jaar per scenario zoals berekend met het RothC-model. De verandering is berekend als het verschil tussen de huidige praktijk en het scenario waarbij maatregelen zijn genomen, gemiddeld over alle landbouwpercelen. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). Een beschrijving van de maatregelen is te vinden in hoofdstuk 2.

4.2 Potentie voor C-vastlegging

De ruimtelijke variatie in de huidige en potentiële C-vastlegging is daarnaast voorspeld met een empirisch model dat rekening kan houden met de interactie tussen kleimineralen, pH, organische stof, grondwaterstanden en landgebruik (zie sectie 2.2.3). De landbouwgronden hebben gemiddeld 98-103 ton C ha⁻¹ organisch koolstof in de bodem, met een bereik van 39 tot 345 ton C ha⁻¹. Dat is vergelijkbaar met andere regio's in Nederland (gemiddeld 119 ton C ha⁻¹; Ros et al., 2023b). De gemiddelde koolstofvoorraad in de bodem binnen de provincie Gelderland is 85-87 ton C ha⁻¹ voor continue maïs en akkerbouw, 89-98 ton C ha⁻¹ voor wisselbouw, en 113 ton C ha⁻¹ voor permanent grasland. Dat komt overeen met een gemiddeld organische stofgehalte van 4,5% voor continue maïs en een gehalte van 6,7% voor permanent grasland.



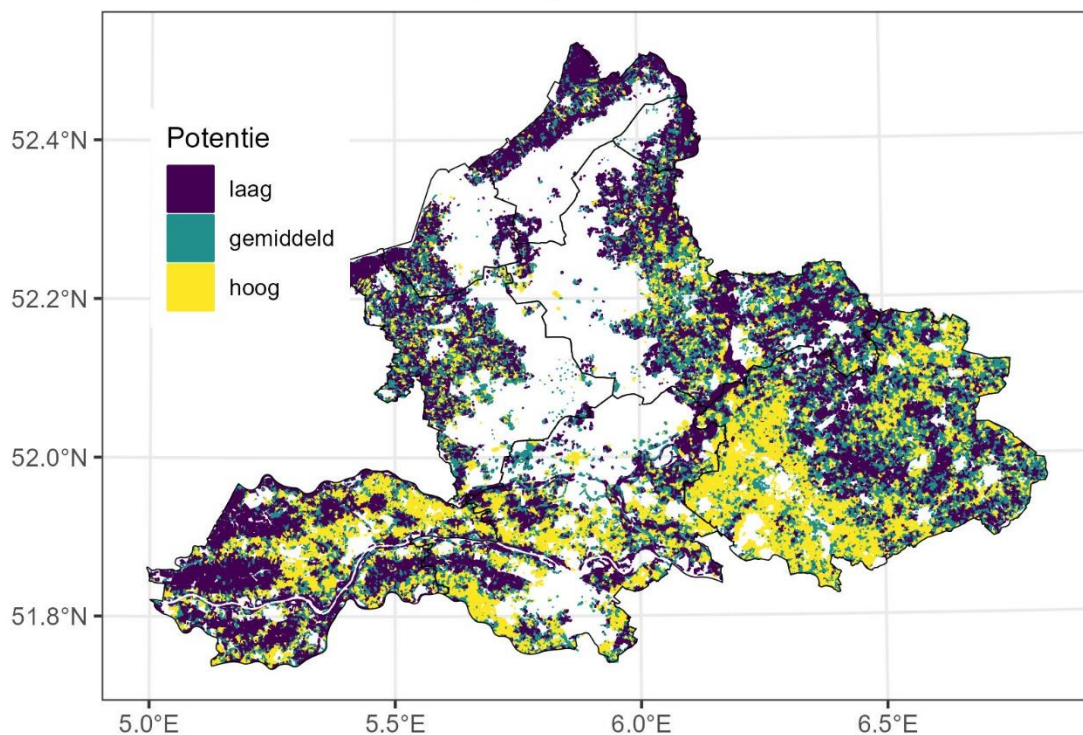
Figuur 4-4. Huidige bodemkoolstof gehalte (ton C ha⁻¹, bovenste 30 cm diepte) in provincie Gelderland (links), de maximale C-bodemvoorraad (midden) en de toename van bodemkoolstof tot de maximaal haalbare bodemkoolstof (rechts).

Op basis van de huidige variatie in C-voorraden en de invloed van perceelseigenschappen als de gewasrotatie, de zuurgraad, de fosfaattoestand en de grondwaterstand is voorspeld dat de maximale koolstofvoorraad in Gelderland gemiddeld kan stijgen tot 152 ton C ha⁻¹ (Figuur 4-4 midden). Over het algemeen leiden een lagere pH, een hogere bemesting met dierlijke mest (gekoppeld aan hogere P-toestanden), een hogere grondwaterstand en de omzetting van landgebruik (meer permanent grasland

en meer granen op bouwland) tot een hogere potentiële koolstofvoorraad. De potentiële stijging van de koolstofvoorraad was het grootst voor continue maïs en bouwland (gemiddelde stijging van 56-66 ton C ha⁻¹), gevolgd door wisselbouw (+ 52-59 ton C ha⁻¹) en grasland (+43 ton C ha⁻¹).

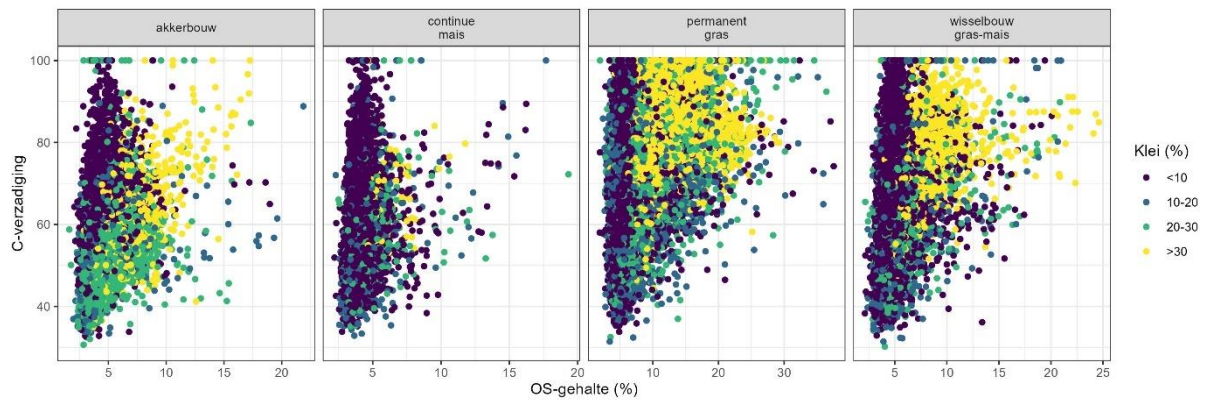
De potentie van elk perceel om de koolstofgehalte te verhogen is ingedeeld in drie niveaus op basis van de verzadigingsgraad t.o.v. de maximaal haalbare koolstof in de bodem: hoog (de huidige koolstofgehalte is lager dan 40% van het maximaal haalbare niveau), gemiddeld (40-70%) en laag (hoger dan 70%) (Figuur 4-5). De regio Achterhoek heeft relatief het grootste areaal om extra koolstof in de bodem vast te leggen. De benodigde toename in de koolstofvoorraad tot het maximaal haalbare niveau van de categorie 'gemiddeld' is gemiddeld 53 ton C ha⁻¹. Om deze toename in 30 jaar te bereiken, moet er elk jaar 1,8 ton C ha⁻¹ extra worden vastgelegd. Dat is veel meer dan wat kan worden bereikt met het huidige bemestingschema: toevoeging van compost of toepassing van groenbemester kan bijvoorbeeld respectievelijk ongeveer 0,03 en 0,45 ton C ha⁻¹ jaar toevoegen (Herbert et al., 2023).

Potentie voor C-vastlegging



Figuur 4-5. Potentie van percelen op basis van C-verzadiging (d.w.z. percentage van huidige bodemkoolstof t.o.v. maximaal haalbare bodemkoolstof). Potentie is als 'hoog' beoordeeld als C-verzadiging lager dan 40% is, 'gemiddeld' als C-verzadiging 40-70 % is, en 'laag' als C-verzadiging hoger dan 60% is.

Verder is de verzadigingsgraad van koolstof laag voor percelen met zeer laag organische stofgehalte (ca. <3%), en ook voor percelen met kleirijke en organische arme bodems (ca. klei > 20% en OS < 5%) (Figuur 4-6). Dit geeft aan dat percelen met een lager OS-gehalte en hoger kleigehalte een relatief hoog potentie hebben om extra C vast te leggen.



Figuur 4-6. Verzadiging van koolstof (d.w.z. percentage van huidige koolstofvoorraad t.o.v. maximale haalbare koolstofvoorraad) voor verschillende niveaus van organische stof- en kleigehalte, afzonderlijk weergegeven voor het huidige landgebruik (akkerbouw, continue maïs, permanent grasland, wisselbouw gras en maïs). Een lage verzadiging betekent een hoge potentie om extra C te vastleggen.

4.3 De opgave per regio

Als het nationale doel (0,5 Mton CO₂ per jaar) gelijk verdeeld wordt over alle minerale landbouwgronden, moet er per jaar gemiddeld 300 kg CO₂ per hectare (= 82 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹) worden vastgelegd. Dat komt overeen met ongeveer 4,1 ton C vastlegging per hectare in 50 jaar. Dit doel kan worden bereikt met verschillende maatregelen. Voor de provincie Gelderland werd de potentiële bijdrage in een landelijke studie geschat op 52,6 kton CO₂ per jaar op zand (bij 75% implementatie van maatregelen op 120.500 ha) en 40,8 kton CO₂ per jaar op klei (op 98.900 ha). In totaal komt dit neer op een vastlegging van 93,4 kton CO₂ per jaar. Gedeeld door het totale oppervlakte landbouw op minerale grond komt dit neer op 426 kg CO₂ of 116 kg C per hectare¹. Uitgaande van een C-fractie van 50% in toegevoegd organische stof, betekent dit dat er jaarlijks 232 kg Effectieve Organische Stof (EOS) per hectare moet worden opgebouwd. Heel concreet betekent dit een gift van 12 ton (extra) rundveedrijfmest (18 kg EOS per ton product), 5 ton geitenmest (45 kg EOS per ton) of 2 ton groencompost (101 kg EOS per ton).

In het ontwerp *Nationaal Programma Landelijk Gebied* van 15 december 2023 is voor elke provincie in beeld gebracht hoeveel potentie er is voor koolstofvastlegging. De regionale verdeling is gebaseerd op het rapport van Zwanet et al. (2023), waarbij de potentie voor koolstofvastlegging per provincie is bepaald op basis van een combinatie van 10 managementmaatregelen voor koolstofvastlegging, het huidige management, bodemcondities en landgebruik per provincie en de structuur van de agrarische sector. Er ligt een gezamenlijke verantwoordelijkheid bij provincies en Rijk om, in samenwerking met sectorpartijen, het doel voor koolstofopslag in minerale landbouwbodems te behalen. Vanuit de klimaatopgave voor bodems streeft het Rijk naar maatregelenpakketten die keuzevrijheid bieden voor de agrariër. Deels wordt deze opgave ingevuld door generiek rijksbeleid en deels is er sprake van rijksbeleid dat gebiedsgericht uitgewerkt moet worden. Provincies hebben een primaire rol als gebiedsregisseur in de uitwerking richting gebiedsprocessen en bij het vertalen van de maatregelen naar de regionale karakteristieken van de bodem. Daarbij is het ook belangrijk de samenhang te

¹ De opgave in kg CO₂ per hectare is gelijk aan $((52,6 + 40,8) \cdot 1000 \cdot 1000) / (\text{areaal_klei} + \text{areaal_zand})$. Uitgedrukt in kg C per hectare wordt de uitkomst gedeeld door 3,67 voor de conversie van CO₂ naar C.

zoeken met de andere NPLG-doelen omdat maatregelen die bijdragen aan het vastleggen van koolstof ook bijdragen aan andere NPLG-doelen zoals klimaat, biodiversiteit, waterkwaliteit, waterberging en stikstof.

Voor de provincie Gelderland is berekend dat de provincie voor 10,8% een bijdrage kan leveren aan de landelijke doestelling voor koolstofvastlegging. Dit komt concreet neer op een opgave van 54 kton CO₂-eq per jaar.

4.3.1 Realistische potentie van maatregelen

Op basis van de mogelijke C-vastlegging zoals deze is berekend met RothC voor alle landbouwpercelen in Gelderland (zie 4.1) kan op lange termijn, dat wil zeggen een periode van 50 jaar, in totaal 5288 kton CO₂ worden vastgelegd, wat neerkomt op een toename van 105 kton CO₂ per jaar. De aanname is dat de maatregelen door iedereen wordt geïmplementeerd. Qua orde grootte is deze berekening vergelijkbaar met de landelijke studie van Herbert et al. (2023).

Tabel 4-1. Koolstofvoorraad na 50 jaar voor de huidige praktijk (kton CO₂) en het effect van maatregelen, doorberekend met behulp van het RothC-model voor de drie meest perspectievolle maatregelpakketten (i.r.t. koolstofvastlegging), uitgaande van een bodemdikte van 30 cm.

Regio *	Areaal (ha*100)	C-voorraad BAU	Δ C-voorraad (kton CO ₂ na 50 jaar)		
			Best practice (S6)	Compost (S3)	Landgebruik (POT)
A	761	30928	1793	1179	2489
EHPZ	52	2549	117	88	110
FV	197	8709	469	319	512
FDR	418	19533	857	658	716
GMR	350	13821	924	572	989
KV	99	5748	220	176	224
SDH	368	16402	846	605	921
SDH-KV	29	1475	62	47	49
Totaal	2277	99165	5288	3644	6010
Totaal per jaar			105	73	120

* De volgende afkortingen worden gebruikt voor de regio's: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

4.3.2 Regio's met potentie

Omdat het effect van maatregelen gericht op de vastlegging van koolstof sterk afhangt van de mate van koolstofverzadiging, is per regio het potentiële areaal berekend voor de drie eerder beschreven potentie-klassen (Tabel 4-2). Hieruit blijkt dat in 43% van het landbouwareaal maatregelen minder effectief zullen zijn om koolstof op te bouwen. In 30% van het areaal, overeenkomend met circa 68.000 hectare landbouwgrond, ligt er echter een hoge potentie om koolstof op te slaan. Maatregelen zijn het meest effectief inzetbaar in de regio's Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen, de Achterhoek en de Fruitdelta Rivierenland.

Tabel 4-2. Percentage landbouwgrondareaal per potentieklasse om koolstof vast te leggen, waarbij de klasse laag alle percelen bevat met een C-verzadiging hoger dan 70%, de klasse hoog alle percelen bevat met een C-verzadiging lager dan 60%, en alle overige percelen in de klasse gemiddeld vallen.

Regio *	Areaal (ha*100)	Percentage areaal per potentieklasse (%)		
		Laag	Gemiddeld	Hoog
A	761	28	32	40
EHPZ	52	63	25	12
FV	197	49	32	18
FDR	418	54	17	29
GMR	350	38	24	38
KV	99	76	18	5
SDH	368	50	31	19
SDH-KV	29	72	22	6
Totaal	2277	43	27	30

* De volgende afkortingen worden gebruikt voor de regio's: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

4.3.3 De toekenning van de koolstofopgave

Op basis van de opgave zoals deze gedefinieerd is in de landelijke studie, is onderzocht hoe deze opgave gerealiseerd kan worden binnen de provincie Gelderland, daarbij rekening houdend met de potentie van maatregelen (sectie 4.3.1) als ook de potentie van gebieden (sectie 4.3.2).

De opgave kan op vier verschillende manieren worden toegekend aan de verschillende regio's:

- 1) **Elk landbouwperceel moet naar rato bijdragen** aan de opgave onafhankelijk van de huidige situatie. Hierbij wordt de totale gebiedsopgave van 54 kton CO₂ per jaar proportioneel toegekend aan alle percelen op basis van het perceeloppervlak. De gewenste C-vastlegging per hectare is hierbij dus gelijk voor elk perceel. Voor elke regio kan vervolgens de totale opgave worden berekend door de toegekende (en gewenste) koolstofvastlegging te sommeren.
- 2) Percelen moeten bijdragen naar **rato van de huidige koolstofverzadiging**. Hierbij wordt de totale opgave proportioneel toegekend aan alle percelen op basis van hun verzadigingsgraad. Percelen met een lage verzadigingsgraad moeten hierbij meer bijdragen dan percelen met een hoge verzadigingsgraad. Het totaal per regio wordt opnieuw berekend als de som van de toegekende opgave van alle percelen.
- 3) De totale opgave moet gerealiseerd worden op de **hoog-potentiepercelen binnen een regio**. Dit betekent dat de percelen met een gemiddelde of lage potentie geen expliciete opgave krijgen. De percelen met een hoge potentie moeten vervolgens bijdragen naar rato van de huidige koolstofverzadiging (idem aan optie 2). Het totaal per regio wordt dan berekend op basis van het areaal hoog-potente percelen en de daarop benodigde koolstofvastlegging.

Om dit verder uit te werken is deze methodiek geïllustreerd voor de regionale opgave van 54 kton CO₂ per jaar (zie Tabel 4-3). Omdat de voorgestelde top-down aanpak om deze opgave te verdelen over de percelen en gebieden een lineaire berekening volgt, kunnen de resultaten op een eenvoudige manier worden aangepast zodra een alternatieve opgave wordt vastgesteld. Dit kan door de toegekende

opgave per regio te vermenigvuldigen met een vaste ratio (waarbij deze ratio te berekenen is door de nieuwe opgave te delen door 54).

Tabel 4-3. Toegekende opgave aan de regio's in relatie tot het i) perceelareaal, ii) de mate van C-verzadiging en iii) de mate van C-verzadiging voor percelen binnen een hoog-potentieklasse. Voor toelichting zie de tekst. Aanvullend is weergegeven hoeveel er via maximale inzet van maatregelen kan worden gerealiseerd (bron: Tabel 4-1).

Regio *	Best Practice kton CO ₂ / jaar	Toegekende opgave in kton CO ₂ per jaar		
		Areaalgewogen	C-verzadiging gewogen	Hoog-potentie
A	36	18	18	22
EHPZ	3	1,2	1,3	1
FV	11	4,7	4,8	3
FDR	17	10,0	10,6	12
GMR	20	8,3	8,3	10
KV	6	2,3	2,3	1
SDH	18	8,7	7,9	5
SDH-KV	1	0,7	0,5	0
Totaal	112	54	54	54

* De volgende afkortingen worden gebruikt voor de regio's: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

Uit deze toekenning blijkt een redelijke overeenkomst tussen de verschillende aanpakken, grotendeels veroorzaakt door het aanwezige landbouwareaal in deze gebieden. Omdat in elke regio variatie is in de mate van C-verzadiging, en daarmee ook het areaal percelen met een hoge potentie, is de toekenning aan de regio's sterk vergelijkbaar tussen de drie opties. Let wel, het totale areaal waarop de maatregelen (moeten) worden ingezet, is wel sterk verschillend. De eerste twee opties nemen aan dat de opgave van toepassing is op alle landbouwgronden binnen de regio, waarbij een hogere effectiviteit op percelen met een lage verzadiging de lagere effectiviteit op percelen met een hoge verzadiging gedeeltelijk compenseert. In de derde optie worden de maatregelen (op papier) alleen uitgevoerd op 6 tot 40% van het landbouwareaal (zie tabel 4-2) met een vergelijkbaar effect op de koolstofvastlegging.

4.4 Maatregelen voor koolstof

Alle maatregelen beschreven door Herbert et al. (2023) hebben een positief effect op de koolstofvoorraad in landbouwbodems. Voor het maximaliseren van koolstofvastlegging zou het dus aan te bevelen zijn om alle maatregelen overal toe te passen. Omdat de effectiviteit afneemt zodra er meer koolstof in de bodem zit (een hogere mate van verzadiging), heeft het echter de voorkeur om de meest effectieve maatregelen op de percelen toe te passen met de hoogste potentie en dus niet generiek alle maatregelen over het hele areaal uit te rollen.

In gebieden met de grootste potentie voor koolstofopslag kan ingezet worden op maatregelen waarmee per jaar veel koolstof wordt vastgelegd. Vanuit eerdere studies (Herbert et al., 2023; Lesschen et al., 2021) blijkt dat de meeste impact te realiseren is via landgebruik (een hoger aandeel van granen in akkerbouwmatige bouwplanen en een hoger aandeel blijvend grasland in de melkveehouderij). De verhoging van het koolstofgehalte varieert van 1,6-2,8 ton CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹ in

minerale bodems. Een vergelijkbare impact is te realiseren door continu teelt van mais te vervangen door wisselteelten van mais en gras, met een potentiële verhoging die varieert van 2,4 tot 3,1 ton CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹. De teelt van vanggewassen na akkerbouwmatige teelten kan aanvullend zorgen voor 1,5 CO₂ ton ha⁻¹ jaar⁻¹ en kan oplopen tot 7,4 ton CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹. De inzet van extra compost en vaste mest zorgt voor een verhoging van 66 tot 100 kg CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹, waarbij het achterlaten en onderwerken van stro zorgt voor een verhoging van 600-1400 kg CO₂ ha⁻¹ jaar⁻¹.

Het vastleggen van koolstof in landbouwbodems is niet het enige doel van landbouwbodems (zie sectie 5.3). Deze bodems zijn in de eerste plaats bedoeld voor plantaardige productie. Het verhogen van het organische stofgehalte is niet automatisch een win-win scenario voor productie en klimaat (Moinet et al., 2023). Zonder rekening te houden met koolstofverzadiging wordt de potentie voor vastlegging al snel overschat.

In overleg met betrokken experts en beleidsmakers van de provincie Gelderland is een getrapte aanpak ontwikkeld. Hierbij wordt allereerst in alle regio's ingezet op brede implementatie van maatregelen die onderdeel zijn van een Goede LandbouwPraktijk (GLP). Deze maatregelen zijn impliciet ook ingebed binnen de bestaande wet- en regelgeving. Het uitgangspunt van de Nitraatrichtlijn is namelijk dat overal de goede landbouwpraktijk wordt bedreven en dat door deze landbouwpraktijk de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater verbetert. Een goede landbouwpraktijk is er op gericht nutriënten zo efficiënt mogelijk te benutten en zo emissies naar het water te voorkomen. Dit betekent in de praktijk dat er wordt bemest volgens het 4-J-principe: de juiste mestsoort, met de juiste dosis, op het juiste tijdstip, met de juiste techniek. Dit betekent ook dat de bodemkwaliteit als zodanig optimaal moet worden onderhouden om te zorgen voor een goede gewasopname van de gegeven nutriënten. Deze principes gelden voor alle landbouwkundige sectoren en stromingen binnen de landbouw. Zowel extensieve, biologische, regeneratieve, en natuurinclusieve bedrijven en intensieve landbouwbedrijven hebben namelijk nutriënten van buiten het bedrijf nodig als ook een goed beheerde bodem om op een duurzame, toekomstbestendige manier voedsel te kunnen produceren. Ook binnen het concept van kringlooplandbouw simpelweg omdat er altijd nutriënten verloren gaan. In de huidige landbouwpraktijk is er echter een enorme variatie in uitvoeringsmogelijkheden en daadwerkelijke implementatie van de GLP. Ook vraagt een goede uitvoering van de GLP om investeringen in tijd, geld en advies.

Onder deze goede praktijk vallen in ieder geval de volgende maatregelen: het op tijd inzaaien van een vanggewas (met daarbij een C-opbouw die varieert van 850 tot 1300 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹), het optimaal inzet van landgebruik voor de melkveehouderij volgens de 60-20-20 regel (Van Eekeren et al. (2007)), waarmee gemiddeld 650 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹ kan worden vastgelegd. Op 60% van het bedrijfsareaal kan de leeftijd van het grasland worden verhoogd (met een vastlegging van 140 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹). Via inzet van deze maatregelen kan gemiddeld 127 kg C ha⁻¹ year⁻¹ worden vastgelegd (Tabel 4-4). Een verhoogde compostaanvoer (5% van de gebruiksruimte) kan de koolstofopbouw met 89 kg C ha⁻¹ year⁻¹ verhogen. Een substantiële wijziging in landgebruik verhoogt de C-aanvoer met gemiddeld 132 kg C ha⁻¹ year⁻¹.

Tabel 4-4. Koolstofvoorraad na 50 jaar voor de huidige praktijk ($\text{kg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) en het effect van maatregelen, doorberekend met behulp van het RothC-model voor de drie meest perspectievolle maatregelpakketten (in relatie tot koolstofvastlegging), uitgaande van een bodemdiepte van 30 cm.

Regio *	Areaal (ha*100)	Areaal maatregel (ha*100)	Effect van maatregelen		
			Best practice (S6)	Compost (S2)	Landgebruik
A	761	760	125	86	164
EHPZ	52	52	123	93	115
FV	197	197	126	89	128
FDR	418	380	131	85	144
GMR	350	341	138	88	155
KV	99	99	120	97	115
SDH	368	367	124	90	125
SDH-KV	29	29	117	89	97
Totaal / gem.	2277	2225	126	90	131

* De volgende afkortingen worden gebruikt voor de regio's: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

Op basis van inzet van deze maatregelen die behoren tot een Goede Landbouwpraktijk kan worden berekend of hiermee de opgave kan worden gerealiseerd en of er een resterende opgave overblijft waarvoor extra maatregelen nodig zijn (Tabel 4-5). Hierbij is een voorzichtige inschatting gemaakt van de implementatiegraad, zeker gezien de verwachte ontwikkelingen in (mest)beleid en markt.

Tabel 4-5. De bijdrage van de goede landbouwpraktijk aan de regionale opgave binnen provincie Gelderland (in kton CO_2 per jaar, gebaseerd op een C-verzadiging gewogen opgave) bij een implementatiegraad van 50% en de resterende opgave die overblijft om via aanvullende beheersmaatregelen te realiseren. Impacts zijn berekend met het RothC-model.

Regio *	Opgave (kton CO_2)	Areaal maatregel (ha*100)	Opgave (o.b.v. C-verzadiging, in kton CO_2)	
			Realisatie via Best practice (S6)	Resterend
A	18	380	18	0,1
EHPZ	1,3	26	1,3	0,1
FV	4,8	99	5,1	0,1
FDR	10,5	190	9,3	1,6
GMR	8,3	170	9,1	0
KV	2,4	49	2,6	0
SDH	7,9	184	8,6	0
SDH-KV	0,5	14	0,1	0
Totaal / gem.	54	1112	54	<1

* De volgende afkortingen worden gebruikt voor de regio's: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

Dit betekent dat een generieke uitrol van de goede landbouwpraktijk bij een implementatiegraad van 50% jaarlijks kan leiden tot de gewenste koolstofvastlegging van 54 kton CO₂. Hiermee kan dus de landelijke opgave voor de provincie Gelderland worden gerealiseerd. Als er binnen regio's extra koolstof bovenop de landelijke opgave moet worden toegevoegd om daarmee een positieve bijdrage te leveren aan andere bodemkwaliteitsfuncties is het aan te bevelen om in te zetten op specifieke maatregelpakketten op gebieden met veel potentie voor koolstofopslag. Qua beschikbaar areaal met een hoge potentie is het aan te bevelen om hierbij een focus te leggen op de gebieden de Achterhoek (A), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), waar per regio in totaal meer dan 10.000 hectare hoog potentiële percelen aanwezig is. Denk dan bijvoorbeeld aan maatregelen als de inzet van extra vaste mest, inwerken stro en compost (in bouwland, levert extra 200 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹), en gebruik van gewassen in het bouwplan die veel koolstof aanvoeren (grassen en granen) via samenwerking melkveehouderij en akkerbouw of extensivering van het bouwplan (extra 400 – 800 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹; effectberekening conform Herbert et al., 2023).

Samengevat betekent dit dat de opgave van 54 kton CO₂ vastlegging kan worden gerealiseerd via een brede uitrol van maatregelen die passen binnen de Goede Landbouwpraktijk. Dit betekent de generieke inzet van vanggewassen en groenbemesters, de omzetting van continue maïs naar gras-maïs wisselbouw, verhoging van de leeftijd van grasland als ook verbetering van bodemstructuur (vermijden verdichting) en inzet van nutriënten conform het Handboek Bodem en Bemesting. Dit verhoogt de gewasopbrengst en daarmee de koolstofaanvoer naar de bodem en verhoogt de vastlegging ervan. Bij een implementatie ervan op 50% van het areaal maakt het mogelijk om 54 kton CO₂ per jaar vast te leggen. Aanvullend daarop is het mogelijk om in de Achterhoek, de FruitDelta Rivierenland (FDR) en Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR) in te zetten op extra maatregelen op percelen met een hoge potentie. Via verruiming van het bouwplan en extra aanvoer van compost, vaste mest en het inwerken van stro kan in het resterende deel van de percelen met een hoge potentie aanvullend 37 kton CO₂ per jaar worden vastgelegd. Door in de uitrol van maatregelen niet expliciet te differentiëren naar deze potentie, betekent dit een generieke uitrol van deze extra maatregelen binnen het hele gebied. Hierbij is het wel aan te bevelen om in de communicatie met name aandacht te vragen voor de omstandigheden waarbij de koolstofopslag is te maximaliseren. Dit omvat met name de zandpercelen met een organische stofgehalte lager dan 4,3% in de Achterhoek, op kleipercelen met een OS-gehalte lager dan 6% (voor gras en gras-maïs in wisselbouw) en 5% (voor bouwland op klei) in de regio FruitDelta, en op akkerbouwpercelen op klei met een OS-gehalte lager dan 4,8% en maïs en graspercelen met een OS-gehalte lager dan 6% in de GMR regio.

5 Discussie

5.1 Bodemkwaliteit van landbouwgrond van Gelderland

Landbouwgronden variëren in kwaliteit tussen regio's en ook binnen regio's, door verschillen in geschiedenis en bodembeheer. De bodemkwaliteit voor primaire productie wordt over het algemeen beoordeeld als goed; in alle regio's komt de gemiddelde score boven een 8,0. Voor een deel hangt dit samen met het breed voorkomen van grasland binnen provincie Gelderland. Een eerder uitgevoerde landelijke analyse van de bodemkwaliteit liet zien dat de landbouwbodems in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie gemiddeld beter scoren voor grasland dan voor andere teelten (Ros et al., 2022). Desondanks komen op een groot deel van het areaal nog knelpunten voor gerelateerd aan specifieke bodemfuncties. Het voorkomen van deze knelpunten, berekend als percentage van het aanwezige landbouwareaal per regio wordt samengevat in tabel 5.1.

Tabel 5-1. Percentage areaal waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5), uitgesplitst per regio in relatie tot de vier getoetste ecosysteemdiensten uit BLN 2.0.

Bodemfuncties	ESD*	Regio *							
		A	EHPZ	FDR	FV	GMR	KV	SDH	SDH-KV
Areaal (ha * 100)	-	761	52	420	197	350	99	368	29
Fosfaatlevering	1	0	1	4	1	1	7	0	3
Zwavellevering	1	71	51	25	60	61	26	62	24
Verdichting	1	67	73	29	74	35	51	67	49
Droogtestress	1	19	18	12	16	15	10	16	14
Natschade	1	3	15	8	13	2	44	8	14
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	57	28	29	45	554	17	41	23
Stikstofbuffering grondwater	2	22	33	36	23	19	47	24	35
Uitspoelingsrisico nitraat	2	38	34	11	32	15	25	34	17
Grondwateraanvulling	2	69	82	77	73	67	85	76	81
EOS-balans	3	4	4	5	6	5	3	3	5
N-benutting	4	97	92	72	94	90	70	95	82
P-kringloop	4	1	1	4	1	1	7	1	4

* ESD1: primaire productie, ESD2: waterregulatie en zelfreinigend vermogen, ESD3: koolstofvastlegging en klimaatregulatie, en ESD4: het faciliteren van de nutriëntenkringloop. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

Er bestaan in de praktijk veel zorgen over het effect van de fosfaatgebruiksnormen op de voorraad en beschikbaarheid van fosfaat in de bodem (zie Fujita & Ros, 2021). Door de hoge opbrengsten en beperkte aanvoer van fosfaat is er in de melkveehouderij regelmatig sprake van een negatief P-bodemoverschot. De bodemvoorraad wordt hiermee uitgemijnd. Op zichzelf is dit niet ongewenst zolang de beschikbaarheid van fosfaat binnen de klasse “neutraal” blijft. De evaluatie met BLN 2.0 in deze studie liet zien dat de P-beschikbaarheidsindex (de index die bepaalt of er een tekort ontstaat of niet) vrijwel nooit een serieus knelpunt is (Tabel 5.1). Een eerdere studie met historische gegevens van P-beschikbaarheid toonde aan dat de huidige gebruiksnormen geen belemmering zijn voor een voldoende hoge aanvoer van fosfaat: de P-plantbeschikbaarheid (P-CaCl₂) daalt maar de P voorraad (P-AL) blijft gelijk (Van Rotterdam et al., 2021). Gegeven het feit dat de beschikbaarheid en aanvoer van dierlijke mest zal dalen in komende jaren, is dit wel een aandachtspunt.

De structuur van de bodems hangt sterk van de zwaarte van de grond. De lichtere gronden gebruikt voor akkerbouw of mais zijn vaak gevoelig voor slomp en verstuiving terwijl de zwaardere gronden moeilijker te bewerken zijn. Deze problemen zien we ook binnen Gelderland dan vaak optreden bij de akkerbouwmatige teelten (zie hoofdstuk 3) maar vanwege het grote areaal grasland is het aandeel percelen voor heel Gelderland kleiner dan 15% (Tabel 5.1). Het voorkomen van ondergrondverdichting is een knelpunt in relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie en vergroot daarnaast het afspoelingsrisico van nutriënten en pesticiden. In alle regio's komt ondergrondverdichting voor op meer dan 30% van de percelen (Tabel 5.1). Let wel, de score geeft het potentiële risico op ondergrondverdichting weer op basis van de landelijke kaart van verdichtingsrisico's (Van der Akker et al., 2012). Echter, de kaart weerspiegelt niet noodzakelijkerwijs de lokale bodemeigenschappen of het effect van het beheer. Actuele informatie over de daadwerkelijke verdichting op perceelniveau is nodig om de evaluatie beter te ondersteunen. Veldmetingen van andere studies elders in het land toonden aan dat verdichting een veelvoorkomend probleem is op een substantieel deel van de landbouwbodem (Brus & Van den Akker, 2018; Van den Akker & Hoogland, 2011).

Opvallend is dat de meeste knelpunten binnen de provincie Gelderland zich focussen op de ecosysteemdienst primaire productie (ESD1) en waterregulatie en zelfreinigend vermogen (ESD2). Vanwege de hoge uitgangssituatie voor organische stof in de bodem blijft de aanvoer van voldoende organische stof relevant voor de ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie (ESD3). Er ligt perspectief om via extra maatregelen aanvullend koolstof op te slaan (zie hoofdstuk 4). Vooral teelt-technische maatregelen als ook maatregelen die de bodemstructuur verbeteren hebben indirect daarmee ook een positief effect op de andere ecosysteemdiensten (zie tabel 3.6).

5.2 Streefwaarden bodemkwaliteit

Voortbordurend op de systematiek van de BLN 2.0 zijn streefwaarden ontwikkeld die rekening houden met de lokale situatie qua grondwatersituatie, grondsoort en bouwplan. Hiermee is het dus mogelijk om op provinciaal niveau en wetenschappelijk onderbouwd inzicht te geven in de kwaliteit van de landbouwbodem. In de voorliggende studie is dit uitgevoerd voor de bodemfuncties die bijdragen aan de ecosysteemdienst primaire productie (ESD1) waarbij rekening wordt gehouden met de bijdragen van chemische, fysische en biologische bodemfuncties en de ecosysteemdiensten waterregulatie en zelfreinigend vermogen (ESD2), koolstofvastlegging en klimaatregulatie (ESD3) en het faciliteren van de nutriëntenkringloop (ESD4).

Door als provincie de streefwaarden van de BLN systematiek te implementeren wordt gebruik gemaakt van een methodiek die én wetenschappelijk is geborgd én aansluit bij de landbouwkundige expertise zoals die in de praktijk vorm krijgt bij bodemkundigen en bemestingsadviseurs. Dit biedt hiermee een goede basis om binnen de provincie maatwerk te combineren met een generieke doelstelling om alle bodems duurzaam te beheren.

Naast de landbouwkundige gewasproductie draagt de bodem ook bij aan andere ecosysteemdiensten zoals het waterregulatie en zelfreinigend vermogen, koolstofvastlegging en klimaatregulatie, bodembiodiversiteit en habitatvoorziening en het faciliteren van de nutriëntenkringloop. Per bodemfunctie zijn er streefwaarden opgesteld in relatie tot het te bereiken doel. Dit betekent ook dat streefwaarden kunnen variëren in afhankelijkheid van de geselecteerde ecosysteemdienst. Daarbij is de hoogte van de streefwaarde afhankelijk van de lokale situatie, zoals grondsoort, klimaat, water. Voor de ecosysteemdienst primaire productie zijn deze streefwaarden afgeleid van empirisch of modelmatig onderzoek. Voor de ecosysteemdiensten waterregulatie en zelfreinigend vermogen zijn de streefwaarden gekoppeld aan de doelen voor een goede waterkwaliteit zoals deze door provincies en waterschappen worden vastgesteld conform de systematiek van de KRW en Nitraatrichtlijn). Voor de ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie zijn streefwaarden gedefinieerd waarmee de bijdrage van de bodem aan deze dienst wordt gemaximaliseerd. Een aggregatie van de bodemkwaliteit over de vier ecosysteemdiensten is echter niet wetenschappelijk te onderbouwen. In iedere situatie is de aggregatie van individuele bodemfuncties tot een integrale eindscore namelijk subjectief (Rinot et al., 2019). Er is namelijk geen wetenschappelijk juiste manier te definiëren die overal van toepassing is. **De integrale beoordeling van een bodem over de verschillende doelen (gewas, water, klimaat, etc.) vraagt daarom om een relatieve weging van de gewenste ecosysteemdiensten waarvoor de bodem gebruikt gaat worden.** Dit is een beleidsmatige afweging en kan als zodanig niet worden gebaseerd op wetenschappelijke kennis of proeven. In deze studie wordt daarom de bodemkwaliteit in kaart gebracht tot op het niveau van een ecosysteemdienst.

In de voorliggende studie is gebruik gemaakt van generiek beschikbare bodemgegevens per perceel. Voor een beperkt aantal bodemindicatoren moeten de resultaten als indicatief worden beschouwd omdat echte meetwaarden ontbreken. Het voorkomen van ondergrondverdichting wordt bijvoorbeeld afgeleid van een potentieel risico op ondergrondverdichting, waarbij de actualiteit van het voorkomen van verdichting afhangt van bodemtextuur, gewasrotatie en de omstandigheden waarin er gewerkt wordt (droog of nat, het gewicht van machines en de type banden). Deze factoren verschillen sterk tussen locaties, en zijn daarom moeilijk te beoordelen op bedrijfsniveau en daarmee ook lastig op te schalen naar regionale niveau. Door gebruik te maken van daadwerkelijke veldobservaties, zoals de visuele beoordeling (bijv. BodemConditieScore), kan de analyse verbeterd worden. Dit geldt daarnaast ook heel sterk voor de biologische functies. Hoewel er in de praktijk allerlei analyses worden uitgevoerd, zijn deze heel lastig of niet interpreteerbaar in relatie tot streefwaarden (met uitzondering van de aaltjesproblematiek). Voor de ecosysteemdienst “*bodembiodiversiteit en habitat-voorziening*” ontbraken de meetgegevens of zijn geen streefwaarden beschikbaar om de kwaliteit van de bodem te beoordelen. Deze ecosysteemdienst is daarom in de huidige analyse niet meegenomen, en heeft ook in de BLN 2.0 de status van een optionele indicator.

5.3 Bijdrage duurzaam Bodembeheer

De BLN is in 2020 ontwikkeld om richting te geven aan duurzaam bodembeheer. Duurzaam Bodembeheer wordt hierbij gedefinieerd als: *“bodembeheer is duurzaam als de ondersteunende, voorzienende, regulerende en culturele diensten die door de bodem worden geleverd, worden gehandhaafd of verbeterd zonder de bodemfuncties die deze diensten mogelijk maken of de biodiversiteit significant te schaden. Het evenwicht tussen de ondersteunende en bevoorradingsdiensten voor plantaardige productie en de regulerende diensten die de bodem levert voor waterkwaliteit en beschikbaarheid en voor de samenstelling van broeikasgassen in de atmosfeer is een bijzondere zorg (FAO, 2017)”*. Inzicht in de huidige en gewenste kwaliteit van de landbouwbodem (zie sectie 3) draagt bij aan de selectie van de juiste maatregelen om de bodemkwaliteit te verbeteren.

Er is in Nederland nog geen bodembeheeradvies-rekenregels beschikbaar die de inzichten vanuit de integrale bodembeoordeling conform de BLN 2.0 implementeert in maatwerk-advies. In 2016 is door

verschillende kennisinstellingen wel een open source Label Duurzaam Bodembeheer ontwikkeld (Van der Wal et al., 2016) dat als zodanig ook in de OBI is geïmplementeerd. Het Label Duurzaam Bodembeheer is een transparant systeem dat agrariërs stimuleert om hun bodem duurzaam te beheren, en maakt onderscheid naar grondsoort en sector (akkerbouw en melkveehouderij). Naast de controleerbare maatregelen zijn ook advies-maatregelen geformuleerd die bijdragen aan het verbeteren van de bodemkwaliteit. Dit omvat maatregelen rondom grondbewerking, het type mest, het gebruik van bestrijdingsmiddelen, irrigatie, bouwplanintensiteit, veedichtheid, grondwaterstand en randenbeheer. Het biedt daarnaast ook de mogelijkheid tot maatwerk waarbij het mogelijk is om specifieke kennis en expertise van de situatie in provincie Gelderland in te bedden. De verschillende publicaties vanuit de PPS Beter Bodembeheer die de afgelopen jaren zijn gepubliceerd geven daarnaast ondersteunende inzichten op welke manier bodembeheermaatregelen bij kunnen dragen aan de verschillende ecosysteemdiensten. Deze kennis is ook binnen deze studie ingezet om per regio inzicht te geven in zinvolle maatregelen om de bodemkwaliteit te verbeteren. Voor de hele provincie zijn daarom per regio de belangrijkste knelpunten in kaart gebracht als ook de gewenste maatregelen (zie hoofdstuk 3). Samengevat voor de hele provincie wordt dit weergegeven in tabel 5.2.

Tabel 5-2. Percentage areaal (in %) waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5), in relatie tot de getoetste ecosysteemdiensten uit BLN 2.0 en de beste maatregelen die hiervoor inzetbaar zijn.

Bodemfuncties	ESD*	Areaal	Beste Maatregelen (zie tabel 3.6)
Areaal (ha * 100)	-	2277	
Fosfaatlevering	1	1	Volg bemestingsadvies
Kaliumlevering	1	7	Volg bemestingsadvies
Zwavellevering	1	56	Volg bemestingsadvies, aanvoer organische stof
Verdichting	1	55	Voorkom verdichting, verruiming bouwplan, aanvoer van organische stof
Droogtestress	1	16	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
Natschade	1	8	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	45	Inzet van akkerranden en bufferstroken, aanvoer van organische stof, verruiming bouwplan
Stikstofbuffering grondwater	2	26	Vanggewassen en groenbemesters, voorkom verdichting, perceel jaarrond groen, verruiming bouwplan
Uitspoelingsrisico nitraat	2	27	Vanggewassen en groenbemesters, voorkom verdichting, perceel jaarrond groen, verruiming bouwplan
Grondwateraanvulling	2	73	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
EOS-balans	3	5	Aanvoer van organische stof, perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters
N-benutting	4	89	Perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters
P-kringloop	4	2	Perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters

Om via bodembeheer gericht te sturen op het realiseren van de opgaves, is het belangrijk om te begrijpen onder welke omstandigheden welke maatregel effect heeft. Tot nu toe wordt dit slechts gemeten op een beperkt aantal lange-termijnproeven en tientallen kortlopende praktijkproeven bij boeren. De evaluatie en toepasbaarheid van maatregelen is vooralsnog ook niet meegenomen in de ontwikkeling van BLN 2.0 (Ros et al., 2023). Het vertalen van deze resultaten naar andere bedrijfssituaties blijkt namelijk lastig, mede door het feit dat er ook synergiën optreden of juist compromissen nodig zijn. Maatregelen kunnen elkaar versterken, maar soms kunnen effecten uitdoven. Het effect van het nemen van maatregelen wordt vaak pas na meerdere jaren zichtbaar en het effect kent ook nog een grote ruimtelijke variatie. Het is belangrijk om beide punten samen met bodemgebruikers verder uit te werken om zo bodemkennis over te dragen naar de praktijk en praktijkervaringen over te dragen naar de wetenschap. De beschreven maatregelen in sectie 3.8 als ook de ondersteunende rapporten vanuit de PPS Beter Bodembeheer en het programma Slim Landgebruik kunnen hierbij ondersteunend zijn. Anno 2023 is een eerste ontwikkeling opgezet om dit maatwerk rondom bodembeheer ook te integreren binnen een bedrijfsgericht adviesprogramma, namelijk het eerder genoemde BedrijfsBodemWaterPlan (Ros et al., 2019; Tijssen & Ros, 2021). Omdat hier een bedrijfsspecifieke vertaalslag wordt gemaakt van regionale opgaven voor waterkwantiteit, waterkwaliteit en bodemkwaliteit richting concrete doelen en maatregelen per bedrijf, biedt dit ook mogelijkheden voor de implementatie van maatregelen om extra koolstof vast te leggen.

5.4 Potentieel van extra koolstofvastlegging

Bijdrage van bodembeheer en bemesting

Op basis van de metingen uit agrarische meetnetten blijkt dat de landbouwgrond in provincie Gelderland gemiddeld 5,9% organische stof bevat, en dat dit gehalte toeneemt van continue mais (4,3%) naar wisselbouw gras en bouwland (4,7%), akkerbouw (4,9%), wisselbouw gras en mais (5,2%) en naar gemiddeld 6,7% voor permanent grasland. Gemiddeld per grondsoort neemt het organische stofgehalte toe van 5,1% op zand tot 5,7% op klei en tot 13,5% op moerige (veen)gronden. Met het procesmatig koolstofmodel Roth-C werd de mogelijkheid onderzocht om de opslag van koolstof in landbouwgrond te vergroten. Via de generieke inzet van diverse maatregelen die horen bij een goede landbouwpraktijk was het mogelijk om per jaar 105 kton CO₂ op te slaan waarbij deze potentie qua orde grootte vergelijkbaar is met de berekende potentie in landelijke modelstudies. Heel concreet gaat het hierbij om verruiming van het bouwplan (meer graan en permanent grasland), extra aanvoer van compost en rundveedrijfmest (binnen de gebruiksnormen), de inzet van vanggewassen en groenbemesters als ook het onderwerken van gewasresten. Tussen de verschillende regio's is de variatie groot, waarbij het percentage percelen met een hoge potentie voor koolstofopbouw (lees: een lage koolstofverzadiging) kan variëren van kleiner dan 10% van het landbouwareaal (regio Kop van de Veluwe en regio Stedendriehoek, Kop van de Veluwe) tot meer dan 30% (regio's FruitDelta Rivierenland, Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen, en de Achterhoek). Er is ook variatie binnen elke regio: in het algemeen hebben percelen met een laag gehalte aan organische stof (grootweg < 3% voor zand en < 5% voor klei) en een hoog kleigehalte (> 20%) een hoger potentieel om meer koolstof op te slaan.

De huidige studie laat zien dat de beoogde koolstofvastlegging in Gelderland voldoende is om bij te dragen aan de landelijke doelstelling om jaarlijks 54 kton CO₂ (= 246 kg CO₂ ha⁻¹, 67 kg C ha⁻¹) op te slaan in de minerale landbouwbodem. In het meest positieve geval kan via goede landbouwpraktijken (waaronder de brede inzet van vanggewassen en groenbemesters, beperkte inzet van compost en inzet van rundveedrijfmest) gemiddeld 126 kg C per hectare per jaar worden opgeslagen in de bodem.

Een extra verandering van het landgebruik (meer granen en meer permanent gras) kan ook voor gemiddeld 131 kg C per hectare per jaar bijdragen aan koolstofopslag.

De landelijke doelstelling kunnen worden gehaald als in alle regio's de maatregelen die horen bij een goede landbouwpraktijk worden geïmplementeerd op 50% van het aanwezige areaal. In deze studie vallen hier de volgende maatregelen onder: verruiming van het bouwplan (permanent grasland tot 75% van het huidige graslandareaal, en 40% graan op het huidige bouwlandareaal), inzet van compost (5% van de fosfaatgebruiksruimte) en rundveedrijfmest (95% van de fosfaatgebruiksruimte), het onderwerken van stro (waar van toepassing) en de inzet van vanggewassen en groenbemesters (waar van toepassing).

Omdat er grote verschillen zijn in bodemeigenschappen binnen provincie Gelderland en de potentie om C vast te leggen sterk kan verschillen in relatie tot deze bodemeigenschappen, is het aan te bevelen om inspanningen voor extra C-vastlegging juist te stimuleren in regio's waar een hoog potentieel ligt voor C-vastlegging. Dat zijn de percelen met een hoog kleigehalte en een laag SOM. In eerder gepubliceerde studies zijn mogelijke extra C vastlegging met realistische combinatie van maatregelen geschat als 300 – 400 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹ (Lesschen et al., 2021) en 316 kg C ha⁻¹ jaar⁻¹ (Herbert et al. 2023). Hierbij werd aangegeven dat Gelderland een hoog potentieel heeft om extra koolstof op te slaan met name op de zandgronden via een hoger aandeel blijvend grasland en de inzet van groenbemesters.

Let wel, in de scenario's in de huidige studie is aangenomen dat de bemesting zoals die in de praktijk wordt vormgegeven ook in de toekomst zo wordt vormgegeven, maar zit hier vele onzekerheden. Ten eerste is er een enorme diversiteit aan bemestingsregime tussen percelen, door bijvoorbeeld de lokale omstandigheden of de voorkeur van de ondernemer. Eerdere simulaties voor provincie Flevoland zonder bemesting laten zien dat de invloed van bemesting groot is (Fujita et al., 2023). De keuze van bemesting (meststofkeuze, hoeveelheid en timing) zijn daarom direct van effect op de hoogte van de C-vastlegging. Ten tweede, zijn er ook onzekerheden in de beschikbaarheid van organische meststof. De beschikbaarheid van champost en groencompost is beperkt, en de beschikbaarheid van dierlijke mest zal zeker gaan veranderen door toekomstig milieu- en landbouwbeleid. Bemesting is slechts een verschuiving van koolstof, en diezelfde mest kan namelijk ook worden gebruikt om op een ander perceel of een andere provincie te zorgen voor een bijdrage aan klimaatdoelen. In deze studie is niet expliciet rekening gehouden met de beschikbaarheid en verdeling van organische meststoffen over Nederland, maar de daadwerkelijke beschikbaarheid ervan kan de uitvoering van verschillende maatregelen beïnvloeden. Ten derde, is er onzekerheid betreft P-toestand. Onze aanname was dat de komende 50 jaar de bemestingspraktijk wordt uitgevoerd conform de huidige mestwetgeving, en daarmee de keuze gemaakt was voor een neutrale P-klasse. Of dit daadwerkelijk in de toekomst zo blijft, is bediscussieerbaar gezien de grote bijdrage van historische P-voorraden in de bodem aan de belasting van het oppervlaktewater. **Als ingrijpende maatregelen worden genomen om het mestbeleid af te stemmen op de benodigde reductie in P-belasting naar het oppervlaktewater, dan zal de aanvoer van mest (en koolstof) naar de bodem verder afnemen.**

Impact van uitgangssituatie en C-verzadiging

De impact van bodembeheer en bemesting om extra koolstof in de bodem op te slaan is sterk afhankelijk van de huidige C-voorraad in de bodem. De hoogste potentie voor koolstofopslag is te vinden in bodems met een relatief laag gehalte aan organische stof en veel klei. Dit omvat met name de zandpercelen met een organische stofgehalte lager dan 4,3% in de Achterhoek, op kleipercelen met een OS-gehalte lager dan 6% (voor gras en gras-mais in wisselbouw) en 5% (voor bouwland op klei) in de regio FruitDelta, en op akkerbouwpercelen op klei met een OS-gehalte lager dan 4,8% en mais en graspercelen met een OS-gehalte lager dan 6% in de GMR regio. **Bodems die voor een groot deel al verzadigd zijn, hebben daarmee weinig potentie. Dit uitgangspunt heeft implicaties voor de implementatie van bodembeheer met het oog op extra koolstofopslag in de bodem.**

Zoals eerder toegelicht zijn er twee manieren om te zorgen voor een verhoging van de koolstofvastlegging. Allereerst kan de aanvoer worden verhoogd en daarnaast kan ook de afbraak worden beperkt. Eerdere studies hebben op basis van lange-termijn experimenten laten zien dat de potentie van niet-ploegen als maatregel om de afbraak te beperken gering is. De grootste impact wordt voorzien via extra koolstofaanvoer (Herbert et al., 2023) via de teelt van meer granen, verhoging van de leeftijd van grasland als ook een hoger aandeel blijvend grasland. Deze maatregelen kunnen echter een grote impact hebben op de bedrijfseconomische situatie van bedrijven. Omdat de hoeveelheid mest en organische reststromen beperkt zijn, is het raadzaam om deze in te zetten op die percelen waar de grootste potentie is te realiseren. Dit is met vooral het geval voor percelen laag in organische stof en kleirijk (veel potentie tot vastlegging) en niet te hoge pH-waarden (om hoge afbraaksnelheden te voorkomen). De ruimtelijke kaarten ontwikkeld op basis van de empirische modellen voor de kwantificering van de C-verzadiging, aangevuld met de procesmatige inschatting van de mogelijke stijging in C-vastlegging als gevolg van management, kunnen gebruikt worden om op regionaal niveau te identificeren waar maatregelen voor koolstofopbouw het meest effectief zijn.

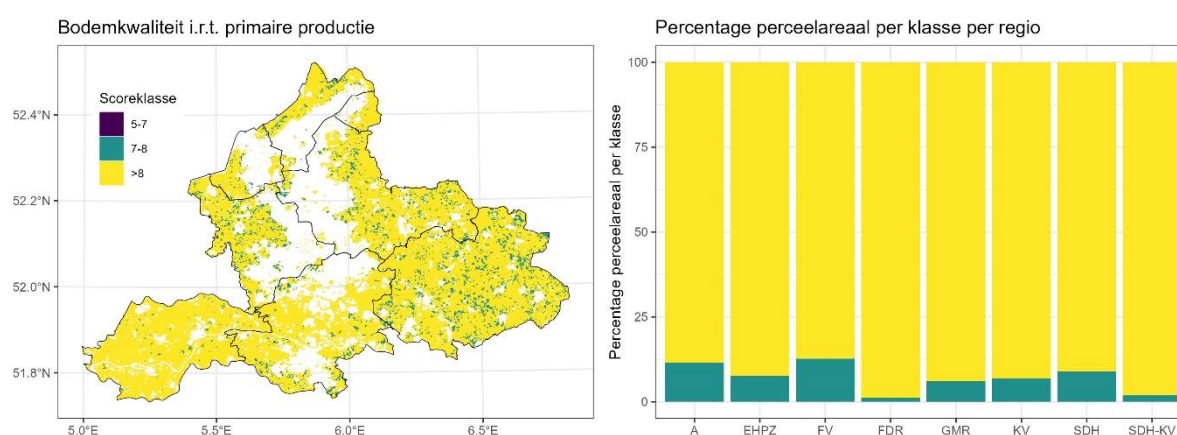
Voor effectieve beleidssturing rondom koolstofvastlegging is het raadzaam om zogenoemde “*best practices*” te definiëren voor generieke inzet voor alle sectoren en bedrijven. Hiermee wordt de bodemkwaliteit verbeterd en worden boeren gestimuleerd om de huidige bodemkwaliteit in stand te houden (zie tabel 3.6). Heel concreet betekent dit het zorgdragen voor een positieve organische stofbalans op bedrijfsniveau. Er zijn diverse tools beschikbaar (www.os-balans.nl, het BedrijfsBodemWaterPlan, NDICEA en de Praktijktool BodemCoolstof) waarmee agrarische ondernemers eenvoudig inzicht krijgen in de mogelijkheden om op bedrijfsniveau via bemesting en bouwplan te zorgen voor voldoende aanvoer van organische stof. Naast deze generieke aanpak liggen er mogelijkheden tot extra “klimaatdiensten” op die percelen en bedrijven met een hoge potentie, dat wil zeggen een lage C-verzadiging en niet een hoge C-afbraak. Voor de keuze van in te zetten maatregelen kan gebruik worden gemaakt van de inzichten uit lange-termijn proeven en modelstudies.

6 Conclusies

Binnen de context van het NPLG is het voor de provincie Gelderland belangrijk om inzicht te krijgen in de ruimtelijke variatie in bodemkwaliteit (in het bijzonder voor de landbouwkundige functies als ook de mogelijkheid om koolstof vast te leggen), de meest voorkomende knelpunten als ook de best passende maatregelen om de bodemkwaliteit te verbeteren. Kennisinstanties, adviseurs en boeren hebben de afgelopen jaren een instrumentarium ontworpen om inzicht te geven in de huidige kwaliteit van landbouwbodems. Deze kennis is gebundeld in de *Bodemindicatorenset Landbouwgronden Nederland* (BLN 2.0). Voor een brede en integrale set aan bodemfuncties kan zo de bijdrage van de bodem aan de ecosysteemdiensten (ESD) primaire productie, waterregulatie en zelfreinigend vermogen, koolstof-opslag en klimaatregulatie, en het faciliteren van de nutriëntenkringloop worden gekwantificeerd én zijn streefwaarden beschikbaar. Voor elk perceel, bedrijf en regio kunnen zo de knelpunten worden geïdentificeerd en bijpassende maatregelen worden gestimuleerd.

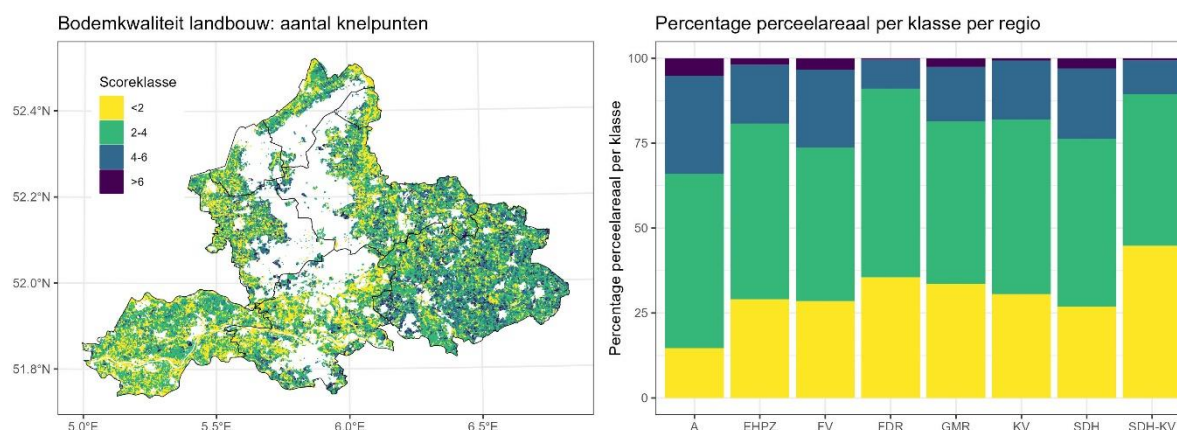
De kwaliteit van landbouwbodems in relatie tot ESD primaire productie

Om de landbouwkundige kwaliteit te beoordelen is voor verschillende chemische, fysische en biologische bodemfuncties in kaart gebracht of er beperkingen zijn voor een goede gewasproductie. Wanneer de onderliggende chemische, fysische en biologische bodemkwaliteitsscores worden geaggregeerd via een eenvoudige berekening van de gemiddelde score, dan blijkt dat in meer dan 90% van de landbouwpercelen de landbouwkundige bodemkwaliteit goed op orde is (Figuur 6-1). In maximaal 10% van het areaal zijn er aandachtspunten, in het bijzonder gerelateerd aan ondergrondverdwijning, de zwavellevering en de beschikbaarheid van water.



Figuur 6-1. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV). De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

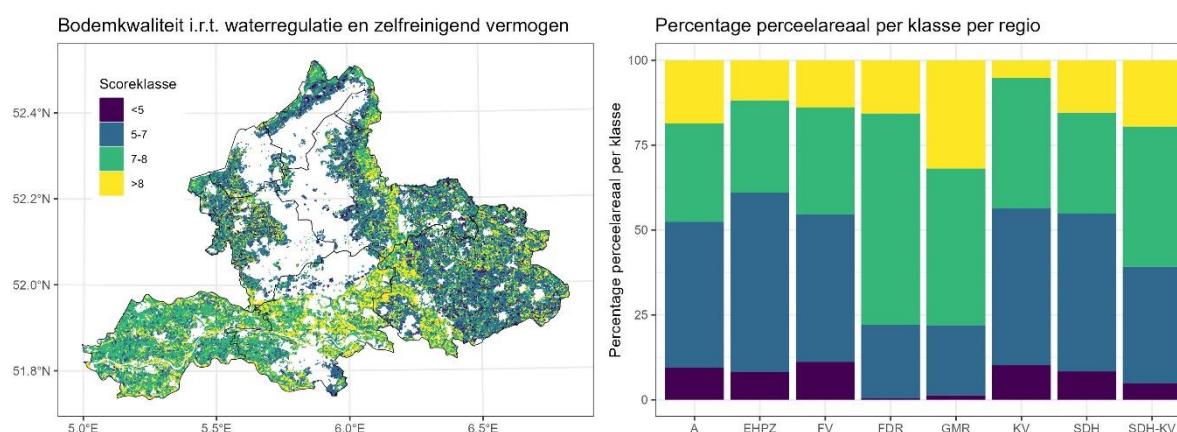
Het aantal knelpunten (die we hier definiëren als scores onder 0,75) worden samengevat in Figuur 6-2. Chemische bodemfuncties zijn over het algemeen goed beoordeeld ten opzichte van de streefwaardes: 95% van de percelen heeft niet meer dan 2 knelpunten (van de in totaal 6 chemische bodemfuncties). Voor de fysische bodemfuncties komen er echter meer knelpunten voor, ook omdat deze voor een deel samenhangen met dezelfde oorzaken. Het totaal aantal knelpunten loopt maximaal op tot vier á vijf. Hoewel het type knelpunt sterk kan variëren per regio (zie hoofdstuk 3.8) is het aantal redelijk constant over de verschillende regio's.



Figuur 6-2. Ruimtelijke variatie in het aantal knelpunten in de bodemkwaliteit in relatie tot de productie van gewassen binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 6-1. Een knelpunt is gedefinieerd als een indicator met een score lager dan 7.

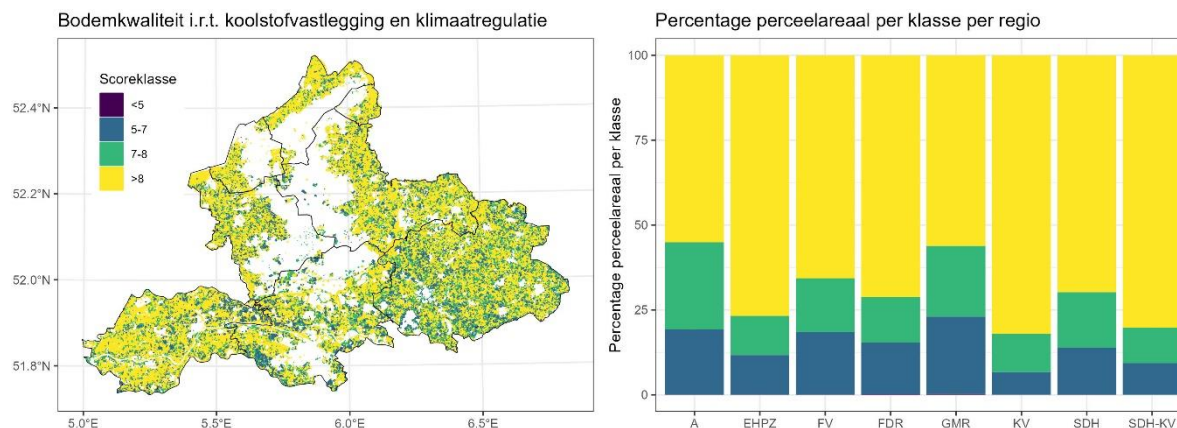
De kwaliteit van landbouwbodems in relatie tot andere ESD

Wanneer de bodemkwaliteitsscores voor grondwateraanvulling en buffering van nutriënten en pesticiden worden geaggregeerd via een eenvoudige berekening van de gemiddelde score, dan blijkt dat in meer dan 10-75% van de landbouwpercelen de landbouwkundige bodemkwaliteit redelijk tot goed op orde is (Figuur 6-3). In gemiddeld 20 tot 50% van het areaal zijn er aandachtspunten, in het bijzonder gerelateerd aan de beschikbaarheid van water (en gekoppelde grondwateraanvulling), en deels ook aan de verliezen van nutriënten en pesticiden naar het grondwater.



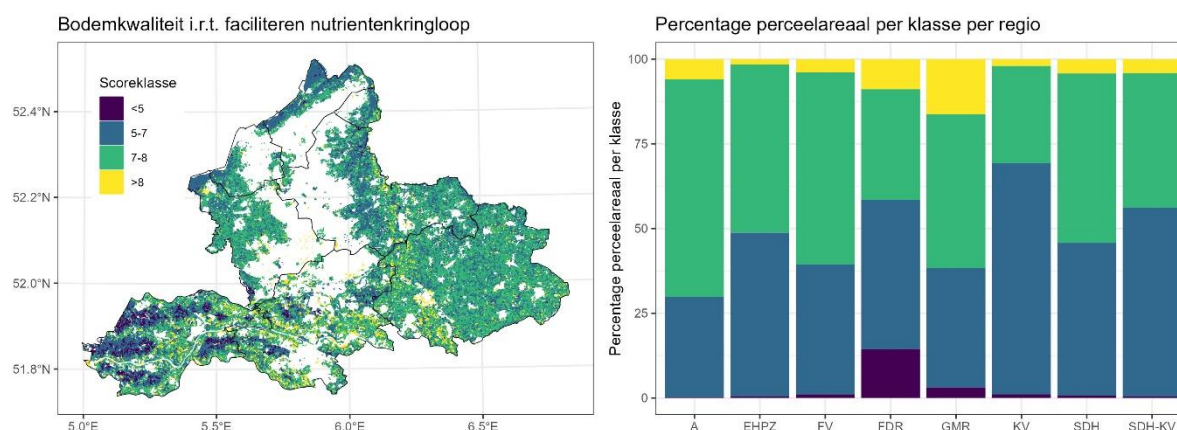
Figuur 6-3. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen binnen de provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 6-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

De huidige bodemkwaliteit in relatie tot de klimaatopgave is positief omdat veel landbouwpercelen anno 2023 een positieve organische stofbalans hebben, een hoog organische stofgehalte en een hoge mate van C-verzadiging. Meer dan 50% van alle percelen heeft daarom ook een bodemkwaliteitsscore hoger dan een 8 (Figuur 6-4). De variatie binnen de provincie is echter groot. Per regio is 25 tot 45% van de percelen inzetbaar voor maatregelen om de koolstofvoorraad te verhogen.



Figuur 6-4. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 6-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

De huidige bodemkwaliteit in relatie tot het faciliteren van de nutriëntenkringloop is positief omdat veel landbouwpercelen anno 2023 een goede bodemtoestand hebben die door de wetgeving rond mestbeleid richting de toestand "neutraal" bewegen. Meer dan 40% van alle percelen heeft daarom ook een bodemkwaliteitsscore hoger dan een 8 (Figuur 6-5). Dat betekent dat voor 60% van de percelen er ook nog uitdagingen liggen om nutriënten efficiënter in te zetten, rekening houdend met de kwaliteit van de bodem. De variatie binnen de provincie is groot, waarbij de grootste uitdagingen in het westen van de provincie liggen.



Figuur 6-5. Ruimtelijke variatie in de gemiddelde bodemkwaliteit in relatie tot de ecosysteemdienst faciliteren nutriëntenkringloop binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. Voor afkorting van regio's, zie Figuur 3-1. De score varieert tussen 10 (goed) en 0 (slecht).

Inzicht in het handelingsperspectief

Er zijn in de literatuur lange lijsten met maatregelen bekend die op basis van expertkennis, modelberekeningen en experimentele data zijn geselecteerd als maatregelen waarmee de bodemkwaliteit kan worden verbeterd. Op basis van expertkennis van de auteurs en gebruik makend van de hierboven genoemde praktijkstudies naar de inzetbaarheid en effectiviteit van maatregelen, is een eerste uitwerking gemaakt van de maatregelen die inzetbaar zijn om de bodemkwaliteit in Gelderland in relatie tot de verschillende ecosysteemdiensten te verbeteren. Deze worden samengevat in de volgende tabel.

Tabel 6-1. Mogelijke bodembeheermaatregelen om een positieve bijdrage te leveren aan de vijf ecosysteemdiensten die de bodem levert: primaire productie (ESD1), waterregulatie en zelfreinigend vermogen (ESD2), koolstofvastlegging en klimaatregulatie (ESD3), bodembiodiversiteit en habitatvoorziening (ESD4) en faciliteren nutriëntenkringloop (ESD5). Gemiddelde bijdrage is beoordeeld als negatief (-), neutraal (0) of positief (+).

Maatregel	Areaal	Bijdrage aan Ecosysteemdienst				
		ESD1	ESD2	ESD3	ESD4	ESD5
Verruiming bouwplan	Areaal waarin fractie gras en rustgewassen < 0,4	-	+	+	+	+
Volg Advies Handboek Bodem en Bemesting voor pH en bemesting	Volledig areaal	+	+	0	-	+
Pas wisselteelt toe en verleng leeftijd grasland	Areaal met continue maïs en tijdelijk grasland	+	+	+	+	+
Inzet van akkerranden en bufferstroken	4% van elk perceel	-	0	0/+	+	0
Vanggewassen en groenbemesters	Volledig areaal bouwland	+	+	+	+/-	+
Aanvoer van (extra) organische stof (compost, bokashi, etc.)	Volledig areaal bouwland	0	0/-	+	+	+
Voorkom verdichting met juiste timing van activiteiten, inzet rijpaden en aanpassing machines	Volledig areaal	+	+	0	0	+
Aanpassen drainage basis en drains	Gedraineerd areaal	0	+	0	0/-	0
Perceel jaarrond groen houden	Volledig areaal	+	+	+	0/+	+
Water vasthouden in perceelsloten	Areaal droogtegevoelige gronden	+	+	0	0	0

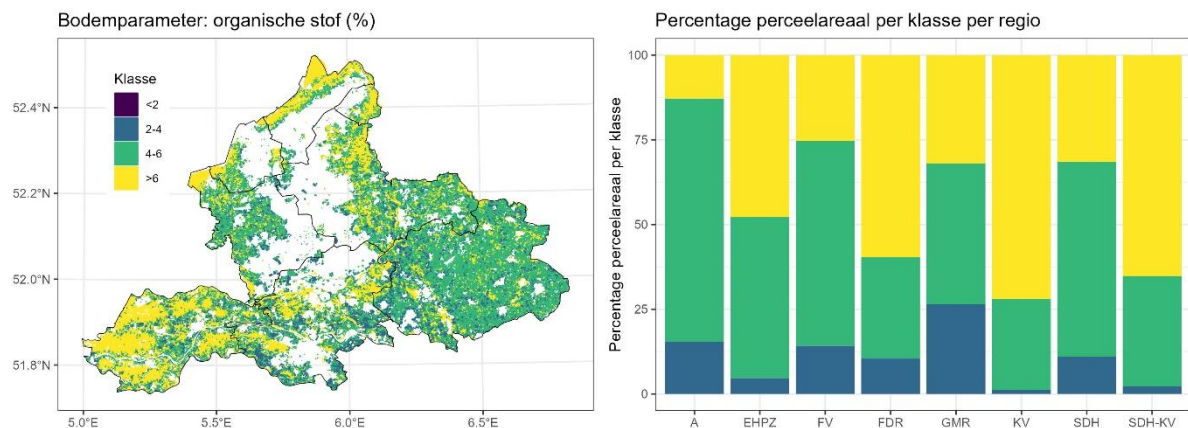
Verschillende regio's in Gelderland hebben te maken met verschillende uitdagingen. In hoofdstuk 3.8 worden deze per regio samengevat. Samengevat voor de hele provincie wordt dit weergegeven in tabel 6-2.

Tabel 6-2. Percentage areaal (in %) waarbij er knelpunten aanwezig zijn voor bodemfuncties (met een score lager dan 5), in relatie tot de getoetste ecosysteemdiensten uit BLN 2.0 en de beste maatregelen die hiervoor inzetbaar zijn.

Bodemfuncties	ESD*	Areaal	Beste Maatregelen (zie tabel 3.6)
Areaal (ha * 100)	-	2277	
Fosfaatlevering	1	1	Volg bemestingsadvies
Kaliumlevering	1	7	Volg bemestingsadvies
Zwavellevering	1	56	Volg bemestingsadvies, aanvoer organische stof
Verdichting	1	55	Voorkom verdichting, verruiming bouwplan, aanvoer van organische stof
Droogtestress	1	16	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
Natschade	1	8	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
Uitspoelingsrisico pesticiden	2	45	Inzet van akkerranden en bufferstroken, aanvoer van organische stof , verruiming bouwplan
Stikstofbuffering grondwater	2	26	Vanggewassen en groenbemesters, voorkom verdichting, perceel jaarrond groen, verruiming bouwplan
Uitspoelingsrisico nitraat	2	27	Vanggewassen en groenbemesters, voorkom verdichting, perceel jaarrond groen, verruiming bouwplan
Grondwateraanvulling	2	73	Aanpassen drainage basis en drains, water vasthouden
EOS-balans	3	5	Aanvoer van organische stof, perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters
N-benutting	4	89	Perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters
P-kringloop	4	2	Perceel jaarrond groen, volg bemestingsadvies, verruiming bouwplan, vanggewassen en groenbemesters

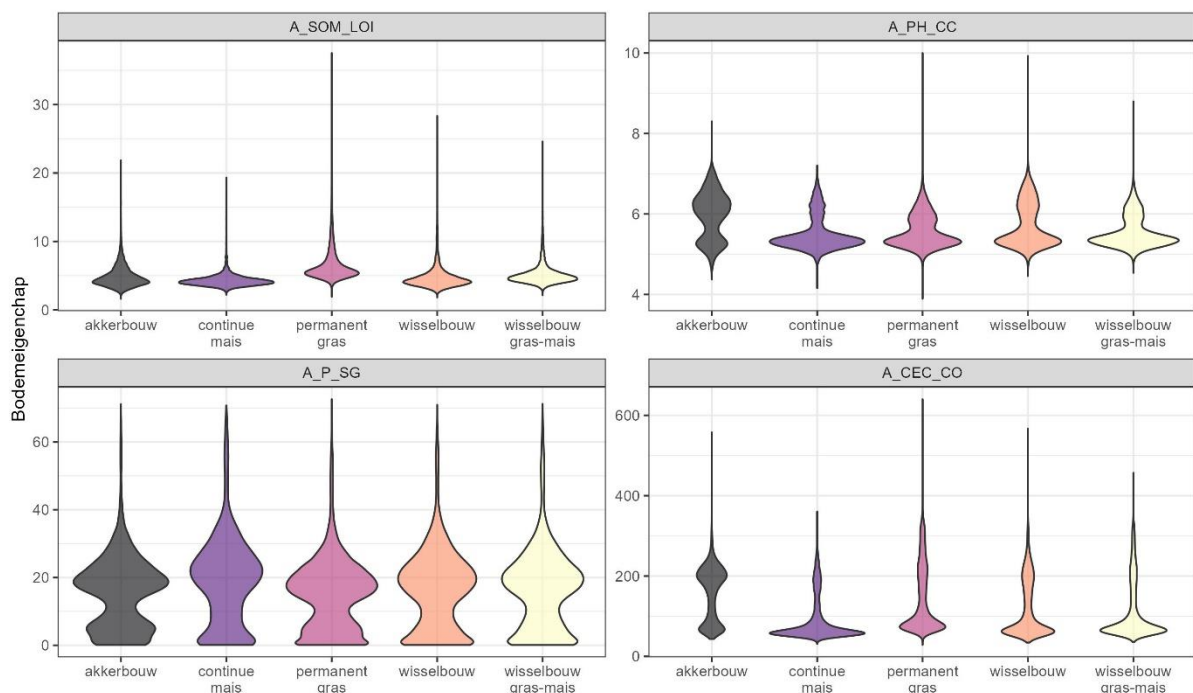
Ruimtelijk inzicht in het organische stofgehalte

Op basis van de metingen uit agrarische meetnetten blijkt dat de landbouwgrond in provincie Gelderland gemiddeld 5,9% organische stof bevat, en dat dit gehalte toeneemt van continue mais (4,3%) naar wisselbouw gras en bouwland (4,7%), akkerbouw (4,9%), wisselbouw gras en mais (5,2%) en naar gemiddeld 6,7% voor permanent grasland. Gemiddeld per grondsoort neemt het organische stofgehalte toe van 5,1% op zand tot 5,7% op klei en tot 13,5% op moerige (veen)gronden. De ruimtelijke variatie in het organische stofgehalte wordt in Figuur 6-6 gevisualiseerd, waarbij ook per regio in kaart is gebracht hoe groot de variatie is in het organische stofgehalte.



Figuur 6-6. Ruimtelijke variatie in het gehalte aan organische stof binnen provincie Gelderland, waarbij voor elke klasse is aangegeven welk deel van de percelen (% van het areaal) binnen de acht regio's in deze klasse valt. De regio's zijn: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropoolregio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

Omdat het organische stofgehalte voor een deel bepaalt wordt door het bouwplan, wordt hieronder een samenvattende violin plot weergegeven die de variatie in het organische stofgehalte illustreert voor de verschillende categorieën landgebruik. Dit is ook gedaan voor de pH, de fosfaatverzadiging en de CEC.



Figuur 6-7. Variatie in bodemkenmerken als het organische stofgehalte (A_SOM_LOI, in %), zuurgraad (A_PH_CC, geen eenheid), fosfaatverzadiging (A_P_SG, in %) en de CEC (A_CEC_CO, in mmol+ kg⁻¹) per type landgebruik binnen de provincie Gelderland.

Inzicht in de mogelijkheden voor koolstofvastlegging

Omdat het effect van maatregelen gericht op de vastlegging van koolstof sterk afhangt van de mate van koolstofverzadiging, is per regio het potentiële areaal berekend voor de drie eerder beschreven potentie-klassen (Tabel 6-3). Hieruit blijkt dat in 43% van het landbouwareaal maatregelen minder effectief zullen zijn om koolstof op te bouwen. In 30% van het areaal, overeenkomend met circa 68.000 hectare landbouwgrond, ligt er echter een hoge potentie om koolstof op te slaan. Maatregelen zijn het meest effectief inzetbaar in de regio's Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen, de Achterhoek en de Fruitdelta Rivierenland.

Tabel 6-3. Percentage landbouwgrondareaal per potentieklasse om koolstof vast te leggen, waarbij de klasse laag alle percelen bevat met een C-verzadiging hoger dan 70%, de klasse hoog alle percelen bevat met een C-verzadiging lager dan 60%, en alle overige percelen in de klasse gemiddeld vallen.

Regio *	Areaal (ha*100)	Percentage areaal per potentieklasse (%)		
		Laag	Gemiddeld	Hoog
A	761	28	32	40
EHPZ	52	63	25	12
FV	197	49	32	18
FDR	418	54	17	29
GMR	350	38	24	38
KV	99	76	18	5
SDH	368	50	31	19
SDH-KV	29	72	22	6
Totaal	2277	43	27	30

* De volgende afkortingen worden gebruikt voor de regio's: Achterhoek (A), EHPZ (EHPZ), Foodvallei (FV), FruitDelta Rivierenland (FDR), Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR), Kop van de Veluwe (KV), Stedendriehoek (SDH) en Stedendriehoek, Kop van de Veluwe (SDH-KV).

De provinciale opgave van 54 kton CO₂ vastlegging kan worden gerealiseerd via een brede uitrol van maatregelen die passen binnen de Goede Landbouwpraktijk. Dit betekent de generieke inzet van vanggewassen en groenbemesters, de omzetting van continue maïs naar gras-maïs wisselbouw, verhoging van de leeftijd van grasland als ook verbetering van bodemstructuur (vermijden verdichting) en inzet van nutriënten conform het Handboek Bodem en Bemesting. Dit verhoogt de gewasopbrengst en daarmee de koolstofaanvoer naar de bodem en verhoogt de vastlegging ervan. Aanvullend daarop is het mogelijk om in de Achterhoek, de FruitDelta Rivierenland (FDR) en Groene Metropool-regio Arnhem-Nijmegen (GMR) in te zetten op extra maatregelen op percelen met een hoge potentie. Via verdere verruiming van het bouwplan en extra aanvoer van compost, vaste mest en het inwerken van stro kan in percelen met een hoge potentie aanvullend 37 kton CO₂ per jaar worden vastgelegd.

Literatuur

- Bodemkundige Dienst België, & Universiteit Gent** (2010). *Ontwikkelen van Een Expertsysteem Voor Het Adviseren van Het Koolstofbeheer in de Landbouwbodems*. Gent.
- Brus DJ & JJH van den Akker** (2018). *How serious a problem is subsoil compaction in the Netherlands? A survey based on probability sampling*. SOIL 4. 37-45.
- CBAV** (2022). *Handboek bodem en bemesting 2022*. Commissie bemesting akkerbouw en vollegrondsgroenten (CBAV) <https://www.handboekbodemenbemesting.nl>.
- CBGV** (2022). *Bemestingsadvies*. Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen (CBGV), Wageningen
- Coleman K & DS Jenkinson** (1996). RothC-26.3 - A Model for the Turnover of Carbon in Soil. In *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*, edited by D.S. Powlson, P. Smith, and J.U. Smith, 237–46. Springer-Verlag, Heidelberg.
- De Haan JJ, van den Elsen E & SM Visser** (2021). *Evaluatie van de Bodemindicatoren Voor Landbouwgronden in Nederland (BLN), Versie 1.0*. Rapport WPR-883. Wageningen: Wageningen Research. <https://edepot.wur.nl/549973>.
- De Haan J, Vervuurt W, Van de Voorde T & A van Gugten** (2023). *Overzicht maatregelen duurzaam bodembeheer*. WPR-OT rapport 988, 26 pp.
- De Vries W, Kros J, Voogd JCH, van Duijvendijk K & GH Ros** (2018). *Kansen voor het sluiten van de mineralenbalansen in Noord-Nederland; effecten op regionale schaal en bedrijfsschaal*. WEnR-rapport 2929, 72 pp.
- De Vries W, Kros J, Voogd JCH & GH Ros** (2023). Integrated assessment of agricultural practices on large scale losses of ammonia, greenhouse gases, nutrients and heavy metals to air and water. *Science of the Total Environment* 857, 159220.
- Falloon P, Smith P, Coleman K & S Marshall** (1998). *Estimating the Size of the Inert Organic Matter Pool from Total Soil Organic Carbon Content for Use in the Rothamsted Carbon Model*. *Soil Biology and Biochemistry* 30 (8–9): 1207–11.
- FAO** (2017). *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management* Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy
- Fujita Y, de Pater J, van den Dool K, de Wit D, de Haan J & GH Ros** (2023). *Bodemkwaliteit streefwaarden Flevoland*, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1916.N.22, pp 52.
- Fujita Y & GH Ros** (2021). *Locatie Specifiek Maatwerk voor Water- en Bodemkwaliteit; Deel 1. Een gebiedsanalyse van de Achterhoek*, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1761.N.20.1, 36 pp.
- Geurts J, Van Loon A & GH Ros** (2021) *Gezonde bodem, gezond watersysteem*. BTO-rapport 2021.026, KWR, Nieuwegein.

- Ros GH, Kros H & Y Fujita** (2021). *Locatie Specifiek Maatwerk voor Water- en Bodemkwaliteit; Deel 4. Inzicht in ruimtelijke variatie bemestingspraktijk*. Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1761.N.20.4, 18 pp.
- Hassink J** (1997). *The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles*. Plant Soil 191 (1), 77–87.
- Herbert Z, Agricola H & C Koopmans** (2023). *Impact van koolstofmaatregelen op regioniveau: Een scenariostudie naar de mogelijkheden per provincie*. Publicatie / Louis Bolk Instituut; No. 2023-012 LbP. Louis Bolk Instituut. <https://edepot.wur.nl/631464>
- Lesschen JP, Hendriks C, van de Linden A, Timmermans B, Keuskamp J, Keuper D, Hanegraaf M, Conijn S & T Slier** (2020). *Ontwikkeling praktijktool voor bodem C*. WEnR-rapport 2990. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/517746>
- Lesschen JP, Hendriks C, Slier T, Porre R, Velthof G & R Rietra** (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*. WEnR-rapport 3130. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/557330>
- NMI** (2023) *BodemSchat versie 6. Ruimtelijke variatie in bodemeigenschappen van Nederland*. NMI-database.
- Peralta G, Di Paolo L, Luotto I, Omuto C, Mainka M, Viatkin K & Y Yigini** (2022). *Global soil organic carbon sequestration potential map (GSOCseq v1. 1)–Technical manual*. Food & Agriculture Org.
- Rinot O, Levy GJ, Steinberger Y, Svoray T & G Eshel** (2019). *Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach*. Sci. Total Environ. 648, 1484–1491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>
- Ros GH** (2019) *De open Bodemindex 0.11*. OBI-rapportage, 183 pp.
- Ros GH, de Haan JJ, Fuchs LM & L Molendijk** (2023). *Bodembeoordeling van landbouwgronden voor diverse ecosysteemdiensten; Ontwikkeling van de BLN, versie 2.0*. Wageningen Research, Rapport WPR-OT 1030, 91 pp.
- Ros GH, Verweij SE, van der Voort T, de Vries W & Y Fujita** (2023b). *Carbon Storage Potential of Agricultural Soils, a data driven approach*. Onder review.
- Ros GH, Verweij SE, Janssen SJC, De Haan J & Y Fujita** (2022). *An Open Soil Health Assessment Framework Facilitating Sustainable Soil Management*. Environmental Science & Technology 56 (23): 17375–84.
- Ros GH, Verweij S, Quist N & N van Eekeren** (2020). *BedrijfsBodemWaterPlan. Maatwerk voor duurzaam bodem en waterbeheer*. Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1805.N.20, 34 pp.
- Selin Norén I, Verstand D & J de Haan** (2021) *Effecten van bodemmaatregelen op bodemfuncties en bodemkwaliteit; integrale analyse van de resultaten uit de PPS Beter Bodembeheer en eerste vertaalslag naar praktische boodschappen*. WPR-rapport 856, 65 pp.
- Selin Norén I, Vervuurt W, Bakker N, Koopmans C, Verstand D & J de Haan** (2022). *Analyse van bodemmaatregelen: effecten op bodemfuncties en toepasbaarheid: integrale analyse van de resultaten uit de PPS Beter Bodembeheer*. Rapport nr. WPR-OT-898.
- Slier T & J van der Kolk** (2023) *Het klimaatdoel voor minerale landbouwbodems in Nederland is haalbaar. Samenvatting van vijf jaar onderzoek in Slim Landgebruik*. WEnR-rapport, projectnummer BO-43.10-003-012, 20 pp.

- Tijssen D & GH Ros** (2021) *Toetsing van het BedrijfsBodemWaterPlan binnen Sensor Gestuurd Boeren*, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1836.N.21, 56 pp.
- Tsiafouli MA, Thébault E, Sgardelis SP, De Ruiter PC, Van Der Putten WH, Birkhofer K, et al.** (2015). *Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe*. *Global Change Biology*, 21(2), 973-985.
- Van den Akker JJH, de Vries F, Vermeulen GD, Hack-ten Broeke MJD & T Schouten** (2012). *Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart*. Alterra-rapport 2409, 80 pp.
- Van den Akker JJH & T Hoogland** (2011) *Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands*. *Soil & Tillage Research* 114, 146-154.
- Van der Putten W** (2020). *Opinie De bodemparadox: het gaat goed met de bodem zolang je alleen naar de gewasopbrengst kijkt*. Foodlog. 10 nov 2020
- Van der Wal A, de Lijster E & W Dijkman** (2016). *Ontwerp Label Duurzaam Bodembeheer*. Rapport nr. 910. Beschikbaar via: <https://edepot.wur.nl/401825>
- Van Rotterdam D, Vervuurt W, Van Geel W, Bussink DW, Brinks H & J de Haan** (2021). *Fosfaatvoorziening aardappel; relatie tussen mestbeleid, fosfaattoestand van de bodem en voorziening van het gewas*, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1777.N.20, pp 57.
- Verloop K, van Agtmaal M, Bussink W, van Eekeren N, Groenendijk P, Jansen S, Noij GJ & M Zanen** (2018). *Achtergronden bij informatie in de BOOT-lijst factsheets*. Wageningen University and Research, nr. WPR-842.



Nutriënten Management Instituut BV
Nieuwe Kanaal 7c
6709 PA Wageningen

tel: (06) 29 03 71 03
e-mail: nmi@nmi-agro.nl
website: www.nmi-agro.nl