



Noodzakelijke indicatoren voor de beoordeling van de gezondheid van Nederlandse landbouwbodems

Selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren voor het meten van de bodemgezondheid

Erik van den Elsen, Martin Knotters, Marius Heinen, Paul Römkens, Jaap Bloem, Gerard Korthals

Noodzakelijke indicatoren voor de beoordeling van de gezondheid van Nederlandse landbouwbodems

Selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren voor het meten van de bodemgezondheid

Erik van den Elsen¹, Martin Knotters¹, Marius Heinen¹, Paul Römkens¹, Jaap Bloem¹, Gerard Korthals²

1 Wageningen Environmental Research

2 CSE, NIOO-KNAW/WUR

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema 'Wettelijke Onderzoekstaken (KB-WOT)' (projectnummer KB-24-004-023.01).

Wageningen Environmental Research

Wageningen, april 2019

Gereviewd door:

Dr. Saskia Visser, Dr. Mirjam Hack

Akkoord voor publicatie:

Dr. Mirjam Hack, teamleider van Bodemfysica en Landgebruik

Rapport 2944

ISSN 1566-7197


Van den Elsen, H.G.M., M. Knotters, M. Heinen, P.F.A.M. Römkens, J. Bloem, G.W. Korthals, 2019. *Noodzakelijke indicatoren voor de beoordeling van de gezondheid van Nederlandse landbouwbodems; Selectie van fysieke, chemische en biologische indicatoren voor het meten van de bodemgezondheid*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2944. 82 blz.; 5 fig.; 41 tab.; 91 ref.

Referaat. Een gezonde bodem is cruciaal voor de mens. Om die bodemgezondheid te kunnen beoordelen, moet allereerst de bodemgezondheid kunnen worden gekwantificeerd. Dat kan worden gedaan aan de hand van een beperkt aantal fysieke, chemische en biologische indicatoren. In dit rapport wordt beschreven hoe aan de hand van literatuuronderzoek wordt bepaald welke indicatoren het geschiktst zijn om bodemgezondheid mee te bepalen. Ook de invloed van heersende omgevingsvariabelen wordt beschreven. Ten slotte wordt een vijftal aanbevelingen gedaan.

Abstract. A healthy soil is crucial for mankind. In order to be able to assess soil health, soil health must first be quantified. This can be done on the basis of assessing a limited number of physical, chemical and biological indicators. This report describes how, on the basis of literature research, it is determined which indicators are most suitable for determining soil health. The influence of prevailing environmental variables is also described. Finally, five recommendations are made.

Trefwoorden: soil health index, SHI, bodemgezondheid, duurzaam bodemgebruik, metacondities

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/475874> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

 2019 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001. Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 2944 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Martin Wimmer – iStockphoto / Getty Images

Inhoud

	Verantwoording	5
	Woord vooraf	7
	Samenvatting	9
1	Inleiding	11
	1.1 Achtergrond	11
	1.2 Aanleiding	12
	1.3 Een Soil Health Index voor Nederland	13
	1.3.1 Ontwikkeling van SHI-indicatoren	13
	1.3.2 Afbakening en definities	13
	1.3.3 Voorwaarden voor indicatoren	14
	1.3.4 Afhankelijkheid van metacondities: bodemsoort, textuur, vocht, temperatuur en veldvariabiliteit	14
	1.3.5 Interpretatie van meetwaarden in verschillende bodemtypen	14
	1.3.6 Natuurlijke variatie in het veld	15
	1.3.7 Uiteindelijke lijst met fysische, chemische en biologische indicatoren	15
	1.3.8 Beschrijving van het selectieproces van fysische, chemische en biologische indicatoren	15
2	Fysische indicatoren	16
	2.1 Korte inleiding	16
	2.2 De belangrijkste fysische bodembedreigingen	16
	2.3 Initiële keuze van indicatoren gebaseerd op literatuuronderzoek (longlist)	17
	2.4 Meetmethoden voor de bepaling van de fysische indicatoren	23
	2.4.1 Aggregaatstabiliteit	23
	2.4.2 Droge bulkdichtheid	24
	2.4.3 Indringingsweerstand	25
	2.4.4 Watervasthoudend vermogen	25
	2.4.5 Doorlatendheid bij verzadiging	26
	2.4.6 Textuur	26
	2.4.7 Alternatieve meetmethoden	27
	2.5 Discussie en uiteindelijke selectie van indicatoren (shortlist)	27
	2.5.1 Invloed metacondities (temperatuur en watergehalte in de bodem) op de geselecteerde indicatoren	27
	2.5.2 Voorstel fysische bodemgezondheidsindicatoren (shortlist)	30
	2.6 Ter informatie	32
3	Chemische indicatoren	33
	3.1 Inleiding: nut en noodzaak van een goede bodemchemische toestand	33
	3.2 De belangrijkste chemische bodembedreigingen	33
	3.3 Initiële keuze van indicatoren gebaseerd op literatuuronderzoek (longlist)	35
	3.4 Meetmethoden voor de bepaling van de indicatoren	37
	3.4.1 Overzicht van de mate van complexiteit van de methoden, kosten en bekendheid bij labs (in NL)	38
	3.4.2 Organische stof	39
	3.4.3 Electrical Conductivity (EC)	39
	3.4.4 Beschikbaar N	40
	3.4.5 Beschikbaar P	40
	3.4.6 Beschikbaar K	41

3.4.7	Zuurgraad pH	41
3.4.8	Micronutriënten	42
3.4.9	Macronutriënten overig	42
3.4.10	Metalen	43
3.5	Discussie en uiteindelijke selectie van indicatoren (shortlist)	43
3.5.1	Afhankelijkheid van indicatoren van bodemtype en temporeel variabele omstandigheden	46
3.5.2	Nadere toelichting van de invloed van bodemfactoren op de scores van de indicatoren	47
4	Biologische indicatoren	48
4.1	Inleiding bodembioïologie en bodemgezondheid	48
4.2	De belangrijkste bedreigingen voor de levende bodem	49
4.3	Hoe meet je bodembiodiversiteit?	49
4.3.1	Potentieel Mineraliseerbare N (PMN)	52
4.3.2	Heet Water extraheerbaar C (HWC)	52
4.3.3	Schimmelbiomassa	52
4.3.4	Bacteriebiomassa	52
4.3.5	Nematoden	52
4.3.6	Regenwormen	53
4.4	Initiële keuze van indicatoren gebaseerd op literatuuronderzoek (longlist)	53
4.5	Uiteindelijke selectie van biologische indicatoren (shortlist)	56
5	Variatie van SHI-indicatoren onder invloed van metacondities	57
5.1	Ruimtelijke variatie van SHI-indicatoren	57
5.2	Relatie tussen SHI-indicatoren en metacondities	58
5.2.1	Metaconditie bodemvocht	59
5.2.2	De invloed van bodemvocht op fysische, chemische en biologische indicatoren	60
5.2.3	Metaconditie bodemtemperatuur	60
5.2.4	De invloed van bodemtemperatuur op biologische, chemische en fysische indicatoren	62
5.3	Invloed van metacondities op de interpretatie van de indicatormeetwaarden	63
6	Aanbevelingen	64
	Literatuur	65
Bijlage 1	Uitgebreide beschrijving van een aantal fysische indicatorsets	70
Bijlage 2	Relatie indringingsweerstand en beworteling	74
Bijlage 3	Kwalitatieve inschatting van de relatie tussen indicator, mate van stabiliteit, complexiteit van meting en kosten	76
Bijlage 4	Kwalitatieve inschatting van de relatie tussen indicator en bodembedreiging	77
Bijlage 5	Kwalitatieve inschatting van de relatie tussen indicator en ES volgens Bünemann et al.	78
Bijlage 6	Indeling risicoklassen organische stof dynamiek bodem	79
Bijlage 7	Voorbeelden van beslisschema's t.b.v. micronutriënten	80

Verantwoording

Rapport: 2944

Projectnummer: 5200044809

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van onze eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord Referent die het heeft beoordeeld,

functie: Programmaleider
naam: Dr. Saskia Visser
datum: 01-03-2019

functie: Teamleider
naam: Dr. Mirjam Hack
datum: 01-03-2019

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack
datum: 01-03-2019

Woord vooraf

Eind 2018 kwam vanuit Kennisbasis Wettelijke Omgevingstaken (KB-WOT) een subsidie vrij waarmee de eerste fase van het gehele projectplan voor het ontwikkelen van de Soil Health Index voor Nederland, namelijk het ontwikkelen van de Soil Health Index (SHI) indicatoren, kon worden uitgevoerd. De Soil Health Index is een tool waarmee m.b.v. fysische, chemische en biologische metingen aan grondmonsters en veldmetingen een uitspraak kan worden gedaan over de bodemgezondheid. Dit rapport bevat de uitwerking van de eerste fase van het complete projectvoorstel voor een SHI voor Nederland en beschrijft de ontwikkelstappen van de indicatorset en de uiteindelijke lijst met geselecteerde fysische, chemische en biologische indicatoren. Deze indicatorset dient als basis voor de verdere uitwerking van de SHI-tool.

Vanuit WENR en CSE / NIOO-KNAW/WUR hebben de volgende mensen met kennis van verschillende vakgebieden meegewerkt aan de totstandkoming van dit rapport:

Erik van den Elsen	WENR	Projectleiding en coördinatie
Martin Knotters	WENR	Statistiek
Marius Heinen	WENR	Bodemfysica
Paul Römkens	WENR	Bodemchemie
Jaap Bloem	WENR	Bodembioologie
Gerard Korthals	CSE, NIOO-KNAW/WUR	Bodembioologie

De auteurs bedanken Saskia Visser (programmameider WENR) en Mirjam Hack (teamleider WENR) voor hun waardevolle commentaar bij het concept van dit rapport.

Samenvatting

Inleiding

De bodem waarop we leven, is cruciaal voor de mens. Een gezond bodemecosysteem is belangrijk voor de diensten die de bodem levert, nu en in de toekomst. Om de bodemgezondheid te kunnen meten, behouden en verbeteren, hebben we gereedschap nodig, zoals de Soil Health Index. Om de gezondheid van het gehele bodemecosysteem te kunnen bepalen, is een selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren nodig. Dit selectieproces vindt plaats aan de hand van recente metastudies en de CASH-manual, waarvan de SHI is afgeleid.

Allereerst is een aantal definities en afbakeningen opgesteld. De indicatoren moeten effectief, praktisch toepasbaar en voldoende nauwkeurig zijn. Hierbij moeten we rekening houden met diverse variabelen die de meetwaarden van indicatoren kunnen beïnvloeden: de metacondities. Dit zijn onder andere bodemtype, bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur.

Fysische indicatoren

De Nederlandse landbouw enerzijds en de waterbeheerders anderzijds zijn gebaat bij een gezonde bodem, inclusief diverse fysisch gerelateerde bodemeigenschappen. Centraal daarin staat de bodemstructuur. Om duurzaam gebruik te kunnen blijven maken van de bodem als productiemiddel is het belangrijk dat structuurbederf zo veel mogelijk wordt tegengegaan.

Uitgaande van internationaal onderzoek komen we, voor een eerste selectie van indicatoren, uit op een lijst van tien indicatoren. Van deze tien wordt, op basis van de belangrijkste bodembedreigingen, een subset van vier indicatoren beschouwd. De bijbehorende meetmethoden die voldoen aan gestelde criteria en de gevoeligheid voor temperatuur, bodemvochtgehalte en bodemtypen worden beschreven. De uiteindelijke selectie van indicatoren bevat aggregaatstabiliteit, indringingsweerstand, watervasthoudend vermogen en textuur. Als add-on-indicatoren komen infiltratiecapaciteit en droge bulkdichtheid in aanmerking.

Chemische indicatoren

Het handhaven van de chemische bodemvruchtbaarheid is een van de belangrijkste beheersinstrumenten van de landbouwer. De intensiteit van de Nederlandse landbouw geeft een hoge bodembelasting met zowel nutriënten als ongewenste stoffen die in mest en/of andere bodemverbeteraars aanwezig zijn.

Uitgaande van internationaal onderzoek komen we uit op een eerste selectie van negentien indicatoren. Op basis van de gestelde criteria blijven hiervan drie primaire indicatoren over: organische stof, pH en beschikbare nutriënten NPK. Als add-on-indicatoren stellen we EC, gehalte aan zware metalen en overige macro- en micronutriënten voor. Van de geselecteerde set wordt ook de gevoeligheid voor metacondities bodemtype, bodemvochtgehalte, bodemtemperatuur en bemesting gegeven.

Biologische indicatoren

Bij bodemfuncties als omzetting en levering van nutriënten, vorming en instandhouding van bodemstructuur, waterregulatie (infiltratie en vasthouden), onderdrukking van plantenziekten en koolstofvastlegging is het bodemleven van groot belang. Alle in de bodem levende organismen zijn op de een of andere manier betrokken bij de nutriëntenkringloop. Afname van deze biodiversiteit is een van de belangrijkste bodembedreigingen. Bodembiodiversiteit omvat veel aspecten. Daarom zijn er veel indicatoren om onderdelen en functies van de bodembiodiversiteit te meten en te begrijpen. Na evaluatie aan de hand van de gestelde criteria stellen we minimaal drie indicatoren voor: potentieel mineraliseerbare stikstof, labiele koolstof en nematodenaantallen en diversiteit, met als add-on bacteriële biomassa, schimmelbiomassa en regenwormen (aantallen en diversiteit). Met name voor biologische indicatoren is het belangrijk om rekening te houden met bodemtype (grondsoort en landgebruik), bodemvocht en temperatuur tijdens het voorgaande seizoen. Daarom wordt onder gematigde omstandigheden in voor- en najaar gemeten. Er is nog weinig kennis over seizoensvariatie.

Metacondities

Omdat bodemgezondheidsindicatoren worden gemeten in het veld of aan monsters uit het veld, werken veldomstandigheden door in uiteindelijke meetresultaten. De belangrijkste veldomstandigheden zijn ruimtelijke variatie in bodemeigenschappen, zowel horizontaal als verticaal, bodemvochtgehalte, bodemtemperatuur en bodemtype. Voor de ruimtelijke variatie kan deels worden gecompenseerd door het optimaliseren van de steekproefopzet.

Het bodemvochtgehalte heeft invloed op zowel de meetmethodiek als de meetwaarde van een aantal indicatoren. De bodemtemperatuur heeft invloed op de meetwaarde van een aantal indicatoren.

Aanbevelingen

- a. Een beoordeling van de bodemgezondheid vereist afzonderlijke scorefuncties (omzetting van indicatormeetwaarde naar een score, bv. van 0-100) voor een aantal verschillende bodemtypen. Op hoofdlijnen maken we daarbij onderscheid naar zand, klei en veen, maar waarschijnlijk moet dit verder uitgesplitst worden naar landgebruik. De scoringsfuncties vergen nader onderzoek.
- b. Voor het krijgen van een globale indruk van de bodemgezondheid van landbouwgrond, voldoet de voorgestelde minimale set van tien 'A'-indicatoren. Echter, voor een breder inzicht in het functioneren van de bodem of bij specifieke tekortkomingen, moeten ook de add-on-indicatoren worden bepaald om de bodemgezondheid vast te stellen. Een nadere specificering van dergelijke specifieke omstandigheden is hier niet verder uitgewerkt, maar vereist wel dat deze indicatoren opgenomen worden in de meetset.
- c. Een correcte interpretatie van de gemeten bodemgezondheidsindicatoren vereist voor een aantal indicatoren informatie over bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur. Deze dienen daarom te worden (mee)gemeten tijdens de meting van de primaire indicator of monsternamen in het veld en, voor zover relevant, samen met de weersgeschiedenis van het perceel in kwestie te worden beschouwd bij de interpretatie van de indicatorwaarde. Dit geldt feitelijk voor alle indicatorenklassen (fysica, chemie en biologie).
- d. Het verkrijgen van een nauwkeurig en compleet beeld van de SHI-indicatoren vereist dat de metingen zo veel mogelijk op hetzelfde tijdstip en aan hetzelfde monster gedaan worden.
- e. Bodemtemperatuur en bodemvocht en met name de seizoensvariatie, hebben invloed op de indicatoren. Verder onderzoek is nodig om de interpretatie van indicatorwaarden te verbeteren.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De bodem waarop we leven en onze activiteiten ontplooiën, is cruciaal voor de mens. De bodem is de bron van een belangrijk deel van ons voedsel, leefgebied voor dieren en plaats voor natuur, maar is ook van belang voor de hele voedselkringloop, waterhuishouding, schone lucht en onze behoefte aan vezels. Figuur 1 geeft een samenvatting weer van de basisfuncties van de bodem.

Afgeleide 'diensten' die de bodem ons 'levert', zijn onder andere het reinigen van water, opslag van regenwater, opslag van voedingsstoffen (nutriënten) en CO₂ en het reguleren van het klimaat. Dit soort diensten worden Ecosysteemdiensten, ofwel Eco System Services (ESS) genoemd (Figuur 1). Het belang van de bodem en zijn natuurlijke voorraden en de ecosysteemdiensten die zij leveren, worden nog niet altijd op waarde geschat (Dominati, 2010).



Figuur 1 De bodemfuncties schematisch weergegeven (bron: Umweltbundesamt, Oostenrijk).

De laatste decennia wordt de mens zich echter steeds meer bewust van het belang van een goed functionerende bodem. Dit is zeker van belang als we spreken over bodems die worden gebruikt voor gewas- en veevoerproductie. We spreken niet alleen van een goed functionerende bodem als die bodem de door de mens gewenste diensten kan verlenen, maar vooral ook wanneer deze bodem dit in

de toekomst kan blijven doen. We spreken dan van duurzaam gebruik. Hiervoor is het nodig dat het zogeheten ecosysteem van de bodem goed functioneert (Brussaard, 1997), zodat de bodem zich voldoende kan herstellen na het leveren van zijn diensten en tegelijkertijd voldoende veerkracht heeft om bedreigingen van buitenaf, die het goed functioneren van het ecosysteem van de bodem ondermijnen, te weerstaan. Onder bedreigingen van buitenaf verstaan we dan invloeden zoals verdroging, overstroming, verzilting, erosie etc.

Een goed functionerend bodemecosysteem is vooral belangrijk als de bodem ons diensten moet leveren zoals het produceren van voedsel, zowel primair (akkerbouw) als secundair (veeteelt). Een goed functionerend bodemecosysteem bezit fysische, chemische en biologische eigenschappen die ervoor zorgen dat deze voedselproductie duurzaam is, dus met zo min mogelijk extern toegevoegde nutriënten. Hierbij moet er dan wel voor worden gezorgd dat de output van de bodem (gewasopbrengst) en de input (organische meststoffen, groenbemesters) met elkaar in evenwicht zijn en dat het bodemecosysteem de gelegenheid krijgt de kringloop te sluiten. Dat wil zeggen dat toegevoegde stoffen door de bodembioïecologie en bodemchemie worden omgezet in nutriënten.

Het begrip 'bodemgezondheid' heeft een iets andere betekenis dan het begrip 'bodemkwaliteit'. Onder bodemkwaliteit wordt verstaan (vertaald uit het Engels): 'De capaciteit van een specifiek soort bodem om te functioneren, binnen natuurlijke of beheerde ecosysteemgrenzen, om de productie van planten en dieren te handhaven, water- en luchtkwaliteit te handhaven of te verbeteren en de gezondheid en bewoning van de mens te ondersteunen' (Karlen, 1997). De definitie van bodemgezondheid is: 'De voortdurende capaciteit van de bodem om te functioneren als een vitaal levend systeem, binnen de grenzen van het ecosysteem en bodemgebruik, om de biologische productiviteit te handhaven, de kwaliteit van lucht- en wateromgevingen te handhaven en de plant-, dier- en menselijke gezondheid te bevorderen' (Doran, 2000). Deze definitie, met wat meer de nadruk op de bodem als onderdeel van een groter ('het') ecosysteem, is wat 'holistischer' van karakter en omvat in principe alle bodemfuncties. Bij bodemkwaliteit daarentegen ligt de nadruk wat meer op 'productie'. Omdat wij de bodem graag zien als meer dan alleen een productiemedium, gebruiken we liever de term bodemgezondheid, hoewel tegenwoordig beide begrippen door elkaar worden gebruikt.

Het functioneren van het ecosysteem bodem is af te lezen aan een hele serie bodemeigenschappen die als indicator aangeven hoe het bodemecosysteem functioneert. Deze indicatoren kunnen worden gemeten. Er kan een set van kritische fysische, chemische en biologische (FCB) indicatoren worden aangewezen die representatief is voor het functioneren van de bodem. Elk van de indicatoren zegt iets over de betreffende eigenschap, maar het gehele scala aan indicatoren zegt iets over het functioneren van het gehele ecosysteem. De indicatoren hebben immers invloed op elkaar. De Soil Health Index brengt deze indicatoren bij elkaar, beoordeelt ze en kent een kwaliteitswaarde toe in de vorm van 'scores' aan de gemeten indicatoren.

Na het beoordelen van deze scores kan een advies worden gegeven om eventuele lage(re) scores te verhogen of te verbeteren door beheersmaatregelen te nemen. Het bodemecosysteem kan door deze beheersmaatregelen beter in balans worden gebracht. Vaak zal het even duren voordat deze beheersmaatregelen effect sorteren; processen in de bodem gaan over het algemeen langzaam.

1.2 Aanleiding

Tegen de bovengeschetste achtergrond is het voor landeigenaren, landgebruikers en bestuurders belangrijk 'grip' te krijgen op het medium bodem en de kwaliteit ervan voor verschillende doeleinden. Als we specifiek kijken naar de ecosystemediensten die te maken hebben met voedselproductie, (als ecosystemedienst vertegenwoordigd door '③ medium voor plantengroei' in Figuur 1), willen we graag de bodemkwaliteit kunnen beoordelen en zo nodig zo efficiënt mogelijk de eigenschappen die minder of slecht scoren verbeteren. Duurzaamheid is hier het sleutelwoord: het veiligstellen van de bodemgezondheid en het gebruik van de bodem waarborgen voor toekomstige generaties.

1.3 Een Soil Health Index voor Nederland

Nederlandse provincies, waaronder de provincie Gelderland, hebben de verantwoordelijkheid voor een duurzaam gebruikte bodem onder meer vormgegeven in programma's ('Meerjarenprogramma bodem en ondergrond' in Gelderland) met een looptijd van 2015-2020. 'Beheerders' van bodem, dus ook provincies, hebben de behoefte om de bodemgezondheid van bodems, zowel enkelvoudig als herhaaldelijk in de tijd (monitoring), op objectieve, wetenschappelijk verantwoorde wijze te kunnen bepalen. Vanaf 2016 is provincie Gelderland, samen met Wageningen Environmental Research (WENR) en Centre for Soil Ecology (CSE), op zoek naar een 'tool' die wat kan zeggen over de actuele bodemgezondheid en ook maatregelen kan bieden die de bodemgezondheid verbeteren. Uitgangspunt hierbij is dat dit gereedschap instemming van en draagvlak heeft bij een brede groep van betrokkenen. Primair zou het een 'universele' tool voor beheerders van landbouwgronden en voor boeren moeten worden, die voor meerdere doelen ingezet kan worden (meten van bodemgezondheid, doelgericht verbeteren van bodemgezondheid). Voorbeelden voor andere toepassingen zijn waardebeoordeling van de grond bij verkoop of pacht, beleidsmonitoring, meerjarige trendanalyses etc. Dit is echter niet het primaire doel van deze tool, maar we voorzien dat de tool hiervoor wel gebruikt kan gaan worden.

Omdat we stellen dat de tool laagdrempelig en toegankelijk moet zijn voor iedereen, dus ook voor boeren, is het belangrijk dat de tool ook betaalbaar moet blijven. Hierdoor willen we gebruik gaan maken van een beperkt aantal indicatoren – om de kostprijs van de bepalingen zo laag mogelijk te houden –, terwijl de uitkomst van de SHI-bepaling toch wetenschappelijk verantwoord is. Het streven is te komen tot een set van tien tot zestien indicatoren, met mogelijk een onderscheid tussen 'absoluut noodzakelijke indicatoren' en 'additionele indicatoren' (add-on-indicatoren). Deze laatste categorie zal de reeks absoluut noodzakelijke indicatoren aanvullen en een completer beeld geven van de bodemgezondheidstoestand. Omdat er in geval van de additionele indicatoren meer metingen in het geding zijn, zal de kostprijs echter ook hoger zijn. Prijzen van bepalingen en de totaalprijs van een SHI-meting is bij het opstellen van de indicatorlijst niet meegenomen.

1.3.1 Ontwikkeling van SHI-indicatoren

Bij de ontwikkeling van een indicatorset van fysische, chemische en biologische indicatoren die het best gebruikt kunnen worden in de SHI, is uitgegaan van (recente) bestaande vakliteratuur met betrekking tot bodemgezondheidstools (zie literatuurlijst), de Cornell Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH)-manual (Moebius-Clune, 2017) en de bij de auteurs van dit rapport aanwezige vakkennis.

Uit de literatuur is vooral het artikel van Bünemann et al. (2018) gebruikt als belangrijk achtergrondartikel. Dit artikel geeft een uitgebreid en recent overzicht van bodemgezondheidstools die in 2018 in gebruik zijn en hun eigenschappen, inclusief een overzicht van de fysische, chemische en biologische indicatoren die deze tools gebruiken. De keuze van indicatoren voor een Nederlandse SHI is mede gebaseerd op de bevindingen van Bünemann et al. (2018).

Stewart et al. (2018) geven een bruikbaar overzicht van de gebruikte indicatoren bij studies naar de effecten bij gebruik van *cover crops* en *no-tillage*-technieken in 192 wetenschappelijke artikelen. Dit artikel, waarbij de gevoeligheid van de gebruikte indicatoren voor management wordt onderzocht, wordt in dit rapport ook gebruikt.

De CASH-manual, geschreven door Moebius-Clune (2017), is geraadpleegd omdat bij het opzetten van de SHI de methodiek van de CASH (analyse van de bodem aan de hand van FCB-indicatoren, presentatie van de meetresultaten aan de hand van scores voor de afzonderlijke indicatoren en advisering voor verbetering van de bodemgezondheid aan de hand van scores) zal worden gevolgd.

1.3.2 Afbakening en definities

Voordat een lijst met belangrijkste fysische, chemische en biologische (FCB) indicatoren kan worden opgesteld, moeten we eerst definiëren waarvoor we deze indicatoren willen gebruiken en wat we in deze context, of de hier bedoelde toepassing, verstaan onder de Soil Health Index. Zoals immers hierboven al werd genoemd, kent de bodem vele functies en het is daarom nodig om te bepalen voor welke bodemfunctie en, daarbinnen, voor welke toepassing de lijst van belangrijkste indicatoren moet

worden gebruikt. In de eerste stap van het ontwikkelen van de SHI-indicatorset hebben we een aantal aspecten gedefinieerd van de uiteindelijke SHI-tool:

1. De SHI is een tool die de bodemgezondheid kan kwantificeren.
2. De SHI kan gebruikt worden om de bodemgezondheid gericht te optimaliseren en ondersteunt daarmee beslissingen t.b.v. (in eerste instantie) duurzame akkerbouw en veehouderij.
3. Onder *duurzaam* verstaan we het verbeteren – of ten minste handhaven – van de gezondheid en functionaliteit van het bodemecosysteem. Hiermee wordt tevens bedoeld dat ook de aangrenzende systemen (lucht en (grond)water) geen nadelige gevolgen mogen ondervinden.
4. Optimaliseren betekent het bereiken van een optimaal functionerend bodemecosysteem waarbij de fysische, chemische en biologische indicatoren optimaal zijn voor het onderliggende bodemtype en landgebruik.
5. Het optimaliseren van indicatoren gebeurt door het adviseren van specifieke maatregelen, bijvoorbeeld met behulp van een zogenaamde 'toolbox', waaruit de voor een gebruiker geschiktste maatregelen kunnen worden gekozen.

1.3.3 Voorwaarden voor indicatoren

Bij het opstellen van een lijst van indicatoren zijn de bruikbaarheid en het nut voor de Nederlandse landbouw steeds het uitgangspunt geweest, daarom zijn in elk van de inleidende paragrafen bij de hoofdstukken van de fysische, chemische en biologische indicatoren ook beknopt de prominentste bodemproblemen in Nederland wat betreft fysica, chemie en biologie beschreven. Dit wordt hier benadrukt, omdat veel literatuur over bodemgezondheid gaat over bodems en landbouwsystemen buiten Nederland.

De indicatorlijst voor de Nederlandse landbouw is als volgt opgesteld:

1. Allereerst hebben we aan de hand van de literatuur een longlist gemaakt met bodemindicatoren op het gebied van fysica, chemie en biologie die relevant zijn voor het beoordelen van bodemgezondheid in Nederland.
2. Om tot een uiteindelijke lijst met indicatoren te komen (een shortlist), hebben we de longlist beoordeeld aan de hand van een aantal criteria die hieronder worden genoemd.

De geselecteerde indicatoren (fysisch, chemisch en biologisch) moeten voldoen aan de volgende voorwaarden:

De indicatoren moeten:

1. effectief zijn (gevoelig voor management (uitgezonderd textuur) en interpreteerbaar zijn);
2. praktisch toepasbaar zijn, dat wil zeggen relatief makkelijk en zo goedkoop mogelijk te bepalen met een korte responstijd van metingen;
3. voldoende nauwkeurig zijn (de herhaalnauwkeurigheid is aanvaardbaar voor onze toepassing binnen de SHI).

1.3.4 Afhankelijkheid van metacondities: bodemsoort, textuur, vocht, temperatuur en veldvariabiliteit

Metingen van de waarde van de indicatoren zullen afhankelijk zijn van een hele reeks omstandigheden en variaties in omgevingskenmerken, zoals bodemsoort, textuur, plaats (veldvariabiliteit), temperatuur en bodemvochtgehalte. In deze lijst kan een onderscheid gemaakt worden in variatie in meetwaarden die inherent veroorzaakt worden door de hoedanigheid van de bodem, bijvoorbeeld bodemtype en textuur.

1.3.5 Interpretatie van meetwaarden in verschillende bodemtypen

De betekenis van de meetwaarde van fysische, chemische of biologische indicatoren voor bodemgezondheid hangt af van het bodemtype of, in eenzelfde bodemtype, van textuur. Daarom zal bij de beoordeling van een meetwaarde het bodemtype en/of de textuur moeten worden meegewogen. Bijvoorbeeld zal een bepaalde indringingsweerstand x in klei anders beoordeeld dienen te worden dan diezelfde waarde x in veengrond: wat in klei als een lage indringingsweerstand wordt beschouwd, is in

veen een hoge indringingsweerstand. Dit betekent dat de *scorefunctie* (vertaalfunctie van meetwaarde naar score 0-100) voor klei er anders uit zal zien dan de scorefunctie voor veengrond.

1.3.6 Natuurlijke variatie in het veld

De meetwaarde van indicatoren, gemeten op puntlocaties, zal binnen percelen variatie op korte afstand vertonen. Deze zogenaamde veldvariabiliteit treedt in meer of mindere mate op bij het meten van elke fysische, chemische of biologische variabele en geeft aan dat de bodem op geen enkele plek exact hetzelfde is. Door bij een meting van de bodemgezondheid binnen een perceel meerdere monsters te nemen op verschillende (willekeurig gekozen) locaties en deze monsters te mengen, kan een perceelgemiddelde waarde worden verkregen voor een bepaalde indicator. Deze techniek kan niet voor alle indicatoren worden toegepast. Deze steekproeftechniek wordt in dit verslag verder niet besproken, omdat het in dit rapport alleen maar gaat over de selectie van geschikte indicatoren. De term veldvariabiliteit wordt hier echter wel genoemd om aan te geven dat hier bij het ontwikkelen van de meettechniek voor de SHI wel rekening mee moet worden gehouden.

1.3.7 Uiteindelijke lijst met fysische, chemische en biologische indicatoren

Elk hierop volgend hoofdstuk beschrijft het selectieproces van indicatoren en sluit af met een lijst van geselecteerde indicatoren voor zowel fysische, chemische als biologische eigenschappen van de bodem. De gepresenteerde lijsten zijn indicatoren die, gegeven het hier benoemde doel, het relevantst zijn om te worden gebruikt binnen de Soil Health Index in Nederland. Daarbij maken we onderscheid tussen absoluut noodzakelijke indicatoren en context-specifieke of additionele indicatoren. Of de hele indicatorset ook daadwerkelijk gebruikt gaat worden binnen de SHI, hangt van een aantal andere factoren af, zoals van de complexiteit en/of kostprijs van de meting.

Hoewel tijdens de selectie van indicatoren al rekening is gehouden met de complexiteit van de meettechniek (zie paragraaf 1.3.3), kan het zijn dat bij een uiteindelijke selectie van indicatoren die daadwerkelijk voor de SHI gebruikt gaan worden, bepaalde indicatoren toch afvallen omdat de betreffende meettechniek niet praktisch bruikbaar is of omdat een bepaalde meettechniek te duur blijkt. Deze afwegingen blijven in dit document buiten beschouwing, omdat het bij de selectie puur om de wetenschappelijke relevantie van de indicatoren gaat.

1.3.8 Beschrijving van het selectieproces van fysische, chemische en biologische indicatoren

In de volgende drie hoofdstukken wordt het selectieproces van de fysische, chemische en biologische indicatoren beschreven en worden aan het eind de resulterende indicatoren gepresenteerd. De volgende hoofdstukken hebben een identieke opbouw:

1. Korte inleiding
2. Belangrijkste hedendaagse bodembedreigingen in Nederland, met de daarbij bijbehorende indicatoren
3. Initiële keuze van indicatoren gebaseerd op literatuuronderzoek
4. Beschikbare meetmethoden voor indicatorlijst met voor- en nadelen
5. Uiteindelijke lijst van geschiktste/geselecteerde indicatoren

2 Fysische indicatoren

2.1 Korte inleiding

De Nederlandse landbouw enerzijds en de waterbeheerders (verantwoordelijk voor afvoer en aanvoer van water in landbouwgebieden) anderzijds, zijn gebaat bij een gezonde bodem, inclusief diverse fysisch gerelateerde bodemeigenschappen. Centraal daarin staat de bodemstructuur. Deze is deels bepaald door de lokale situatie, via de textuur (zand-, klei-, zavelgronden) en het gehalte van organische stof (bijvoorbeeld veengebieden), welke niet, of niet gemakkelijk, beïnvloedbaar zijn. Structuurbederf kan door menselijk handelen ontstaan (Hack-ten Broeke et al., 2009). Verdichting bijvoorbeeld ontstaat als gevolg van het gebruik van zware landbouwvoertuigen, grondbewerking onder te natte omstandigheden of verdwijnen van organische stof in de bovengrond. Structuurbederf kan ook ontstaan tijdens extreme klimatologische omstandigheden, bijvoorbeeld korstvorming door de impact van regendruppels op het grondoppervlak, en erosie door water en wind. Een fysisch gezonde bodem is niet een doel op zich, maar heeft een duidelijke interactie met de bodemchemie (nutriëntenbeschikbaarheid, nutriëntenuitspoeling) en bodembioologie (optimale mineralisatie onder invloed van bodemleven en gunstige leefomgeving in de bodem (water, zuurstof)).

2.2 De belangrijkste fysische bodembedreigingen

In de agrarische sector moet de bodem gezien worden als een duurzaam productiemiddel, iets waar ook de toekomstige generaties gebruik van moeten maken. Teruggang in bodemkwaliteit of bodemgezondheid moet tegengegaan worden. Een van de grootste bedreigingen voor de fysische bodemgezondheid is structuurbederf. Dit kan plaatsvinden door toename van de belasting van de bodem tijdens grondbewerking (zware machines; berijden onder te natte omstandigheden; ook door grazend vee) en door een grotere impact van klimaatverandering (intense, hevige buien, lange perioden van droogte). Structuurbederf uit zich in:

- verdichting boven- en ondergrond, inclusief korstvorming;
- verminderde capaciteit om water te infiltreren en water vast te houden;
- erosie (water, wind);
- slechte zuurstofhuishouding in de wortelzone;
- inundatie, plasvorming en oppervlakkige afvoer.

Een bekend voorbeeld van ondergrondverdichting is de ploegzool. Het gebruik van zware machines in het algemeen leidt tot verdichting van de bodem, zowel ondiep (30cm) als diep (>1m) (Van den Akker et al., 2012). Op dit moment kan een verdichte bodem alleen mechanisch weer worden losgemaakt (diepwoelen, ploegen, eggen). Belangrijk is vervolgens om maatregelen te nemen om nieuwe verdichting tegen te gaan of te beperken. Omdat er toch altijd met machines het land op gegaan moet worden, verdient het dan de voorkeur om vaste rijpaden te hanteren, zodat de tussenliggende stroken niet verdicht worden. Te veel verdichting leidt tot verhoging van de indringingsweerstand en dus tot een beperkte doorworteling in de bodem. Verdichting betekent ook minder poriën, waardoor onder meer de zuurstofvoorziening van de wortelzone, die nodig voor de ademhaling van de wortels en voor het overige bodemleven, bemoeilijkt wordt.

Slemp of korstvorming treedt op bij gronden waar van nature weinig binding is tussen de bodemdeeltjes. Onder invloed van de inslag van regendruppels ontstaat een schifting van de bodemdeeltjes waarbij de lutum (< 2 µm) en silt (2-50 µm) fracties de poriën tussen de zanddeeltjes of bodemaggregaten verstoppen. Gronden met een lutumfractie tussen 10 en 20% of met hoge leemgehalten (leem = lutum+silt) groter dan 50% zijn het meest slempgevoelig; dit wordt minder naarmate het gehalte van organische stof hoger is (Schneider & Huinink, 1991). Korsten zijn slecht voor de zuurstofuitwisseling tussen bodem en atmosfeer en verhinderen infiltratie van water. Iets

vergelijkbaars kan ook onder het maaiveld plaatsvinden: interne slemp, vooral in slecht ontwaterde, humusarme, lichte zavel bovengronden.

Water kan in de bodem bewegen en worden vastgehouden. Dit wordt veelal samengevat in de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken (Wösten et al., 2001; Bakker et al., 2018). Voor een groot deel worden deze karakteristieken bepaald door de bodemstructuur en bodemtextuur. Veranderingen in de structuur leiden tot veranderingen in deze karakteristieken en hun afgeleiden, zoals waterbeschikbaarheid, watervasthoudend vermogen en infiltratiecapaciteit. Het watervasthoudend vermogen of waterretentie beschrijft de mate waarin een bodem in staat is om water vast te houden. Deze is afhankelijk van de energietoestand van het water in de bodem. De totale energie is opgebouwd uit een deel capillaire energie (drukhoogte) en uit zwaartekrachtenergie. Omdat per bodemsoort de capillaire werking verschilt, is het watervasthoudend vermogen dus per bodemsoort verschillend. Als de energiestatus van de bodem verandert, wijzigt ook het watergehalte in de bodem. Vandaar dat er sprake is van een waterretentiecurve of waterretentiekarakteristiek waarin het verband tussen capillaire energie (drukhoogte h (cm)) en waterinhoud in de bodem is omschreven. Uit deze waterretentiekarakteristiek wordt soms het voor de planten beschikbare water (in spraakgebruik veelal watervasthoudend vermogen genoemd) afgeleid als het verschil in watergehalte bij veldcapaciteit ($h = -100$ cm) en bij het verwelkingspunt ($h = -16.000$ cm)¹. Watererosie treedt voornamelijk op in hellende gebieden wanneer de regenintensiteit groter is dan de infiltratiecapaciteit. In Nederland is dat voornamelijk in Zuid-Limburg het geval in de lössgronden, welke ook nog eens slempgevoelig zijn (Hack-ten Broeke, 2007). In vlakke gebieden waar de regenintensiteit groter is dan de infiltratiecapaciteit leidt dit tot plasvorming en aansluitend oppervlakkige afvoer. Winderosie (stuifgevoeligheid) treedt plaatselijk op, veroorzaakt door periodieke uitdroging van onbedekte bovengronden met minder dan 10% lutum (Huinink, 1991). Hoge gehalten van organische stof kunnen winderosie tegengaan. Water- en winderosie alsook oppervlakkige afstroming zijn nadelig voor gewasproductie en voor beheer en inrichting van open watersystemen vanwege piekafvoeren, sedimentatie en eventuele vervuiling.

Samengevat: een slechte bodemstructuur heeft grote nadelige gevolgen voor waterinfiltratie, zuurstofvoorziening van de bovengrond, en kan leiden tot oppervlakkige afvoer. Slechte water- en/of zuurstofhuishouding is nadelig voor gewasproductie en bodemleven. Verbetering en vervolgens in stand houden van de structuur (losser maken, verhogen organisch stofgehalte, overig management) moet dus een hoge prioriteit hebben. De mate waarin de bodem water kan vasthouden (waterretentie), wordt beschreven door de zogenaamde waterretentiekarakteristiek die de relatie tussen drukhoogte en watergehalte weergeeft. Deze verschilt per bodemsoort door verschillen in textuur en structuur. Uit deze karakteristiek kan ook een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid water die voor planten beschikbaar is, het watervasthoudend vermogen.

2.3 Initiële keuze van indicatoren gebaseerd op literatuuronderzoek (longlist)

Diverse Amerikaanse studies en initiatieven rondom bodemgezondheid en bodemkwaliteit laten zien dat in de loop der decennia er een trend is om het aantal fysische indicatoren te reduceren. De huidige CASH-methodiek van Cornell University (Moebius-Clune et al., 2016) legt de nadruk op:

1. **aggregaatstabiliteit;**
2. **waterbeschikbaarheid;**
3. hardheid (**indringingsweerstand**) van grondoppervlak en ondergrond (dit is in het CASH-systeem echter een optionele indicator).

De **indringingsweerstand** wordt in de CASH-methode gezien als een optionele indicator. **Textuur** wordt niet gezien als een indicator *per se*, maar is vaak nodig om later een beoordeling afhankelijk van de grondsoort te kunnen geven. Deze grootheden zijn overgebleven uit een oorspronkelijk lijst van zeventien fysische indicatoren (zie Bijlage 1).

¹ Dat wil nog niet zeggen dat al dit water gemakkelijk beschikbaar is voor wortelopname (zie secties 2.3 en 2.4.4).

Ook de United States Department of Agriculture / Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS) is teruggedaan van negen indicatoren² naar een voorstel om de focus te leggen op alleen de **aggregaatstabiliteit** (Stott, 2018³, Bijlage 1). Stott (2018) geeft aan dat voor een meer volledige beschouwing ook **verdichting** en **watervasthoudend vermogen** beschouwd moeten worden. Er wordt echter niet aangegeven waarom deze twee indicatoren in de huidige 'Soil Health Technical Note' niet nader worden beschouwd.

In een brede literatuurstudie laten Bünemann et al. (2018) zien dat in het wetenschappelijk onderzoek de aandacht nog vrij breed is. In 65 studies worden 10 indicatoren in 15%-60% van alle studies gehanteerd (Tabel 1; Bijlage 1²). De top 4 van deze indicatoren (waarbij met 'density' ook indringingsweerstand kan worden gelezen) zien we ook terug in de CASH- en USDA-NRCS-lijsten. In een zeer recente literatuurstudie naar gehanteerde indicatoren in studies naar de effecten van vanggewassen en 'no-tillage' vonden Stewart et al. (2018) dat in 192 studies 4 indicatoren in meer dan 15% van alle studies werden gerapporteerd: droge bulkdichtheid, bodemvochtgehalte, aggregatie en porositeit (Bijlage 1). Deze zijn vergelijkbaar met de hierboven genoemde indicatoren. Uiteraard zal een goede structuur- of aggregaatstabiliteit gecorreleerd zijn met andere fysische indicatoren. Een goede bodemstructuur is bijvoorbeeld minder vatbaar voor korstvorming aan maaiveld en bevordert een goede infiltratiecapaciteit. Aggregaatstabiliteit wordt over het algemeen uitgedrukt als het percentage aggregaten dat stabiel blijft onder invloed van vernatting (nat zeven, dan wel beregend onder gestandaardiseerde omstandigheden). Het levert geen kwantitatieve maat op en is moeilijk rechtstreeks te vertalen in bijvoorbeeld infiltratiecapaciteit of dichtheid.

Tabel 1 De 10 meest genoemde fysische bodemgezondheidsindicatoren in 65 studies volgens Bünemann et al. (2018). Genoemd worden de indicatoren en het percentage van voorkomen in de 65 studies.

#	Indicator	Percentage
1	Watervasthoudend vermogen (incl. "water-holding capacity, water content, sorptivity, water-filled pore space, water retention, field capacity, permanent wilting point, plant-available water content, Ksat")	60
2	Droge bulkdichtheid	54
3	Textuur (incl. deeltjesgrootte verdeling)	45
4	Structuurstabiliteit (incl. "aggregate stability, shear strength, tilth and friability, structure, consistence, slake test")	29
5	Bodemdiepte (incl. "soil depth, topsoil depth, maximum rooting depth, layer thickness")	29
6	Indringingsweerstand	26
7	Hydraulische doorlatendheid	20
8	Porositeit (incl. "porosity, macroporosity, air capacity")	19
9	Aggregatie (incl. "aggregation, aggregate size distribution, pedality")	17
10	Infiltratie	15

Op basis van literatuuranalyse stellen we voor de Nederlandse situatie de volgende indicatoren voor:

- **Aggregaatstabiliteit**
- **Dichtheid en/of indringingsweerstand**
- **Watervasthoudend vermogen**
- **(Optioneel) doorlatendheid bij verzadiging of infiltratiecapaciteit in het veld**

Zoals in paragraaf 2.1 al is aangegeven, is structuurbederf een van de belangrijkste bodembedreiging in Nederland. Het ligt dan ook voor de hand om enkele kenmerken van de bodem in de SHI-Nederland op te nemen die de structuur omschrijven. Hiervoor zijn aggregaatstabiliteit en dichtheid en/of indringingsweerstand voorgesteld. Water is van essentieel belang voor gewassen voor hun transpiratie. Dus kennis over watervasthoudend vermogen (waterbeschikbaarheid) van de bodem, en ook over de mate waarin water kan infiltreren en zich verplaatsen door de bodem, is dan belangrijk om mee te nemen in de Nederlandse SHI.

² Afgeleid uit diverse documenten beschikbaar op: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/resource/>

³ Zie ook: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/soils/health/>

Omdat bijvoorbeeld in de CASH-methodiek alle scores worden gekoppeld aan bodemtextuur zal deze ook bekend moeten zijn. Deze vrij stabiele indicator hoeft vaak maar eenmalig bepaald te worden voor een perceel. Het betreft hier de textuurverdeling van de minerale delen van de bodem. Organische stof wordt apart als bodemgezondheidsindicator beschouwd (zie SHI-chemie en/of SHI-biologie, hoofdstuk 3 en 4).

Wanneer de droge bulkdichtheid bekend is, kan ook een eerste schatting van de porositeit gemaakt worden. De verzadigde doorlatendheid zegt ook iets over infiltratie, en de combinatie van porositeit en watervasthoudend vermogen kan gebruikt worden om het lucht gevulde poriënvolume te schatten. Deze aspecten zullen later bij de beschrijving van beschikbare meetmethodes meegenomen worden. De mate waarin de bodem een grote aanvoer van (regen)water kan verwerken, is ook heel belangrijk. Metingen om de hydraulische doorlatendheid en/of infiltratiecapaciteit te bepalen, zijn echter tijdrovend en kennen een grote spreiding in uitkomsten, meestal als gevolg van ruimtelijke variabiliteit in het veld en verschil in meettechniek. De doorlatendheid bij verzadiging of infiltratiecapaciteit is daarom optioneel toegevoegd aan de huidige lijst. Deze meting kan worden toegevoegd als er specifiek problemen met de doorlatendheid van een perceel worden ervaren. Zodra voor hydraulische doorlatendheid (of voor infiltratiecapaciteit) betere meetmethoden beschikbaar zijn, kunnen deze alsnog als standaardindicator beschouwd worden.

Merk op dat in veel gevallen er meer sprake is van een bodemgezondheidscategorie dan van een unieke bodemgezondheidsindicator. Bodemstructuurstabiliteit kan bijvoorbeeld op verschillende manieren worden geïnterpreteerd en verschillende meetmethoden kunnen worden aangewend om iets over structuurstabiliteit te zeggen. Zo wordt in dit geval vaak de focus gelegd op (natte) aggregaatstabiliteit, maar dat betekent niet dat daarmee andere grootheden niet beschouwd zouden kunnen of mogen worden, zoals metingen betreffende bodemsterkte (Atterberg limits, Proctor test, compressie of triaxiaal test; Horn & Baumgartl, 2002). Deze laatste uitkomsten hebben bijvoorbeeld een direct verband met grondbewerking of de mogelijkheid daartoe.

In onderstaande tabellen (Tabel 2 t/m Tabel 6) wordt per indicator omschreven of de methode effectief is, praktisch toepasbaar is, precies is en of de uitkomsten zijn te interpreteren.

Tabel 2 *Eigenschappen van aggregaatstabiliteit m.b.t. effectiviteit, praktische toepasbaarheid en precisie.*

Aggregaatstabiliteit	
Effectief, te interpreteren	<p>Macro-aggregaten zijn gevoelig voor management en gerelateerd aan C- en nutriëntenhuishouding; micro-aggregaten niet (zijn gekoppeld aan textuur). Stabiliteit is gecorreleerd met bodemmicrobiologie: exudaten van micro-organismen fungeren als een soort lijm tussen de bodemdeeltjes.</p> <p>Nog geen scorefunctie voor Nederlandse gronden en omstandigheden bekend. Volgens de CASH-methode afhankelijk van textuur van de bodem. In principe geldt hoe hoger de stabiliteit des te beter.</p> <p>In humide gebieden bestaat de kans dat de natte aggregaatstabiliteit zeer hoog is (90%-100%) (Nimmo & Perkins, 2002). In dat geval moet mogelijk overgestapt worden op een bepalingsmethode waarbij een grotere impact op de aggregaten wordt uitgeoefend (bijvoorbeeld m.b.v. een regenval simulator).</p>
Praktisch toepasbaar	<p>Kan bepaald worden aan gestoorde monsters (mengmonsters) in een laboratorium en vereist geen ingewikkelde apparatuur.</p> <p>Aggregaatstabiliteit kan hoger uitvallen wanneer zout water wordt gebruikt (Nimmo & Perkins, 2002). Dat betekent dat in gebieden met veel zout in het (beregening)water mogelijk een aangepaste meetmethode moet worden toegepast.</p>
Precisie	<p>Duidelijk beschreven meetmethode en daarmee lijkt herhaalnauwkeurigheid goed te zijn.</p> <p>De bepaling kan worden uitgevoerd op gestoorde monsters, zodat de bemonstering in het veld kan gebeuren via een mengmonster van een (groot) aantal sublocaties in het perceel. De verwachting is dat het nemen van meerdere mengmonsters tot vrijwel dezelfde resultaten zullen leiden.</p>
Info Bofylab*	<p>w:\PROJECTS\Labs-Soil-Physics\Standard Work Instructions - SWV\Methods\Aggregate stability and aggregate distribution\ *)</p>

*) interne schijf op intranet. Voor meer info: neem contact op met de auteurs.

Tabel 3 Eigenschappen van dichtheid/indringingsweerstand m.b.t. effectiviteit, praktische toepasbaarheid en precisie.

	Dichtheid en/of indringingsweerstand
Effectief, te interpreteren	<p>De dichtheid van de bodem kan direct beïnvloed worden door extreme belasting van de bodem (zware machines; ploegzool). Opheffen van verdichte lagen kan worden bereikt door woelen, diepspitten, bepaalde diepwortelende gewassen e.d. Verbeteren van de bodemstructuur kan via verhogen van het organischestofgehalte en verbeteren van het bodemleven; hiermee wordt gevoeligheid voor verdichting verkleind.</p> <p>De dichtheid is afhankelijk van de bodemtextuur. Voor zand-, klei-, leem- en veengronden is de gemiddelde droge bulkdichtheid van de bovengrond: 1,6, 1,1, 1,1, en 0,25 g cm⁻³ (Koorevaar et al., 1983; "info Bofylab"). Soms wordt de term relatieve genormaliseerde dichtheid gehanteerd: gronden met een kleigehalte < 16,7% (g/g) zijn te dicht indien de droge bulkdichtheid > 1.6 g cm⁻³ is; voor gronden met kleigehalte ≥ 16,7% (g/g) is dat > 1,75-0,009*kleigehalte (Schjønning et al., 2015). Voor een scorefunctie zal gelden dat het de vorm van een optimumfunctie zal hebben: te hoge maar ook te lage (lage draagkracht) droge bulkdichtheid is minder goed. Functie zal afhangen van textuur.</p> <p>De droge bulkdichtheid is soms nodig om andere (fysische, chemische, biologische) indicatoren te kunnen omrekenen van een meetwaarde per gewichtseenheid grond naar een meetwaarde per volume- of oppervlakte-eenheid grond.</p> <p>Diepteprofielen van de indringingsweerstand kunnen aangeven of potentiële verdichte lagen aanwezig zijn. De absolute meetwaarde is als gevolg van de afhankelijkheid van het bodemvocht niet altijd goed te duiden. Over het algemeen wordt gesteld dat bij een indringingsweerstand van meer dan 2-3 MPa beworteling vrijwel niet meer mogelijk is (zie Bijlage 2).</p> <p>Af te leiden grootheden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • porositeit (nodig: dichtheid vaste fase schatten op basis van textuur en OS); • luchtgevuld poriënvolume bij drukhoogte 100 cm (porositeit minus watergehalte bij drukhoogte 100 cm zoals bepaald bij watervasthoudend vermogen) (liever bij andere drukhoogtes, maar dan wordt dat een extra meting); • kwetsbaarheid voor verdichting (op basis van textuur, dichtheid, klimaat, landgebruik: klassen) (zie bijv. Huber et al., 2008; Kibblewhite et al., 2008; Van den Akker et al., 2012).
Praktisch toepasbaar	<p>De droge bulkdichtheid moet bepaald worden in een ongestoord monster van bekend volume en vindt plaats in een laboratorium.</p> <p>Indringingsweerstand wordt in het veld gemeten met een penetrometer. De meetwaarden zijn afhankelijk van de vochttoestand van de bodem, hetgeen een unieke interpretatie moeilijk maakt. Voor metingen in bovengrond dient soms een andere conus gebruikt te worden dan voor meting in ondergrond. Meerdere metingen per perceel zijn mogelijk.</p>
Precisie	<p>Meting van droge bulkdichtheid is nauwkeurig omschreven en daarmee herhaalbaar. De geschatte meetfout in het laboratorium is daarbij < 3,5%. De meetwaarde is afhankelijk van de positie waar het monster is genomen. Bij bemonstering moet dus rekening gehouden worden met locatie in perceel (kopakker, midden perceel, in of naast rijpaden) en diepte (bovengrond, ondergrond, ploegzool).</p> <p>Meetwaarden van de indringingsweerstand zijn afhankelijk van het vochtgehalte van de bodem en de kracht waarmee het apparaat bediend wordt. Per perceel moeten meerdere opnames uitgevoerd worden om een indruk van de spreiding in het perceel te krijgen.</p>
Info Bofylab	<p>w:\PROJECTS\Labs-Soil-Physics\Standard Work Instructions - SWV\Methods\Gravimetric Method - Bulk density en Water content\</p>

Tabel 4 Eigenschappen van watervasthoudend vermogen m.b.t. effectiviteit, praktische toepasbaarheid en precisie.

Watervasthoudend vermogen	
Effectief, te interpreteren	<p>Watervasthoudend vermogen wordt meestal gedefinieerd als het verschil in watergehalte bij veldcapaciteit ($h = -100$ cm; h is drukhoogte) en verwelkingspunt ($h = -16000$ cm). Voor veldcapaciteit geldt dat het watergehalte vooral wordt bepaald door de combinatie bodemstructuur en bodemtextuur, terwijl dit bij verwelkingspunt vooral door bodemtextuur wordt bepaald. Vanwege de afhankelijkheid van de bodemstructuur is de beïnvloeding van het watervasthoudend vermogen door management dus voorstelbaar (zie verder bij aggregaatstabiliteit).</p> <p>In principe zal gelden dat een hoger watervasthoudend vermogen beter is. De vorm van de scorefunctie is afhankelijk van textuur en/of bodemtype.</p> <p>Watervasthoudend vermogen kan ook uitgedrukt worden in een waterschijf door het verschil in watergehalte te vermenigvuldigen met een laagdikte (wortelzone). Dit geeft aan hoeveel water in potentie beschikbaar is voor evapotranspiratie door een plant; indirect zegt het ook iets over de luchthuishouding (porositeit*laagdikte – waterinhoud).</p> <p>Er kan ook nog onderscheid gemaakt worden in gemakkelijk en moeilijk beschikbaar water door een tussenmeting uit te voeren bij een drukhoogte van $h = -400$ cm; makkelijk: verschilmeting bij -100 en -400 cm; en moeilijk: verschilmeting bij -400 en -16000 cm (Wösten et al., 2013). Deze waarde kan ook gebruikt worden bij adviezen voor beregening.</p>
Praktisch toepasbaar	<p>De bepaling van het watervasthoudend vermogen is gebaseerd op een verschilmeting in een ongestoord (bekend volume) en in een gestoord monster.</p> <p>In het ongestoorde monster kan gelijktijdig de dichtheid gemeten worden (zie Dichtheid en/of indringingsweerstand). De meting vindt plaats in een laboratorium.</p>
Precisie	<p>Meting van watergehalte is nauwkeurig omschreven en daarmee herhaalbaar. De geschatte meetfout in het laboratorium is daarbij $< 3,5\%$ à $5,5\%$; $3,5\%$ indien rechtstreeks het volumetrisch watergehalte in een ongestoord monster wordt gemeten, en $5,5\%$ indien het volumetrisch watergehalte via omrekening van gravimetrisch naar volumetrisch wordt uitgevoerd met behulp van de droge bulkdichtheid.</p> <p>Bij bemonstering van het ongestoorde monster moet dus rekening gehouden worden met locatie in perceel (kopakker, midden perceel, in of naast rijpaden) en diepte (bovengrond, ondergrond, ploegzool).</p> <p>Het ongestoorde monster daarentegen kan aangeleverd worden als een mengmonster van een (groot) aantal sublocaties in het perceel. De verwachting is dat het nemen van meerdere mengmonsters tot vrijwel dezelfde resultaten zal leiden.</p>
Info Bofylab	<p>w:\PROJECTS\Labs-Soil-Physics\Standard Work Instructions - SWV\Methods\Gravimetric Method - Bulk density en Water content</p> <p>w:\PROJECTS\Labs-Soil-Physics\Standard Work Instructions - SWV\Equipment\Pressure Plate\</p>

Tabel 5 Eigenschappen van doorlatendheid bij verzadiging m.b.t. effectiviteit, praktische toepasbaarheid en precisie.

Doorlatendheid bij verzadiging	
Effectief, te interpreteren	<p>De doorlatendheid bij verzadiging (K_{sat}) kan gezien worden als een integrale indicator voor bodemstructuur, zuurstofdiffusie capaciteit, bewortelbaarheid en leefomstandigheden voor bodemleven, en is daarom een waardevolle indicator.</p> <p>K_{sat} kan op korte termijn variëren bijvoorbeeld als gevolg van grondbewerking, verdichting of korstvorming (verslemping). De poriëngroottesverdeling (bodemstructuur) is bepalend voor K_{sat} en deze is afhankelijk van textuur, structuur, horizontindeling, beworteling, bioporiën, vorst-dooisequentie en zwel-krimpverschijnselen (Reynolds et al., 2002). Daarom zullen veldverzadigde en verzadigde indicatoren ook zeer variabel zijn met variatiecoëfficiënten van 400% of meer en zeer scheve verdelingsfuncties (Reynolds et al., 2002).</p> <p>Als vuistregel kan gesteld worden dat $K_{sat} > 100 \text{ cm d}^{-1}$ voldoende is voor de meeste landbouwkundige praktijken en dat $K_{sat} < 1 \text{ cm d}^{-1}$ problemen veroorzaakt (Koorevaar et al., 1983).</p> <p>Meting van K_{sat} in het laboratorium is goed gedefinieerd en goed omschreven en het monster is nauwgezet volledig verzadigd. Er zijn ook meetmethodes om in het veld de doorlatendheid bij verzadiging te meten, vaak aangeduid door K_{fs} (fs: 'field-saturated'). Echter, bij dergelijke metingen zal de bodem nooit volledig verzadigd zijn, zodat $K_{fs} < K_{sat}$.</p> <p>K_{sat} of K_{fs} sec zegt nog niets over de infiltratiecapaciteit of infiltratiesnelheid, omdat deze afhankelijk is van de uitgangstoestand (drukhoogte- of vochtgehalteverdeling) in de bodem. K_{fs} (K_{sat}) is in feite de infiltratiesnelheid na langere tijd.</p>
Praktisch toepasbaar	De bemonstering voor en de meting van K_{sat} is bewerkelijk (en dus kostbaar). De meetwaarde kan sterk bepaald worden door tijdstip en locatie van bemonstering (ruimtelijk en temporeel variabel). Veldgemeten infiltratiecapaciteit is vaak onder onverzadigde omstandigheden, zodat de uitkomst lastiger te interpreteren is.
Precisie	Herhaalbaarheid aan hetzelfde monster is goed. In de praktijk wordt uitgegaan van drie opeenvolgende registraties die onderling <10% afwijken. Omdat vrij veel instellingen en deelgrootheden worden gemeten, is de maximale theoretische fout groter dan deze 10% (ca. 30%); dit is nog steeds kleiner dan de variatie die in het veld voorkomt. De grootheid is ruimtelijk en temporeel variabel.
Info Bofylab	w:\PROJECTS\Labs-Soil-Physics\Standard Work Instructions - SWV\Methods\Saturated hydraulic conductivity\

Tabel 6 Eigenschappen van textuur m.b.t. effectiviteit, praktische toepasbaarheid en precisie.

Textuur	
Effectief, te interpreteren	De minerale verdeling van de textuur is niet noemenswaardig te beïnvloeden. Daarom wordt textuur ook niet als een bodemgezondheidsindicator gezien. Kennis van de textuur van de bodem is echter nodig om in enkele gevallen fysische, chemische of biologische indicatoren beter te kunnen interpreteren (scorefuncties kunnen afhankelijk zijn van textuur).
Praktisch toepasbaar	Textuurverdeling is relatief makkelijk te bepalen en hoeft maar eenmalig voor een perceel/bedrijf te gebeuren indien bekend is dat er geen variatie in bodemsoort gevonden wordt.
Precisie	Duidelijk beschreven meetmethode, de herhaalnauwkeurigheid lijkt goed te zijn. De bepaling kan worden uitgevoerd op gestoorde monsters, zodat de bemonstering in het veld kan gebeuren via een mengmonster van een (groot) aantal sublocaties in het perceel. De verwachting is dat het nemen van meerdere mengmonsters tot vrijwel dezelfde resultaten zal leiden. Uiteraard geldt dat indien binnen een perceel verschillende bodemprofielen voorkomen dat hiermee rekening gehouden moet worden tijdens de bemonstering.
Info Bofylab	w:\PROJECTS\Labs-Soil-Physics\Standard Work Instructions - SWV\Methods\Texture\

2.4 Meetmethoden voor de bepaling van de fysische indicatoren

In de volgende paragrafen wordt per voorgestelde indicator beschreven wat de gangbaarste meetmethode is en hoe de uiteindelijke indicator wordt verkregen. In sommige gevallen wordt ook omschreven hoe eventueel afgeleide indicatoren kunnen worden verkregen.

2.4.1 Aggregaatstabiliteit

Tabel 7 De gangbaarste meetmethoden voor aggregaatstabiliteit.

Aggregaatstabiliteit

Droge aggregaatstabiliteit

Via zeven of eventueel verkrumelen tussen twee platen. Resultaat vooral geschikt voor studies naar winderosie (Nimmo & Perkins, 2002) en juist niet voor studies waarbij water een belangrijke rol speelt.

Natte aggregaatstabiliteit (nat zeven)

Met behulp van een standaard natte-zeefapparaat met een 0,26 mm zeef en een dispergeervloeistof (natrium hydroxideoplossing indien $\text{pH} < 7$; natrium hexametafosfaat indien $\text{pH} > 7$) (alternatief: ultrasoonsonde). Grond (luchtdroog) wordt van tevoren niet natgemaakt; correctie voor zandfractie. Details: zie Nimmo & Perkins (2002) of gebruiksaanwijzing 08.13 van Eijkelkamp. Percentage natte aggregaatstabiliteit (NAS) wordt gegeven als de verhouding van het gewicht stabiele fractie (W_2 ; g) ten opzichte van uitgangsgewicht (W_1 ; g):

$$\text{NAS} = 100\% \cdot W_2 / W_1 \quad (\%)$$

Opmerking:

- betreft analyse voor macro-aggregaten;
- soms worden de aggregaten eerst van tevoren wel nat gemaakt;
- de huidige CASH-scorefunctie kan niet zonder meer worden toegepast op NAS bepaald volgens de hier beschreven methode (zie ook hieronder).

Natte aggregaatstabiliteit (CASH Cornell regen simulator; Schindelbeck et al., 2016)

Voorgezeefde grond (0,25-2 mm) met een bekend gewicht (W_1 ; g) wordt op een zeef geplaatst waarop gedurende 5 min beregend wordt (12,5 mm; vanaf 50 cm hoogte); na afloop wordt resterende grond op de zeef na drogen gewogen (W_2 ; g) of het gewicht van de uitgespoelde grond wordt na drogen gewogen ($W_3 = W_1 - W_2$; g). Percentage natte aggregaatstabiliteit (NAS) wordt gegeven als:

$$\text{NAS} = 100\% \cdot W_2 / W_1 \quad (\%)$$

Opmerkingen:

- dit betreft een zeer summiere beschrijving; er zijn meerder stappen in het proces;
 - correcties voor steentjes en grotere organische materialen is mogelijk;
 - nog geen vergelijking beschikbaar met de hierboven beschreven methode voor bepaling natte aggregaatstabiliteit;
 - in recente technische notitie over standaardisatiemethoden (USDA-NRCS) wordt gesteld dat deze methode theoretische en fysiek robuust is, maar dat deze fundamenteel afwijkt van de hierboven beschreven methode waardoor de uitkomsten niet uitwisselbaar zijn;
 - de scorefunctie gehanteerd in CASH zegt dat, in afhankelijkheid van de textuur, NAS zeer laag is bij $\text{NAS} < 15\text{-}20\%$ en zeer hoog is bij $\text{NAS} > 40\text{-}60\%$.
-

2.4.2 Droge bulkdichtheid

Tabel 8 De gangbaarste meetmethoden voor droge bulkdichtheid.

Droge bulkdichtheid

De droge bulkdichtheid wordt gemeten in een ongestoord ringmonster (bijv. 100 cm³) na droging bij 105 °C. De droge bulkdichtheid is het drooggewicht van het monster (W ; g) gedeeld door het volume van het monster (V ; cm³; bijv.

$V = 100 \text{ cm}^3$):

$$\rho_d = W/V \quad (\text{g cm}^{-3})$$

Opmerkingen:

- correcties zijn mogelijk voor aanwezigheid grove fracties (steen, grind);
- aanpassingen meting voor situaties met hoog OS en/of CaSO₄ (o.a. drogen bij lagere temperatuur);
- voor zeer losse gronden eventueel een 'uitgraafmethode' toepassen (Grossman & Reinsch, 2002).

Alternatieven:

- kluitmethode: geeft vaak overschatting omdat in de praktijk ook ruimte tussen de kluiten aanwezig is die niet wordt beschouwd;
- meting via gammastraling; vereist dure apparatuur en watergehalte moet ook bepaald worden;
- (VIS)NIR spectroscopie: meer toegepast voor textuurbepalingen; vraagt veel dataverwerking en correctie voor watergehalte (Knotters et al., 2017).

Via een of andere pedotransfer(vertaalfunctie) is de dichtheid af te leiden uit andere eenvoudige grootheden, zoals textuur, gehalte van organische stof en dichtheid (Wösten et al., 2001). De Staringreeks omschreven in Wösten et al. (2001) omvat pedotransferfuncties voor Nederland, echter niet alle Nederlandse gronden zijn hierin vertegenwoordigd.

Afgeleide grootheden

De zogenaamde 'packing density' (PD; g cm⁻³) wordt soms gebruikt om de mate van compactheid van de bodem te symboliseren. Deze is gedefinieerd als (zie Van den Akker & Hoogland, 2011):

$$PD = \rho_d + 0.009 \cdot \text{lutum} \quad \text{lutum in \% (w/w)}$$

PD wordt gezien als een enkelvoudige grootheid waarin geïntegreerd de droge bulkdichtheid, structuur, gehalte van organische stof en kleigehalte.

De droge bulkdichtheid vergeleken met een kritieke droge bulkdichtheid wordt de (relatieve) genormaliseerde dichtheid ρ_{norm} (dimensieloos) genoemd (Van den Akker & Hoogland, 2011; Schjønning et al., 2015):

$$\rho_{\text{norm}} = \rho_d / 1.6 \quad \text{lutum} < 16,7\% \text{ (w/w)}$$

$$\rho_{\text{norm}} = \rho_d / (1.75 - 0.009 \cdot \text{lutum}) \quad \text{lutum} \geq 16,7\% \text{ (w/w)}$$

De term $0.009 \cdot \text{lutum}$ komt uit definitie PD (zie hierboven).

De porositeit ϕ (cm³ cm⁻³) kan geschat worden op basis van de droge bulkdichtheid (ρ_d ; g cm⁻³) en de dichtheid van de vaste fase (ρ_s ; g cm⁻³) van de bodem:

$$\phi = 1 - \rho_d / \rho_s$$

Een grove benadering voor ρ_s is $\rho_s = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$. ρ_s kan ook geschat worden uit textuur en gehalte van organische stof van de bodem volgens:

$$\rho_s = [\text{OS}/1.47 + \text{LU}/2.75 + \text{SS}/2.66]^{-1}$$

waarin OS het gehalte van organische stof (g g⁻¹), LU het lutumgehalte (g g⁻¹) en SS het gehalte silt + zand (g g⁻¹); de specifieke dichtheden voor OS, LU en SS zijn daarbij 1,47, 2,75 en 2,66 g cm⁻³.

Het luchtgevulde poriënvolume (ϕ_a ; cm³ cm⁻³) is gedefinieerd als:

$$\phi_a = \phi - \theta$$

ϕ_a is een functie van het volumetrisch watergehalte (θ ; cm³ cm⁻³) of de drukhoogte (h ; cm). Standaardisatie bij welke drukhoogte ϕ_a moet worden vastgesteld, is nog nodig. Veel gebruikt zijn

$h = 30, 50$ en 60 cm (zie Huber et al., 2008).

NB Indien deze indicator gewenst is, dan afstemmen met metingen van het watervasthoudend vermogen (zie aldaar).

2.4.3 Indringingsweerstand

Tabel 9 De gangbaarste meetmethoden voor indringingsweerstand.

Indringingsweerstand

Pentrometer: meestal voorzien van 2 conussen, waarbij de grote gebruikt kan worden voor meer lossere gronden, en de kleine voor de meer hardere gronden.

Bovengrond (0-15 cm)

Ondergrond (15-50 cm)

Snelheid van indringing: ca. 2.5-4 cm per seconde.

Meten op het moment dat de bodem op veldcapaciteit is.

Diverse opnames per perceel/bedrijf; bijvoorbeeld 10 registraties per hectare.

Houdt rekening met bekende variabiliteit in het veld: kopakker, rijpaden, textuurverschillen.

Aangeven waar de hoogste indringingsweerstand in bovengrond en in ondergrond wordt waargenomen. Als vuistregel geldt dat beworteling niet meer mogelijk is indien de indringingsweerstand > 2-3 MPa (zie Bijlage 2).

2.4.4 Watervasthoudend vermogen

Tabel 10 De gangbaarste meetmethoden voor watervasthoudend vermogen.

Watervasthoudend vermogen

Watergehalte bij 'veldcapaciteit' (drukhoogte = -100 cm (-10 kPa, 0.1 bar)): in ongestoord ringmonster 100 cm³ op een zandbak: θ_1 (cm³ cm⁻³)

Watergehalte bij 'verwelkingspunt' (drukhoogte = -16000 cm (-1600 kPa, 16 bar); sommigen hanteren -15000 cm): in gestoord klein monster in een drukpan: θ_2 (cm³ cm⁻³)

Het watervasthoudend vermogen (AWC) wordt berekend als het verschil in watergehalte vermenigvuldigd met een standaard bodemlaag (Δz_r ; cm), zodat een hoeveelheid water per oppervlakte-eenheid wordt verkregen (cm waterschijf; of na vermenigvuldiging met 10 in mm waterschijf):

$$AWC = (\theta_1 - \theta_2) * \Delta z_r \quad (\text{cm})$$

Opmerking:

Het gewas ondervindt al eerder dan bij verwelkingspunt problemen met wateropname. Dat kan al beginnen bij een drukhoogte van -400 cm (θ_a ; cm³ cm⁻³). Wösten et al. (2013) stellen daarom voor om AWC te verdelen in een gedeelte makkelijk (AWC_g) en een gedeelte moeilijk (AWC_m) beschikbaar water:

$$AWC_g = (\theta_1 - \theta_a) * \Delta z_r \quad (\text{cm})$$

$$AWC_m = (\theta_a - \theta_2) * \Delta z_r \quad (\text{cm})$$

$$AWC = AWC_g + AWC_m \quad (\text{cm})$$

NB Indien ook geïnteresseerd in luchtgevuld poriënvolume, dan mogelijk in hetzelfde monster als waar θ_1 (en θ_a) voor bepaald wordt ook een ander watergehalte hierin bepalen.

CASH (Schindelbeck et al., 2016): Idem, maar ook θ_1 wordt daarbij aan *gestoord* monster (gezeefd 2 mm) in drukpan gemeten. Sneller, maar doet afbreuk aan het feit dat θ_1 wel degelijk afhangt van de bodemstructuur (en niet alleen van textuur + OS). CASH hanteert 15 bar voor bepaling θ_2 .

Bij de CASH-methode wordt waterbeschikbaarheid uitgedrukt als gravimetrisch watergehalte (w ; g g⁻¹), zodat niet rechtstreeks de vertaling naar beschikbaar water gemaakt kan worden (dat vereist tevens kennis van de droge bulkdichtheid (ρ_d ; g cm⁻³): $\theta = w\rho_d$, bij constant veronderstelde dichtheid van water gelijk aan 1 g cm⁻³).

De scorefunctie gehanteerd in CASH zegt dat, in afhankelijkheid van de textuur, AWC zeer laag is bij AWC < 0,075-0,1 g g⁻¹, en zeer hoog is bij AWC > 0,19-0,21 g g⁻¹.

Via een pedotransfer(vertaal)functie is soms de waterretentiekarakteristiek af te leiden uit andere eenvoudige grootheden, zoals textuur, organisch stofgehalte en dichtheid (bijv. Wösten et al., 2001). Hieruit kunnen dan rechtstreeks θ_1 en θ_2 berekend worden.

Omdat deze vertaalfuncties via regressieanalyses zijn verkregen met soms lage verklaarde varianties, is deze werkwijze nogal grof.

Niet alle Nederlandse gronden zijn vertegenwoordigd in de Staringreeks-vertaalfuncties (Wösten et al., 2001), zodat op dit moment deze werkwijze niet landsdekkend toegepast kan worden.

2.4.5 Doorlatendheid bij verzadiging

Tabel 11 De gangbaarste meetmethoden voor waterdoorlatendheid bij verzadiging.

Waterdoorlatendheid bij verzadiging

De meting vindt plaats aan een relatief groot, ongestoord ringmonster dat in het laboratorium volledig verzadigd is en blijft gedurende de rest van de meting. Tijdens de meting blijft de gradiënt in waterpotentiaal constant.

Meet 2 tot 3 keer de uitstroming gedurende een vast tijdsinterval (minimaal 10 minuten). Rapporteer het geometrisch gemiddelde van deze 2 of 3 waarnemingen (K_{sat} ; cm d^{-1}); de 2 of 3 afzonderlijke waarnemingen mogen echter niet meer dan 10% onderling verschillen.

Details: NEN 5789, De Vos (1997).

Alternatieve laboratoriummethoden (in Engels; Reynolds et al., 2002):

- falling head method
- steady flow soil column method (especially suitable for swelling clay soils with macropores)

Veldverzadigde waterdoorlatendheid (K_{fs}) in het veld kan gemeten worden met diverse methoden (in Engels; Reynolds et al., 2002):

- ring infiltrometer (single or double ring)
- pressure ring infiltrometer
- multiple ring infiltrometers
- constant head well permeameter (in vadose zone)
- auger-hole method (in saturated zone)
- piezometer method (in saturated zone)

In de meeste gevallen zal bij metingen in het veld de bodem onder het meetapparaat niet volledig verzadigd zijn, waardoor de meetwaarde dus moeilijk te vergelijken is met de in het laboratorium bepaalde K_{sat} -waarde, en dus ook moeilijker interpreteerbaar zal zijn.

Onverzadigde infiltratiecapaciteit in het veld kan worden bepaald met behulp van een disk permeameter (Reynolds et al., 2002).

2.4.6 Textuur

Tabel 12 De gangbaarste meetmethoden voor textuur.

Textuur

Droog zeven om zandfractie ($> 53 \mu\text{m}$; $< 2000 \mu\text{m}$) te bepalen. Indien meerdere zeven met verschillende maaswijdtes worden gehanteerd, is het mogelijk om een korrelgrootteverdeling te verkrijgen. Tevens kan dan ook een schatting van de mediaan ($M50$; μm) verkregen worden.

Pipetmethode

Geschikt voor deeltjes $< 38 \mu\text{m}$ (soms $< 35 \mu\text{m}$). Procedure vastgelegd in NEN 5753 en/of ISO 11277. Of: gebruiksaanwijzing Pipetapparaat van Eijkelkamp.

Opmerkingen:

- monsters met harde kluiten of een korstachtige structuur zijn nog moeilijk goed te meten (Gerben Bakker, persoonlijke mededeling);
- monster moeten voorbehandeld worden om organische en carbonaten (i.v.m. hun kittende werking) verwijderd worden; grote gehalten ijzeroxide kunnen ook van invloed zijn op de meetresultaten.

CASH: Rapid Texture procedure (Schindelbeck et al., 2016)

Grondmonster met bekend drooggewicht (W_t ; g) wordt opgelost in een natrium hexametafosfaatoplossing waarna 1) de zandfractie wordt verkregen via zeven (0,053 mm of $53 \mu\text{m}$; drooggewicht W_z ; g) en 2) de silt ($2-50 \mu\text{m}$) en lutum ($< 2 \mu\text{m}$) fracties worden verkregen via uitzakken in de oplossing (silt is die fractie die na 2 uur is uitgezakt; drooggewicht W_s ; g).

$$\text{zand} = 100\% * W_z / W_t$$

$$\text{silt} = 100\% * W_s / W_t$$

$$\text{lutum} = 100\% - (\text{zand} + \text{silt})$$

Alternatieven:

- (VIS)NIR spectroscopie: vraagt veel dataverwerking en correctie voor watergehalte (Knotters et al., 2017);
- laserdiffractie: levert echter een textuurverdeling op volumefractiebasis en niet op gewichtsfractiebasis; vraagt nog veel aanvullende voorstudie.

2.4.7 Alternatieve meetmethoden

In de voorgaande secties zijn de traditionele meetmethoden (laboratorium, veld) beschouwd. Er wordt ook onderzoek gedaan naar alternatieve meetmethoden die snel informatie kunnen opleveren. In de meeste gevallen moet voor zo'n nieuwe meetmethode een kalibratie beschikbaar zijn welke weer is gebaseerd op een vergelijking met traditionele metingen. Een bekend voorbeeld van zo'n nieuwe techniek is NIRS (Nabij Infra Rood Spectrometrie; *Near InfraRed Spectrometry*). Andere technieken zijn: *gamma-ray spectrometry*, *electromagnetic induction*, en *ground penetrating radar*. Knotters et al. (2017) geven een overzicht van dergelijke beschikbare methodes voor het bepalen van bodemfysische kenmerken, zoals textuur (klei, silt, zand) en watergehalte. Zij hebben geen referenties gevonden waarbij (droge) bulkdichtheid kon worden gemeten. Rechtstreekse meting van waterretentie of doorlatendheid was geen onderdeel van hun literatuurstudie.

Cañasveras et al. (2010) hebben NIRS toegepast om het aandeel waterstabile aggregaten te meten. De gevonden relatie had een regressiecoëfficiënt van 60%. Ter vergelijking: in dezelfde studie was de regressiecoëfficiënt voor kleigehalte 84%.

Askari et al. (2015) concludeerden dat VIS-NIR (*visible (VIS) and near-infrared (NIR) spectroscopy*) redelijk was in het schatten van de droge bulkdichtheid ($R^2 = 0.75$), aggregaatgrootteverdeling ($R^2 = 0.68$) en indringingsweerstand ($R^2 = 0.61$).

Veum et al. (2015) vonden daarentegen geen goede relatie tussen VNIRS (*visible, near-infrared diffuse reflectance spectroscopy*) en waterstabile aggregaten of (droge) bulkdichtheid.

Dit beperkte aantal voorbeelden geeft aan dat er nog geen duidelijk zicht is op betrouwbare alternatieve NIRS-gerelateerde meetmethoden voor de fysische indicatoren zoals in deze studie beschouwd. Dat neemt niet weg dat de ontwikkelingen op dit gebied natuurlijk wel gevolgd dienen te worden en, indien de metingen voldoende betrouwbaar zijn geworden, NIRS ook voor fysische metingen kan worden gebruikt. Hoewel de NIRS-metingen snel zijn, vergt de dataverwerking tijd en zijn correcties voor het watergehalte vaak nodig (Knotters et al., 2017).

2.5 Discussie en uiteindelijke selectie van indicatoren (shortlist)

In onderstaande wordt ingegaan op de afhankelijkheid van de geselecteerde fysische bodemgezondheidsindicatoren van de temperatuur (seizoen) en watergehalte in de bodem. Uiteraard zijn de meeste fysische, chemische en biologische indicatoren ook afhankelijk van bodemtype dan wel textuur. In de CASH-scoringsfuncties is die afhankelijkheid bijvoorbeeld zichtbaar in verschillende scoringsfuncties, afhankelijk van de textuurclassificatie (grof, gemiddeld, fijn getextureerd). Voor de hier geselecteerde fysische bodemgezondheidsindicatoren geldt dat in ieder geval voor aggregaatstabiliteit, droge bulkdichtheid en watervasthoudend vermogen. Maar ook voor indringingsweerstand en doorlatendheid bij verzadiging speelt bodemtype of textuur een rol. In bodems met grote (bio)poriën of scheuren kunnen wortels toch doordringen tot beneden lagen met een hoge indringingsweerstand en zal ook de doorlatendheid beïnvloed worden. Het liefst maken we natuurlijk gebruik van indicatoren die zo min mogelijk afhankelijk zijn van de geldende omstandigheden in het veld, alleen is dit niet altijd mogelijk. Om een gefundeerde keuze te kunnen maken, zullen we eerst een beschrijving geven van die afhankelijkheid van indicatoren voor de heersende temperatuur en watergehalte in de bodem.

2.5.1 Invloed metacondities (temperatuur en watergehalte in de bodem) op de geselecteerde indicatoren

In de tabellen hieronder wordt de invloed van metacondities (temperatuur en watergehalte in de bodem) op de geselecteerde fysische indicatoren beschreven. Een overzichtstabel van deze invloed op alle voor de SHI geselecteerde indicatoren is te vinden in paragraaf 5.2 op blz. 58.

Tabel 13 Invloed metacondities temperatuur en watergehalte in de bodem op de aggregaatstabiliteit.

Afhankelijkheid	Aggregaatstabiliteit
Bodemvocht	Aggregaatstabiliteit in het veld is afhankelijk van het watergehalte, omdat immers onderscheid wordt gemaakt tussen droge en natte aggregaatstabiliteit. De meting zelf wordt onder geconditioneerde omstandigheden (meestal op basis van luchtdroge grond) uitgevoerd, waardoor de situatie ten tijde van bemonstering niet van invloed is op de meting in het laboratorium. Watergehalte beïnvloedt mineralisatie en microbiële activiteit: zie verder hieronder bij temperatuur.
Bodemtemperatuur, seizoen	Stabiliteit wordt bepaald door het kittende vermogen van organische stof en microbiële exudaten. Mineralisatie (afbraak) van organische stof en microbiële activiteit zijn sterk afhankelijk van de bodemtemperatuur.
Interpretatie	Vanwege de seizoenvariatie in kittende werking van organische stof en microbiële exudaten verdient het de aanbeveling om bemonstering steeds op vergelijkbare momenten in het seizoen te doen.

Tabel 14 Invloed metacondities temperatuur en watergehalte in de bodem op de droge bulkdichtheid.

Afhankelijkheid	Droge bulkdichtheid
Bodemvocht	De droge bulkdichtheid is een indicator die in principe nooit feitelijk in het veld aanwezig is. Wel kunnen we spreken over de totale massa bodemdeeltjes per eenheid volume. Deze is onafhankelijk van het watergehalte. Alleen in sterk zwellende (bij natte omstandigheden) en krimpende (onder droge omstandigheden) gronden kan het zo zijn dat de massa per volume-eenheid varieert.
Bodemtemperatuur, seizoen	Temperatuur heeft geen invloed op de (droge) bulkdichtheid. Seizoensafhankelijkheid is primair het gevolg van eventuele afhankelijkheid van bodemvocht (zie aldaar) en mechanische belasting.
Interpretatie	Monsternamen voor bepaling droge bulkdichtheid wordt niet beperkt door afhankelijkheid van bodemvocht of temperatuur. Uitzondering: in sterk zwellende en krimpende gronden. Bemonstering dient wel rekening te houden met specifieke locatie in het veld in relatie tot mechanische belasting.

Tabel 15 Invloed metacondities temperatuur en watergehalte in de bodem op de indringingsweerstand.

Afhankelijkheid	Indringingsweerstand
Bodemvocht	De indringingsweerstand is erg afhankelijk van het bodemvocht en de dichtheid (zie ook aldaar) ten tijde van de meting (Horn & Baumgartl, 2002). Bij voorkeur steeds meten bij hetzelfde bodemvochtgehalte.
Bodemtemperatuur, seizoen	De indringingsweerstand is onafhankelijk van de bodemtemperatuur. Overige seizoensafhankelijkheden gaan via de effecten hiervan op de dichtheid en bodemvochtgehalte.
Interpretatie	Voor de interpretatie is het zeer gewenst steeds onder dezelfde omstandigheden (lees: bodemvochtgehalte, dichtheid) te meten.

Tabel 16 Invloed metacondities temperatuur en watergehalte in de bodem op het watervasthoudend vermogen.

Afhankelijkheid	Watervasthoudend vermogen
Bodemvocht	<p>Het watervasthoudend vermogen wordt vastgesteld op basis van het verschil in bodemvochtgehalte bij twee opgelegde drukhoogtes. Het vochtgehalte bij drukhoogte -100 cm (soms veldcapaciteit genoemd) is afhankelijk van de bodemstructuur en dus alle processen die de bodemstructuur al dan niet onder invloed van het bodemvocht veranderen, beïnvloeden daarmee ook het vochtgehalte bij veldcapaciteit en daarmee het watervasthoudend vermogen. Het andere vochtgehalte (bij drukhoogte -1600 cm; verwelkingspunt) is onafhankelijk van de bodemstructuur (alleen van textuur; gemeten in gestoord monster) en wordt dus niet beïnvloed door bodemvocht.</p> <p>Veranderingen van bodemstructuur onder invloed van bodemvocht (o.a. zwel, krimp; maar ook mechanische belasting) beïnvloeden dus het watervasthoudend vermogen.</p>
Bodemtemperatuur, seizoen	Watervasthoudend vermogen is onafhankelijk van de bodemtemperatuur.
Interpretatie	<p>Omdat watervasthoudend vermogen deels afhankelijk is van de bodemstructuur, welke kan variëren in ruimte en tijd, verdient het de voorkeur steeds op hetzelfde moment in het jaar te bemonsteren.</p> <p>Bemonstering dient wel rekening te houden met specifieke locatie in het veld in relatie tot mechanische belasting.</p>

Tabel 17 Invloed metacondities temperatuur en watergehalte in de bodem op de doorlatendheid bij verzadiging.

Afhankelijkheid	Doorlatendheid bij verzadiging
Bodemvocht	<p>De doorlatendheid bij verzadiging, K_{sat}, is in de bodem alleen dan aanwezig indien de bodem verzadigd is en is daarmee dus in principe onafhankelijk van het bodemvocht of variaties daarin. Dit betreft een unieke situatie in de totale doorlatendheidskarakteristiek, welke zelf echter een sterke, niet-lineaire relatie heeft met het watergehalte. Maar dat wordt hier niet beschouwd.</p> <p>De K_{sat} wordt bepaald door de bodemstructuur en dus alle processen die de bodemstructuur al dan niet onder invloed van het bodemvocht veranderen, beïnvloeden daarmee ook K_{sat} (bijvoorbeeld zwellende en krimpende gronden).</p>
Bodemtemperatuur, seizoen	<p>De K_{sat} wordt in het laboratorium bij een standaardtemperatuur gemeten. In principe is K_{sat} onafhankelijk van (bodem)temperatuur (bij verwaarlozing van effect temperatuur op viscositeit van water).</p> <p>Seizoensvariëaties van K_{sat} zijn indirect via de beïnvloeding van de bodemstructuur door seizoensafhankelijke mechanische belasting en zwel of krimp.</p> <p>Uiteraard geldt dat in een bevroren bodem de doorlatendheid nul is.</p>
Interpretatie	<p>Monsternamen voor bepaling van de doorlatendheid bij verzadiging wordt niet beperkt door afhankelijkheid van bodemvocht of temperatuur. Uitzondering: in sterk zwellende en krimpende gronden.</p> <p>Bemonstering dient wel rekening te houden met een specifieke locatie in het veld in relatie tot mechanische belasting; horizontaal i.v.m. ruimtelijke variabiliteit, en verticaal i.v.m. aanwezigheid verdichte ondergrondlagen (bijv. ploegzool).</p>

Tabel 18 Invloed metacondities temperatuur en watergehalte in de bodem op de infiltratiecapaciteit.

Afhankelijkheid	Infiltratiecapaciteit
Bodemvocht	Infiltratiecapaciteit of veld-verzadigde doorlatendheid, K_{fs} , is gerelateerd aan de (quasi)stationaire infiltratiesnelheid die tijdens een veldmeting wordt bereikt. In dat geval is de gradiënt in de drukhoogte gelijk aan nul, ofwel de drukhoogte is constant alsmede het bijbehorende watergehalte. Omdat onder veldomstandigheden meestal geen volledige verzadiging wordt verkregen, geldt $K_{fs} < K_{sat}$. De infiltratiesnelheid zelf is een functie van het watergehalte bij aanvang van de meting. Maar omdat we hier spreken van de stationaire toestand die na verloop van tijd wordt bereikt, valt deze afhankelijkheid weg.
Bodemtemperatuur, seizoen	In principe is K_{fs} onafhankelijk van (bodem)temperatuur (bij verwaarlozing van effect temperatuur op viscositeit van water). Seizoensvariaties van K_{fs} zijn indirect via de beïnvloeding van de bodemstructuur door seizoensafhankelijke mechanische belasting en zwel of krimp. Uiteraard geldt dat in een bevroren bodem de doorlatendheid nul is.
Interpretatie	De infiltratiecapaciteit wordt <i>in situ</i> gemeten. De snelheid waarmee water vanuit de meetopstelling de bodem in infiltreert, is in eerste instantie groot en neemt af om ten slotte een constante waarde te bereiken. Het vaststellen van deze constante waarde is deels subjectief. Ook kan de meting beïnvloed worden indien na verloop van tijd het water een laag bereikt met afwijkende fysische eigenschappen, waardoor de infiltratiecapaciteit wordt beïnvloed.

Tabel 19 Invloed metacondities temperatuur en watergehalte in de bodem op de textuur.

Afhankelijkheid	Textuur
Bodemvocht	Textuur is onafhankelijk van bodemwatergehalte.
Bodemtemperatuur, seizoen	Textuur is onafhankelijk van bodemtemperatuur of tijdstip in het seizoen. Ook verder in de tijd zal textuur niet (of nauwelijks) veranderen.
Interpretatie	Monsters voor bepaling kunnen elk moment in het jaar genomen worden (bevroren gronden uitgezonderd). Omdat textuur niet (of nauwelijks) verandert in de tijd, hoeft dit niet elk jaar bepaald te worden. Voornamelijk bij moerige gronden zal analyse om de paar jaar gewenst zijn, omdat deze langzaam veranderen in minerale gronden.

Bij bovenstaande beschouwingen zijn de afhankelijkheden van de temperatuur op viscositeit en dichtheid van water niet meegenomen. Ook niet meegenomen zijn de invloed van samendrukbaarheid van water en het effect van variaties in luchtdruk.

2.5.2 Voorstel fysische bodemgezondheidsindicatoren (shortlist)

Op basis van de belangrijkste hedendaagse bodembedreigingen (vanuit een fysisch standpunt beschouwd) en in de literatuur beschreven fysische bodemgezondheidsindicatoren, kan vastgesteld worden dat er een groot aantal kandidaat-indicatoren beschikbaar zijn. Zoals Bünemann et al. (2018) al opmerkten, is er soms sprake van een indicator-categorie in plaats van een unieke indicator. Onder een categorie vallen meerdere specifieke eigenschappen en bijbehorende metingen. We zouden dus kunnen stellen dat er een longlist van zeventien indicatoren/indicatorcategorieën bestaat (Tabel 20), waarvan de eerste tien veelvuldig in het onderzoek worden toegepast (zie Tabel B1.1, Bijlage 1). De eerste tien worden veruit het meest gerapporteerd in de literatuur, en dat levert een eerste schifting. Als we kijken naar wat Cornell University en USDA-NRCS hanteren als huidige indicatoren, dan komen die overeen met de top vier van deze shortlist. Het ligt dus erg voor de hand om deze top vier zonder meer ook te gaan gebruiken voor de Nederlandse bodemgezondheidsindicatoren voor het onderdeel fysica.

Onder Nederlandse omstandigheden is de waterhuishouding van de bovengrond een heel belangrijk aandachtspunt en het is dus logisch om deze shortlist uit te breiden met de doorlatendheid bij verzadiging en eventueel ook infiltratiecapaciteit gemeten in het veld. Hoewel diverse indicatoren dan

wel meetprotocollen afhankelijkheden vertonen van vochtgehalte, temperatuur, moment van bemonstering (seizoen) en de mechanische toestand in de bodem (kopakker, rijpaden, ploegzool, overig) kan dat niet een reden zijn om deze af te wijzen; het kan wel reden zijn om dergelijke metacondities mee te nemen (en dus ook te meten ten tijde van veldopname), omdat dit interpretatie van de metingen vereenvoudigt en betrouwbaarder maakt, zie ook hoofdstuk 5 op pagina 57. Wanneer een dergelijke indicator een goed te interpreteren grootte oplevert en deze is te beïnvloeden door aangepast landmanagement, is de meerwaarde aangetoond.

Tabel 21 geeft het voorstel voor fysieke bodemgezondheidsindicatoren, aangevuld met textuur, voor de Nederlandse SHI (Soil Health Index), waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen 'A'-indicatoren (Absoluut noodzakelijk' en '+'-indicatoren (add-on-)indicatoren. Hydraulische waterdoorlatendheid (meestal gemeten in het laboratorium) of infiltratiecapaciteit (meestal gemeten in het veld) zijn belangrijke indicatoren om primair een slechte bodemstructuur en/of een verdichte bodemlaag aan te tonen. Het vaststellen van dergelijke indicatoren lijkt alleen zinvol indien er duidelijke indicaties zijn voor infiltratieproblemen of verdichtingsproblemen, en zijn derhalve als add-on-indicator aangeduid. Bijvoorbeeld: aan de hand van indringingsweerstandprofielen kan vooraf worden nagegaan of er sprake is van slechte bodemstructuur. Daarna kunnen dan aanvullende add-on-indicatoren bepaald worden.

Nadeel van de indicator *indringingsweerstand* is dat deze sterk afhankelijk is van het heersende bodemvochtgehalte (zie ook Tabel 37). Indicator droge bulkdichtheid is in de categorie add-on-indicatoren geplaatst, omdat de droge bulkdichtheid alleen zin heeft om te worden gemeten als voor een aantal andere chemische en biologische (add-on-)indicatoren de concentratie op volumebasis noodzakelijk is.

Tabel 20 Zeventien door Bünemann et al. (2018) in de literatuur geïdentificeerde kandidaat-fysieke bodemgezondheidsindicatoren, inclusief percentage voorkomen in de literatuur.

#	Indicator(categorie)	%
1	Watervasthoudend vermogen (incl. "water-holding capacity, water content, sorptivity, water-filled pore space, water retention, field capacity, permanent wilting point, plant-available water content, Ksat")	60
2	Droge bulkdichtheid	54
3	Textuur (incl. deeltjesgrootteverdeling)	45
4	Structuurstabiliteit (incl. "aggregate stability, shear strength, tilth and friability, structure, consistence, slake test")	29
5	Bodemdiepte (incl. "soil depth, topsoil depth, maximum rooting depth, layer thickness")	29
6	Indringingsweerstand	26
7	Hydraulische waterdoorlatendheid	20
8	Porositeit (incl. "porosity, macroporosity, air capacity")	19
9	Aggregatie (incl. "aggregation, aggregate size distribution, pedality")	17
10	Infiltratie (incl. "infiltration rate")	15
11	Fractie stenen	5
12	Bodentemperatuur	6
13	Dichtheid vaste fase	5
14	Oppervlakte eigenschappen (incl. "surface characteristics, surface conditions, surface residues")	3
15	Klei eigenschappen (incl. "clay characteristics, mineralogy, water-dispersible clay, soil color (if related to clay characteristics)")	5
16	Bioporiën	2
17	¹³⁷Cesium verdeling (als een maat voor erosie)	3

Tabel 21 Voorstel fysische indicatoren voor de Nederlandse bodemgezondheidsindex (Soil Health Index) – shortlist. A = Absoluut noodzakelijk, + = add-on-meting (wanneer deze worden ingezet: zie onderaan paragraaftekst 2.5.2).

#	Indicator
A	Watervasthoudend vermogen
A	Aggregaatstabiliteit
A	Textuur (nodig voor interpretatie van andere SHI-indicatoren)
A	Indringingsweerstand
+	Hydraulische waterdoorlatendheid (lab (of veld); optioneel) of infiltratiecapaciteit (veld; optioneel)
+	Droge bulkdichtheid

2.6 Ter informatie

In het kader van de Basis Registratie Ondergrond (BRO) en Bodemkundig Informatie Systeem Nederland (BIS-NL) worden in Nederland grondmonsters geanalyseerd op waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken, waarbij aanvullende informatie over textuur, dichtheid, organischestofgehalte en bodemprofielbeschrijving wordt gemeten en omschreven (Bakker et al., 2018). Hier is dus veel informatie over dichtheid, watervasthoudend vermogen (immers volgt direct uit de waterretentiekarakteristiek) en textuur bekend, maar niet over de aggregaatstabiliteit. Omgekeerd geldt echter dat de SHI-informatie zoals hierboven omschreven voor bodemfysische bodemgezondheidsindicatoren niet in BRO en/of BIS-NL kan worden opgenomen, omdat niet wordt voldaan aan een volledige BRO omschreven meetset.

3 Chemische indicatoren

3.1 Inleiding: nut en noodzaak van een goede bodemchemische toestand

Nederland kent een intensieve vorm van landbouw: zowel in de akkerbouw als in de veeteelt geldt dat bodembeheer grotendeels afgestemd is op een maximale productie, deels in afhankelijkheid van het bodemtype, waarbij bepaalde vormen van landbouw meer of minder geconcentreerd of juist op bepaalde bodemtypen voorkomen. Zo is akkerbouw op veen niet gebruikelijk en vinden de meeste graan- en aardappelteelten op klei- en zavelgronden plaats. Het handhaven van de *chemische* bodemvruchtbaarheid is dan ook een van belangrijkste managementinstrumenten van de landbouwer waarbij optimalisatie van de aanvoer van nutriënten en, in mindere mate neutraliserende stoffen (kalk), decennialang het belangrijkste instrument voor handhaven of vergroten van de productie is geweest.

Uiteraard kan een bodem – ook in chemisch opzicht – alleen goed functioneren als het gaat om productie, indien de fysische en biologische condities eveneens intact blijven. Hier beschouwen we nu echter alleen de bodemchemische aspecten, ofschoon landbouwkundig management altijd geïntegreerd is of dat zou moeten zijn. Bij het beoordelen van de bodemchemische indicatoren die in het licht van de SHI zijn voorgesteld, is dan ook het uitgangspunt in welke mate die indicatief is voor het chemisch functioneren. In deze context betreft dat dan vooral het karakteriseren van *de mate waarin de bodem voor gewasgroei chemisch gezien optimaal is*.

In de door CASH benoemde soil-health-criteria staan twee aspecten die daarmee direct in relatie tot de chemische toestand benoemd kunnen worden, te weten:

1. voldoende aanvoer van nutriënten, waarbij een evenwicht tussen aan- en afvoer het doel zou moeten zijn ('Sufficient supply, but not excess of nutrients');
2. bodems moeten voor zover mogelijk vrij blijven van contaminanten en andere toxines die leiden tot schade aan bodem, gewas en/of de aangrenzende compartimenten lucht en water ('Free of chemicals and toxins that may harm the crop').⁴

Deze twee aspecten sluiten daarmee direct aan op de hieronder genoemde voornaamste bedreigingen in relatie tot de chemische toestand.

3.2 De belangrijkste chemische bodembedreigingen

De mate van intensiteit van de Nederlandse landbouw heeft als gevolg dat er sprake is van een hoge bodembelasting met zowel nutriënten als ongewenste stoffen die in mest (dierlijke en kunstmest) en/of andere bodemverbeteraars (compost, slib) aanwezig zijn. Daarnaast is er regionaal sprake van grote veranderingen in de kwaliteit van grond- en deels oppervlaktewater door intrusie van zout zeewater of zelfs inlaat van zout oppervlaktewater gerelateerd aan onder andere de toenemende variatie en duur van droge perioden met name in de zomer. Vanuit bodemchemisch oogpunt leiden deze factoren lokaal, regionaal of zelfs landelijk tot een aantal knelpunten voor de bodemkwaliteit. De belangrijkste landelijke knelpunten met betrekking tot bodemchemische condities zijn:

1. uitspoeling van stikstof en fosfaat naar grond- en oppervlaktewater als gevolg van hoge (dierlijke) mestgift;
2. aanwezigheid van o.a. medicijnresten, nano particles (NPs), hormonale stoffen in dierlijke mest en andere bodemverbeteraars (compost, evt. slib);
3. uitspoeling van micronutriënten (Cu, Zn) in mest naar oppervlaktewater;

⁴ Gezien de relevantie van kwaliteit van in eerste instantie water (nitraat, fosfaat, zinkuitspoeling) en in tweede instantie lucht (in relatie tot NH₃-emissie) is dit hier toegevoegd. Zoals gezegd, geldt voor een deel van de stoffen (N, P) dat ze in de bodem zelf niet direct tot een effect leiden, maar juist wel in de aangrenzende milieucompartimenten. Hieronder zouden wellicht ook nog effecten als gevolg van verzilting benoemd kunnen worden. Deze effecten worden niet expliciet benoemd, maar kunnen lokaal en/of regionaal van groot belang zijn (Stuyt et al., 2016).

4. tekort/teveel van andere (micro)nutriënten als molybdeen (Mo) en selenium (Se);
5. verzilting door intrusie van zilt/zout grondwater (irrigatie met zout grondwater is veel minder een issue, speelt uiteraard in andere landen een grote rol);
6. de hoeveelheid organische stof in de bodem.

Juist vanwege de intensiteit van de landbouw en het daarbij behorende gebruik van meststoffen is er een situatie gecreëerd waarbij zowel voor N als P sprake is (geweest) van een onbalans tussen aan- en afvoer. Deze onbalans in combinatie met de noodzaak (of wens) om een groot deel van de geproduceerde dierlijke mest af te zetten naar de bodem, heeft geleid tot onder meer verhoogde gehalten aan N (nitraat) en P (fosfaat) in het bovenste grondwater en oppervlaktewater. Deels is deze onbalans inmiddels gereduceerd door (strengere) Nederlandse en EU-wetgeving die aanvoer van met name N en P koppelt aan onder meer gewasbehoefte, bodemtype en, voor P, de voorraad P in de bodem. Vanwege de deels trage dynamiek van onder meer transport van P (maar ook metalen als koper en zink, zie hierna) van de bodem naar grondwater, ijlen de effecten van deze onbalans ook nu en de komende decennia nog na (Emissieregistratie, 2016).

Voor zowel N als P geldt dat de overmatige aanwezigheid van N en/of P in de landbouwbodems zelf niet tot negatieve of positieve effecten leidt. Bij de huidige N- en P-gehalten in de bodem is er in landbouwgronden voor zover bekend geen sprake van ecologische effecten. Uitspoeling van N en P naar het grondwater is het belangrijkste criterium op basis waarvan aanwending van dierlijke en kunstmest gereguleerd wordt, uiteraard rekening houdend met de gewenste gewasproductie. Daartoe is voor zowel N als P een gebruiksnormenstelsel in werking dat op basis van gewas, bodemtype, hydrologie (grondwatertrap) en actuele gehalten aan beschikbaar N en P de toegestane aanwending reguleert. Mede als gevolg van het gevoerde beleid daalde het stikstof- en fosfaatoverschot (aanvoer – afvoer) naar de bodem van ± 350 kton voor N en ± 100 kton voor P₂O₅ in 2000 naar 160 kton (N) en vrijwel 0 voor P₂O₅ in 2014 (Van Gaalen en Van Grinsven, 2017).

Daarbij staan dus optimalisatie van oogst én bescherming van grond- en oppervlaktewater centraal. Voor N geldt daarbij ook dat emissie naar lucht (zowel als N₂O als NH₃) eveneens gereguleerd wordt, onder meer door voorschriften voor de manier waarop en het moment waarop mest uitgereden mag worden.

Recente zorgen in relatie tot de chemische toestand betreft met name de aanwezigheid van medicijnresten (diergeneesmiddelen, zie o.a. Lahr et al., 2018), pharmaceuticals, hormonale stoffen en of nanoparticles die in bepaalde mestsoorten, vooral dierlijke mest, compost, slib en, recent, ook een discussie in relatie tot 'nieuwe' meststoffen als struviet, digestaat, biochar of assen die in het kader van de circulaire economie voorgesteld worden als mogelijke alternatieven voor kunstmest. Vooralsnog bestaat voor een groot deel van deze stoffen geen beoordelingskader voor de kwaliteit van de bodem en ook zijn de data die inzicht kunnen bieden in het voorkomen van dergelijke stoffen in de mest en bodem zeer beperkt en slechts lokaal bekend.

Van groter, landelijk belang zijn de gehalten aan onder meer koper en zink in dierlijke mest, want die leiden tot een dusdanige belasting van de bodem dat er regionaal in Nederland normen voor met name zink (Osté et al. 2018) in oppervlaktewater overschreden worden, hetzij door directe afspoeling dan wel door uitloging van bodem via drains naar oppervlaktewater. Effecten op dieper grondwater zijn voor dit soort stoffen niet relevant gezien de veelal lange transportroute die relevant is voor overdracht naar grondwater. Gezien de actuele gehalten aan koper en zink in de bodem is het niet de verwachting dat de hoeveelheden in de bodem zelf beperkend zijn voor gewasproductie en/of gezondheid van het bodemecosysteem (De Vries et al., 2004; Groenenberg et al., 2006). Recent metingen naar de beschikbaarheid van zink laten echter in een aantal akkerbouwsystemen een daling van de beschikbare hoeveelheid zink zien (Eurofins, 2015). Dit sluit aan bij de discussie over tekorten aan andere micronutriënten als selenium en molybdeen.

Ook de mogelijke verandering in het organischestofgehalte van de bodem is een steeds terugkerend thema. Daarbij speelt zowel de vraag of en zo ja, waar en hoe snel de organischestofvoorraad in de bodem daalt (Smit en Kuikman, 2005; Hanegraaf et al., 2009) en in welke mate bodembeheer kan bijdragen aan het opslaan van CO₂ en op die manier een bijdrage levert aan de klimaatdiscussie.

3.3 Initiële keuze van indicatoren gebaseerd op literatuuronderzoek (longlist)

Recent is de compilatie van gebruikte indicatoren binnen soil health tools gepubliceerd door Bünemann et al. (2018). Deze kent negentien indicatoren wat betreft de chemische toestand van de bodem (zie Tabel 22). De meeste in CASH gebruikte chemische indicatoren komen terug in de tabel. In Tabel 22 is ook opgenomen in hoeveel procent van alle onderzochte soil health tools de betreffende indicator is gebruikt. Dit varieert van 6.2% voor C/N ratio tot 90.8% voor total organic matter/carbon. Ook de recente studie van Stewart et al. (2018) benoemt organische stof/organisch koolstof en pH als relevantste (en essentiële) indicatoren voor de bodemchemie.

Tabel 22 Overzicht van chemische indicatoren uit Bünemann et al. (2018).

Indicator chemische toestand	Gebruikt in % van alle studies	Opgenomen in CASH
Total organic matter/carbon	90.8	Nee ¹
pH	81.5	Ja
Available P	73.8	Ja
Available K	49.2	Ja
Total N	40.0	Nee
Cation -exchange capacity (CEC)	32.3	Nee
electrical conductivity	33.8	Add-on
Available N	29.2	Add-on
Heavy metals	21.5	Add-on
Other macronutrients	16.9	Add-on
Micronutrients	15.4	Add-on
Labile C and N	13.8	Nee
Sodicity, salinity	15.4	Add-on
Base saturation	9.2	Nee
Carbonate content	7.7	Nee
Total P	9.2	Nee
Total K	7.7	Nee
Organic pollutants	7.7	Nee
C/N ratio	6.2	Nee

¹ Opgenomen onder biologische indicatoren.

Tabel 22 laat zien dat de in CASH opgenomen indicatoren overeenkomen met de over het algemeen meest gehanteerde indicatoren, alleen Cation Exchange Capacity (CEC) en totaal N komen niet voor in het pakket van CASH. In Tabel 23 staan de meetmethoden en scoringsmethoden voor elk van de in CASH opgenomen indicatoren.

Tabel 23 Overzicht van bodemchemische indicatoren, methode en scoringsfunctie zoals gebruikt in CASH.

Indicator CASH	Wat wordt bepaald	Methode	Scoring
Standard Nutrient Analysis	P, K, Mg, Fe, Mn, Zn Note: N is excluded due to highly dynamic nature	Modified Morgans solution (NH ₄ Ac pH 4.8)	Continuous function (P, K), more is better with optimum Mg, Mn, Fe, Zn: fixed lower thresholds
	pH	1:1 soil:water extract	Continuous function, lower (5.5) and upper limit (7.7)
Add-on: mineralizable N	Potentially available N pool	Anaerobic incubation, measurement of NH ₄	More is better (within the range from 0 to 16 µg N g ⁻¹ dw wk ⁻¹)
Add-on: Root pathogen pressure	Test for fungi and oomycetes that affect growth	Controlled growth test	Less is better
Add-on: heavy metal contamination	Test for potentially harmful substances in relation to food quality	Extraction of total soil metal content	Fixed cut-off levels, less is better
Add-on: Salinity and Sodicity	Determination of total EC and Na	1:1 soil-water extraction followed by analysis of EC and analysis of Ca, Na, Mg	Less is better, indeling in klassen met bovengrenzen

3.4 Meetmethoden voor de bepaling van de indicatoren

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van gehanteerde methoden voor de bepaling van de indicatoren. Daarbij benoemen we in eerste instantie (zie Tabel 24) de gangbare methoden die in NL gehanteerd worden en geven aan of die overeenkomen met de in CASH genoemde methoden dan wel andere gangbare methoden. De hiernavolgende tekst voor de in Nederland gehanteerde methoden is afkomstig uit het Handboek Bodembemesting (<https://www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting.htm>), daar waar dit methoden voorschrijft.

Tabel 24 Overzicht van gangbare methoden voor de bepaling van de geselecteerde indicatoren.

Indicator	Feitelijke bepaling	Methode
Organische Stof	Hoeveelheid organisch koolstof dan wel organische stof in de bodem	1. Gloeiverlies: bepaling van gewichtsverlies van een vers monster na droging bij 105 en gloeien bij 550 graden 2. Elementaire analyse van totaal organisch koolstof (TOC) uit totaal koolstof (TC) bij 900 graden na thermische oxidatie (met correctie voor anorganisch koolstof (TIC) door aanzuren: $TOC = TC - TIC$) 3. Nat-chemische oxidatie (Chromaat, Walkley and Black)
		Noot: methode 1 bepaalt het totaal organischestofgehalte (SOM), methode 2 en 3 alleen het totaal organisch C-gehalte (OC). Organische stof wordt dan weer berekend volgens $SOM = a \cdot OC$ Waarbij a varieert van 1.7 tot 2
EC ('zoutsterkte')	Totale zoutsterkte in oplossing	Bepaling van zoutsterkte in 1:5 bodem-water- extract dan wel directe EC-meting in irrigatiewater
Beschikbaar N	N-mineraal $NO_3 + NH_4$ gehalte	Bepaling van NH_4 en NO_3/NO_2 mbt spectrofotometrie in een 1:2 (m:v) 0.01 M $CaCl_2$ extract
Beschikbaar K	Beschikbare K hoeveelheid in verdund zuur	<i>Akkerbouw</i> : Vlamfotometrische bepaling van K in een 1:10 (m:v) extract van 0.1 M HCl en 0.4 M oxaalzuur <i>Grasland</i> : bepaling van K in 1:1 (g:v) 0.01 M $CaCl_2$ met correctie voor CEC
Beschikbaar P	Beschikbare hoeveelheid P in water (Pw) Beschikbare hoeveelheid P in verdund zout (P- $CaCl_2$) geadsorbeerde hoeveelheid P in zure complexextractie (P-Al)	Spectrofotometrische bepaling van P in een 1:60 (v:v) water extract bij 20 graden C. Spectrofotometrische bepaling van P in een 1:10 (m:v) 0.01 M $CaCl_2$ extract Spectrofotometrische bepaling van P in een 1:20 (m:v) NH_4 -Ac extract bij pH 3.75
pH	pH in verdunde zoutoplossing (pH- $CaCl_2$)	Bepaling van de pH in 1:5 (m:v), 0.1 M $CaCl_2$ extract
Micronutriënten	Bepaling beschikbaar Cu Bepaling van beschikbaar B Bepaling van beschikbaar Mn Fe, Zn, Mo	Bepaling van Cu d.m.v Atomic Absorbtion Spectroscopy (AAS) in een 1:10 (m:v) 0.43 N HNO_3 -extract Bepaling van B via AES-ICP in 1:10 m:v water extract verkregen na 10 minuten koken Bepaling van Mn via AAS in 1:20 m:v NH_4Ac 1N hydrochinon extract
Macronutriënten	Bepaling beschikbaar Mg Ca, S	Bepaling van Mg via AAS in een 1:10 (m:v) 0.01 M $CaCl_2$ -extract Geen standaardmethode (Ca + S)
Metalen	Bepaling potentieel en actueel beschikbare metalen	Actueel beschikbaar: bepaling van metalen in 1:10 (m:v) 0.01 M $CaCl_2$ extract m.b.v. ICP-MS Potentieel beschikbaar: bepaling van metalen in 1:10 (m:v) 0.43 N HNO_3 extract m.b.v. ICP-MS

Voor organische stof dan wel organisch koolstof zijn hier drie methoden opgenomen die veel gebruikt worden. Tabel 25 geeft een overzicht van een aantal belangrijke criteria voor elk van deze drie methoden.

Tabel 25 Evaluatie drie methoden voor de bepaling van organisch koolstof dan wel organische stof (uit: Vanhoof en Tirez, 2003).

Methode	Gloeiverlies	Natte oxidatie	Elementaire C-bepaling
Conversiefactor OS/OC	n.v.t.	Bodem: 1.72 Compost 1.8 Afval: variabel	Bodem: 1.72 Compost 1.8 Afval: variabel
Detectie	Massaverlies	Gevormde Cr ³⁺ /overmaat Cr ₂ O ₇ ²⁻	Gevormde CO ₂
Selectiviteit voor C	Aselectief voor C	Aselectief voor C	Selectief voor C
Monstervoorbehandeling	Drogen	Drogen + malen	Drogen + malen
Monsterhoeveelheid	± 50 gram	20-500 mg	10-20 mg 50-100 mg indien C < 0.5%
Juistheid/specifiteit	+	++	+++
Interferentie	+++	++ (Fe/S/Cl)	+
Investering	+	+	+++
Moeilijkheid analyse	+	+++	++
Arbeidsintensiviteit	+	+++	++
Veiligheid	+	+++ (toxische stoffen)	++

Een aantal van de hier genoemde indicatoren zijn nat-chemische bepalingen die ook bepaald kunnen worden door een niet-destructieve methode, bijvoorbeeld de NIRS-methode (Near InfraRed Spectroscopy), waarbij ook andere spectra (VIS, NIT, MIR, variërend van 400 tot 25000nm banden; Rossel et al. 2006) gebruikt worden. Het voordeel van dergelijke infrarood spectroscopiemethoden is dat deze in staat zijn om een aantal indicatoren in één monster te bepalen zonder veel voorbereiding. Zo wordt NIRS al veel toegepast bij de bepaling van de voederwaarde van veevoer. Voor mest en bodem is er al redelijk veel onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van de bepaling van organische stof en nutriënten (o.a. He et al., 2005; Rossel et al., 2006; Chen et al., 2013). Recent is voor vaste mest aangetoond dat de werking van NIRS voor N, P, K, Mg en organische stof redelijk tot goed is, afhankelijk van de gekozen validatiecriteria (Rietra en Oenema, 2017). Daarbij zijn voor N, K, Mg en organische stof geen verschillen gevonden tussen de geldende referentiemethoden en de bepaling met NIRS. Ook voor dunne mest zijn studies uitgevoerd naar de nauwkeurigheid voor de bepaling van zowel nutriënten en metalen (Sørensen et al., 2007, 2015), maar deze varieert van redelijk tot goed voor nutriënten en matig voor metalen. Het artikel van Soller toont aan dat de betrouwbaarheid van de Infrarood-methoden voor onder meer organische stof en pH goed is met een gerapporteerde RMSE van 0.1 (voor pH) en 0.15 (voor organische stof). Voor N gemeten als NO₃ bleek er echter geen enkele relatie te bestaan tussen de spectra en gemeten hoeveelheden in de bodem (Rossel et al., 2006). Voor organische stof en N-totaal geldt de methode op dit moment echter als voldoende betrouwbaar (niet openbaar, wel RvA-geaccrediteerd) om te worden gebruikt als alternatief voor de nat-chemische bepalingen. Concluderend kunnen we stellen dat NIRS in principe geschikt lijkt of al gebruikt wordt voor het bepalen van een aantal van de genoemde chemische indicatoren (organische stof en N-totaal), ofschoon de onderbouwing en/of betrouwbaarheid van de methode deels niet geëvalueerd kan worden, omdat de gegevens die daarvoor gebruikt worden niet openbaar zijn.

3.4.1 Overzicht van de mate van complexiteit van de methoden, kosten en bekendheid bij labs (in NL)

In onderstaand overzicht staat een verdere toelichting op de effectiviteit, praktische toepasbaarheid en precisie van de benoemde indicatoren. Daarbij lichten we de volgende aspecten toe:

- **Effectief** (gevoelig voor management, korte responstijd van metingen, interpreteerbaar, bruikbaar)
- **Praktisch toepasbaar** (makkelijk in gebruik, zo goedkoop mogelijk)
- **Precisie** (herhaalnauwkeurigheid) is aanvaardbaar

Aanvullend staat aangegeven of er voor de betreffende indicator op dit moment al een toetsingskader bestaat en zo ja, met welk specifiek doel.

3.4.2 Organische stof

Tabel 26 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van organische stof.

Organische stof	
Effectief, te interpreteren	Organische stof (OS) is een van cruciale eigenschappen van de bodem in relatie tot zowel chemische, biologisch als fysische eigenschappen en als maat voor bodemkwaliteit dus essentieel. Er bestaat een relatie tussen bodemmanagement en OS-gehalte, waarbij vooral fysieke handelingen (ploegen) van invloed zijn. De dynamiek van OS in de bodem in relatie tot bodemtype en management is echter nog steeds slecht gekwantificeerd en duidelijke trends zijn slechts beperkt waarneembaar en kennen bovendien een trage dynamiek (zowel daling als toename van OS). Binnen een jaar is deze indicator dus als statisch te beschouwen. Verschillende studies hebben kritische waarden voor soil organic matter (SOM) of OC afgeleid, maar deze zijn niet generiek geldend. Bovendien zijn de uitkomsten deels bodemtype-afhankelijk, 2% SOM in een zandgrond kan een andere waardering hebben dan 2% in een klei- of lössgrond.
Praktisch toepasbaar	Metingen zijn gangbaar, bekend bij laboratoria en eenvoudig uit te voeren bij verstoorde grondmonsters, al dan niet gedroogd. Benodigde apparatuur verschilt zowel in aanschafkosten als gebruik (zie Tabel 25).
Precisie	Er bestaat verschil in precisie van de drie methoden, deels als gevolg van bodemtype (wel of geen kalk) of de gehanteerde conversie van OC naar SOM. Voor de meeste gronden waarbij SOM > 1% zijn de drie gehanteerde methoden echter qua precisie ruim voldoende toepasbaar. Voor kleigronden (en grond met kalk) moet correctie bij de gloeiverlies methode toegepast worden. Voor de OC-bepalingen geldt dat de generieke correctiefactor van 1.7 of 1.8 ter discussie staat (sommigen hanteren 2) en het is waarschijnlijk dat deze niet constant is voor sterk verschillende vormen van bodemorganisch koolstof (cf veen vs. kleigrond).
Toetsingskader beschikbaar	Deels; er bestaan geen harde eisen voor minimale gehalten, vaak wordt wel een minimumgehalte van 3% genoemd als grens tussen bodems met een 'laag' en 'hoog' organischestofgehalte (TCB, 2016) ¹ . Gerapporteerde minimumwaarden variëren van 1,5% (Zwart et al., 2013) tot 3,4% (Jones et al. 2012), ofschoon onderkend wordt dat dergelijke minimumeisen arbitrair zijn en onder meer afhangen van klimaat, bodemtype en landgebruik (Van Camp et al., 2004). Wel zijn er adviestabellen om een organische-stofbalans op te stellen om zodoende inzicht te krijgen op welke manier de SOM-voorraad gehandhaafd kan worden. Dit is afhankelijk van bodemtype en gewas. Uitgangspunt is vaak om het gehalte organische stof in de bodem in elk geval te handhaven.

¹ Een voorgestelde evaluatie betreft de snelheid van verandering in het OC-gehalte in de bodem, waarbij onderscheid gemaakt wordt naar bodems met een laag dan wel hoog organischestofgehalte.

3.4.3 Electrical Conductivity (EC)

Tabel 27 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van EC.

EC	
Effectief, te interpreteren	Er bestaat een relatie tussen EC van irrigatie/beregeningswater en productieverliezen waarbij deze relatie afhankelijk is van gewas; voor zover bekend, zijn dergelijke relaties onafhankelijk van regio of bodem en daarmee generiek toepasbaar.
Praktisch toepasbaar	Bepaling van EC is eenvoudig, robuust en goedkoop, vergt weinig specialistische apparatuur.
Precisie	De methode is herhaalbaar en kent een relatief kleine toevallige fout.
Toetsingskader beschikbaar	Bestaand overzicht van zouttolerantie: Stuyt et al. (2016) Noot: dit toetsingskader betreft dus een toets in het gebruikte water en niet zozeer in de bodem zelf. Daarmee is EC feitelijk geen onderdeel van een bodemtoets. Het is echter aannemelijk dat bij EC-waarden in het bodemvocht die de ondergrens voor irrigatiewater voor de gevoeligheid van een gewas overschrijden, er eveneens sprake zal zijn van schade. Dit is echter nog niet een-op-een vastgesteld (m.a.w. relatie EC-water en EC-bodemvocht).

3.4.4 Beschikbaar N

Table 28 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van beschikbaar N.

Beschikbaar N	
Effectief, te interpreteren	Bepaling van beschikbaar N is zeer dynamisch (variabel in de tijd) en wordt aan het begin van het teeltseizoen gemeten om daarop de bemesting af te stemmen. Voor vrijwel elke combinatie van gewas/gewasgroep en bodemtype bestaan advieswaarden ten behoeve van gewasproductie. De status van N-mineraal reageert daarmee direct op bemesting. Uitkomsten van de N-mineraal status vormen, in Nederland, de basis voor de gewasbemestingsadviezen en kunnen voor dat doeleinde dus deel uitmaken van een SHI.
Praktisch toepasbaar	Bepaling van mineraal N is een standaardmethode, veelgebruikt, relatief betrouwbaar.
Precisie	Resultaten zijn herhaalbaar, wel hoge mate van seizoensinvloed en ruimtelijke spreiding, omdat de actuele N-voorraad sterk beïnvloed wordt door onder meer weersomstandigheden en gewasgroei waardoor grote verschillen kunnen ontstaan, zowel ruimtelijk als temporeel.
Toetsingskader beschikbaar	Adviesbemestingswaarden zijn beschikbaar (CBAV, 2018) en dienen als basis voor jaarlijkse mestgift. Toediening gelimiteerd op basis van gebruiksnorm variërend van pm 50 tot 250 kg N/ha.

3.4.5 Beschikbaar P

Table 29 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van beschikbaar P.

Beschikbaar P	
Effectief, te interpreteren	Gewasopbrengst en P-gehalte in gewas zijn deels gecorreleerd aan de P-status van de grond (P-status = combinatie van actueel (Pw of P-Ca) en potentieel (P-AI) beschikbaar P). Daarbij zijn Pw en P-Ca meer variabel (gedurende en tussen seizoenen) dan P-AI (buffer). Gewasrespons en relaties tussen Pw en/of P-Ca en gewas zijn gewas- en bodemafhankelijk en daarnaast nog afhankelijk van de bodem P-status zelf. In NL hanteert men voor zowel grasland als akkerbouw ofwel Pw (akkerbouw) dan wel P-AI- en P-Ca (gras/mais) als maat voor de interpretatie van de P-status. Deze waarden zijn niet generiek toepasbaar (in andere landen) vanwege de invloed van bodemeigenschappen op de vastlegging van P. Voor Nederland zijn deze advieswaarden bovendien ook nog afgestemd op de wens om uitspoeling uit de bodem te minimaliseren om zodoende de waterkwaliteit te beschermen.
Praktisch toepasbaar	Bepaling van P-w is relatief lastig voor P-Ca of P-AI, weinig labs voeren Pw uit en deze waarde wordt in toenemende mate berekend uit P-Ca en P-AI.
Precisie	Meetmethoden zijn goed omschreven, wel enige discussie over inter-laboratorium kalibratie.
Toetsingskader beschikbaar	Voor grasland en mais zijn er specifieke advieswaarden op basis van P-Ca en P-AI (Van Rotterdam en Bussink, 2016). Voor akkerbouw geldt Pw als indicator op basis waarvan een gewasgericht dan wel bodemgericht advies bepaald kan worden. Voor de beoordeling van de bodemtoestand voor het vaststellen van de P-gebruiksnorm zijn gecombineerde voorstellen voor grasland en bouwland op basis van P-Ca en P-AI in ontwikkeling (Oenema et al 2016). Momenteel gelden nog de waarden op basis van Pw (akkerbouw) dan wel P-AI (grasland; Ministerie LNV, IW 2017). Dit toetsingskader is daarmee zeer specifiek gericht op Nederland. Voor P geldt, meer dan voor andere nutriënten, dat er veel verschillende bepalingmethoden zijn die al dan niet in combinatie in verschillende landen toegepast worden. Scoringsfuncties uit andere SHI-systemen zijn daarom niet toepasbaar voor Nederland.

3.4.6 Beschikbaar K

Tabel 30 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van beschikbaar K.

Beschikbaar K	
Effectief, te interpreteren	Kalium is relatief mobiel in de bodem en reageert op weer (uitspoeling) en gewasopname. Beginsel is om de K-voorraad op peil te houden door te corrigeren voor gewasopbrengst en (gemiddelde) verliezen door uitspoeling. Het kaligetal is gekoppeld aan zowel gewasstype (gewasgericht advies) als bodemtype. De combinatie van beide levert een uiteindelijke geadviseerde gift op, zodat voldaan wordt aan zowel gewasbehoefte als het op peil houden van het K-getal in de bodem.
Praktisch toepasbaar	Bepaling van K in HCL/oxaalzuur is standaard, relatief eenvoudig uit te voeren en robuust. Sinds 2015 bestaat voor grasland een herziene methode op basis van K-extractie in CaCl ₂ , in combinatie met CEC (Bussink et al., 2014).
Precisie	Metingen en extracties zijn relatief eenvoudig uit te voeren, zeker na standaardisatie op CaCl ₂ die voor meerdere elementen toegepast wordt.
Toetsingskader beschikbaar	Voor grasland bestaan specifieke rekenregels die de K behoefte berekenen aan de hand van ofwel CEC dan wel een combinatie van SOM en textuur in combinatie met K gemeten in CaCl ₂ .

3.4.7 Zuurgraad pH

Tabel 31 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van pH.

pH	
Effectief, te interpreteren	De pH stuurt in hoge mate de beschikbaarheid van een aantal stoffen (onder andere P, micronutriënten Cu en Zn, metalen) en is verder een randvoorwaarde voor het goed chemisch functioneren van gewassen. Bij extreem lage (voor de meeste gewassen pH < 4.5 a 5) of hoge pH (pH > 8) ontstaan gebrekziekten (vooral bij hoge pH, vooral voor micronutriënten) ofwel toxiciteit, deels van bodemeigen stoffen als aluminium, deels van metalen indien aanwezig. Voor P geldt juist dat de beschikbaarheid afneemt bij lagere pH-waarden. Advieswaarden voor optimale pH-trajecten zijn relatief vergelijkbaar voor verschillende bodems/regio's; waarden gehanteerd in andere systemen (indices) zijn derhalve vergelijkbaar met die in Nederland.
Praktisch toepasbaar	pH-metingen zijn zeer eenvoudig, zelfs in het veld, uit te voeren (onder andere met handheld elektroden of pH-papierjes). Gestandaardiseerde metingen in 0.01 M CaCl ₂ zijn zeer robuust, gangbaar en goedkoop.
Precisie	Vergeleken met pH-water is pH-CaCl ₂ veel stabiel te bepalen; door de zoutbuffer is er ook minder seizoensinvloed, omdat de variatie in EC in bodem in veel gevallen gebufferd wordt door de 0.01 M-matrix.
Toetsingskader beschikbaar	https://www.handboekbodemenbemesting.nl/nl/handboekbodemenbemesting/Handeling/pH-en-bekalking/Advisering-pH-en-bekalking.htm

3.4.8 Micronutriënten

Tabel 32 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van micronutriënten (B, Mn, Cu, Fe, Mo, Zn).

Micronutriënten (B, Mn, Cu, Fe, Mo, Zn)	
Effectief, te interpreteren	De relatie tussen gewasgroei en de voorraad aan micronutriënten is slechts voor een klein aantal elementen onderbouwd met advieswaarden (B, Mn, Cu). Sturing op bodemvoorraden door bemesting gebeurt wel om een minimale hoeveelheid in de bodem voor gewasgroei te garanderen, maar de relatie tussen bodemvoorraad en gewasgroei/productie is veelal beperkt of niet relevant (Fe). Deels zijn de advieswaarden ook generiek, dus niet afhankelijk van bodem of gewas (Cu), ofschoon de beschikbaarheid van stoffen als Cu sterk kan verschillen al naargelang de combinatie van bodemeigenschappen. Voor Zn zijn er vooralsnog geen minimale eisen voor bodemvoorraden beschikbaar, ofschoon er suggesties gedaan zijn dat er (landelijk) sprake kan zijn van een zinktekort (BLGG, 2015). Vergelijking met advieswaarden/scoringsfuncties in andere beoordelingssystemen wordt bemoeilijkt door de grote range aan methoden die internationaal voorhanden zijn (o.a. voor Cu, Fe, Mn en Zn).
Praktisch toepasbaar	Methoden die gehanteerd worden, voor zover voorgeschreven (B, Mn, Cu) zijn dit veelal redelijk standaardmethoden (in Nederland) waarbij die voor B afwijkt, omdat dit een extractie gevolgd door koken betreft.
Precisie	Methoden zijn voldoende robuust en herhaalbaar.
Toetsingskader beschikbaar	Ja, deels, maar generiek scoringsstelsel voor alle elementen is niet voorhanden, extractiemethode (en daarmee hoeveelheid in meting) varieert sterk tussen landen.

3.4.9 Macronutriënten overig

Tabel 33 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van macronutriënten (Mg, Ca, S).

Macronutriënten overig (Mg, Ca, S)	
Effectief, te interpreteren	Interpretatie deels wel (Mg, S) deels niet mogelijk op basis van gemeten waarden. In het algemeen geldt dat voor deze macronutriënten de onderbouwing van de advieswaarden beperkt is. Streven naar handhaving van voldoende niveau vormt de basis. Verschillen tussen bodems/gewassen maar beperkt mogelijk of onderbouwd.
Praktisch toepasbaar	Bepalingsmethoden van Ca is niet vastgelegd, voor S geldt een totaalbepaling die omgerekend wordt naar een beschikbare fractie (S-mineraal), terwijl voor Mg de standaard 0.01 M CaCl ₂ -methode wordt gebruikt.
Precisie	Methoden voor de bepaling zijn accuraat en deels (CaCl ₂ , totaalbepaling) standaardmethoden, die voor veel andere indicatoren ook gebruikt worden. Op perceelniveau voldoende precies op basis van een mengmonster.
Toetsingskader beschikbaar	Beperkt voorhanden voor S en Mg, onderbouwing echter matig.

3.4.10 Metalen

Tabel 34 Effectiviteit, praktische toepasbaarheid, precisie en toetsingskader van metalen.

Metalen	
Effectief, te interpreteren	De beschikbaarheid (toxiciteit) van de meeste metalen is gekoppeld aan vooral pH en in mindere mate organischestofgehalte. Sturing van de beschikbaarheid is dus deels mogelijk, al zal de mate waarin dit kan beperkt zijn vanwege de relatief kleine variatie in onder meer pH en de andere sturende factoren, vooral organische stof en klei. Voor de totale of reactieve (potentiële) beschikbaarheid geldt dat deze niet binnen een groeiseizoen varieert en ook niet afhankelijk is van management.
Praktisch toepasbaar	Metingen van metalen in 0.01 M CaCl ₂ (beschikbaarheid) sluit goed aan bij de standaardmetingen voor nutriënten, omdat die in hetzelfde extract bepaald worden. Bepaling van de potentiële beschikbaarheid van metalen sluit aan bij bestaande standaardmethode voor onder meer bepaling van Cu voor grasland en akkerbouw (0.43 N HNO ₃). Beide zijn daarmee gangbare en geaccepteerde methoden.
Precisie	Door lage actuele beschikbaarheid (in CaCl ₂ -extract) in pH-traject van 6 tot 7 kan een deel van de metalen rond of beneden detectielimiet uitvallen. Herhaalbaarheid van bepaling in gemengde veldmonsters op perceelniveau is voldoende tot goed. Variatie in metingen deels afhankelijk van aanwezigheid heterogene verontreinigingen (stadslandbouw) die onder andere voor lood de herhaalbaarheid reduceren. Voor de overige metalen is de herhaalbaarheid in zowel CaCl ₂ als HNO ₃ voldoende tot goed.
Toetsingskader beschikbaar	Deels bestaan er voor micronutriënten (m.n. Cu en Zn) advieswaarden op basis van HNO ₃ -extraheerbare fractie voor minimale gehalten om gebrekkigheden te voorkomen. Maximale gehalten waarboven effecten op oogstdeuring, toxiciteit en productkwaliteit te verwachten zijn bestaan ook, onder meer LAC(Landbouw Adviescommissie)-waarden voor verschillende vormen van landgebruik en bodemtype (Römkens et al., 2007); basis is totaalgehalte (Aqua Regia) waarbij overwogen wordt dit op termijn ook te vervangen door HNO ₃ (Lijzen et al., 2017). Landelijke waarden voor de actuele beschikbaarheid (CaCl ₂) en voorraad (HNO ₃) voor een groot aantal elementen in onverdachte bodems met onderscheid naar regio en bodemtype zijn beschikbaar (Mol et al., 2012) en kunnen daarmee als referentie voor de beoordeling dienen.

3.5 Discussie en uiteindelijke selectie van indicatoren (shortlist)

De USDA (2018) geeft een andere selectie van methoden voor de bepaling van de soil health-status. Daarbij worden indicatoren in eerste instantie aan bodemprocessen gekoppeld en niet per definitie ingedeeld in chemische, biologische en fysische methoden, ofschoon deze onderverdeling wel gemaakt kan worden. Bodemprocessen die vooral betrekking hebben op de bodemchemische componenten zijn:

1. dynamiek van organische stof;
2. beschikbaar stikstof, ofschoon dit refereert aan de beschikbare N-pool voor bodemorganismen en niet, of niet noodzakelijk, aan de N-beschikbaarheid voor gewassen.

In bijlagen 3-5 staat een kwalitatieve inschatting van onder andere kosten van het bepalen van de verschillende chemische indicatoren, complexiteit van de voorgestelde methoden en de mate waarin deze resultaten van de indicatoren te relateren zijn aan de onderscheiden bodembedreigingen en ecosystem services. Uit deze tabellen blijkt onder meer dat vooral voor de landbouwkundige bedreigingen (waterkwaliteit, opbrengst gevolgd door ecosysteem-functioneren) en bodemfuncties de relatie tussen de indicatoren groot is (tabel Bijlage 3). Dit is niet in de laatste plaats het gevolg van het feit dat een deel van de indicatorsystemen in eerste instantie voor hetzij landbouwkundig dan wel ecologisch functioneren ontwikkeld is. Voor de in CASH opgenomen chemische indicatoren geldt dit in hoge mate. De feitelijk enige indicator is de beschikbaarheid van nutriënten, waarbij N in eerste instantie niet meegenomen wordt. Voor een goed landbouwkundig functioneren, zoals al benoemd in de inleiding, geldt dat de nutriëntenvoorziening cruciaal is en strikt genomen de meest beperkende, meer dan alle andere met inachtneming van normale landbouwbodems. Van de add-on-indicatoren lijkt in eerste instantie saliniteit de relevantste voor Nederland, zeker in kustgebieden, waar sprake

kan zijn van zoute kwel dan wel inlaat van zout oppervlaktewater. Zoals in paragraaf 1.3.3 is beschreven, beoordelen we de onderscheiden indicatoren op de volgende aspecten:

- effectiviteit (gevoelig voor management, interpreteerbaar);
- praktische toepasbaarheid (relatief) makkelijk te meten, zo goedkoop mogelijk, korte responstijd van metingen);
- herhaalnauwkeurigheid die aanvaardbaar is voor onze toepassing binnen de SHI.

Een aanvullend aspect dat mogelijk onderscheidend kan zijn bij de beoordeling van indicatoren, is de interpreteerbaarheid van gegevens. Deels is dit benoemd in paragraaf 3.2, maar voor een aantal indicatoren is in Tabel 35 een aanvullende beoordeling gegeven over de mate waarin de scoring van een indicator universeel is of juist alleen maatgevend voor bepaalde bodems in bepaalde regio's. Indien een scoringsfunctie namelijk sterk regionaal bepaald is, betekent dit dat deze feitelijk steeds opnieuw vastgesteld moet worden voor toepassing in andere gebieden. Dit is, in afwijking van de fysische en biologische indicatoren, opgenomen in een aparte kolom. Daarbij beperken we ons tot die indicatoren die in de CASH-manual zijn opgenomen en in de review van Bünemann et al. (2018) in de top tien van meest gebruikte indicatoren staan. Dit betreft daarmee:

- Total organic matter/carbon
- pH
- Available P
- Available K
- Total N
- Cation exchange capacity
- Electrical conductivity
- Available N
- Heavy metals
- Other macronutrients
- Micronutrients

In Tabel 35 staat een samenvatting van de scores van deze indicatoren met betrekking tot de hierboven genoemde criteria. In eerste instantie is dit ingedeeld in de categorieën *goed* – *voldoende* – *matig*. *Goed* betekent dat de indicator voldoet aan de gestelde criteria zoals hierboven genoemd, *voldoende* betekent dat de indicator wellicht geschikt is met een paar aandachtspunten en *matig* betekent dat er aspecten zijn waardoor de indicator minder geschikt is dan wel dat er aanvullende gegevens nodig zijn.

Labiël N en C worden hier ook beschouwd, ofschoon deze in eerste instantie gekoppeld zijn aan de biologische kwaliteit/indicator. Sodiciteit/salinity is hier niet meegenomen, omdat ook al EC als maat voor de saliniteit beoordeeld wordt.

Tabel 35 Samenvatting van score op effectiviteit, toepasbaarheid, precisie en interpreteerbaarheid van de indicatoren.

	Effectiviteit	Toepasbaarheid	Precisie	Interpreteerbaarheid ¹
SOM/OC	goed	goed	goed	goed
pH	goed	goed	goed	goed
Beschikbare nutriënten	N	goed	goed	goed
	P	goed	goed	voldoende
	K	goed	goed	voldoende
Totaal N	goed	goed	voldoende	goed
CEC	matig	matig	voldoende	voldoende
EC²	goed	goed	goed	goed
Metalen	goed	voldoende	voldoende	voldoende
Macro- nutriënten	voldoende	voldoende	voldoende	matig
Micro- nutriënten	voldoende	voldoende	voldoende	matig
Labiël C en N	matig	voldoende	matig	matig

¹ Betreft de mate waarin een score een generieke geldigheid heeft of per regio/bodem varieert.

² EC wordt vaak bepaald aan het beregenings-/irrigatiewater en niet zozeer aan de EC in bodemvocht. In welke mate de EC van irrigatiewater bepalend is voor de EC in de bodem is slecht onderzocht.

Uit de analyse in Tabel 35 blijkt dat de meeste indicatoren, behalve CEC en labiel C en N, voldoende tot goed scoren op effectiviteit. Een voldoende- tot goede-score betekent hier dat ze in het licht van de chemische 'gezondheid' van de bodem te interpreteren zijn, hier specifiek in relatie tot gewasproductie, en goed functioneren van het systeem akkerbouw/veehouderij. Voor de meeste indicatoren geldt dat ze redelijk eenvoudig en tegen beperkte kosten te analyseren zijn. Voor metalen, macro- en micronutriënten en labiele N en C geldt dat ze deels duurder in analyse zijn dan wel dat er geen eenduidig beoordelingskader is. Zo geldt dat CEC niet alleen duur is, maar voor CEC bestaat ook geen eenduidige indeling in 'goed' of 'slecht' in relatie tot bijvoorbeeld gewasproductie. Zowel in gronden met een lage CEC dan wel hoge CEC kan een gewas optimaal geteeld worden. Voor precisie geldt dat vooral de veel onderzochte indicatoren (organische stof, pH, nutriënten) met een voldoende tot goede precisie en herhaalbaarheid bepaald kunnen worden, deels omdat het bemonsteringsprotocol (nutriënten) daar al op is afgestemd, bijvoorbeeld door het vermijden van grote variatie in meetresultaten door ruimtelijke variatie op perceelniveau mee te nemen bij de opzet van de monsternamen. De scores van *goed*, zoals te zien onder precisie, komen dan ook overeen met die onder interpreteerbaarheid, juist omdat een deel van deze indicatoren al deel uitmaakt van bestaande landbouwkundige kwaliteitsbepalingen. Onder meer voor organische stof, pH, beschikbare nutriënten en EC bestaan nu al (in Nederland) richtlijnen, onder meer bemestingsadviezen gericht op productie. Die bestaan (nog) niet voor de indicatoren labiele C en N, deel van de micronutriënten, of deels voor de indicatoren metalen.

Aan de hand van deze beoordeling worden de volgende indicatoren voorgesteld, waarbij we nog een indeling maken in indicatoren die altijd meegenomen dienen te worden en een tweede groep die, afhankelijk van de locatie en historie van een gebied, meegenomen *kunnen* worden:

De uiteindelijk geselecteerde indicatoren worden in Tabel 36 weergegeven.

Tabel 36 De uiteindelijke selectie van chemische indicatoren, met A = absoluut noodzakelijk en '+' = locatieafhankelijk (add-on).

Chemische Indicator	
A	Organische stof SOM/OC
A	pH
A	Beschikbare nutriënten (N, P, K)
+	EC
+	Metalen (actueel en potentieel)
+	Aanvullende macro- en micronutriënten

Deze zes indicatoren zijn in tabellen Tabel 26 t/m 34 verder toegelicht; in paragraaf 3.4 staat tevens een overzicht van methoden die gehanteerd kunnen worden om deze te bepalen.

Verantwoording van de keuze voor de generieke en locatie specifieke (add-on-)indicatoren

De combinatie van de hier geselecteerde indicatoren is zowel gebaseerd op de mate waarin een bodem productief kan zijn als de kwaliteit van producten die geteeld worden. De productiviteit van de bodem voor gezonde gewassen hangt in hoge mate af van de chemische bodemvruchtbaarheid, hier gedefinieerd als de hoeveelheid beschikbare nutriënten voor het gewas. De indicator 'beschikbare nutriënten' is daarom onmisbaar om de chemische gezondheid vast te stellen en de facto ook de enige naast pH die standaard in CASH is opgenomen. De mate waarin nutriënten beschikbaar zijn voor een plant hangt vervolgens sterk samen met onder andere de pH en organische stof. De zuurgraad (pH) bepaalt onder meer de beschikbaarheid van P, maar vooral ook van een groot deel van de overige (micro)nutriënten als zink en koper. Voor de meeste teelten bestaan daarom specifieke optimale pH-ranges, deels afhankelijk van bodemtype. Naast pH is ook organische stof van belang voor de nutriëntenhuishouding, deels vanwege nalevering van onder meer N en, in mindere mate, P en K. Ook wordt organische stof in toenemende mate gezien als potentiële bron voor micronutriënten Cu en Zn, voor zover die niet al in voldoende mate in de bodem aanwezig zijn, onder andere door aanwending van dierlijke mest die vrijwel alle gevallen zorgt voor een meer dan voldoende aanvoer van deze micronutriënten.

Naast deze generieke indicatoren die regionaal van toepassing zijn kunnen EC, metalen en overige macro- en micronutriënten als relevantste add-ons beschouwd worden. EC of zoutsterkte is van belang in die gebieden waar sprake kan zijn van intrusie van zout water via de ondergrond of irrigatie met zout water (inlaat van zout water). Veel gewassen zijn namelijk gevoelig voor zoutschade; vooral gewassen als komkommer, paprika, sla en boomteeltproducten vertonen al bij relatief lage waarden voor EC, of meer specifiek Chloride-concentraties, negatieve effecten van zout. Daartegenover staan ook meer zouttolerante gewassen als granen, gras en suikerbieten (Stuyt et al., 2016).

Als tweede add-on die ook in de CASH-methodiek is opgenomen, wordt de metaalbeperking genoemd. In verreweg het grootste deel van Nederland kan gesteld worden dat de huidige gehalten aan metalen niet beperkend is voor de productie van gewassen (zie onder andere Mol et al. (2012)). Lokaal, onder andere in uiterwaarden van zowel grote rivieren (Maas, Rijn, Waal) en kleine stromen (o.a. Geul, Dommel) en soms regionaal zoals in de Kempen en in het Veenweidegebied van Zuid- en Noord-Holland, komen (sterk) verhoogde gehalten aan metalen voor in de bodem. In de meeste gevallen van lokaal of regionaal verhoogde gehalten aan metalen zal daarbij niet zozeer de productiviteit van een gewas aangetast worden, maar voldoet de kwaliteit van voedselgewassen dan wel veevoer niet meer aan de daarvoor geldende kwaliteitseisen (te hoge concentraties metalen). Voorbeelden hiervan zijn onder meer verhoogde gehalten aan cadmium in graan, prei en bladgroenten in de Kempen en verhoogde kopergehalten in gras in het veenweidegebied. In combinatie met informatie over pH en bodemtype bestaan voor een aantal metalen en bodem-gewascombinaties specifieke advieswaarden waar de gehalten in de bodem aan moeten voldoen om de kwaliteit van een gewas te waarborgen (Römkens et al., 2007). De voorgestelde methodiek komt daarbij wat concept betreft overeen met die voor fosfaat, waar twee bepalingen nodig zijn om zowel de actuele beschikbaarheid als potentieel beschikbare bodemvoorraad te meten. Voor metalen betreft dit voor actuele beschikbaarheid dezelfde methode als voor P (0.01 M CaCl₂), terwijl voor de bodemvoorraad de verdunde HNO₃-extractie voorgesteld wordt, analoog aan de mogelijke invoering van deze methode in het bodembeleid (Lijzen et al., 2017).

Tot slot stellen we voor om aanvullend de macro- en micronutriënten op te nemen als add-on. Hieronder vallen, voor Nederland, onder meer calcium (Ca), magnesium (Mg) en zwavel (S; macronutriënten) en borium (B), mangaan (Mn), koper (Cu), molybdeen (Mo), ijzer (Fe) en zink (Zn). Voor de laatste drie geldt echter dat, in tegenstelling tot B, Cu en Mn, er geen advieswaarden bestaan. Recent zijn er wel suggesties gedaan dat onder meer voor Zn er sprake zou zijn van een toenemend lage zinkstatus van bodems (BLGG, 2015), maar dit is nog onderwerp van discussie en onderzoek.

Overeenkomst met andere indicatorsystemen in Nederland

In Nederland heeft onder andere de Bodemacademie, een initiatief van het Louis Bolk Instituut en CLM, een serie bodemkenmerken opgesteld als belangrijkste criteria voor de bodemchemische vruchtbaarheid, evenals voor bodemfysische en bodembiochemische eigenschappen (<http://bodemacademie.nl/>). De bodemchemische eigenschappen die benoemd worden, zijn pH, EC, macro- en micronutriënten en CEC.

Organische stof wordt daarbij wel benoemd, maar wordt geschaard onder de bodembiochemische indicatoren. Met uitzondering van CEC komt deze selectie daarmee overeen met de hier benoemde shortlist (organische stof, macronutriënten en pH) en de aanvullende bodemafhankelijke indicatoren (EC, micronutriënten).

3.5.1 Afhangelijkheid van indicatoren van bodemtype en temporeel variabele omstandigheden

Een belangrijk aspect bij de beoordeling van de score van een indicator is de mate waarin deze afhankelijk is van andere, al dan niet temporeel of ruimtelijk variabele condities. Hieronder vallen onder meer bodemtype (klei, zand, veen, löss) en weer (invloed van temperatuur en neerslag – dus ook bodemvochtgehalte). Veel van de gekozen indicatoren zijn in meer of mindere mate afhankelijk van een of beide factoren. In Tabel 37 staat de mate waarin dat het geval is en of er bij de beoordeling van de score rekening gehouden moet worden met deze sturende factoren. Daarmee wordt niet alleen bedoeld of de score zelf afhangt van de factor, bijvoorbeeld in welke mate organische stof afhangt van bodemtype, maar ook of de beoordeling van de score relatief is en ook afhankelijk is van de genoemde factoren. Dat laatste geldt specifiek voor bodemtype; voor weers- of seizoensinvloeden is alleen van belang na te gaan of de meting zelf afhankelijk is van, in dit geval, vochtgehalte en temperatuur.

Tabel 37 Overzicht van de afhankelijkheid van de meetwaarde van de indicator van bodemtype en weer: ●=afhankelijk, ●●=sterk afhankelijk., ●●●=zeer sterk afhankelijk ?=niet (geheel) bekend.

Indicator	Bodemtype		Weer/Seizoen/bemesting ¹		
	Meetwaarde	Beoordeling	Bodemvocht gehalte	Temperatuur	Bemesting
Organische stof/koolstof	●●●	●			
EC			●●	●●	●●
pH	●●●	●●			●
Macronutriënten: N ²	●	●●	?	?	
Macronutriënten: P ²	●	●●	?	?	●?
Macronutriënten: K	●	●			
Micronutriënten: Zn, Cu, Fe, Mn,	●	●			●
Metalen actueel	●●		●		●(●)
Metalen potentieel	●	●			

¹ Invloed van bemesting geldt niet zozeer de invloed op een extraheerbaar gehalte, maar veeleer de indirecte invloed door bijvoorbeeld effecten van zoutsterkte en/of pH als gevolg van bemesting.

² Dit geldt met name voor de meting van beschikbaar N en P (Pw, P-Ca), niet zozeer voor totaal N en P (P-AI).

3.5.2 Nadere toelichting van de invloed van bodemfactoren op de scores van de indicatoren

Bodemtype

Voor de meeste indicatoren geldt dat de absolute meetwaarden en de interpretatie (beoordeling) ervan in meer of mindere mate gekoppeld zijn aan bodemtype. Verschillen in pH, organische stof en metaalgehalten zijn deels bepaald door bodemtype en daarnaast uiteraard door bodemmanagement. Voor de meeste macronutriënten (N, P, K) geldt dat management soms belangrijker is dan bodemtype, maar het uiteindelijke gehalte en zeker de interpretatie ervan, is sterk bodemafhankelijk. Dat maakt dat voor vrijwel alle indicatoren zoals hier benoemd, bekend moet zijn wat het bodemtype is, niet alleen om de waarde in absolute zin te beoordelen, maar meer nog in de betekenis voor de chemische bodemtoestand. Voor vrijwel alle indicatoren die nu reeds in de bemestingsadviezen zijn opgenomen, geldt dat de beoordeling van de indicatorwaarde verschilt per bodemtype.

Vochtgehalte/temperatuur

Of het vochtgehalte en/of de temperatuur van een bodemmonster van invloed zijn op meetwaarde een indicator hangt deels samen met de voorbehandeling. Onder veldcondities zullen de EC en wellicht ook de pH (en daarmee samenhangend alle stoffen die gerelateerd zijn aan pH) afhankelijk zijn van vocht en temperatuur. Voor vrijwel alle bepalingen, behalve N, geldt echter dat gedroogde grond gebruikt wordt. Dit betekent dat het initiële vochtgehalte zoals dat onder veldcondities bepaald zou worden van geringe betekenis is voor de meting in de grond na droging. Hiermee hebben de veldcondities (vochtgehalte/temperatuur) dus geen invloed op de meetwaarden.

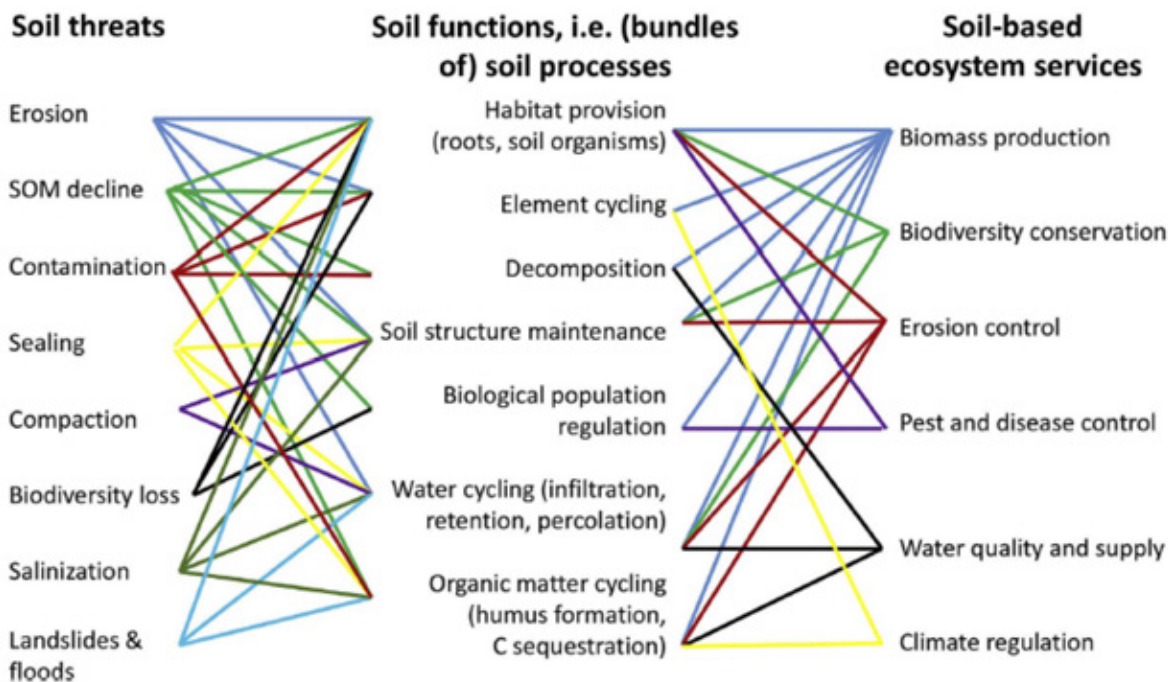
Bemesting

Voor een aantal indicatoren, zoals pH of EC (of die indicatoren die deels bepaald worden door pH en EC (onder andere Pw, metalen)), kan bemesting van invloed zijn op de hoogte van de bepaling. Daarbij laten we de invloed van bemesting door verhoging van een gehalte, bijvoorbeeld N, P of metalen, hier buiten beschouwing, maar dit heeft uiteraard ook een effect. Om invloeden van bemesting te voorkomen, zou een aantal dagen moeten worden gewacht voor SHI-bemonstering.

4 Biologische indicatoren

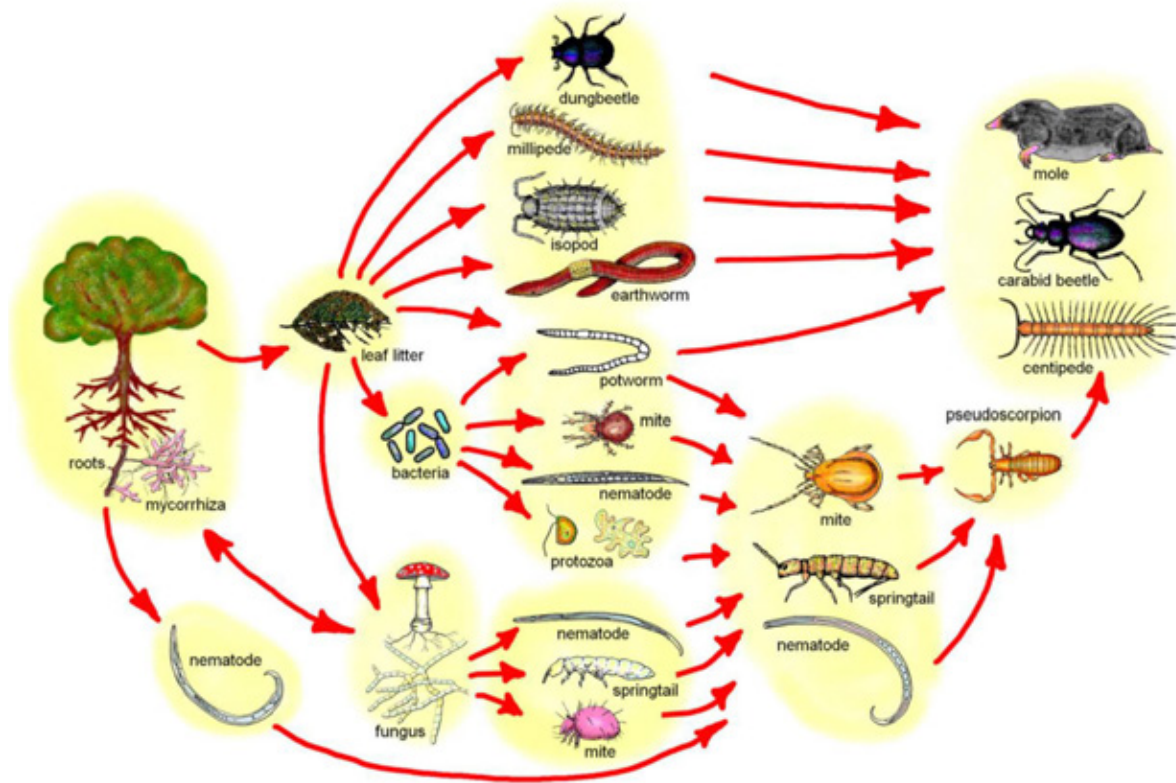
4.1 Inleiding bodembioLOGIE en bodemgezondheid

Iedereen heeft wel een beeld van wat een onvruchtbare of vruchtbare bodem is (Schils, 2012). Bij een onvruchtbare grond denk je al snel aan geel of wit zand waarmee je normaal gesproken de zandbak vult. Daar zal niet veel op groeien. Een zak met potgrond is het andere uiterste. Het is rijk aan organische stof, houdt water goed vast en bevat veel voedingsstoffen voor planten. Hoe vruchtbaarder de grond, hoe beter we gewassen kunnen produceren als voedsel voor mensen en dieren. Bodemvruchtbaarheid is de bijdrage van de bodem aan de productiviteit. De invloed van bodemvruchtbaarheid komt vooral tot uiting indien geen gebruik wordt gemaakt van additionele meststoffen, beregening of gewasbeschermingsmiddelen. Indien deze grond- en hulpstoffen wel worden toegepast, is de positieve invloed van een goede bodemvruchtbaarheid gemaskeerd (Bloem et al., 2017). Bodemgezondheid (soil health) is een breder begrip. Een gezonde bodem is een levende bodem waarin natuurlijke processen en functies onbelemmerd kunnen verlopen. Functies die direct of indirect nuttig zijn voor de mens worden ecosysteemdiensten genoemd (Figuur 2, rechterkolom) en zijn rechtstreeks gekoppeld aan diverse functies van de bodem. Vaak worden de begrippen functies en diensten door elkaar gebruikt. Belangrijke functies zijn onder andere de omzetting en levering van nutriënten, de vorming en instandhouding van bodemstructuur, waterregulatie (infiltratie en vasthouden), onderdrukking van plantenziekten en koolstofvastlegging.



Figuur 2 De relatie tussen bodembedreigingen, bodemfuncties en bodem-ecosysteemdiensten (Bünemann et al., 2018).

Voor al deze functies is het bodemleven van groot belang, in samenhang met de fysische en chemische omstandigheden. In de bodem leven micro-organismen, zoals bacteriën en schimmels, en fauna, zoals wormen, mijten, springstaarten, aaltjes en protozoën. Al deze organismen zijn op de een of andere manier betrokken in de nutriëntenkringloop in de bodem (Figuur 3). Ze voeden zich met plantenresten, met meststoffen, maar ook met elkaar. Een deel van het verwerkte voedsel komt weer beschikbaar als voedingsstoffen voor de plant. Een ander deel wordt vastgelegd in het weefsel van de organismen zelf of in andere vormen van organische stof.



Figuur 3 Bodemvoedselweb (Ron de Goede, WUR, uit Rutgers et al., 2018).

4.2 De belangrijkste bedreigingen voor de levende bodem

In de Europese Bodemstrategie zijn acht bedreigingen voor het functioneren van de bodem beschreven (zie ook Figuur 2). Deze omvatten:

- Erosie
- Verlies van organische stof
- Plaatselijke en diffuse bodemverontreiniging
- Bodemafdekking en bodemverdichting
- Afname van de biodiversiteit in de bodem
- Verzilting
- Overstromingen en aardverschuivingen

Verzuring werd in een later stadium aan het rijtje toegevoegd (Rutgers et al., 2011, 2014).

De meeste bedreigingen spelen ook in Nederland. Om erosie te voorkomen, is in Zuid-Limburg niet-kerende grondbewerking wettelijk verplicht. Door intensieve landbouw zijn er serieuze zorgen over bodemverdichting, verlies van organische stof en afname van bodembiodiversiteit (Rutgers et al., 2011; Schouten et al., 2018). In natuurgebieden zorgt verzuring voor afname van bodemleven en haperende strooiselafbraak en nutriëntenlevering (Bergsma et al., 2018).

4.3 Hoe meet je bodembiodiversiteit?

Het vakgebied bodemgezondheid maakt momenteel een enorme ontwikkeling door. In het klassieke bodemonderzoek heeft de chemische bodemkwaliteit de boventoon gevoerd. Recentelijk is dat meer en meer uitgebreid naar de biologische en fysische bodemgezondheid, zonder de samenhang met de chemische bodemvruchtbaarheid uit het oog te verliezen. Bodemorganismen spelen een centrale rol in het functioneren van de bodem en worden beschouwd als de gevoeligste indicatoren voor bodemgezondheid, omdat ze snel reageren op veranderingen in milieuomstandigheden en beheer

(Bünemann et al., 2018; Stewart et al., 2018). Door dit inzicht wordt er steeds meer aandacht gegeven aan bodembioïologie en komen door additioneel onderzoek steeds meer bodembioïologische indicatoren beschikbaar. Dat kunnen rechtstreekse metingen zijn van het aantal of het gewicht van bepaalde bodemorganismen of afgeleide indicatoren die de activiteit van bepaalde groepen beschrijven. Ook de functie van diverse organismen in de bodem en hun rol in het bodemecosysteem worden steeds meer in kaart gebracht (Rutgers et al. 2014; Griffiths et al., 2018). Langzamerhand verschijnen hierdoor ook steeds meer adviezen over bodembioïologische streefwaarden, al dan niet voorzien van een bemestings- of handelingsadvies (Rutgers et al., 2007; Schils, 2012; Hanegraaf & van Alebeek, 2013; Bloem et al., 2017).

Bodembioïodiversiteit heeft veel aspecten. Daarom zijn er veel indicatoren om onderdelen en functies van de bodembioïodiversiteit te meten. In een aantal Europese projecten zijn selecties gemaakt van toepasbare indicatoren voor bodembioïodiversiteit en bodemkwaliteit (Bloem et al. 2006; Bispo et al. 2009, Griffiths et al 2016; Rutgers et al., 2018). Veel indicatoren hebben hun bruikbaarheid bewezen en er zijn niet een paar die superieur en universeel toepasbaar zijn. Er is altijd een meer of minder uitgebreide set van indicatoren nodig, afhankelijk van het doel, de technische mogelijkheden en van beschikbaar budget. Bodembioïologische indicatoren omvatten aantallen of biomassa, soortensamenstelling of diversiteit van verschillende functionele groepen bodemorganismen. Daarnaast worden ook activiteiten en functies van bodemorganismen gemeten.

In het Bodembioïologische Indicator (Bobi) project werden meer dan vijftig indicatoren gemeten in het kader van het Landelijke Meetnet Bodem (LMB). Bobi werd sinds 1997 gecoördineerd door het RIVM, maar de metingen zijn beëindigd in 2014. Wel is de database nog zeer relevant als referentie. De uitgebreide set indicatoren geldt als de standaard voor Nederland (Rutgers et al., 2007, 2014).

Naast bodembioïologische eigenschappen zijn in Bobi ook chemische en fysische eigenschappen gemeten, onder andere het organischestofgehalte, C- en N-totaal, bulkdichtheid, indringweerstand en vochtgehalte. Daarnaast worden ook gegevens over het bodembeheer en bedrijfsvoering verzameld. Bobi bevat indicatoren voor de volgende organismen en processen (Schouten et al., 1997, 2002):

- Koolstof- en stikstofkringloop (potentiële C- en N-mineralisatie)
- Bacteriën en schimmels
- Aaltjes (nematoden)
- Potwormen (enchytreeën)
- Regenwormen (lumbiciden)
- Mijten en springstaarten (micro-arthropoda)

Voor de meeste organismen werden indicatoren afgeleid, gebaseerd op meting van biomassa, aantallen, samenstelling en soortenrijkdom. Identificatie van soorten vond plaats tot op het niveau van het geslacht (genus) of de soort (species). De monstercampagnes voor Bobi vonden plaats in de maanden april en mei, en oktober en november, omdat in die perioden de diverse bodemecosystemen actief en relatief stabiel zijn: de vochtthuishouding en nutriëntenstatus zijn dan tamelijk constant en relatief onafhankelijk van de weersomstandigheden. Een meer gedetailleerde beschrijving van de methoden is te vinden in Rutgers et al. (2007).

Voor de (landbouw)praktijk is de omvang van een meetset als die van Bobi te kostbaar. In 2013 is voor het toenmalige Productschap Akkerbouw een kleinere selectie voorgesteld van indicatoren voor een minimale dataset bodembioïodiversiteit (Hanegraaf en van Alebeek, 2013)⁵.

Tabel 38 geeft naast de Bobi-standaardset en de daarvan afgeleide minimale dataset, een overzicht van andere systemen die worden gebruikt of ontwikkeld om bodemkwaliteit – en in meer of mindere mate ook bodembioïodiversiteit – in kaart te brengen.

⁵ Gedetailleerde informatie is te vinden op <http://www.kennisakker.nl/node/4156>. De links hierin werken echter niet goed meer. Dit is te omzeilen door met bv. Google te zoeken op 'meetset bodembioïodiversiteit'.

Tabel 38 Een overzicht van gemeten biologische indicatoren in verschillende bodemgezondheid-tools.

Systeem	Beschrijving	Gehanteerde bodembioologische indicatoren
Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit (Bobi)	Deze uitgebreide set van indicatoren geldt als de standaard voor Nederland. Het door het RIVM gecoördineerde meetnet (1993-2014) is niet meer operationeel. Wel zijn de database en de set aan indicatoren, waaronder de Bodembioologische Indicator (Bobi), nog (zeer) relevant als referentie.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bacteriële biomassa, -activiteit en diversiteit 2. Schimmelbiomassa en activiteit 3. Nematoden (aantallen en diversiteit) 4. Regenwormen en potwormen (aantallen en diversiteit) 5. Mijten en springstaarten (aantallen en diversiteit) 6. Potentiële C-mineralisatie (bodemademhaling) 7. Potentiële N-mineralisatie (aerob) 8. Potentieel mineraliseerbare N (anaerob)
Minimale dataset	Database uit de PPS Bodem van de Topsector Agri&Food Als tool niet operationeel.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bacteriële biomassa 2. Schimmelbiomassa en activiteit 3. Hot Water extractable Carbon (HWC) 4. Potentieel Mineraliseerbare N (PMN) 5. Nematoden (aantallen en diversiteit) 6. Regenwormen (aantallen en diversiteit) <p><i>Soms aangevuld met:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Mijten en springstaarten (aantallen en diversiteit) 8. Ziektewering (biotoetsen in potproeven) 9. Pathogene schimmels/bacteriën
Comprehensive assessment of soil health (CASH)	Systeem ontwikkeld door Cornell University (VS). Mogelijkheden in inventariserende studie onderzocht.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eiwitindex 2. Bodemademhaling (CO₂-respiratie) 3. Actieve koolstof 4. Potentieel Mineraliseerbare N (PMN) 5. Wortel ziektedruk
Bodemscan	Bodemkwaliteitsbeoordeling, ontwikkeld door LBI. Visuele deel in gebruik bij Stichting Veldleeuwierik.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Organische stof 2. Bodempathogenen (besmettingen) 3. BFI/Bodemleven (indirecte NIR-meting, zie Laboratoria waaronder Eurofins) 4. CO₂-respiratie (meting) 5. Poriën (score) 6. Wormgangen (score)
Bodemconditiescore	Visuele veldbeoordeling t.b.v. kennisoverdracht veehouderij, ontwikkeld door WUR, LBI en boerenverstand. Gebaseerd op Visual Soil Assessment (Nieuw-Zeeland).	<ol style="list-style-type: none"> 1. Organische stof (meting) 2. Regenwormen (score)
Bodempaspoort	In ontwikkeling bij ZLTO. Beoogt bodem- en perceelinfo te combineren t.b.v. huur en pacht.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Organische stof (meting) 2. Pathogene nematoden (soort/aantal) 3. Regenwormen (aantal/m²)
Bodemlabel	In ontwikkeling bij CLM. Gericht op maatregelen die genomen kunnen worden om bodemconditie te verbeteren.	(Nog) niet uitgewerkt
Diverse systemen van laboratoria waaronder Eurofins	Uitgebreide set van chemische en soms bodembioologische indicatoren.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Organische stof (meting) 2. BFI (bodemleven), indirecte meting met Near InfraRed spectroscopie (NIR). Zou moeten correleren met de potentieel mineraliseerbare N.

De minimale dataset voor de akkerbouw is verder ontwikkeld door Wageningen Plant Research in de PPS Bodem van de Topsector Agri & Food. In de volgende paragrafen volgt een beknopte toelichting over de indicatoren.

4.3.1 Potentieel Mineraliseerbare N (PMN)

PMN (mg N/kg grond) is een maat voor labiele, gemakkelijk afbreekbare stikstof. Dit wordt gemeten als de toename van ammonium na één week anaerobe incubatie in water bij 40 °C. Onder deze omstandigheden is er een snelle mineralisatie en wordt er weinig stikstof weer vastgelegd in microbiële biomassa. Er wordt geen nitraat gevormd, waardoor verliezen door denitrificatie worden vermeden. De PMN vertoont goede correlaties met de totale microbiële biomassa en is betrekkelijk eenvoudig te meten en te begrijpen. De totale microbiële biomassa en de bodemademhaling worden ook veel gebruikt. De PMN is echter gemakkelijker te meten dan de microbiële biomassa en gemakkelijker te interpreteren dan de bodemademhaling. Daarom wordt PMN gebruikt als een gemakkelijk toepasbare maat voor totale microbiële biomassa.

Hogere waarden wijzen op meer bodemleven en een grotere bodemvruchtbaarheid. De hoogste waarden worden gevonden op (permanent) grasland, lagere waarden op percelen gebruikt voor akkerbouw en de laagste waarden op percelen gebruikt voor tuinbouw. Dit hangt samen met de intensiteit van het grondgebruik.

4.3.2 Heet Water extraheerbaar C (HWC)

HWC ($\mu\text{g C/kg}$) is labiele, gemakkelijk afbreekbare koolstof. Het wordt gemeten als de toename in organische koolstof na 18 uur incubatie in water bij 80 °C. HWC bestaat voor een groot deel uit slijm dat door bacteriën en schimmels is uitgescheiden en zorgt voor het samenkiten van bodemaggregaten (grondkruimels). HWC correleert met totaal organische stof, maar laat sneller en grotere verschillen zien van bijvoorbeeld organische bemesting of gereduceerde grondbewerking. HWC wordt gezien als een early indicator voor veranderingen in organischestofgehalte.

De hoogste waarden worden gevonden op (permanent) grasland, lagere waarden worden gevonden in akkerbouw, en de laagste waarden worden gevonden in tuinbouw.

Labiele C en N (HWC en PMN) geven informatie over de afbreekbaarheid en daarmee de kwaliteit van organische stof. PMN geeft ook een indicatie van de totale microbiële biomassa. Dat is praktisch toepasbare, maar nog wel erg beknopte informatie op de grens tussen chemie en biologie. Om de ecologie te begrijpen, zijn ook biologische metingen nodig van (kwantitatief) belangrijke groepen organismen van het bodem voedselweb, zoals schimmels, bacteriën, regenwormen en nematoden.

4.3.3 Schimmelbiomassa

Schimmels zijn, samen met bacteriën, de belangrijkste afbrekers van organische stof en vormen de basis van het (bodem)voedselweb. Schimmeldraden vormen netwerken rond organisch materiaal en gronddeeltjes en dragen zo bij aan een goede, kruimelige structuur. Een hoge schimmelbiomassa ($\mu\text{g C/g}$) en een hogere schimmel-bacterieverhouding wijzen op een relatief lage beschikbaarheid van (minerale) nutriënten, langzame afbraakprocessen en een kleinere kans op stikstofverliezen door uitspoeling en denitrificatie. De totale schimmelbiomassa wordt microscopisch gemeten na kleuring van de celwanden. Actieve schimmeldraden (% van totaal) worden onderscheiden door kleuring van nucleïnezuren.

4.3.4 Bacteriebiomassa

Bacteriën zijn, samen met schimmels, belangrijke afbrekers van organische stof en vormen de basis van het bodem-voedselweb. De hoeveelheid en activiteit van bacteriën worden bevorderd door organische bemesting, vooral door drijfmest met een relatief hoge stikstofbeschikbaarheid. Bodems met relatief veel bacteriën (lage schimmel-bacterieverhouding) hebben een relatief snelle afbraak en hoge mineralisatie. Een grotere bacteriebiomassa ($\mu\text{g C/g}$) wijst op een hogere bodemvruchtbaarheid. Dit is gunstig voor de gewasproductie, maar geeft ook een groter risico op stikstofverliezen door uitspoeling of denitrificatie. Totale hoeveelheden bacteriën worden microscopisch gemeten.

4.3.5 Nematoden

Nematoden (aaltjes) zijn belangrijke begrazers van bacteriën, schimmels en plantenwortels en dragen bij aan de mineralisatie. Daarnaast zijn er ook predatoren (roofaaltjes) die protozoën en andere

nematoden belagen. Ze worden tot nu toe vooral microscopisch gemeten en al lang gebruikt als indicator (aantal/100 gram grond, soortensamenstelling) en geven aanwijzingen over de vruchtbaarheid en mate van verstoring in de bodem.

Plantenparasitaire nematoden beïnvloeden direct de teelt van een gewas. Doordat de meeste soorten verscheidene jaren in de bodem kunnen overleven in de afwezigheid van een waardplant, is vruchtwisseling van groot belang, inclusief rekening houden met de soort groenbemester. Aangezien de waardplantenreeks van de diverse soorten parasitaire nematoden varieert, kan pas actie tot bestrijding worden ondernomen als de teler weet welke soorten in een perceel voorkomen.

4.3.6 Regenwormen

Regenwormen (aantal/m²) kunnen in de bodem soms net zulke hoge biomassa's bereiken als schimmels en bacteriën. Wormen brengen organisch materiaal in de bodem, mengen de grond, bevorderen de microbiële activiteit en verbeteren de bodemstructuur (kruimels) en waterinfiltratie (poriën). In blijvend grasland komen hoge aantallen voor, maar in akkers veel minder. Voor telling van regenwormen worden plaggen (20x20x20 cm) gestoken en de wormen worden uitgezocht en getermineerd. Dieper levende 'pendelaars' worden met een mosterdextract gestimuleerd om zich bovengronds te melden.

Levende organismen (en dus biologische indicatoren) zijn gevoelig voor vocht en temperatuur (metaconditie). Daarom is het gebruikelijk deze metingen uit te voeren bij gematigde omstandigheden in het voor- en/of najaar, zodat in elk geval zomerdroogte en winterkou worden vermeden. Voor microbiologische metingen aan bacteriën en schimmels werden in Bobi aanvankelijk de monsters een maand in het lab voor-geïncubeerd bij constante temperatuur en vochtgehalte. Vanaf 2004 is dit niet meer gedaan, omdat toen de schimmelmetingen werden toegevoegd aan de indicatorset. Met name mycorrhizaschimmels kunnen snel afnemen tijdens incubatie, omdat ze dan gescheiden zijn van de plantenwortels waar ze hun voeding van krijgen. Effecten van weer en klimaat zijn dus onvermijdelijk bij biologische metingen. Anderzijds maakt de hoge gevoeligheid biologische indicatoren juist geschikt als indicator voor veranderingen in beheer en omstandigheden (zgn. most responsive indicators) (Bloem et al., 2006; Bünemann et al., 2018; Stewart et al., 2018).

4.4 Initiële keuze van indicatoren gebaseerd op literatuuronderzoek (longlist)

De indicatoren (fysisch, chemisch en biologisch, FCB) die voor de SHI worden geselecteerd, moeten voldoen aan een aantal algemene criteria die we voorafgaand aan dit werk hebben gedefinieerd (paragraaf 1.3.3):

- Effectief (gevoelig voor management, interpreteerbaar)
- Praktisch toepasbaar (relatief makkelijk te meten, zo goedkoop mogelijk, korte responstijd van metingen)
- Nauwkeurigheid is aanvaardbaar voor onze toepassing binnen de SHI

Het vakgebied bodembioïologie wijkt af van bodemfysica en bodemchemie in die zin dat de bodembioïologie complexer en nog volop in ontwikkeling is. Dit geldt dus ook voor bodembioïologische meetmethoden. Hedendaagse ontwikkelingen op meetgebied gaan echter zeer snel. Of de hieronder gepresenteerde indicatoren in alle gevallen aan alle criteria kunnen voldoen is de vraag, omdat dit ook verband houdt met de hoedanigheid van de bodembioïologie, waarin we tenslotte werken met levende organismen.

Biologische indicatoren zijn bewezen effectief en gevoelig. Ze zijn ook praktisch toepasbaar, maar in het algemeen nog betrekkelijk arbeidsintensief en daardoor veel duurder dan de meeste fysische en chemische analyses. Daarom beperken praktijktoepassingen zoals soil-health-indexsystemen zich vaak tot slechts enkele biochemische metingen van labiele C en N. De nauwkeurigheid voor biologische metingen (aan hetzelfde homogene grondmonster) ligt in het algemeen onder de 10%. In de praktijk wordt de nauwkeurigheid echter bepaald door de veel hogere variatie in het veld. Deze ligt vaak rond de 15-20%, niet alleen bij biologische, maar ook bij chemische en fysische indicatoren.

Na zeventien jaar is Bobi geëvalueerd en werd nog steeds beschouwd als de 'state of art' voor het monitoren van zowel bodembiodiversiteit als bodem-ecosysteemdiensten (Rutgers et al., 2014; Griffiths et al., 2018). Stabiliteit en continuïteit zijn de basis voor het opbouwen van een lange en daardoor waardevolle meetserie. Daarvoor is een stabiele indicatorset nodig. Er is een snelle ontwikkeling in moleculaire DNA- en RNA-technieken, maar de informatie ligt vaak in het verlengde van klassieke taxonomische methoden. Dit levert niet per se nieuwe mogelijkheden voor beoordeling van bodemgezondheid en ecosysteemdiensten op. DNA-technieken leveren ongekende nieuwe informatie over de enorme diversiteit van met name micro-organismen. Deze informatie is nog niet makkelijk te interpreteren en vooral kwalitatief. Het geeft de soortenrijkdom en relatieve verhoudingen tussen soorten weer, maar nog nauwelijks betrouwbare kwantitatieve informatie over hoeveelheden (biomassa) en activiteit.

Voor bacteriën en schimmels wordt phospholipid fatty acid (PLFA) analyse beschouwd als een voor de praktijk beter toepasbare maat voor de structuur van de microbiële gemeenschap dan DNA-analyse. PLFA's geven geen informatie over de soortenrijkdom, maar wel over de hoeveelheden van belangrijke groepen micro-organismen. PLFA's zijn kenmerkende vetzuren in de celmembranen die worden gebruikt als biomarkers. Naast biomarkers voor diverse groepen bacteriën is er ook een biomarker voor schimmels. Bovendien kunnen ook arbusculaire mycorrhizaschimmels worden meegenomen door een neutral lipid fatty acid (NLFA) biomarker te meten.

Door Rutgers et al. (2014, <http://edepot.wur.nl/345145>) is op basis van multicriteria-analyse⁶ een minimumdataset voor het monitoren van bodem-ecosysteemdiensten voorgesteld. Pagina 80 van die publicatie geeft de minimumdataset:

- **Bodembioïologische indicatoren:** regenwormen, microarthropoden (mijten en springstaarten), nematoden, potwormen (enchytreeën, met name als er geen regenwormen zijn), schimmels, bacteriën, N-mineralisatie, C-mineralisatie en wortelmassa (alleen grasland).
- **Abiotische bodemindicatoren:** bodemtype en textuur, indringingsweerstand, bulkdichtheid, organische stof indicatoren inclusief labiele fracties, pH, nutriënten.
- **Systeeminidicatoren:** landgebruik, vegetatie, landbouwpraktijk (gewas, rotatie, grondbewerking, bemesting, gewasbescherming (pesticiden), berijding door machines en grondwatervniveau.

De geschiktheid van deze indicatoren is bepaald aan de hand van de criteria: betekenis, gevoeligheid, praktische meetbaarheid, kosten en relevantie voor beleid en praktijk. Als kosten een voornaam aspect vormen voor de bodemmonitoring, kunnen deze alleen worden gereduceerd door het aantal indicatoren te verminderen.

In o.a. de VS, Nieuw-Zeeland en Australië worden onlinetools aangeboden die vooral gericht zijn op de landbouwpraktijk. Hierin zitten een beperkt aantal indicatoren die een relatie hebben met bodembioïologie.

In the Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH, Cornell framework VS, <http://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/manual.pdf>) gaat het om de volgende indicatoren:

- Soil Protein Index

The Autoclaved Citrate Extractable (ACE) Protein Index is an indicator of the fraction of the soil organic matter that is present as proteins or protein like substances. This represents the large pool of organically bound nitrogen (N) in the soil organic matter, which microbial activity can mineralize, and make available for plant uptake. Protein content is an indicator of the biological and chemical health of the soil and is very well associated with overall soil health status.

- Soil Respiration

Respiration is a measure of the metabolic activity of the soil microbial community. It is measured by capturing and quantifying carbon dioxide (CO₂) released from a re-wetted sample of airdried soil held in an airtight jar for 4 days. Greater CO₂ release is indicative of a larger, more active soil microbial community.

- Active Carbon

Active carbon is an indicator of the small portion of soil organic matter that can serve as a readily available food and energy source for the soil microbial community, thus helping to maintain a healthy

⁶ (zie scoringstabellen op pagina's 54, 60, 69)

soil food web. To begin the process of measuring active carbon, soil is mixed with a potassium permanganate solution, which starts off deep purple in colour. The permanganate oxidizes the active carbon and loses some of its color. The more active carbon found in the soil, the more the purple color declines. This color change is measured with a spectrophotometer or colorimeter.

- **Add-on Test: Potentially Mineralizable Nitrogen**

Potentially Mineralizable Nitrogen (PMN) is an indicator of the capacity of the soil microbial community to convert (mineralize) nitrogen tied up in complex organic residues into the plant available form of ammonium. Soil samples are anaerobically incubated for 7 days, and the amount of ammonium produced in that period is measured as an indicator of nitrogen mineralization. This indicator has been replaced with the soil protein and respiration measurements in the CASH package, as those two separately indicate the activity of the microbial community in aerobic conditions, and the availability of N containing organic residues. PMN is available as an add-on test.

Behalve de PMN worden alle CASH-metingen uitgevoerd met gedroogde grond (*airdried soil*). Dit is een bodemkundige (chemische), maar geen biologische aanpak. Biologische metingen worden gedaan aan verse veldvochtige grond. De *soil protein index* wordt in de bodem-ecologische literatuur weinig genoemd (ook niet in Bünemann et al., 2018). Soil respiration met gedroogde en herbevochtigde grond meet niet de bodemademhaling (C-mineralisatie), want veel micro-organismen gaan kapot door het drogen en worden versneld afgebroken na herbevochtigen. Hierbij gaan ook bodemaggregaten (krumels) met daarin beschermd koolstof kapot. Dit draagt extra bij aan de piek (flush) in activiteit na het herbevochtigen. Op deze wijze meet je niet de activiteit van het bodemleven, maar een indicatie van gemakkelijk afbreekbare koolstof (labiele C). Dat is op zich nuttig en is in Nederland jarenlang aangeboden als CO₂-respiratie door GAIA Bodemonderzoek.

Naast de Cornell SHI zijn er vergelijkbare indicators sets voor de praktijk met online tools in Australië en Nieuw-Zeeland.

Soil Quality Australia

(<http://www.soilquality.org.au>):

- *Microbial biomass carbon (chloroform fumigatie extractie)*
- *Labile C komt overeen met active carbon (permanganaat oxideerbaar C)*
- *Soil Nitrogen Supply door middel van Potentially mineralizable nitrogen (PMN)*
- *Microbial activity (CO₂-productie) wordt genoemd, zonder verdere toelichting*
- *Nematodes*

Soil Quality Indicators (SINDI) New Zealand

<https://www.landcareresearch.co.nz/resources/data/sindi-soil-quality-indicators>,
<https://sindi.landcareresearch.co.nz/>

- *Anaerobically mineralisable Nitrogen: Availability of nitrogen reserve, surrogate measure for soil microbial biomass.*

Dit is potentieel mineraliseerbare N (PMN). Gemakkelijker te meten dan microbiële biomassa met chloroform fumigatie. Respiratie (CO₂-productie) is niet geselecteerd. Het is makkelijk meetbaar, maar moeilijk interpreteerbaar (Schipper en Sparling, 2000).

4.5 Uiteindelijke selectie van biologische indicatoren (shortlist)

Op basis van de voorgaande tekst en in de afgelopen decennia opgedane ervaringen in Nederland en Europa (Rutgers et al., 2014; Bloem et al., 2017; Rutgers et al., 2018), komen we voor een Nederlandse SHI uit bij de volgende indicatoren:

1. **Potentieel mineraliseerbare stikstof (PMN)**, als maat voor de kwaliteit (afbreekbaarheid) van organische stikstof en eerste indicatie van de totale microbiële biomassa. Internationaal veel gebruikt. Goede ervaringen en referentiedata in Bobi.
2. **a. Heet Water extraheerbaar koolstof (HWC)**, als maat voor labiele (gemakkelijk afbreekbare) koolstof en early indicator van veranderingen in totaal organische stof. Goede ervaringen in praktijkonderzoek. Nog onvoldoende referentiedata. **Of:**
b. Misschien ook interessant, maar nog weinig gebruikt: **actief koolstof (permanganaat oxideerbaar C, POXC)**, als maat voor wat stabielere organische stof en early indicator van koolstof vastlegging (Bongiorno et al., 2019).

NB Een van de twee bovengenoemde methoden (HWC of POXC) kan gebruikt worden om de component 'koolstof' binnen biologische indicatoren te meten. Welke methode daadwerkelijk gebruikt moet/zal gaan worden, moet ten tijde van implementatie beslist worden.

Voor de landbouwpraktijk worden in het algemeen (CASH Cornell, SINDI Nieuw-Zeeland en Soil Quality Australia) dus maar enkele biologische indicatoren gebruikt, die bovendien nauwelijks biologisch zijn te noemen, maar eerder biochemisch. Als de SHI niet alleen op duurzame landbouwproductie maar ook breder op bodemdiensten is gericht (Griffiths et al., 2018), is er meer nodig dan alleen labiele organische stof. Naast mineraliseerbare stikstof en heet water extraheerbaar koolstof is er dan aanvulling nodig, zoals voorgesteld in de minimale dataset voor het praktijkonderzoek (Tabel 38), met op zijn minst:

1. **Nematoden** (aantallen en diversiteit)
2. **Bacteriële biomassa** [nmol PLFA/kg]. De eenheid nanomol PLFA/kg grond kan eventueel worden omgerekend naar mg C/kg, maar de nauwkeurigheid van de omrekeningsfactoren is niet bekend, en het PLFA-gehalte per hoeveelheid C is geen constante, maar een benadering.
3. **Schimmelbiomassa** [nmol PLFA/kg]
4. **Regenwormen** (aantallen en diversiteit)

Deze belangrijke groepen organismen kunnen op verschillende manieren worden gemeten. Schimmels, bacteriën en nematoden zijn tot nu toe voornamelijk microscopisch gemeten, deels automatisch. Voor schimmels en bacteriën is het lastig om (uiteindelijk) grote aantallen monsters te verwerken (> 500 per jaar). Internationaal gezien worden PLFA-analyses vaker toegepast. Hoewel dan geen Bobi-referentiedata meer kunnen worden gebruikt, lijkt het voor internationale harmonisering van methoden gewenst om verder te gaan met PLFA-technieken. Voor nematoden kan ook gedacht worden aan DNA-technieken, wanneer die voldoende uitgekristalliseerd zijn tot stabiele methoden die niet binnen enkele jaren weer aangepast moeten worden. Regenwormen kunnen eventueel door de landgebruiker zelf in het veld worden geteld, net als andere visuele kenmerken. Bij veldmetingen moet rekening worden gehouden met veel variatie. Dit is minder het geval bij metingen die in samengestelde mengmonsters in een lab worden uitgevoerd. Wel is het nodig dat per bodem en gewastype meer referentiedata worden verzameld en er ook meer inzicht komt in seizoensvariatie. De uiteindelijke shortlist van biologische indicatoren wordt nu:

Tabel 39 Uiteindelijke lijst biologische indicatoren. A = absoluut noodzakelijk, + = add-on indicator.

Indicator	
A	Potentieel mineraliseerbare stikstof (PMN)
A	Heet Water extraheerbaar koolstof (HWC) of actief koolstof (permanganaat oxideerbaar C), POXC
A	Nematoden (aantallen en diversiteit)
+	Bacteriële biomassa [nmol PLFA/kg]
+	Schimmelbiomassa [nmol PLFA/kg]
+	Regenwormen (aantallen en diversiteit)

5 Variatie van SHI-indicatoren onder invloed van metacondities

Omdat bodemgezondheidsindicatoren voor fysica, chemie en biologie worden gemeten in het veld of aan monsters gestoken in het veld, kunnen veldomstandigheden doorwerken in de meeste metingen en ook in de meeste meetwaarden. Een uitzondering hierop is bijvoorbeeld de indicator textuur, welke nauwelijks verandert, gezien op de menselijke tijdschaal. Deze veldomstandigheden zijn per definitie omstandigheden die bepaald worden door de heersende klimatologische omstandigheden en het gehanteerde landmanagement en waar we weinig tot niets aan kunnen doen. We noemen deze condities met een verzamelnaam 'metacondities'. Deze metacondities zijn uit te drukken in een aantal omgevingsfactoren waar deze metingen door worden beïnvloed:

- ruimtelijke variatie (binnen een perceel)
- bodemvochtgehalte
- bodemtemperatuur
- bodemtype (o.a. textuur)

De invloed van deze omgevingsfactoren op de fysische, chemische en biologische indicatoren en de grootte van deze invloed(en) worden hieronder verder beschreven.

5.1 Ruimtelijke variatie van SHI-indicatoren

Alle SHI-indicatoren vertonen meer of minder variatie binnen de ruimtelijke eenheden waarvoor zij worden bepaald, zoals percelen. Deze ruimtelijke variatie geldt zowel in het horizontale vlak als in het verticale vlak (diepte). Dit wordt ook wel veldvariabiliteit genoemd; geen enkele plek binnen een perceel is qua eigenschappen exact hetzelfde. Met deze ruimtelijke variatie moet rekening worden gehouden bij de bemonstering ter bepaling van de bodemgezondheid binnen een ruimtelijke eenheid met een bepaalde nauwkeurigheid. Hierbij is het volgende van belang:

- de steekproefopzet binnen de ruimtelijke eenheid (het ontwerp, de steekproefomvang);
- de *support*, i.e. de grootte van de individuele monsters.

Voorinformatie over de ruimtelijke variatie van SHI-indicatoren binnen ruimtelijke eenheden is cruciaal voor een nauwkeurige beoordeling van de soil health van die ruimtelijke eenheid. Door bij het steekproefontwerp rekening te houden met de ruimtelijke variatie kan worden bereikt dat de scores van SHI-indicatoren die voor een ruimtelijke eenheid worden berekend, voldoen aan nauwkeurigheidseisen.

Daarnaast kan ruimtelijke variatie zélf een indicator van soil health zijn. Een (te) grote bodemdichtheid met weinig ruimtelijke variatie zal bijvoorbeeld meer beperking voor worteling opleveren dan een grote bodemdichtheid met veel ruimtelijke variatie. In het laatste geval kunnen wortels toch nog een weg naar beneden vinden. Het schatten van alleen een perceelsgemiddelde bodemdichtheid is dus niet relevant voor de beoordeling van de soil health van een perceel. De variatie van bodemdichtheid binnen het perceel kan in dat geval aanvullende informatie opleveren.

5.2 Relatie tussen SHI-indicatoren en metacondities

De scores van bodembioologische, bodemchemische en bodemfysische indicatoren kunnen afhankelijk zijn van metacondities zoals bodemvochtgehalte, bodemtemperatuur en bodemtype. Tabel 40 geeft indicaties van deze afhankelijkheden voor alle, in eerdere hoofdstukken geselecteerde, indicatoren.

Deze afhankelijkheid kan op een aantal manieren optreden:

- De *meettechniek* die wordt gebruikt voor het bepalen van de waarde van een indicator wordt beïnvloed door een metaconditie. Bijvoorbeeld het meten van de indringingsweerstand met behulp van een penetrometer wordt beïnvloed door het actuele bodemvochtgehalte: als de bodem vochtig is, zal de indringingsweerstand lager zijn dan wanneer een bodem droog is.
- De *meetwaarde van de indicator zelf* wordt beïnvloed door een metaconditie, bijvoorbeeld de Electrical Conductivity (EC) is zowel afhankelijk van temperatuur als bodemvochtgehalte.

Tabel 40 Indicatie van de afhankelijkheid tussen indicatoren voor bodemgezondheid enerzijds en de metacondities bodemtype, bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur anderzijds. ● = afhankelijk; ●● = sterk afhankelijk; ●●● = zeer sterk afhankelijk. Lege cellen indiceren geen afhankelijkheid. A = absoluut noodzakelijk, '+' = add-on.

		Indicator	Afhankelijkheid bodemtype	Afhankelijkheid bodemvochtgehalte	Afhankelijkheid bodemtemperatuur
F	A	Watervasthoudend vermogen	● (klei)	● (klei)	
	A	Aggregaatstabiliteit	●	●	●
	A	Textuur	●		
	A	Indringingsweerstand	●●●	●●●	
	+	Doorlatendheid bij verzadiging, infiltratiecapaciteit	●		
	+	Droge bulkdichtheid	● (klei)	● (klei)	
C	A	Organischestofgehalte SOM/OC	●●●		
	A	pH	●●●		
	A	Beschikbaar N	●	● (indirect)	● (indirect)
		Beschikbaar P	●	● (indirect)	● (indirect)
		Beschikbaar K	●		
	+	EC (extract)		●●	●●
	+	Metalen actueel	●●		
		Metalen potentieel	●		
+	Aanvullende macro- en micronutriënten	●			
B	A	Potentieel mineraliseerbare stikstof (PMN)	●	●	●
	A	Heet water extraheerbaar stikstof (HWC) of Actief koolstof (permanganaat oxideerbaar C) POXC	●	●	●
	A	Nematoden (aantallen en diversiteit)	●	●	●
	+	Bacteriële biomassa	●	●	●
	+	Schimmelbiomassa	●	●	●
	+	Regenwormen (aantallen en diversiteit)	●	●	●

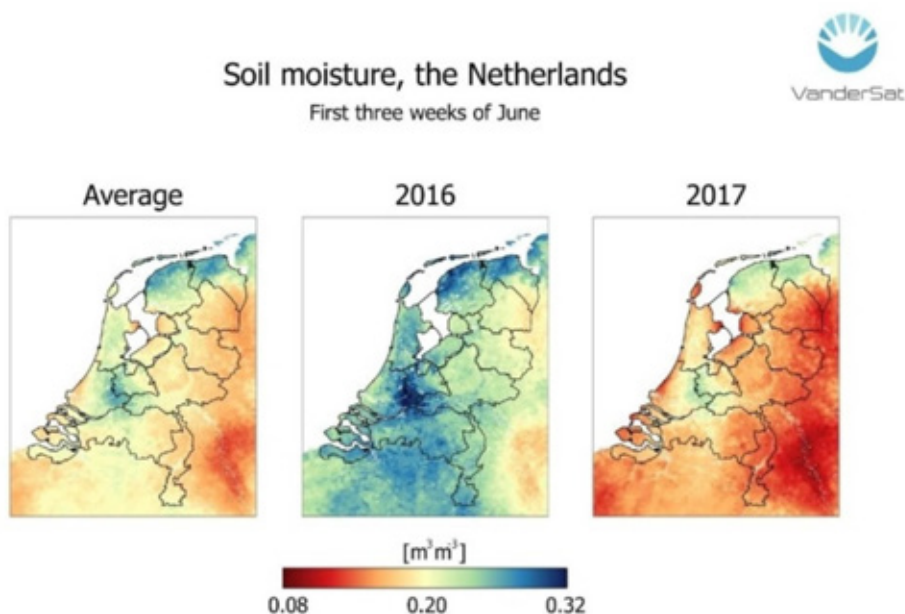
= Wordt gezien als één parameter

Een aantal bodemgezondheidsindicatoren is afhankelijk van het bodemtype. Het gehalte aan organische stof heeft in een kleigrond bijvoorbeeld een andere betekenis voor de bodemgezondheid dan in een zandgrond. De scores voor deze indicatoren zullen voor verschillende bodemtypen óf verschillend moeten worden geïnterpreteerd, óf zodanig worden berekend dat de scores voor verschillende bodemtypen met elkaar vergelijkbaar zijn.

Bij de bepaling en interpretatie van scores is het belangrijk om met de variatie van bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur in tijd en ruimte rekening te houden, omdat de geselecteerde indicatoren hierdoor in meer of mindere mate worden beïnvloed. In de volgende paragrafen zal op elk van deze twee metacondities nader worden ingegaan.

5.2.1 Metaconditie bodemvocht

De beschikbaarheid van water is essentieel voor plantengroei. Daarmee is het bodemvocht een belangrijk aspect van bodemgezondheid. Het bodemvochtgehalte, of meer specifiek de hoeveelheid vocht die voor de plant beschikbaar is, hangt af van aan- en afvoer naar boven (de atmosfeer) en naar beneden (het freatische grondwater) en van de fysische eigenschappen van de bodem. Vochtgehalten zullen seizoenfluctuaties vertonen die samenhangen met de fluctuaties in neerslag, verdamping en grondwaterstand. Informatie uit satellietbeelden geven een indruk van de temporele variatie van bodemvochtgehalten in de bovengrond. Figuur 4 geeft een beeld van het bodemvochtgehalte in de bovengrond van Nederland gedurende drie weken in juni 2016 en 2017, afgeleid van satellietinformatie, en daarmee een indruk van: a) de ruimtelijke variatie hiervan op hetzelfde tijdstip per jaar en b) de temporele variatie in dezelfde maand van twee opeenvolgende jaren. De volgende link geeft een dynamisch beeld van de veranderingen in bodemvocht: <https://www.vandersat.com/blog/how-low-can-you-go.>⁷



Figuur 4 Het Gemiddelde bodemvochtgehalte in de bovengrond gedurende de eerste drie weken van juni 2016 en 2017. De kaartjes '2016' en '2017' geven de hoge mate van variatie van het bodemvochtgehalte in ruimte en tijd weer voor elk van de jaren. De plaatjes 2016 en 2017 geven aan dat de bodemvochtgehalten per jaar ook sterk kunnen verschillen.

Bron: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/08/Soil_moisture_in_the_Netherlands⁷

⁷ Vermelding van merk-, product- en bedrijfsnamen dient uitsluitend om te informeren, niet om te propageren.

5.2.2 De invloed van bodemvocht op fysische, chemische en biologische indicatoren

Bij de bodemfysische indicatoren zijn aggregaatstabiliteit en indringingsweerstand afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Bij kleigronden zijn wegens zwel en krimp de droge bulkdichtheid en het watervasthoudend vermogen afhankelijk van het vochtgehalte. Om de meetwaarden en dus ook de scores van deze indicatoren op correcte wijze te kunnen beoordelen, zal ook het heersende bodemvochtgehalte tijdens de meting in het veld moeten worden bepaald. Indien mogelijk moet hiervoor worden gecorrigeerd.

De meeste bodemchemische indicatoren zijn niet afhankelijk van het bodemvochtgehalte. Het elektrische geleidingsvermogen (EC) is hierop een uitzondering. Voor het bepalen van het EC wordt daarom aanbevolen om ook het heersende bodemvochtgehalte in het veld ten tijde en op de plek van de bemonstering te meten. Beschikbaar N en beschikbaar P zijn afhankelijk van bodemvochtgehalte door seizoen afhankelijkheid van weer en gewasgroei, maar de bepalingmethode voor de indicator zelf wordt niet beïnvloed door het heersende bodemvochtgehalte ten tijde van bemonstering. Volgens Lebbink en Antonides (1990) heeft het vochtgehalte in de grond grote invloed op het bodemleven. Hierbij merken zij op dat het indrogen van grond in het algemeen minder invloed heeft dan waterverzadiging. Bij het indrogen van grond kunnen vochtminnende bodemdieren namelijk migreren naar vochtiger plaatsen, terwijl veel bacteriën en protozoën kunnen overgaan in droogteresistente vormen. Actieve microben zijn volgens Lebbink en Antonides (1990) steeds omhuld met een waterlaag. Voor de meeste bacteriën is een vochtgehalte waarbij de poriën voor 40 tot 60% gevuld zijn met water optimaal, terwijl schimmels en actinomyceten beter tegen droogte kunnen. Deze daadvormig groeiende micro-organismen vormen netwerken en kunnen voedsel en water van verschillende plekken halen. Verder stellen Lebbink en Antonides (1990) dat de gevoeligheid voor een overmaat aan water toeneemt bij hogere bodemtemperaturen. Dit komt omdat water veel minder zuurstof bevat bij hogere temperatuur. Het bodemvochtgehalte (droge stofgehalte) wordt standaard meegenomen bij microbiologische metingen. In de meetpraktijk worden extreem droge en natte perioden vermeden.

5.2.3 Metaconditie bodemtemperatuur

De bodemtemperatuur is een belangrijke factor voor de groei van een plant en daarmee een belangrijk aspect van bodemgezondheid. De indicatoren die voor de SHI zijn geselecteerd, worden echter ook beïnvloed door de bodemtemperatuur, en wel op twee manieren. Ten eerste veranderen de indicatoren zelf onder invloed van veranderende temperaturen. De groei van bacteriën in de bodem hangt bijvoorbeeld sterk van de temperatuur af. Ten tweede hangt de meting van bepaalde indicatoren sterk af van de temperatuur. De Electrical Conductivity (EC) is sterk gerelateerd aan de temperatuur en voor een nauwkeurige meting moet hiervoor worden gecorrigeerd. De bodemtemperatuur fluctueert met de atmosferische temperatuur, zij het vertraagd en gedempt. De bodemtemperatuur hangt bovendien ook af van het vochtgehalte, het gehalte aan organische stof en de dichtheid van de bodem.

Figuur 5 geeft een beeld van de jaarlijkse variatie in gemiddelde etmaal(lucht)temperatuur. De temperatuur in de atmosfeer werkt gedempt en vertraagd door in de bodem. De dagelijkse temperatuurvariatie reikt tot circa 0,5 m diepte, terwijl de jaarlijkse temperatuurvariatie tot circa 9 m reikt (Feddes en Huinink, 1990). Op circa 9 m heerst de gemiddelde jaartemperatuur (in het klimaat van 1990 was dit circa 10°C voor Nederland).

Hoe diep en hoe snel veranderende luchttemperaturen worden doorgegeven aan de bodem, hangt onder andere af van het warmtegeleidingsvermogen van de bodem en de bodembedekking. Het warmtegeleidingsvermogen van de bodem hangt op zijn beurt hoofdzakelijk af van het totale contactoppervlak van de bodemdelen: hoe groter hoe beter, dus hoe hoger het vochtgehalte en hoe groter de dichtheid, hoe groter het warmtegeleidingsvermogen. Een droge grond geleidt minimaal, een volledig met water verzadigde grond maximaal. Het verloop van het warmtegeleidingsvermogen met het vochtgehalte verschilt per grondsoort. Feddes en Huinink (1990) laten voorbeelden van dit verloop zien voor zavel- en kleigronden met verschillende dichtheden: bij de zavelgronden neemt het warmtegeleidingsvermogen sneller toe met het vochtgehalte dan bij de kleigronden, bij een gegeven vochtgehalte is het warmtegeleidingsvermogen hoger bij grotere dichtheden van de zavel of klei.

De warmtecapaciteit van de bodem is opgebouwd uit de warmtecapaciteiten van organische stof, minerale delen en bodemvocht:

- organische stof: $2,7 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
- minerale delen: $1,9 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
- bodemvocht: $4,2 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$

Feddes en Huinink (1990) geven op basis van deze componenten de volgende vergelijking voor de warmtecapaciteit van de bodem:

$$C_t = (2,7\phi_h + 1,9\phi_m + 4,2\theta)\text{MJ m}^{-3}\text{K}^{-1},$$

waarin:

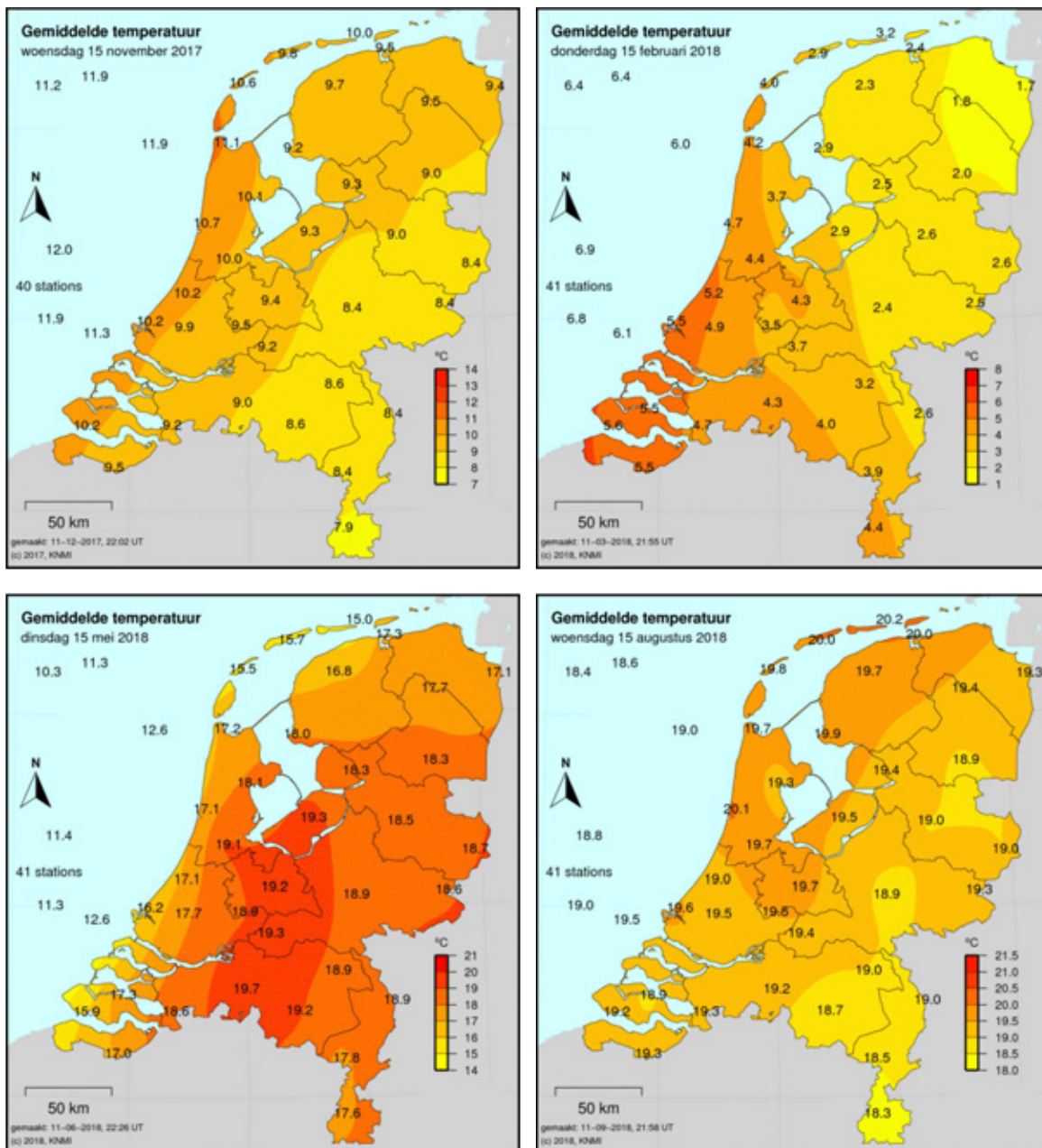
C_t de warmtecapaciteit van de grond is, ϕ_h de volumefractie organische stof, ϕ_m de volumefractie minerale delen en θ de volumefractie vocht.

Uit de bovenstaande formule blijkt dat de warmtecapaciteit van de bodem sterk afhangt van het bodemvochtgehalte: hoe natter, hoe langer het duurt voordat een bodem is opgewarmd of afgekoeld. Gronden met relatief veel organische stof zullen bij een gegeven vochtgehalte minder snel opwarmen of afkoelen dan gronden met relatief weinig organische stof.

Temperatuursveranderingen in de bodem hangen af van de verhouding tussen warmtegeleiding en warmtecapaciteit en daarmee van vochtgehalte, dichtheid en gehalte aan organische stof. De temperatuurvereffeningscoëfficiënt (dat is de verhouding tussen de warmtegeleidingscoëfficiënt en de warmtecapaciteit) bepaalt zowel de snelheid waarmee als de diepte tot waar temperatuursveranderingen doordringen in de bodem. Deze coëfficiënt kan voor een bodem met gegeven dichtheid en gehalte aan organische stof eerst toenemen met het vochtgehalte om vervolgens weer af te nemen.

Gezien de samenhang tussen temperatuur en vochtgehalte zal de grondwaterstanddiepte van relatief grote invloed zijn op het temperatuurregime. Volgens Feddes en Huinink (1990) vertonen percelen met een diepe grondwaterstand grotere temperatuurschommelingen dan percelen met een ondiepe grondwaterstand. Dit verschil is bij zavelgronden groter dan bij kleigronden, doordat zavelgronden een betere capillaire opstijging hebben. Verlaging van de grondwaterstand heeft daarom bij zavelgronden meer effect op de bodemtemperatuur dan bij kleigronden. Over het algemeen zullen kleigronden in het voorjaar warmer zijn dan zavelgronden.

Voor een indicatie van de variatie van de bodemtemperatuur in ruimte en tijd in Nederland zie Figuur 5, waarin de luchttemperatuur voor Nederland op vier tijdstippen in het jaar ruimtelijk wordt weergegeven.



Figuur 5 Gemiddelde etmaaltemperatuur (lucht temperatuur op 1m hoogte) op vier dagen tussen 1 oktober 2017 en 30 september 2018. Identieke kaartjes voor ruimtelijke en temporele variatie van de bodemtemperatuur zijn niet beschikbaar, maar de kaartjes van de luchttemperatuur (die correleert met de bodemtemperatuur) geven de grote ruimtelijke en temporele variatie weer. Merk op dat de vier kaartjes verschillende legenda's hebben.

Bron: knmi.nl.

5.2.4 De invloed van bodemtemperatuur op biologische, chemische en fysische indicatoren

De bodemtemperatuur is van invloed op het bodemleven. Volgens Lebbink en Antonides (1990) kunnen de meeste bodemorganismen temperatuurschommelingen goed verdragen, mits deze niet te extreem zijn. Volgens Lebbink en Antonides (1990) kan bij daling van de bodemtemperatuur de microbiële activiteit sterk teruglopen, maar zal deze zich snel herstellen als het weer warmer wordt. De bacteriële biomassa fluctueert veel minder dan de microbiële activiteit (groei, ademhaling, mineralisatie) en wordt bepaald door de beschikbare organische stof (voedsel) en gestabiliseerd door predatie (Bloem et al., 1994). In de SHI-selectie zit daarom niet de activiteit, maar de biomassa. In monitoringsystemen waar wel activiteit wordt gemeten (o.a. Bobi), gebeurt dit in het lab onder gestandaardiseerde omstandigheden (Bloem et al., 2006; Rutgers et al., 2007).

Zoals ook al eerder werd opgemerkt, zal de bodemtemperatuur onder veldcondities van invloed zijn op het elektrische geleidingsvermogen van de bodem en van het bodemvocht. De pH van de bodem kan indirect samenhangen met de temperatuur als gevolg van de invloed van temperatuur op biologische processen.

Temperatuur heeft vooral invloed op bodemfysische indicatoren bij vorst. De doorlatendheid zal bij temperaturen onder 0 °C nul zijn. Vorst kan positief bijdragen aan de bodemfysische gezondheid van de bodem (bijvoorbeeld doordat vorst (gedeeltelijk) bodemverdichting kan opheffen). Ook temperaturen boven 0 °C kunnen van invloed zijn op bodemfysische indicatoren. Aggregaatstabiliteit wordt bepaald door het kittende vermogen van organische stof en microbiële exudaten.

5.3 Invloed van metacondities op de interpretatie van de indicatormeetwaarden

Omdat meerdere fysische, chemische en biologische indicatoren beïnvloed worden door temperatuur en het bodemvochtgehalte en de mate van mogelijke variatie van deze twee metacondities, is het van belang dat de indicatoren onder een vergelijkbare metaconditie worden gemeten (dus liefst alle indicatoren op dezelfde plaats en dezelfde tijd).

Dit betekent ook dat de uiteindelijke SHI-waarden, bepaald uit gemeten indicatorwaarden, kunnen fluctueren in de tijd. Bijvoorbeeld voor biologische indicatoren: na een periode van droogte leidt regen tot een piek in microbiële activiteit (bodemademhaling) en in mindere mate tot een toename van microbiële biomassa (Bloem et al., 1992). Ook na het onderploegen van gewasresten in een akker na de oogst, ontstaat een piek (Bloem et al., 1994). Dergelijke pieken zijn na zeven tot tien dagen weer uitgedoofd. Daarom dient na ploegen of bemesten minimaal twee weken te worden gewacht met monstereen. In het algemeen wordt er in het voor- of najaar bemonsterd als de omstandigheden gematigd zijn. Aan de andere kant moeten indicatoren ook gevoelig zijn voor stress, anders hebben ze geen betekenis. Bovendien zijn weerstand en veerkracht onderdeel van bodemgezondheid (Griffiths et al., 2018). De Vries et al. (2012) vonden dat grasland met een hogere schimmel-bacterieverhouding een hogere weerstand had tegen droogte dan een bacterie-gedomineerde akkerbodem, en daardoor beter bestand was tegen klimaatverandering.

Een deel van de fysische indicatormetingen wordt in het veld onder heersende weersomstandigheden uitgevoerd, een ander deel van de indicatormetingen wordt in het lab aan veldvochtige monsters uitgevoerd en een derde deel van de indicatormetingen wordt in het lab aan monsters uitgevoerd waar zowel de temperatuur als het vochtgehalte zijn gestandaardiseerd (en vaak ook de temperatuur en het vochtgehalte van het monster zelf op bepaalde waarden zijn gebracht). In die zin heeft de actuele waarde van bodemtemperatuur en bodemvochtgehalte niet voor *alle* indicatoren directe invloed op de meting. Echter, de weersgeschiedenis van de bodem in het veld heeft wel op alle indicatoren invloed. Dat er een invloed is van metacondities op het meten van alle typen indicatoren (fysisch, chemisch, biologisch) is hierboven uitvoerig beschreven en in Tabel 40 indicatief aangegeven. Of deze invloed is te kwantificeren en of het mogelijk is om eventueel voor de invloed van bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur te kunnen compenseren, moet aan de hand van wetenschappelijke literatuur worden onderzocht. Als compensatie niet mogelijk blijkt zou men, als alternatief, ook kunnen denken aan het doen van (veld)metingen binnen bepaalde grenzen van metacondities bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur (inclusief vergelijkbare weersgeschiedenis), om een SHI-bepaling praktisch werkbaar te houden. Omdat dit rapport zich beperkt tot de selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren, gaat het te ver om hier verder op in te gaan.

6 Aanbevelingen

Dit rapport beschrijft de selectie van fysische, chemische en biologische indicatoren voor het meten van de bodemgezondheid en omvat de eerste aanzet tot het ontwikkelen van de Soil Health Index (SHI) voor Nederland. Bij het gebruik van de in dit rapport gepresenteerde indicatoren voor het ontwikkelen van een dergelijke SHI worden volgende aanbevelingen gedaan:

- a. Een beoordeling van de bodemgezondheid vereist afzonderlijke scorefuncties (omzetting van indicatormeetwaarde naar score) voor een aantal verschillende bodemtypen. Op hoofdlijnen maken we daarbij onderscheid naar zand, klei en veen, maar waarschijnlijk moet dit verder uitgesplitst worden naar landgebruik. De scoringsfuncties vergen nader onderzoek.
- b. Voor het krijgen van een globale indruk van de bodemgezondheid van landbouwgrond, voldoet de voorgestelde minimale set van 10 'A'-indicatoren. Echter, voor een breder inzicht in het functioneren van de bodem, of bij specifieke tekortkomingen, moeten ook de add-on-indicatoren worden bepaald om de bodemgezondheid vast te stellen. Een nadere specificering van dergelijke specifieke omstandigheden is hier niet verder uitgewerkt, maar vereist wel dat deze indicatoren opgenomen worden in de meetset.
- c. Een correcte interpretatie van de gemeten bodemgezondheidsindicatoren vereist voor een aantal indicatoren informatie over bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur. Deze dienen daarom te worden (mee)gemeten tijdens de meting van de primaire indicator of monsternamen in het veld en, voor zover relevant, samen met de weersgeschiedenis van het perceel in kwestie te worden beschouwd bij de interpretatie van de indicatorwaarde. Dit geldt feitelijk voor alle indicatorenklassen (fysica, chemie en biologie).
- d. Het verkrijgen van een nauwkeurig en compleet beeld van de SHI-indicatoren vereist dat de metingen zo veel mogelijk op hetzelfde tijdstip en aan hetzelfde monster gedaan worden.
- e. Bodemtemperatuur en bodemvocht, en met name de seizoensvariatie, hebben invloed op de indicatoren. Verder onderzoek is nodig om de interpretatie van indicatorwaarden te verbeteren.

Tabel 41 De meest geschikte indicatoren voor het bepalen van de bodemgezondheid in Nederland.

Indicator		
F	Watervasthoudend vermogen	A
	Aggregaatstabiliteit	A
	Textuur	A
	Indringingsweerstand	A
	Hydraulische doorlatendheid of infiltratiecapaciteit	+
	Droge bulkdichtheid	+
C	Organischestofgehalte SOM/OC	A
	pH	A
	Beschikbare nutriënten N, P, K	A
	EC	+
	Metalen (actueel en potentieel)	+
	Aanvullende macro- en micronutriënten	+
B	Potentieel mineraliseerbare stikstof (PMN)	A
	Heet water extraheerbaar stikstof (HWC) of Actief koolstof (permanganaat oxideerbaar C) POXC	A
	Nematoden (aantallen en diversiteit)	A
	Schimmelbiomassa	+
	Bacteriele biomassa	+
	Regenwormen (aantallen en diversiteit)	+

- A Absoluut noodzakelijke basis-parameter
+ Add-on parameter

Literatuur

- Askari, M.S., J. Cui, S.M. O'Rourke & N.M. Holden. 2015. Evaluation of soil structural quality using VIS-NIR spectra. *Soil & Tillage Research* 146: 108-117.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.03.006>
- Bakker, G., M. Heinen, W.J.M. de Groot, F.B.T. Assinck, H.P.A. Gooren & E.W.J. Hummelink. 2018. Hydrofysische gegevens van de bodem in BRO en BIS : Update 2017. Wageningen Environmental Research rapport 2895, Wageningen Environmental Research, Wageningen
- Bergsma, H.; Vogels, J.; Burg, A. van den; Bobbink, R. 2018. Is de bodemverzuring in Nederland onomkeerbaar? : door chronische verzurende depositie zal de natuur op droge natuur op droge zandgronden niet vanzelf herstellen. *Vakblad natuur bos landschap* 144, 4-7.
- Bispo, A., Cluzeau, D., Creamer, R., Dombos, M., Graefe, U., Krogh, P.H., Sousa, J.P., Peres, G., Rutgers, M., Winding, A., Römbke, J. Indicators for monitoring soil biodiversity (2009) *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5, pp. 717-719.
- BLGG. 2015. Zinktekort toenemend probleem in Nederland. <http://eurofins-agro.com/nl-nl/expertise/bemesting/artikelen/zinktekort-toenemend-probleem-nederland>
- Bloem, J., P.C. de Rooter, G.J. Koopman, G. Lebbink and L. Brussaard. 1992. Microbial numbers and activity in dried and rewetted arable soil under integrated and conventional management. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 655-665.
- Bloem, J., G. Lebbink, K.B. Zwart, L.A. Bouwman, S.L.G.E. Burgers, J.A. de Vos and P.C. de Rooter. 1994. Dynamics of microorganisms, microbivores and nitrogen mineralisation in winter wheat fields under conventional and integrated management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 51, 129-143.
- Bloem, J., D.W. Hopkins and A. Benedetti (editors) 2006. *Microbiological methods for assessing soil quality*. 307 pp. CABI, Wallingford, UK.
- Bloem, Jaap, Chris Koopmans en René Schils. 2017. Effect van mest op de biologische bodemkwaliteit in de Zeeuwse akkerbouw. Wageningen Environmental Research, Rapport 2843. 54 blz.
- Bongiorno, G. et al. 2019. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators* 99: 38-50.
- Brussaard, L. 1997. Biodiversity and ecosystem functioning in soil. *Ambio*, 563-570.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, Th.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W. & Brussaard, L. 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105-125.
- Bussink, D.W., L. van Schöll, H. van der Draai, J.C. van Middelkoop, en G. Holshof. 2014. Naar een herziening van kali-advies grasland. NMI-rapport 1421.N.10, Wageningen, 63p.
- Cañasveras, J.C., V. Barrón, M.C. del Campillo, J. Torrent & J.A. Gómez. 2010. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 158: 78-84. doi:10.1016/j.geoderma.2009.09.004
- CBAV. 2018. Bemestingsadvies. Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. Versie 2018. Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. Wageningen Livestock Research, Postbus 338, 6700 AH Wageningen (<https://www.bemestingsadvies.nl/nl/bemestingsadvies.htm>)
- Chen, L.J., L. Xing, and L.J. Han. 2013. Review of the Application of Near-Infrared Spectroscopy Technology to Determine the Chemical Composition of Animal Manure. *Journal of Environmental Quality*. 42:1015-28.
- de Vos, J.A. 1997. Water flow and nutrient transport in a layered silt loam soil. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, the Netherlands.
- De Vries, F.T., Liiri, M.E., Bjørnlund, L., Bowker, M.A., Christensen, S., Setälä, H.M., Bardgett, R.D. 2012. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. *Nature Climate Change* 2, 276-280.
- De Vries, W., P.F.A.M. Römkens and J.C.H. Voogd. 2004. Prediction of the long term accumulation and leaching of zinc in Dutch agricultural soils: a risk assessment study. Alterra rapport 1030, Alterra, Wageningen UR.

- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858-1868.
- Doran, J.W., & Zeiss, M.R. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied soil ecology*, 15(1), 3-11.
- Emissieregistratie. 2016. Uitspoeling van zware metalen uit landbouw- en natuurbodems. Versie mei 2016. www.emissieregistratie.nl
- Eurofins. 2015. <http://eurofins-agro.com/nl-nl/expertise/bemesting/artikelen/zinktekort-toenemend-probleem-nederland>
- Feddes, R.A. en J.T. Huinink, 1990. Hoofdstuk 13: Warmtehuishouding. In: Locher, W.P. en H. de Bakker (red.), *Bodemkunde van Nederland. Deel 1 Algemene Bodemkunde*. Den Bosch, Malmberg.
- Griffiths, B.S., Römbke, J., Schmelz, R.M., Scheffczyk, A., Faber, J.H., Bloem, J., Pérès, G., Cluzeau, D., Chabbi, A., Suhadolc, M., Sousa, J.P., Martins Da Silva, P., Carvalho, F., Mendes, S., Morais, P., Francisco, R., Pereira, C., Bonkowski, M., Geisen, S., Bardgett, R.D., De Vries, F.T., Bolger, T., Dirilgen, T., Schmidt, O., Winding, A., Hendriksen, N.B., Johansen, A., Philippot, L., Plassart, P., Bru, D., Thomson, B., Griffiths, R.I., Bailey, M.J., Keith, A., Rutgers, M., Mulder, C., Hannula, S.E., Creamer, R., Stone, D. Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function (2016) *Ecological Indicators*, 69, pp. 213-223.
- Griffiths, B.S., Faber, J., Bloem, J. 2018. Applying soil health indicators to encourage sustainable soil use: The transition from scientific study to practical application. *Sustainability (Switzerland)*, 10 (9), art. no. 3021.
- Groenenberg, J.E., P.F.A.M. Römkens, and W. de Vries. 2006. Prediction of the long-term accumulation and leaching of copper in Dutch agricultural soils: a risk assessment study. Alterra report 1278. Alterra, Wageningen UR, the Netherlands.
- Grossman, R.B. & T.G. Reinsch. 2002. Bulk density and linear extensibility. In: J.H. Dane & G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*, pp. 201-228. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Hack-ten Broeke, M.J.D., C.L. van Beek, T. Hoogland, M. Knotters, J.P. Mol-Dijkstra, R.L.M. Schils, A. Smit en F. de Vries, 2009. *Kaderrichtlijn bodem; Basismateriaal voor eventuele prioritaire gebieden*. Wageningen, Alterra, (Alterra-rapport 2007). 77 blz.; 30 fig.; 8 tab.; 21 ref.
- Hanegraaf, M.C., E. Hoffland, P.J. Kuikman, and L. Brussaard. 2009. Trends in soil organic matter contents in Dutch grasslands and maize fields on sandy soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 60(2):213-222.
- Hanegraaf, M. & F. van Alebeek. 2013. Herkenningskaart Meetset Bodembiodiversiteit. NMI/PPO-AGV. <http://edepot.wur.nl/292715>.
- He, Y., Song, H.Y., Pereira, A.G., & Gómez, A.H. 2005. Measurement and analysis of soil nitrogen and organic matter content using near-infrared spectroscopy techniques. *Journal of Zhejiang University. Science. B*, 6(11), 1081-6.
- Hollis, J.M., J. Hannam & P.H. Bellamy. 2012. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science* 63: 96–109. doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01412.x
- Horn, R. & T. Baumgartl. 2002. In: Warrick, A.W. (ed.), *Soil Physics Companion*, pp. 17-48. CRC Press, Boca Raton.
- Huber, S., G. Prokop, D. Arrouays, G. Banko, A. Bispo, R.J.A. Jones, M.G. Kibblewhite, W. Lexer, A. Möller, R.J. Rickson, T. Shishkov, M. Stephens, G. Toth, J.J.H. Van den Akker, G. Varallyay, F.G.A. Verheijen & A.R. Jones (eds.). 2018. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume I: Indicators & Criteria*. JRC Scientific and Technical Reports EUR 23490 EN/1, Office for the Official Publications of the European Communities Luxembourg.
- Huinink, J.T. 1991. Bodemverontreiniging en bodembescherming. In: W.P. Locher & H. de Bakker, *Bodemkunde van Nederland*, pp. 361-375. Malmberg, Den Bosch.
- ISO 11277. 2009. Soil quality — Determination of particle size distribution in mineral soil material — Method by sieving and sedimentation. ISO, Geneva, Switzerland.
- Jones, Arwyn., Panagos, Panos., Erhard, Markus., Tóth, Gergely., Barcelo, Sara., Bouraoui, Faycal., Bosco, Claudio., Dewitte, Olivier., Gardi, Ciro., Hervás, Javier., Hiederer, Roland., Jeffery, Simon., Penizek, Vit., Strassburger, Thomas., Lükewille, Anke., Marmo, Luca., Montanarella, Luca., Olazábal, Claudia., Petersen, Jan-Erik., Van Den Eeckhaut, Miet., Van Liedekerke, Mark., Verheijen, Frank., Viestova, Eva., Yigini, Yusuf., 2012. The state of soil in Europe: a contribution

-
- of the JRC to the European Environment Agency's environment state and outlook report -- SOER 2010. Report EUR 25186 EN, European Commission, Luxembourg.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., & Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Kibblewhite, M.G., R.J.A. Jones, L. Montanarella, R. Baritz, S. Huber, D. Arrouays, E. Micheli & M. Stephens (eds.). 2018. *Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume VI: Soil Monitoring System for Europe*. JRC Scientific and Technical Reports EUR 23490 EN/6, Office for the Official Publications of the European Communities Luxembourg.
- Knotters, M., F.M. van Egmond, G. Bakker, D.J.J. Walvoort & F. Brouwer. 2017. A selection of sensing techniques for mapping soil hydraulic properties. WENR Report 2853, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. <http://edepot.wur.nl/429204>
- Koorevaar, P., G. Menelik & C. Dirksen. 1983. *Elements of soil physics*. Developments in Soil Science 13, Elsevier, Amsterdam.
- Lahr, J., A. Derksen, L. Wipfler, M. van de Schans, B. Berendsen, M. Blokland, W. Simmers, P. Bolhuis en R. Smidt. 2018. *Diergeneesmiddelen en hormonen in het milieu door toediening van drijfmest; Een verkennende studie in de Provincie Gelderland naar antibiotica, antiparasitaire middelen, coccidiostatica en natuurlijke hormonen in mest, (water)bodem, grondwater en oppervlaktewater*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2898. 90 pp.
- Lebbink, G. en J.J. Antonides, 1990. Hoofdstuk 15: Bodembioologie. In: Locher, W.P. en H. de Bakker (red.), *Bodemkunde van Nederland. Deel 1 Algemene Bodembioologie*. Den Bosch, Malmberg.
- Lijzen, J.P.A., A.J. Verschoor, M. Mesman, P.T. de Boer, L. Osté, P. Römken. 2017. *Visiedocument gebruik van biobeschikbaarheid in bodembeoordeling. Mogelijkheden voor metalen in bodem en waterbodem*. RIVM Brieftapport 2015-0215, RIVM - Bilthoven, 86p.
- Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. 2017. *Zesde Nederlandse actieprogramma betreffende de Nitraatrichtlijn (2018-2021)*. December 2017, den Haag.
- Ministerie LNV, IW 2017. *Zesde Nederlandse actieprogramma betreffende de Nitraatrichtlijn (2018 - 2021)*.
- Moebius-Clune, B.N., D.J. Moebius-Clune, B.K. Gugino, O.J. Idowu, R.R. Schindelbeck, A.J. Ristow, H.M. van Es, J.E. Thies, H.A. Shayler, M.B. McBride, K.S.M. Kurtz, D.W. Wolfe & G.S. Abawi. 2016. *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework, Edition 3.2*, Cornell University, Geneva, NY. <http://soilhealth.cals.cornell.edu/training-manual/>
- Mol, G., J. Spijker, P. van Gaans en P. Römken. 2012. *Geochemische bodematlas van Nederland*. Wageningen, Wageningen Academic Publishers. Pages: 276 ISBN: 978-90-8686-186-6; <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-743-1>
- NEN 5789. 1991. *Bodem. Bepaling van de verzadigde waterdoorlatendheid*. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, The Netherlands.
- NEN 5753. 2006. *Bodem - Bepaling van het lutumgehalte en de korrelgrootteverdeling in grond en waterbodem met behulp van zeef en pipet*. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, The Netherlands.
- Nimmo, J.R. & K.S. Perkins. 2002. Aggregate Stability and Size Distribution. In: J.H. Dane & G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*, pp. 317-328. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Oenema, O., J.P. Mol-Dijkstra, J.C. Voogd, P.A.I. Ehlerter en G.L. Velthof, 2016. *Klassenindelingen voor de fosfaattoestand van de bodem, ten behoeve van de afleiding van fosfaatgebruiksnormen*. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2743
- Oste, L.A., Postma, J.F., Roskam, G.o., Keijzers, R., VanDuijnoven, N., 2018. *Basisdocumentatie probleemstoffen. Rapport bij de basisdocumenten 2018*. Deltares Projectrapport 11202236-001.
- Reynolds, W.D., D.E. Elrick, E.G. Youngs, A. Amoozegar, H.W.G. Booltink & J. Bouma. 2002. Saturated and Field-Saturated Water Flow Indicators. In: J.H. Dane & G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*, pp. 797-878. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Rietra, R.P.J.J. en O. Oenema. 2017. *Bepaling samenstelling van vaste mest met NIRS*. Wageningen Environmental Research, rapport 2837. 28pp.
- Römken, P.F.A.M., J.E. Groenenberg, R.P.J.J. Rietra, J.E. Groenenberg, en W. de Vries. 2007. *Onderbouwing LAC2006-waarden en overzicht van bodem-plantrelaties ten behoeve van de*

- risicotoolbox; een overzicht van gebruikte data en toegepaste methoden. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1442. 103 blz.
- Rossel, R.A.V., D.J.J. Walvoort, A.B. McBratney, L.J. Janik, & J.O. Skjemstad. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131 (2006) 59–75.
- Rutgers M., C. Mulder, A.J. Schouten, J. Bloem, J.J. Bogte, A.M. Breure, L. Brussaard, R.G.M. de Goede, J.H. Faber, G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, H. Keidel, G.W. Korthals, F.W. Smeding, C. ten Berg, N. van Eekeren. 2007. Typering van bodemecosystemen in Nederland met tien referenties voor biologische bodemkwaliteit. RIVM-rapport 607604008 96 pp.
- Rutgers, M., T. Schouten, G. Jagers op Akkerhuis, J. Bloem, T. Breure. 2011. Kaderrichtlijn Bodem. Bodembiodiversiteit onder druk bij dalende organische stof. *Bodem* 21(2), 19-21.
- Rutgers, M., Schouten, T., Bloem, J., Buis, E., Dimmers, W., van Eekeren, N., de Goede, R.G.M., Jagers op Akkerhuis, G.A.J.M., Keidel, H., Korthals, G., Mulder, C., Wattel-Koekkoek, E.J.W. 2014. Een indicatorsysteem voor ecosysteemdiensten van de bodem: Life support functions revisited. RIVM Rapport 2014-0145, 129 pp. <http://edepot.wur.nl/345145>
- Rutgers, Michiel & Trinsoutrot Gattin, Isabelle & Van Leeuwen, Jeroen & Menta, Cristina & Gatti, Fabio & Visioli, Giovana & Debeljak, Marko & Trajanov, Aneta & Bugge Henriksen, Christian & Creamer, Rachel. 2018. Key indicators and management strategies for soil biodiversity and habitat provisioning. <http://landmark2020.eu/>
- Schils, R. 2012. 30 vragen en antwoorden over bodemvruchtbaarheid. Alterra, Wageningen UR. 143 p. <http://edepot.wur.nl/211205>.
- Schindelbeck, R.R., B.N. Moebius-Clune, D.J. Moebius-Clune, K.S. Kurtz & H.M. van Es. Cornell University Comprehensive Assessment of Soil Health Laboratory Standard Operating Procedures, February 2016. <http://bit.ly/SoilHealthSOPs>
- Schipper, L.A. and Sparling, G.P. 2000. Performance of soil condition indicators across taxonomic groups and land uses. *Soil Science Society of America Journal* 64: 300–311.
- Schouten, A.J., Brussaard, L., De Rooter, P.C., Siepel, H., Van Straalen, N.M. 1997. Een indicatorsysteem voor life-supportfuncties van de bodem in relatie tot biodiversiteit. Rapport 712910005, RIVM, Bilthoven.
- Schouten, A.J., Bloem, J., Didden, W., Jagers op Akkerhuis, G., Keidel, H., Rutgers, M. 2002. Bodembioologische indicator 1999 – ecologische kwaliteit van graslanden op zandgrond bij drie categorieën melkveehouderijbedrijven. Rapport 607604003, RIVM, Bilthoven.
- Schouten, Ton, Jaap Bloem, Ron de Goede, Nick van Eekeren, Joachim Deru, Marleen Zanen, Wijnand Sukkel, Derk van Balen, Gerard Korthals en Michiel Rutgers. 2018. Niet-kerende grondbewerking goed voor de bodembiodiversiteit? - Veldexperimenten uitgelicht. *Bodem* nr. 3 juni 2018, p.20-23.
- Schjønning, P., J.J.H. van den Akker, T. Keller, M.H. Greve, M. Lamandé, A. Simojoki, M. Stettler, J. Arvidsson & H. Breuning-Madsen. 2015. Soil compaction. *In: Stolte, J., M. Tesfai & L. Oygarden (eds.). 2015. Soil in Europe – Threats, functions and ecosystem services*, pp. 80-93. www.recare-project.eu
- Schneider, C.B.H. & J.T. Huinink. 1991. Bouwvoorbodembodemkunde en grondbewerking. *In: W.P. Locher & H. de Bakker, Bodembodemkunde van Nederland*, pp. 197-209. Malmberg, Den Bosch.
- Smit, A. & P. Kuikman. 2005. Organische stof: onbemind of onbekend? Alterra-rapport 1126; Alterra, Wageningen, 2005.
- Sørensen, L.K., P., Sørensen, en T.S. Birkmose. 2007. Application of reflectance near infrared spectroscopy for animal slurry analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:1398-1405.
- Sørensen, M.K., O. Jensen, O.N. Bakharev, T. Nyord, and N.C. Nielsen. 2015. NPK NMR Sensor: Online Monitoring of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium in Animal Slurry. *Analytical chemistry*. 87. 6446-6450.
- Soil Quality Indicators (SINDI) New Zealand
<https://www.landcareresearch.co.nz/resources/data/sindi-soil-quality-indicators;>
<https://sindi.landcareresearch.co.nz/>
- Soil Quality Australia (<http://www.soilquality.org.au>)
- Stewart, R.D., J. Jian, A.J. Gyawali, W.E. Thomason, B.D. Badgley, M.S. Reiter & M.S. Strickland. 2018. What We Talk about When We Talk about Soil Health. *Agricultural & Environmental Letters* 3: 180033. doi:10.2134/ael2018.06.0033 (including Supplemental Information)

-
- Stott, D.E. 2018. Soil Health Technical Note. Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures. Technical Note No. SH-XX (draft version), USDA, Washington DC.
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/soils/health/?cid=nrcseprd1315420>
- Stuyt, L.C.P.M., M. Blom-Zandstra, R.A.L. Kselik, 2016. Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2739. 158 blz.
- TCB, 2016. Advies Toestand en dynamiek van organische stof in Nederlandse landbouwbodems. TCB A110(2016).
- Tranter, G., B. Minasny, A.B. Mcbratney, B. Murphy, N.J. McKenzie, M. Grundy & D. Brough. 2007. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use and Management* 23: 437–443. doi: 10.1111/j.1475-2743.2007.00092.x
- USDA. 2018. Recommended Soil Health Indicators and Associated Laboratory Procedures. Soil Health Technical Note No. SH-XX. Draft version. Federal Register Notice Docket No. NRCS-2018-0006.
- USDA-NRCS. 2000a. Erosion and Sedimentation on Construction Sites. Soil Quality – Urban Technical Note No. 1. Soil Quality Institute, Auburn, AL.
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/resource/>
- USDA-NRCS. 2000b. Urban Soil Compaction. Soil Quality – Urban Technical Note No. 2. Soil Quality Institute, Auburn, AL. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/resource/>
- Van-Camp, L., B. Bujarrabal, A-R. Gentile, R.J.A. Jones, L. Montanarella, C. Olazabal and S-K. Selvaradjou, 2004. Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/3, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Van den Akker, J.J.H., F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke en T. Schouten, 2012. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2409. 80 blz.; 15 fig.; 7 tab.; 50 ref.
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/251636>
- van den Akker, J.J.H. & T. Hoogland. 2011. Comparison of risk assessment methods to determine the subsoil compaction risk of agricultural soils in The Netherlands. *Soil & Tillage Research* 114: 146–154. doi:10.1016/j.still.2011.04.002
- Van Gaalen en Van Grinsven. 2017. Vijf vragen en antwoorden over nutriënten en waterkwaliteit, Den Haag: PBL.
- Vanhoof, C. en K. Tirez. 2003. Bepaling van organische stof/koolstof in vaste stoffen. Finaal rapport. Studie uitgevoerd in opdracht van de OVAM 2003/MIM/R/191; Milieumetingen. December 2003
- Van Rotterdam, D. en W. Bussink, 2016. Fosfaatstreeftoestand in de bodem voor mais en gras. Notitie Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen.
- Veum, K.S., K.A. Sudduth, R.J. Kremer & N.R. Kitchen. 2015. Estimating a Soil Quality Index with VNIR Reflectance Spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal* 79: 637-649.
doi:10.2136/sssaj2014.09.0390
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot & J. Stolte. 2001. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra-rapport 153, Alterra, Wageningen.
<http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/43272>
- Wösten, H., F. de Vries, T. Hoogland, H. Massop, A. Veldhuizen, H. Vroon, J. Wesseling, J. Heijkers & A. Bolman. 2013. BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland. Alterra-rapport 2387, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/247678>
- Zwart, K., A. Kikkert, A. Wolfs, A. Termorshuizen en G.J. van der Burgt. 2013a. Tien vragen en antwoorden over organische stof. HLB, Wijster. (<http://edepot.wur.nl/272641>)

Bijlage 1 Uitgebreide beschrijving van een aantal fysische indicatorsets

Overzicht van indicatoren uit drie belangrijkste bronnen: 1) CASH, 2) Bunemann et al., 3) USDA-NRCS, 4) Stewart et al. en 5) overige bodemgezondheidssystemen

1) CASH (Moebius-Clune et al., 2016)

De huidige lijst met fysische indicatoren van de Cornell Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH) is overgebleven van de volgende lijst potentiële indicatoren die zij bij aanvang van hun studie hadden opgesteld (Tabel B1.1). In de huidige CASH worden hiervan gebruikt: natte aggregaatstabiliteit, waterbeschikbaarheid en (optioneel) de indringingsweerstand. Textuur wordt niet als indicator beschouwd, maar wordt wel gebruikt bij de beoordeling van zowel fysische, chemische als biologische bodemgezondheid.

Tabel B1.1 De uitganglijst met (potentiële) fysische indicatoren die aan de basis heeft gelegen van de huidige CASH-methode (Moebius-Clune et al., 2016).

#	Indicator
1	Textuur
2	Droge bulkdichtheid
3	Macro-porositeit
4	Meso-porositeit
5	Micro-porositeit
6	Water beschikbaarheid
7	Residuele porositeit
8	Indringingsweerstand bij 10 kPa (100 cm)
9	Doorlatendheid bij verzadiging
10	Droge aggregaatfractie (<0.25 mm)
11	Droge aggregaatfractie (0,25 - 2 mm)
12	Droge aggregaatfractie (2 - 8 mm)
13	Natte aggregaatstabiliteit (0,25 - 2 mm)
14	Natte aggregaatstabiliteit (2 - 8 mm)
15	Hardheid bodemoppervlakte (indringingsweerstand met penetrometer)
16	Hardheid ondergrond (indringingsweerstand met penetrometer)
17	Infiltratiecapaciteit in het veld

2) Bünemann et al. (2018)

In een zeer uitgebreide literatuurstudie hebben Bünemann et al. (2018) in totaal een lijst van zeventien fysische indicatoren opgesteld die hierbij zijn verzameld. De volgende tabel (Tabel B1.2) geeft de gesorteerde lijst (gesorteerd naar het percentage voorkomen in de gerapporteerde studies). De top tien is ook vermeld in de hoofdtekst van dit rapport.

Tabel B1.2 Fysische indicatoren verzameld in literatuurstudie van Bünemann et al. (2018; zie hun aanvullende document) met aangegeven welke termen per indicator gegroepeerd zijn en het percentage van de studies waarin de betreffende indicator werd toegepast.

#	Indicator	Percentage
1	Watervasthoudend vermogen (incl. "water-holding capacity, water content, sorptivity, water-filled pore space, water retention, field capacity, permanent wilting point, plant-available water content, Ksat")	60.0
2	Droge bulkdichtheid	53.8
3	Textuur (incl. deeltjesgrootteverdeling)	44.6
4	Structuurstabiliteit (incl. "aggregate stability, shear strength, tilth and friability, structure, consistence, slake test")	29.2
5	Bodemdiepte (incl. "soil depth, topsoil depth, maximum rooting depth, layer thickness")	29.2
6	Indringingsweerstand	26.2
7	Hydraulische doorlatendheid	20.0
8	Porositeit (incl. "porosity, macroporosity, air capacity")	18.5
9	Aggregatie (incl. "aggregation, aggregate size distribution, pedality")	16.9
10	Infiltratie (incl. "infiltration rate")	15.4
11	Fractie stenen	6.2
12	Bodentemperatuur	4.6
13	Dichtheid vaste fase	4.6
14	Oppervlakte-eigenschappen (incl. "surface characteristics, surface conditions, surface residues")	4.6
15	Klei-eigenschappen (incl. "clay characteristics, mineralogy, water-dispersible clay, soil color (if related to clay characteristics)")	3.1
16	Bioporiën	3.1
17	¹³⁷ Cesiumverdeling (als een maat voor erosie)	1.5

3) USDA-NRCS (2018)

De volgende tabel (Tabel B1.3) geeft een overzicht van alle fysische indicatoren die in de afgelopen decennia zijn beschouwd door USDA-NRCS zoals afgeleid uit diverse documenten beschikbaar op: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/resource/> (zie ook: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/soils/health/>).

Tabel B1.3 De in de loop der jaren beschouwde fysische bodemgezondheidsindicatoren op de website van USDA-NRCS (1996-2000; 2008) en die genoemd in Stott (2018).

#	Indicator	1996-2000	2008	2018
1	Aggregaatstabiliteit	x	x	x
2	Beschikbaar water	x	x	-
3	Bodemstructuur (incl. macroporiën)	-	x	-
4	Bulkdichtheid	-	x	-
5	Infiltratie	x	x	-
6	Korstvorming	x	x	-
7	Verdichting	x	-	-
8	Verslemping	-	x	-
9	Waterafstotendheid	x	-	-

4) Stewart et al. (2018)

Stewart et al. (2018) rapporteren over een meta-analyse studie op basis van 192 publicaties, gericht op effect van fysische, chemische, biologische en overige indicatoren bij vanggewassen en 'no-tillage' landbouw. In totaal werden 42 indicatoren beschouwd, waarvan er (slechts) 8 in meer dan 20% van de studies werden gerapporteerd. Tabel B1.4 vermeldt de 12 fysische indicatoren uit deze studie. In totaal werden fysische indicatoren in 121 van de 192 studies beschouwd, ofwel in 63% van de studies

Tabel B1.4 Fysische indicatoren verzameld in literatuurstudie van Stewart et al. (2018; zie hun aanvullende document) met aangegeven het percentage van de studies waarin de betreffende indicator werd toegepast.

#	Indicator	Percentage
1	Droge bulkdichtheid	37.5
2	Bodemvochtgehalte	32.3
3	Aggregatie	29.2
4	Porositeit	15.6
5	Infiltratie	14.1
6	Doorlatendheid bij verzadiging	14.1
7	Indringingsweerstand	10.4
8	Waterbeschikbaarheid	8.3
9	Oppervlakkig afspoeling (run-off)	7.3
10	Bodemerosie	6.8
11	Bodemtemperatuur	5.7
12	Textuur	2.1

5) Overige bodemgezondheidssystemen

Australië

<http://www.soilquality.org.au/>

- textuur
- grindgehalte
- droge bulkdichtheid
- ondergrondverdichting
- watervasthoudend vermogen of waterbeschikbaarheid

Nieuw-Zeeland (SINDI)

<https://www.landcareresearch.co.nz/resources/data/sindi-soil-quality-indicators>

<https://sindi.landcareresearch.co.nz/>

- droge bulkdichtheid (als maat voor bodem verdichting, fysische leefomgeving voor wortels en bodemorganismen);
- macroporositeit (als maat voor water- en lucht(zuurstof)beschikbaarheid, waterretentie, drainage eigenschappen).

Nederland: Eurofins bemestingswijzer

Eurofins maakt onderscheid tussen een bemestingswijzer voor akkerbouw en een bemestingswijzer voor grasland.

Akkerbouw

http://eurofins-agro.com/nl-nl/sites/eurofins-agro.com/files/nl_at_klei_110506_jr_17_18.pdf

- textuur: klei (< 2 µm), silt (2-50 µm), zand (> 50 µm), slib (< 16 µm), M50; plus duiding grondsoort;
- verkruiembaarheid, verslemping, stuifgevoeligheid (alle drie een rapportcijfer);
- watervasthoudend vermogen: inschatting waterretentiekarakteristiek (waarschijnlijk op basis van continue vertaalfunctie Staringreeks 2001) en watergehaltes bij drukhoogtes -100 en -16000 cm;
- structuur: kwalitatief; op basis van verdeling bezetting klei-humuscomplex.

Grasland

<http://eurofins-agro.com/nl-nl/product/bemesting/bemestingswijzer-grasland/voorbeeld-0>

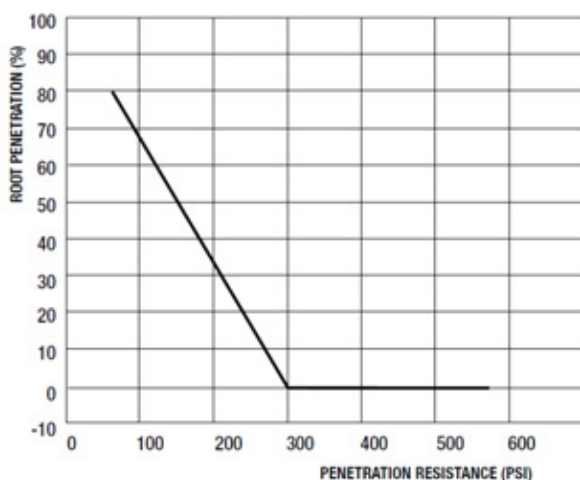
- textuur: klei (< 2 μm), silt (2-50 μm), zand (> 50 μm), M50; plus duiding grondsoort;
- watervasthoudend vermogen: inschatting waterretentiekarakteristiek (waarschijnlijk op basis van continue vertaalfunctie Staringreeks 2001), en watergehaltes bij drukhoogtes -100 en -16000 cm;
- structuur: kwalitatief; op basis van verdeling bezetting klei-humuscomplex.

Bijlage 2 Relatie indringingsweerstand en beworteling

Aannemelijk dat dit afhankelijk is van grondsoort en type gewas. Bijvoorbeeld:

Martino & Shaykewiich (1994): "Soil strength critical for root penetration was determined to be 2 MPa and was independent of soil type"; situations considered: for heavy clay, silty clay loam, and loamy sand, for wheat and barley.

Otto et al. (2001): "Sugarcane root growth was not affected below Pr [*penetration resistance*] values of 0.75 MPa, but decreased significantly between 0.75 and 2.0 MPa. Root growth was severely restricted when Pr > 2.0 MPa."



Bengough & Mullins, (1990): Maximum stress that roots can exert is on the order of 0.9-1.3 MPa; however, penetrometers experience a resistance 2 to 8 times greater than experienced by roots.

Bengough et al. (2011): "... mechanical impedance is often a major limitation to root elongation in these soils [*19 soils ranging from loamy sand to silty clay loam*] even under moderately wet conditions ...". and: "Root elongation is typically halved in repacked soils with penetrometer resistances >0.8-2 MPa, in the absence of water stress."

Duiker (2002): "The penetrometer simulates root growth. Root growth decreases linearly with increasing penetration resistance [*see figure below*], until practically stopping above 300 psi [*300 PSI = 2.07 MPa*]. Remember, however, that roots may still penetrate soil with a penetration resistance greater than 300 psi if natural cracks and pores are present."

Horn & Baumgartl (2002): "When penetration resistance exceeds 2 MPa, root growth is often reduced by half, while values >3 MPa often prevent root growth. Tillage may increase the critical stress value of a hard pan to >3.5 MPa depending on the nature of the pore system and the type of soil structure."

Referenties Bijlage 2

- Bengough, A.G. & C.E. Mullins. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science* 41: 341-358.
- Bengough, A.G., B.M. McKenzie, P.D. Hallett, T.A. Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62: 59-68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>

-
- Duiker, S.W. 2002. Diagnosing Soil Compaction Using a Penetrometer (Soil Compaction Tester). Agronomy Facts 63, Penn State Extension, Pennsylvania State University.
<https://extension.psu.edu/diagnosing-soil-compaction-using-a-penetrometer-soil-compaction-tester>
- Horn, R. & T. Baumgartl. 2002. In: Warrick, A.W. (ed.), Soil Physics Companion, pp. 17-48. CRC Press, Boca Raton.
- Martino, D.L. & C.F. Shaykewich. 1994. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. Canadian Journal of Soil Science, 1994, 74(2): 193-200, <https://doi.org/10.4141/cjss94-027>.
- Otto, R., A.P. Silva, H.C.J. Franco, E.C.A. Oliveira, P.C.O. Trivelin. 2011. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. Soil and Tillage Research, 117: 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.005>.

Bijlage 3 Kwalitatieve inschatting van de relatie tussen indicator, mate van stabiliteit, complexiteit van meting en kosten

	Used by x% of tools	dynamic			simple			different methods			cost		
		1. stable or more than 1 year/decade	2. dynamic within year	3. dynamic daily/weekly	1. robust/easy	2. moderate	3. complex method	1. single agreed	2. multiple agreed	3. multiple, not agreed	1. low	2. moderate	3. high
total organic matter/carbon	90.8	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
pH	81.5	2	1	1	1	1	1	2	2	1.5	1	1	1
available P	73.8	2	2	2	2	2	2	3	3	1	1	1	1
available K	49.2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1
total N	40.0	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1
cation exchange capacity	32.3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
electrical conductivity	33.8	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
available N	29.2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
heavy metals	21.5	1	1	1	1	1	1	3	3	2	2	2	2
other macronutrients	16.9	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2
micronutrients	15.4	1	1	1	2	2	2	3	3	2	2	2	2
labile C and N	13.8	?	?	?	2	2	2	?	?	2	2	2	2
sodicity, salinity	15.4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
base saturation	9.2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2
carbonate content	7.7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
total P	9.2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
total K	7.7	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
organic pollutants	7.7	1.5	1.5	1.5	3	3	3	2	2	3	3	3	3
C/N	6.2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Bijlage 4 Kwalitatieve inschatting van de relatie tussen indicator en bodembedreiging

1: direct, used as indicator
 2: indirectly, conversion needed
 3: not related

Meaningful to quantify	Threat	Erosion	SOM decline	Contamination	Sealing	Compaction	Biodiversity loss	Salinization	Landslides
total organic matter/carbon	3	2	1	2	2	2	1	2	2
pH	3	3	2	1	3	3	2	3	3
available P	3	3	3	3	3	3	3	3	3
available K	3	3	3	3	3	3	3	3	3
total N	3	3	2	3	3	3	2	3	3
cation exchange capacity	2	2	2	2	3	3	2	2	2
electrical conductivity	2	3	3	3	3	3	3	1	3
available N	3	3	2	3	3	3	2	3	3
heavy metals	3	3	3	1	3	3	2	3	3
other macronutrients	3	3	3	3	3	3	2	2	3
micronutrients	3	3	3	1	3	3	2	3	3
labile C and N	3	3	1	3	3	3	2	3	3
sodicity, salinity	2	2	2	3	2	2	2	1	2
base saturation	3	3	3	3	3	3	3	1	3
carbonate content	3	3	3	2	3	3	3	3	3
total P	3	3	3	3	3	3	3	3	3
total K	3	3	3	3	3	3	3	3	3
organic pollutants	3	3	3	1	3	3	2	3	3
C/N	3	3	2	3	3	3	2	3	3

Bijlage 5 Kwalitatieve inschatting van de relatie tussen indicator en ES volgens Bünemann et al.

Meaningful to quantify ES according to Bünemann et al.	Erosion Control	Water quality and supply	Biomass Production	climate regulation	pest disease control	Biodiversity conservation
total organic matter/carbon	2	2	2	1	1	1
pH	3	2	1	2	2	2
available P	3	1	1	3	3	2
available K	3	3	1	3	3	3
total N	3	2	2	3	3	2
cation exchange capacity	2	2	2	2	2	3
electrical conductivity	2	1	1	2	3	3
available N	3	1	1	3	3	3
heavy metals	3	1	2	3	3	2
other macronutrients	3	2	2	3	3	2
micronutrients	3	1	1	3	3	2
labile C and N	3	2	2	2	3	2
sodicity, salinity	2	1	1	2	3	3
base saturation	3	2	2	3	3	3
carbonate content	3	2	2	2	3	3
total P	3	2	2	3	3	3
total K	3	3	2	3	3	3
organic pollutants	3	1	3	3	3	2
C/N	3	3	2	2	3	2

Bijlage 6 Indeling risicoklassen organische stof dynamiek bodem

Tabel B6.1 Arbitraire risicoklassen voor minerale gronden voor een groot, beperkt of klein risico op achteruitgang van het gehalte OS in de bodem bij een initieel laag (kleiner of gelijk aan 3%) en hoog (groter dan 3%) gehalte aan OS in de bovenste 25 cm van de bodem. De in de tabel genoemde percentages hebben betrekking op de OS-gehalten.

OS-gehalte	Risicoklassen (verandering eerste jaar)	Risico
Laag (< 3%)	Afname van 0,5% of meer	Groot
	Afname tussen 0 en 0,5%	Beperkt
	Geen afname of toename	Geen
Hoog (> 3%)	Afname van 1% of meer	Groot
	Afname tussen 0,5% en 1%	Beperkt
	Afname kleiner of gelijk aan 0.5% of geen verandering dan wel toename	Klein

Bron: TCB – 2016

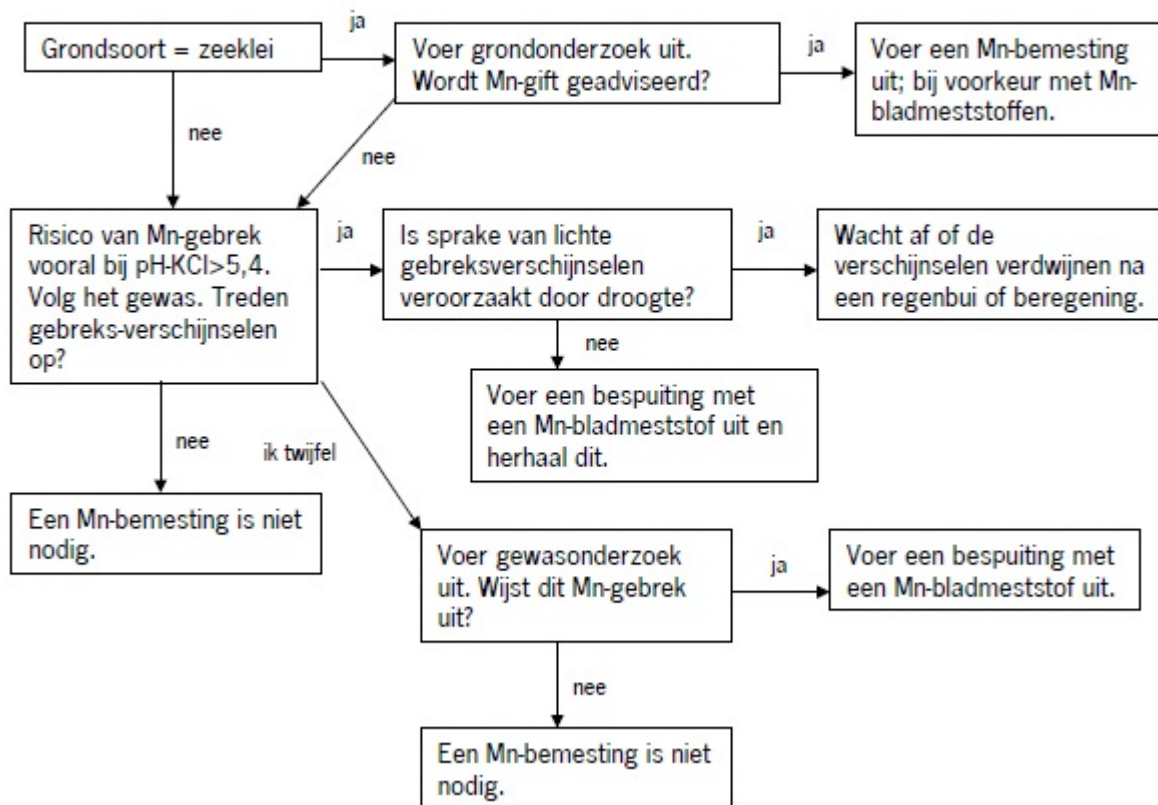
Average soil organic matter content (%) for the Netherlands based on LSK data and land use of 2012. The letters indicate whether there are significant differences, for the column "All land uses" it refers to differences between soil types, while for the other three columns with land use it refers to significant differences within a certain soil type for the land uses.

Tabel B6.2 Overzicht van het gemiddelde bodem organische stofgehalte (%) gebaseerd op LSK-data (2012) (Bron: Conijn en Lesschen, 2015).

Bodentype	Gemiddelde	Grasland	Akkerbouw	Natuur
Kalkhoudende zandgrond	2.4 ^a	2.8	2.3	2.2
Brikgrond	3.7	3.7	3.7	4
Kalkloze zandgrond	3.7	4.4	3.7	2.7
Oude-kleigrond	4.0	4.1	4.2	3.1
Eerdgrond	4.3	4.3	4.2	4.9
Leemgrond	4.6	4.3	3.6	5.9
Zeekleigrond	5.4	7	4.2	7
Podzolgrond	5.6	6.2	5.4	5
Rivierkleigrond	6.7	7.1	4.4	11.7
Moerige grond	15.5	13.8	15.8	23.6
Veengrond	26.1	24.9	21.4	42.5

Bijlage 7 Voorbeelden van beslisschema's t.b.v. micronutriënten

Beslisschema mangaanbemesting



Bron: Handboek Bodem en Bemesting

<https://www.handboekbodemembemesting.nl/nl/handboekbodemembemesting/Handeling/Bemesting/Sporenelementen/Mangaan.htm>

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 2944
ISSN 1566-7197

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, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten 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.



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



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 2944
ISSN 1566-7197

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, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten 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.

