



Bodembeoordeling van landbouwgronden voor diverse ecosysteemdiensten

Ontwikkeling van de BLN, versie 2.0

Auteurs: G.H. Ros, J.J. de Haan, L.M. Fuchs, L. Molendijk



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Rapport WPR-OT 1030

Bodembeoordeling van landbouwgronden voor diverse ecosysteemdiensten

Ontwikkeling van de BLN, versie 2.0

G.H. Ros^{1,2}, J.J. de Haan¹, L.M. Fuchs¹, L. Molendijk¹

1 Wageningen University & Research

2 Nutriënten Management Instituut

Dit onderzoek is in opdracht van de Topsector Agri & Food uitgevoerd door de Stichting Wageningen Research (WR), in het kader van de PPS Beter Bodembeheer (TKI-AF-16064/BO-56-001-005).

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Wageningen, augustus 2023

Rapport WPR-OT 1030

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/634579>

Duurzaam bodembeheer is relevant voor de kwaliteit van de landbouwbodem en de leefomgeving, en heeft daarbij ook invloed op het grond- en oppervlaktewater, de circulaire economie en de biodiversiteit. Op basis van de eerder ontwikkelde indicatorset Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN), de inzichten van de Open Bodemindex en nieuwe wetenschappelijke inzichten wordt in dit rapport de opvolger gepresenteerd: BLN 2.0. We presenteren hierbij een verbeterde systematiek om relatief goedkoop en eenvoudig de bodemkwaliteit integraal te beoordelen in relatie tot vijf ecosysteemdiensten, zowel op perceelsniveau als op nationaal niveau.

Trefwoorden: bodemkwaliteit, bodembeoordeling, meten, indicatoren, landbouw, bodemeigenschap, bodemfunctie

© 2023 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Open Teelten, Postbus 16, 6700 AA Wageningen; T 0317 48 07 00; www.wur.nl/plant-research

KvK: 09098104 te Arnhem
VAT NL no. 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Rapport WPR-1030

Foto omslag: WUR

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Uitdagingen in de landbouw rond bodemkwaliteit en -beheer	9
1.2 Beoordelingsinstrumenten bodemkwaliteit en -beheer	10
1.2.1 BLN-indicatorset	10
1.2.2 Open Bodemindex (OBI)	11
1.2.3 Overige bodembeoordelingsinstrumenten	12
1.2.4 Instrumenten ter beoordeling van duurzaam (bodem)beheer	14
1.3 Doel BLN 2.0	16
1.4 Leeswijzer	17
2 Framework van de BLN 2.0	18
2.1 Definities rond beoordeling van bodemkwaliteit	18
2.2 Framework van de BLN 2.0	19
2.2.1 Framework BLN 2.0	19
2.2.2 Afbakening	20
2.3 Selectie van ecosysteemdiensten (stap 1)	21
2.4 Selectie van bodemfuncties (stap 2)	22
2.4.1 Selectie van bodemfuncties	22
2.4.2 Optionele bodemfuncties	23
2.4.3 Bodemfuncties in ontwikkeling	23
2.5 Selectie van bodemeigenschappen (stap 3)	24
2.6 Beoordeling van bodemfuncties (stap 4)	24
2.6.1 Van bodemfunctie naar indicator	24
2.6.2 Vaststellen streef-, drempel- en referentiewaarden	24
2.6.3 Scoringsfuncties: het berekenen van een score voor kwaliteit	25
2.7 Beoordeling van integrale bodemkwaliteit (stap 5)	26
2.7.1 Aggregatiemethodes	26
2.7.2 Aggregatie: wetenschappelijk of subjectief?	27
2.7.3 Aggregatie in de BLN 2.0	28
3 Ecosysteemdienst primaire productie	30
3.1 Chemische bodemfuncties BLN 2.0	30
3.2 Fysische bodemfuncties	34
3.3 Biologische bodemfuncties	38
3.4 Rol van organische stof	41
4 Ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen	43
4.1 Bodemfuncties voor regulatie en reiniging grondwater	43
4.2 Bodemfuncties voor regulatie en reiniging oppervlaktewater	47
5 Ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie	51
5.1 Bodemfuncties voor koolstofvastlegging	51
5.2 Bodemfuncties voor broeikasgasemissies	54
6 Ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	56
7 Ecosysteemdienst faciliteren van de nutriëntenkringloop	60

8	Overzichten ecosysteemdiensten, bodemfuncties en bodemeigenschappen in de BLN 2.0	62
9	Discussie, reflectie en vooruitblik	67
9.1	Framework van de BLN 2.0	67
9.1.1	De aanleiding	67
9.1.2	Het BLN 2.0 framework	67
9.1.3	Definities	68
9.1.4	BLN 2.0 in vergelijking met andere frameworks rond bodembeoordeling	69
9.1.5	Ruimtelijke en tijdschaal	69
9.1.6	Ecosysteemdiensten	70
9.1.7	Bodemfuncties	70
9.1.8	Streefwaarden, drempelwaarden en referentiewaarden	71
9.1.9	Selectie van Bodemmetingen	71
9.1.10	Aggregatie	72
9.2	Toepassing BLN 2.0	72
9.2.1	Inbedding in beleid, praktijk en onderzoek	72
9.2.2	Gebruik van de BLN 2.0 op perceels- en bedrijfsniveau voor de boer	73
9.2.3	Gebruik voor regionale en nationale monitoring	74
9.3	Discussie, reflectie en vooruitblik per ecosysteemdienst	75
9.3.1	Ecosysteemdienst Primaire productie	75
9.3.2	Ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen	75
9.3.3	Ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie	77
9.3.4	Ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	78
9.3.5	Ecosysteemdienst faciliteren van de nutriëntenkringloop	78
9.4	Overzicht aanbevelingen voor vervolg	79
	Literatuur	81
	Bijlage 1 Methoden voor bepaling van koolstofverzadiging	87

Woord vooraf

De ontwikkeling van de BLN 2.0 is een traject waaraan veel meer mensen hebben bijgedragen dan alleen de auteurs van dit rapport. De BLN bouwt voort op vele voorgaande trajecten zoals de biologische bodem-indicatoren (BOBI), de Soil Health Index (SHI), het Meten is weten project in de PPS Duurzame Bodem en de Open Bodemindex. Ook de metingen van de BLN-indicatoren in diverse lange termijn projecten zoals in de systeemproeven, het bedrijvennetwerk bodemmetingen en andere projecten van de PPS Beter Bodembeheer hebben bijgedragen aan het tot stand komen en het verbeteren van de BLN.

We zijn dus schatplichtig aan vele collega-onderzoekers in de afgelopen decennia die gewerkt hebben aan onderdelen van het meten van bodemkwaliteit. In het bijzonder willen we allen bedanken die hebben bijgedragen aan de evaluatie van de BLN, versie 1.0. Daarnaast willen we Marius Heinen, Jack Faber, Gerard Korthals en Joeke Postma en ook de partners uit de PPS Beter Bodembeheer Thea van Beers (Agrifirm), Gera van Os (Aeres Hogeschool), Frank Woets en Conno van Dam (van Iperen), Pieter Brooijmans (Cosun), Edwin de Jongh (BO-Akkerbouw) en Albert Jan Olijve (Van Tafel naar Kavel) bedanken voor hun bijdrage. We danken ook de betrokken onderzoekers en betrokkenen van de Open Bodemindex waaronder Yuki Fujita, Wim Bussink, Debby van Rotterdam, Sven Verweij, Brent Riechelman, Dick van den Oever en Fadyan Pronk (asr), Harry Smit en Jeen Nijboer (Rabobank), en Rik Thijssen (Vitens) als ook honderden boeren en bemestingsadviseurs (van PPP-Agro en Delphy) voor hun bijdrage.

Tot slot willen we ook Annet Zweep, Albert de Vries en Esmée van Eeden van het Ministerie van LNV bedanken voor hun bijdrage aan de PPS als ook in de bespreking van de concepten van dit rapport.

We verwachten dat we met dit rapport bijdragen aan de verdere ontwikkeling van het meten en beoordelen van bodemkwaliteit in de Nederlandse landbouw.

Gerard H. Ros, Janjo de Haan, Lennart Fuchs en Leendert Molendijk

Samenvatting

Aanleiding en voorgeschiedenis

In Nederland is de wens geuit om eenduidig inzicht te krijgen in het meten en beoordelen van de bodemkwaliteit om zo duurzaam beheer van landbouwgronden te kunnen stimuleren. Dit is ook opgenomen in het Nationaal Programma Landbouwbodems. WUR heeft hiervoor in 2019 de BLN-indicatorset ontwikkeld, Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland. In 2021 is deze aangepast naar de versie 1.1. De indicatorset bestaat uit een 18-bodemmetingen met beschikbare streefwaarden en referentiewaarden. Tegelijkertijd is met de Open Bodemindex (OBI) een methodiek ontwikkeld om de bodemkwaliteit te beoordelen voor primaire productie aan de hand van metingen.

Doel BLN 2.0

Doel van de BLN 2.0 is om een integrale beoordeling van de kwaliteit van landbouwbodems te maken voor de bijdrage van landbouwbodems aan belangrijkste maatschappelijke opgaves die spelen in Nederland. In de BLN 2.0 integreren we de BLN-indicatorset met de methodiek ontwikkeld in de OBI en verbreden we deze naar een beoordeling van de bijdrage van de bodem aan meerdere ecosysteemdiensten: naast 1) primaire productie ook 2) waterregulatie en zelfreinigend vermogen, 3) koolstofvastlegging en klimaatregulatie, 4) bodembiodiversiteit en habitatvoorziening en 5) het faciliteren van de nutriëntenkringloop. Dit rapport beschrijft het framework van de BLN 2.0 met de bodemfuncties die inzicht geven in de bijdrage van de bodem aan de ecosysteemdiensten en de bijbehorende indicatoren met streefwaarden en te meten bodemeigenschappen. Ook wordt beschreven hoe tot scoringsfuncties te komen en hoe de scores per indicator te aggregeren zijn naar integrale beoordelingen.

Beschrijving BLN 2.0

In totaal zijn er 39 zogenoemde bodemfuncties geïdentificeerd die bijdragen aan primaire productie (n = 21), waterregulatie en zelfreinigend vermogen (n = 10), koolstofvastlegging en klimaatregulatie (n = 3), bodembiodiversiteit en habitatvoorziening (n = 6) en het faciliteren van de nutriëntenkringloop (n = 5). Voor een groot deel hiervan zijn streefwaarden beschikbaar specifiek per gewastype, grondsoort en geohydrologische situatie. Wanneer streefwaarden ontbreken, kan voorlopig gebruik gemaakt worden van drempelwaarden en referentiewaarden.

Potentieel gebruik

De BLN 2.0 is in eerste instantie ontwikkeld voor toepassing op perceelsniveau door boeren. Gebruik van de BLN 2.0 geeft boeren inzicht hoe ze via hun bodemkwaliteit hun productie kunnen verbeteren en in hoeverre ze bijdragen aan de belangrijke maatschappelijke opgaves in Nederland. Ook is de BLN 2.0 inzetbaar binnen bestaande (en in ontwikkeling zijnde) bodem- en landbouwbeoordelingsinstrumenten en adviestools zoals de Open Bodemindex, de Bodemmaatlat, de BedrijfsWaterWijzer, het BedrijfsBodemWaterPlan, de Biodiversiteitsmonitoren Akkerbouw en Melkvee en de KPI-systematiek om zo ook daadwerkelijke gebruikers van landbouwbodems toegang te geven tot de ontwikkelde inzichten.

Daarnaast kan de BLN 2.0 ook gebruikt worden als basis voor regionale en nationale monitoring. De monitoring kan voortbouwen op de eerdere monitoring van 2018 met de BLN 1.0 omdat de te meten bodemeigenschappen gelijk zijn gebleven. Wel moeten voor een goede nationale monitoring nog een aantal aspecten uitgewerkt worden zoals juiste stratificatie van metingen en precieze keuze van meetmethoden.

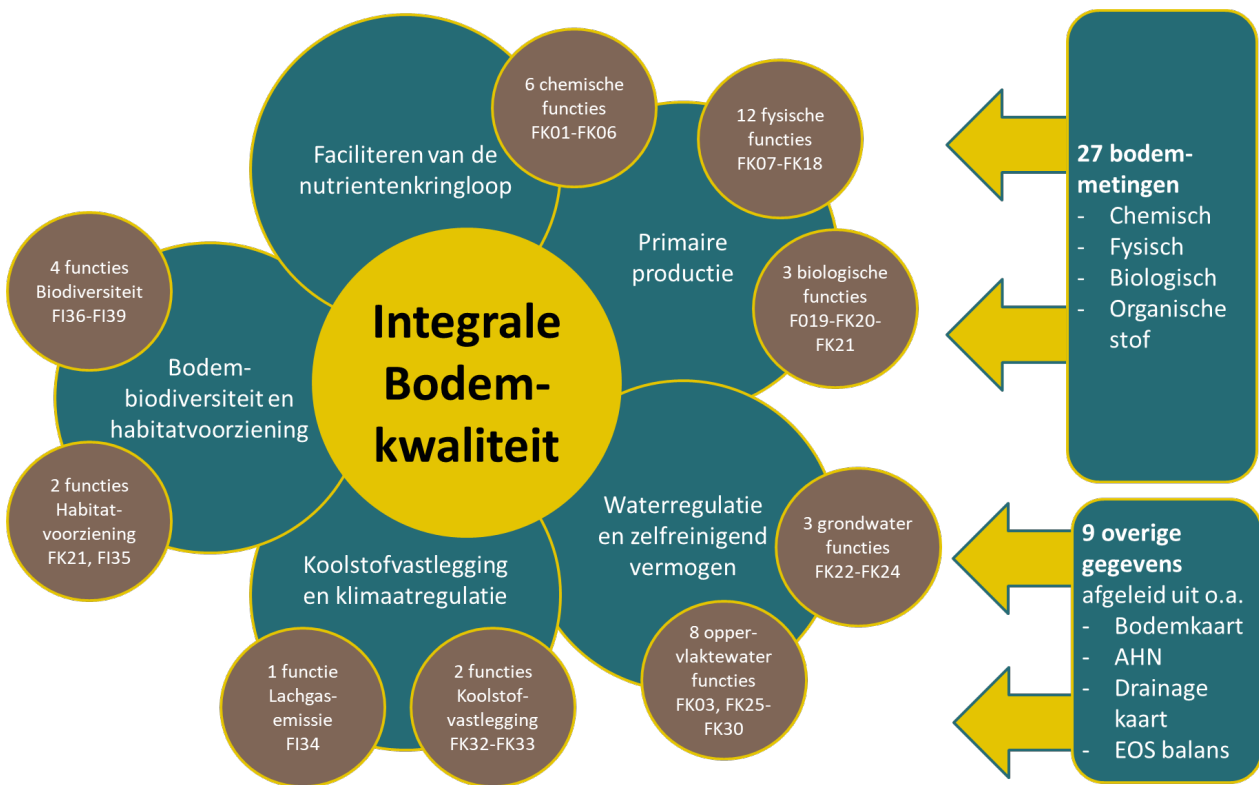
Verdere ontwikkeling

Het onderwerp van bodembeoordeling is sterk in ontwikkeling. Het is noodzakelijk om de BLN 2.0 af te (blijven) stemmen met internationale ontwikkelingen op dit gebied zoals in EJP SOIL, de EU Soil Mission, de European Environmental Agency, JRC en FAO. Hierbij gaat het vooral om gebruikte definities, bodemfuncties, indicatoren en hun streefwaarden, meetmethodieken, toepassing in ruimte en tijd en aggregatiemethoden.

Daarnaast is een verdere ontwikkeling van de BLN 2.0 sowieso gewenst. Een aantal verbeteringen zijn al geïdentificeerd maar konden in het bestek van dit project niet meegenomen worden. Het belangrijkste hierin is de verbetering van de bodembioologische beoordeling zowel voor de ecosystemedienst primaire productie als voor de ecosystemedienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening. Daarnaast is een goede praktische toetsing van de BLN 2.0 nodig.

Tot slot

De in dit rapport beschreven BLN 2.0 is een belangrijke stap in het integraal beoordelen van landbouwbodems in het licht van bijdrage aan belangrijke maatschappelijke opgaves in de landbouw in Nederland inclusief primaire productie. Het is een belangrijke methodiek om te komen tot een daadwerkelijk duurzaam beheer van landbouwbodems in 2030, het doel van het Nationaal Programma Landbouwbodems. Een goede implementatie van de BLN 2.0 binnen praktijk en beleid is hierin cruciaal. Doorontwikkeling en toetsing van de BLN 2.0 methodiek is hierbij gewenst om tot een bredere en specifiekere toepassing te komen en de laatste kennis en inzichten mee te nemen.



Figuur S.1 *Overzicht van de BLN 2.0: In het midden in geel het totaalresultaat, de integrale beoordeling van bodemkwaliteit, daarom heen in blauw de 5 ecosystemediensten waarop de bodemkwaliteit wordt beoordeeld. In bruin de bodemfuncties per ecosystemedienst met de codes van de indicatoren. Zie voor betekenis van de codes het overzicht tabel 8.1 en de tabellen in hoofdstukken 3-7.*

1 Inleiding

1.1 Uitdagingen in de landbouw rond bodemkwaliteit en -beheer

De landbouw staat anno 2023 voor een aantal grote uitdagingen. Voor een groot deel heeft dat te maken met de toenemende verwachtingen van overheid en markt rond het verduurzamen van de gewasproductie als ook het leveren van extra ecosysteemdiensten aan gebiedsgerichte opgaven voor klimaat, waterkwaliteit, waterkwantiteit en biodiversiteit. De bodem speelt daarin een sleutelrol. Zowel het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (kamerbrief van mei 2018), als private partijen (in het Nationaal Programma Landbouwbodems) hebben als streefdoel aangegeven dat alle landbouwbodems in Nederland in 2030 daarom duurzaam worden beheerd. In veel beleidsopgaven is de bodemkwaliteit en een goed bodembeheer essentieel voor het slagen van het beleid. Voorbeelden van recent beleid waarin bodembeheer een rol heeft zijn:

- Het Nationaal Programma Landbouwbodems
- De visie rond kringlooplandbouw LNV
- Het Nederlands klimaatakkoord
- Het 6^e en 7^e actieprogramma nitraat met herijking mestbeleid
- De Kaderrichtlijn water

In de landbouwvisie van voormalig minister Carola Schouten wordt bijvoorbeeld ingezet op een transitie van het huidige landbouwsysteem naar kringlooplandbouw, zodat niet alleen productieverhoging, maar ook de waarde van producten en milieukwaliteit centraal komen te staan. Bewust bodembeheer is een van de instrumenten om de afhankelijkheid van externe hulpbronnen af te laten nemen. Met het Interbestuurlijk Programma Vitaal Platteland wordt via een bottom-up benadering invulling gegeven aan deze transitie naar kringlooplandbouw. Voor het bedrijfsleven is bodembeheer daarnaast ook van groot belang voor een robuust toekomstgericht teeltsysteem met grote weerbaarheid tegen ziekte en plagen, de grillen van klimaatverandering en daarmee een goed opbrengstpotentieel en verdienmodel. Om die reden hebben diverse partijen in de markt duurzaam bodembeheer en een goede bodemkwaliteit opgenomen in hun duurzaamheidsprogramma's waarbij zij agrariërs ook belonen voor een duurzaam bodembeheer.

Een duurzaam beheerde en gezonde bodem is van grote waarde. Vitale bodems leveren namelijk een groot aantal ecosysteemdiensten voor zowel agrariërs als waterbeheerders en andere landgebruikers. Recente studies (RLI, 2020) suggereren dat het slecht is gesteld met de kwaliteit van onze landbouwbodems en leggen daarbij direct een relatie met het landgebruik. Intensieve agrarische bedrijfsvoering zou ervoor zorgen dat overall de bodemkwaliteit afneemt vanwege verzuring, vermisting, verdroging, verdichting en allerlei bodemgerelateerde ziektes. Dit zou vervolgens weer leiden tot lagere opbrengsten, vermindering van biodiversiteit, eutrofiëring van oppervlaktewater, minder waterberging en hogere uitstoot van broeikasgassen. Experts en bodemkundigen vanuit de agrarische praktijk betwijfelen deze conclusie, en geven aan dat de interpretatie én beoordeling van de landbouwbodem voor een heel groot deel wordt gestuurd door de bril waarmee men naar de bodem kijkt en naar de beoordeling van de landbouwkundige functie in verhouding tot de andere ecosysteemdiensten die de bodem levert (Wolf et al., 2022, van der Putten, 2020). Dit pleit voor een heldere en concrete definitie van het begrip "duurzame bodemkwaliteit" om spraakverwarring te voorkomen en beleidsvoornemens concreet te maken voor een duurzaam bodembeheer in 2030.

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 ontwikkeling in bodemkwaliteit vast te stellen. Dit inzicht is ook nodig om effectief te kunnen sturen op maatregelen om de bodemkwaliteit te verbeteren. Het is van belang dat boeren de bodemkwaliteit van hun percelen én meten én beoordelen. 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. Het perceel is daarbij de eenheid waarop het beheer grotendeels plaatsvindt. Het is cruciaal dat daarbij een gemeenschappelijke, eenduidige werkwijze gebruikt wordt. Voor een brede toepassing van de bodembeoordeling is het ook van belang dat deze beoordeling betaalbaar is. Ook voor een monitoring op

nationaal of regionaal niveau is het nodig om een goede en betaalbare set metingen te kunnen doen die goed geïnterpreteerd kunnen worden naar de diverse beleidsdoelen.

De BLN is expliciet ontwikkeld voor bovenstaande beleidsvraag gericht op landbouwgronden in Nederland en niet voor ander landgebruik of gebruik in andere landen. Bij de ontwikkeling van BLN 2.0 wordt aangesloten bij Europese ontwikkelingen. De EU publiceerde op 17 november 2021 de EU-Bodemstrategie waarbij acties en een kader met maatregelen voor bescherming, herstel en duurzaam gebruik wordt gegeven. Het ontwikkelen van een wet voor gezonde bodems (de *Soil Health Law*) is onderdeel van de strategie. Volgens de strategie zijn bodems gezond als ze in een goede chemische, biologische en fysieke conditie zijn. Bodems in een goede conditie zijn in staat om continu zoveel mogelijk ecosysteemdiensten te leveren. De strategie gaat niet alleen over landbouwbodems, dit in tegenstelling tot de BLN, maar ook over natuurbodems, stadsbodems en grondwater. In de Bodemstrategie schetst de Commissie haar visie en doelen voor gezonde bodems in 2050 waarbij ook aandacht is voor het creëren van maatschappelijke betrokkenheid, financiële middelen, gelijke voorwaarden op de interne markt, gedeelde kennis, duurzame praktijken en monitoring. Dit om de gemeenschappelijke doelen te bereiken op het gebied van klimaat, biodiversiteit, circulaire economie, voedsel en gezondheid. Hoe de Europese implementatie van de *Soil Health Law* samenvalt met de beoogde integraliteit van en betrokken ecosysteemdiensten binnen BLN 2.0, en de gevolgen van eventueel verschillen in aanpak en meetmethoden, is op dit moment onduidelijk. In de voorliggende studie beperken we ons vooralsnog tot de ontwikkeling van een bodemkwaliteitsbeoordeling in het licht van de huidige ambities in het Nederlands beleid als ook de Nederlandse markt.

1.2 Beoordelingsinstrumenten bodemkwaliteit en -beheer

In Nederland zijn er in de afgelopen jaren verschillende beoordelingsinstrumenten ontwikkeld rondom bodemkwaliteit en bodembeheer (Molendijk et al., 2018; Riechelman et al., 2021). Deze zijn er in verschillende vormen en maten, met verschillend niveau van integratie en detail. Hieronder worden de BLN-indicatorset en de Open Bodem Index (OBI) uitgebreid toegelicht, aangezien deze de basis vormen voor de ontwikkeling van de BLN 2.0. Beide zijn geïnitieerd vanuit de overheid en markt om op een robuuste en wetenschappelijk betrouwbare manier inzicht te geven in de kwaliteit van de landbouwbodem in relatie tot de vijf eerdergenoemde ecosysteemdiensten. Daarnaast worden er enkele andere beoordelingsinstrumenten en indicatoren genoemd zowel op gebied van beoordeling van bodemkwaliteit als van bodembeheer.

1.2.1 BLN-indicatorset

Wageningen University & Research heeft in 2019 de indicatorset Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN 1.0) ontwikkeld in opdracht van het Ministerie van LNV (Hanegraaf et al., 2019). De BLN 1.0 is een integratie van de Minimale Dataset voor meten van bodemkwaliteit (de Haan et al., 2019) en de Nederlandse versie van de Soil Health Index (van den Elsen et al., 2019). Doel van de BLN is om handvat te bieden aan partijen in het publieke en private domein om te komen tot een eenduidige systematiek voor de beoordeling van de bodemkwaliteit in Nederland. De BLN is in 2021 geëvalueerd en aangepast naar de BLN 1.1 (Figuur 1.1, de Haan et al., 2021a, de Haan et al., 2021b). De BLN omvat een wetenschappelijk verantwoorde indicatorset die de basis vormt om de kwaliteit van de Nederlandse landbouw bodems integraal (fysisch, chemisch, biologisch en visueel), voor verschillende landgebruiksdoelen, vast te stellen. Om te komen tot een eenduidige beoordeling van de bodemkwaliteit onderschrijven de partijen betrokken bij het Nationaal Programma landbouwbodems dat de BLN de basis is voor het bepalen van bodemkwaliteit. Dit is vastgelegd in de notitie Jan Jacob van Dijk van voorjaar 2020 namens de ketenpartijen aan de minister van LNV.

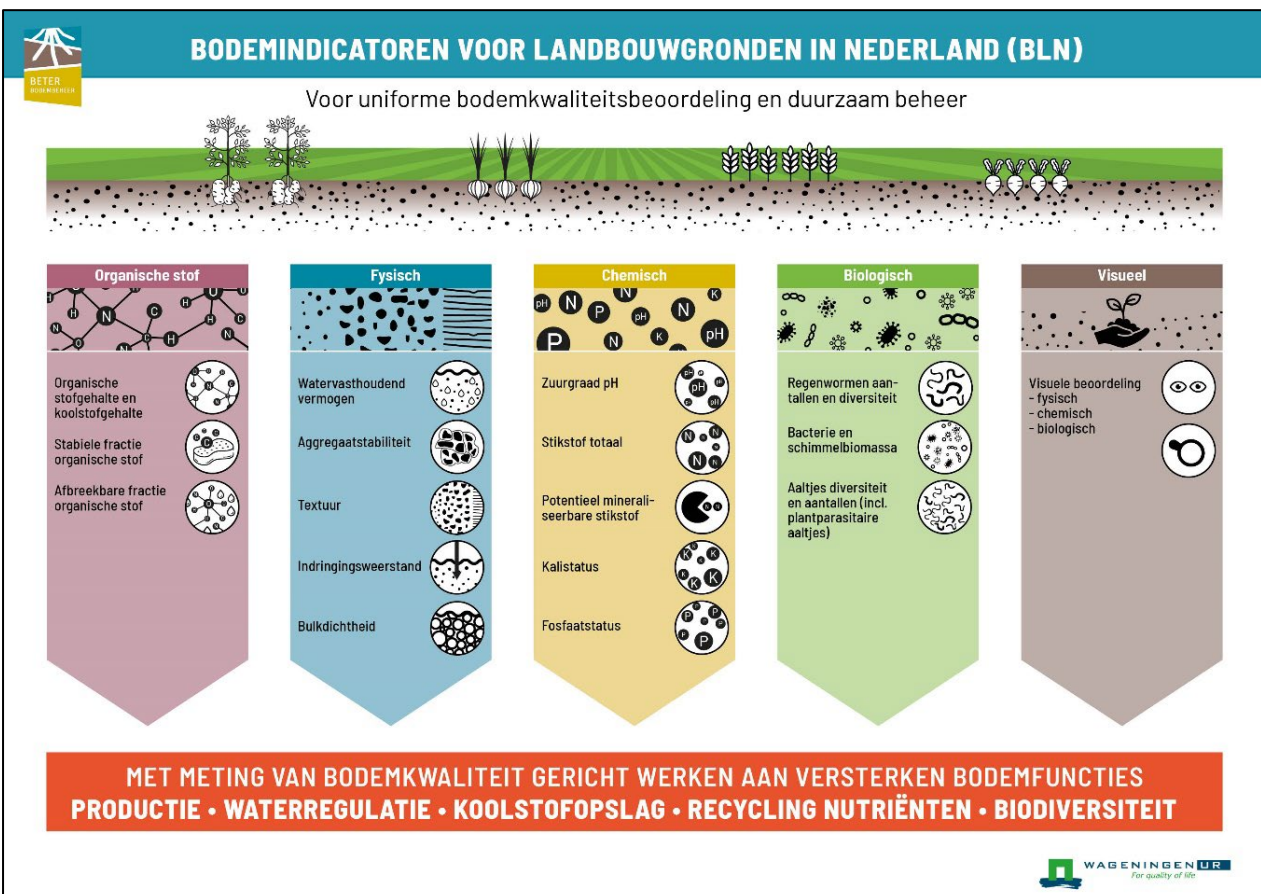
In de BLN zijn, via expertkennis, 18 bodemeigenschappen geselecteerd die ingezet kunnen worden voor de beoordeling van bodemkwaliteit, onderverdeeld in 5 categorieën (Figuur 1.1 en Tabel 1.1). Dit zijn:

1. *Organische stofeigenschappen*: het organische stofgehalte, het koolstofgehalte en de fractie afbreekbare organische stof (HWC),
2. *Fysische bodemeigenschappen*: het watervasthoudend vermogen, de aggregaatstabiliteit, de indringingsweerstand en de droge bulkdichtheid,
3. *Chemische bodemeigenschappen*: de zuurgraad, het gehalte N-totaal, de potentieel mineraliseerbare stikstof, de P-voorraad, P-beschikbaarheid, de K-voorraad en K-beschikbaarheid,

4. *Biologische bodemeigenschappen*: de aaltjesgemeenschap (aantallen en diversiteit), bacteriële biomassa, schimmelbiomassa, en aantallen en diversiteit aan regenwormen, en
5. *Algemene bodemeigenschappen*: een visuele bodembeoordeling

In de BLN wordt onderscheid gemaakt tussen klassieke meetmethoden (meestal nauwkeurig en precies) en alternatieve meetmethoden (meestal snel en goedkoop), omdat veel meetmethodes niet voldoen aan alle criteria tegelijk. Klassieke meetmethoden meten direct terwijl de alternatieve meetmethoden vaak gebaseerd zijn op indirecte metingen. De BLN is getest en toegepast in het Bedrijvennetwerk Bodemmetingen van de PPS Beter Bodembeheer. Metingen zijn uitgevoerd in 2019 (de Haan et al., 2021c) en 2021. Ook is de meetset BLN ingebed binnen de methodiek van de Open Bodemindex, getoetst op 29 bedrijven in 2019 (Ros, 2019a) en meer dan 100 bedrijven in 2021 (Ros et al., 2022). Tevens is de BLN toegepast in het programma Slim Landgebruik:

- Een analyse van een beperkte set van de BLN-indicatoren vanuit de CC-NL-bemonstering op koolstofvastlegging uit 2018 in Nederland (van den Elsen et al., 2020).
- Een selectie van BLN-indicatoren is gemeten in de lange termijnexperimenten die ook bemeten zijn op koolstofvastlegging in najaar 2019 en 2020 (Koopmans et al., 2020, Hoogmoed et al., 2021a, Schepens et al., 2022).
- Dezelfde selectie van BLN-indicatoren is gemeten op bedrijven in de bodem- en klimaatnetwerken van Slim Landgebruik zowel in de akkerbouw als in de melkveehouderij (Janmaat & Koopmans, 2020; Hoogmoed et al., 2021b; Wagenaar et al., 2020; Van Hal & Wagenaar, 2021).



Figuur 1.1 Gewenste bodemkwaliteitsindicatoren voor meten en beoordelen van bodemkwaliteit, uit BLN 1.1 (De Haan et al., 2021a).

1.2.2 Open Bodemindex (OBI)

Tegelijkertijd met de ontwikkeling van de BLN hebben de kennisinstellingen in Nederland (WUR, Deltares, KWR) samen met de praktijk gewerkt aan een beoordelingssystematiek van de kwaliteit van landbouwbodems (Ros, 2019a, Ros et al., 2022), uitmondend in het framework van de Open Bodemindex (OBI). Hierbij wordt voortgebouwd op bestaande metingen zoals deze beschikbaar zijn via routinematig landbouwkundig

bodemonderzoek. De OBI is benoemd in de brief van ketenpartijen aan het ministerie van LNV in het kader van het Nationaal Programma Landbouwbodems als mogelijk instrument voor beoordeling en beloning van bodemkwaliteit door marktpartijen (van Dijk, 2019). Doel van de OBI is het meten van de bodemkwaliteit om zo 'te werken aan de verduurzaming van de bodem met als resultaat dat agrarisch ondernemers en de drinkwatervoorziening daarvan profiteren'.

De OBI heeft een vergelijkbare selectieprocedure voor bodemfuncties gevolgd als de BLN, met inbreng van experts, deskundigen, en adviseurs, voortbouwend op een analyse van alle beschikbare bodemkwaliteits-systemen wereldwijd. In vergelijking met BLN 1.0 sloot de gebruikte aanpak niet aan bij de benadering van de *Minimale Dataset*, maar op het gebruik maken van bestaande metingen die routinematig beschikbaar zijn bij agrarische laboratoria zodat het meten én beoordelen van bodemfuncties aansluit bij de beschikbare kennis en data in de landbouw. Aanvullend daarop wordt gebruik gemaakt van openbaar beschikbare informatie uit databases beschikbaar bij kennisinstellingen en satellietdata waarmee ook informatie beschikbaar is over de ondergrond, de potentiële beworteling en de beschikbaarheid van water. De belangrijkste randvoorwaarde voor selectie van bodemfuncties was dat bodemmetingen gebruikt kunnen worden voor het kwantificeren van functies die de bodem levert én dat daar vervolgens ook streefwaarden voor beschikbaar zijn (Rinot et al., 2019). De onderliggende kennis is wetenschappelijk onderbouwd en open source toegankelijk gemaakt. Het werkt daarbij via een modulaire aanpak zodat nieuwe inzichten rond meten en beoordelen van bodemkwaliteit eenvoudig toegevoegd kunnen worden.

De Open Bodemindex maakt gebruik van de volgende bodemeigenschappen en perceelskenmerken (zie ook Tabel 1.1):

- Openbare perceelskenmerken als bouwplan, grondsoort, geohydrologie (grondwaterstanden en kritieke stijghoogte), en drainage,
- Textuur (klei-, zand- en siltpercentages) en organische stofgehalte,
- De zuurgraad, het gehalte N-totaal, en de potentieel mineraliseerbare stikstof, en de voorraad en plantbeschikbaarheid van fosfaat, kalium, zwavel, magnesium, calcium, zink en koper,
- De aaltjes qua plantparasitaire nematoden (aantallen en diversiteit),
- Een visuele bodembeoordeling volgens de in Nederland ontwikkelde Bodemconditiescore (Sonneveld et al., 2014) met visuele metingen in relatie tot bodemstructuur, beworteling, en voorkomen van wormen.

Voor het beoordelen van het bodembeheer maakt de OBI gebruik van het eerder in Nederland ontwikkelde Label Duurzaam Bodembeheer (Van der Wal et al., 2016), een instrumentarium dat is opgesteld met onderzoekers en adviseurs in 2016 voor maatregelen die bijdragen aan een duurzame bodem.

1.2.3 Overige bodembeoordelingsinstrumenten

Bodembologisch indicatorsysteem en meetnet (BoBi)

Het door het RIVM, LBI en WUR ontwikkelde Bodembologisch indicatorsysteem (BoBi, Schouten et al., 1997) is gericht op de bodembiodiversiteit. In 2013 is de BoBi (deels) samengegaan met het Landelijke Meetnet Bodemkwaliteit en valt sinds 2013 onder het onderzoeksprogramma 'Bodem Ecosysteemdiensten Onderzoek'. Aan de hand van expert-kennis en een statistische analyse zijn de volgende bodemeigenschappen geselecteerd en op een groot aantal locaties binnen Nederland geanalyseerd (Rutgers et al., 2014):

- *Bodembologie*: aantallen en diversiteit fauna (regenwormen, micro-arthropoda, nematoden, potwormen), micro-organismen (bacteriën en schimmels, incl. biomassa), functionele biologische metingen als potentiële C- en N-mineralisatie, anaerobe N-mineralisatie en functionele diversiteit bacteriën en wortelbiomassa (alleen onder grasland).
- *Abiotische bodemeigenschappen*: textuur en grondsoort, organische stof (totaalgehalte en fracties), zuurgraad, diverse nutriënten (stikstof, fosfaat, kalium, magnesium, calcium en zwavel), bulkdichtheid en indringingsweerstand en bodemtemperatuur en vocht.

Ook bodembeheer werd meegenomen in het BoBi-meetnet, waarbij informatie verzameld werd over o.a. landgebruik, type bemesting, diversiteit van landgebruik, bodembewerking, grondwaterstand, gebruik van bestrijdingsmiddelen, veedichtheid, en aantal niet-productieve landschapselementen.

Tabel 1.1 Gebruikte bodemmetingen en perceelseigenschappen ter onderbouwing en beoordeling van bodemkwaliteit in BLN 1.1 en OBI, waarbij de OBI voor een deel gebruik maakt van (goedkopere) metingen conform de beschreven systematiek van BLN. In vet weergegeven de overlappende metingen.

	BLN (1.1)	Open Bodemindex
<i>Organische stofeigenschappen</i>	Organische stofgehalte Koolstofgehalte Fractie afbreekbare organische stof (HWC)	Organische stofgehalte Koolstofgehalte Berekende koolstofbalans
<i>Fysische bodemeigenschappen</i>	Watervasthoudend vermogen Aggregaatstabiliteit Droge bulkdichtheid Indringingsweerstand	Watervasthoudend vermogen Aggregaatstabiliteit Droge bulkdichtheid Waterlevering vanuit ondergrond
<i>Chemische bodemeigenschappen</i>	Zuurgraad Gehalte N-totaal P-voorraad en beschikbaarheid K-voorraad en beschikbaarheid	Zuurgraad Gehalte N-totaal P-voorraad en beschikbaarheid K-voorraad en beschikbaarheid Ca-voorraad Mg-voorraad en beschikbaarheid Gehalte S-totaal Zn en Cu beschikbaarheid Kationomwisselcapaciteit
<i>Biologische bodemeigenschappen</i>	Aaltjesgemeenschap (aantallen en diversiteit) Plant parasitaire aaltjes (aantallen en diversiteit) Potentieel mineraliseerbare stikstof Regenwormen (aantallen en diversiteit) Bacteriële biomassa Schimmelbiomassa	Plant parasitaire aaltjes (aantallen en diversiteit) Potentieel mineraliseerbaar stikstof Regenwormen (aantal)
<i>Algemene bodemeigenschappen</i>	Visuele bodembeoordeling	Visuele bodembeoordeling Bodemtype Textuur (klei-, zand-, silt)
<i>Algemene perceelskenmerken</i>	Landgebruik (sector)	Bouwplan, grondsoort, geohydrologie (GHG, GLG, kritieke stijghoogte), drainage, bodembeheer

Soil Navigator

De Soil Navigator is een online tool (decision support system) die ontwikkeld is binnen het Europese Landmark project. Het beoordeelt aan de hand van input gegevens over een perceel hoe deze scoren op de 5 verschillende ecosysteemdiensten, daarbij gebruik makend van kennisregels en expertkennis als ook statistische modellen getraind op Europese databases. De volgende vijf ecosysteemdiensten worden in beeld gebracht:

1. Primaire productie
2. Waterregulatie en zelfreinigend vermogen
3. Koolstofvastlegging en klimaat regulatie
4. Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening
5. Faciliteren van nutriëntenkringloop

Vanuit deze uitkomsten kan gekozen worden welke ecosysteemdiensten verbeterd dienen te worden, en op basis hiervan worden er oplossingen/strategieën aangedragen om dit te bewerkstelligen.

De tool relateert ecosysteemdiensten aan meetbare bodemeigenschappen via slimme statistische clusterings-technieken, gebaseerd op data uit landelijke monitoringsmeetnetten. In vergelijking met BLN en OBI maakt de Soil Navigator sterk gebruik van statistische algoritmes om bodemkwaliteit te interpreteren terwijl de

eerdergenoemde instrumenten gebruik maken van empirische algoritmes en streefwaarden afgeleid van veldproeven en modelberekeningen die zijn afgestemd op de Nederlandse context.

De tool is te gebruiken via www.soilnavigator.eu

BIOSIS

In 2021 is de BIOSIS-tool gelanceerd om meer inzicht te geven in de biologische processen die van invloed zijn op het functioneren van de bodem. De gebruiker krijgt een advies welke meetmethoden er beschikbaar zijn, rekening houdend met de bodemfuncties van studie, de omgevingsvariabelen als landgebruik en de grondsoort. Deze tool is daarmee niet bedoeld om bodemkwaliteit te evalueren in relatie tot het functioneren van de bodem, maar juist om de selectie van beschikbare en geschikte meetmethodieken voor bodemkwaliteit te evalueren.

1.2.4 Instrumenten ter beoordeling van duurzaam (bodem)beheer

Label Duurzaam Bodembeheer

In 2016 is door verschillende kennisinstellingen een open source Label Duurzaam Bodembeheer ontwikkeld (Van der Wal et al., 2016). 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). Bodembeheersmaatregelen moeten voldoen aan de volgende eisen:

- Een positieve bijdrage leveren aan de bodemkwaliteit,
- Geen disproportioneel hoge investering vragen,
- Inpasbaar zijn in de bedrijfsvoering, en
- Via een onafhankelijke partij kunnen worden bepaald en gecontroleerd.

Naast de controleerbare maatregelen zijn ook adviesmaatregelen 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. In 2019 is deze systematiek geïntegreerd binnen de Open Bodemindex, waarbij in 2021 op basis van wetenschappelijke proeven, literatuurgegevens en expertkennis een voorlopige relatie is gelegd tussen de te nemen maatregelen en de bijdrage aan opgaves voor waterkwaliteit, klimaat en biodiversiteit (Ros et al., 2022).

GLB - Ecoregeling

Vanaf 2023 zal het GLB een nieuw instrument bevatten: de Ecoregeling, bedoeld voor doelgerichte betalingen aan agrariërs voor groenblauwe diensten. De Ecoregeling zal bestaan uit een keuzemenu aan vergroeningsmaatregelen gekoppeld aan een puntensysteem. Boeren kunnen aanspraak maken op een basispremie voor duurzame landbouw als ze aan bepaalde voorwaarden voldoen. Dit wordt conditionaliteit genoemd. Vervolgens kunnen zij kiezen voor verdere verduurzaming middels eco-activiteiten waarbij elke activiteit punten op verschillende groene doelen oplevert. Bij voldoende punten per doel kan een bedrijf een ecopremie ontvangen aanvullend op de basispremie. De doelen zijn klimaat, bodem, water, biodiversiteit en landschap. In 2022 is op basis van expertbeoordeling een lijst van maatregelen opgesteld met daaraan gekoppeld een puntenscore in relatie tot de vijf genoemde doelen (Stout et al., 2022). Dit puntensysteem is door het ministerie geïmplementeerd.

In de afgelopen jaren zijn er vanuit de praktijk drie GLB-pilots geweest waarin ervaring is opgedaan met een puntensystematiek die aansluit bij de opgaves als ook het handelingsperspectief op agrarische bedrijven. De betrokken agrarische collectieven hebben in 2020 besloten om samen met BoerenNatuur en LTO Nederland een nieuw pilotvoorstel op te zetten waarin het ontwikkelen, testen en demonstreren van een integraal puntensysteem centraal staat. Ten opzichte van het puntensysteem van het ministerie van LNV dat in 2023 van kracht wordt, richt het puntensysteem van de pilot zich sterker op sectorale en regionale verschillen en zijn er meer prestatieprikkels ingebouwd. Daarbij werkt dit puntensysteem aan een sterkere koppeling met duurzaamheids-initiatieven vanuit de keten (KPI's). Dit systeem wordt in 2023 getoetst en na afronding wordt in overleg met het ministerie de meerwaarde geëvalueerd en indien nodig geïntegreerd.

De Ecoregeling pilot bevat 25 maatregelen die inzetbaar zijn in plantaardige sectoren (plus verschillende prestatieniveaus per maatregel) en 23 maatregelen die inzetbaar zijn in dierlijke sectoren. Voor elke maatregel is opgenomen hoe deze een positieve bijdrage levert aan de doelen voor klimaat, bodem, water, biodiversiteit en landschap. Het sturen op een goede bodemkwaliteit is hiermee dus onderdeel van de Ecoregeling.

Biodiversiteitsmonitor Melkveehouderij en Akkerbouw

Om biodiversiteit op landbouwbedrijven te monitoren, de prestaties te meten en desgewenst te belonen zijn de biodiversiteitsmonitor melkveehouderij en akkerbouw ontwikkeld. Beiden werken via een KPI-systematiek van kritische prestatie indicatoren. Met de inzet van KPI's kunnen verschillende soorten bedrijven (per sector) via eenzelfde systeem gemonitord worden en aansluitend beoordeeld worden op hun impact op biodiversiteit. Hierbij is het dus wel van belang dat deze KPI's daadwerkelijk representatief en volledig zijn voor de biodiversiteit. Hiermee kunnen boeren sturen op doelen, en zijn ze niet gebonden aan specifieke maatregelen voor subsidies.

De biodiversiteitsmonitor melkveehouderij is operationeel en is ondergebracht bij de Stichting Biodiversiteitsmonitor, welke opgezet is door het WNF, Rabobank en ZuivelNL (samenwerking tussen LTO, NMV, NAJK, NZO). De huidige biodiversiteitsmonitor melkveehouderij gaat uit van de volgende 7 KPI's:

1. Broeikasgasemissie (g CO₂-eq per kg melk OF per ha)
2. Stikstofbodemoverschot (kg/ha)
3. Ammoniakemissie (kg/ha)
4. Percentage eiwit van eigen land (%)
5. Aandeel blijvend grasland (% van totale bedrijfsareaal)
6. Aandeel natuur- en landschapsbeheer (% van totale bedrijfsareaal)
7. Aandeel kruidenrijk grasland (% van totale bedrijfsareaal)

Ook is er een specifieke Brabantse biodiversiteitsmonitor melkveehouderij, die in Noord-Brabant operationeel is met 13 verschillende indicatoren.

Ook in de akkerbouw is gewerkt aan een biodiversiteitsmonitor akkerbouw (BMA). Hierbij is een selectie gemaakt van 8 indicatoren (Ambrosius et al., 2023; van Doorn et al., 2022):

1. Percentage rustgewassen
2. Organische stofbalans
3. Stikstofbedrijfsoverschot
4. Milieubelasting gewasbeschermingsmiddelen
5. Percentage bodembedekking
6. Carbon Footprint
7. Percentage natuur- en landschapsbeheer
8. Gewasdiversiteit

Deze biodiversiteitsmonitors zijn gericht op de algemene, en dus boven- en ondergrondse biodiversiteit, en dus niet specifiek op de bodembiodiversiteit.

KPI-K(ringlooplandbouw)

Naast de biodiversiteitsmonitors wordt er ook gewerkt aan een integrale KPI-K, waarbij K staat voor 'kringlooplandbouw'. Het doel hierbij is ene integrale set aan KPI's, die moeten bijdragen aan de volgende doelen (van Doorn et al., 2021):

- Verbeteren circulariteit
- Omgaan met & tegengaan van klimaatverandering
- Verbeteren waterkwaliteit en -beheer
- Verbeteren bodemkwaliteit
- Herstellen biodiversiteit
- Verbeteren plant- en diergezondheid
- Verbeteren socio-economische positie boer

Net als bij de biodiversiteitsmonitors geldt hier dat het dus niet enkel om bodemkwaliteit gaat, maar bodemkwaliteit is hier wel een onderdeel van.

BedrijfsBodemWaterPlan

Het BBWP is in 2019 ontwikkeld als concrete opvolging van het Strategisch Advies dat kennisinstellingen, adviseurs en experts binnen het Deltaplan Agrarisch Waterbeheer hebben opgesteld over het gebruik van tools (Ros et al., 2020). Het integreert bestaande tools als het BedrijfsWaterPlan, de werkwijze van het toenmalige BedrijfsBodemWaterPlan, de BodemScan, de Maatregel-Op-De-Kaart en delen van de Open Bodemindex. Het instrument is ontwikkeld door het NMI en het LBI, in samenwerking met kennisinstellingen, regionale overheden, adviseurs, (Z)LTO en boeren. De eerste ontwikkeling is beschreven door Ros et al. (2020).

Het instrument BBWP wil integraal inzicht geven in verschillende landbouwopgaven en dit vertalen in concreet maatwerkadvies per perceel en bedrijf. Het BBWP doet dit door inzicht te geven in de opgaves, risico's en de best passende maatregelen die inzetbaar zijn om aan de doelen te werken. Anno 2023 bevat het opgaves voor waterberging en grondwateraanvulling (doel 1), voor de benutting van nutriënten (doel 2), voor de uitspoeling van nitraat naar het grondwater (doel 3) en de afspoeling van stikstof en fosfor naar het oppervlaktewater (doelen 4 en 5). Deze doelen variëren per regio in relatie tot het oppervlaktewatersysteem, de geohydrologie en de aanwezige landbouw, en worden door provincies en waterschappen vastgesteld. Deze regionale opgaves zijn binnen het BBWP vertaald richting concrete opgaves voor elk landbouwbedrijf. De risico's worden per perceel en bedrijf berekend op basis van bodemkenmerken gemeten bij agrarische laboratoria aangevuld met openbare data. Voor elk perceel wordt daarbij een risico-indicator (KPI) berekend die in kaart brengt hoe de kwaliteit van het perceel als ook het daarop gevoerde management bijdraagt aan de vijf opgaves.

Op basis van de laatste inzichten uit het wetenschappelijke en toegepast onderzoek (Groenendijk et al., 2021) is kwantitatief in beeld gebracht wat de effectiviteit is van meer dan 100 maatregelen (op het gebied van bodembeheer, bemesting, sloot(kant)beheer, beheer van erfafspoeling, gewasbescherming) op de vijf hierboven genoemde doelen. Ook wordt rekening gehouden of een maatregel wel inzetbaar is gegeven eigenschappen van de percelen zoals het landgebruik, de grondsoort, de diepte van het grondwater als ook de aanwezigheid van drainage. Bij het advies wordt rekening gehouden met synergie en trade-offs tussen maatregelen. Binnen het BBWP is het mogelijk om advies te krijgen voor maatregelen die gelden op zowel bedrijfsniveau als ook op perceelsniveau.

In 2023 bevat het BBWP ook de rekensystematiek van de pilot Ecoregeling. In 2023 en 2024 wordt het BBWP uitgebreid met modules voor biodiversiteit (een koppeling met de biodiversiteitsmonitor), de Open Bodemindex, een stikstofbalans, slootplannen, en het beperken van pesticiden, dit alles binnen de context van de ontwikkeling van maatwerk binnen het Nationaal Programma Landelijk Gebied, het Brabantse BodemUP-programma en de uitrol van maatregelen voor het DAW, de KPI-pilots en de KRW. De tool is te gebruiken via: www.bbwp.nl.

1.3 Doel BLN 2.0

Om alle bodems in Nederland in 2030 duurzaam te beheren (beleidsdoel) is het gewenst om een integrale systematiek te gebruiken waarmee helder kan worden gemaakt hoe de huidige kwaliteit is in relatie tot de gewenste kwaliteit om aanwezige doelen voor landbouw en omgevingskwaliteit te realiseren. Daarnaast is het nodig om inzicht te krijgen hoe bodembeheer ingezet kan worden om eventuele knelpunten op te lossen. Zoals hierboven toegelicht zijn hiervoor twee instrumenten ontwikkeld voor toepassing in Nederland. De BLN 1.1 en Open Bodemindex hebben beide de focus op beoordeling van bodemkwaliteit, met name in het licht van landbouwproductie. Verdere integratie van beide werkwijzen is gewenst om de uniformiteit en eenduidigheid te bevorderen van het beoordelen van de bodemkwaliteit van landbouwbodems en te komen tot duurzaam beheerde landbouwbodems. Hierbij kijken we ook naar de methodieken uit andere tools zoals beschreven in paragraaf 1.2. De primaire focus ligt hierbij op toepassing op perceel en bedrijfsniveau, waarbij de ontwikkelde kennis en rekenregels overigens ook inzetbaar moet zijn om op hogere schaalniveaus (regionaal of landelijk) inzicht te geven in opgaves en handelingsperspectief.

De bodemkwaliteit wordt in de huidige BLN 1.1 en de Open Bodemindex niet expliciet beoordeeld op de bijdrage aan andere ecosysteemdiensten zoals koolstofvastlegging (voor klimaat), nutriëntenbuffering (voor kwaliteit

water) en biodiversiteit. Voor een integrale beoordeling van bodemkwaliteit is het gewenst om ook de bijdrage van de bodem aan maatschappelijke opgaves op gebieden als klimaatmitigatie en -adaptatie, waterkwaliteit, biodiversiteit en beperkingen in gebruik van eindige grondstoffen in kaart te brengen.

Dit rapport beschrijft het framework van de BLN 2.0 waarin een betaalbare integrale beoordeling van bodemkwaliteit op perceelsniveau in het licht van de belangrijkste maatschappelijke opgaves is ontwikkeld voor Nederland. In het framework worden de belangrijkste ecosysteemdiensten gedefinieerd en vervolgens worden bodemfuncties, bijbehorende indicatoren, streefwaarden, scoringsfuncties en te meten bodemeigenschappen vastgesteld. Ook wordt ingegaan op hoe de verzamelde scores per indicator te aggregeren zijn naar integrale beoordelingen. Dit framework bouwt voort op de aanzet voor een BLN 2.0 die gegeven is in het rapport van de evaluatie van de BLN 1.0 (de Haan et al., 2021b) en de methodiek van de Open Bodemindex (Ros., 2019; Ros et al., 2022).

In dit rapport presenteren we praktische betaalbare oplossingen om de bodemkwaliteit van een perceel te beoordelen in het licht van maatschappelijke opgaven die op een groter schaalniveau spelen zoals nitraatgehalte in het grondwater (relevant voor de Nitraatrichtlijn), de soortensamenstelling in een waterlichaam (relevant voor de Kaderrichtlijn Water), het mitigeren van verhoogde CO₂-concentraties in de atmosfeer (relevant voor klimaat), de grondwateraanvulling (relevant voor watervraagstukken) en de bovengrondse biodiversiteit (relevant voor verbetering van natuur). Hierbij vertalen we de maatschappelijke opgaven op deze hogere schaalniveaus naar meetbare doelen per perceel.

1.4 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd: Hoofdstuk 2 omvat de beschrijving van het framework van de BLN 2.0 om bodemkwaliteit meetbaar te maken. Hoofdstuk 3 tot en met 7 beschrijven per ecosysteemdienst de beschikbare kennis rond beoordeling van de ecosysteemdiensten met bodemfuncties uit de wetenschappelijke literatuur en de selectie van bodemfuncties, met bijbehorende streefwaarden en bodemeigenschappen, om zo richting te geven aan beoordeling in de BLN 2.0. In hoofdstuk 8 worden de geselecteerde bodemfuncties, bodemeigenschappen en overige benodigde gegevens samengevat in enkele figuren en tabellen. Hoofdstuk 9 bevat de discussie, reflectie en een voortuitblik met aanbevelingen voor vervolg in de ontwikkeling van de BLN.

2 Framework van de BLN 2.0

2.1 Definities rond beoordeling van bodemkwaliteit

Binnen het werkveld van bodembeoordeling worden allerlei begrippen en definities door elkaar heen gebruikt. Een heldere definitie van begrippen is daarom belangrijk. In dit rapport maken hierbij gebruik van de volgende begrippen met de volgende definities. Deze wijken soms af van wat tot nu toe gebruikelijk is om tot een consistent framework te komen. De begrippen worden in de volgende hoofdstukken nader toegelicht en toegepast. In paragraaf 9.1 is een discussie over de definities van de begrippen opgenomen.

- *(Integrale) Bodemkwaliteit*: de capaciteit van een bodem om onder wisselende omstandigheden de gewenste bodemfuncties in voldoende mate beschikbaar te hebben voor een combinatie van doelen (en diensten) zoals voedselproductie, efficiënte kringloop van voedingsstoffen en behoud van biodiversiteit (BLN 1.1; de Haan et al., 2021a; Hanegraaf et al., 2019). In dit kader is de definitie alleen gericht op landbouwbodems.
- *Duurzaam bodembeheer*: 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)”. Deze definitie is overgenomen uit de BLN. De BLN beperkt zich tot alleen landbouwgronden (de Haan et al., 2021a).
- *Bodemecosysteemdienst*: Een onderdeel van de bodemgerelateerde subset van ecosysteemdiensten die direct en kwantificeerbaar worden gecontroleerd of geleverd door de bodem en zijn chemische, fysische en biologische eigenschappen, processen en functies (van den Elsen et al., 2022). In de BLN 2.0 wordt hiervoor uitgegaan van de vijf bodemecosysteemdiensten zoals gedefinieerd in het Functional Land Management framework (Schulte et al., 2014) en gebruikt in het Europese Landmark Project. Zie verdere toelichting op de Bodem ecosysteemdiensten in paragraaf 2.4.
- *Bodemfunctie*: 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 (aangepast aan Van den Elsen et al., 2022). 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.
- *Bodemindicator*: een waarde, klasse of index waarmee de bijdrage dan wel relevantie van een bodemfunctie voor een ecosysteemdienst wordt beoordeeld. Dit gebeurt in de praktijk via beoordelingsklassen (laag tot hoog) ofwel cijfers (1-10) op basis van streefwaarden (of bij afwezigheid van streefwaarden drempel- of referentiewaarden). Dit betekent dat in dit kader een bodemeigenschap en een bodemfunctie geen indicator zijn.
- *Bodemeigenschap*: ook wel bodemkenmerk of bodemmeting genoemd. Een kenmerk van een bodem dat indicatief kan zijn voor één of meerdere bodemfuncties. Deze eigenschappen kunnen zijn geanalyseerd in het laboratorium, bepaald in het veld als ook samenhangen met kenmerken die voortkomen uit de ligging van het perceel in het landschap. Denk bijvoorbeeld aan de grondsoort en grondwatertrap, de variatie in maaiveldhoogte, de helling, en de aanwezigheid van drainage.
- *Streefwaarde*: De waarde voor een indicator waarboven en/of waaronder een bodemfunctie voldoende bijdraagt aan één ecosysteemdienst voor een gegeven combinatie van landgebruik en bodemtype. De streefwaarde kan ook een bandbreedte omvatten. 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.
- *Drempelwaarde*: een minimum- of maximumwaarde waar de indicator in ieder geval boven of onder moet blijven. Een drempelwaarde kan toegepast worden indien nog niet exact duidelijk is op welk niveau de

gewenste situatie ligt (streefwaarde ontbreekt), maar al wel duidelijk is welke waarde minimaal of maximaal behaald moet worden voor een degelijke bodemkwaliteit.

- *Referentiewaarde*: Een vastgestelde waarde of bereik waarmee een indicator kan worden vergeleken, zonder oordeelsvorming in termen van goed of slecht voor een gegeven combinatie van landgebruik en bodemtype zoals een gemiddelde van een bodemeigenschap van percelen in een specifieke regio. Bij voorkeur wordt een referentiebereik vastgesteld uit de 5% en 95% percentielen van een groot aantal bepalingen van de bodemfunctie.
- *Scoringsfunctie*: een wiskundige of logische functie om de huidige waarde van een bodemfunctie te evalueren in het licht van de referentie-, streef- of drempelwaarde.

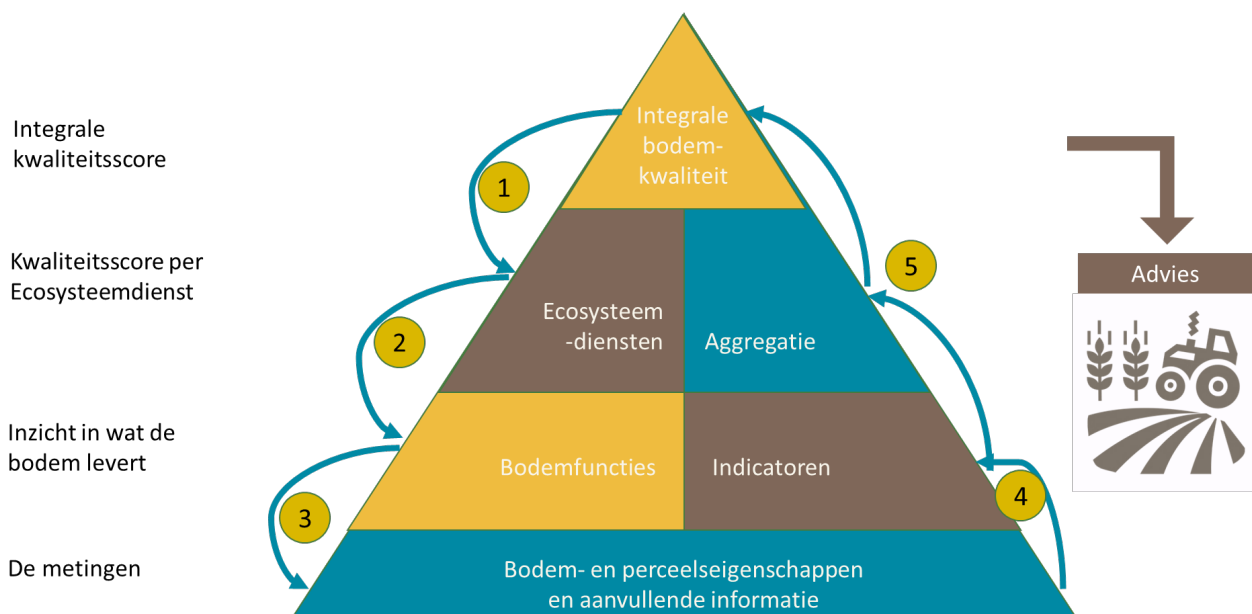
2.2 Framework van de BLN 2.0

2.2.1 Framework BLN 2.0

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 het framework van de Open Bodemindex (De Haan et al., 2021b). Het startpunt hier zijn gestelde doelen, die gerelateerd kunnen worden aan de bodemecosysteemdiensten.

Elk bodembeoordelingsinstrument dat zinvolle informatie geeft aan boeren om gericht te werken aan een goede bodemkwaliteit en het duurzaam beheer van de bodem volgt ten principale vijf opeenvolgende stappen welke gevisualiseerd zijn in Figuur 2.1. De wetenschappelijke onderbouwing hiervan staat in Rinot et al. (2019).

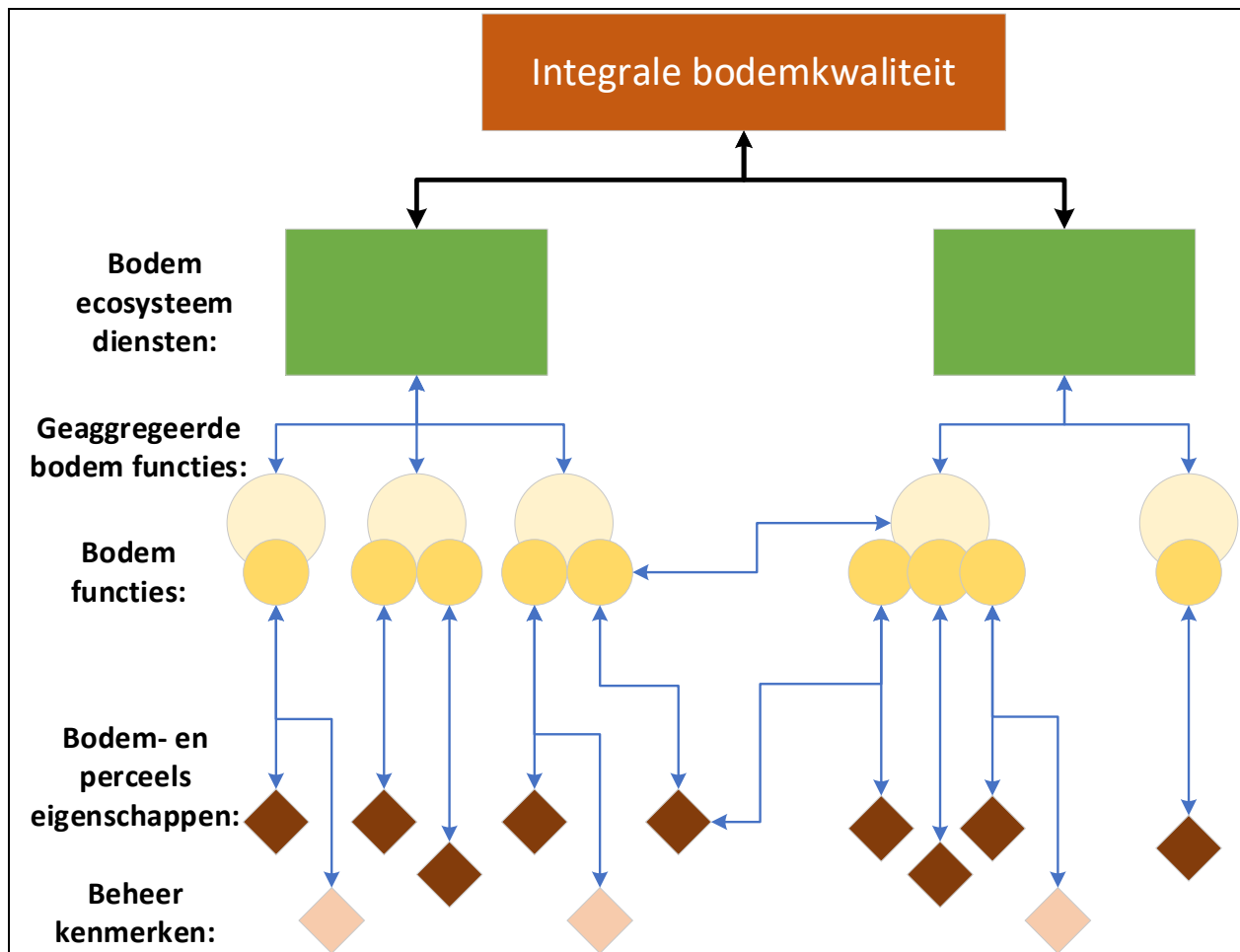
1. Vaststellen van een set van doelen of wel ecosysteemdiensten waar de bodem aan moet bijdragen;
2. Selectie van relevante bodemfuncties die deze ecosysteemdiensten beïnvloeden;
3. Selectie van de bodemeigenschappen en andere gegevens die nodig zijn om de geselecteerde bodemfuncties vast te stellen;
4. Vaststellen van de streefwaarden (of drempelwaarden) om de bodemfuncties te beoordelen en vaststellen van de indicatorwaarde op basis van de streefwaarde en de scoringsfunctie;
5. Aggregatie van prestaties per bodemfunctie in een gewogen index naar prestaties per geaggregeerde bodemfunctie, per (onderdeel van een) ecosysteemdienst en in ultimo naar een integrale bodembeoordeling over de gehele set van geselecteerde ecosysteemdiensten.



Figuur 2.1 Conceptuele aanpak van meten en beoordelen van bodemkwaliteit. De nummers verwijzen naar de stappen die in de tekst benoemd zijn.

In Figuur 2.1 wordt de relatie tussen de ecosysteemdiensten, bodemfuncties, indicatoren en bodemeigenschappen getoond. Bovenaan de integrale bodemkwaliteit, die voor de BLN 2.0 is onderverdeeld in een aantal ecosysteemdiensten. In principe kunnen de ecosysteemdiensten ook separaat beoordeeld worden, en is een aggregatie tot één score voor bodemkwaliteit niet altijd nodig of gewenst.

Voor elk van de ecosysteemdiensten worden verschillende bodemfuncties onderscheiden die samen een score kunnen vormen voor de betreffende ecosysteemdienst. Het is mogelijk dat bepaalde bodemfuncties voor verschillende diensten relevant zijn. Elke bodemfunctie wordt gewaardeerd met een indicator. Een bodemfunctie kan bestaan uit één specifieke beoordeelde bodemeigenschap, of uit een functie op basis van meerdere bodem- en perceelseigenschappen samen. Ook zullen in sommige gevallen bepaalde beheerkenmerken meegenomen moeten worden om de bodemfunctie goed te kunnen scoren. Uit deze aanpak komt uiteindelijk een set aan bodem- en perceelseigenschappen en beheerkenmerken die bepaald moeten worden. Hiervoor zijn dan ook geschikte meetmethodes nodig om deze metingen van bodemeigenschappen uit te voeren. In figuur 2.2 wordt de samenhang in meer detail weergegeven.



Figuur 2.2 Samenhang tussen ecosysteemdiensten, bodemfuncties, bodem- en perceelseigenschappen en beheer.

In het vervolg van dit hoofdstuk worden de stappen in meer detail behandeld (paragraaf 2.3-2.6). Als eerste wordt echter de afbakening van het framework besproken.

2.2.2 Afbakening

Grondsoorten en landgebruik

De focus voor de BLN 2.0 ligt op bodembeoordeling in de akkerbouw en melkveehouderij op klei- en zandgrond in Nederland, waarbij meer detaillering mogelijk is zodra er streefwaarden bekend zijn voor bodemfuncties in relatie tot grondsoort en landgebruik.

Qua grondsoorten wordt onderscheid gemaakt in dekzand, duinzand, rivierklei, zeelei, moerige klei en dalgronden. Voor andere grondsoorten (m.n. löss, veen) is het framework grotendeels toepasbaar maar zijn mogelijk ook aanpassingen nodig voor een complete bodembeoordeling in het bijzonder voor de niet-landbouwkundige functies die de bodem levert. Bijvoorbeeld voor lössgronden moet ook rekening gehouden worden met voorkomen van (water)erosie en op veengronden is voorkomen van bodemdaling van belang. Deze zaken spelen niet of nauwelijks op de zand en kleigronden in Nederland en bodemfuncties voor deze aspecten worden nu niet meegenomen in de BLN 2.0.

Voor het landgebruik wordt er allereerst onderscheid gemaakt tussen bouwland (incl. mais) en grasland. Waar mogelijk wordt ook onderscheid gemaakt naar specifieke gewassen of gewasgroepen. Voor chemische functies kan dit op gewasniveau (>400 gewassen volgens de Basisregistratie Percelen), voor fysische functies wordt veelal gebruik gemaakt van 12 gewascategorieën (zie Huinink et al., 2018) en voor biologische functies wordt vaak aangesloten op de twee genoemde landgebruiksklassen: grasland en bouwland.

Schaalniveau en eisen aan bodemfuncties en bodemeigenschappen

Het framework van de BLN 2.0 wordt in eerste instantie ontwikkeld voor beoordeling van bodemkwaliteit op perceelsschaal. Gebruik van het framework voor nationale en/of regionale monitoring van de bodemkwaliteit wordt besproken in de discussie.

Duurzaam bodembeheer

Bodembeheer wordt meegenomen in de BLN 2.0 zodra dit bijdraagt in de kwaliteit van de geselecteerde bodemfunctie of wanneer een bodemfunctie gebaseerd op bodembeheer een betere beoordeling van de bodemfunctie geeft dan een bodemmeting. Bijvoorbeeld voor de ecosysteemdienst koolstofvastlegging is een bodemfunctie/indicator koolstofbalans benoemd gebaseerd op de aangevoerde organische stof met mest, groenbemesters en gewasresten door de ondernemer. We nemen bodembeheer in de BLN 2.0 niet apart mee als aparte categorie in de bodembeoordeling zoals nu wel in de Open Bodemindex gebeurt. In de verdere ontwikkeling van de BLN kan dit wel een optie zijn.

Doorgaande ontwikkeling

De BLN 2.0 is een volgende stap in de ontwikkeling van een beoordelingsinstrument voor de bodemkwaliteit van landbouwgronden. Met de BLN 2.0 wordt de ontwikkeling niet afgerond. De verwachting is dat er in de komende jaren nog veel nieuwe kennis ontwikkeld wordt rond dit onderwerp. Dit speelt zich af op de volgende vlakken:

- Kennis van bodemprocessen, zowel fysisch, chemisch als biologisch en de interacties tussen de verschillende functies die de bodem levert;
- Ontwikkelingen van betere, snellere en goedkopere meettechnieken dan wel het gebruik van pedotransferfuncties;
- Effect van management op de bodemkwaliteit.

Op basis hiervan kunnen in de komende jaren nieuwe bodemfuncties ontwikkeld worden die een beter beeld geven van de bodemkwaliteit. Ontwikkeling van de BLN na deze 2.0 versie blijft dus van belang.

2.3 Selectie van ecosysteemdiensten (stap 1)

Om bodemkwaliteit integraal en goed te kunnen beoordelen, staan de ecosysteemdiensten die een bodem kan leveren centraal. Binnen de PPS Beter Bodembeheer wordt uitgegaan van vijf bodem (gerelateerde) ecosysteemdiensten die voortkomen uit het 'Functional Land Management' framework (Schulte et al. 2014) en toegepast zijn in het EU LANDMARK project. Deze vijf ecosysteemdiensten worden ook als basis genomen in de BLN 2.0:

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. Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening

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.

5. 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.

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. In essentie wordt de BLN ontwikkeld voor landbouwgronden, maar daarbinnen kunnen ook verschillende eisen gesteld worden aan landgebruik. Naast landgebruik kan dit ook afhangen van de regiospecifieke situatie en uitdagingen. Een landbouwbodem met als gebruiksdoel agrarisch natuurbeheer of weidevogelbeheer heeft bijvoorbeeld een andere kwaliteit (en geleverde diensten) nodig dan een bodem die hoofzakelijk gebruikt wordt voor ruwvoerproductie of gewassen voor menselijke consumptie.

In de uitwerking van de BLN 2.0 zijn een aantal praktische keuzes gemaakt in de uitwerking van deze ecosysteemdiensten in hoofdstuk 3 tot en met 7:

- 1. Primaire productie** (hoofdstuk 3): Er is 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 bodemfuncties en indicatoren hier zijn grotendeels overgenomen uit de BLN 1.1 en Open Bodemindex. De indeling in chemische, fysische en biologische functies is discutabel maar ook breder gebruikt en refereert aan nutriëntenvoorziening (chemisch), structuur, beworteling en water (fysisch) en bodembiodiversiteit en ziektevering (biologisch).
- 2. Waterregulatie en zelfreinigend vermogen** (hoofdstuk 4): er is een opsplitsing gemaakt in waterregulatie en zelfreinigend vermogen voor grondwater en waterregulatie voor oppervlaktewater.
- 3. Koolstofvastlegging en klimaatregulatie** (hoofdstuk 5): er is een opsplitsing gemaakt in koolstofvastlegging in de bodem en de broeikasgasemissies uit de bodem.
- 4. Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening** (hoofdstuk 6): hierbij zijn de indicatoren vanuit BLN1.1 overgenomen als indicatoren in ontwikkeling omdat streefwaarden voor deze indicatoren ontbreken.
- 5. Faciliteren van de nutriëntenkringloop** (hoofdstuk 7): hierbij wordt grotendeels gebruik gemaakt van dezelfde bodemfuncties als benodigd voor de primaire productie, waarbij de beoordeling van deze bodemfuncties opgesteld is om bij te dragen aan een hoge benutting van nutriënten en het sluiten van kringlopen.

2.4 Selectie van bodemfuncties (stap 2)

2.4.1 Selectie van bodemfuncties

In stap twee worden eerst op basis van expertkennis de bodemfuncties geselecteerd die behoren bij een ecosysteemdienst. Hierbij dienen 1) alle bodemaspecten van invloed op de ecosysteemdienst meegenomen te worden, 2) voorkomen te worden dat er (veel) overlap zit tussen de geselecteerde bodemfuncties en 3) worden functies weggelaten die onvoldoende meetbaar of interpreteerbaar zijn. Een bodemfunctie kan voor meerdere ecosysteemdiensten relevant zijn (zie Figuur 2.2).

De bodemfuncties worden op basis van de wetenschappelijke kennis gedefinieerd en geselecteerd voor de Nederlandse omstandigheden. Deze selectie vereist allereerst inzicht in de laatste wetenschappelijke concepten, de sturende processen in de bodem als ook de omstandigheden die gewasgroei (voor de productiefunctie), waterberging (voor de waterregulatie) of retentie van nutriënten (voor het zelfregulerend vermogen) beïnvloeden. Op basis daarvan kan vervolgens gezocht worden naar experimentele of modelmatige onderbouwing van deze bodemfuncties, waarbij een relatie wordt gelegd tussen bodemanalyses, perceelseigenschappen als ook de bodemfunctie. Omdat de bodem een complex systeem is waarbij allerlei processen op elkaar ingrijpen, kunnen soms meerdere functies nodig zijn om de variatie in de ecosysteemdienst goed te kwantificeren en te beoordelen. Hierbij kunnen sommige functies een grotere rol spelen dan andere, volgens het concept van "the law of the optimum" (Lemaire et al., 2019). In veel situaties is de agronomische data om de selectie van relevante bodemfuncties te onderbouwen nog beperkt, waardoor ook gewerkt moet worden met expertkennis om deze selectie te maken. In hoofdstukken 3 tot en met 7 wordt dit bij de relevante bodemfuncties verder toegelicht.

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, bodemkaarten etc. Voor de BLN 2.0 zijn in totaal 39 bodemfuncties geselecteerd in relatie tot de vijf ecosysteemdiensten. De bodemfuncties zijn zoveel mogelijk gebaseerd op Nederlandse studies. Waar deze kennis ontbreekt zijn buitenlandse studies gebruikt. De functies per ecosysteemdiensten wordt uitgewerkt in de hoofdstukken 3 tot 7 en samengevat in hoofdstuk 8.

2.4.2 Optionele bodemfuncties

Sommige bodemfuncties zijn alleen relevant voor een specifieke grondsoort en/of landgebruikssituatie. Voorbeelden hiervan zijn de bodemfuncties plantparasitaire aaltjes en risico op watererosie. De eerste is alleen op bepaalde grondsoorten en met bepaalde gewassen relevant. De tweede speelt in Nederland alleen op lössgronden. Hiervoor zijn optionele bodemfuncties in de BLN 2.0 meegenomen. Deze worden alleen meegenomen wanneer dat relevant is. In hoofdstuk 3-7 wordt aangegeven welke bodemfuncties optioneel zijn. De geselecteerde bodemfuncties die niet als optioneel zijn benoemd, kunnen worden beschouwd als kernfuncties voor een integrale beoordeling van de bodemkwaliteit voor zover ze niet nog in ontwikkeling zijn (zie volgende paragraaf). De kernfuncties zijn wel allemaal nodig om tot een integrale beoordeling van de bodemkwaliteit op een of meer ecosysteemdiensten te komen.

2.4.3 Bodemfuncties in ontwikkeling

In sommige gevallen is het onmogelijk om de bijdrage van een bodemfunctie aan een ecosysteemdienst voldoende concreet te definiëren en er ook handelingsperspectief aan te koppelen (maatregelen). Dit terwijl er wel tenminste een basisniveau van kennis is dat de bodemfunctie van belang is voor de ecosysteemdienst. In dat geval kan het wel van belang zijn om deze bodemfuncties te monitoren als ook de daarvoor benodigde bodemeigenschappen te meten zijn. De volgende situaties kunnen zich voordoen:

1. De precieze relatie tussen bodemfuncties en ecosysteemdiensten is nog onvoldoende wetenschappelijk onderbouwd (m.a.w., wetenschappelijk onderbouwde streefwaarden voor de bodemfuncties ontbreken);
2. De relatie tussen bodemeigenschappen en de bodemfunctie zijn nog onbekend
3. Er worden (nieuwe) meetmethodes en/of berekeningsmethodes voor de bodemfunctie gebruikt die nog niet voldoende wetenschappelijk gevalideerd zijn.

Voor deze gevallen zijn een aantal bodemfuncties in ontwikkeling in de BLN 2.0 opgenomen. Afhankelijk van het precieze doel van gebruik van de BLN 2.0 kunnen deze bodemfuncties meegenomen worden, maar deze bodemfuncties zijn niet noodzakelijk voor een integrale beoordeling van de bodemkwaliteit op een of meer ecosysteemdiensten. Ook speelt mee dat het bepalen van de bodemeigenschappen en/of bodemfunctie van bodemfuncties in ontwikkeling relatief duur en/of tijdrovend is.

In hoofdstuk 3-7 wordt aangegeven welke bodemfuncties in ontwikkeling zijn en worden de bijbehorende streefwaarden, drempelwaarden of referentiewaarden gegeven.

2.5 Selectie van bodemeigenschappen (stap 3)

Om een bodemfunctie te kwantificeren is er informatie nodig van de bodem, afgeleid van open data of gemeten in het laboratorium. Dit zijn de bodemeigenschappen. Belangrijke eis aan de te bepalen bodemeigenschappen is dat ze voldoende betrouwbaar bepaald kunnen worden in korte tijd tegen aanvaardbare kosten. Dat betekent dat de bodemeigenschappen:

- Beschikbaar zijn via algemeen toegankelijke data (zoals hoogtekartaart, bodemkaart, satellietgegevens) of;
- Routinematig in laboratoria bepaald kunnen worden of;
- Eenvoudig door de boer of zijn adviseur zelf bepaald kunnen worden in het veld met standaard hulpmiddelen of;
- Afgeleid kunnen worden uit gemeten eigenschappen via pedotransferfuncties of andere modellen.

Voor het bepalen van de 39 bodemfuncties is het nodig dat er 27 bodemeigenschappen bekend zijn en nog 9 andere gegevens verzameld worden. Voor het bepalen van de 32 kernbodemfuncties is het nodig dat 21 bodemeigenschappen bekend zijn. Voor de 7 optionele bodemfuncties en bodemfuncties in ontwikkeling is het nodig om 6 extra metingen uit te voeren. Per bodemfunctie worden de benodigde bodemeigenschappen en andere gegevens toegelicht in hoofdstukken 3 tot en met 7.

2.6 Beoordeling van bodemfuncties (stap 4)

2.6.1 Van bodemfunctie naar indicator

Een indicator is gedefinieerd als een beoordeling van de bijdrage van een bodemfunctie aan een ecosysteemdienst (zie paragraaf 2.1). Zodra een bodemfunctie is beoordeeld, spreken we in BLN 2.0 over een indicator. Dit is anders dan in de BLN 1.0 waar indicatoren waren gedefinieerd als bodemeigenschappen die gemeten en beoordeeld kunnen worden. Knelpunt daarbij was dat sommige bodemeigenschappen geen directe relatie hebben met de te beoordelen ecosysteemdiensten. Het beoordelingskader van een indicator geeft aan of een bepaalde bodemfunctie goed of slecht presteert. Hiervoor zijn streefwaarden nodig. De volgende eisen worden aan een indicator gesteld:

- De indicator moet wetenschappelijk inzicht geven in de bijdrage van de bodemfunctie aan het realiseren van de beoogde ecosysteemdienst. Wetende dat de bodem een complex systeem is waarin allerlei processen samenhangen, is het belangrijk om indicatoren te selecteren die gericht inzetbaar zijn om de prestaties van bodemfuncties goed in kaart te brengen;
- Streefwaarden moeten beschikbaar zijn om de gekozen bodemfuncties te kunnen beoordelen
- Elke bodemfunctie en daarvan afgeleide indicator wordt vastgesteld door gebruik van tenminste één bodemeigenschap. Wanneer dat niet het gewenste inzicht oplevert kan gekeken worden of het mogelijk is om de indicator te bepalen op basis van het bodembeheer;

In de bodembeoordeling moet een relatie gelegd kunnen worden tussen de beoordeelde bodemfuncties en het management van het perceel: met welke maatregelen is de prestatie op een bodemfunctie te verbeteren. Deze eis stellen we om te zorgen dat met de BLN 2.0 boeren handelingsperspectief hebben om de bodemkwaliteit van hun percelen te verbeteren.

2.6.2 Vaststellen streef-, drempel- en referentiewaarden

Voor de beoordeling van een bodemfunctie is de beschikbaarheid van een streefwaarde belangrijk. Het begrip streefwaarde is gedefinieerd in paragraaf 2.1. Streefwaarden zijn op verschillende manieren vast te stellen. Dit kan op basis van:

- *Empirisch onderzoek*, waarbij voor een groot aantal percelen (die variëren in eigenschappen) gericht een relatie wordt gelegd tussen één of meerdere bodemeigenschappen en de relevante ecosysteemdienst. Klassiek voorbeeld hiervan zijn de bemestingsproeven die inzicht geven in de gewasrespons op de beschikbaarheid van nutriënten in de bodem. Op basis hiervan kan bijvoorbeeld in beeld worden gebracht wanneer een bodem te weinig fosfaat beschikbaar kan maken om voldoende gewasopbrengst te realiseren.

In Nederland zijn hiervoor bijvoorbeeld proeven uitgevoerd waarbij de P-beschikbaarheid wordt berekend als functie van de fosfaatvoorraad en de fosfaatbeschikbaarheid in de bodemoplossing.

- *Modelmatig onderzoek*, waarbij een wetenschappelijk getoetst procesmodel wordt ingezet om de gewasrespons of het verlies van nutriënten te kwantificeren in relatie tot de betrokken bodemeigenschappen en externe omgevingsvariabelen.
- *Expertkennis*, gebaseerd op wetenschappelijk gepubliceerde proeven (via bijvoorbeeld meta-analyses) of praktijkervaring, waarbij expliciet rekening wordt gehouden met de lokale omstandigheden als bouwplan en grondsoort.
- *Statistische technieken*, waarbij een response variabele zoals de gewasopbrengst of het bufferend vermogen van een bodem (d.w.z., een ecosysteemdienst, gemeten, berekend of vastgesteld op basis van expertkennis) via een multicriteria-analyse, multivariate statistische methoden, innovatieve clusteringsalgoritmes of neurale netwerken wordt gerelateerd aan bodemeigenschappen die gemeten kunnen worden. Een alternatieve statistische aanpak is door een "verzameling optimale bodems" te selecteren via experts, deze goed te documenteren, en de variatie in bodemeigenschappen te vergelijken met deze set bodems.
- *Wet- en regelgeving*, deze is vaak gebaseerd op een van bovenstaande manieren maar kan ook afgeleid zijn van beleidsmatige ambitie terwijl de relaties met de mogelijkheden van het systeem beperkt of (nog) niet bekend zijn. Voorbeelden hiervan zijn de EU-nitraatnorm voor het grondwater ($50 \text{ mg NO}_3 \text{ L}^{-1}$), de KRW-doelen voor vegetatie in waterlichamen of de doelen voor koolstofvastlegging in landbouwbodems (kamerbrief van mei 2018).

Streefwaarden kunnen variëren in afhankelijkheid van de geselecteerde ecosysteemdienst. Ook is de hoogte van de streefwaarde afhankelijk van de lokale situatie, zowel op basis van de doelen die in een regio gesteld zijn op bijvoorbeeld het gebied van waterkwaliteit (provincies en waterschap definiëren hierbij de doelen (dan wel normen) voor een goede waterkwaliteit conform de systematiek van de KRW), biodiversiteit (vastgesteld door provincies) of klimaat (vastgesteld door de landelijke overheid in samenspraak met de sector) en de gewenste bijdrage van de landbouw aan de ecosysteemdiensten als op basis van wat mogelijk is in een regio gezien de fysieke omstandigheden zoals grondsoort, klimaat, water.

Wanneer geen streefwaarde beschikbaar is voor een bodemeigenschap of bodemfunctie, kan de bodemkwaliteit niet beoordeeld worden. In het geval dat wel duidelijke aanwijzingen beschikbaar zijn dat een hogere of juist lagere meetwaarde positief is voor de bodemkwaliteit kan gebruik gemaakt worden van een drempelwaarde. Ook het begrip drempelwaarde is gedefinieerd in paragraaf 2.1. Drempelwaarden worden op eenzelfde wijze vastgesteld als streefwaarden maar de beschikbare kennis om een waarde goed te onderbouwen en voldoende specifiek te maken ontbreekt nog. Een drempelwaarde kent een grotere onzekerheid dan een streefwaarde. Daarnaast is een drempelwaarde in veel gevallen minder ambitieus en minder toegesneden op de lokale situatie.

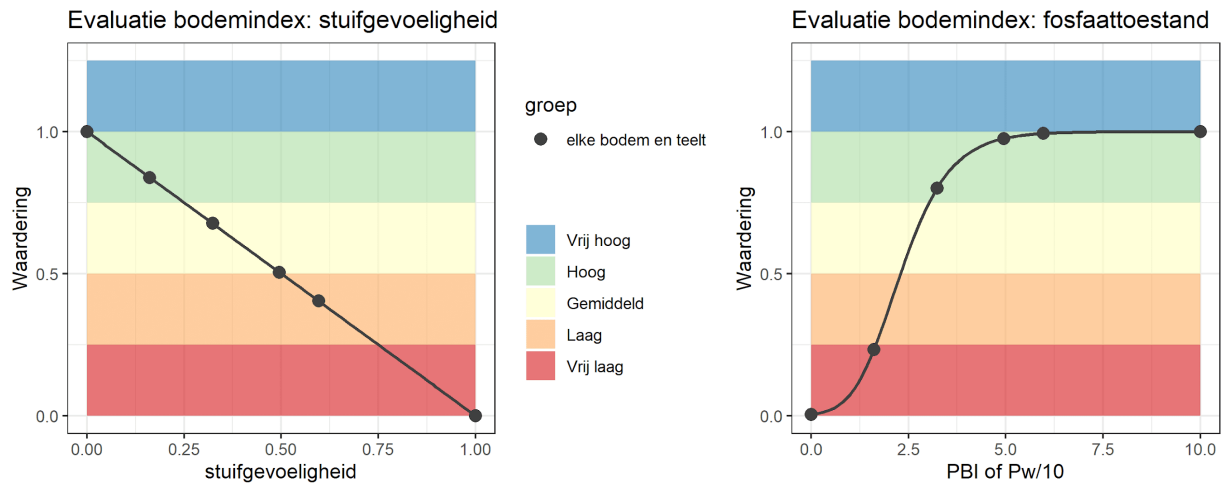
Referentiewaarden kunnen gebruikt worden als niet duidelijk is wat de gewenste toestand is van een bodemfunctie. Op basis van een (voldoende grote) dataset kan daarbij gekeken worden in hoeverre een individuele bepaling van een bodemfunctie afwijkt van een grote set van bepalingen van deze bodemfunctie. Hierbij kan niet goed beoordeeld worden of de prestatie goed of slecht is omdat het gewenste niveau onduidelijk is. Toch worden referentiewaarden vaak als streefwaarden ingezet bij gebrek aan beter. Ook in de BLN 2.0 zullen we dit doen als dit niet anders mogelijk is. De definitie van referentiewaarde is opgenomen in paragraaf 2.1.

Referentiewaarden worden vaak vastgesteld op basis van een groot aantal metingen waarbij ofwel het gemiddelde, de mediaan of een referentiebereik wordt vastgesteld uit de 5% en 95% percentielen. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van landelijke meetsets dan wel ruimtelijke statistieken afgeleid van metingen uit agrarische laboratoria. Het gebruik van metingen uit agrarische laboratoria heeft daarbij de voorkeur.

2.6.3 Scoringsfuncties: het berekenen van een score voor kwaliteit

Als er voor een gegeven bodemfunctie en betreffende indicator streefwaarden bekend zijn, kan voor elke bodem een scoringsfunctie worden gebruikt om de kwaliteit te beoordelen. Met andere woorden: bodems met een kwaliteit die ver afwijken van de streefwaarde hebben een slechtere kwaliteit dan bodems waarbij de streefwaarden wel worden gerealiseerd. Ook hier zijn er weer allerlei varianten denkbaar, waarbij de meest gebruikte scoringsfuncties lineair zijn en de waarde van de indicator wordt gedeeld door de gewenste minimale,

maximale of optimale streefwaarde. In figuur 2.3 zijn voorbeelden van een lineaire en een niet lineaire scoringsfunctie weergegeven.



Figuur 2.3 Voorbeelden van een lineaire scoringsfunctie voor stuifgevoeligheid en van een niet-lineaire functie voor de fosfaattoestand uit de Open Bodemindex

Belangrijk bij het vaststellen van de scoringsfunctie is te weten of de indicatorwaarden normaal verdeeld zijn. Methoden die gebruik maken van lineaire (multivariate) statistiek zijn gevoelig voor niet normaal verdeelde datasets; de scores worden namelijk sterk bepaald door de variantie per indicator. Als de statistische methode om referentiewaarde of streefwaarden vast te stellen geen duidelijke link heeft met een response variabele, dan bestaat er ook het risico dat de score weinig zegt over de bodemkwaliteit in relatie tot de gewenste functies. Niet-lineaire scoringsalgoritmes nemen normaliter aan dat bodemeigenschappen normaal verdeeld zijn, waarbij de relatie met de ecosysteemdienst (zoals koolstofopbouw, gewasproductie) een niet-lineaire respons vertoont (Andrews et al., 2002; Fernandes et al., 2011; Svoray et al., 2015). Meest bekend is de klassieke wet van afnemende meeropbrengst bij toenemend aanbod van nutriënten (Lemaire et al., 2019), maar ook de fosfaatverliezen via ondiepe uitspoeling nemen exponentieel toe in relatie tot de P-beschikbaarheid in de bodem. Diverse studies laten zien dat deze niet-lineaire scoringsalgoritmes beter in staat zijn om de bijdrage van bodemkwaliteit aan ecosysteemdiensten in kaart te brengen (Andrews et al., 2002; Gugino et al., 2009; Rutgers et al., 2014). Gegeven de complexiteit van bodems, en de diversiteit in opgaves, is het waarschijnlijk dat elke ecosysteemdienst zo zijn eigen scoringsfunctie zal hebben, mogelijk zelfs gedifferentieerd naar bodemtype en bouwplan (Ros, 2019a; Andrews et al., 2004; Fine et al., 2017; Lilburne et al., 2004). Dat betekent overigens ook dat bodembeoordelingssystemen een intrinsieke regionale component hebben.

Voor BLN 2.0 wordt voor het overgrote deel van de bodemfuncties gebruik gemaakt van een logistische beoordelingsfuncties, in het bijzonder voor bodemfuncties waarbij experimentele data gebruikt zijn om de streefwaarden te onderbouwen. De precieze scoringsfuncties per bodemfunctie wordt uitgewerkt in de hoofdstukken 3 tot 7 waarbij aangeven wordt wat de wetenschappelijke onderbouwing is van de gebruikte streefwaarde en scoringsfunctie.

2.7 Beoordeling van integrale bodemkwaliteit (stap 5)

2.7.1 Aggregatiemethodes

Als in beeld is gebracht welke bodemfuncties relevant zijn voor een combinatie van doelen dan wel ecosysteemdiensten, ontstaat de uitdaging om de verschillende bodemfuncties ten opzichte van elkaar te wegen in een overall score waarmee de bodemkwaliteit integraal mee kan worden beoordeeld. Ook kan het al nodig zijn om meerdere bodemfuncties te aggregeren tot groepen van functies die richting geven richting de interpretatie van bodemkwaliteit. In de BLN wordt bijvoorbeeld voor de ecosysteemdienst primaire productie gebruik gemaakt van een beoordeling van chemische, fysische en biologische functies. Na aggregatie van de individuele bodemfuncties tot deze drie geaggregeerde functies kan dit vertaald worden in een beoordeling van

de bodemkwaliteit voor de ecosysteemdienst primaire productie. Op een vergelijkbare manier kan een aggregatie gewenst zijn voor de andere ecosysteemdiensten. In de praktijk wordt deze aggregatie vooral gebruikt vanuit gebruikersperspectief om grip te krijgen op de belangrijkste knelpunten voor een goed bodemkwaliteit als ook het handelingsperspectief om via beheer de bodemkwaliteit te verbeteren. Tot slot moet, wanneer de wens is om tot één integrale score van bodemkwaliteit te komen, een aggregatie gemaakt worden van de scores per ecosysteemdienst.

Een heel eenvoudige aggregatiemethode is die van 'one out, all out' (Bouma et al., 2022). Wanneer een van de bodemfuncties niet aan de streefwaarde voldoet is de bodemkwaliteit onvoldoende. Pas wanneer alle bodemfuncties goed zijn is de bodemkwaliteit goed. Deze methode zal leiden tot de conclusie dat in de meeste gevallen de bodemkwaliteit onvoldoende is tenzij het niveau van de streefwaarden erg laag gelegd wordt. Deze aanpak miskent daarnaast de complexiteit van bodems waarbij een negatieve score op één aspect in de praktijk gecompenseerd kan worden door de aanwezige interacties met andere bodemprocessen. Een enkele tekortkoming hoeft nog niet te betekenen dat de bodemkwaliteit onvoldoende is.

De meest gangbare methode om tot een score te komen voor geaggregeerde groepen van bodemfuncties is het gebruik van middeling, daarbij aannemend dat de individuele beoordelingen additief en gelijkwaardig zijn (Fine et al., 2017; Svoray et al., 2015). Deze aanpak kan handig zijn voor een snelle evaluatie van de bodemkwaliteit, maar miskent de diversiteit van functies in de bodem, de interacties tussen bodemfuncties en het feit dat veel processen in de bodem niet-lineair zijn. Meer recentere benaderingen maken gebruik van een gewogen gemiddelde, waarbij nog steeds de aanname is dat de verschillende functies additief zijn. Deze aanname bouwt voort op het klassieke concept van Liebig ("the law of the minimum") waarbij het functioneren van een landbouwbodem belemmerd wordt door het minst functionerende onderdeel. De weging van individuele bodemfuncties kan gebaseerd worden op empirische gegevens, literatuurdata of expertkennis, en hangt samen met het gewenste doel of ecosysteemdienst (Andrews et al., 2002; Krueger et al., 2012; Wienhold et al., 2004; Moncada et al., 2014).

De onderlinge weging van de verschillende functies en hun relevantie in het realiseren van een doel wordt in de wetenschappelijke literatuur genegeerd (m.a.w., elke functie draagt evenveel bij) of wordt gebaseerd op expertkennis of op het gebruik van statistische technieken die binnen grote datasets naar verbanden zoekt tussen individuele functies en de externe doelvariabele. Het grootste probleem voor de laatste benadering is dat er grote databases nodig zijn waarin alle componenten van de bodem zijn meegenomen als ook het (historisch) beheer en management. Deze gegevens zijn vooralsnog niet – of heel beperkt – aanwezig, waardoor de meeste instrumenten vooralsnog uitgaan van expertkennis.

De gekozen methodiek van een gewogen gemiddelde kan vorm krijgen via een hiërarchische benadering, waarbij bijvoorbeeld chemische, biologische en fysische functies (een veel gebruikte clustering van functies die van invloed zijn op de landbouwkundige kwaliteit van de bodem) eerst los van elkaar worden geaggregeerd waarna vervolgens een gewogen gemiddelde van deze geaggregeerde functies wordt berekend om tot een integrale eindscore voor bodemkwaliteit te komen. De bestaande tools en instrumenten die een score geven voor bodemkwaliteit (BoBi, Open Bodemindex, het Bedrijfsbodemwaterplan en de Soil Navigator) volgen hierin allen een eigen methodiek, en deze zijn allen met argumenten onderbouwd. De BLN 1.1 kent geen aggregatiemethodiek.

2.7.2 Aggregatie: wetenschappelijk of subjectief?

In iedere situatie is de aggregatie van individuele bodemfuncties tot een integrale eindscore subjectief (Rinot et al., 2019), in het bijzonder wanneer de bijdrage van de bodem aan meerdere ecosysteemdiensten wordt geëvalueerd. 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 om een relatieve weging van de gewenste doelen waarvoor de bodem gebruikt gaat worden. Dit is een politieke of beleidsmatige afweging en kan als zodanig niet worden gebaseerd op wetenschappelijke kennis of proeven. Vanuit de wetenschap kan wel enige richting gegeven worden maar nooit helemaal. Wel kan een definitie worden gegeven van de bodemkwaliteit als ook het beheer waarin de verschillende doelen tegelijkertijd worden gemaximaliseerd. Via bodembeheer kan ook gericht gezocht worden naar maatregelen die negatieve effecten voor een specifieke functie of ecosysteemdienst kunnen compenseren. Feitelijk betekent dat het (vooralsnog) gewenst is om elke ecosysteemdienst evenredig mee te laten wegen bij de berekening van een integrale

bodemkwaliteitsscore. Let wel, op regionaal niveau kan tussen de ecosysteemdiensten wel gedifferentieerd worden in relatie tot "wat er mogelijk is".

Deze subjectiviteit in de berekening van integrale bodemkwaliteitsscores betekent ook dat het voor een bodembeoordelingsinstrument belangrijk is om inzicht te geven in de gemaakte keuzes, en dat gebruikers inzicht krijgen in de score van de onderliggende bodemfuncties voordat ze geaggregeerd worden tot scores die een maat zijn voor de integrale bodemkwaliteit. Ook het concrete handelingsperspectief krijgt concreet vorm als op het niveau van bodemfuncties knelpunten en oplossingen worden geïdentificeerd. Vanuit communicatiedoelinden en eventuele borging en monitoring is het gebruik van proxies dan wel integrale eindscores waardevol (zie kader). Proxies verschillen daarbij op subtiele wijze van het begrip indicatoren, doordat het doel van de proxy expliciet is omschreven en op een hoog integratieniveau ligt (Rutgers et al., 2014). Een proxy voorziet in een constructie om de meetbare of modelleerbare kenmerken van het systeem te verbinden met het geïntegreerde doel: een ecosysteemdienst of de bodembiodiversiteit.

Proxies

In 2014 introduceerden Rutgers et al. (2014) de term proxy om zo op een statistische manier combinaties van bodemkenmerken te relateren aan ecosysteemdiensten, in het bijzonder die diensten die samenhangen met de leveren en functionele en intrinsieke biodiversiteit. Met verwijzing naar Van Wijnen et al. (2012) laten zij bijvoorbeeld zien dat het mogelijk is om variatie in het zelfreinigend vermogen van bodems in kaart te brengen op basis van zes kenmerken van een bodem. Deze zes zijn de functionele diversiteit van de microbiële gemeenschap, de potentiële C- en N-mineralisatie, het P-ammoniumlactaat gehalte, de zuurgraad en het organische stofgehalte. Het kwantificeren van ecosysteemdiensten met behulp van proxies is een manier om concrete kenmerken van de leefomgeving te integreren tot relevante informatie voor beleid en praktijk. De meetbare of modelleerbare kenmerken van het bodem- en watersysteem kunnen hierbij als input voor de verschillende proxies fungeren. Elke ecosysteemdienst kan door een unieke proxy worden getypeerd. Dezelfde aanpak wordt gevolgd in de Open Bodemindex waar een aggregatie plaatsvindt op basis van een totale analyse van "distance to target", waarbij de afstand tot de streefwaarde wordt gesommeerd over de verschillende bodemfuncties.

De eerste ervaringen met zulke proxies zijn gepubliceerd door Van Wijnen et al. (2012) en Rutgers et al. (2012). De set van tien relatief eenvoudige algoritmes was gebaseerd op de binaire (ongewogen) toepassing van een set genormaliseerde bodemkenmerken, in een samengestelde "distance to target"-benadering. Een vergelijkbare aanpak is door Ros et al. (2020, 2021) en Groenendijk et al. (2021) gebruikt om concreet inzicht te geven in de bijdrage die landbouwpercelen kunnen leveren aan het verhogen van het waterbergend vermogen en de nutriëntenbenutting als ook het verminderen van de belasting van grond- en oppervlaktewater. De studie van Geurts et al. (2021ab) laat zien dat deze aanpak ook inzetbaar is voor het verbeteren van de grondwateraanvulling en bescherming van de grondwaterkwaliteit.

2.7.3 Aggregatie in de BLN 2.0

Volgens de hierboven beschreven analyse worden de bodemfuncties binnen de BLN 2.0 ook geaggregeerd. De aggregatie vindt plaats tot op het niveau van ecosysteemdiensten. De aggregatie per type bodemfunctie zoals chemisch – biologisch – fysisch voor de ecosysteemdienst Primaire productie wordt ook standaard in kaart gebracht om zo recht te doen aan de verschillende aspecten van bodemkwaliteit.

De aggregatie vindt plaats via een gewogen gemiddelde waarbij lage scores harder meewegen dan hogere scores, een mathematische oplossing om te voorkomen dat hoge en lage scores elkaar uitmiddelen. Dit volgt een inhoudelijke argumentatie volgend op de "law of the optimum" (Lemaire et al., 2019; 2021) zoals deze ook is geïmplementeerd in de systematiek van de Open Bodemindex (Ros et al., 2022).

De aggregatie van verschillende ecosysteemdiensten kan per regio anders zijn in afhankelijkheid van de aanwezige opgaven op het gebied van voedselproductie, waterkwaliteit, klimaat en biodiversiteit. Omdat dit een politieke/beleidsmatige afweging vereist en geen wetenschappelijke, is deze aggregatie geen onderdeel van de BLN 2.0.

De weergave van de beoordeling kan gegevens worden op diverse wijzen:

- In enkele klassen, bijvoorbeeld slecht – gemiddeld - goed. Deze drie klassen kunnen eventueel verfijnd worden naar bijv. vijf klassen (bijv. met de klassen zeer slecht en zeer goed toegevoegd) of meer klassen. Voordeel van deze benadering is dat het een duidelijk onderscheid geeft. Nadeel is dat de beoordeling scherp afgekaderd worden, zeker bij weinig klassen.
- Met een rapportcijfer van 1 tot 10. Dit kan op hele cijfers, met halve cijfers (bijvoorbeeld 7½) of met decimalen (bijvoorbeeld 7.4) Voordeel van deze benadering is de herkenbaarheid. Nadeel is de absoluteheid waarmee cijfers vaak worden geïnterpreteerd.

Daarom wordt gekozen om een beoordeling in klassen te maken. Een precieze uitwerking van de klassenindeling moet nog gemaakt worden bij een test van de BLN 2.0 methodiek.

3 Ecosysteemdienst primaire productie

3.1 Chemische bodemfuncties BLN 2.0

Belang van chemische bodemkwaliteit

Chemische bodemkwaliteit richt zich op bodemfuncties die verantwoordelijk zijn voor de levering en buffering van nutriënten en is daarmee van grote invloed op de voedselproductie: nutriënten zijn essentieel voor gewasgroei en te lage en eventuele te hoge gehalten (verontreinigingen) in de bodem kunnen een invloed hebben op de gewaskwaliteit en daarvan afgeleide voedselproducten. De chemische bodemkwaliteit wordt daarnaast sterk beïnvloed door de eigenschappen van de bodem zoals zuurgraad en textuur, die op hun beurt weer sterk afhankelijk zijn van de grondsoort (bodemtype).

Chemische bodemfuncties in de BLN en de Open Bodemindex

Gewassen hebben in grote mate stikstof, fosfor, kalium, magnesium, calcium en zwavel nodig. Om die reden worden ze macro-elementen genoemd. Van sporen- (of micro-) elementen, zoals bijvoorbeeld koper, mangaan, kobalt en silicium heeft een plant minder nodig. De BLN 1.1 bevat vijf bodemeigenschappen die nodig zijn om inzicht te geven in de beschikbaarheid van nutriënten. Dit waren de zuurgraad, het gehalte en beschikbaarheid van stikstof, en de voorraden en beschikbaarheid van fosfaat en kalium. In de gangbare landbouwpraktijk worden daarentegen vrijwel alle nutriënten routinematig gemeten, en bestaan er ook bemestingsadviezen voor zwavel, magnesium, koper en zink. Daarom zijn deze nutriënten ook meegenomen in de Open Bodemindex naast de bodemeigenschappen uit de BLN. De Open Bodemindex bevat daarnaast ook een beoordeling van de kationomwisselcapaciteit (CEC).

Selectie van bodemfuncties voor de BLN 2.0

In tabel 3.1 wordt een overzicht gegeven van de chemische bodemfuncties met de bodemeigenschappen die gemeten dienen te worden met meetmethode en kostenindicatie. In figuur 3.1 is dit grafisch weergegeven. Alle bodemfuncties zijn overgenomen uit de BLN 1.1 en/of Open Bodemindex. Per bodemfunctie wordt aangegeven of er een streefwaarde beschikbaar is, waar deze op gebaseerd is, en in welke mate deze streefwaarde rekening houdt met grondsoort en landgebruik als ook een referentie naar de onderliggende studies waarin de afleiding is beschreven of vermeld. Wanneer geen streefwaarde beschikbaar is, wordt aangegeven of een drempelwaarde of referentiewaarde beschikbaar is. De bodemfuncties zink en koper uit de Open Bodemindex nemen we niet op in de BLN 2.0 vanwege de geringe relevantie voor de Nederlandse akkerbouw. De bodemfunctie CEC uit de Open Bodemindex nemen we niet mee in de BLN 2.0, omdat deze functie een inhoudelijke verbetering nodig heeft in relatie tot de ontwikkeling van streefwaarden in relatie tot de primaire productie (zie 9.3.1). Voor de beschrijving van de bodemfuncties en de rekenregels wordt verwezen naar de [online documentatie van de Open Bodemindex](#). Bij de chemische bodemfuncties zijn op dit moment nog geen geaggregeerde bodemfuncties nodig of gewenst.

Selectie van bodemeigenschappen

De benodigde bodemeigenschappen om de bodemfuncties te bepalen zijn goedkoop te meten en vooral gebaseerd op NIRS en op een extractie met CaCl₂. De NIRS-metingen zijn indirect maar worden goed gevalideerd met klassieke chemische metingen. De betrouwbaarheid is voldoende voor het beoordelen van bodemkwaliteit. Indien gewenst kunnen ook klassieke methoden worden ingezet.

Beschikbaarheid van streefwaarden

De beschikbare streefwaarden en referentiewaarden voor de chemische bodemfuncties zijn gebaseerd op veldproeven. De streef- en referentiewaarden zijn overgenomen of afgeleid uit de bemestingsadviezen voor akkerbouw en grasland zoals opgenomen in het [Handboek Bodem en Bemesting van de CBAV](#) en de [Adviesbasis Grasland en Voedergewassen](#) van de CBGV. De bodemfuncties die geen streefwaarde kennen maar wel een referentiewaarde, zoals het N- en S-leverend vermogen, zijn dermate relevant voor gewasproductie en gemakkelijk vast te stellen dat het zinvol is om deze op te nemen als kern bodemfunctie in BLN 2.0 ondanks

de afwezigheid van een onderbouwde relatie met gewasopbrengst en -kwaliteit. De streef- en referentiewaarden zijn allen gedifferentieerd naar landgebruik en grondsoort (en voor zwavel ook naar regio).

Tabel 3.1 Chemische bodemfuncties, bodemeigenschappen en bijhorende streefwaarde en meetmethodes ten behoeve van de ecosystemendienst primaire productie. De chemische bodemfuncties hebben geen geaggregeerde bodemfuncties.

Bodemfunctie~	Bodemeigenschappen*	Meetmethode	Kostenindicatie	Streefwaarde, drempelwaarde, referentiewaarde^	Differentiatie\$	BLN/OBI	Bronnen
FK01 Buffering zuurgraad	pH, OS%	NIRS	Laag	SE Zie tabellen HBB/ABGV&	Landgebruik, grondsoort,	BLN-OBI	CBGV, 2022; CBAV, 2022
FK02 Stikstofleverend vermogen	N-totaal, C-org%, OS%, C/N-verhouding	NIRS	Laag	RE 100 - 140 kg N ha ⁻¹ op basis van veel voorkomende NLV	Landgebruik, grondsoort	BLN-OBI	CBGV, 2022
FK03 Fosfaatbuffering	P-CaCl ₂ , P-Al	CaCl ₂ en NIRS	Laag	SE Zie tabellen HBB/ABGV&	Landgebruik, grondsoort	BLN-OBI	CBGV, 2022; CBAV, 2022
FK04 Kaliumbuffering	K-CaCl ₂ , K-CEC, CEC	CaCl ₂ en NIRS	Laag	SE Zie tabellen HBB/ABGV&	Landgebruik, grondsoort	BLN-OBI	CBGV, 2022; van Schöll et al., 2020 (OBI)
FK05 Magnesiumbuffering	Mg-CaCl ₂ , pH, OS%, lutum%, CEC, K-CEC	CaCl ₂ en NIRS	Laag	SE Mg-index van 45 - 132 op basis van veldproeven	Landgebruik, grondsoort	OBI	CBGV, 2022; CBAV, 2022; Ros et al., 2019b (OBI)
FK06 Zwavelleverend vermogen	S-totaal, OS%, lutum%	NIRS	Laag	RE SLV van 20 - 23 kg S ha ⁻¹ op basis van veldproeven of delta SLV t.o.v. voorkomende SLV	Landgebruik, grondsoort, regio	OBI	CBAV, 2022; CBAV, 2022

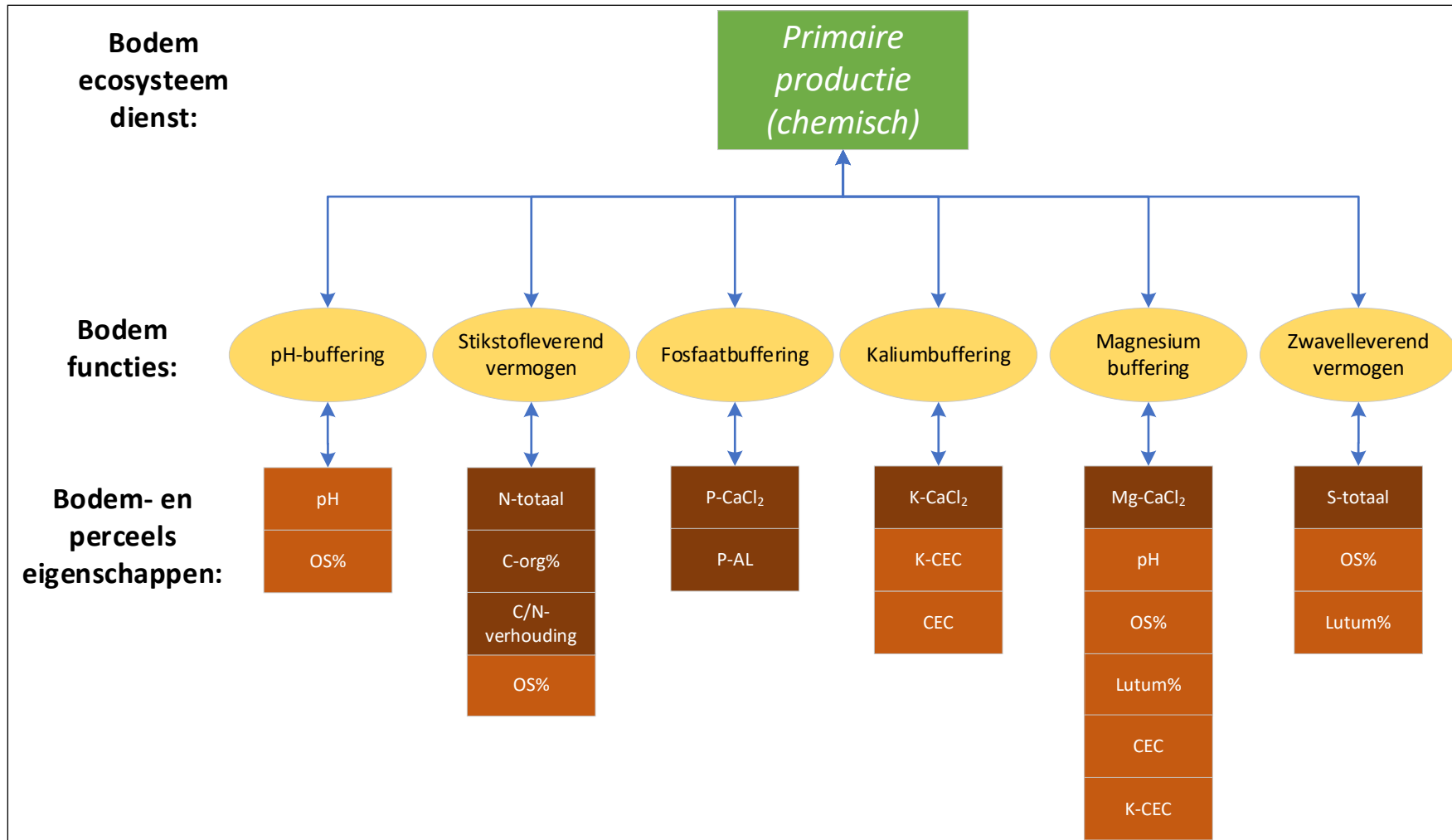
~ FK = kern bodemfunctie, FO = optionele bodemfunctie, FI = bodemfunctie in ontwikkeling

* pH is de zuurgraad, OS% is organisch stofgehalte, N-totaal is totaal stikstof, C-org% is het organisch koolstofgehalte, C/N-verhouding is de verhouding koolstof-stikstof

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

^ 1^e letter: S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde, 2^e letter: waarde gebaseerd op E = empirisch onderzoek, M = modelmatig onderzoek, X = expertkennis, S = statistische technieken, W = wet- en regelgeving

\$ landgebruik omvat de categorieën akkerbouw (inclusief vollegrondsgroente), grasland, mais met de onderliggende rotatie. De grondsoort omvat de categorieën: dekzand, duinzand, rivierklei, zeeklei, veen, moerige klei, dalgronden en lössgronden.



Figuur 3.1 Visuele weergave van chemische bodemfuncties en bijbehorende bodemeigenschappen van de ecosystemedienst primaire productie, zoals gegeven in Tabel 3.1

3.2 Fysische bodemfuncties

Belang van fysische bodemkwaliteit

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. De bodemstructuur wordt bepaald door de onderlinge rangschikking van de deeltjes waaruit de bodem is opgebouwd. Deeltjes klei, leem, zand en organisch materiaal vormen samen aggregaten. De grootte en vorm van deze aggregaten is van grote invloed op het poriënvolume en de onderlinge verbinding tussen de poriën en bepalen daarmee in grote mate de lucht- en waterhuishouding. Het biologisch leven in de bodem speelt een actieve rol bij de opbouw van aggregaten en de stabiliteit. Er is geen eenduidig kengetal waarmee de bodemstructuur kan worden aangeduid.

Fysische bodemfuncties in de BLN en de Open Bodemindex

In de BLN zijn de volgende bodemeigenschappen opgenomen om inzicht te geven in de bodemstructuur en daaraan gekoppelde functies: watervasthoudend vermogen, aggregaatstabiliteit, indringingsweerstand, en droge bulkdichtheid. Deze eigenschappen zijn te meten dan wel af te leiden van grondsoort, mineralogie en het organische stofgehalte via zogenoemde pedotransferfuncties. Op basis van dezelfde gegevens zijn in de Open Bodemindex nog een aantal extra bodemfuncties opgenomen die inzicht geven in de bodemstructuur als ook de beschikbaarheid van water. Het gaat concreet om functies voor de mate van verkruielbaarheid, verslemping, ondergrondverdichting, gevoeligheid voor winderosie, de hoeveelheid plant beschikbaar water, de gemiddelde vochtlevering (met droogte- en natschade) en de bewerkbaarheid van de bodem. Deze functies zijn complementair aan elkaar, en soms ook specifiek voor bepaalde soorten landgebruik. Gecombineerd geven deze bodemfuncties inzicht in drie geaggregeerde fysische bodemfuncties van de bodemstructuur, en wel 1) het bufferen en leveren van vocht, 2) de aggregaatstabiliteit, en 3) de bewortelbaarheid.

Selectie van bodemfuncties voor de BLN 2.0

In tabel 3.2 wordt een overzicht gegeven van 12 geselecteerde fysische bodemfuncties met de bijbehorende bodemeigenschappen die gemeten dienen te worden met meetmethode en kostenindicatie. Per bodemfunctie wordt aangegeven of er een streefwaarde beschikbaar is, waar deze op gebaseerd is, en in welke mate deze streefwaarde rekening houdt met grondsoort en landgebruik als ook een referentie naar de onderliggende studies waarin de afleiding is beschreven of vermeld. In figuur 3.2 is dit grafisch weergegeven. Wanneer geen streefwaarde beschikbaar is, wordt aangegeven of een drempelwaarde of referentiewaarde beschikbaar is. De bodemmetingen voor watervast-houdend vermogen en aggregaatstabiliteit uit de BLN 1.1 worden in de BLN 2.0 vervangen door pedotransfer-functies en alternatieve functies die een beoordeling geven van deze bodemfuncties conform de rekensystematiek zoals deze wordt gebruikt in de Open Bodemindex. Voor de beschrijving van de bodemfuncties en de rekenregels wordt verwezen naar de [online documentatie van de Open Bodemindex](#). Gezamenlijk leveren de 12 geselecteerde bodemfuncties een integraal beeld op van de processen in de bodem die sturend zijn voor de beschikbaarheid van water, de bewortelbaarheid en de aggregaatstabiliteit.

Selectie van bodemeigenschappen

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. De meeste bodemeigenschappen kunnen goedkoop met NIRS gemeten worden. De NIRS-metingen zijn indirect maar goed gevalideerd met klassieke metingen voor textuur, CEC en chemische aspecten. De bodemstructuur kan daarnaast functioneel beschreven worden op basis van: i) aggregaatgrootteverdeling, ii) stabiliteit (ofwel verslemping en bewerkbaarheid), iii) poriënvolume (dichtheid), iv) waterretentiecurve, v) verzadigde doorlatendheid, vi) indringweerstand en vii) verkruielbaarheid (Van Uffelen et al., 2004; Bussink et al., 2012). Meer indirecte visuele metingen vanuit de BodemConditieScore (Sonneveld et al., 2014) geven een aanwijzing van de fysische bodemkwaliteit zoals plasvorming en het voorkomen van versturende bodemlagen

die beworteling beperken. Of er bodemstructuurproblemen aanwezig zijn die zorgen voor nadelige gevolgen voor de primaire productie kunnen mogelijk in de toekomst ook afgeleid worden van remote sensing beelden van de bodem zelf (denk aan plasvorming) en opbrengstniveaus (zie sectie 9.3.2).

Aggregaatstabiliteit als geaggregeerde bodemfunctie kan ook direct gemeten worden als bodemeigenschap maar dit is een dure en tijdrovende meting en daarom niet opgenomen in de BLN 2.0. Daarnaast geven de subfuncties onder aggregaatstabiliteit aanvullende informatie rond aggregaatstabiliteit. Bulkdichtheid is ook direct te meten met ringen en in de toekomst mogelijk met een sensor (bijv. RohC). De ringenmethode is tijdrovend en duur en ook de sensormeting kost meer dan de bepaling van bulkdichtheid op basis van textuur en organische stof zoals nu opgenomen in de BLN 2.0.

Beschikbaarheid van streefwaarden

In vergelijking met de chemische bodemkwaliteitsfuncties, zijn er 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, verkruimelbaarheid) gecombineerd met expertkennis en literatuurgegevens (o.a. watervasthoudend vermogen, waterbuffering), en in sommige situaties ook in combinatie met modelberekeningen (verdichting ondergrond, opbrengstschade door te droge of natte omstandigheden). Voor droge bulkdichtheid is een referentiewaarde afgeleid gebaseerd op uitgevoerde metingen in Nederland, waarbij een streefwaarde is af te leiden uit de literatuur. De streefwaarde voor de indringingsweertand is afgeleid vanuit de literatuur.

De relaties tussen indicator en bodemfunctie is over het algemeen sterk maar de kwaliteit van de indicatorwaarde is over het algemeen vrij zwak omdat deze ofwel indirect via pedotransferfuncties bepaald wordt of relatief lastig te bepalen is met directe metingen. Vanuit oogpunt van toepasbaarheid is gekozen voor gebruik van de indirecte metingen en pedotransferfuncties. Op deze wijze kunnen alle bodemfuncties als kernfunctie worden meegenomen.

Tabel 3.2 Fysische bodemfuncties (met aggregatie), bodemeigenschappen, en streefwaarde en meetmethodes ten behoeve van de ecosysteemdienst primaire productie.

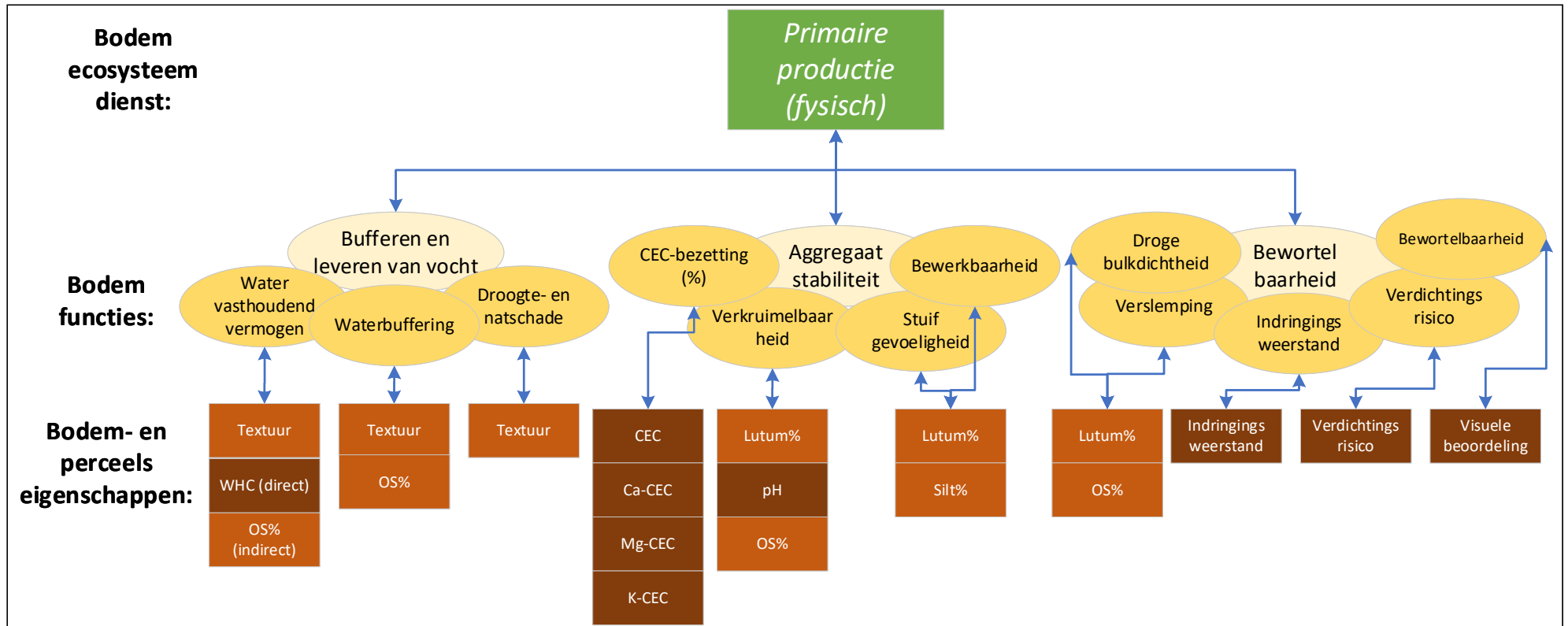
Geaggregeerde bodemfunctie	Bodemfunctie~	Bodem-eigenschappen *	Meet-methode	Kosten-indicatie	Streefwaarde, drempelwaarde, referentiewaarde^	Differentiatie\$	BLN/OBI	Bronnen	
Bufferen en leveren van vocht	FK07	Watervasthoudend vermogen	Textuur, OS% (indirect), WHC (direct)	NIRS, vloeigrens	Laag	DX 200 mm water in 0-30 cm bouwvoor, afgeleid van expertschatting.	Grondsoort	BLN-OBI	Ros et al., 2019; Moebius-Clune et al., 2016
Bufferen en leveren van vocht	FK08	Waterbuffering	Textuur, OS%	NIRS	Laag	DX 100 mm water in 0-30 cm bouwvoor, afgeleid van expertschatting.	Grondsoort	OBI	Ros et al. (2019); Moebius-Clune et al. (2016)
Bufferen en leveren van vocht	FK09	Droogte en natschade	Textuur	NIRS	Laag	DM Opbrengstschade door droogte of natheid < 5%, afgeleid van metingen en modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort, grondwatertrap	OBI	Van Schöll et al., 2021; Van Bakel et al., 2005
Aggregaatstabiliteit	FK10	CEC-bezetting (%)	CEC, K-CEC, Ca-CEC, Mg-CEC	NIRS	Laag	DL Afwijking van optimale CEC-bezetting (%) op basis van literatuur	Grondsoort	BLN-OBI	Eurofins, 2019; Bussink et al., 2012
Aggregaatstabiliteit	FK11	Verkruijmelbaarheid	Lutum%, OS%, pH	NIRS	Laag	DE Index = 10, afgeleid van veldobservaties	Landgebruik	OBI	Locher en Bakker, 1992; Huinink, 2011
Aggregaatstabiliteit	FK12	Stuifgevoeligheid	Lutum%, silt%	NIRS	Laag	DE Weerstand tegen grondverschuiving < 1, afgeleid van proeven en praktijkgegevens	Landgebruik	OBI	Van Kerckhoven et al., 2009; Ros et al., 2019
Aggregaatstabiliteit	FK13	Bewerkbaarheid	Lutum%, silt%	NIRS	Laag	DE Fractie bewerkbare dagen in groeiseizoen = 1, afgeleid van veldproeven	Landgebruik, grondsoort, grondwatertrap	OBI	Huinink, 2018; Riechelmann, 2021
Bewortelbaarheid	FK14	Droge bulkdichtheid	OS%, Lutum%	NIRS	Laag	RE 0,76-1,51 g cm ⁻³ op basis van veel voorkomende dichtheid	Landgebruik, grondsoort	BLN-OBI	De Haan et al., 2021
Bewortelbaarheid	FK15	Bewortelbaarheid	Visuele beoordeling	Visueel	Gemiddeld	DE Classificatiescore = 0, afgeleid van veldobservaties	-	BLN-OBI	Sonneveld et al., 2014
Bewortelbaarheid	FK16	Indringingsweerstand	Indringingsweerstand	Penetrometer	Gemiddeld	SL Weerstand < 3 MPa op basis van literatuur	-	BLN	CBAV, 2022
Bewortelbaarheid	FK17	Verdichtingsrisico	Verdichtingsrisico	Modelberekening	Laag	DM Classificatie op basis van draagkracht bodem, afgeleid van metingen en modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort	OBI	Van den Akker et al., 2012; Ros et al., 2019
Bewortelbaarheid	FK18	Verslemping	Lutum%, OS%	NIRS	Laag	DE Opbrengstschade is <1% afgeleid van veldproeven	Landgebruik	OBI	Huinink, 2018; van Schöll et al., 2019

~ FK = kernbodemfunctie, FO = optionele bodemfunctie, FI = bodemfunctie in ontwikkeling

* pH is de zuurgraad, OS% is organisch stofgehalte, N-totaal is totaal stikstof, CEC is de kationomwisselcapaciteit, en K-CEC, Mg-CEC en Ca-CEC is de bezetting van de CEC met kalium, magnesium en calcium. WHC is de vloeigrens en staat voor Water Holding Capacity, en lutum% is het kleigehalte en silt% is het siltgehalte.

^ 1^e letter: S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde, 2^e letter: waarde gebaseerd op E = empirisch onderzoek, M = modelmatig onderzoek, X = expertkennis, S = statistische technieken, W = wet- en regelgeving, L = literatuur

\$ landgebruik omvat de categorieën akkerbouw (inclusief volleggrondsgronnte), grasland, mais met de onderliggende rotatie. De grondsoort omvat de categorieën: dekzand, duinzand, rivierklei, zeeklei, veen, moerige klei, dalgronden en lössgronden



Figuur 3.2 Visuele weergave van fysische bodemfuncties en bijbehorende bodemeigenschappen van de ecosystemedienst primaire productie, zoals gegeven in Tabel 3.2

3.3 Biologische bodemfuncties

Belang van biologische bodemkwaliteit

Het bodemleven is de biologische motor waardoor allerlei processen in de bodem actief bijdragen aan structuurverbetering en de beschikbaarheid van nutriënten. Er is geen enkel landbouwsysteem mogelijk zonder bodemleven. Het bodemvoedselweb zorgt voor samenhang tussen bodemdeeltjes en een mooie homogene bodem, en maken nutriënten beschikbaar voor gewasopname. Ook zorgen ze voor de vertering van organische materiaal en de vastlegging van koolstof in de bodem. Ze vergroten daarmee het bufferend vermogen van de bodem. De hypothese is dat bij voldoende diversiteit (een groot aantal verschillende soorten) het risico op ziekten en plagen kleiner is. Tegelijkertijd is het bodemleven niet alleen actief en sturend bezig in de bodem, maar hangt de hoeveelheid als ook de soortenrijkdom samen met de grondsoort, het weer, de diepte van het grondwater, de uitgevoerde bemesting en het bouwplan. Zodra de omstandigheden op orde zijn, kan in vrijwel elke bodem een gezonde en gevarieerde populatie van bodemleven tot ontwikkeling komen. Naast de positieve bijdrage van het bodemleven aan de bodemkwaliteit zijn er ook verschillende organismen die heel schadelijk kunnen zijn voor gewassen. Bepaalde bodemschimmels, bodeminsecten en nematoden tasten ondergronds of soms ook bovengronds gewassen aan en veroorzaken daardoor problemen met groei van gewassen, en soms met de kwaliteit van het product. Bij de teelt van gevoelige gewassen en rassen kan de populatie van deze schadelijke organismen snel toenemen, waardoor de schade nog groter wordt in het volgende jaar dat een gevoelig gewas wordt geteeld. Een eenzijdig, intensief teeltplan met slechts enkele gewassen leidt in de praktijk vaak tot opbouw van schadelijke bodemorganismen, waaronder schimmels, bacteriën, insecten, en nematoden. Dat zien we vooral op lichtere klei- en zavelgronden en op zandgronden met intensieve teelten, waardoor er minder zelfregulatie binnen de bodemlevensgemeenschap kan zijn.

Biologische bodemfuncties in de BLN en de Open Bodemindex

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. Daarbij zijn op basis van empirische proeven en literatuurgegevens kritische drempelwaarden ontwikkeld waarboven substantiële schade optreedt aan het groeiend gewas. Daarnaast is het belang van organische stof als abiotische sleutelparameter voor het bodemleven breed bekend. 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 maakt dat ontwikkeling van streefwaarden rond schimmels nog onbekend zijn. Wel is er op basis van lange termijnproeven en praktijkervaring meer bekend over hoe bodembeheer invloed heeft op het bodemleven. Om het bodemleven te voeden is aanvoer van koolstof nodig, en dit kan via wortel-exudaten van gewassen, gewasresten en groenbemesters, maar ook via de aanvoer van organische mest. Om voldoende zuurstof in de bodem te houden, is het belangrijk dat de structuur luchtig is en dat de bodem niet verzadigd is met water.

In de BLN zijn zes biologische metingen opgenomen die iets 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. Omdat nog onduidelijk is hoe de variatie in aantallen en diversiteit invloed hebben op de gewasproductie of gewaskwaliteit, zijn deze metingen nog niet opgenomen in de Open Bodemindex. In de Open Bodemindex is naast de bodemfunctie plantparasitaire nematoden wel een wat discutabele maar eenvoudige rekenregel opgenomen rond de ziekteveroorzakende van bodems in relatie tot de hoeveelheid organische stof, gebaseerd op expertkennis van diverse deskundigen. Zowel BLN als de Open

Bodemindex maken gebruik van de *Potentieel Mineraliseerbare Stikstof* meting, een bodemanalyse die aangeeft hoe gemakkelijk het bodemleven de aanwezige organische stof kan afbreken.

Selectie van bodemfuncties voor de BLN 2.0

In tabel 3.3 is een overzicht van biologische bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie opgenomen met de bijbehorende bodemeigenschappen die gemeten dienen te worden met meetmethode en kostenindicatie. Per bodemfunctie wordt aangegeven of er een streefwaarde beschikbaar is, waar deze op gebaseerd is, en in welke mate deze streefwaarde rekening houdt met grondsoort en landgebruik als ook een referentie naar de onderliggende studies waarin de afleiding is beschreven of vermeld. Wanneer geen streefwaarde beschikbaar is, wordt aangegeven of een drempelwaarde of referentiewaarde beschikbaar is. In figuur 3.3 is dit grafisch weergegeven.

De noodzaak van het meten van de bodemfunctie plantparasitaire aaltjes is optioneel omdat plantparasitaire aaltjes niet op alle gronden en in alle bouwplannen een risico vormen en de meting dan ook niet altijd effectief is om uit te voeren.

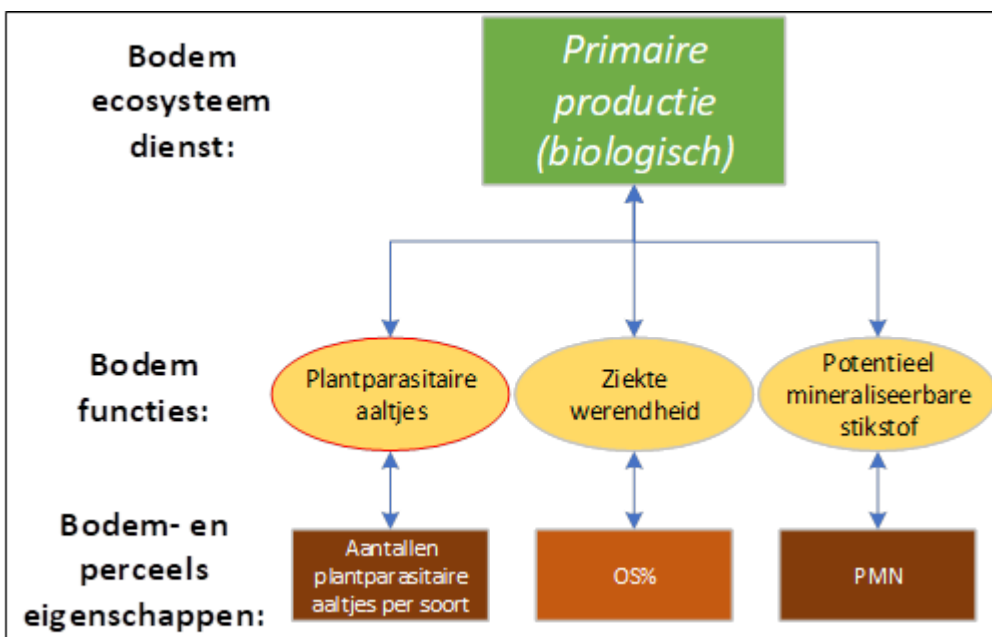
De biologische bodemeigenschappen rond hoeveelheid aaltjes, bacteriën, schimmels en regenwormen uit de BLN 1.1 zijn daarmee niet overgenomen in de BLN 2.0 voor de ecosysteemdienst primaire productie vanwege het ontbreken van een duidelijke relatie met gewasopbrengst of gewaskwaliteit. Deze eigenschappen worden wel meegenomen als bodemfuncties in ontwikkeling in de beoordeling van de ecosysteemdienst biodiversiteit en habitatvoorziening (zie hoofdstuk 6).

Selectie van bodemeigenschappen

Voor de bodemfunctie plantparasitaire aaltjes worden de hoeveelheden schadelijke aaltjes gemeten. De metingen van plantparasitaire aaltjes worden nog grotendeels met microscopie gedaan, hoewel er voor een aantal ook PCR-methodes beschikbaar zijn. De kosten hiervan zijn aanzienlijk maar over het algemeen wel effectief wanneer er een risico is op het voorkomen van plantparasitaire aaltjes (met name lichte gronden). Het organische stofgehalte als ook de hoeveelheid potentieel mineraliseerbaar stikstof (PMN) voor de andere twee bodemfuncties kunnen relatief accuraat met NIRS worden vastgesteld, waarbij de meetonzekerheid voor PMN relatief hoog is bij lagere afbraaksnelheden. Deze onzekerheid is eigen aan zowel de klassieke biologische referentiemethode als ook de NIRS-analyse.

Beschikbaarheid van streefwaarden

Voor de plantparasitaire aaltjes zijn streefwaarden beschikbaar gebaseerd op vele veldproeven. De streefwaarde voor ziekte werendheid op basis van organische stof is een ruwe expertinschatting. De referentiewaarde voor PMN is gebaseerd op een aantal datasets uit het BoBI-netwerk.



Figuur 3.3 Visuele weergave van biologische bodemfuncties en bijbehorende bodemeigenschappen van de ecosysteemdienst primaire productie, zoals gegeven in Tabel 3.3

Tabel 3.3 *Biologische bodemfuncties, bodemeigenschappen, en bijbehorende streefwaarde en meetmethodes ten behoeve van de ecosystemedienst primaire productie. De biologische functies hebben geen geaggregeerde bodemfuncties.*

Bodemfunctie~	Bodem-eigenschappen*	Meet-methode	Kosten-indicatie	Streefwaarde, drempelwaarde, referentiewaarde^	Differentiatie\$	BLN/OBI	Bronnen	
FO19	Plantparasitaire aaltjes	Aantallen plantparasitaire aaltjes per soort	Microscopie, PCR	Gemiddeld	SE	Waarde < drempel per aaltjessoort, afgeleid van veldproeven	Landgebruik, grondsoort	BLN-OBI Aaljesschema.nl
FK20	Ziektewerendheid	OS%	NIRS	Laag	DE	5% OS, afgeleid van expertschatting	-	OBI Hanegraaf et al., 2013
FK21	Potentieel mineraliseerbare stikstof	PMN	NIRS	Laag	RE	40 mg N kg ⁻¹ op basis van veel voorkomende PMN	Landgebruik, grondsoort	BLN-OBI Van Schöll et al., 2019; Moebius-Clune et al., 2016

~ FK = kern bodemfunctie, FO = optionele bodemfunctie, FI = bodemfunctie in ontwikkeling

* OS% is organisch stofgehalte, en PMN staat voor potentieel mineraliseerbaar stikstof.

^ 1^e letter: S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde, 2^e letter: waarde gebaseerd op E = empirisch onderzoek, M = modelmatig onderzoek, X = expertkennis, S = statistische technieken, W = wet- en regelgeving

\$ landgebruik omvat de categorieën akkerbouw (inclusief vollegrondsgroente), grasland, mais en natuur. De grondsoort omvat de categorieën: dekzand, duinzand, rivierklei, zeeklei, veen, moerige klei, dalgronden en lössgronden

3.4 Rol van organische stof

Belang van organische stof

Organische stof is een cruciaal element voor een goed functionerende bodem. Organische stof speelt een rol bij de beschikbaarheid van nutriënten en water, de vastlegging van koolstof in de bodem, bij de vorming van structuur en bij de weerbaarheid van de bodem tegen ziekten en plagen. Het verbetert de structuur, bevordert de bewerkbaarheid en verhoogt het vochtvasthoudend vermogen van de grond. Het verhoogt de kationomwisselcapaciteit van de bodem (CEC) waardoor de bodem meer kationen als kalium, calcium en magnesium kan vasthouden. De organische stof zelf bevat relevante mineralen als stikstof, fosfor en zwavel, die na afbraak van de organische stof beschikbaar komen (mineraliseren). De toevoer van vers organische materiaal stimuleert het bodemleven en kan de bodemweerbaarheid verhogen. Toch zijn er ook risico's met name rond de insleep van verontreinigingen en pathogenen met aanvoer van externe organische stof. Over de cruciale rol van organische stof in de bodem is in het hele werkveld van agronomen, bodemkundigen, hydrologen en klimatologen geen discussie.

Organische stof in de BLN en de Open Bodemindex

In de BLN 1.0 wordt onderscheid gemaakt tussen vier groepen bodemfuncties, gerelateerd aan organische stof, de fysische, chemische en biologische bodemkwaliteit. Dit onderscheid klopt vanuit een differentiatie naar beschikbare meetmethodes, maar is minder geschikt vanuit het oogpunt van landbouwkundige bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie, in het bijzonder voor de specifieke rol van organische stof. In de BLN zijn drie meetbare bodemeigenschappen opgenomen die gerelateerd zijn aan de hoeveelheid en kwaliteit van de organische stof: het organische stofgehalte, het koolstofgehalte en de afbreekbare fractie van organische stof in de bodem. Het is vanwege deze complexe rol zeer lastig om een eenduidige streefwaarde vast te stellen voor het organische stofgehalte, dan wel voor de kwaliteit van de organische stof. Om deze reden was het organische stofgehalte als zodanig geen bodemfunctie in de Open Bodemindex. De bijdrage van organische stof wordt daarom verdisconteerd in de bodemfuncties die daardoor beïnvloed worden. Ook in de BLN 2.0 is daarom organische stof geen aparte bodemfunctie voor landbouwkundige productie.

Selectie van bodemfuncties voor BLN 2.0 waar organische stof van belang is

Organische stof speelt in veel bodemfuncties een rol. De bodemfuncties die relevant zijn voor de ecosysteemdienst primaire productie en mede door organische stof beïnvloed worden zijn:

- Chemische bodemfuncties: buffering zuurgraad, stikstofleverend vermogen, zwavelleverend vermogen, kaliumbuffering (zie tabel 3.1);
- Fysische bodemfuncties: Watervasthoudend vermogen, Plantbeschikbaar water, Aggregaatstabiliteit, Verkruijmelbaarheid en Verslemping (zie tabel 3.2);
- Biologische bodemfuncties: Ziektewerendheid (zie tabel 3.3)

Naast de rol van organische stof voor de primaire productie heeft organische stof ook een rol voor de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen voor grondwater en oppervlaktewater (hoofdstuk 4) en in het bijzonder voor de ecosysteemdienst voor koolstofvastlegging en broeikasgasemissies (hoofdstuk 5). Ook in de ecosysteemdienst habitat voor biodiversiteit (hoofdstuk 6) speelt organische stof een rol maar hier wordt organische stof alleen in de HWC (hot water carbon) meegenomen. Bij een verdere ontwikkeling van bodemfuncties voor deze ecosysteemdienst kan dit nog wijzigen.

Selectie van bodemeigenschappen

Het organische stofgehalte wordt klassiek gemeten via een gloeiverliesmethode, maar tegenwoordig veelal via een totale C-analyse. De hoeveelheid organische stof wordt dan berekend uit het koolstofgehalte. Hoewel het koolstofgehalte kan variëren als gevolg van het historische management en daarmee indicatief kan zijn voor de kwaliteit van de organische stof, is de variatie binnen grondsoorten klein (Ros, 2016). Dit betekent dat het voldoende is om één van beide te meten. In de praktijk wordt hiervoor de bekende van Bemmelenfactor voor gebruikt (een factor van 0,58) maar recente inzichten laten zien dat het beter is om een factor 0,5 te gebruiken (Pribyl, 2010). De vertaalslag van een bodemeigenschap richting een bodemfunctie heeft daarnaast een intrinsieke onzekerheid die groter is dan deze conversiefunctie. Omdat de methode om het koolstofgehalte te meten nauwkeuriger is dan de gloeiverliesmethode, heeft deze de voorkeur om te gebruiken in de BLN 2.0

voor de berekening van de bodemfuncties. Waar in de tabellen met bodemfuncties in hoofdstuk 3 tot en met 7 als benodigde bodemeigenschap organische stofgehalte staat kan ook koolstofgehalte gebruikt worden en vice-versa.

Beschikbaarheid van streefwaarden

Er zijn in Nederlands onderzoek nooit streefwaarden of drempelwaarden opgesteld voor het organische stofgehalte. Een recente wereldwijde meta-analyse van Oldfield et al. (2019) laat een voorzichtig positief effect zien van organische stof op de gewasopbrengst, maar dit effect is vooral zichtbaar bij bodems met erg weinig organische stof. Recent onderzoek door Moinet et al. (2023) bevestigt deze conclusie op basis van meer dan 21 meta-analyses waarbij het effect van organische stof op opbrengst sterk kon variëren. Bestaande lange-termijnproeven laten zien dat het verhogen van het OS-gehalte weinig meerwaarde heeft als er al 3 á 4% organische stof in de bodem zit. In Nederland heeft 75% van alle bouwland percelen een OS-gehalte hoger dan 3,2% (Ros, 2020). Voor graslanden ligt het OS-gehalte zelfs substantieel hoger. Vanuit de ecosysteemdienst primaire functie heeft het geen meerwaarde om een streefwaarde voor het OS-gehalte als bodemeigenschap te definiëren.

Er zijn anno 2023 geen experimentele gegevens beschikbaar om streefwaarden of drempelwaarden af te leiden voor de afbreekbare organische stoffractie voor toepassing in Nederland. Er zijn wel meerdere proeven die bevestigen dat het landgebruik, het type bemesting en grondbewerking een invloed kunnen uitoefenen op de voorgestelde hot water carbon (HWC)-fractie, maar deze inzichten zijn i) niet consistent en afhankelijk van andere bodemeigenschappen, en ii) niet te relateren aan een functie die de bodem daadwerkelijk levert ten behoeve van de ecosysteemdienst primaire productie. Omdat de HWC-fractie sterk correleert met de koolstofvoorraad in de bodem (Ros et al., 2011), is de toegevoegde waarde voor een generieke bodemkwaliteits-beoordeling voor primaire productie vooralsnog discutabel en wordt deze in de BLN 2.0 voor deze ecosysteemdienst niet meegenomen. Wel wordt de HWC als bodemfunctie in ontwikkeling meegenomen voor beoordeling van de ecosysteemdienst biodiversiteit en habitatvoorziening (zie hoofdstuk 6).

4 Ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen

4.1 Bodemfuncties voor regulatie en reiniging grondwater

Belang van bodemkwaliteit voor regulatie en reiniging van grondwater

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 vochtleverendvermogen (minimale afhankelijkheid van irrigatie uit grond- en oppervlaktewater en maximale robuustheid tegen droogte). Deze eigenschappen worden mede bepaald door het samenspel van fysische, chemische en biologische processen die gedurende de bodemvorming zijn opgetreden. Belangrijk is dat de opgaves voor deze ecosysteemdiensten niet gelijk zijn over Nederland; de grootste opgaves liggen in de Oostelijke en Zuidelijke zand- en lössgebieden, in het bijzonder in de grondwaterbeschermingsgebieden. Op klei- en veengronden is deze problematiek kleiner, met uitzondering van gebieden met verziltingsproblematiek waarbij zout water opwelt vanuit de ondergrond. Die verzilting lijkt in de laatste jaren een steeds groter probleem te worden in Nederlandse (zee)kleigebieden door zeespiegelstijging, bodemdaling en daling van de grondwaterstand. Bodemeigenschappen en perceelskenmerken die een rol spelen in de bijdrage van bodemkwaliteit aan de verbetering van grondwaterkwaliteit en -aanvulling zijn:

- Generiek: landgebruik, grondsoort, textuur, aanwezigheid van versturende lagen en geohydrologische setting (GHG, GLG, kwel, infiltratie en drainage) als ook de maaiveldmorfologie;
- Bodemchemie en biologie: organische stof (kwantiteit en kwaliteit), kationomwisselcapaciteit en zuurgraad, en potentieel een hele serie aan bodemeigenschappen die gezamenlijk een proxy vormen voor het zelfreinigend vermogen van de bodem (Rutgers et al., 2014).

Beschikbare bodemfuncties in de BLN, de Open Bodemindex en andere tools

In BLN 1.0 zijn geen bodemfuncties beschikbaar voor de ecosysteemdienst regulatie en reiniging van grondwater. De Open Bodemindex heeft één bodemfuncties beschikbaar waarbij de bijdrage van de bodem aan de nitraatuitspoeling wordt gekwantificeerd en beoordeeld. Daarnaast is er in 2021 een aanpak ontwikkeld voor bodemfuncties die zorgdragen voor voldoende grondwateraanvulling en het voorkomen van uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen en nitraat (Geurts et al., 2021a). Deze zijn af te leiden van bodemeigenschappen, zoals dat bijvoorbeeld vorm krijgt in de proxy 'zelfreinigend vermogen' in de BoBi-aanpak (Van Wijnen et al., 2012; Rutgers et al., 2012) en de bodemfuncties grondwateraanvulling, stikstofefficiëntie en -buffering, en afbraakpotentie voor pesticiden in de Open Bodemindex (Geurts et al., 2021a). Dit kan met behulp van expertkennis, metamodellen (Tiktak et al., 2006) en statistische methoden (Van den Dool et al., 2021). Andere methodieken zijn gebaseerd op procesmatige, statistische of empirische modellen om de impact van bodembeheer, mestbeleid en bodemkwaliteit op nitraatconcentraties te kwantificeren (Ros, 2021). Denk dan aan de modellen STONE, INITIATOR, WOGWOD, het DSG-nitraatuitspoelingsmodel, de KringloopWijzer en NDICEA als ook de Nitraatkaart ontwikkeld door het RIVM op basis van een *random forest* clusteringsalgoritme. De toepasbaarheid en betrouwbaarheid van deze modellen op perceelsniveau is vooralsnog beperkt, waardoor meer kwalitatieve benaderingen zoals geïmplementeerd in de Open Bodemindex, de Maatregel-Op-De-Kaart en het BWWP worden gebruikt om zo een "distance to target" te definiëren per perceel als maat voor de bodemkwaliteit.

Selectie van bodemfuncties voor de BLN 2.0

In tabel 4.1 is een overzicht van de bodemfuncties voor de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen ten behoeve van grondwater opgenomen met de bijbehorende bodemeigenschappen die gemeten dienen te worden met meetmethode en kostenindicatie. Per bodemfunctie wordt aangegeven of er een streefwaarde beschikbaar is, waar deze op gebaseerd is, en in welke mate deze streefwaarde rekening houdt

met grondsoort en landgebruik als ook een referentie naar de onderliggende studies waarin de afleiding is beschreven of vermeld. Wanneer geen streefwaarde beschikbaar is wordt aangegeven of een drempelwaarde of referentiewaarde beschikbaar is. Hieronder worden deze functies kort beschreven en toegelicht.

Bodemfunctie Nitraatuitspoeling

In hoeverre stikstof als nitraat uitspoelt naar het watersysteem, hangt af van bodemsoort, gewassoort en grondwaterstand. Onder natte omstandigheden spoelt er minder nitraat naar het grondwater omdat er meer stikstof denitrificeert en er een hoger risico op afspoeling. Onder grasland spoelt er ook minder nitraat uit dan onder akkerbouw omdat gras een intensief wortelstelsel heeft als ook een langere opnameperiode. Zandgronden zijn daarnaast gevoeliger voor uitspoeling dan klei- of veengronden door een hogere infiltratiesnelheid van regenwater. Op basis van het landelijke modelinstrumentarium STONE is in 2016 de gevoeligheid van N-uitspoeling berekend als functie van het N-overschot (gedefinieerd als de hoeveelheid niet opgenomen stikstof afkomstig uit bemesting en van mineralisatie). Op basis hiervan kan per grondsoort, gewasstype en grondwatertrap in kaart gebracht hoe het nitraatgehalte in het grondwater verandert als gevolg van een verandering in het N-overschot. De *extra* uitspoeling als gevolg van het N-leverend vermogen van de bodem is daarna in beeld worden gebracht door de berekende nitraatuitspoeling te normaliseren op basis van de bijdrage van NLV aan de totale N-aanvoer door bemesting en depositie (Fujita et al., 2019).

Bodemfunctie Grondwateraanvulling

De grondwateraanvulling wordt primair gestuurd door het neerslagoverschot. De kwaliteit van de bodem bepaalt vervolgens welk deel van het neerslagoverschot ook daadwerkelijk infiltreert richting het grondwater. Om deze grondwateraanvulling in kaart te brengen, kan het neerslagschot worden berekend via de potentiële gewasverdamping en de Makkink-correctie, waarna dit overschot kan worden gecorrigeerd voor twee andere bodemkenmerken, namelijk de snelheid waarmee het water kan infiltreren (afgeleid van de onverzadigde doorlatendheid) en het risico op verslemping. Optioneel kan hierbij ook rekening worden gehouden met het voorkomen van ondergrondverdichting en de aanwezigheid van drainage (Van den Dool et al., 2021).

Bodemfunctie Uitspoeling gewasbeschermingsmiddelen

De gevoeligheid van de bodem voor uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen kan in kaart worden gebracht met behulp van een meta-model van het uitspoelingsmodel PEARL (Tiktak et al., 2006). De bijdrage van de bodemkwaliteit wordt hierbij sterk gestuurd door het organische stofgehalte. Door van Dool et al. (2021) wordt voorgesteld een indicator te gebruiken gebaseerd op een worst-case scenario, waarbij de uitspoeling wordt berekend voor een zeer persistent middel. Om de rol van de bodem in het voorkomen van uitspoeling van gewasbeschermingsmiddelen te kwantificeren, wordt elke bodem vergeleken met een bodemkwaliteit die niet in staat is gewasbeschermingsmiddelen af te breken of te binden. Dit gebeurt bij bodems met een extreem laag organische stofgehalte. Optioneel kan er ook rekening wordt gehouden met het effect van bodembeheer (inclusief beheersmaatregelen rondom het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen).

Selectie van bodemeigenschappen

Voor de geselecteerde bodemfuncties zijn een aantal bodemeigenschappen nodig. De belangrijkste zijn gerelateerd aan de bodemfysica en het transport van water. Op basis van gemeten mineralogie (klei-, zand- en siltgehalte) als ook het gehalte aan organische stof kan via een pedotransferfunctie de doorlatendheid en watervasthoudend vermogen worden berekend. Op basis van de grondsoort zijn ook uitspoelfracties bekend vanuit metingen uit het Landelijk Meetnet Mestbeleid en ondersteund door modelberekeningen. Voor het neerslagoverschot wordt gebruikt gemaakt van de neerslag (van een nabijgelegen weerstation) en gewasafhankelijke correctiefactoren voor de verdamping.

Beschikbaarheid van streefwaarden

Bodemeigenschappen zijn in sterke mate bepalend voor de droogte- en uitspoelingsgevoeligheid van bodems. Recent hebben Geurts et al. (2021a) onderzocht of het mogelijk was om de bijdrage van de bodem aan het beschermen van grondwater inzichtelijk te maken. Zij stelden op basis van interviews met bodemdeskundigen dat het definiëren van referentiebodems, als streefbeeld voor een goede bodemkwaliteit, onvoldoende recht doet aan de variatie in bodemeigenschappen en -gebruik binnen de context van de bescherming van het grondwatersysteem. De optimale bodem is sterk doel- en situatieafhankelijk en voor een deel ook moeilijk maakbaar. Juist door de sterke koppeling met grondsoort en lokale geohydrologie is het zelfs nadelig om naar een generieke referentiebodem toe te werken. Het is beter om de pijlen te richten op specifieke bodemeigenschappen die verbeterd kunnen worden en vervolgens bodemfuncties en streefbeelden te

definiëren op basis van deze eigenschappen. 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). In 2021 zijn hiervoor de eerste bodemfuncties, en bijbehorende indicatoren, ontwikkeld en beperkt getoetst (van den Dool et al., 2021). Als streefwaarde voor de bijdrage van de bodem aan de nitraatuitspoeling wordt voorgesteld om hiervoor een drempelwaarde te definiëren van 25 mg NO₃ per liter. Als streefwaarde voor de bodemfunctie grondwateraanvulling wordt voorgesteld om uit te gaan van een gewenst overschot van 400 mm jaar⁻¹, waarbij onderliggend de doorlatendheid van de bodem wordt geëvalueerd in relatie tot een streefwaarde van 100 cm d⁻¹. De streefwaarde voor de bodemfunctie om de uitspoeling gewasbeschermingsmiddelen te beperken is gebaseerd op een relatieve vergelijking met i) een bodem die niet of weinig invloed heeft op de retentie of afbraak van deze middelen en ii) een bodem die de uitspoeling maximaal kan reduceren. De maximale retentie bij de bodem die de uitspoeling maximaal kan reduceren wordt daarbij gedefinieerd als de streefwaarde.

Tabel 4.1 Bodemfuncties, bodemeigenschappen, en bijbehorende streefwaarde en meetmethodes ten behoeve van de ecosystemendienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen onderdeel grondwater.

Bodemfunctie~	Bodemeigenschappen*	Meetmethode	Kosten-indicatie	Streefwaarde, drempelwaarde, referentiewaarde^	Differentiatie\$	BLN-OBI	Bronnen		
FK22	Nitraatuitspoeling	Uitspoelingsrisico, N-totaal, grondwatertrap	Modelberekening	Laag	SW	NO ₃ ⁻ concentratie < 25 mg/l, gebaseerd o.b.v. modelberekeningen	Grondsoort, landgebruik, OBI	Groenendijk et al., 2016; Fujita et al., 2019	
FK23	Grondwateraanvulling	Watervasthoudend vermogen, neerslagoverschot, bodemverdichting, drainage, verslemping (tabel 3.2)	Modelberekening	Laag	SX	Index = 1, op basis van expertkennis	Grondsoort, landgebruik	-	Van den Dool et al., 2021
FK24	Uitspoeling gewasbeschermingsmiddelen	Klei-, zand- en siltgehalte en OS%, neerslagoverschot, en 2 optionele beheersmaatregelen	Modelberekening	Laag	SM	Index < 0.75, gebaseerd op modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort	-	Van den Dool et al., 2021

~ FK = kern bodemfunctie, FO = optionele bodemfunctie, FI = bodemfunctie in ontwikkeling

* N-totaal is het gehalte aan stikstof in de bodem, OS% is het percentage organische stof

^ 1^e letter: S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde, 2^e letter: waarde gebaseerd op E = empirisch onderzoek, M = modelmatig onderzoek, X = expertkennis, S = statistische technieken, W = wet- en regelgeving

\$ landgebruik omvat de categorieën akkerbouw (inclusief vollegrondsgroente), grasland, mais en natuur. De grondsoort omvat de categorieën: dekzand, duinzand, rivierklei, zeeklei, veen, moerige klei, dalgronden en lössgronden

4.2 Bodemfuncties voor regulatie en reiniging oppervlaktewater

Belang van bodemkwaliteit voor regulatie en reiniging van oppervlaktewater

Vanuit het perspectief van de kwaliteit van het oppervlaktewater zijn er een aantal bodemeigenschappen die van invloed zijn op het voorkomen van belasting met nutriënten vanuit het perceel naar de naastliggende waterloop. Vanuit eerdere studies (Groenendijk et al., 2016; van der Bolt et al., 2020; Ros et al., 2020; Groenendijk et al., 2020) is bekend dat ondiepe uitspoeling en afspoeling de belangrijkste routes zijn waarlangs nutriënten naar het oppervlaktewater stromen. Vergelijkbaar met de opgaves voor het grondwater, zijn de opgaves voor de kwaliteit van het oppervlaktewater regiospecifiek, afhankelijk van de eigenschappen van het stroomgebied en de ecologische streefbeelden die worden nagestreefd. De bodemeigenschappen en perceelskenmerken die een rol spelen in het verhogen van het zelfreinigend vermogen zijn:

- Generiek: landgebruik, grondsoort, textuur, aanwezigheid van versturende lagen en geohydrologische setting (GHG, GLG, kwel, infiltratie en drainage) als ook de maaiveldmorfologie;
- Bodemchemie en biologie: organische stikstof, de afbreekbaarheid ervan, fosfaatvoorraden en beschikbaarheid, en fosfaatretentie.

Ook het voorkomen van belasting van oppervlaktewater met gewasbeschermingsmiddelen is van belang maar wordt voorsnog niet meegenomen.

Beschikbare bodemfuncties in de BLN, de Open Bodemindex en andere tools

In BLN 1.0 zijn geen bodemfuncties beschikbaar voor de ecosysteemdienst waterregulatie en reiniging van grondwater. De Open Bodemindex heeft één bodemfunctie beschikbaar waarbij de bijdrage van de bodem aan de stikstofuitspoeling wordt gekwantificeerd en beoordeeld. Voor de rol van de bodem in het beperken van afspoeling en ondiepe uitspoeling worden er in Nederland twee systemen toegepast waarbij inzicht en maatwerk worden mogelijk gemaakt. Allereerst is er de modelmatige benadering, waarbij op basis van grondsoort, landgebruik en nutriëntentoestand van de bodem en het agrarisch management de bijdrage van de bodem wordt gekwantificeerd. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het model ANIMO-SWAP als onderdeel van STONE en het landelijk waterkwaliteitsmodel (Groenendijk et al., 2016; Van der Bolt et al., 2020). Per stroomgebied kan hiermee in kaart worden gebracht wat de benodigde reductie is vanuit de landbouwbodem om de belasting van het oppervlaktewater met N en P te realiseren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de zogenoemde ECHO-systematiek (Schipper et al., 2020). Gegeven de onzekerheid in inputgegevens en modelkalibratie is een fijnere resolutie dan stroomgebieden niet mogelijk. Voortbouwend op deze modelstudies is door LBI, NMI en WEnR ook een alternatieve aanpak uitgewerkt waarbij op basis van meetbare perceelskenmerken het risico op uit- en afspoeling in kaart wordt gebracht (Groenendijk et al., 2021; Ros et al., 2021). Deze aanpak is verder doorontwikkeld in een BedrijfsBodemWaterPlan (BBWP, Ros et al., 2020) volgens het strategisch advies voor de ontwikkeling van DAW-tools om sturing te geven aan maatregelen op perceel en bedrijf (Ros et al., 2019). De gebruikte methodiek is gebaseerd op expertkennis en statistische methoden om zo een "distance to target" te definiëren per perceel gegeven de opgaves voor oppervlaktewater.

Selectie van bodemfuncties voor de BLN 2.0

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 daarom gekozen voor het gebruik van de bodemfuncties die gebruikt zijn in de landelijke BBWP-systematiek (Ros et al., 2019).

In tabel 4.2 is een overzicht van de bodemfuncties voor de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen ten behoeve van oppervlaktewater opgenomen met de bijbehorende bodemeigenschappen die gemeten dienen te worden met meetmethode en kostenindicatie. Per bodemfunctie wordt aangegeven of er een streefwaarde beschikbaar is, waar deze op gebaseerd is, en in welke mate deze streefwaarde rekening houdt met grondsoort en landgebruik als ook een referentie naar de onderliggende studies waarin de afleiding

is beschreven of vermeld. Wanneer geen streefwaarde beschikbaar is, wordt aangegeven of een drempelwaarde of referentiewaarde beschikbaar is. Hieronder worden deze functies kort beschreven en toegelicht.

Bodemfunctie: afspoelingsrisico

Een van de sturende bodemfuncties is het risico van afspoeling, dat er water via runoff of ondiepe uitspoeling naar het oppervlaktewater verdwijnt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een aantal onderliggende indicatoren waarbij perceelskenmerken worden geëvalueerd in relatie tot een streefwaarde waarbij weinig tot geen uit- en afspoeling optreedt. De berekening van dit risico is gebaseerd op rekenregels voor het risico op oppervlakkige afspoeling (Van Hattum et al., 2011) afgeleid van de maaiveldhoogte, de helling van het maaiveld, en de aanwezigheid van greppels op het perceel en de connectiviteit met omliggend oppervlaktewater (Van Gerven et al., 2018). Daarnaast wordt rekening gehouden met de grondwatertrap (bij natte percelen is er meer runoff) en de aanwezigheid van ondergrondverdichting (Van den Akker, 2012).

Bodemfunctie: risico op fosforafspoeling

Het risico op afspoeling van fosfor naar het oppervlaktewater is een gewogen gemiddelde van de indicator oppervlakkige afspoeling (zie hierboven), de P-retentie afgeleid via een oxalaatextractie van de hoeveelheid ijzer en aluminium, de direct beschikbare hoeveelheid fosfaat in de bodemoplossing, en de P-verzadigingsgraad. De bodemfunctie is gebaseerd op een statistische ranking methode, waarbij het risico varieert tussen de waarde 0 (geen risico) tot 1 (een hoog risico).

Bodemfunctie: risico op stikstofafspoeling

Het risico op afspoeling van stikstof naar het oppervlaktewater is een gewogen gemiddelde van de indicator oppervlakkige afspoeling (zie hierboven), de hoeveelheid stikstof (N-totaal) in de bouwvoor als ook de afbreekbaarheid ervan waarbij rekening wordt gehouden met landgebruik en het risico op ondergrondverdichting (Van den Akker, 2012). Ook hier is de bodemfunctie gebaseerd op een statistische ranking methode, waarbij het risico varieert tussen de waarde 0 (geen risico) tot 1 (een hoog risico).

Selectie van bodemeigenschappen

De ontwikkelde BBWP-score brengt voor elk perceel het risico in kaart dat er stikstof of fosfor verloren gaat naar het oppervlaktewater, waarbij percelen met een laag risico dus gekenmerkt worden door een hoge mate van regulatie en reiniging. Hiervoor zijn de volgende bodem- en perceelseigenschappen nodig:

- Grondsoort en landgebruik
- Fosfaatmetingen waarbij fosfaat gemeten wordt via een extractie van water, CaCl_2 , ammoniumlactaat en oxalaat. Hierbij zijn er pedotransfer functies beschikbaar om P-CaCl_2 en P_{WATER} uit elkaar te berekenen, beide gemeten via een klassieke extractiemethode. P-Al wordt alleen klassiek gemeten omdat spectroscopische technieken (nog) onvoldoende betrouwbaar zijn.
- Voor de hoeveelheid fosfor, ijzer en aluminium dat extraheerbaar is met oxalaat kan gebruik worden gemaakt van klassieke extractiemethoden. Voor heel Nederland zijn er ook metingen beschikbaar via NIRS.
- Het klei-, zand-, en siltgehalte als ook het gehalte van organische stof, het stikstofgehalte en de potentieel mineraliseerbare stikstof kunnen zowel via klassiek meetmethoden als ook via NIRS worden gemeten. De NIRS-meting heeft voor deze elementen een hoge nauwkeurigheid.
- De natte omtrek als ook het risico op oppervlakkige afspoeling wordt afgeleid van de morfologie van het perceel (afgeleid van de AHN) en ruimtelijke bestanden voor de geometrie van percelen en de watergangen.

Beschikbaarheid van streefwaarden

De ontwikkelde indicatoren (dat wil zeggen een beoordeelde bodemfunctie) in het BBWP zijn gebaseerd op een statistische ranking methode waarbij de bodemeigenschappen en perceelseigenschappen worden gerangschikt van laag (de waarde 0, geen risico) tot hoog (de waarde 1, een hoog risico). Na deze rangschikking worden de verschillende bodemfuncties geaggregeerd op basis van de "distance to target", waarbij bodemfuncties die gecorreleerd zijn minder impact krijgen op de uiteindelijke indicator.

Tabel 4.2 Bodemfuncties (met aggregatie), bodemeigenschappen, en bijbehorende streefwaarde en meetmethodes ten behoeve van de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen onderdeel oppervlaktewater.

Geaggregeerde bodemfunctie	Bodemfunctie~	Bodemeigenschappen*	Meetmethode	Kosten-indicatie	Streefwaarde, drempelwaarde, referentiewaarde^	Differentiatie\$	BLN-OBI	Bronnen	
Algemeen afspoelingsrisico	FK25	Afspoelingsrisico o.b.v. morfologie	Morfologie	Berekening o.b.v. AHN en geometrie	Laag	SX Index = 0, afgeleid van expertkennis	-	-	Van Hattum, 2011; Ros et al., 2019
Algemeen afspoelingsrisico	FK26	Afspoelingsrisico o.b.v. omtrek	Natte omtrek\$	Berekening o.b.v. geometrie	Laag	SX Index = 0, afgeleid van expertkennis	-	-	Van Gerven et al., 2019
Algemeen afspoelingsrisico	FK27	Afspoelingsrisico o.b.v. helling	Helling\$	Berekening o.b.v. AHN	Laag	SM Helling < 2%	-	-	Groenendijk et al., 2021
Algemeen afspoelingsrisico	FK28	Afspoelingsrisico o.b.v. natheid perceel	Grondwatertrap\$	Kaart	Laag	SM Gt > 3	-	-	Groenendijk et al., 2021
Algemeen afspoelingsrisico	FK29	Afspoelingsrisico o.b.v. verdichting	Ondergrondverdichting	Kaart obv Modelberekening	Laag	SM Classificatie index = 0, op basis van draagkracht bodem, afgeleid van metingen en modelberekeningen	Landgebruik, grondsoort	-	Van den Akker et al., 2012; Ros et al., 2019
P-afspoelingsrisico	FK30	Capaciteit om fosfaat te binden, P-retentie\$ en P-verzadiging	Al-ox, Fe-ox, P-ox	NIRS-meting klassiek	Laag/gemiddeld	SM < Mediane waarde per LSW*	Per LSW+	-	Groenendijk et al., 2021
P-afspoelingsrisico	FK03	Fosfaatbuffering	P-CaCl ₂ , P-Al	Extractie met CaCl ₂ en NIRS	Laag	SX < 4, afgeleid van veldproeven en expertkennis	Landgebruik	OBI	Ros et al., 2019
N-afspoelingsrisico	FK31	Stikstofafspoelingsrisico	N-totaal, OS%, C/N-verhouding, PMN	NIRS	Laag	SM NLV kleiner dan mediane waarde per LSW*	Landgebruik, per LSW+	OBI	Ros et al., 2019

~ FK = kern bodemfunctie, FO = optionele bodemfunctie, FI = bodemfunctie in ontwikkeling

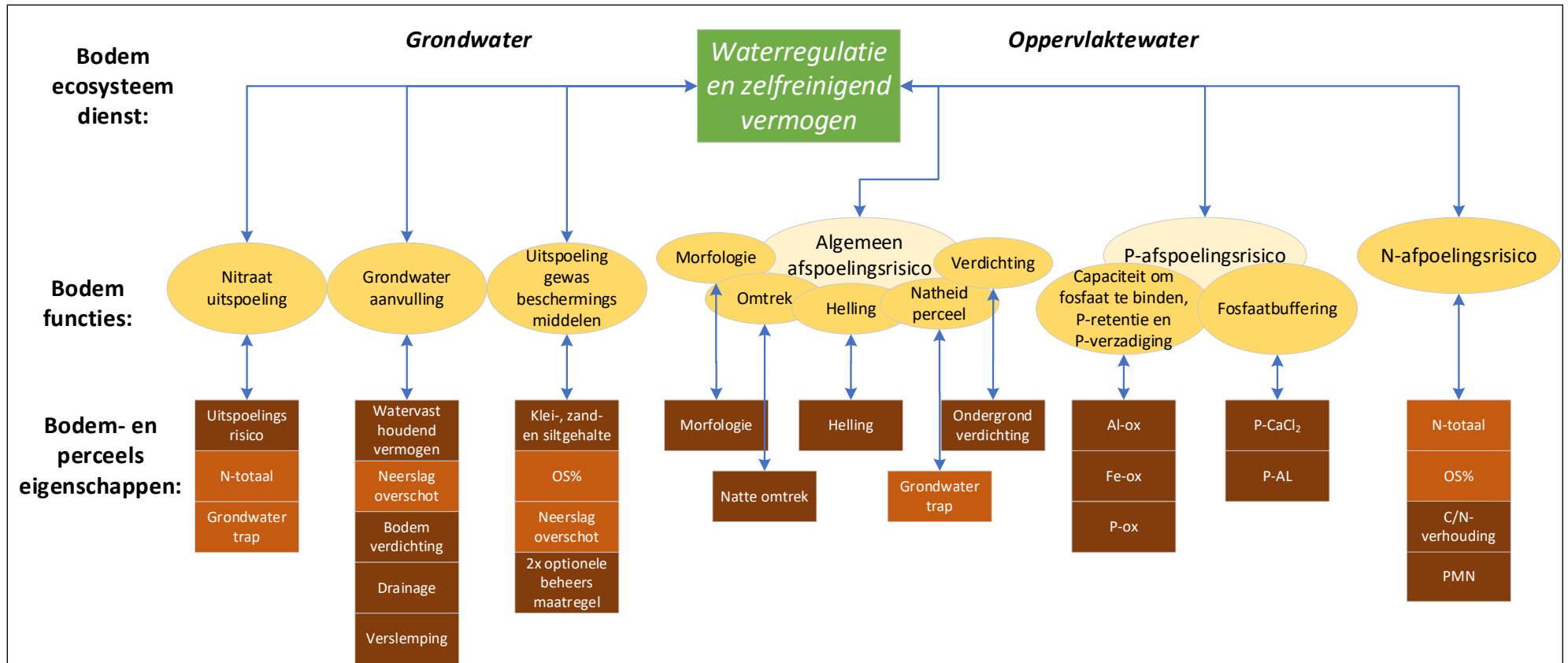
* N-totaal is het gehalte aan stikstof in de bodem, OS% is het percentage organische stof, C/N-verhouding is de ratio tussen koolstof en stikstof, PMN is potentieel mineraliseerbaar stikstof, P-CaCl₂ is de P-concentratie in 0.01M CaCl₂ extract en P-Al is de P-voorraad gemeten in extractie of ammoniumlactaat. De P-retentie is de som van de hoeveelheid aluminium en ijzer gemeten via een oxalaatextractie, en de P-verzadiging is gedefinieerd als de ratio van P-oxalaat over de P-retentie. LSW staat voor Local Surface Water, en wordt gebruikt binnen de landelijke waterkwaliteitsanalyse binnen het Landelijk WaterkwaliteitsModel.

^ 1^e letter: S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde, 2^e letter: waarde gebaseerd op E = empirisch onderzoek, M = modelmatig onderzoek, X = expertkennis, S = statistische technieken, W = wet- en regelgeving

\$ landgebruik omvat de categorieën akkerbouw (inclusief vollegroentes), grasland, mais en natuur. De grondsoort omvat de categorieën: dekzand, duinzand, rivierklei, zeeklei, veen, moerige klei, dalgronden en lössgronden

\$ deze bodemkenmerken zijn als zodanig minder stuurbaar, en kunnen worden beschouwd als perceelsspecifieke correcties die nodig zijn voor differentiaties in streefwaarden.

+ LSW staat voor Local Surface Water en is een ruimtelijke eenheid die gebruikt wordt om belasting van het oppervlaktewatersysteem in beeld te brengen met het Landelijk Waterkwaliteitsmodel (van der Bolt et al., 2020)



Figuur 4.1 Visuele weergave van bodemfuncties en bijbehorende bodemeigenschappen van de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen, zoals gegeven in Tabel 4.1 en 4.2

5 Ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie

5.1 Bodemfuncties voor koolstofvastlegging

Belang van bodemkwaliteit voor koolstofvastlegging

Op minerale gronden zijn er verschillende 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 de koolstof. Er zijn in principe twee manieren om de koolstofvoorraad in de bodem te verhogen: het verhogen van de koolstofaanvoer en het verlagen van de koolstofafbraak. Allereerst kan de jaarlijkse aanvoer van koolstof worden verhoogd. Dit kan door het telen van gewassen die veel gewasresten achterlaten in de bodem, denk aan diepwortelende gewassen, het achterlaten van stro en groenbemesters, of door bemestingsproducten of andere organische reststromen te gebruiken die veel koolstof nalaten in de bodem. Een ton compost zorgt bijvoorbeeld voor een sterkere verhoging dan een ton varkensdrijfmest omdat compost én meer koolstof bevat en deze moeilijker wordt afgebroken. Een tweede manier is het verminderen van de afbraak van koolstof. Dit kan via het verminderen van bodembewerking, het beïnvloeden van de pH (bij lage pH wordt koolstof minder gemakkelijk afgebroken) en verhoging van de ontwatering van percelen (in natte percelen is de afbraak van koolstof lager dan in droge percelen). Alle opties ter vermindering van de afbraak van organische stof hebben tot risico dat de gewasgroei belemmerd wordt en daarmee ook de koolstofvastlegging vanuit gewasresten of groenbemesters. Een laatste optie ter vermindering van de afbraak is toevoeging van klei aan zandgronden. De afbraak van koolstof vermindert bij toenemend kleigehalte van de grond. Zowel voor verhoging aanvoer als vermindering afbraak is de uitgangssituatie belangrijk: in bodems met veel koolstof breekt jaarlijks meer koolstof af dan in bodems met weinig koolstof, waardoor er ook meer moet worden aangevoerd om het gehalte op peil te houden dan wel te laten stijgen.

Om de bijdrage van de bodem aan de klimaatopgave te vergroten, is het zinvol om te sturen op een zo hoog mogelijke koolstofvoorraad in de bodem. Het is zinvol om rekening te houden met het feit dat niet elke bodem evenveel koolstof kan opslaan. 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. Bodemeigenschappen die van invloed zijn op de opbouw en afbraak van koolstof zijn:

- Generiek: landgebruik, grondsoort, textuur en geohydrologie
- Organische stof (kwantiteit en kwaliteit) en de opbrengstpotentie (afhankelijk van de landbouwkundige kwaliteit van de bodem)

Beschikbare bodemfuncties in de BLN, de Open Bodemindex en andere tools

Kijkend naar de koolstofdynamiek in de bodem in relatie tot klimaatmitigatie, is de belangrijkste bodemfunctie hier de langdurige opbouw de koolstofvoorraad in de bodem (koolstofvastlegging). Het gaat hierbij niet zozeer om de hoeveelheid koolstof die op een gegeven moment aan de bodem wordt toegevoegd, maar juist om de toename in de koolstofvoorraad op de lange termijn. Zoals hierboven al genoemd, zal de koolstofvoorraad toenemen 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. Dit geeft als eerste vooral een reflectie op de bijdrage via het huidige management, maar indirect daarmee ook op de koolstof die in de bodem in de toekomst wordt vastgelegd. Een eenvoudige koolstofbalans is om die reden ook opgenomen in de Open Bodemindex.

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, geohydrologie 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 Roth-C; Lesschen et al., 2020) of meetsets (Ros et al., 2023). Zowel grondsoort als landgebruik bepalen voor een groot deel de maximale koolstofvastlegging. Permanent grasland heeft bijvoorbeeld voor Nederlandse minerale landbouwgronden de hoogste koolstofvoorraad. Bouwland heeft een lagere voorraad dan grasland en binnen bouwland hebben bouwplannen met veel graan over het algemeen een hogere koolstofvastlegging dan bouwplannen met weinig graan.

Selectie van bodemfuncties voor de BLN 2.0

De bodemfunctie koolstofbalans kan eenvoudig worden opgesteld via de gegevens zoals deze beschikbaar zijn in het Handboek Bodem en Bemesting (CBAV, 2021) dan wel eenvoudige tools als de os-balans (www.os-balans.nl).

De bodemfunctie koolstofvastlegging kan bepaald worden aan de hand van de koolstofvoorraad. De berekende voorraad moet vergeleken worden met een maximaal haalbare voorraad die berekend is op basis van modellen of bepaald is aan de hand van een groot aantal metingen representatief voor landgebruik en grondsoort. In bijlage 1 is beschreven hoe dit gedaan kan worden.

In tabel 5.1 en figuur 5.1 is een overzicht van de bodemfuncties voor koolstofvastlegging opgenomen met de bijbehorende indicatoren en bodemeigenschappen die gemeten dienen te worden met meetmethode en kostenindicatie. Per bodemfunctie wordt aangegeven of er een streefwaarde beschikbaar is, waar deze op gebaseerd is, en in welke mate deze streefwaarde rekening houdt met grondsoort en landgebruik als ook een referentie naar de onderliggende studies waarin de afleiding is beschreven of vermeld.

Selectie van bodemeigenschappen

De belangrijkste bodemeigenschappen die nodig zijn voor het kwantificeren van bodemfuncties voor de ecosysteemdienst koolstofvastlegging zijn het OS-gehalte, en het klei-gehalte. Daarnaast spelen perceelseigenschappen als gewasrotatie, de hoeveelheid aluminium en ijzeroxides, de zuurgraad en de grondwaterstand een rol.

De koolstofbalans kan berekend worden met de rekenregels en kengetallen uit het Handboek Bodem en Bemesting. In het handboek staan kengetallen voor de aanvoer van organische stof met mest, gewasresten en groenbemesters. Het vaststellen van de afbraak van bodemorganische stof blijkt erg lastig te zijn. Daarom wordt vaak gerekend worden met een vast getal van 2000 kg organische stof per ha. Er zijn enkele alternatieve methoden beschikbaar waarbij een empirische functie waarbij de afbraak berekend wordt op basis van het OS-gehalte zelf (Zwart et al., 2013) de meeste waarde lijkt te hebben. Voor de koolstofvoorraad moet het koolstofgehalte en de bulkdichtheid gemeten worden. Deze laatste kan met een pedotransferfunctie geschat worden uit textuur en organisch stofgehalte of via NIRS worden gemeten. Beide zijn daarnaast ook te meten via klassieke meetmethoden.

Beschikbaarheid van streefwaarden

De streefwaarde voor de koolstofbalans is groter dan 0. De grootste fout in de berekening van de koolstofbalans zit in de schatting van de afbraak. Zoals hierboven aangegeven, zijn er geen betrouwbare kengetallen per grondsoort, bodembeheer of landgebruik beschikbaar. De streefwaarde voor de koolstofvastlegging kan worden vastgesteld op basis van een maximaal haalbare koolstofvoorraad in de bodem. Deze moet nog worden vastgesteld per bodemtype en evt. landgebruik op basis van modellen of grote datasets. Daarbij moet ook bepaald worden welke afwijking van de maximale koolstofvoorraad als goed bestempeld wordt. Dit is meer een beleidsmatige vraag dan een wetenschappelijke. Wetenschappelijk kan deze eventueel afgeleid worden uit de beleidsmatige opgave voor koolstofvastlegging in minerale gronden van 0.5 Mton/jaar (vanaf 2030) uit het klimaatakkoord.

Tabel 5.1 Bodemfuncties, bodemeigenschappen, streefwaarde en meetmethodes ten behoeve van de ecosystemedienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie.

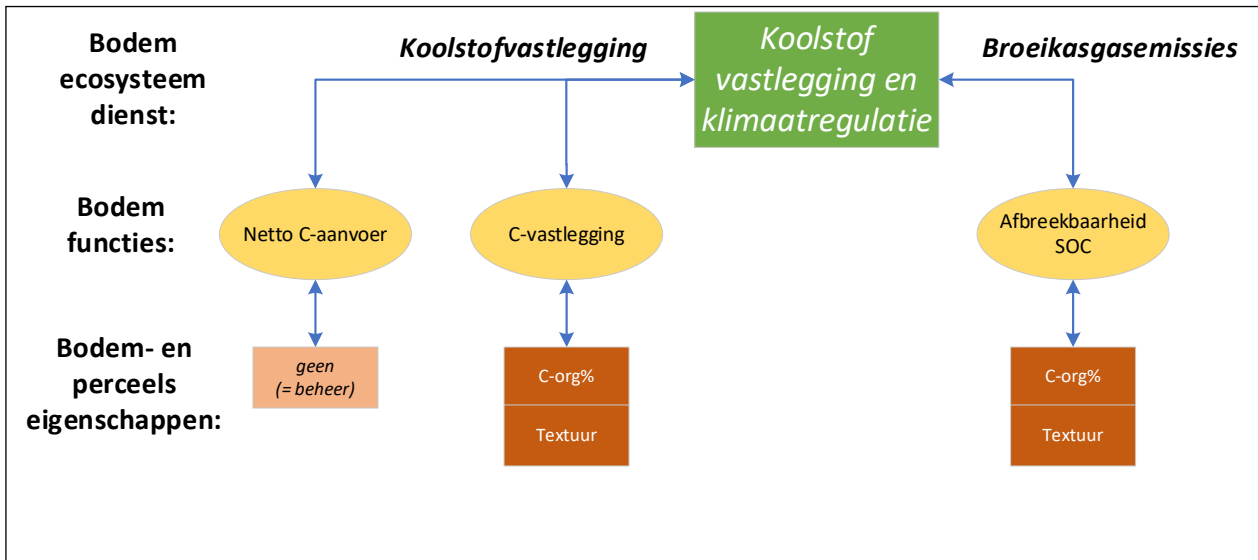
Bodemfuncties~	Bodem-eigenschappen*	Meetmethode	Kosten-indicatie	Streefwaarde, drempelwaarde, referentiewaarde^	Differentiatie\$	BLN-OBI	Bronnen		
<i>Koolstofvastlegging</i>									
FK32	Netto koolstofaanvoer	Geen	EOS-balans	Gemiddeld	SM	Koolstofbalans > 0	-	OBI	CBAV, 2022
FK33	Koolstofvastlegging	C-org%, textuur	NIRS	Laag	SM	Af te leiden aan de hand van modelberekeningen of datasets	Grondsoort, landgebruik, Gt		Lesschen et al., 2020; Ros et al., 2022
<i>Broeikasgasemissies</i>									
FI34	Afbreekbaarheid SOC	C-org%, textuur	NIRS	Laag	R	Af te leiden van landelijke datasets	Grondsoort, landgebruik	-	

~ FK = kern bodemfunctie, FO = optionele bodemfunctie, FI = bodemfunctie in ontwikkeling

• = lage kosten, •• = gemiddelde kosten, ••• = hoge kosten

^ 1^e letter: S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde, 2^e letter: waarde gebaseerd op E = empirisch onderzoek, M = modelmatig onderzoek, X = expertkennis, S = statistische technieken, W = wet- en regelgeving

\$ landgebruik omvat de categorieën akkerbouw (inclusief vollegrondsgroente), grasland, mais en natuur. De grondsoort omvat de categorieën: dekzand, duinzand, rivierklei, zeeklei, veen, moerige klei, dalgronden en lössgronden



Figuur 5.1 Visuele weergave van bodemfuncties en bijbehorende bodemeigenschappen van de ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie, zoals gegeven in Tabel 5.1

5.2 Bodemfuncties voor broeikasgasemissies

Belang van bodemkwaliteit voor broeikasgasemissies

Bij broeikasgasemissies gaat het om de emissies van CO₂ (kooldioxide), CH₄ (methaan) en N₂O (lachgas). Emissies van CO₂ speelt vooral op veengronden. Door hogere peilen en grondwaterstanden is het mogelijk om de koolstofafbraak van veengronden te verlagen. Echter de focus van de BLN 2.0 ontwikkeling ligt op minerale gronden en daarom wordt CO₂-emissie van veengronden op dit moment niet meegenomen. Methaanemissies uit minerale landbouwgronden in Nederland spelen een geringe rol, omdat er bijna altijd zuurstof aanwezig is. Zuurstof remt de vorming van methaan. De beoordeling van broeikasgasemissies uit de bodem richt zich daarom verder alleen op lachgasemissies. Lachgasemissies zijn verantwoordelijk voor 30-50% van de broeikasgasemissies op bedrijfsniveau (Bos et al. 2007). Lachgasemissies komen voor een groot deel vrij bij bodemprocessen waarin nitraat wordt omgezet in lachgas en/of stikstofgas (denitrificatie). In dit denitrificatieproces is organische stof nodig (als energiebron voor de denitrificerende bacteriën). Lachgas kan ook vrijkomen bij nitrificatie, de omzetting van ammonium naar nitraat. Hiervoor is zuurstof nodig. Biologische processen zoals nitrificatie en denitrificatie worden geremd bij verzuring van de bodem. Verzuring leidt daarom tot een afname van lachgasemissie (Slier & Velthof, 2021). De volgende bodemeigenschappen zijn dus voor lachgasemissies relevant:

- Het organisch stofgehalte en het stikstofgehalte
- Bodemfysische kwaliteit (bodemstructuur) voor wat betreft het zuurstofgehalte in de bodem
- De zuurgraad van de bodem (pH)

Daarnaast is ook landgebruik van belang. Bijvoorbeeld zit in grasland veel makkelijk afbreekbaar koolstof en daardoor is de denitrificatiecapaciteit van grasland hoger dan bouwland.

Beschikbare Bodemfuncties in de BLN, de Open Bodemindex of andere tools

In BLN 1.0 en de Open Bodemindex zijn geen bodemfuncties beschikbaar voor het kwantificeren van lachgasverliezen. Lachgasemissies uit de bodem zijn zeer variabel in de tijd en afhankelijk ook van het weer en het management van de boer. Ook het zuurstofgehalte en temperatuur zijn van invloed. De bodemfuncties voor lachgasemissie richten zich op de invloed van de bodem op de langere termijn en daarmee meer op het beperken van risico's op lachgasemissie vanuit de bodem. De belangrijkste bodemeigenschappen op de lange termijn zijn organische stof en zuurgraad (pH). Organische stof in de bodem is de energiebron voor denitrificerende bacteriën. Hoe gemakkelijker de organische stof is af te breken, hoe gemakkelijker de denitrificerende bacteriën er energie uithalen voor de omzetting van nitraat. Beschikbaarheid van makkelijk afbreekbare organische stof is een belangrijke randvoorwaarde voor risico op lachgasemissies. Afbreekbaarheid van organische stof kan vrij direct gemeten worden via respirometingen of potentiële denitrificatie of wat

meer indirect vanuit DOC of HWC. DOC en HWC worden beiden niet routinematig gemeten, maar kunnen op basis van organisch stofgehalte en textuurgegevens geschat worden om verschillen tussen percelen te duiden (Ros, 2011).

De precieze rol van de zuurgraad in het proces van lachgasproductie is nog onduidelijk. Internationaal zijn er ook veel studies die lachgasreductie meten bij stijging van pH (bijv. Hénault et al., 2019). Daarom is zuurgraad niet geschikt als bodemfunctie voor inschatting van lachgasemissies.

Selectie van bodemfuncties voor BLN 2.0

In tabel 5.1 is alleen afbreekbaar koolstof als bodemfunctie opgenomen met als bijbehorende indicator DOC te bepalen uit de bodemeigenschappen. We stellen voor om deze bodemfunctie als in ontwikkeling mee te nemen vanwege de grote rol van bemesting (deze rol is groter dan de invloed van de bodem) als ook de grote invloed van dag-tot-dag variatie die de lachgasverliezen sturen als ook de afbreekbaarheid van de aanwezige koolstof. Dit maakt deze bodemfunctie vooralsnog lastig om op te nemen als een kernbodemfunctie.

Selectie van bodemeigenschappen

Voor deze bodemfunctie is inzicht nodig in het gehalte aan totaal en afbreekbaar koolstof. Beide kunnen gemeten worden via klassieke methoden. Totaal koolstof kan ook gemeten worden met NIRS. Afbreekbaar koolstof kan op basis van organisch stofgehalte en textuur worden geschat (beide te meten met NIRS).

Beschikbaarheid van streefwaarden

Er zijn nog geen streefwaarden beschikbaar voor deze bodemfunctie.

6 Ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening

Belang van bodemkwaliteit voor biodiversiteit en habitatvoorziening

Deze ecosysteemdienst betreft de bodem als drager voor het landschap en het habitat voor soorten (Faber et al., 2022), waarbij het niet alleen gaat om ondergrondse maar ook de bovengrondse biodiversiteit. In Landmark wordt deze ecosysteemdienst als volgt gedefinieerd: “*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*” (Van Leeuwen et al., 2019). Deze ecosysteemdienst is echter ook een moeilijk te waarderen dienst omdat de functionele betekenis van biodiversiteit niet altijd duidelijk is. Biodiversiteit wordt in dat opzicht wel ingedeeld naar ‘functionele biodiversiteit’ (die aspecten waarvan de betekenis enigszins bekend is) en ‘structurele biodiversiteit’ (wanneer onbekend).

Beschikbare bodemfuncties in de BLN, de Open Bodemindex of andere studies

In BLN 1.0 en de Open Bodemindex zijn geen bodemfuncties beschikbaar voor bodembiodiversiteit en habitatvoorziening.

Biodiversiteit wordt klassiek gedefinieerd als de graad van verscheidenheid aan levensvormen (soorten en genen) binnen een gegeven ecosysteem of ander begrensd systeem (Rutgers et al., 2014). Er bestaat geen unieke en universeel toepasbare maat voor de biodiversiteit, en de te meten bodemeigenschappen zijn contextafhankelijk. In vergelijking met de beoordeling van andere ecosysteemdienst is het beoordelen van bodembiodiversiteit en habitatvoorziening lastig. De functionele kant van bodembiodiversiteit voor primaire productie is met name besproken in paragraaf 3.3 ‘Biologische bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie’. Het bodemvoedselweb is complex en we begrijpen de werking daarvan nog maar voor een klein deel, laat staan dat we begrijpen wat de bijdrage is van bodembiodiversiteit aan allerlei maatschappelijke diensten. Daarnaast zijn meettechnieken nog sterk in ontwikkeling en zijn er nog weinig praktisch toepasbare routinematige metingen. Er is op dit thema de laatste jaren al wel veel vooruitgang geboekt, maar deze is nog onvoldoende voor een uitgewerkte set aan bodemfuncties met streefwaarden en routinematige bodemmetingen.

Om de beoordeling van bodembiodiversiteit te vereenvoudigen wordt vaak gebruik gemaakt van proxies (waarbij aantallen en soortenrijkdom van verschillende trofische groepen worden genormaliseerd en gesommeerd tot één proxy-score). De complexiteit hangt ook samen met de onderliggende vraag in welke mate bodembioïologie volgend dan wel sturend is op de abiotische matrix en het landgebruik. Uit onderzoek voor de BoBi (Rutgers et al., 2014) blijkt wel dat veel ecosysteemdiensten gekoppeld kunnen worden aan biologische bodemeigenschappen, maar de wetenschappelijke basis hieronder is amper uitgewerkt.

Selectie van bodemfuncties BLN 2.0

In tegenstelling tot andere bodemfuncties is hier de aanwezigheid van verschillende soorten de drager van de ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening. Deze diversiteit is afhankelijk van allerlei bodemeigenschappen als ook managementmaatregelen, maar de onderliggende relaties zijn onduidelijk. Anno 2023 zijn er diverse biologische metingen die een “bewezen” waarde hebben voor het in beeld brengen van de kwaliteit van de bodem vanuit het oogpunt van bodembiodiversiteit waarbij algemeen wordt aangenomen dat bodems met een grote variatie te waarderen zijn boven bodems met een kleine variatie. Het gaat hierbij om:

- Schimmel en bacterie biomassa en de onderlinge verhouding hiertussen (PLFA)
- Aantallen en diversiteit van de aaltjesgemeenschap (milieuaaltjes)
- Aantallen en diversiteit van de regenwormen
- Diversiteit van soorten qua gewasdiversiteit in tijd en ruimte

De bovenste 3 bodemeigenschappen zijn ook opgenomen in de eerdere versies van de BLN (1.0 en 1.1).

In tabel 6.1 is een overzicht van de bodemfuncties voor de ecosysteemdienst biodiversiteit en habitatvoorziening opgenomen met de bijbehorende bodemeigenschappen die gemeten dienen te worden met meetmethode en kostenindicatie. Per bodemfunctie wordt aangegeven of er een streefwaarde beschikbaar is, waar deze op gebaseerd is, en in welke mate deze streefwaarde rekening houdt met grondsoort en landgebruik als ook een referentie naar de onderliggende studies waarin de afleiding is beschreven of vermeld. Wanneer geen streefwaarde beschikbaar is, wordt aangegeven of een drempelwaarde of referentiewaarde beschikbaar is. Behalve de bodemfunctie PMN, die ook voor de ecosysteemdienst primaire productie gebruikt wordt, zijn alle bodemeigenschappen vooralsnog in ontwikkeling. Een beoordeling op deze ecosysteemdienst is pas mogelijk als van beide bodemfuncties tenminste de helft van de bodemeigenschappen gemeten is.

Selectie van bodemeigenschappen

Kijkend naar bestaande bodemeigenschappen wordt de kwaliteit van organische stof in bodembiologisch onderzoek steeds meer als een sleutelfactor voor de bodemkwaliteit beschouwd. Eigenschappen van de organische stof die relevant kunnen zijn voor de ecosysteemdienst bodembiodiversiteit zijn:

- Potentieel mineraliseerbare stikstof (PMN), als indicatie van microbiële activiteit
- Afbreekbare fractie van organische stof (HWC = hot water extractable carbon)

De PMN is opgenomen in de BLN 1.1 en Open Bodemindex en in de BLN 2.0 als onderdeel van de biologische bodemkwaliteit voor de ecosysteemdienst primaire productie (zie paragraaf 3.3).

Beschikbaarheid van streefwaarden

Voor alle beschikbare bodemfuncties zijn geen specifieke streefwaarden of drempelwaarden bekend.

Tabel 6.1 Bodemfuncties met hun bijbehorende bodemeigenschappen streefwaarde en meetmethodes ten behoeve van de ecosystemedienst biodiversiteit en habitatvoorziening

Geaggregeerde bodemfunctie	Bodemfunctie ~	Bodem-eigenschappen *	Meet-methode	Kosten-indicatie	Streefwaarde, drempelwaarde, referentiewaarde^	Differentiatie\$	BLN/OBI	Bronnen
Habitat bodemleven	FK21	Potentieel mineraliseerbare stikstof	Potentieel mineraliseerbare stikstof	NIRS	Laag	RE 40 mg N kg ⁻¹ op basis van veel voorkomende PMN	Landgebruik, grondsoort	BLN-OBI Van Schöll et al., 2019; Moebius-Clune et al., 2016
Habitat bodemleven	FI35	Hot Water Carbon	Hot Water Carbon	HWC	Gemiddeld	RE CC-NL	Landgebruik, grondsoort	BLN Van den Elsen et al. 2020
Biodiversiteit	FI36	Aaltjesdiversiteit	Aaltjesdiversiteit	Microscopie/PCR	Hoog/gemiddeld	RE	Landgebruik, grondsoort	BLN Rutgers et al., 2007
Biodiversiteit	FI37	Bacteriële biomassa	Bacteriële biomassa	PLFA	Hoog/gemiddeld	RE	Landgebruik, grondsoort	BLN Rutgers et al., 2007
Biodiversiteit	FI38	Schimmelbiomassa	Schimmelbiomassa	PLFA	Hoog/gemiddeld	RE	Landgebruik, grondsoort	BLN -
Biodiversiteit	FI39	Regenwormen	Regenwormen	Mosterd extractie	Hoog	RE	Landgebruik, grondsoort	BLN Rutgers et al., 2007

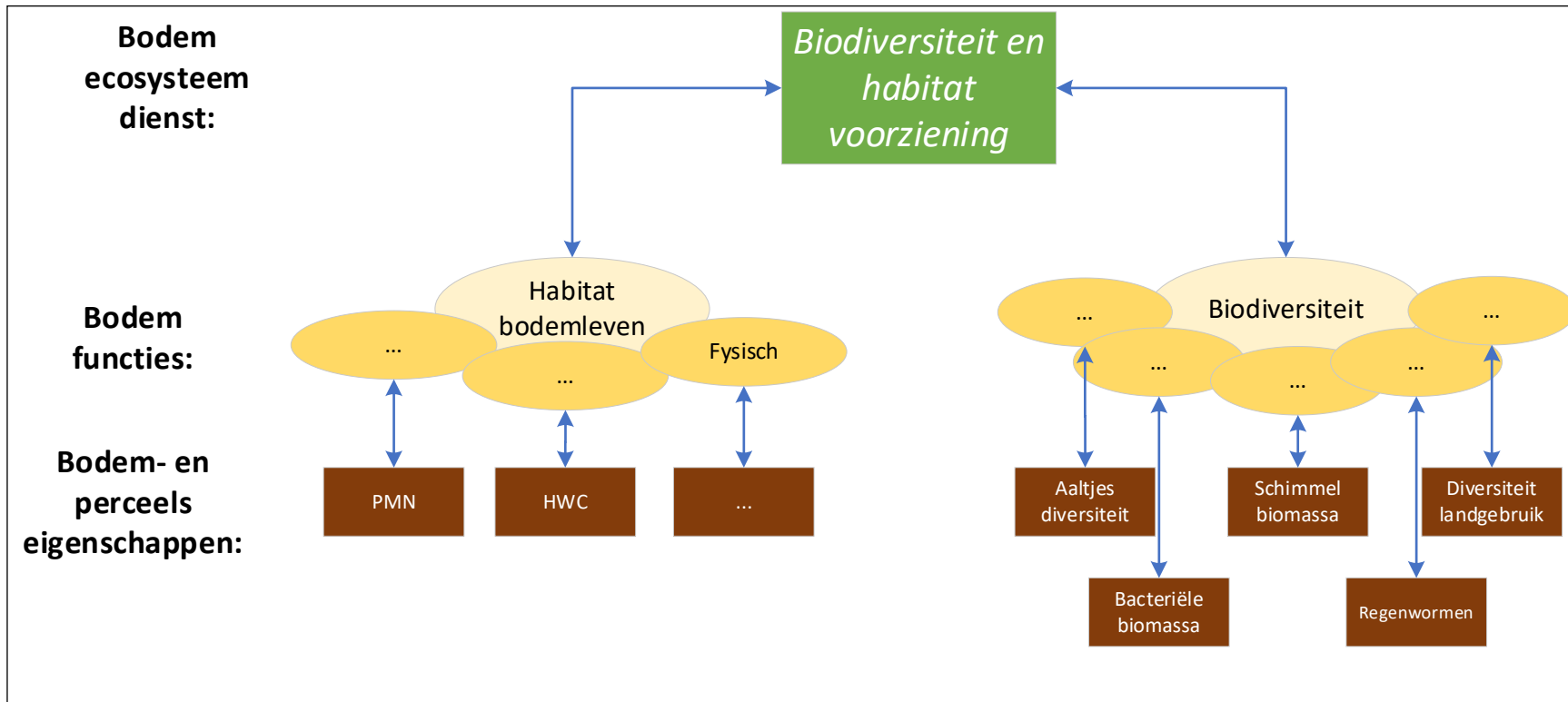
~ FK = kern bodemfunctie, FO = optionele bodemfunctie, FI = bodemfunctie in ontwikkeling

^ S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde

* Aaltjes verwijst naar de aantallen en diversiteit van voorkomende nematoden, de plantparasitaire aaltjes naar de aantallen en diversiteit van plant parasitaire aaltjes, en ook regenwormen verwijst naar metingen van aantallen en diversiteit van regenwormen.

^ 1^e letter: S = streefwaarde, D = drempelwaarde, R = referentiewaarde, 2^e letter: waarde gebaseerd op E = empirisch onderzoek, M = modelmatig onderzoek, X = expertkennis, S = statistische technieken, W = wet- en regelgeving

\$ landgebruik omvat de categorieën akkerbouw (inclusief vollegrondsgroente), grasland, mais en natuur. De grondsoort omvat de categorieën: dekzand, duinzand, rivierklei, zeeklei, veen, moerige klei, dalgronden en lössgronde



Figuur 6.1 Visuele weergave van bodemfuncties en bijbehorende bodemeigenschappen van de ecosystemedienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening, zoals gegeven in Tabel 6.1

7 Ecosysteemdienst faciliteren van de nutriëntenkringloop

Belang van bodemkwaliteit voor faciliteren van de nutriëntenkringloop

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. Recent voerde Del Castilho (2019) daarom een pleidooi voor volledige recycling van humane en landschappelijke reststromen. In zijn visie blijft hiermee de bodemkwaliteit op orde en komt de gewasproductie niet in gevaar. De Mansholtlezing van prof. de Boer (De Boer & Van Ittersum, 2018) vult dit perspectief aan met een landschappelijk element waarbij zowel gewaskeuze als landbouwtype volgend is op de kwaliteit van de bodem. Beide aspecten hebben richting gegeven aan de invulling van de landbouwvisie van minister Schouten evenals de Europese groeistrategie om de landbouw om te vormen tot een sector waarbij het natuurlijk kapitaal wordt beschermd, behouden en verbeterd.

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 bemesting het meest efficiënt is: op percelen die zelf heel veel nutriënten leveren, is de benutting van mest relatief laag.

Beschikbare bodemfuncties in de BLN, de Open Bodemindex en andere tools

Zowel de BLN 1.0 als de Open Bodemindex hebben geen beoordeling van de nutriëntenbenutting. Met andere woorden: bodems met extreem hoge nutriëntenconcentraties worden positief gewaardeerd. In relatie tot de ecosysteemdienst primaire productie is deze beoordeling correct, met uitzondering van bodemtoestanden waarbij het gehalte toxisch wordt voor gewasgroei. Deze situaties komen in Nederland echter niet voor. In relatie tot de ecosysteemdienst van het sluiten van kringlopen is een hoge benutting van gegeven bemesting cruciaal, en de bodem speelt daarin een sleutelrol. Klassiek wordt hierbij in de agronomie gebruik gemaakt van de Apparent N recovery voor stikstof, een maat die aangeeft welk deel van de gegeven stikstof ook daadwerkelijk wordt opgenomen door het gewas. Een ANR rond 80% is hoog, zeker voor landbouwsystemen met een netto neerslagoverschot.

Aansluitend op de *build-up and maintenance approach* kan voor de andere macronutriënten ook aangegeven worden wanneer een situatie van uitmijning gewenst is om daarmee de concentraties aan nutriënten te verlagen tot een gehalte waarbij gewassen goed kunnen groeien.

Selectie van bodemfuncties BLN 2.0

Voor de ecosysteemdienst faciliteren van de nutriëntenkringloop zijn de relevante bodemfuncties gelijk aan de chemische bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie. Het gaat hierbij om de bodemfuncties N-leverend vermogen, P-buffering, K-buffering, Mg-buffering, S-leverend vermogen, Zn-levering en Cu-levering. Ook de bodemfunctie zuurgraad is van belang omdat deze de beschikbaarheid van nutriënten beïnvloedt en de kationenbuffering voor binding van nutriënten aan het kleihumuscomplex.

Selectie van bodemeigenschappen

De benodigde bodemeigenschappen zijn al eerder beschreven in tabel 3.1.

Beschikbaarheid van streefwaarden

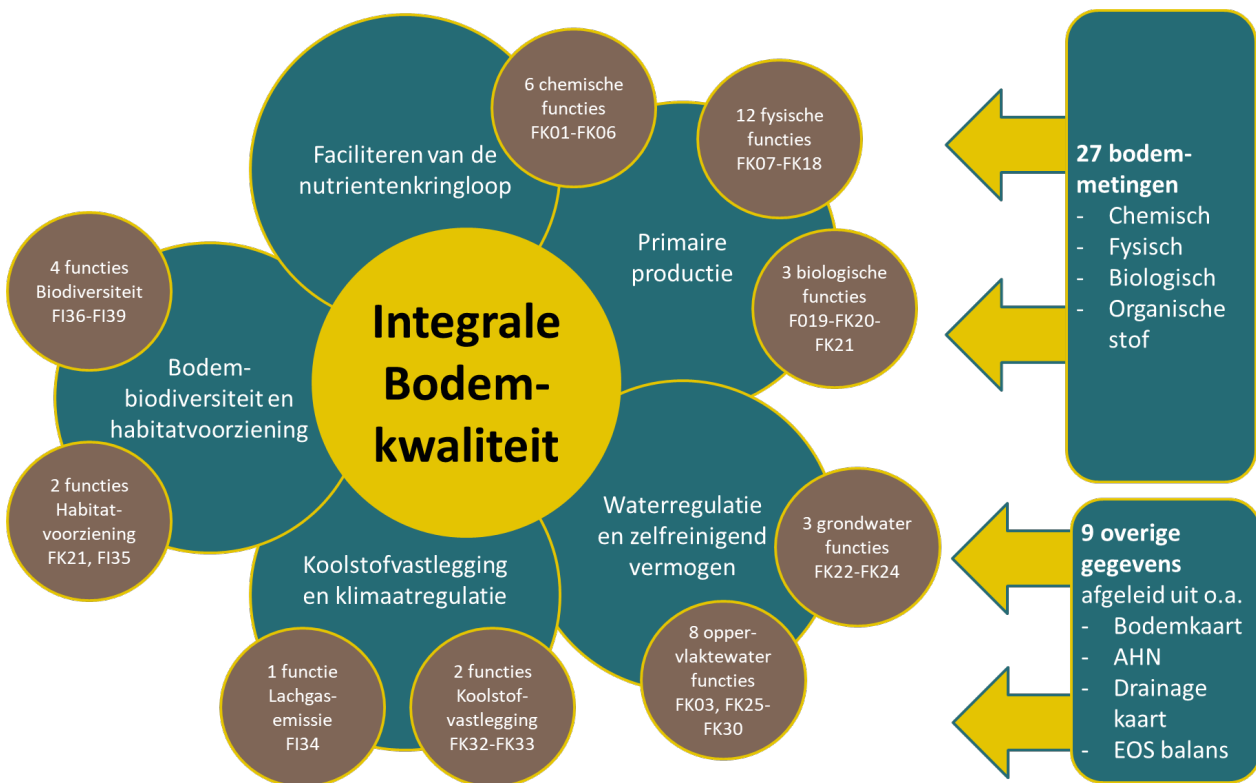
De streefwaarden voor beoordeling van de bodemfuncties voor de ecosysteemdienst faciliteren van de nutriëntenkringloop zijn voor de ondergrens gelijk aan de streefwaarden voor primaire productie. Dit correspondeert met de landbouwkundige beoordelingsklasse voldoende tot goed. Hogere concentraties dan

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.

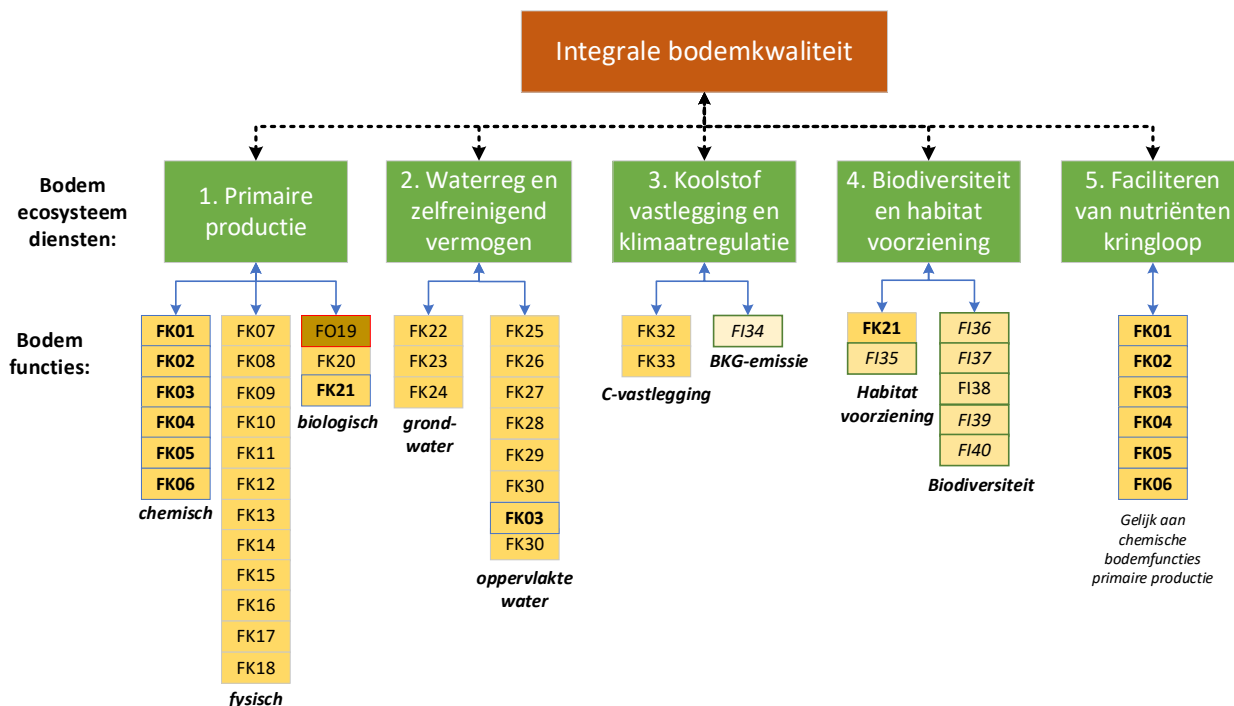
8 Overzichten ecosysteemdiensten, bodemfuncties en bodemeigenschappen in de BLN 2.0

In dit hoofdstuk zijn een aantal overzichtsfiguren en -tabellen opgenomen om meer inzicht te geven in de totale opbouw van de BLN 2.0.

In Figuur 8.1 is een globaal overzicht van de BLN 2.0 weergegeven. Figuur 8.2 specificeert dit nog wat meer. Figuur 8.3 geeft aan per ecosysteemdienst welke bodemfuncties zijn overgenomen uit de BLN 1.1 of de Open Bodemindex, het aantal nieuwe bodemfuncties en de aantallen optionele functies en functies in ontwikkeling. Tabel 8.1 geeft een overzicht van de bodemfuncties met koppeling aan de ecosysteemdienst, hoe de streefwaarde, drempelwaarde of referentiewaarde is afgeleid, of deze al in de BLN of OBI voorkwam en of er al een factsheet van beschikbaar is. Tabel 8.2 geeft een overzicht van de bodemmetingen die uitgevoerd moeten worden voor bepaling van de BLN 2.0, bij welke bodemfunctie(s) de meting hoort, wat de meetmethode is, een kostenindicatie en of de meting al onderdeel was van de BLN 1.1 of de Open Bodemindex. Tabel 8.3 geeft een overzicht van de overige gegevens die de BLN 2.0 gebruikt om de bodemkwaliteit te beoordelen.



Figuur 8.1 Overzicht van de BLN 2.0: In het midden in geel het totaalresultaat, de integrale beoordeling van bodemkwaliteit, daarom heen in blauw de 5 ecosysteemdiensten waarop de bodemkwaliteit wordt beoordeeld. In bruin de bodemfuncties per ecosysteemdienst met de codes van de indicatoren. Zie voor betekenis van de codes het overzicht tabel 8.1 en de tabellen in hoofdstukken 3-7.



Figuur 8.2 Overzicht van de bodemfuncties per ecosystemedienst. De vetgedrukte en blauw omrande bodemfuncties zijn voor meerdere ecosystemediensten relevant. De optionele bodemfuncties (FO) zijn rood omrand en donkergeel. De bodemfuncties in ontwikkeling zijn groen omrand en lichter van kleur.

	Primaire productie	Waterregulatie & zelfreinigend vermogen	Koolstofvastlegging en klimaatregulatie	Biodiversiteit en habitatvoorziening	Faciliteren nutriëntenkringloop
Aantal bodemfuncties in de BLN 2.0	6 chemische functies 12 fysische functies 3 biologische functies	3 functies grondwater 8 functies oppervlaktewater	2 functies koolstofvastlegging 1 functie broeikasgasemissies	7 functies	6 functies
Bodemfuncties in de BLN 2.0 uit de BLN 1.1 of de Open Bodem Index	6 chemische functies 12 fysische functies 3 biologische functies	1 functie grondwater 2 functie oppervlaktewater	1 functie koolstofvastlegging	6 functies	6 functies
Nieuwe bodemfuncties in de BLN 2.0	-	2 functies grondwater 6 functies oppervlaktewater	1 functie koolstofvastlegging 1 functie broeikasgasemissies	1 functie	-
Optionele bodemfuncties in de BLN 2.0	1 biologische functie	-	-	-	-
Bodemfuncties in ontwikkeling in de BLN 2.0	-	-	1 functie broeikasgasemissies	6 functies	-

Figuur 8.3 Overzicht van aantallen bodemfuncties, aantallen bodemfuncties uit de BLN 1.1 en de Open Bodemindex, aantallen nieuwe kernbodemfuncties en aantallen optionele bodemfuncties en bodemfuncties in ontwikkeling voor de vijf ecosystemediensten

Tabel 8.1 Overzicht van de bodemfuncties in de BLN 2.0

Nr#	Bodemfunctie	Bodemecosysteemdienst	Streef- drempel- referentiewaarde	BLN/OBI	Fact-sheet [§]
FK01	Buffering zuurgraad	1) Primaire productie, 5) Faciliteren nutriëntenkringloop	Streefwaarde Empirisch	BLN-OBI	X
FK02	Stikstofleverend vermogen	1) Primaire productie, 5) Faciliteren nutriëntenkringloop	Referentiewaarde Empirisch	BLN-OBI	X
FK03	Fosfaatbuffering	1) Primaire productie, 2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen 5) Faciliteren nutriëntenkringloop	Streefwaarde Empirisch Streefwaarde Expertkennis	BLN-OBI	X
FK04	Kaliumbuffering	1) Primaire productie, 5) Faciliteren nutriëntenkringloop	Streefwaarde Empirisch	BLN-OBI	X
FK05	Magnesiumbuffering	1) Primaire productie, 5) Faciliteren nutriëntenkringloop	Streefwaarde Empirisch	OBI	X
FK06	Zwavelleverend vermogen	1) Primaire productie, 5) Faciliteren nutriëntenkringloop	Referentiewaarde Empirisch	OBI	X
FK07	Watervasthoudend vermogen	1) Primaire productie	Drempelwaarde Expertkennis	BLN-OBI	X
FK08	Waterbuffering	1) Primaire productie	Drempelwaarde Expertkennis	OBI	X
FK09	Droogte en natschade	1) Primaire productie	Drempelwaarde Modelberekening	OBI	X
FK10	CEC-bezetting (%)	1) Primaire productie	Drempelwaarde Literatuur	BLN-OBI	X
FK11	Verkruimelbaarheid	1) Primaire productie	Drempelwaarde Empirisch	OBI	X
FK12	Stuifgevoeligheid	1) Primaire productie	Drempelwaarde Empirisch	OBI	X
FK13	Bewerkbaarheid	1) Primaire productie	Drempelwaarde Empirisch	OBI	X
FK14	Droge bulkdichtheid	1) Primaire productie	Referentiewaarde Empirisch	BLN-OBI	X
FK15	Bewortelbaarheid	1) Primaire productie	Drempelwaarde Empirisch	BLN-OBI	X
FK16	Indringingsweerstand	1) Primaire productie	Streefwaarde Literatuur	BLN	
FK17	Verdichtingsrisico	1) Primaire productie	Drempelwaarde Modelberekening	OBI	X
FK18	Verslemping	1) Primaire productie	Drempelwaarde Empirisch	OBI	X
FO19	Plantparasitaire aaltjes	1) Primaire productie	Streefwaarde Empirisch	BLN-OBI	X
FK20	Ziektewerendheid	1) Primaire productie	Drempelwaarde Empirisch	OBI	X
FK21	Potentieel mineraliseerbare stikstof	1) Primaire productie 4) Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	Referentiewaarde Empirisch	BLN-OBI	X
FK22	Nitraatuitspoeling	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Wetgeving	OBI	X
FK23	Grondwateraanvulling	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Expertkennis	OBI	X
FK24	Uitspoeling	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Modelberekening		
FK25	Afspoelingsrisico o.b.v. morfologie	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Expertkennis		
FK26	Afspoelingsrisico o.b.v. omtrek	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Expertkennis		
FK27	Afspoelingsrisico o.b.v. helling	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Modelberekening		
FK28	Afspoelingsrisico o.b.v. natheid perceel	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Modelberekening		
FK29	Afspoelingsrisico o.b.v. verdichting	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Modelberekening		

Nr [#]	Bodemfunctie	Bodemecosysteemdienst	Streef- drempel- referentiewaarde	BLN/OBI	Fact-sheet [§]
FK30	Capaciteit om P te binden	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Modelberekening		
FK31	Stikstofafspoelingsrisico	2) Waterregulatie en zelfreinigend vermogen	Streefwaarde Modelberekening		
FK32	Netto koolstofaanvoer	3) Koolstofvastlegging en klimaatregulatie	Streefwaarde Modelberekening	OBI	X
FK33	Koolstofvastlegging	3) Koolstofvastlegging en klimaatregulatie	Streefwaarde Modelberekening	BLN-OBI	X
FI34	Afbreekbaarheid bodemkoolstof	3) Koolstofvastlegging en klimaatregulatie	Referentiewaarde Empirisch		
FI35	Hot Water Carbon	4) Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	Referentiewaarde Empirisch	BLN	
FI36	Aaltjesdiversiteit	4) Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	Referentiewaarde Empirisch	BLN	
FI37	Bacteriële biomassa	4) Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	Referentiewaarde Empirisch	BLN	
FI38	Schimmelbiomassa	4) Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	Referentiewaarde Empirisch	BLN	
FI39	Regenwormen	4) Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening	Referentiewaarde Empirisch	BLN	

[#] Nummering functies: 2^e letter geeft kernbodemfunctie (K) of optionele bodemfunctie (O) aan

[§] X geeft aan of er een factsheet beschikbaar is op <https://www.openbodemindex.nl/documentatie/>

Tabel 8.2 Overzicht van de te meten bodemeigenschappen in de BLN 2.0

Nr.	Bodemeigenschap	Bodemfunctie	Meetmethode	Kosten-indicatie	BLN/OBI
E01	Zuurgraad (pH)	FK01, FK05	NIRS	▪	BLN-OBI
E02	Organisch stofpercentage (OS%)/ Organisch koolstofpercentage (C-org)	FK01, FK02, FK05, FK06, FK07, FK08, FK11, FK14, FK18, FK20, FK23, FK24, FK33, FI34	NIRS	▪	BLN-OBI
E03	Stikstofvoorraad (N-totaal)	FK02, FK22	NIRS	▪	BLN-OBI
E04	C/N-verhouding	FK02	Berekend	▪	OBI
E05	Direct beschikbare fosfaatvoorraad (P-CaCl ₂)	FK03	PAE – CaCl ₂	▪	BLN-OBI
E06	Fosfaatvoorraad (P-Al)	FK03	NIRS	▪	BLN-OBI
E07	Direct beschikbare kalivoorraad (K-CaCl ₂)	FK04	PAE – CaCl ₂	▪	BLN-OBI
E09	Kalibezetting CEC-complex (K-CEC)	FK04, FK10	NIRS	▪	BLN-OBI
E09	Direct beschikbare magnesiumvoorraad (Mg-CaCl ₂)	FK05	PAE – CaCl ₂	▪	OBI
E10	Magnesiumbezetting CEC-complex (Mg-CEC)	FK10	NIRS	▪	OBI
E11	Zwavelvoorraad (S-totaal)	FK06	NIRS	▪	OBI
E12	Calciumbezetting CEC-complex (Ca-CEC)	FK10	NIRS	▪	OBI
E13	Omvang kationomwisselcapaciteit (CEC)	FK05	NIRS	▪	OBI
E14	Textuur inclusief lutum, silt klei percentage (lutum%, silt%, zand%)	FK05, FK06, FK07, FK08, FK09, FK11, FK12, FK13, FK14, FK23, FK24, FK33, FI34	NIRS	▪	BLN-OBI
E15	Watervasthoudendvermogen (WHC)	FK07, FK23	Vloeigrens	▪	
E16	Visuele beoordeling	FK15	Visueel	▪▪	BLN-OBI
E17	Indringingsweerstand	FK16	Penetrometer	▪▪	BLN
E18	Plantparasitaire aaltjes aantallen per soort	FO19	Microscopie, PCR	▪▪	BLN-OBI
E19	Potentieel mineraliseerbare stikstof	FK21, FK31	NIRS	▪	BLN-OBI
E20	Aluminium-oxalaat (Al-ox)	FK30	NIRS	▪	
E21	IJzer-oxalaat (Fe-ox)	FK30	NIRS	▪	
E22	Fosfaat-oxalaat (P-ox)	FK30	NIRS	▪	
E23	Hot Water Carbon (HWC)	FI35	Hot Water Carbon	▪▪	BLN
E24	Aaltjesdiversiteit	FI36	Microscopie/PCR	▪▪▪/▪▪	BLN
E25	Bacteriële biomassa	FI37	Microscopie/PLFA	▪▪▪/▪▪	BLN
E26	Schimmelbiomassa	FI38	Microscopie/PLFA	▪▪▪/▪▪	BLN
E27	Regenwormen	FI39	Mosterd extractie	▪▪▪	BLN

Tabel 8.3 Overige gebruikte gegevens in de BLN 2.0

Nr.	Gegeven	Bodemfunctie	Bron	BLN-OBI
G1	Verdichtingsrisico	FK17, FK24, FK29	Kaart o.b.v. modelberekening, Van den Akker et al., 2012	OBI
G2	Uitspoelingsrisico	FK22	Afgeleid van 1:50.000 bodemkaart en berekening STONE	OBI
G3	Grondwatertrap	FK22, FK28	1:50.000 bodemkaart	OBI
G4	Morfologie	FK25	AHN en geometrie perceel	
G5	Natte omtrek	FK26	AHN en geometrie perceel	
G6	Hellingspercentage	FK27	AHN	
G7	Neerslagoverschot	FK23, FK24	KNMI	
G8	Drainage	FK23	Landelijke kaart buisdrainage (Massop & Schuiling, 2016).	
G9	Effectieve organische stofbalans (EOS-balans)	FK31	Aanvoer organische stof met mest, gewasresten, groenbemesters. OS-balans.nl, HBB	OBI

9 Discussie, reflectie en vooruitblik

9.1 Framework van de BLN 2.0

9.1.1 De aanleiding

De BLN is in 2020 ontwikkeld om richting te geven aan duurzaam bodembeheer. In dit rapport wordt duurzaam Bodembeheer 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)”*. In het kader van de huidige studie beperkt deze definitie zich tot landbouwgronden.

Voortbouwend op de laatste wetenschappelijke ontwikkelingen rondom het meten én beoordelen van de bodemkwaliteit is in dit rapport een integraal raamwerk opgezet om voor elke bodem in Nederland de kwaliteit te beoordelen in het licht van de volgende vijf ecosysteemdiensten (ESD, zie sectie 2):

1. Primaire productie (van landbouwgewassen);
2. Waterregulatie en zelfreinigend vermogen;
3. Koolstofvastlegging en klimaatregulatie;
4. Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening;
5. Faciliteren van de nutriëntenkringloop.

Om de bodemkwaliteit te meten én te beoordelen in licht van deze vijf ESD zijn de beschikbare bodemfuncties geïdentificeerd en geselecteerd, evenals de benodigde bodemeigenschappen om deze functies te berekenen en de streefwaarden om deze functies te evalueren.

De BLN is inzetbaar voor elke grondsoort en alle gewassen in Nederland, waarbij er een sterke focus ligt op akkerbouw en vollegrondsgroente op mineralen bodems. Het laat zien wat er gemeten moet worden om een integrale beoordeling te geven van de kwaliteit van de landbouwbodems en geeft aan hoe verschillende bodemfuncties berekend en geëvalueerd kunnen worden in het licht van een gewenste situatie voor zowel landbouw als omgevingskwaliteit.

9.1.2 Het BLN 2.0 framework

In de wetenschappelijke literatuur zijn er verschillende benaderingen om de kwaliteit van een landbouwbodem en het bodembeheer op een integrale manier te beoordelen. Om een zinnige uitspraak te kunnen doen over de kwaliteit en gezondheid van de bodem zijn allereerst metingen en waarnemingen cruciaal, hierna bodemeigenschappen genoemd. Elk bodemeigenschap moet daarna worden geïnterpreteerd in het licht van een gewenste situatie. Voor de vertaling van een bodemeigenschap naar een kwaliteitsbeoordeling spelen bodemfuncties een sleutelrol. Bodemfuncties geven kwantitatief inzicht in de bijdrage van een bodem aan een dienst, zoals het water leverend vermogen, indringingsweerstand van wortels, ziekteweerbaarheid, en nutriëntenbeschikbaarheid, en worden afgeleid van één of meerdere bodemeigenschappen. Om te bepalen in hoeverre bodemfuncties behaald worden, worden per functie zogenoemde streefwaarden gebruikt.

Hiermee is een systematiek ontwikkeld (De Haan & Ros, 2019; de Haan et al., 2021ab; Ros et al., 2022) om relatief goedkoop en eenvoudig de bodemkwaliteit integraal vast te stellen van landbouwbodems in Nederland als basis voor beslissingen over het verdere management van de bodem zowel voor nationale en regionale monitoring als voor het vaststellen van de bodemkwaliteit op perceelsniveau. Het gebruik van recente bodemmetingen is noodzakelijk en wordt gecombineerd met beschikbare historische informatie, managementinformatie en data uit openbare bronnen. Desgewenst kan ingezoomd worden op het vaststellen van de bodemkwaliteit voor de hierboven genoemde ecosysteemdiensten waarbij rekening wordt gehouden

met eventuele risico's op afwenteling naar andere functies. Ook belangrijk is een standaardisering en uniformering van de beoordeling van de verzamelde metingen en indicatoren. Er wordt in de BLN een overzicht van de bodembeoordeling gegeven van de kwaliteit van alle relevante bodemfuncties. Omdat elke functie beoordeeld kan worden in relatie tot de streefwaarde (of streeftraject) biedt dit mogelijkheden om de bodemkwaliteit op een integrale manier te beoordelen (zie Rinot et al., 2019; en Ros, 2019) en zo eenvoudig overzicht geven van de belangrijkste knelpunten. Deze aggregatie is gewenst voor monitoring en borging en mogelijk ook valorisatie in de markt, maar minder noodzakelijk voor advisering en inzicht op perceelsniveau. Op basis van de bodemkwaliteitsbeoordeling kan de gebruiker concrete maatregelen nemen om het bodembeheer te verbeteren, op alle schaalniveaus waar de BLN wordt toegepast.

Het is gewenst om een bodembeoordelingssystematiek te hebben die van goede kwaliteit is, duidelijk is in de communicatie naar gebruikers, betaalbaar en uitvoerbaar (de Haan et al., 2021b). Daarom is het gewenst dat het aantal bodemfuncties beperkt is dan wel de bodemfuncties al beschikbaar zijn vanuit beschikbare databronnen. Tegelijkertijd is de bodem complex en willen we inzicht krijgen in de prestatie voor diverse bodemprocessen. Dit vraagt om méér bodemfuncties. Vanuit oogpunt van kosten en tijd kan het aantal bodemfuncties nog aanzienlijk zijn, zolang ze maar relatief snel te bepalen zijn tegen aanvaardbare kosten.

Advisering is geen onderdeel van de BLN 2.0. Adviezen voor bodemmaatregelen worden bijvoorbeeld gegeven in een Bodemkwaliteitsplan (Fuchs et al., 2021), de OBI-tool (Ros, 2019a, Ros et al., 2022), het BedrijfsBodemWaterPlan (Ros et al., 2020) of andere instrumenten rondom duurzaam bodembeheer (Riechelman et al., 2021).

9.1.3 Definities

In paragraaf 2.1 hebben we de begrippen gedefinieerd aan de hand waarvan we het framework voor het beoordelen van bodemkwaliteit van landbouwgronden hebben opgebouwd. Hierbij hebben we de begrippenkaders van de BLN en de Openbodemindex geïntegreerd en zo uitgewerkt dat we een logisch en goed gedefinieerd framework hebben. Definities van begrippen in de literatuur rond beoordelen van bodemkwaliteit leiden vaak tot verwarring omdat dezelfde termen voor andere zaken worden gebruikt of verschillende termen voor dezelfde zaken. Voorbeelden hiervan zijn:

- *Ecosysteemdiensten* en *bodemfuncties*: In het 'Functional Land Management' framework (Schulte et al. 2014) zoals gebruikt in het LANDMARK project wordt de term bodemfuncties gebruikt voor de bijdrage van de bodem aan ecosysteemdiensten. In de BLN 2.0 is bodemfunctie gedefinieerd als reken- of beslisregel die bodemprocessen beschrijven welke bijdragen aan een bepaalde ecosysteemdienst.
- *Bodemindicatoren* en *bodemeigenschappen* worden vaak verward. We definiëren in de BLN 2.0 bodemindicatoren als de wijze van beoordeling van de bodemfunctie. Met deze definitie zijn bodemeigenschappen geen bodemindicatoren. Wel kan een enkele bodemeigenschap dienen als bodemfunctie.
- *Streefwaarden*, *drempelwaarden* en *referentiewaarden* worden in andere vakgebieden (vaak los van elkaar) met andere definities gebruikt waarbij bijvoorbeeld referentiewaarden wel een normatief karakter hebben. In de context van bodembeoordeling hebben deze drie begrippen een verschillende interpretatie.

In de bodemkundige literatuur wordt ook onderscheid gemaakt tussen bodemgezondheid en bodemkwaliteit. Hierbij wordt bodemgezondheid vaak gedefinieerd als de actuele staat van de bodem en bodemkwaliteit als de potentiële staat van de bodem (bijv. Bunemann, 2018; Bonfante et al, 2020; Faber et al., 2022). Internationaal wordt de term 'Soil Health' meer en meer gebruikt in plaats van 'Soil Quality' (EEA, 2023). In Nederland wordt de term bodemkwaliteit meer gebruikt dan bodemgezondheid omdat de laatste term de indruk wekt vooral gericht te zijn op bodemziekten en -plagen. In de BLN 2.0 gebruiken we de FAO-definitie voor bodemkwaliteit. Daarnaast hebben we geen onderscheid gemaakt tussen de actuele en potentiële staat, en beoordelen we vooral de actuele staat van de bodem.

De definities van de begrippen hangt sterk samen met het framework en zorgt ervoor dat een betere afstemming op internationale literatuur lastig is. De internationale ontwikkeling van frameworks voor bodembeoordeling- en bodemmonitoring is nog sterk in ontwikkeling. Naar de toekomst toe is verdere afstemming over definities en frameworks erg gewenst.

9.1.4 BLN 2.0 in vergelijk met andere frameworks rond bodembeoordeling

Hoe worden deze inzichten concreet in Nederland? Voortbouwend op tientallen jaren landbouwkundig onderzoek, opgebouwde expertise binnen het Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit en inzichten vanuit tools als Soil Health Index, BodemQ en de Soil Navigator, is in 2019 de set Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN) als ook de Open Bodemindex (OBI) ontwikkeld. De BLN-set is opgezet om concreet te maken welke bodemeigenschappen minimaal gemeten moeten worden om inzicht te krijgen in de bodemkwaliteit en -gezondheid. Samen met boeren, bemestingsadviseurs en beleidsmakers van waterschappen en provincies hebben kennisinstellingen daarnaast gewerkt aan een integrale beoordelings-systematiek, de Open Bodemindex. In de voorliggende publicatie zijn deze twee onderzoekslijnen geïntegreerd, waarbij het gecombineerde spoor van meten (BLN) én beoordelen (OBI) inzicht kan geven in de bodemkwaliteit voor elk landbouwperceel in Nederland. Hierbij is de systematiek uitgebreid om zo ook een relatie te leggen tussen bodemeigenschappen en andere ecosysteemdiensten, waaronder waterregulatie, koolstofopslag, recycling van nutriënten en het stimuleren van de biodiversiteit.

In de literatuur zijn diverse andere frameworks en methodieken van bodembeoordeling beschreven en ontwikkeld vanuit andere doelen en kaders. Voorbeelden hiervan zijn minimale datasets (bijv. Sparling et al. 2008) waarbij op basis van statistische analyse van een groot aantal percelen een beperkte set van indicatoren wordt geselecteerd waarmee de bodemkwaliteit het beste beschreven kan worden en (de Haan et al. 2019). Nadeel van deze benadering is dat de indicatoren statistisch gekozen zijn en het onduidelijk is welke bodemprocessen nu onderscheidend zijn met de gekozen indicator. Het framework voor BLN2.0 wijkt sterk af van Bodembologisch indicatorsysteem en meetnet (BoBi, Schouten et al., 1997) vanuit de doelstellingen en randvoorwaarden. In BoBi worden zeer veel bodemeigenschappen gemeten met dure en tijdrovende meetmethoden. Randvoorwaarde in de BLN 2.0 is dat bodemeigenschappen snel en goedkoop te meten zijn. Ook de BIOSIS-tool en delen van de Soil Navigator tool voldoen niet aan deze randvoorwaarde.

Het doel van de Soil Navigator tool komt grotendeels overeen met het doel van de BLN 2.0. Hierbij wordt ook beoordeeld op dezelfde ecosysteemdiensten. De aanpak van de Soil Navigator is echter zo anders dan het reeds ontwikkelde beoordelingskader van de Open Bodemindex, dat vooralsnog geen gebruik is gemaakt van het framework van de Soil Navigator. Zodra de Soil Navigator uitgebreid is getoetst op bedrijfsniveau in Nederland zien we potentie voor verdere verfijning van de niet-landbouwkundige ecosysteemdiensten.

De frameworks zoals beschreven in het EJP SOIL SIREN-project (Faber et al., 2022) en SERENA-project (Cousin et al., 2023) zijn meer conceptueel van karakter. Ze geven in minder detail richting aan wat gemeten moet worden en hoe de beoordeling uitgevoerd moet worden. Dit is nog erg beperkt tot het meten en beoordelen van individuele bodemeigenschappen. Ze zijn daarnaast sterk gericht op regionale en nationale monitoring. Het framework van de BLN 2.0 is concreter en meer gericht op de beoordeling van bodemkwaliteit op perceelsniveau om inzicht geven in de kwaliteit van de bodem in relatie tot de gewenste doelen voor de verschillende ESD aan de hand van bodemfuncties en waarbij handelingsperspectief gegeven wordt voor de gebruiker.

9.1.5 Ruimtelijke en tijdschaal

Perceels- en bedrijfsniveau

De ontwikkelde systematiek van BLN 2.0 is in eerste instantie ontwikkeld voor toepassing op bedrijfs- en perceelniveau door boeren. Op bedrijfs- en perceelsniveau speelt het dilemma van de bepaling van integrale bodemkwaliteit met kwalitatief goede parameters tegen de kosten van de bepalingen: basis bodemkenmerken worden daarom vaak gemeten via spectroscopie waarbij de directe beschikbare hoeveelheid van nutriënten als ook het bodemleven gebruik maakt van klassieke meetmethoden. Tevens is handelingsperspectief nodig wanneer de beoordeling matig of slecht is.

Regionale en nationale schaal

Op regionale en nationale schaal speelt het dilemma van een voldoende uitgebreide steekproef met de bepaling van integrale bodemkwaliteit met kwalitatief goede parameters waarin alle grondsoorten en landgebruiken voldoende vertegenwoordigd zijn tegen een bemonstering die in beperkte tijd uitgevoerd kan worden om de vergelijkbaarheid tussen locaties te behouden (en tegen redelijke kosten). Vooralsnog is de BLN 2.0 gericht op toepassing op perceels- en bedrijfsniveau, maar diverse studies laten zien dat de BLN 2.0 ook goed bruikbaar

is voor regionale en mogelijk zelfs ook voor nationale monitoring. Belangrijke vraag is wel of dit voldoende aansluit bij de monitoringseisen op nationaal en EU-niveau, dit laatste met name gezien de komende EU Soil Health Law. Op dit moment zijn deze eigen nog onduidelijk.

Verloop in de tijd

Veranderingen in bodemkwaliteit als gevolg van bodembeheer zijn veelal pas meetbaar na een aantal jaren (ca 4-5 jaar). Veranderingen zijn enerzijds gevolg van beïnvloedbare zaken als management en landgebruik en anderzijds vanwege fysieke omstandigheden (o.a. door klimaatverandering). Tegelijkertijd is het onmogelijk om kwaliteit te definiëren los van het landgebruik: het landgebruik bepaalt namelijk ook de definitie van "goed" en bepaalt daarmee de streefwaarden waaraan de bodemfuncties moeten voldoen. Binnen de akkerbouw betekent dit automatisch dat de kwaliteit alleen gedefinieerd kan worden op het niveau van een bouwplan. Veranderingen in bodemkwaliteit verlopen daarnaast vaak traag. De selectie van bodemfuncties moet zodanig zijn dat wanneer veranderingen optreden deze zichtbaar zijn binnen een tijdsperiode van jaren. Omdat bodemkwaliteit daarmee ook een jaar-overstijgend karakter heeft, is het belangrijk dat de gebruikte metingen en bodemfuncties niet afhangen van factoren die van dag-tot-dag of van seizoen-tot-seizoen kunnen fluctueren. Als dat wel het geval is, moet de monsternamen qua tijdstip en omstandigheden worden gestandaardiseerd.

9.1.6 Ecosysteemdiensten

In de BLN 2.0 is gekozen voor beoordeling op vijf algemene ecosysteemdiensten die het meest relevant zijn in de landbouw en gebaseerd op het 'Functional landmanagement framework' van Schulte et al. (2014). De indeling wijkt af van de algemeen gehanteerde indeling van ecosysteemdiensten van CICES (www.cices.eu). Dit is gedaan om het aantal ecosysteemdiensten te beperken en aan te sluiten bij de meest relevante maatschappelijke vraagstukken voor de landbouw in Nederland.

Voor alle ecosysteemdiensten hebben we bodemfuncties kunnen definiëren die de bijdrage van de bodem aan de ecosysteemdienst beschrijven. Voor de ecosysteemdienst primaire productie is de rol van bodemkwaliteit in een grote mate van detail uitgewerkt in een groot aantal bodemfuncties. De BLN 2.0 geeft onderbouwd inzicht in de relatie tussen bodemeigenschappen en de daarmee samenhangende bodemfuncties. Voor de overige ecosysteemdiensten is een eerste onderbouwing gemaakt op basis van bestaande kennis, maar verdere onderbouwing van de gekozen methodiek is gewenst, in het bijzonder in relatie tot de methodiek om regionale doelen te vertalen in opgaves per perceel. In sommige gevallen zoals voor de ecosysteemdienst Koolstofvastlegging en klimaatregulatie zijn er maar enkele bodemfuncties gedefinieerd. Voor fysieke bodemkwaliteit binnen de ecosysteemdienst Primaire productie en ook voor de ecosysteemdienst Waterregulatie en zelfreinigend vermogen zijn een grote groep aan bodemfuncties gedefinieerd die elk een klein deel van de bijdrage van de bodem aan de ecosysteemdienst beschrijven. Met nieuwe inzichten en meettechnieken zijn mogelijk de bodemfuncties te verbeteren. Ook voor de ecosysteemdienst Biodiversiteit en habitatvoorziening is dit het geval.

Voor de ecosysteemdienst Faciliteren nutriëntenkringloop zijn geen aparte bodemfuncties opgesteld, ze overlappen volledig met de chemische bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie. Wel zijn in de beoordeling de streefwaarden anders. In plaats van een minimum streefwaarde is er een streeftraject waarbinnen de optimale waarde zich bevindt. Hiermee blijft het relevant om deze ecosysteemdienst apart mee te nemen.

9.1.7 Bodemfuncties

De ontwikkelde methodiek van BLN 2.0 is bedoeld om een integraal beeld te geven van de kwaliteit van de bodem in het licht van meerdere ecosysteemdiensten. Om die reden is het ongewenst om selectief te shoppen in de ontwikkelde bodemfuncties en bijbehorende methodieken. Afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid kan wel gebruik worden gemaakt van goedkopere meetmethoden of pedotransferfuncties, zolang deze de functionaliteit van de BLN 2.0 niet negatief beïnvloed. Deze randvoorwaarde geldt voor alle kernbodemfuncties zoals deze in dit rapport zijn weergegeven.

De ontwikkelde methodiek geeft integraal inzicht in de bijdrage van de bodem aan de 5 ecosysteemdiensten. Een integratie van deze doelen is optioneel om gebruikers maximaal inzicht te geven in de mogelijke synergie

en trade-offs die bestaan tussen de verschillende ecosysteemdiensten. Hierbij spelen overigens naast wetenschappelijke ook politieke ambities een rol.

Vanuit een wetenschappelijk oogpunt is het cruciaal om bodemeigenschappen te vertalen in een bodemfunctie en deze vervolgens te beoordelen in het licht van een gewenste situatie. Vanuit dit oogpunt is in BLN 2.0 een onderscheid gemaakt tussen kernbodemfuncties, optionele bodemfuncties en bodemfuncties in ontwikkeling. Optionele bodemfuncties zijn alleen van belang op bepaalde grondsoorten en/of met een specifiek landgebruik. Bodemfuncties in ontwikkeling zijn opgenomen omdat er i) op korte termijn (binnen 10 jaar) waarschijnlijk streefwaarden beschikbaar komen of ii) ze indicatief zijn voor bodemfuncties waarvan op basis van expertkennis een effect verwacht gaat worden maar deze kennis anno 2023 nog niet beschikbaar is. De bodemfuncties zijn in ontwikkeling omdat de kennis nu nog ontbreekt om de gemeten waarden goed te interpreteren dan wel inzetbaar te maken voor de sturing van duurzaam bodembeheer. Dit geldt voor de meeste biologische bodemfuncties als ook de daaraan gekoppelde ecosysteemdiensten.

Voor de discussie over de compleetheid van de bodemfuncties zie paragraaf 9.3, waarin voor iedere ecosysteemdienst beschouwd wordt wat de stand van zaken is in de BLN 2.0.

9.1.8 Streefwaarden, drempelwaarden en referentiewaarden

Door de Haan et al. (2021b) en Ros et al. (2022) wordt onderbouwd dat het voor een goede bodembeoordeling van belang is om streefwaarden af te leiden die een wetenschappelijk onderbouwd onderscheid maken tussen wat goed is en wat verbeterd moet worden. In de praktijk blijkt dat nog niet voor alle bodemfuncties en ecosysteemdiensten streefwaarden beschikbaar zijn. In dat geval kan het gebruik van referentiewaarden een tijdelijke escape zijn om veranderingen in bodemkwaliteit te monitoren, maar blijft een wetenschappelijk juiste interpretatie van deze verandering (is het goed of slecht) onmogelijk.

Zoals in par 2.6.2 beschreven gaat een streefwaarde uit van een gewenste situatie (=goed), wat zou betekenen dat alles wat daarbuiten valt dan niet gewenst en dus fout is. Om hier een meer geleidelijke schaal van te maken zou het ook opgedeeld kunnen worden in meerdere klassen, bijvoorbeeld optimaal-goed-matig-slecht. Hierbij kunnen de begrippen ook toegepast worden als volgt: het begrip streefwaarde als ambitieus doel waarbij een grotere inspanning nodig is om dit te behalen (in rapportcijfers 8 of hoger) en het begrip drempelwaarde als een minimale ondergrens waaraan elk systeem moet voldoen (het zesje).

9.1.9 Selectie van Bodemmetingen

Om de bodemfuncties te beoordelen zijn bodemanalyses noodzakelijk, naast een aantal perceelskenmerken die afgeleid kunnen worden uit openbare databronnen. Meetmethoden moeten i) voldoende nauwkeurig en precies zijn om veranderingen in management te kunnen detecteren, ii) bij voorkeur routinematig in een agrarisch laboratorium gemeten kunnen worden om kosten te reduceren, iii) snel en praktisch uitvoerbaar zijn en iv) niet te dynamisch zijn in afhankelijkheid van weersomstandigheden. Omdat veel meetmethodes niet voldoen aan alle criteria tegelijk is in de BLN 1.1 onderscheid gemaakt in de klassieke meetmethoden (meestal nauwkeurig en precies) en alternatieve meetmethoden (meestal snel, goedkoop en betrouwbaar genoeg voor een kwaliteitsbeoordeling). Klassieke meetmethoden meten vaak de bodemeigenschap direct terwijl de alternatieve meetmethoden vaak gebaseerd zijn op indirecte metingen waarbij gebruik wordt gemaakt van sensoren (XRF, NIR of MIR), eDNA sequencing of pedotransferfuncties afgeleid van grote datasets. De oorspronkelijke systematiek van BLN 1.0 waarbij de gewenste meetmethode geselecteerd kon worden op basis van een gewenste nauwkeurigheid blijft hiermee staan. De systematiek geeft enerzijds een default resultaat maar is echter ook zo flexibel dat een gebruiker de default methoden voor elke bodemfunctie kan aanpassen voor de eigen situatie en doelstellingen, uiteraard binnen algemene randvoorwaarden voor statistische betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid. Wel is gekozen om in de BLN 2.0 de snelle goedkopere methode de defaultmethode te maken omdat deze voor de meeste gebruikers relevant is.

Alle indicatoren genoemd in de BLN 1.1 komen terug in de BLN 2.0 als bodemfunctie. In een aantal gevallen zijn wel de meetmethoden voor de bodemfunctie in de BLN 2.0 anders dan in de BLN 1.1. Dit geldt voor de volgende bodemfuncties:

- Aggregaatstabiliteit is in de BLN 2.0 een geaggregeerde functie die aan de hand van een aantal bodemfuncties ingeschat wordt in plaats van een meting met de natte zeefmethode. Deze methode is

tijdrovend en duur en de spreiding in metingen is groot. Door juist een aantal bodemfuncties te bepalen (zie tabel 3.2) wordt een beter beeld van de aggregaatsstabieliteit gevormd.

- Bulkdichtheid wordt in de BLN 2.0 bepaald met een pedotransferfunctie zoals ook vermeld in de BLN 1.1 als alternatieve methode en wordt gebruikt bij meerdere bodemfuncties. De directe meting van bulkdichtheid komt hiermee niet direct terug maar is indirect nog steeds onderdeel van de BLN 2.0 en kan desgewenst door meting de pedotransferfunctie vervangen.

De indicatoren 'Afbreekbare fractie organische stof' en alle biologische indicatoren behalve plantparasitaire aaltjes uit de BLN 1.1 zijn in de BLN 2.0 bodemfuncties in ontwikkeling omdat bepaling van de bodemeigenschappen van de bodemfuncties te tijdrovend en duur is en in veel gevallen ook streefwaarden ontbreken, de precieze relatie met de ecosysteemdienst en de beïnvloedbaarheid door management nog onbekend is.

9.1.10 Aggregatie

Het totaal aan bodemfuncties geeft een overzicht van de bodembeoordeling. Deze beoordeling gebeurt in principe op het laagste niveau voor iedere bodemfunctie. Omdat deze beoordeling uniform is gedefinieerd als een "afstand tot een streefwaarde" is het mogelijk om onderliggende bodemfuncties te clusteren en te aggregeren zoals dat ook gebeurt in Landmark en de Open Bodemindex. Deze aggregatie kan gebeuren op aspecten van landbouwkundige bodemkwaliteit (chemie, fysica en biologie), maar ook in relatie tot de niet-landbouwkundige diensten die de bodem levert zoals biodiversiteit, waterkwantiteit, waterkwaliteit, en koolstofvastlegging. Op deze manier kan de bodemkwaliteit op een integrale manier worden beoordeeld (zie Rinot et al., 2019 en Ros, 2019a) en geïntegreerd tot één rapportcijfer per ecosysteemdienst, functiecategorie of voor de integrale bodemkwaliteit als geheel. Deze aggregatie is gewenst voor monitoring en borging en mogelijk ook valorisatie in de markt, maar minder noodzakelijk voor advisering en inzicht op perceelsniveau.

De BLN 2.0 zelf geeft geen richtlijnen voor de methode van aggregatie. Op basis van de ontwikkelde systematiek kunnen stakeholders in onderling overleg wel tot afspraken komen hoe de resultaten van de verschillende bodemfuncties ten opzichte van elkaar beoordeeld en geaggregeerd kunnen worden. In een vervolg van de BLN 2.0 is het wel gewenst om aggregatiestrategieën verder uit te werken.

Wel is er discussie geweest over de weergave van resultaten waarbij de voorkeur is uitgesproken een klasse-indeling (bijv. goed-matig-slecht) te hanteren boven een rapportcijfer (1-10) of vergelijkbare systemen. Uiteindelijk is dit een keuze voor de instrumenten die de methodiek van de BLN 2.0 willen toe passen welke weergave gekozen wordt.

9.2 Toepassing BLN 2.0

9.2.1 Inbedding in beleid, praktijk en onderzoek

De BLN is in opdracht van LNV ontwikkeld vanuit het onafhankelijk onderzoek om tot uniforme meting van bodemkwaliteit te komen. Onafhankelijkheid en brede beschikbaarheid voor overheid en bedrijfsleven in de hele landbouwsector is belangrijk. Vanuit een vergelijkbare invalshoek is door het bedrijfsleven precompetitief met de kennisinstellingen de Open Bodemindex opgezet om bodemkwaliteit te beoordelen. In de BLN 2.0 worden beide initiatieven gecombineerd tot een wetenschappelijke onderbouwde en robuuste systematiek om de kwaliteit van landbouwbodems te kunnen beoordelen. De ontwikkelde systematiek wordt bewust gepositioneerd los van de eventuele instrumenten die in Nederland inzetbaar zijn voor bodemadvies en beoordeling. Binnen het speelveld van alle tools is de BLN 2.0 daarmee de wetenschappelijke basis voor bodemkwaliteitsbeoordeling. De methodiek kan gebruikt worden in diverse tools waarin bodemkwaliteitsbeoordeling een onderdeel is.

De BLN, versie 1.0 is ingebed in het Nationaal Programma Landbouwbodems (NPL) en wordt ondersteund door de stakeholders betrokken in het NPL en bodemexperts in Nederland. De partijen onderschrijven de BLN versie 1.0 als basis voor het bepalen van bodemkwaliteit (Ministerie van LNV, 2020). De Open Bodemindex is benoemd in de brief van ketenpartijen aan het ministerie van LNV in het kader van het NPL als mogelijk instrument voor beoordeling en beloning van bodemkwaliteit door marktpartijen (van Dijk, 2020) en wordt door diverse stakeholders en experts ondersteund. Het is van belang om dit draagvlak bij stakeholders binnen

en buiten het NPL en bij experts te behouden en te versterken voor de BLN 2.0. Er is duidelijk vraag naar standaardisering en systematisering van het meten én het interpreteren van bodemkwaliteit. Met de ontwikkeling van de BLN, versie 2.0 wordt een rekenmotor aangeboden waarmee derden de juiste bodemindicatoren, functies en eigenschappen kunnen selecteren (met bijbehorende meetmethoden) om tot een integrale beoordeling van bodemkwaliteit te komen. De BLN 2.0 is ontwikkeld in de PPS Beter Bodembeheer met meer dan 20 partners uit het bedrijfsleven. Daarmee is al draagvlak bij bedrijfsleven aanwezig. Het is gewenst dit draagvlak verder uit te bouwen.

Om in 2030 alle bodems duurzaam te beheren, is het nodig om meer zicht te krijgen in: i) de relatie tussen bodemkenmerken en de regionale ecosysteemdiensten die de bodem levert, ii) de aanwezige synergiën en compromissen tussen de bodemgerelateerde ecosysteemdiensten, iii) de korte en lange termijn impact van het bodembeheer op deze relatie, en iv) de vertaalslag van deze kennis naar bedrijfs- en perceelsniveau. Om de landelijke en regionale opgaves rond klimaat, biodiversiteit, bodem- en waterkwaliteit te realiseren, is BLN 2.0 bewust verbreed richting de vijf uitgewerkte systeemdiensten.

Om via bodembeheer gericht te sturen op het realiseren van de opgaves, is het vervolgens 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. 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 ontwikkeling van de BLN gebeurt ook in Europese afstemming, vooral binnen het European Joint Programming on Agricultural Soils (EJP-SOIL) en de projecten van de EU Soil Mission. In projecten in EJP SOIL brengen we kennis vanuit NL rond de BLN in en halen we nieuwe kennis voor verbetering van de BLN 2.0.

9.2.2 Gebruik van de BLN 2.0 op perceels- en bedrijfsniveau voor de boer

Gebruik voor beoordeling van bijdrage van bodem aan ecosysteemdiensten

De BLN 2.0 kan ingezet worden voor de beoordeling van de integrale bodemkwaliteit op de bijdrage van de bodem aan alle 5 de ecosysteemdiensten of voor een beoordeling van de bodemkwaliteit voor een selectie van een of meer ecosysteemdiensten. Het is niet mogelijk/ongewenst om binnen een ecosysteemdienst een selectie te maken van te beoordelen (kern)bodemfuncties. Voor een beoordeling moeten alle bodemfuncties bepaald worden. Hiermee wordt cherry picking voorkomen. Uitzondering zijn optionele bodemfuncties, deze zijn een toevoeging op de overige bodemfuncties omdat het niet zinvol is deze in alle gevallen te bepalen. De ecosysteemdienst biodiversiteit en habitatvoorziening bestaat uit veel bodemfuncties in ontwikkeling. Voor een beoordeling van deze ecosysteemdienst moeten per geaggregeerde bodemfunctie (biodiversiteit en habitatvoorziening) tenminste de helft van de bodemfuncties bepaald zijn.

De BLN 2.0 is zo opgezet dat boeren en adviseurs op basis van een algemene bodemvruchtbaarheidsmeting met een aantal managementgegevens makkelijk een beoordeling van de bodemkwaliteit kunnen maken waaruit duidelijk de goede punten en verbeterpunten blijken. Ook worden eventuele tegenstellingen in de beoordeling zichtbaar: een goede beoordeling van de een bodemfunctie voor de ene ecosysteemdienst kan gepaard gaan met een slechte beoordeling van een andere bodemfunctie voor de andere ecosysteemdienst. Op basis hiervan kan de boer met zijn adviseur werken aan de verbetering van de integrale bodemkwaliteit door gericht maatregelen te selecteren die de zwakke punten verbeteren en in discussie gaan met de partijen in zijn omgeving over de prioriteit van ecosysteemdiensten voor dit perceel.

Wanneer van alle percelen van het bedrijf de bodemkwaliteit bepaald is, kan ook een beoordeling van het gehele bedrijf gemaakt worden. Hierbij moet wel goed gekeken worden naar de aggregatiemethoden. Voor bodemfuncties waar de doelen op bedrijfsniveau of hoger liggen (bijvoorbeeld rond koolstofvastlegging) kan geaggregeerd worden door het (gewogen) middelen van percelen. Voor bodemfuncties met doelen op perceelsniveau (zoals pH, of fosfaatbuffering) moet eerder gekeken worden naar het percentage percelen/oppervlak wat niet voldoet aan de streefwaarde of in een bepaalde klasse zit. Dit om te voorkomen dat problemen op percelen uitgemiddeld worden op bedrijfsniveau en zo onzichtbaar gemaakt worden.

Voor toepassing op perceels- en bedrijfsniveau is koppeling van de BLN 2.0 aan bodemadviestools als het Bodekwaliteitsplan of het BedrijfsBodemWaterPlan gewenst. Op die wijze kan direct ook een onderbouwd integraal advies gegeven worden welke maatregelen een boer kan nemen ter verbetering van zijn bodemkwaliteit. Hiervoor is het nodig dat alle bodemfuncties in detail beschreven zijn, dit is voor de nieuwe bodemfuncties nog niet het geval. Ook kunnen de toegevoegde functies van de BLN 2.0 beschikbaar worden gemaakt als rekenmodule via een API-infrastructuur vergelijkbaar met de Open Bodemindex. Hierdoor kan voor elk perceel eenvoudig inzicht worden gegeven in de kwaliteit van de bodem, en kunnen andere IT-systemen gebruik maken van de ontwikkelde methodiek.

Het framework van de BLN 2.0 moet omgezet worden in een toepasbare tool. De Stichting Open Bodemindex en de Brancheorganisatie Akkerbouw hebben al aangegeven belangstelling te hebben om de framework in te bouwen in respectievelijk de Open Bodemindex en de Bodemmaatlat.

Toepasbaarheid voor beloning bodemkwaliteit

Nu met de BLN 2.0 de integrale bodemkwaliteit onafhankelijk en wetenschappelijk onderbouwd bepaald kan worden, kan dit ook ingezet worden om te belonen voor een goede bodemkwaliteit. Diverse partijen zijn de mogelijkheden hiernaar aan het verkennen. Belangrijke aspecten hierin zijn wel:

- Een goede bodemkwaliteit betekent nog niet dat het actuele beheer van de bodem goed is. Beloningen zouden daarom gebaseerd moeten zijn voor een langere termijn waarin de bodemkwaliteit over langere tijd gevolgd kan worden.
- De beloning moet bij voorkeur gebaseerd zijn op de totale score van integrale bodemkwaliteit om afwenteling te voorkomen en synergie te versterken. Zowel wanneer gericht wordt op een of enkele ecosysteemdiensten als wanneer gericht wordt op een kleine set van indicatoren en bodemfuncties over de ecosysteemdiensten heen bestaat dit risico. Daarbij speelt ook dat de betrouwbaarheid van een aantal bodemfuncties beperkt door gebrek aan kennis of beschikbaarheid van snelle goedkope meetmethoden. De integrale beoordeling is wel voldoende betrouwbaar omdat alle aspecten worden meegenomen.

9.2.3 Gebruik voor regionale en nationale monitoring

De BLN 2.0 methodiek definieert hoe gemeten en berekende bodemeigenschappen beoordeeld kunnen worden in het licht van vijf ecosysteemdiensten. Deze methodiek is primair toegepast op het niveau van percelen, maar is ook inzetbaar op grotere ruimtelijke schaalniveaus (Ros et al., 2022). Diverse studies laten zien dat hiermee regionaal en ook landelijk inzicht kan worden gegeven in de meest voorkomende knelpunten, dan wel mogelijke oplossingsrichtingen om de kwaliteit van de bodem te verbeteren (Riechelman & Ros, 2023; Fujita & Ros, 2021; Ros et al., 2022). Dit betekent dat dezelfde systematiek inzetbaar is om ook landelijke schaal uitspraken te doen over de kwaliteit van de landbouwbodem als ook het gevolgd of gewenste bodembeheer.

De set te meten bodemeigenschappen sluit aan op de eerdere set in de BLN 1.1 die is gebruikt voor de nationale monitoring van bodemkwaliteit (van den Elsen et al., 2020). Hiermee kan de ingezette monitoring voortgezet worden en uitgebreid worden en kan nu ook de bodemkwaliteit voor de verschillende ecosysteemdiensten beoordeeld worden. Met het regelmatig herhalen van de meting kan ook een trend zichtbaar gemaakt worden in de ontwikkeling van de bodemkwaliteit.

In de aggregatie spelen dezelfde zaken als in de paragraaf hierboven beschreven rond aggregatie naar bedrijfsniveau. Voor inzet van de BLN 2.0 in nationale monitoring moet een gedetailleerd monitoringsplan gemaakt worden. Vragen die hier spelen zijn o.a. 1) representatieve steekproef over het gehele land, 2) keuze in optionele indicatoren en indicatoren in ontwikkeling afhankelijk van beschikbaar budget, 3) keuze in specifieke meetmethoden (aanpassing tov standaarden in BLN 2.0) vanwege uniformiteit met eerdere metingen en kosten.

De BLN 2.0 is alleen gericht op landbouwgronden en vooralsnog vooral de zand- en kleigronden met grasland en eenjarige teelten. In het kader van nationale monitoring zal ook gekeken moeten worden naar andere grondsoorten (veen, löss) en ander landgebruik (meerjarige gewassen, natuur, stedelijk gebied). De BLN 2.0 kan hier deels op aangepast worden maar daarnaast zullen voor vooral de landgebruiken natuur en stedelijk gebied aanpalende methodieken ontwikkeld moeten worden.

9.3 Discussie, reflectie en vooruitblik per ecosysteemdienst

9.3.1 Ecosysteemdienst Primaire productie

Discussie

De ecosysteemdienst Primaire productie is in de BLN 1.1 en Open Bodemindex al goed uitgewerkt. Vrijwel alle makkelijk en goedkoop te meten bodemeigenschappen uit de BLN 1.1 komen terug in de ecosysteemdienst Primaire productie. Het grootste deel van de bodemfuncties van de Open Bodemindex zijn overgenomen in de BLN 2.0. We hebben enkele chemische bodemfuncties die van beperkt belang zijn voor akkerbouwmatige teelten dan wel functies waarbij streefwaarden beperkt zijn onderbouwd (CEC, koper, zink) niet overgenomen.

Gewenste verdere ontwikkeling

Voor de bodemfuncties en bijbehorende streefwaarden voor de ecosysteemdienst Primaire productie zijn de volgende verbeterpunten mogelijk:

- De streefwaarden voor het stikstofleverend vermogen (NLV) variëren per type landgebruik en zijn nog niet beschikbaar. Deze streefwaarden kunnen afhankelijk worden gemaakt van het bouwplan, door een N-index te definiëren die de bijdrage van de bodem aan de N-gewasbehoefte kwantificeert. Dit kan door het N-leverend vermogen te delen door de N-opname van het bouwplan (af te leiden van de gewasrotatie van de afgelopen jaren). Een vergelijkbare aanpak kan worden gevolgd voor het S-leverend vermogen.
- De beoordeling van een aantal chemische functies gebaseerd op de bemestingsadviezen in het Handboek Bodem en Bemesting en de Adviesbasis bemesting grasland en voedergewassen verschilt tussen akkerbouw en grasland vooral doordat ze met verschillende onderzoekers tot stand zijn gekomen. Het is gewenst de beoordelingen, zolang er geen fysieke noodzaak is, zoveel mogelijk gelijk te trekken.
- De fysische bodemfuncties worden veelal indirect ingeschat op basis van een aantal pedotransferfuncties. De pedotransferfuncties zijn redelijk grof en kunnen meer gepreciseerd worden door gebruik van meerdere bekende bodemeigenschappen en door meer rekening te houden met grondsoort en landgebruik. Daarmee kunnen dan ook de drempelwaarden vervangen worden door streefwaarden. Daarnaast kunnen de fysische functies verbeterd worden met de volgende vernieuwingen:
 - o Voor het risico op bodemverdichting ook in de ondergrond door te hoge wiellasten zou gebruik gemaakt kunnen worden van het SOMOCO-model (van den Akker 2004).
 - o (Grond)waterstand in combinatie met de aanwezigheid van drainage is voor de ecosysteemdienst primaire productie niet expliciet meegenomen in de BLN 2.0 terwijl dit van grote invloed is op de vochthuishouding en daarmee ook andere processen in de bodem die de landbouwproductie beïnvloeden. Hier moet in een vervolg nader naar gekeken worden.
- De biologische functies voor primaire productie dienen nog verbeterd te worden. Met name organische stof is een te algemene en discutabele bodemfunctie. Voor vrijwel alle functies zijn geen onderbouwde streefwaarden beschikbaar voor specifieke toepassing per combinatie van gewasstype en grondsoort. Ook is het gewenst om een bodemfunctie te ontwikkelen rond bodemziekten en -plagen vergelijkbaar met de functie rond plantparasitaire nematoden. Er is vanuit de PPS Beter Bodembeheer meer kennis en data uit diverse lange termijnproeven en andere monitoringsprojecten beschikbaar om de streefwaarden te verbeteren. Het was echter niet mogelijk om dit in het tijdsbestek van dit project mee te nemen.
- Bodembioologie is ook van invloed op de chemische en fysische functies, bijvoorbeeld stikstofleverend vermogen of aggregaatstabiliteit. Er worden echter op dit moment geen biologische bodemkenmerken meegenomen in de chemische en fysische functies omdat er nog geen goed onderbouwde relaties bekend zijn tussen biologische bodemeigenschappen en de chemische of fysische bodemfuncties voor Nederlandse bodems. Wanneer deze er wel is, is het gewenst dit mee te nemen.

9.3.2 Ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen

Discussie

Vanuit de wetenschappelijke literatuur is relatief veel bekend over het gedrag van water in de bodem en hoe water kan worden vastgehouden in de bodem. Bodems met veel organische stof en een goede bodemstructuur zorgen ervoor dat water niet snel wegstroomt (met bijkomend verlies van nutriënten) en dat gewassen minder gevoelig zijn voor droogte. De hier ontwikkelde functies zijn goed inzetbaar om relatieve verschillen tussen

percelen goed in kaart te brengen, maar de gebruikte streefwaarden zijn afgeleid van expertkennis en behoeven nog verdere onderbouwing vanuit veldproeven.

Op de meest kwetsbare gronden die gevoelig zijn voor droogte en uitspoeling (de droge zandgronden) is verandering in landgebruik mogelijk de enige optie om uitspoeling van nitraat en bestrijdingsmiddelen te verlagen. Deze verandering wordt echter niet altijd vrijwillig ondersteund, omdat het bijvoorbeeld betekent dat gangbare, uitspoelingsgevoelige gewassen niet meer geteeld mogen worden. Het opstellen van eenduidige doelvoorschriften, beleidskaders en kritische ondergrenzen is nodig om duurzaam bodembeheer op de lange termijn effectief te laten zijn. Dit heeft ook gevolgen voor het beoordelingskader van het BLN waarbij de kwaliteit van de bodem wordt beoordeeld gegeven het huidige bouwplan. Gegeven het feit dat de opgaven voor grondwaterbeschikbaarheid en waterkwaliteit lokaal sterk kan variëren door de kenmerken van het watersysteem, zijn de gekozen functies voor een deel afhankelijk van gedefinieerde beleidsmatige opgaven. Waar de bodemfuncties voor primaire productie een stevige empirische basis hebben, zijn de functies voor de ecosysteemdienst waterregulatie en zelfreinigend vermogen sterk gebaseerd op modelmatige kennis. De toegevoegde functies voor het oppervlaktewater zijn in een praktijksetting getoetst, maar dit geldt nog maar heel beperkt voor de toetsing van de bodemfuncties voor grondwateraanvulling en de impact van de bodem op de uitspoeling van pesticiden.

De ecosysteemdienst zelfreinigend vermogen is hierbij sterk uitgewerkt in relatie tot het gedrag van stikstof en fosfor om daarmee verliezen van deze nutriënten naar grond- en oppervlaktewater te voorkomen. Op basis van inzichten in de processen wordt een statistische aanpak gevolgd om risico's van percelen te kwantificeren. Hierbij is de keuze van het stroomgebied uiteraard van groot effect. In de uitwerking van de KRW wordt hiervoor aangesloten op kleinere stroomgebieden, waarbij de aanwezigheid van een opgave (voor N en P-reductie) medebepalend is voor het gekwantificeerde risico. In de praktijk blijkt deze aanpak zowel inzicht te geven als ook boeren te inspireren om met maatwerkoplossingen het zelfreinigend vermogen van het landbouwperceel te verbeteren. Verschillende praktijktoetsen met boeren en bodemkundige experts bevestigen dit. Vanuit deze overweging sluiten we aan op de door kennisinstellingen ontwikkelde BBWP-methodiek, waarbij we ons ook bewust zijn van de bijbehorende onzekerheden in relatie tot het realiseren van een opgave.

De HELP- en HB-tabellen zoals die worden gebruikt in de bodemfunctie vochtlevering m.b.t. droogte- en natschade zijn in het verleden ontwikkeld voor regionale toepassing en doen alleen uitspraken over gemiddelde omstandigheden. Ze zijn beperkt toepasbaar voor het doen van uitspraken over bijvoorbeeld opbrengstderving als gevolg van suboptimale agrohydrologische omstandigheden op een specifiek bedrijf of in een specifiek jaar. Ook houden de tabellen beperkt of geen rekening met de effecten van een aantal voor de landbouwbedrijfsvoering belangrijke ontwikkelingen van de laatste 10 à 20 jaren. De HELP-tabellen geven daarnaast alleen 30-jarig gemiddelde opbrengstdervingen en zijn gebaseerd op oude klimatologische omstandigheden (1951-1980). Gezien het feit dat het huidige klimaat flink is veranderd en men ook zeer geïnteresseerd is in jaarlijkse fluctuaties van de opbrengstderving is de afgelopen jaren het project Waterwijzer Landbouw uitgevoerd. Het is aan te bevelen om de huidige systematiek te vervangen door de daar gebruikte systematiek.

Een andere verbeteroptie is om bij de derving door droogte, rekening te houden met de regionale verschillen in neerslag en verdamping. De hier gebruikte droogtedepressies zijn berekend voor het meteostation De Bilt. De meteorologische omstandigheden van De Bilt gelden echter niet voor Nederland als geheel. Door Huinink (2018) is een verdere uitwerking gemaakt waarbij regionale verschillen in neerslag en verdamping worden gebruikt in berekening droogteschade. De vochtvoorziening zelf wordt niet berekend. Dit zou kunnen met behulp van de Staringreeks (Wösten et al., 2001).

De aggregaatstabiliteit staat in vrijwel alle recente studies naar bodemkwaliteit in de top-10 van relevante bodemindicatoren (Bünemann et al. 2018; Hanegraaf et al., 2019; van Elsen et al., 2018). Op dit moment worden deze metingen niet standaard bepaald in Nederland. Het is daarom gewenst dat er (nieuwe) methodes ontwikkeld worden om aggregaatstabiliteit goedkoop en snel te meten om het in te bedden binnen routinematige bepalingen in agrarische laboratoria.

De nauwkeurigheid van de toegevoegde functies voor uitspoeling van pesticiden en de grondwateraanvulling kan worden verhoogd door ze te kalibreren met extra meetgegevens. Er zijn uitgebreide datasets in Nederland om de berekende of gemeten grondwateraanvulling te koppelen aan bouwplan, bodemtype en grondwaterstand. Deze data kunnen gebruikt worden om een metamodel te maken voor het bepalen van grondwateraanvulling.

De ontwikkelde BBWP-methodiek is opvolgend op diverse studies waarbij de effecten van een groot aantal maatregelen op basis van expertkennis is gekwantificeerd. Deze koppeling met de impact van maatregelen is als zodanig niet opgenomen in de BLN, maar biedt zeker mogelijkheden om concreet handelingsperspectief te geven om de bodemkwaliteit te verbeteren. Een modelmatige onderbouwing van de geschatte impacts is gedeeltelijk uitgevoerd, en het is aan te bevelen om de integrale systematiek van het BBWP te evalueren in het licht van potentiële reducties die berekend kunnen worden met de modellen ANIMO, STONE of het LWKM.

De methodiek om uitspoelingsverliezen van stikstof in beeld te brengen is gebaseerd op uitspoelfracties voor een beperkt aantal landgebruikscategorieën. Het is wenselijk om op basis van de landelijke gegevens zoals die gebruikt worden in het landelijke waterkwaliteitsmodel om te zetten naar lokale toepassing door het gebruik van statistische meta-modellen. Hiermee is verdere verfijning naar specifieke grondsoorten, bouwplannen en geohydrologische condities mogelijk.

Gewenste verdere ontwikkeling

- Onderbouwing van streefwaarden voor waterregulatie en zelfreinigend vermogen op basis van veldproeven;
- Evaluatie van het leidend criterium van continuering van het bouwplan als basis van bodembeoordeling in relatie tot de noodzakelijke of gewenste grondwateraanvulling;
- Ontwikkeling meta-modellen voor uitspoelingsrisicos van nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen als functie van chemische en fysische bodemeigenschappen en het landgebruik;
- Verbetering van de agrohydrologische aannames in de fysische bodemfuncties op basis van nieuw inzichten van de WaterWijzer Landbouw;
- Ontwikkeling nieuwe meetmethodieken voor aggregaatstabiliteit.

9.3.3 Ecosysteemdienst koolstofvastlegging en klimaatregulatie

Discussie

Grote onzekerheid in de koolstofbalans op basis van effectieve organische stof is de inschatting van afbraak van organische stof in de bodem. Empirische relaties gebaseerd op spectroscopie zijn mogelijk, maar ontbreken, zodat de daadwerkelijke afbreeksnelheid per perceel nog een grote onbekende is. In plaats van een koolstofbalans op basis van effectieve organische stof kan ook een koolstofbalans opgesteld worden gebruikmakend van procesmodellen als RothC, praktisch uitgewerkt in bijvoorbeeld de praktijktool BodemCoolstof (Hendriks et al., 2023) en de carbon-DST zoals ingebed binnen het BBWP. Deze modellen vragen over het algemeen echter meer input dan de koolstofbalans op basis van effectieve organische stof.

Omdat veranderingen in organische stof lastig meetbaar zijn te maken, en een lange tijdshorizon vereisen, is een betrouwbare meting van het OS-gehalte cruciaal en dit is op dit moment nog niet mogelijk of relatief duur. Een recent ontwikkelde methodiek die gebruik maakt van sensor fusing (satelliet- en sensormetingen) lijkt perspectiefvol voor toepassing op bedrijfsniveau (Van der Voort et al., 2023).

Hoe en op welke manier voor elk perceel een "*distance to target*" moet worden gedefinieerd is nog onduidelijk, en wereldwijde protocollen voor de berekeningen van zogenoemde *carbon credits* zijn nog in ontwikkeling en onvoldoende duidelijk (Ros, 2021). De hoofdvraag hierin is of een absolute target mogelijk is of moet het per definitie worden ingevuld als een relatieve verandering ten opzichte van een business-as-usual.

De bijdrage van de bodem aan emissies van lachgas is afhankelijk van veel omstandigheden waarbij het actuele weer en management (bemesting) de belangrijkste zijn. Gekozen is voor een bodemfunctie rond afbreekbaarheid van organische stof als belangrijkste bodemeigenschap die van invloed is op het risico op lachgasemissies. De meting hiervan is nog indirect op basis van organische stof en textuur. Gewenst is om een meer direct meting van de afbreekbaarheid te hebben.

Gewenste verdere ontwikkeling

- Perceelsspecifieke inschatting van de koolstofafbraak voor de koolstofbalans
- Streefwaarden voor de koolstofvoorraad moeten nog worden afgeleid op basis van de potentie van koolstofvastlegging op basis van modellen of bepaald is aan de hand van een groot aantal metingen representatief voor landgebruik en grondsoort.

-
- Ontwikkeling van een directere meting met streefwaarde voor de afbreekbaarheid van organische stof in licht van risico op lachgasemissies.

9.3.4 Ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening

Discussie

Beoordeling van ecosysteemdienst bodembiodiversiteit en habitatvoorziening is lastig vanwege de relatief dure en tijdrovende metingen en het gebrek aan pedotransferfuncties en streefwaarden. Niettemin hebben we een aantal, met name bodemfuncties in ontwikkeling gedefinieerd die een beeld geven van de prestaties van de bodem op deze ecosysteemdienst.

Een suggestie was om bodemgerelateerde kritische prestatie-indicatoren uit de Biodiversiteitsmonitor Akkerbouw/Melkvee over te nemen. Dit zijn echter met name managementaspecten (zoals aandeel rustgewassen, toepassing NKG, OS-balans, N-overschot, bodembedekking, gewasbeschermingsmiddelen-gebruik) die beperkt iets zeggen over de actuele bodemkwaliteit. Anderzijds hebben deze aspecten wel invloed op de bodemkwaliteit en kunnen deze aspecten in de BLN geïntegreerd worden. Dit kan op vergelijkbare wijze als het label Duurzaam bodembeheer in de Open Bodemindex geïntegreerd is. Zoals eerder aangegeven is de BLN gericht op een kwaliteitsbeoordeling van de bodem, en zijn daarnaast ook instrumenten nodig voor de beoordeling van het beheer van de bodem. Om deze reden zijn bovengenoemde KPIs geen onderdeel geworden van BLN 2.0. Een inhoudelijke reden daarbij is dat een beoordeling van management los van de bodemkwaliteit eigenlijk niet mogelijk is.

Voor het bepalen van de habitatvoorziening voor biodiversiteit is het ook van belang te kijken naar meer fysische en chemische bodemindicatoren die medebepalen of bodemleven goed tot ontwikkeling kan komen.

Een relatief nieuwe techniek die het beoordelen en meten van bodembiodiversiteit in de toekomst mogelijk gemakkelijker gaat maken is de moleculaire analyse. Hierbij wordt op basis van een bodemmonster een moleculair profiel gemaakt van het bodemleven. Dit kan via DNA-analyse, maar hierbij wordt ook al het inactieve en dode bodemleven meegenomen. De toepassing van RNA-analyse zou mogelijk meer kunnen zeggen over het actieve en levende bodemleven. Deze technieken staan echter nog in hun kinderschoenen en zijn nog niet genoeg wetenschappelijk onderbouwd en praktisch toepasbaar. Dit zal naar alle waarschijnlijkheid ook nog meerdere jaren op zich laten wachten.

Voor alle beschikbare bodemfuncties voor beoordeling van deze ecosysteemdienst zijn geen specifieke streefwaarden of drempelwaarden bekend. Een hoge variatie in soorten is per definitie een synoniem voor bodembiodiversiteit, wat suggereert dat een data-gedreven benadering mogelijk gebruikt kan worden om streefwaarden te definiëren. Binnen BoBi is deze aanpak uitgewerkt (Rutgers et al., 2008) waarbij op basis van expertkennis een aantal "representatieve" percelen als optimale biologische referentie zijn gedefinieerd om het biologisch functioneren van een bodem te evalueren (Van Wijnen et al., 2012). In welke mate deze aanpak generiek inzetbaar is voor alle landbouwpercelen, gegeven de enorme variatie in grondsoort, geohydrologie, landgebruik en bemesting, is nog onduidelijk. Wel biedt deze aanpak perspectief zolang procesmatige of empirische relaties tussen bodemeigenschappen en het leveren van intrinsieke biodiversiteit ontbreken.

Gewenste verdere ontwikkeling

- Managementaspecten opnemen ter beoordeling van ecosysteemdienst biodiversiteit en habitatvoorziening
- Invulling van bodemfuncties voor habitatvoorziening met ook chemische en fysische aspecten.
- Uitwerken proxy-benadering met vergelijking met x-tal 'optimale referentiepercelen' van BoBi voor BLN om zo ook streefwaarden mee te nemen voor biologische bodemfuncties.

9.3.5 Ecosysteemdienst faciliteren van de nutriëntenkringloop

Discussie

De bodemfuncties voor deze ecosysteemdienst overlappen nu volledig met de bodemfuncties voor de ecosysteemdienst primaire productie, alleen de streefwaarden en daarmee de beoordeling zijn anders. Waar de bodemfuncties voor primaire productie alleen worden beoordeeld op een ondergrens speelt hier ook een bovengrens een rol. Het niveau van de beschikbaarheid van nutriënten moet goed zijn maar ook niet te hoog.

Enerzijds lijkt dit een dubbeling te zijn van bodemfuncties, anderzijds is dit juist de kracht dat bodemfuncties voor meerdere ecosysteemdiensten ingezet kunnen worden, wel echter met een specifiek beoordelingskader vanuit die ecosysteemdienst. Er is dan ook geen reden om deze ecosysteemdienst niet mee te nemen of samen te voegen met primaire productie.

Naast het kijken naar de nutriëntenvoorraden in de bodem is voor deze bodemfunctie ook voorgesteld om te kijken naar bodemfuncties rond nutriëntenefficiëntie, berekend op basis van overschotten of input/output. Een vergelijkbare aanpak wordt gevolgd in de bekende Biodiversiteitsmonitor Melkveehouderij, de Biodiversiteitsmonitor Akkerbouw en de KPI-indicator voor kringlooplandbouw. Hoewel ook hier management een grote rol speelt, duiden deze functies ook goed de beschikbaarheid van nutriënten uit de bodem. Dit is relevant voor stikstof en fosfaat gezien het belang rond beperken verliezen en voor fosfaat en kali gezien het belang van zuinig omgaan met beperkte voorraden.

Gewenste verdere ontwikkeling

- Het relateren en beoordelen van het N- en P-bodemoverschot (of bedrijfsoverschot) in relatie tot de kwaliteit van de bodem.
- Het verbeteren en aanpassen van de landbouwkundige klassegrenzen voor fosfaatdifferentiatie van landbouwbodems waarbij rekening wordt gehouden met de acceptabele P-verliezen naar het oppervlaktewater.

9.4 Overzicht aanbevelingen voor vervolg

In deze paragraaf worden de belangrijkste aanbevelingen voor vervolg puntsgewijs samengevat. Deze kunnen in een nieuwe PPS of onderzoeksproject verder opgepakt worden.

Doorontwikkeling van het framework algemeen

Gebaseerd op de huidige stand van zaken als ook de koppeling met lopende beleidstrajecten en marktinitiatieven is het gewenst om de volgende aspecten de komende jaren verder uit te werken:

- Verdere uitwerking van de BLN 2.0 voor nationale (en regionale) monitoring, inclusief aspecten als bemonsteringsplan en voldoen aan nationale en Europese vereisten voor monitoring.
- Afstemming van BLN framework op Europese ontwikkelingen in kader van EU Soil Mission en de Soil Health Law.
- Koppeling van het BLN aan het Bodemkwaliteitsplan en BedrijfsBodemWaterPlan met daarbij de focus "hoe is de kwaliteit van de bodem te beïnvloeden via goed bodembeheer"
- Doorontwikkeling naar andere grondsoorten voor de niet-landbouwkundige ecosysteemdiensten (o.a. veen, lössgrond) en meerjarige teelten (met name boomteelt en fruitteelt).
- Focus op doorontwikkeling van bodemfuncties in ontwikkeling en samengestelde bodemfuncties waar relatie bodemeigenschappen bodemfunctie zwak is. Dit kan via de ontwikkeling van:
 - o Nieuwe meetmethodes zoals NIR, MIR, XRF, eDNA, 16S en 18S
 - o Pedotransferfuncties op basis van datasets met metingen;
 - o Metamodellen om de koppeling van perceel naar regionale effecten op waterkwaliteit te versterken;
 - o Streefwaarden voor biologische bodemfuncties.
- Doorontwikkeling aggregatiemethodes tot niveau van ecosysteemdiensten
- Nagaan noodzaak om managementaspecten meer mee te nemen in de beoordelingen van bodemkwaliteit per ecosysteemdienst.
- Maken van factsheet voor nieuwe bodemfuncties, en het updaten van factsheets van bodemfuncties overgenomen uit de Open Bodemindex.

Verdere ontwikkeling naar gebruik, stimulering van gebruik en behalen van doelen

Waar de landbouwkundige bodemfuncties de afgelopen jaren uitgebreid zijn getoetst is het gewenst om ook de bijdrage van de bodem aan andere ecosysteemdiensten te evalueren en te toetsen met experts, adviseurs en boeren enerzijds en betrokken beleidsmakers anderzijds.

- Testen van framework van de BLN 2.0 in pilotprojecten met ondernemers in diverse regio's en sectoren. Nagaan van synergiën en trade-offs tussen resultaten ecosysteemdiensten bij toepassing in de praktijk

-
- Toepassen van BLN 2.0 in nationale bodemmonitoring CC-NL
 - Draagvlak verwerven voor aanpak bodembeoordeling in BLN 2.0 en organiseren toepassing in diverse tools waaronder de Bodemmaatlat BO-Akkerbouw, de Open Bodemindex, tools toeleveranciers, BedrijfsBodemWaterPlan, etc.)

Op onderdelen per ecosysteemdienst

Per ecosysteemdienst bevelen we aan de volgende activiteiten uit te voeren ter verbetering van het BLN framework:

- Primaire productie
 - o Streefwaarden afleiden voor bodemfuncties stikstoflevering en zwavellevering.
 - o Verbeteren fysische bodemfuncties qua streefwaarden en meetmethoden.
 - o Ontwikkelen biologische bodemfuncties, zowel bodemfuncties zelf als streefwaarden, waaronder een bodemfunctie voor ziekte- en plaagbeheersing.
- Waterregulatie en zelfreinigend vermogen
 - o Verbeteren van fysische bodemfuncties qua rekenmethodiek om beter aan te sluiten bij lokale informatie.
 - o Verdere kwantificering van de kwaliteit – impact relaties waarbij een relatie wordt gelegd tussen perceelskenmerken en de doelen die gelden per waterlichaam.
- Koolstofvastlegging en klimaatregulatie
 - o Ontwikkelen methode om afbraak bodemorganische stof perceelsspecifiek in te schatten.
 - o Ontwikkelen streefwaarden voor koolstofvoorraad op basis van maximaal haalbare opslag.
 - o Ontwikkelen streefwaarden voor bodemfunctie afbreekbare organische stof.
- Bodembiodiversiteit en habitatvoorziening
 - o Doorontwikkeling bodemfuncties voor deze ecosysteemdienst inclusief streefwaarden en meetmethodes, met name ook bodemfuncties voor de habitatvoorziening van bodembiodiversiteit.
 - o Uitwerken proxy-benadering met vergelijking met x-tal 'optimale referentiepercelen' van BoBi voor BLN.
 - o Nagaan noodzaak voor opnemen van managementaspecten ter beoordeling van ecosysteemdienst biodiversiteit en habitatvoorziening.
- Faciliteren van de nutriëntenkringloop
 - o Definiëren van streefwaarden voor bodemfuncties waarboven de benutting van nutriënten sterk afneemt.
 - o Het inbrengen van indicatoren gerelateerd aan management, voortbouwend op de KPI-set ontwikkeld voor de Biodiversiteitsmonitors Akkerbouw en Melkveehouderij.

Literatuur

- Ambrosius, F., Klaassens, R., Lodders, A. & Nijboer, J. 2023. BiodiversiteitsMonitor Akkerbouw. <https://www.bo-akkerbouw.nl/files/Pdfs-Kennis-en-Innovatie/BiodiversiteitsMonitor-Akkerbouw-Brochure.pdf>
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., and J.P. Mitchell, 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25-45.
- Bonfante, A.; Basile, A.; Bouma, J. 2020. Targeting the soil quality and soil health concepts when aiming for the United Nations Sustainable Development Goals and the EU Green Deal. *Soil* 6, 453-466. <https://doi.org/10.5194/soil-6-453-2020>
- Bos, J. F. F. P., De Haan, J. J., & Sukkel, W. 2007. Energieverbruik, broeikasgasemissies en koolstofvastlegging: de biologische en gangbare landbouw vergeleken. Volledig rapport (No. 140). Plant Research International. <https://edepot.wur.nl/183415>
- Bouma, J., de Haan, J., & Dekkers, M. F. S. 2022. Exploring Operational Procedures to Assess Ecosystem Services at Farm Level, including the Role of Soil Health. *Soil Systems*, 6(2), 34.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., ... & Brussaard, L. 2018. Soil quality—A critical review. *Soil biology and biochemistry*, 120, 105-125.
- Bussink D.W., Van Schöll L., Van der Draai H. & van Riemsdijk, W.H. 2012. Beter waterbeheer en – kwaliteitsmanagement begint op de akker. NMI-rapport O1150, 68 pp.
- Cousin, I., Montagne, D., Anton-Sobejano, R., Scammacca, O., De Haan, J., & van den Elsen, E. 2023. A conceptual framework to link some soil concepts: Soil Quality, Soil Health, Soil-based Ecosystem Services, Soil threats. A proposition from the EJP SOIL–SERENA project (No. EGU23-13094). Copernicus Meetings.
- De Boer I.J.M. & van Ittersum, M.K. 2018. Circularity in agricultural production. Mansholt Lecture 2018.
- Del Castilho, P. 2019. Volhoudbare agrarische productie: een utopie? *BODEM* 6, 38-39
- De Haan, J., Rombout, S., Molendijk, L., Thoden, T., Hoek, H., de Wolf, P., & Sukkel, W. 2019. Meten is weten anno 2015: Ontwikkeling van de WUR Minimale Data Set tot 2015 voor het meten van bodemkwaliteit in de open teelten als basis voor verdere ontwikkeling. Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Open Teelten. <https://doi.org/10.18174/511394>
- De Haan, J. J. & Ros, G. H. 2019. Beoordeling Bodemkwaliteit gegeven doel. Interne notitie t.b.v. landelijk advies Nationaal Programma Landbouwbodems, 5 pp.
- De Haan, J. J., van den Elsen, H. G. M., Hanegraaf, M. C., & Visser, S. M. 2021a. Bodemindicatoren voor landbouwgronden in Nederland (BLN versie 1.1). Wageningen Plant Research. <https://edepot.wur.nl/550065>
- De Haan, J. J., van den Elsen, E., & Visser, S. M. 2021b. Evaluatie van de Bodemindicatoren voor Landbouwgronden in Nederland (BLN), versie 1.0: BLN, versie 1.1 en de schets van een ontwikkelpad naar een BLN, versie 2.0. Wageningen Plant Research (WPR-883). <https://doi.org/10.18174/549973>
- De Haan, J. J., Korthals, G. W., Hanegraaf, M. C., Postma, J., van Egmond, F. M., Olijve, A. J., van Asperen, P., Vervuurt, W. ... & Schilder, M. T. 2021c. Bodemkwaliteitsmetingen 2019 in Bedrijvennetwerk Bodemmetingen: eerste analyse van de meetresultaten 2019 van integrale bodemkwaliteit op 16 akkerbouwbedrijven. Wageningen Plant Research (WPR-888). <https://doi.org/10.18174/554216>
- De Vries, W., Kros, J., Voogd, J.C.H, van Duijvendijk, K. & Ros, G.H. 2018. Kansen voor het sluiten van de mineralenbalansen in Noord-Nederland; effecten op regionale schaal en bedrijfsschaal. WEnR-rapport 2929, 72 pp.
- EEA (European Environment Agency) 2023. Soil monitoring in Europe – indicators and thresholds for soil health assessments (editor: Baritz, R.; authors: Baritz, R., Amelung, W., Antoni, V., Boardman, J., Hijbeek, R., Horn, R., Prokop, G., Römbke, J., Romkens, P., Steinhoff-Knopp, B., Swartjes, F., Trombetti, M., de Vries, W.). EEA Report No 08/2022.
- Faber, J.H., Cousin, I., K.H.E. Meurer, C.M.J. Hendriks, A. Bispo, M. Viketoft, L. ten Damme, D. Montagne, M.C. Hanegraaf, A. Gillikin, P. Kuikman, G. Obiang-Ndong, J. Bengtsson, & Taylor, A. 2022. Stocktaking for

-
- Agricultural Soil Quality and Ecosystem Services Indicators and their Reference Values. EJP SOIL Internal Project SIREN Deliverable 2. Report, 153 pp.
- FAO. 2017. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.
- Fernandes, J. C., Gamero, C. A., Rodrigues, J. G. L., & Mirás-Avalos, J. M. 2011. Determination of the quality index of a Paleudult under sunflower culture and different management systems. *Soil and Tillage Research*, 112(2), 167-174.
- Fine, A. K., van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. 2017. Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 589-601.
- Fuchs, L. M., Molendijk, L. P. G., & Rombout, S. 2021. Bodem Kwaliteits Plan (BKP) documentatie.
- Fujita, Y. & Ros, G.H. 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.
- Fujita, Y., Ros, G. H., Bussink, D. W., & Groenendijk, P. 2019. N-buffering voor grondwater 0.3. Factsheet Open Bodemindex, 6 pp.
- Geurts, J., van Loon, A., Ros, G.H. 2021. Gezonde bodem, gezond watersysteem. https://www.nmi-agro.nl/wp-content/uploads/2022/08/geurts_2021_gezond.pdf
- Groenendijk, P., van Boekel, E., Renaud, L., Greijdenus, A., Michels, R. & de Koeijer, T. 2016. Landbouw En de KRW-Opgave Voor Nutriënten in Regionale Wateren: Het Aandeel van Landbouw in de KRW-Opgave, de Kosten van Enkele Maatregelen En de Effecten Ervan Op de Uit- En Afspoeling Uit Landbouwgronden. Wageningen.
- Groenendijk, P., van Gerven, L., Schipper, P., Jansen, S., Buijs, S., van Loon, A., ... & Noij, G. J. 2021. Maatregel op de Kaart (Fase 2): Identificeren van kansrijke perceelsmaatregelen voor schonere grond- en oppervlaktewater (No. 2021-26). Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- Geurts, J., Van Loon, A. & Ros, G.H. 2021 Gezonde bodem, gezond watersysteem. BTO-rapport 2021.026, KWR, Nieuwegein.
- Geurts, J., Van Loon, A., Ros, G.H. & K. van den Dool. 2021b Met duurzaam bodembeheer naar een gezond watersysteem: bouwstenen voor een integrale bodemstrategie. H2O-Online, 3 december 2021, 7pp.
- Gugino, B.K., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R., van Es, H.M., Wolfe, D.W., Moebius-Clune, B.N, Thies, J.E. & G.S. Abawi (2009) Cornell soil health assessment training manual Edition 2.0. Cornell University, Geneva, NY, USA, 51 pp.
- Hanegraaf, M. C., Den Ouden, J. B., Termorshuizen, A. J., Visser, A., van Schöll, L. & Guldmond, A. 2013. Bodemvitaliteit in landbouw- en natuurgebieden in de provincie Noord-Brabant. p. 101. Nutriënten Management Instituut NMI BV, Wageningen.
- Hanegraaf, M., van den Elsen, E., de Haan, J., & Visser, S. 2019. Bodemkwaliteitsbeoordeling van landbouwgronden in Nederland - indicatorset en systematiek, versie 1.0. (Rapport WPR; No. 795).
- Hénault, C., Bourennane, H., Ayzac, A., Ratié, C., Saby, N. P., Cohan, J. P., ... & Gall, C. L. 2019. Management of soil pH promotes nitrous oxide reduction and thus mitigates soil emissions of this greenhouse gas. *Scientific reports*, 9(1), 20182.
- Hendriks, C., Lesschen, J. P., Timmermans, B., Hanegraaf, M., Dijkman, W., Rougoor, C., ... & Schepens, J. 2023. Description and development Soil Carbon Tool.
- Hoogmoed, M., Timmermans, B. G. H., Bloem, J., van Asperen, P., Crujisen, J. J. P., de Haan, J. J., ... & Koopmans, C. J., 2021a. Verschillen in bodemkwaliteit door koolstofmaatregelen: In beeld gebracht aan de hand van de BLN-indicatorset. *Slim Landgebruik*.
- Hoogmoed, M., Janmaat, L., Verstand, D., Bijker, J. W., Schurer, B. L. M., Timmermans, B. G. H., ... & Koopmans, C. 2021b. Bodem & Klimaat Netwerk Akkerbouw: Voortgangsrapportage juni 2021. Slim Landgebruik.
- Huinink, J. Th. M. 2011. Bodemgeschiktheidsbeoordeling voor landbouw, bosbouw en recreatie: t.b.v een optimalisatie van grondwater- en oppervlaktewaterpeilbeheer : state of the art 2011
- Huinink, J. Th. M. 2018. "Bodem/Perceel Geschiktheidsbeoordeling Voor Landbouw, Bosbouw En Recreatie: T.b.v. Een Optimalisatie van Grondwater- En Oppervlaktewaterpeilbeheer: State of the Art 2018." www.bodemconsult.nl.
- Janmaat, L., & Koopmans, C. J. 2020. Bodem & Klimaat Netwerk-akkerbouw. *Slim Landgebruik*.
- Koopmans, C., Timmermans, B., de Haan, J., van Opheusden, M., Noren, I. S., Slier, T., & Wagenaar, J. P. 2020. Evaluatie van maatregelen voor het vastleggen van koolstof in minerale gronden 2019-2023: Voortgangsrapportage 2020. Louis Bolk Instituut.

-
- Krueger, T., Page, T., Hubacek, K., Smith, L., & Hiscock, K. 2012. The role of expert opinion in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*, 36, 4-18.
- Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., & Bélanger, G. 2019. Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 1-17.
- Lemaire, G., Tang, L., Bélanger, Gilles, Zhu, Y., Jeuffroy, Marie-Hélène, 2021. Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture. *Eur. J. Agron.* 125 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126248>.
- Lesschen, J. P., Hendriks, C., van de Linden, A., Timmermans, B., Keuskamp, J., Keuper, D., ... & Slier, T. 2020. Ontwikkeling praktijktool voor bodem C (No. 2990). Wageningen Environmental Research.
- Lilburne, L., Sparling, G., & Schipper, L. 2004. Soil quality monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(3), 535-544.
- Locher & Bakker. 1992. Bodemkunde van Nederland Deel 1 Algemene bodemkunde.
- Massop, L. & Schuiling, C. 2016. Buisdrainagekaart 2015: Update Landelijke Buisdrainagekaart Op Basis van de Landbouwmetellingen van 2012. Wageningen.
- Ministerie van LNV, 2020. Reactie op brief 'Afspraken ketenpartijen' en voortgang Nationaal Programma Landbouwbodems. 4 september 2020. Den Haag. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-f48e5756-f33f-4ce0-be73-88f0a291e729/pdf>
- Moebius-Clune et al., 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2, Cornell University, Geneva, NY.
- Molendijk, L.P.G., de Wolf, P.L. & Wesselink, M. 2018. Instrumenten voor Duurzaam Bodembeheer; Een overzicht. Wageningen Research, Rapport WPR-740.
- Moinet, G. Y., Hijbeek, R., van Vuuren, D. P., & Giller, K. E. 2023. Carbon for soils, not soils for carbon. *Global Change Biology*, 29(9), 2384-2398.
- Moncada, M. P., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. 2014. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. *Geoderma*, 235, 271-278.
- Oldfield, E. E., Bradford, M. A., & Wood, S. A. 2019. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, 5(1), 15-32.
- Pribyl, D. W. 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3-4), 75-83.
- Riechelman, W.H., van den Dool K.C.H., Molendijk, L.P.G., de Haan, J.J. & Ros, G.H. 2021. QuickScan bodeminstrumenten en datasystemen: Een analyse van tools om bodemkwaliteit integraal te beoordelen, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1819.N.20, pp 39.
- Riechelman, W.H. & Ros, G.H. 2023 Analyse Bodemkwaliteit voor a.s.r. Dutch Farmland Fund 2021. Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1876.N.22, 20 pp.
- Rinot, O., Levy, G. J., Steinberger, Y., Svoray, T., & Eshel, G. 2019. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of the Total Environment*, 648, 1484-1491.
- RLI. 2020. De Bodem bereikt?! Digitale uitgave, Publicatie Rli 2020/02.
- Ros, G. H., Hanegraaf, M. C., Hoffland, E., & van Riemsdijk, W. H. 2011. Predicting soil N mineralization: Relevance of organic matter fractions and soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8), 1714-1722.
- Ros, G. H. (2011). Predicting soil nitrogen supply: relevance of extractable soil organic matter fractions. Wageningen University and Research.
- Ros, G.H. 2016. Organische stof en bemesting. (On)voorspelbaar... CBGV presentatie 11 januari 2016, Nijkerk.
- Ros, G.H. 2019a. De Open Bodemindex 0.11. OBI rapportage, 183 pp.
- Ros, G.H., Bussink, D.W., Fujita, Y. 2019b. Mg-Beschikbaarheid. OBI factsheet.
- Ros, G.H., van Gerven, L., Groenendijk, P., Damen, S. De Haan, M. & Verloop, K. 2020. Strategisch plan voor ontwikkeling van DAW-tools voor bewustwording en advies aan agrariërs om de waterkwaliteit te verbeteren, Rapport KennisImpuls Waterkwaliteit – deelproject Nutriëntenmaatregelen, en Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1589.N.20, 62 pp.
- Ros, G.H., Verweij, S., Quist, N. & van Eekeren, N. 2020. BedrijfsBodemWaterPlan. Maatwerk voor duurzaam bodem en waterbeheer. Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1805.N.20, 34 pp.
- Ros, G.H. (2021) Evaluation C monitoring protocols. NMI note 1589.N.20., 8 pp.
- Ros, G.H., S.E. Verweij, S.J. Janssen, J.J. de Haan & Y. Fujita. 2022. An Open Soil Health Assessment Framework Facilitating Sustainable Soil Management. *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 23, 17375–17384. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04516>
- Ros, G.H., Verweij, S.E., van der Voort T., de Vries W. & Fujita, Y. 2023. Carbon Storage Potential of Agricultural Soils, a data driven approach. Submitted.

- Rutgers, M.; Mulder, C.; Schouten, A.J.; Bloem, J.; Bogte, J.J.; Breure, A.M.; Brussaard, L.; Goede, R.G.M. de. 2007. Typering van bodemecosystemen in Nederland. Met tien referenties voor biologische bodemkwaliteit. RIVM rapport 607604008/2007. <http://edepot.wur.nl/40979>.
- Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A. J., Bloem, J., Bogte, J. J., Breure, A. M., ... & Van Eekeren, N. 2008. Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality. RIVM report 607604009.
- Rutgers, M., Van Wijnen, H. J., Schouten, A. J., Mulder, C., Kuiten, A. M. P., Brussaard, L., & Breure, A. M. 2012. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of the Total Environment*, 415, 39-48.
- Rutgers, M., Schouten, T., Bloem, J., Buis, E., Dimmers, W., Van Eekeren, N., ... & Wattel-Koekkoek, E. J. W. 2014. Een indicatorsysteem voor ecosysteemdiensten van de bodem: Life support functions revisited. RIVM Rapport 2014-0145, 129 pp.
- Schepens, J.A.B., Timmermans, B.G.H., Herbert, Z.G.J., Hoogmoed, M., Fuchs, L.M., Heupink, D.T., Slier, T., Wagenaar, J.P., Koopmans, C.J., 2022. Effecten van koolstofvastleggende maatregelen op de (BLN)-bodemkwaliteit indicatoren - Deel 2. *Slim Landgebruik*.
- Schipper, P., Van Boekel, E., Jeurissen, L., Renaud, L. & Hendriks, R. 2020. Water- en nutriëntenbalansen oppervlaktewater Flevoland. <https://edepot.wur.nl/523160>
- Schouten, A. J., Brussaard, L., De Ruiter, P. C., Siepel, H., & Van Straalen, N. M. 1997. Een indicatorsysteem voor life support functies van de bodem in relatie tot biodiversiteit. RIVM Rapport 712910005.
- Schulte, R. P., Creamer, R. E., Donnellan, T., Farrelly, N., Fealy, R., O'Donoghue, C., & O'huallachain, D., 2014. Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. *Environmental Science & Policy*, 38, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.10.002>
- Slier, T., & Velthof, G. L. 2021. 30 vragen en antwoorden over lachgasemissie uit landbouwgronden. Wageningen Environmental Research.
- Sonneveld, M.P.W., Heuvelink, G.B.M., & Moolenaar, S.W. 2014. *Application of a visual soil examination and evaluation technique at site and farm level*. *Soil use and management* 30 (2): 263-71.
- Sparling, G., Lilburn, L. & Voivodic-Vukovic, M. 2008. Provisional targets for soil quality indicators in New Zealand / Palmerston North, N.Z.: Manaaki Whenua Press. Landcare Research Science series, ISSN 1172-269X ; no. 34 ISBN 978-0-478-09396-4.
- Stout, B., Polman, N., & Dijkman, W. 2022. Score activiteiten op doelstellingen in de eco-regelingen van het Nationaal Strategisch Plan. CLM Onderzoek en Advies.Ten Berge, H. F. M., & Postma, J. 2010. Duurzaam Bodembeheer in de Nederlandse landbouw: Visie en bouwstenen voor een kennisagenda. Plant Research International.
- Svoray, T., Hassid, I., Atkinson, P. M., Moebius-Clune, B. N., & Van Es, H. M. 2015. Mapping soil health over large agriculturally important areas. *Soil Science Society of America Journal*, 79(5), 1420-1434.
- Tiktak, A., Boesten, J.J.T.I., Van der Linden, A.M.A. & Vanclooster, M. 2006. Mapping ground water vulnerability to pesticide leaching with a process-based metamodel of EuroPEARL. *Journal of Environmental Quality* (35), 1213- 1226.
- Tsiafouli, M. A., Thébault, E., Sgardelis, S. P., De Ruiter, P. C., Van Der Putten, W. H., Birkhofer, K., ... & Hedlund, K. 2015. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global change biology*, 21(2), 973-985.
- Van Bakel, J., Huinink, J., Prak, H., van der Bolt, F. 2005. HELP-2005 UITBREIDING EN ACTUALISERING VAN DE HELP-TABELLEN TEN BEHOEVE VAN HET WATERNOOD-INSTRUMENTARIUM. STOWA Rapportnummer 2005-16
- Van den Akker, J. J. H. 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil & Tillage Research*, 79(1), 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.021>
- Van den Akker, J.J.H., de Vries, F., Vermeulen, G.D., Hack-ten Broeke, M.J.D. & Schouten, T. 2012. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart, Alterra-rapport 2409, 80 pp.
- Van den Dool, K., Ros G.H., Geurts J.M. & A.H. van Loon (2021) Pilot Open Bodemindex: Een verkenning naar de bijdrage van de bodem aan grondwaterkwaliteit, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1846.N.21, pp 48.
- Van den Elsen, E., Knotters, M., Heinen, M., Römkens, P., Bloem, J., & Korthals, G. 2019. Noodzakelijke indicatoren voor de beoordeling van de gezondheid van Nederlandse landbouwbodems: Selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren voor het meten van de bodemgezondheid. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/475874>

-
- Van den Elsen, E., van Tol-Leenders, D., Teuling, K., Römkens, P., de Haan, J., Korthals, G., & Reijneveld, A. 2020. De staat van de Nederlandse landbouwbodems in 2018: Op basis van beschikbare landsdekkende dataset (CC-NL) en bodem-indicatorenlijst (BLN). (Wageningen Environmental Research rapport; No. 3048). Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/537281>.
- Van den Elsen, E., Antón, R., Cousin, I., Fuchs, L., de Haan, J., Teuling, K., Klimkowicz-Pawlas, A., Niedzwiecki, J., Pindral, S., Montagne, D., Scammacca, O., Weninger, T. 2022. A framework to assess soil threats, soil functions and soil-based ecosystem services. *EJP Soil SERENA Project deliverable, not public yet*.
- Van der Bolt, F. J. E., Kroon, T., Groenendijk, P., Renaud, L. V., van den Roovaart, J., Janssen, C. M. C. M., Loos, S., Cleij, P., van den Linden, A., & Marsman, A. 2020. Het Landelijk Waterkwaliteitsmodel: Uitbreiding van het Nationaal Water Model met waterkwaliteit ten behoeve van berekeningen voor nutriënten. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/524769>
- Van der Voort, T.S., Verweij, S.E., Fujita, Y. & Ros, G. H. 2023. Enabling soil carbon farming: presentation of a robust, affordable, and scalable method for soil carbon stock assessment. *Agronomy for Sustainable Development* 43, 1140. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-022-00856-7>
- Van der Wal, A., de Lijster, E., Dijkman, W., Zanen, M., van Essen, E., Sukkel, W., ... & Rutgers, M. (2016). Ontwerp Label Duurzaam Bodembeheer. CLM Onderzoek en Advies.
- 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. <https://www.foodlog.nl/artikel/de-bodemparadox-het-gaat-goed-met-de-bodem-zolang-je-alleen-naar-de-gewasop/allcomments/>
- Van Dijk, 2019. Nationaal Programma Landbouwbodems. Stuk van Jan Jacob van Dijk, namens de ketenpartijen aan de minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. Bijlage bij kamerbrief Min LNV. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-65d5a49a-480b-4c31-972c-ecdb7611d5aa/pdf>
- Van Doorn, M., Van Rotterdam, D. & Cusell, C. 2021. Klimaatmaatregelen en waterkwaliteit. Potentie en effecten in de agrarische polders ten oosten van de Weerribben en ten noorden van de Wieden. NMI rapport.
- Van Doorn, A., Waenink, R., Selin Noren, I., Sukkel, W., Heupink, D., Koopmans, C., Bruines, J., Deijl, L. 2022. Drempel- en streefwaarden voor de KPI's van de BiodiversiteitsMonitor Akkerbouw. *Wageningen Environmental Research*. <https://edepot.wur.nl/564802>
- Van Doorn, A., Reijs, J., Erisman, J. W., Verhoeven, F., Verstand, D., de Jong, W., ... & de Wolf, P. 2021. Integraal sturen op doelen voor duurzame landbouw via KPI's. Wageningen Environmental Research. edepot.wur.nl/548327
- Van Gerven, L., Jansen, S. & Groenendijk, P. 2019. Maatregel op de Kaart (Fase 1). Identificeren van kansrijke landbouwmaatregelen per perceel voor schonere grond- en oppervlaktewater. KIWK-notitie, 16 pp.
- Van Hal, O., & Wagenaar, J. P. 2021. Bodem & Klimaat Netwerk Veehouderij.
- Van Hattum, T., van Boekel, E. M. P. M., Massop, H. T. L., & Schuilings, C. 2011. P-reducerende maatregelen in het stroomgebied van de Hunze: inventarisatie van de meest kosteneffectieve P-reducerende maatregelen in het stroomgebied van de Hunze (No. 2183). Alterra.
- Van Kerckhoven, S., Riksen, M. & Cornelis, W. 2009. Afbakening van gebieden gevoelig aan winderosie in Vlaanderen, Eindrapport, Universiteit Gent, Vakgroep Bodembeheer, 79 pp.
- Van Leeuwen, J. P., Creamer, R. E., Cluzeau, D., Debeljak, M., Gatti, F., Henriksen C.B., Kuzmanovski, V., Menta, C., Peres, G., Picaud, C., Saby, N.P.A., Trajanov A., Trinsoutrot-Gattin, I., Visioli, G. & Rutgers, M. 2019. Modeling of Soil Functions for Assessing Soil Quality: Soil Biodiversity and Habitat Provisioning. *Frontiers in Environmental Science* 7, 113.
- Van Schöll L., Fujita, Y., Ros, G.H. 2019. Microbiële activiteit 0.5. OBI factsheet, 9 pp.
- Van Schöll L., Bussink D.W. & Ros, G.H. 2020. K-beschikbaarheid. OBI factsheet. 8 pp.
- Van Schöll L., Fujita, Y., Ros, G.H., Heinen, S., Janssen, S. 2021. Vocht: droogte- en nachtschade. OBI factsheet.
- Van Uffelen C.G.R., Bussink, D.W., & Reijneveld, J.A. 2004. Waardering van de bodemstructuur op basis van chemische karakteristieken. NMI-rapport 937.03-III.
- Van Wijnen, H. J., Rutgers, M., Schouten, A. J., Mulder, C., De Zwart, D., & Breure, A. M. 2012. How to calculate the spatial distribution of ecosystem services—natural attenuation as example from The Netherlands. *Science of the Total Environment*, 415, 49-55.
- Wienhold, B. J., Andrews, S. S., & Karlen, D. L. 2004. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. *Environmental Geochemistry and Health*, 26, 89-95.
- Wolf, P.L., Ros, G.H. & Berkhout, P. 2022. De bodem, daar is toch iets mee. Longread. Wageningen University & Research. 9 nov 2022. <https://www.wur.nl/nl/show-longread/de-bodem-daar-is-toch-iets-mee-.htm>

-
- Wösten, J. H. M., Veerman, G.J., de Groot, W.J.M. & Stolte, J. 2001. Waterretentie- En Doorlatendheids-
karakteristieken van Boven- En Ondergronden in Nederland: De Staringreeks. Wageningen.
- Zwart, K. B., Kikkert, A., Wolfs, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, A. (2013). Organische stofbalans
Excel-applicatie: onderdeel van het project sturen van de N-mineralisatie met kennis over organische stof.

Bijlage 1 Methoden voor bepaling van koolstofverzadiging

Vanuit het oogpunt van een zo hoog mogelijke bijdrage van bodembeheer, bemesting en grondbewerking op de koolstofvastlegging heeft het gebruik van een indicator op basis van de koolstofverzadiging de voorkeur. De methodiek hoe de koolstofverzadiging moet worden bepaald, kan variëren.

Er zijn in de wetenschappelijke literatuur verschillende benaderingen beschikbaar om de potentiële koolstofvastlegging in een bodem te beoordelen. Ten eerste geven experimentele studies met adsorptie-experimenten of langlopende veldexperimenten met behandelingen met veel organische stof toevoer (Abramoff et al., 2021; Lessmann et al., 2021) gedetailleerde inzichten in de onderliggende mechanismen en het potentieel om koolstof op te slaan, maar deze zijn tijdrovend, duur en vaak moeilijk te extrapoleren naar veldsituaties op een landbouwbedrijf. Ten tweede worden er procesmodellen zoals CENTURY, INITIATOR, NDICEA of RothC ingezet waarmee veranderingen in koolstofpools in kaart kunnen worden gebracht als gevolg van veranderingen in het beheer, rekening houdend met de weersomstandigheden en de belangrijkste landbouwpraktijken (Lugato et al., 2014, 2015; Lesschen et al., 2021). Hoewel deze modellen toepasbaar zijn op regionale en nationale schaal, slagen ze er vaak niet in de werkelijke variatie in de koolstofvoorraad op veld- en bedrijfsniveau na te bootsen zonder bedrijfsspecifieke kalibratie. Bovendien negeren de huidige modellen gewoonlijk de interactie met bodemmineralen en de functionele complexiteit van het bodemleven, die beide als sleutelfactoren voor koolstofstabilisatie zijn geïdentificeerd (Dynarksi et al., 2020; Lehmann et al., 2020), en hun toepasbaarheid staat nog steeds ter discussie. Ten derde worden er empirische, statistische benaderingen gebruikt om de impact van agro-ecosysteemeigenschappen op de huidige en potentiële SOC-niveaus in landbouwbodems te ontrafelen (Weismeier et al., 2019).

Statistische benaderingen variëren van eenvoudige lineaire regressie (Hassink, 1997; Chen et al., 2018) tot geostatistische (McBratney et al., 2003) en machine learning modellen zoals quantile regressie neurale netwerken en random forest regressie modellen (Heuvelink et al., 2020; Padarian et al., 2022; Grimm et al., 2008; Wiesmeier et al., 2014; Ros et al., 2023). In de studie van McBratney et al. (2003) wordt bijvoorbeeld de SCORPAN-benadering verder uitgewerkt, een empirische relatie tussen SOC en ruimtelijke variabelen voor bodemkwaliteit, klimaat, landgebruik, reliëf, moedermateriaal, tijd en ruimtelijke positie. Belangrijke factoren op microschaal zoals metaaloxiden, kleimineralogie en pH zijn minder relevant op grotere ruimtelijke schalen (Weismeier et al., 2019). Daarnaast vond Hassink (1997) een sterke correlatie tussen het gehalte aan fijne bodemdeeltjes en de fijne fractie SOC in een breed scala aan bodems en stelde voor om deze relatie te gebruiken om de mate van (stabiel) SOC-opslagpotentieel te schatten. Meer specifieke benaderingen zijn ontwikkeld voor bodems met verschillende kleigehalte, landgebruik en klimatologische regio's (Six et al., 2002; Feller & Bear, 1997, Chen et al., 2018). De statistische benaderingen (mits goed uitgevoerd) hebben het voordeel dat de voorspelde SOC-voorraden gebaseerd zijn op waarnemingen uit de echte wereld, waardoor een nauwkeurige kwantificering van de koolstofverzadigingsgraad op hoge ruimtelijke resolutie mogelijk is.

In een recente studie hebben Ros et al. (2023) de potentie voor koolstofopslag afgeleid van meer dan 21.123 metingen over heel Nederland. De ruimtelijke variatie in koolstofopslag varieerde sterk en kon worden voorspeld op basis van de bodemtextuur (kleigehalte, oxalaat-Fe en oxalaat-Al), landgebruik, geohydrologie (grondwaterdiepte) en bodemkwaliteit (pH, totaal N, P_{ox} , en P-verzadigingsgraad). Bij toepassing op alle landbouwpercelen bedroeg de huidige koolstofvoorraad van de 0-30 cm bodemlaag 119 ton C ha⁻¹ en kon deze met 21 tot 59 ton C ha⁻¹ worden verhoogd door veranderingen in landgebruik en bodemkwaliteit. De koolstofverzadigingscapaciteit, uitgedrukt als de verhouding tussen de werkelijke en de potentiële koolstofvoorraad, varieerde van 85 tot 93% in graslandgronden, van 55 tot 83% in akkerbouw en van 69 tot 91% in andere vormen van landgebruik. Gemiddeld bedroeg de koolstofverzadigingsgraad 75%.

Vergelijkbare observaties zijn afgeleid uit studies waarin procesmodellen worden gebruikt om de potentiële koolstofopslag van agronomische maatregelen te onderbouwen. Op Europese schaal hebben Lugato et al. (2014, 2015) de potentiële koolstofvastlegging van akkerbouwgronden geschat met het CENTURY-model, met specifieke aandacht voor de omzetting van akkerland in grasland, inwerken van stro, verminderde grondbewerking en gebruik van vanggewassen en groenbemesters. De omzetting in grasland gaf de hoogste

koolstofvastlegging, variërend tussen 0,4 en 0,8 t C ha⁻¹ jr⁻¹. De gemiddelde jaarlijkse koolstofvastlegging op korte termijn bedroeg 0,6 ton C ha⁻¹ jr⁻¹ voor de omschakeling van akkerbouw- naar graslandssystemen, en deze varieerde tussen 0,16 en 0,3 ton C ha⁻¹ jr⁻¹ wanneer het onderwerken van stro werd gecombineerd met verminderde bodembewerking, en kon oplopen tot 0,5 ton C ha⁻¹ jr⁻¹ wanneer maatregelen (zonder verandering van landgebruik) werden gecombineerd. De verwachte toename van de koolstofvoorraad was lineair over bijna een decennium, hoewel het 50 tot >100 jaar duurde om een nieuw evenwicht te bereiken. In 2050 was de verwachte verandering in de koolstofvoorraad voor Nederland hoger dan 20 ton C ha⁻¹ wanneer bouwland werd omgezet in grasland, en kon worden verhoogd met ten hoogste 5 ton C ha⁻¹ voor zowel de verwerking van stro in combinatie met niet-kerende grondbewerking als de volledige toepassing van groenbemesters. Deze ramingen op nationale schaal worden bevestigd door de analyse van Ros et al. (2023) waaruit blijkt dat verandering van landgebruik de koolstofvoorraad met 43 ton C ha⁻¹ kan doen toenemen voor akkerbouwgewassen op minerale bodems, terwijl een verbetering van de bodemkwaliteit (door een geoptimaliseerd bodem- en nutriëntenbeheer) zou leiden tot een toename met maximaal 13 ton C ha⁻¹. Onlangs hebben Lesschen et al. (2021) de potentiële koolstofvastlegging via landbouwmaatregelen geraamd op 0,16 tot 0,18 ton C ha⁻¹ per jaar in 2030 voor kleiachtige en zandige bodems in vergelijking met de baseline van 2017. Uitgaande van een lineaire respons over 33 jaar om het effect in 2050 te ramen, impliceert dit een verandering van de koolstofvoorraad van 5,4 tot 5,9 ton C ha⁻¹. Deze lagere raming hangt samen met de meer de conservatieve scenario's die zijn geanalyseerd, gezien het percentage granen in de vruchtwisseling, en het feit dat geen rekening is gehouden met veranderingen in landgebruik (van akkerland naar grasland).

Literatuur

- Abramoff, R.Z., Georgiou, K., Guenet, B., Torn, M.S., Huang, Y., Zhang, H., Feng, W., Jagadamma, S., Kaiser, K., Kothawala, D., Mayes, M.A., Ciais, P., 2021. How much carbon can be added to soil by sorption? *Biogeochemistry* 152, 127–142.
- Chen, S., Martin, M.P., Saby, N.P.A., Walter, C., Angers, D.A., Arrouays, D. 2018. Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potential in France. *Science of the Total Environment* 630, 389–400.
- Dynarski, K.A., Bossio, D.A., Scow, K.M., 2020. Dynamic stability of soil carbon: reassessing the “permanence” of soil carbon sequestration. *Frontiers in Environmental Science* 8, 514701.
- Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79 (1–4), 69–116.
- Grimm, R., Behrens, T., Marker, M., Elsenbeer, H., 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island — digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma* 146 (1–2), 102–113.
- 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.
- Heuvelink, G.B.M., Angelini, M.E., Poggio, L., Bai, Z., Bartjes, N.H., van den Bosch, R., Bossio, D., Estella, S., Lehmann, J., Olmedo, G.F., Sanderman, J. 2020. Machine learning in space and time for modelling soil organic carbon change. *Eur J Soil Sci.*, 72, 1607–1623.
- Lehmann, J., Hansel, C.M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzoni, S., Nunan, N., Reichstein, M., Schimel, J.P., Torn, M.S., Wieder, W.R., Kögel-Knaber, I. 2020. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience* 13, 529–534.
- Lesschen, J.P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G., Rietra, R. 2021. De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw. WEnR-report 3130, 88 pp, <https://edepot.wur.nl/557330>. in Dutch.
- Lessmann, M., Ros, G.H., Young, M.D., de Vries, W. 2021. Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management. *Glob Change Biol.* 28, 1162–1177.
- Lugato, E., Panagos, P., Bampa, F., Jones, A., Montanarella, L. 2014. A new baseline of organic carbon stock in European agricultural soils using a modelling approach. *Global Change Biology*, 20 (1), pp. 313–326.
- Lugato, E., Bampa, F., Panagos, P., Montanarella, L., Jones, A. 2015. Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Global Change Biology* 20, 11, 3557–3567.
- McBratney, A.B., Santos, M.M., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- Padarian, J., Minasny, B., McBratney, A., Smith, P., 2022. Soil carbon sequestration potential in global croplands. *PeerJ* 10:e13740. <https://peerj.com/articles/13740/>

-
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S.J., Gregorich, E.G. et al. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1981–1987.
- Weismeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Liess, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H-J, Kögel-Knabner, I., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333, 149-162.
- Wiesmeier, M., Barthold, F., Spörlein, P., Gess, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., Angst, G., von Lützow M., Kögel-Knabner, I., 2014. Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany). *Geoderma Regional* 1, 67-78.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research

Open Teelten

Edelhertweg 1

Postbus 430

8200 AK Lelystad

T (+31)320 29 11 11

www.wur.nl/openteelten

Rapport WPR-OT 1030

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
