

Evaluering van die microBIOMETER®-veldtoetsstel en ander grondgesondheidsaanwysers in drie verskillende gronde van die Wes-Kaap Provinsie

A Marais,¹ M Booyse²

¹Instituut vir Plantwetenskappe, Wes-Kaapse Department van Landbou, Suid-Afrika;

²LNR Biometrie, Suid-Afrika

Korresponderende outeur: Anélia Marais **E-pos:** Anelia.marais@westerncape.gov.za

Daar is toenemende kommer oor agteruitgang van grondgesondheid en -kwaliteit, onder andere as gevolg van klimaatsverandering en toenemende druk op landbouers om meer voedsel te produseer. Ten einde iets te monitor, moet dit gemeet word. Verskeie aanwysers vir grondgesondheid het die afgelope dekades die lig gesien. Die meerderheid van hierdie toetse is laboratoriumgebonde en genoodsaak vervoer en berging van grondmonsters wat die grondlewe beïnvloed. Die microBIOMETER® is 'n veldtoetsstel wat die mikrobiële biomassa, persentasie swamme en bakterieë, asook die swam:bakterieverhouding binne minute met behulp van 'n selfoontoepassing kan meet. Hierdie toetsstel is in drie verskillende grondtipes met verskillende bestuurspraktyke in die Wes-Kaap Provinsie, Suid-Afrika, getoets. Terselftertyd is vyf laboratoriumgebaseerde toetse wat tans beskikbaar is, ook op dieselfde grond uitgevoer, naamlik: aktiewe koolstof, mikrobiële aktiwiteit, protosoë, persentasie organiese koolstof, ammoniumstikstof en mikrobiële respirasie. Die verskillende grondtipes het verskillend op die toetse gereageer. Al die toetse, insluitend die microBIOMETER®, kon sommige van die grondtipes en bestuurspraktyke uitwys. Dit is duidelik dat al die toetse in hierdie studie verskillende aspekte van die grond getoets het. Dit word aanbeveel dat meer as een toets gebruik word ten einde grondgesondheid en -kwaliteit te meet en dat vergelykings binne grondtipes en grondgebruik en oor die verloop van die seisoene gedoen word. Verdere navorsing mag moontlik 'n stel toetse vir 'n spesifieke grondtipe en/of gebruik kan identifiseer.

Trefwoorde: aggregaatstabiliteit, aktiewe koolstof, grondgesondheid, microBIOMETER®, mikrobiële aktiwiteit, protosoë, Solvita® CO₂-Burst

Evaluation of the microBIOMETER® field test kit and other soil health indicators in three different soils of the Western Cape Province:

There is growing concern about degradation of the health and quality of soil, due to, amongst other things, climate change and increasing pressure on farmers to produce more food. In order to monitor something, it must be measured. Several soil health tests have seen the light of day in recent decades. The majority of these tests currently available in South Africa are laboratory-bound and necessitates transportation and storage of soil samples that can change soil biology. The microBIOMETER® is a field test kit that can measure microbial biomass, percentage of fungi and bacteria, as well as the fungi:bacteria ratio in minutes, using a mobile phone application. This kit was tested in three different soil types with different management practices in the Western Cape Province, South Africa. At the same time, five currently available laboratory-based tests were also carried out on the same soil, namely: active carbon, microbial activity, protozoa, percentage organic carbon, ammonium nitrogen and microbial respiration. The different soil types responded differently to the tests. All the tests, including the microBIOMETER®, were able to distinguish some of the soil types and management practices. It is clear that all the tests in this study measured different aspects of the soil. It is recommended that more than one test be used to measure soil health and quality and that comparisons be made within soil types and land use and over the course of seasons. Further research may be able to identify a set of tests for a specific soil type and/or use.

Keywords: active carbon, aggregate stability, microbial activity, microBiometer®, protozoa, soil health, Solvita® CO₂-Burst

Inleiding

In die lig van toenemende kommer oor moontlike gevolge van klimaatsverandering (Erasmus et al. 2000), sowel as die antropogeniese uitwerking van onder andere industriële landbou (Emmert et al., 2021; Reinecke en Reinecke, 2018), is die soeke na volhoubare boerderypraktyke die afgelope jare op baie maniere toegelig. Alhoewel grondgesondheid en -kwaliteit nie sinonieme is nie, blyk die definisie van grondkwaliteit deur Schlöter et al., (2006), 'n eenvoudige beskrywing te wees wat die belangrike aspekte van gesonde grond vaspen: "Die kapasiteit van 'n grond om tans en in die toekoms, vir 'n onbepaalde tydperk, te funksioneer". Volhoubare boerdery het gesonde gronde van hoë kwaliteit nodig (Guo, 2021).

Ten einde iets te monitor, moet dit gemeet word. 'n Vinnige internetsoektoeg met sleutelwoorde "maniere om grondgesondheid te meet" het onder andere die volgende moontlikhede gebied: Cornell Universiteit (Moebius-Clune et al., 2017) het aktiewe koolstof, mikrobiële respirasie (gemeet deur Solvita® CO₂-Burst), grondorganiese materiaal, pH, totale koolstof en totale stikstof, sowel as aggreëatstabiliteit as belangrike toetse voorgestel. Die Verenigde State van Amerika se Departement van Landbou (USDA, 2015) het erdwurms, organiese materiaal van biologiese oorsprong tussen 0.053 – 2 mm-grootte, potensieel mineraliseerbare stikstof, grondensieme, mikrobiële respirasie en aggreëatstabiliteit as moontlike aanwysers gelys. 'n Grondlaboratorium in die Verenigde State, AgSource® (Anon, 2023a), het grondgesondheid beskou as 'n kombinasie van biologiese, chemiese en fisiese aspekte en het 'n basiese toets vir 'n grondgesondheidsindeks, koolstofdioksiedrespirasie en C:N-verhouding aangebied. 'n Australiese grondtoetsfasiliteit, Nutrient Advantage® (Anon, 2021), maak op die resultate van die meting van totale koolstof en stikstof, C:N-verhouding, aggreëatstabiliteit en -verspreiding, aktiewe koolstof en mikrobiële respirasie (Solvita® CO₂-Burst) staat. Die Woods End-laboratorium (Anon, 2022), vervaardigers en verspreiders van die Solvita®-toetsstelle, het hul basiese grondgesondheidstoets aangebied wat Solvita® CO₂-Burst, Solvita® labiele-amino-N, waterstabile aggreëate, grond C:N-verhouding en 'n respiratoriese kwasiënt insluit. 'n Plaaslike Wes-Kaapse maatskappy, Soil Health Support Centre (Anon, 2024), het toetse vir mikrobiële respirasie, volumetriese aggreëatstabiliteit, gemeenskapstruktuur (PFLA – fosfolipiedvetsure) asook die Haney-ontledings (standaard makro- en mikrovoedingstowwe vir plante, asook skattings van voedingstowwe vir mikrobiële verbruik) aangebied.

Dit is duidelik dat daar baie verskillende toetse bestaan. Aangesien grondgesondheid unieke vereistes vir 'n spesifieke ekosisteem sal hê (Guo, 2021; Schlöter et al., 2006), sal verskillende gronde verskillend op dieselfde toets reageer en dus lyk dit verstandig te wees om meer as een toets te gebruik (Kibblewhite et al., 2008).

Die Verenigde State se Departement van Landbou (USDA, 1991) het 'n veldtoetsstel vir grondgesondheid ontwikkel wat blykbaar die volgende aspekte kan toets: respirasie, infiltrasie, bulkdigtheid, elektriese geleidingsvermoë, pH, nitrate, aggreëat-

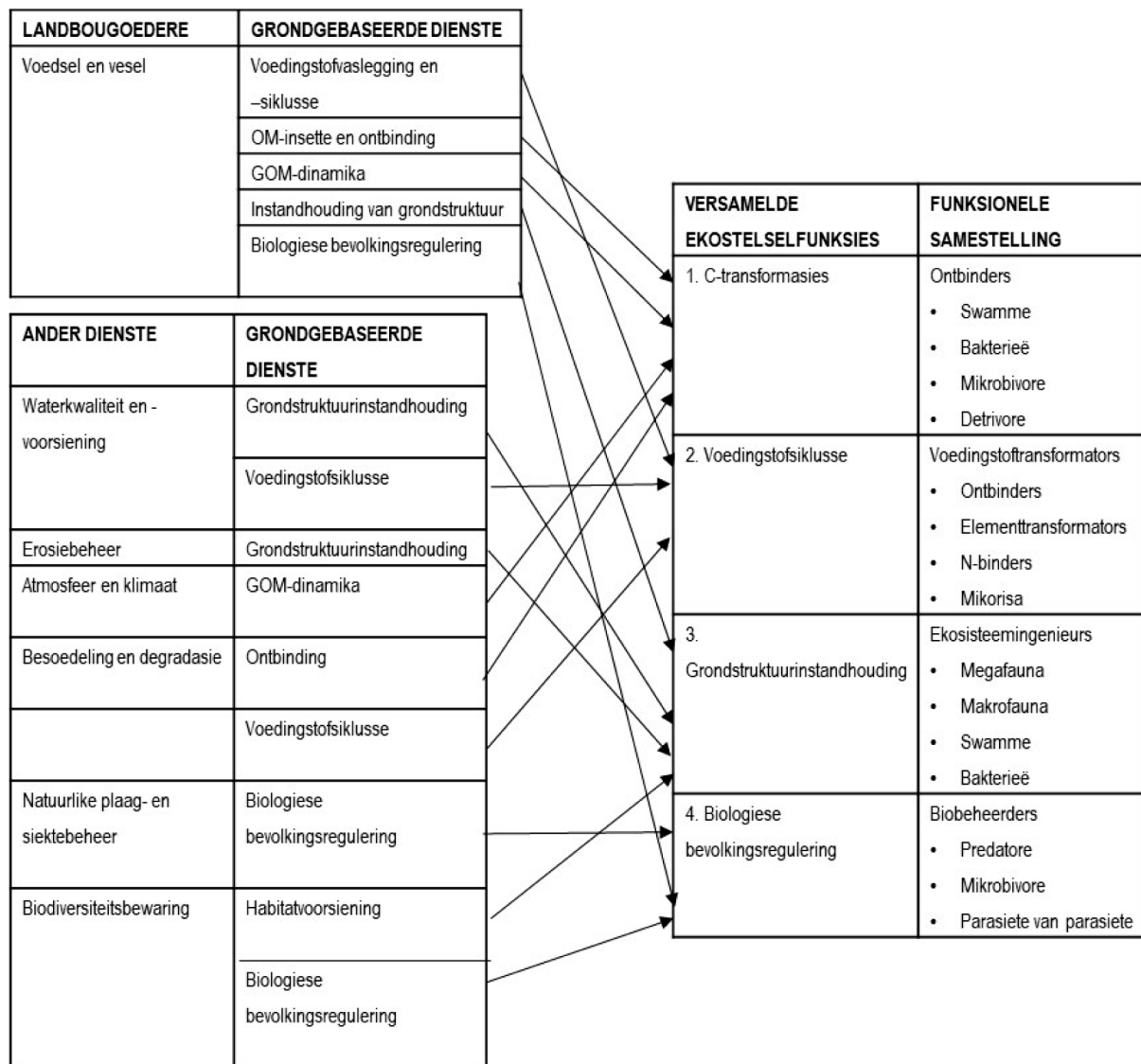
stabiliteit, blussing, erdwurmtellings en weerstand teen penetrasie. Die meeste van die toetse wat plaaslik beskikbaar is, word egter in laboratoriums uitgevoer. Dit behels gewoonlik monsterneming, vervoer en berging van die grond – alles aksies wat die biologiese aspekte van gronde kan verander (Cui et al., 2014; Lane et al., 2022).

Mikrobiële biomassakoolstof (lewende fraksie) is een van vele grondgesondheidsaanwysers. Dit is een van die fraksies van grondorganiese koolstof (GOK) wat maklik op 'n kort termyn verander (Kibblewhite et al., 2008). Die microBIOMETER® (Anon 2023c) is deur 'n Amerikaanse maatskappy, Prolific Earth Sciences, as 'n koste-effektiewe toets vir mikrobiële biomassakoolstof, % swamme en % bakterieë ontwikkel. Die feit dat dit 'n veldtoets is, maak die gebruik daarvan baie aantreklik, aangesien dit die noodsaaklikheid van vervoer en berging van grondmonsters sal uitskakel. Twee studies wat die microBIOMETER® se akkuraatheid vir mikrobiële biomassameting geëvalueer het, het wisselende resultate behaal. Gordon (2021), het tot die gevolgtrekking gekom dat die microBIOMETER® wel aspekte van grondgesondheid meet. Alhoewel die korrelasies met ander bepalinge van mikrobiële biomassa nie betekenisvol was nie, het hy positiewe korrelasies tussen die apparaat se metings en aktiewe koolstof, asook grondproteïene, gekry. Sain (2022), het bevind dat die microBIOMETER® se resultate meer as dié van die ander metodes vir mikrobiële biomassabepaling s'n gewissel het en dat dit nie tussen behandelings kon onderskei nie. Hierdie outeur het aanbeveel dat die microBIOMETER® nie as 'n enkele toets vir grondgesondheid gebruik behoort te word nie.

Kibblewhite et al. (2008), het die volgende sleutelprosesse, naamlik transformasies van koolstof, voedingstofsiklusse, instandhouding van die struktuur en materiaal van die grond, asook biologiese regulering van grondgemeenskappe in die grondsisteem geïdentifiseer. Figuur 1 beeld die onderlinge verbande tussen verskillende aspekte van grond uit wat relevant is vir grondkwaliteit en -gesondheid, soos deur Kibblewhite et al. (2008) uiteengesit. Hierdie prosesse moet in gedagte gehou word indien enige tipe grondgesondheidstoets oorweeg word, aangesien 'n mens behoort te poog om ten minste een toets vir elk van hierdie ekosisteemfunksies in te sluit.

Mikrobiële biomassa (soos gemeet deur die microBIOMETER® in hierdie studie), sowel as permanganaat oksideerbare koolstof (genoem aktiewe koolstof in hierdie studie), word albei beskou as sensitiewe aanwysers van grondgebruiksverandering en bestuurspraktyke (Hurisso et al., 2016), aangesien hierdie fraksies van grondorganiese koolstof 'n 1-5 jaar omsettyd het (Ramesh et al., 2019). Hierdie twee metings behoort dus 'n aanduiding te wees van C-transformasies en voedingstofsiklusse (Figuur 1: 1 – C-transformasie, 1: 2 – voedingstofsiklusse). Ning et al. (2021) het ook direkte verbande tussen hierdie twee koolstof-fraksies aangetoon.

Grondstruktuur is 'n aanduiding van die stabiliteit van die grond se aggreëate (Ramesh et al., 2019), wat op sy beurt blykbaar 'n direkte invloed op die ophoping van organiese koolstof en totale stikstof in die grond het (Mustafa et al., 2020). Aggreë-



Figuur 1: Verwantskappe tussen die aktiwiteite van die grondbiologiese gemeenskap en 'n reeks ekosistemoedere en -dienste wat die samelewing van landbougrond kan verwag. OM = organiese materiaal, GOM = grondorganiese materiaal (aangepas uit Kibblewhite et al., 2008).

gaatstabiliteit is aan die instandhouding van die grondstruktuur (Figuur 1:3 – grondstruktuurinstandhouding) gekoppel.

Protoosoë is by habitat- en ekologiese veranderinge betrokke en behoort dus 'n goeie aanduiding van grondgesondheid te wees (Chitra, 2017; Luu, 2019). Hulle word dikwels met mikrobiese aktiwiteit gekorreleer (Luu, 2019). Hulle jag en vreet ander mikrobies selektief en aktief en speel dus 'n integrale rol in die handhawing van die ewewig van die grondlewe (Figuur 1:4 – bevolkingsregulering; Johns, 2017). Protoosoë verhoog die vloeï van voedingstowwe in die grondekosistemo (Foissner, 1999), aangesien hulle voedingstowwe wat in die liggame van hul prooi was, vrystel (mineralisasie) (Figuur 1:2 – voedingstofsiklusse).

Adam en Duncan (2001) het voorgestel dat die spektrofotometriese bepaling van die hidrolise van fluoreseëndiasetaat (FDA), 'n eenvoudige, sensitiewe en vinnige metode vir die bepaling van totale mikrobiese aktiwiteit in grond is, omdat dit verskeie ensiemklasse soos lipases, esterases en proteases insluit. Hierdie ensieme is volop in gronde (Patle et al., 2018) en

is by chemiese transformasie van verskeie substrate betrokke (Figuur 1:1 – C-transformasies, 1:2 – voedingstofsiklusse, 1:3 – grondstruktuurinstandhouding).

Die Solvita®-toetsstel is deur die Woods End-laboratoriums ontwikkel (Anon, 2022). Die toetsstel meet die skielike vlag van koolstofdioksied wat mikrobies na 'n versteuringsgebeurtenis (eers droging en dan herbenatting) produseer. Die CO₂ wat so geproduseer word, hou verband met die grond se gesondheid deurdat dit 'n aanduiding van die biologiese aktiwiteit is (Figuur 1:1 – C-transformasies, 1:2 – voedingstofsiklusse, 1:3 – grondstruktuurinstandhouding). Hierdie toets boots die natuurlike droging-benattingsiklus wat gronde ten tye van reënval ondervind, na.

Die samestelling van grondbiologiese gemeenskappe en -kenmerke en grondorganiese materiaal is onderling verwant (Figuur 1; Domeignoz-Horta et al., 2021; Tecon en Or, 2017).

Die doel van hierdie ondersoek was om die microBIOMETER® te evalueer teenoor meer tradisionele (laboratorium-) grondge-

sondheidsaanwysers wat tans in Suid-Afrika en spesifiek in die Wes-Kaapse landbougronde gebruik word. Ten einde die verskillende grondgesondheidsaanwysers te toets, was die gekose lokaliteite in verskillende streke van die Wes-Kaap Provinsie geleë, met verskillende kimate, grondtipes en bestuurspraktyke (Tabel I).

Die volgende toetse (spesifieke metodes tussen hakies): mikrobiële biomassa, (microBIOMETER®), aktiewe koolstof (KMnO_4 -oksidase), nat grond aggreëatstabiliteit (Royal Eijkelkamp, geen datum) protosoë (mees-waarskynlike-getal, of MWG), totale mikrobiële aktiwiteit (fluoreseëndiasetaat, of FDA) sowel as mikrobiële respirasie (Solvita® CO_2 -Burst) is uitgevoer. Die grondmonsters se totale organiese koolstofinhoud (% C, Walkley-Black se metode) en ammoniumstikstof (% N, Kjeldalmetode) is ook bepaal (Anon, 1990).

Materiaal en metodes

Die Wes-Kaap Provinsie van Suid-Afrika ervaar hoofsaaklik 'n tipiese Mediterreense klimaat met warm, droë somers en koel, klam winters. Drie navorsingsplase van die Wes-Kaapse Departement van Landbou (Anon, 2023b) is as lokaliteite vir die genoemde toetse gekies.

Nortier navorsingsplaas (32.035147 S, 18.331839 O), naby Lambertsbaai, is aan die Weskus geleë. Hierdie plaas het die minste intensiewe landboupraktyke van die drie gekose plase en word hoofsaaklik vir weiding op natuurlike veld gebruik. Die gronde is van die Namib-vorm met nie-rooi regiese sand en van aeoliese oorsprong. Die pedologiese ontwikkeling is beperk, sanderig en baie goed gedreineer. Die klei-inhoud is 1 – 4% met 'n diepte van meer as 750 mm. Die gemiddelde neerslag is 200

mm, waarvan die meeste in die wintermaande voorkom (Grondklassifikasiewerkgroep, 1991; Booysen et al., 2009, ongepubliseer).

Outeniqua navorsingsplaas (33.987630 S, 22.420645 O) is suidwes van George in die Edendistrik geleë en is vir navorsing oor suiwelproduksie op aangeplante weidings bekend. Die grond is goed gestruktureer en word beskryf as afkomstig van Kaapse Graniet (Witfontein-vorm) met 'n diepte van 450 – 750 mm. Die gronde het 'n klei-inhoud van minder as 15%. (Grondklassifikasiewerkgroep, 1991). Jaarlikse neerslag is 700 mm per jaar, wat regdeur die jaar, met pieke in Maart, April en Augustus, voorkom.

Langgewens (33.276981 S, 18.703856 O), naby Moorreesburg, in die Swartland, is in een van die vernaamste koringproduserende gebiede onder droëlandtoestande, geleë. Die gronde is vlak, afkomstig van Malmesbury skalie en het beperkte pedologiese ontwikkeling. Glenrosa- en/of Mispah-vorms is dominant, met kalk wat gewoonlik in die hele landskap voorkom. Klei-inhoud wissel tussen 15 en 35%, met 'n diepte van minder as 750 mm (Grondklassifikasiewerkgroep, 1991). Die gronde het swak vertikale dreinerings, maar goeie laterale dreinerings, wat dikwels tot versuipde areas in laagliggende gebiede lei (Wiese et al., 2016). Gemiddelde neerslag is net minder as 400 mm per jaar, waarvan ongeveer 80% gedurende die tydperk April tot September voorkom.

Vier persele op is op elke plaas, onder verskillende bestuurspraktyke, geïdentifiseer. Die perseel wat deurgans 'veld' genoem word, is so natuurlik en onversteur deur landbou as wat op die spesifieke plaas gevind kon word (Tabel I).

Tabel I: Kort beskrywing van die bestuurspraktyke en persentasie organiese koolstof (C) en ammoniumstikstof (N) van die vier persele op elke plaas wat in hierdie studie gebruik is.

NORTIER 32.035147 S, 18.331839 O	OUTENIQUA 33.987630 S, 22.420645 O	LANGGEWENS 33.276981 S, 18.703856 O
Veld = onversteurde, natuurlike area naby die see. Soms deur skape en wild beweë. % C = 0.703 % N = 0.094	Veld = onversteurde, natuurlike area, sommige uitheemse plante. Soms deur beeste en wild beweë. % C = 2.59 % N = 0.216	Veld = onversteurde, natuurlike area, sommige uitheemse plante. Benut deur wild wat natuurlik voorkom. % C = 1.53 % N = 0.127
Heuwel = onversteurde, natuurlike area op 'n heuwel. Benut deur wild wat natuurlik voorkom. Soms deur skape beweë. % C = 0.647 % N = 0.088	Kikoejoe = aangeplante kikoejoeweiding onder besproeiing, beweë deur melkkoeie. NPK-kunsmis en kalk indien nodig, jaarliks. % C = 2.747 % N = 0.367	KKKK = koringmonokultuur Verminderde bewerking afgelope 16 jaar. NPK-kunsmis en kalk soos aanbeveel. Swamdoders en onkruidodders wanneer nodig. % C = 1.35 % N = 0.135
SBG = ou soutbos- en grasweiding, beweë deur skape tydens monsterneming. % C = 0.623 % N = 0.081	Vlei = onversteurde vlei gebied. Benut deur wild wat natuurlik voorkom. % C = 5.097 % N = 0.488	McKMcK = medic/koring/medic/koring-rotasie; monsters in koringfase geneem. Verminderde bewerking afgelope 16 jaar. NPK-kunsmis en kalk soos aanbeveel. Swamdoders en onkruidodders wanneer nodig. % C = 1.587 % N = 0.153
Weiding = besproeide aangeplante weiding (mengsel van rog, korog, voergars, wieke, lupiene en ertjies). Geen landbouchemikalieë nie. % C = 0.553 % N = 0.081	Deklaag = Dekgewasproef, met dooie <i>Eragrostis tef</i> ten tye van monsterneming. NPK-kunsmis en kalk soos aanbeveel gedurende groeifase van dekgewas. % C = 1.563 % N = 0.146	LKCK = lupiene/koring/canola/koring-rotasie; monsters in koringfase geneem. Verminderde bewerking die afgelope 16 jaar. NPK-kunsmis en kalk soos aanbeveel. Swamdoders en onkruidodders wanneer nodig. % C = 1.44 % N = 0.151

Vyf grondmonsters (elk 40 mm deursnee en 150 mm diep) is ewekansig in elk van die drie herhalings in die vier proefpersele (bestuurspraktyke) per plaas versamel, deur van 'n metaalpyp gebruik te maak. Die vyf grondmonsters is saamgevoeg en gemeng om drie monsters vir elke proefperseel vir alle ontledings te verskaf. Hierdie grondmonsters is gebruik vir die microBIOMETER®-metings in die veld, waarna die oorblywende grond in nuwe plastieksakke gestoor is, in 'n koelsak na die laboratorium vervoer is en daarna by 4 °C gestoor is totdat dit ontleed is.

microBIOMETER®

Die microBIOMETER®-toetsstel (Anon, 2023c) kom toegerus met alles wat nodig is om die toets te doen, behalwe vir die water om die grond en die ekstraksieoplossing te meng. Voor die meting moet die microBIOMETER®-toepassing op 'n slimfoon geïnstalleer word. Die eenvoudige instruksies was op die webwerf toeganklik, maar 'n gedrukte weergawe is ook by die toetsstel ingesluit. Die hele prosedure om een monster te toets, het ongeveer 25 minute geneem. Die grondmonsters moes gesif, gemeet en by die ekstraksieoplossing (voorsienende soutverbinding) en water gevoeg word, gemeng en gelaat word om uit te sak. 'n Druppel van die bostand van die grondoplossing is daarna op die ingeslote spesiale filtreerpapier geplaas. Dit is daarna met die selfoontoepassing ontleed. Die gevolglike % swamme, % bakterieë, swamme:bakterieë-verhouding en grondmikrobiese biomassa was binne minute beskikbaar. Vir hierdie evaluering, is slegs die mikrobiese biomassa gebruik.

Aktiewe koolstof (AktC)

Die KMnO₄-oksidasiemetode is maklik om uit te voer en dit benodig nie potensieel gevaarlike chemikalieë in groot hoeveelhede nie. Na aanleiding van 'n aangepaste prosedure (Marais et al., 2020), is grond met 'n KMnO₄-oplossing gemeng en toegelaat om met die koolstof in die monster te reageer terwyl dit horisontaal geskud is. Nadat die reaksie beëindig is, is die kleur van die mengsel op 'n spektrofotometer by 550 nm gemeet. Deur die gespesifiseerde formule toe te pas, is die hoeveelheid aktiewe koolstof bepaal (dele per miljoen, dpm). Dit is in duplikaat vir elke grondmonster gedoen, waarna die gemiddelde in die statistiese ontledings gebruik is.

Nat grond aggregaatstabiliteit

Die prosedure vir die aggregaatstabiliteitsbepaling is verkry vanaf die webwerf van die vervaardigers van die masjien (Royal Eijkelkamp, geen datum). Vier gram van voorheen luggedroogde en gesifte grondmonsters (1-2 mm in deursnit), is in 'n Eijkelkamp nat grond sifapparaat geplaas en bevogtig, voordat dit met behulp van die masjien op en af beweeg is, eers in gedistilleerde water, wat die onstabiele aggregate uitgewas het, daarna in 'n NaOH-oplossing, wat die stabiele aggregate uitgewas het. Hierdie grondoplossings is dan vir 24 uur in 'n oond by 100 °C gedroog (totdat al die water verdamp het) en daarna geweeg. Die toepassing van die gespesifiseerde formule het gelei tot die bepaling van die persentasie stabiele aggregate in die monsters. Dit is twee keer vir elke grondmonster gedoen, waarna die gemiddelde in die statistiese ontledings gebruik is.

Hierdie prosedure kon nie op die sanderige gronde van Nortier gedoen word nie, aangesien die sand deur die 1 mm-sif geval het. Nortier se sandgrond het dus geen aggregate van tussen 1 – 2 mm gehad nie.

Protoë (mees waarskynlike getal, MWG)

In hierdie metode (Briones en Reichardt, 1999) is 'n grondverdunningsreeks vir vyf dae toegelaat om te inkubeer (22 °C) met 'n steriele grondekstrak, voorberei uit die eksperimentele grondmonsters, wat as voedsel vir die mikrobies gedien het. Die grondoplossing van die verskillende verdunnings is daarna onder 'n 200 x-vergrotingslens van 'n omgekeerde mikroskoop (objektief en okulêr omgeruil) waargeneem. Die finale protoëbevolking is geskat deur gebruik te maak van 'n formule van Rønn et al., (1995).

Mikrobiese aktiwiteit (FDA)

Die metode van Adam en Duncan (2001) behels die inkubasie van die grondmonster met buffer en FDA vir 'n spesifieke tyd by 'n vasgestelde temperatuur. Tydens die inkubasie is die hoeveelheid fluoresserende kleurvorming 'n aanduiding van die ensiematiese aktiwiteit van die mikrobiese gemeenskap in die monster. Die intensiteit van die kleur word gemeet deur 'n spektrofotometer by 450 nm en vergelyk met 'n standaardkromme om die relatiewe mikrobiese aktiwiteit in die monster, deur gebruikmaking van die gespesifiseerde formule, te bepaal. Elke monster is in drievoud uitgevoer, terwyl die gemiddelde in die finale ontledings gebruik is.

Mikrobiese respirasie (Solvita® CO₂-Burst)

Gedroogde en gesifte grond is in 'n plastiekbeker volgens die protokol op die webwerf afgemete (Anon, 2022). 'n Gespesifiseerde volume gedistilleerde water is bygevoeg en die plastiekbeker is in 'n glasfles met 'n lugdigte skroefdeksel geplaas. 'n Spaan, bedek met koolstofchromatografiese jel, is in die nat grond geplaas en die glasfles is verseël. Na inkubasie van 24 uur by 'n konstante temperatuur van 22 °C, is die spaan verwyder en op 'n Solvita® Digital Color Reader gelees. Die mikrobies het op die herbenatting gereageer met 'n skielike vlag van geproduseerde CO₂ as gevolg van mikrobiese aktivering na 'n versteuringsgebeurtenis van uitdroging, gevolg deur vinnige herbenatting. Die dele per miljoen (dpm) CO₂ wat so gevorm is, het as 'n algehele aanwyser van aërobiese grond se mikrobiese potensiaal gedien. Hierdie toets is op twee van die drie herhalings per behandeling per plaas gedoen.

Statistiese ontleding

Die data van die drie plase is afsonderlik ontleed, want die behandelings tussen plase het verskil. Die plase is wel gesamentlik vir die behandeling "veld" ontleed. 'n Analise van variansie (ANOVA) is toegepas om die hipotese dat daar geen behandelingsverskille binne 'n plaas en tussen plase vir "veld"-behandeling bestaan het nie, te toets. Fisher se t-toets met KBV (kleinste betekenisvolle verskil) by 5% betekenispeil ($p = 0.05$) is verder toegepas om verskille tussen behandelingsgemiddeldes te bepaal. Die Shapiro-Wilk-toets is gebruik om te bepaal of die

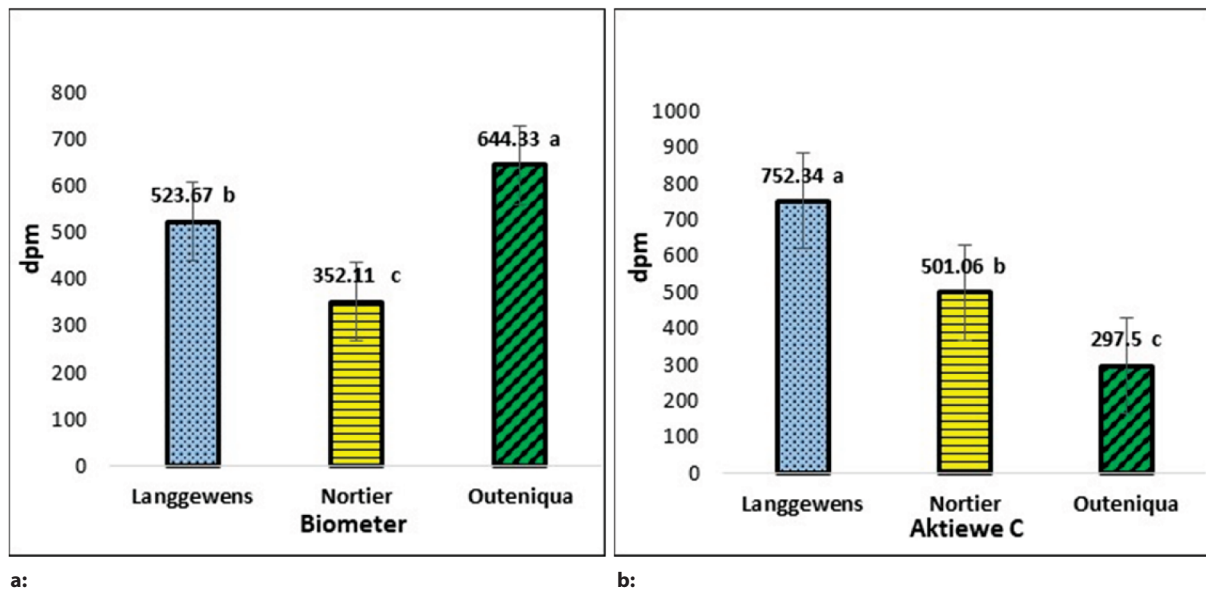
gestandaardiseerde residue van die model aanvaarbaar is. Die Proc GLM-prosedure van die statistiese pakket SAS (weergawe 9.4; SAS Instituut Inc, Cary, USA) is hiervoor gebruik. Verder is Pearson korrelasiekoeffisiënte bereken om die lineêre verband tussen die veranderlikes te bepaal. Hierdie statistiese toets is met behulp van die statistiese pakket XLSTAT (Addinsoft, 2022); uitgevoer.

Resultate en besprekings

Op grond van die gemiddeldes van die ANOVA, het slegs die microBIOMETER®- en die aktiewe koolstof toetse betekenisvolle

verskille tussen al drie die verskillende plase aangetoon wanneer slegs die onversteurde veld in ag geneem is (Figuur 2).

Die verskillende plase is daarna individueel ontleed. By Nortier was die enigste toets wat die veld van die ander kon onderskei, die protosoë, terwyl die microBIOMETER® die twee onversteurde persele (veld en heuwel) van die soutbosweiding kon onderskei (Tabel II). Hierdie plaas het redelik homogene sandgrond en daar word nie veel verskillende bestuurspraktyke toegepas nie.



Figuur 2: Mikrobiële biomassa soos gemeet deur die (a) microBIOMETER® (Biometer) en (b) aktiewe koolstof (Aktiewe C) in dele per miljoen (dpm) in die gronde van die onversteurde persele (veld) op die verskillende plase. Gemiddeldes van ANOVA. Stafies beeld standaardfout uit. Verskillende letters dui op betekenisvolle verskille by $p = 0.05$.

Tabel II: Gemiddeldes van ANOVA van veranderlikes bepaal vir die behandelings by die drie verskillende plase. Gemiddeldes binne dieselfde kolom met verskillende letters, dui op betekenisvolle verskille by $p = 0.05$.

	micro BIOMETER® (dpm)	Aktiewe C (dpm)	FDA mikrobiële aktiwiteit (dpm)	Log Populasie Protosoë	%C	%N	Solvita CO ₂ -Burst (dpm)	% Aggregate
NORTIER								
Veld	347.67 ^a	489.39 ^a	28.30 ^a	3.82 ^b	0.703 ^a	0.094 ^a	13.5 ^a	nvt
Heuwel	244.33 ^a	481.23 ^a	34.616 ^a	6.281 ^a	0.647 ^a	0.088 ^a	19.05 ^a	nvt
Weiding	248.67 ^{ab}	473.57 ^a	31.192 ^a	6.062 ^a	0.553 ^a	0.081 ^a	18.8 ^a	nvt
SBG*	202 ^b	465.08 ^a	38.285 ^a	6.623 ^a	0.623 ^a	0.109 ^a	21.9 ^a	nvt
OUTENIQUA								
Veld	644.3 ^{ab}	297.5 ^b	164.24 ^a	3.987 ^{ab}	2.59 ^b	0.216 ^c	51.74 ^b	50.145 ^a
Kikoejoe	848 ^{ab}	526.04 ^a	140.22 ^{ab}	5.042 ^a	2.747 ^b	0.367 ^b	110.55 ^a	50.197 ^a
Vlei	603.3 ^b	352.33 ^{ab}	178.5 ^a	3.719 ^b	5.097 ^a	0.488 ^a	78.4 ^{ab}	49.542 ^a
Deklaag	916.7 ^a	-198.69 ^c	76.06 ^b	3.78 ^b	1.563 ^b	0.146 ^d	51.1 ^b	50.338 ^a
LANGGEWENS								
Veld	523.67 ^{ab}	752.3 ^a	46.366 ^a	3.46 ^c	1.53 ^a	0.127 ^a	27.75 ^{cb}	49.445 ^b
KKKK*	340.67 ^b	555.4 ^a	36.506 ^a	4.323 ^{bc}	1.35 ^a	0.135 ^a	88.04 ^a	50.361 ^a
McKMcK*	614 ^a	466.1 ^a	47.315 ^a	5.52 ^{ab}	1.587 ^a	0.153 ^a	47.8 ^b	48.592 ^c
LKCK*	345.33 ^b	643.1 ^a	45 ^a	6.263 ^a	1.44 ^a	0.151 ^a	15.4 ^c	48.708 ^{cb}

*Verwys na Tabel I vir verklaring van afkortings van bestuurspraktyke.

By Outeniqua, met sy hoë koolstofvlakke (Tabel I), kon al die toetse, behalwe aggregeerbaarheid, sommige van die bestuurspraktyke onderskei. Dit is moontlik dat hierdie plaas met sy goed ontwikkelde grond en hoë koolstofinhoud, nie werklik meer verskille op aggregeerbaarheid toon nie, soos ook deur Mbanjwa et al. (2022) in 'n ander Suid-Afrikaanse studie bevind. Op Outeniqua het die persentasie ammoniumstikstof (%N) betekenisvolle verskille tussen al die behandelings aangetoon.

Geeneen van die toetse kon al die verskillende bestuurspraktyke by al die plase onderskei nie. Indien die veld buite rekening gelaat word by Langgewens, was die toets vir mikrobiële respirasie (Solvita® CO₂-Burst), in staat om tussen die drie rotasiesistels te onderskei. Die microBIOMETER®, die geskatte populasie van protosoë asook die stabiele aggregeate, het betekenisvolle verskille in sommige van die bestuurspraktyke op Langgewens onderskei.

microBIOMETER®

Die prosedure vir die microBIOMETER® (Anon, 2023c) was maklik om te verstaan, alhoewel soms probleme ondervind is waar daar geen selfoonsein was nie. Die verskaffer het verklaar dat 'n selfoonsein nie nodig is nie, maar die probleem het by sommige van die lokaliteite voortgeduur.

Die mikrobiële biomassa, soos bepaal met behulp van die microBIOMETER®, was een van slegs twee grondgesondheidsaanwysers wat getoets is, wat in staat was om tussen die drie lokaliteite (Langgewens, Nortier, Outeniqua) te onderskei. Hierdie onderskeid was slegs in die grond van die mees onversteurde gebiede (veld) (Figuur 2), dus waar geen kunsmatige insette (bewerking, kunsmis, plaagdoders) 'n verskil in die grondbiologie kon maak nie, waarneembaar.

Uit Figuur 3 is dit duidelik dat die microBIOMETER® nie die verskillende bestuurspraktyke kon onderskei wanneer lokaliteite vir alle bestuurspraktyke saam geanaliseer is nie (verwys na Tabel I vir volledige beskrywing van bestuurspraktyke). Hierdie tipe onderskeid tussen wyd uiteenlopende grontipes en klimaat, is bykans onmoontlik vir enige enkele toets (Vos et

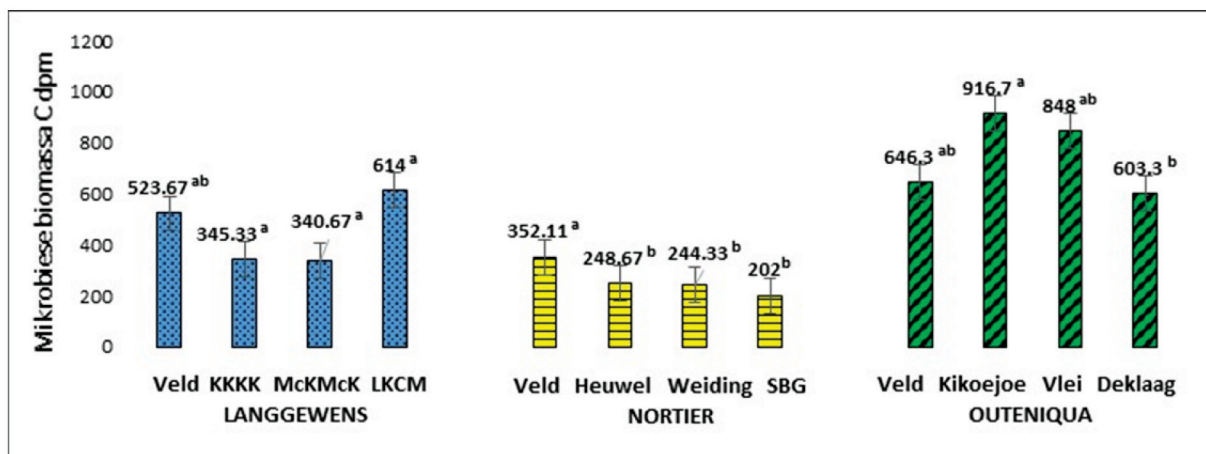
al., 2013; Fierer et al., 2021), soos ook blyk die geval te wees vir die microBIOMETER®, asook die ander toetse wat in hierdie studie gebruik is. Die tendense van die mikrobiële biomassa by die verskillende lokaliteite, is verwag, met Outeniqua se gronde die hoogste en Nortier se sandgronde die laagste in organiese koolstof (Tabel I). Die hoogste mikrobiële biomassa in die gronde onder die deklaag by Outeniqua is nie verwag nie, aangesien die deklaag (dooie materiaal ten tye van monsterneming), geen lewende wortels gehad het wat die mikrobies met wortelsuitskeidings kon voed nie. Moontlik het die deklaag reeds begin ontbind, wat wel voedsel vir (ander) mikrobies verskaf het. Mikrobiële biomassa is die massa van alle lewende mikrobies in die grond (Hoyle et al., 2023), insluitend die ontbinders.

Aktiewe koolstof

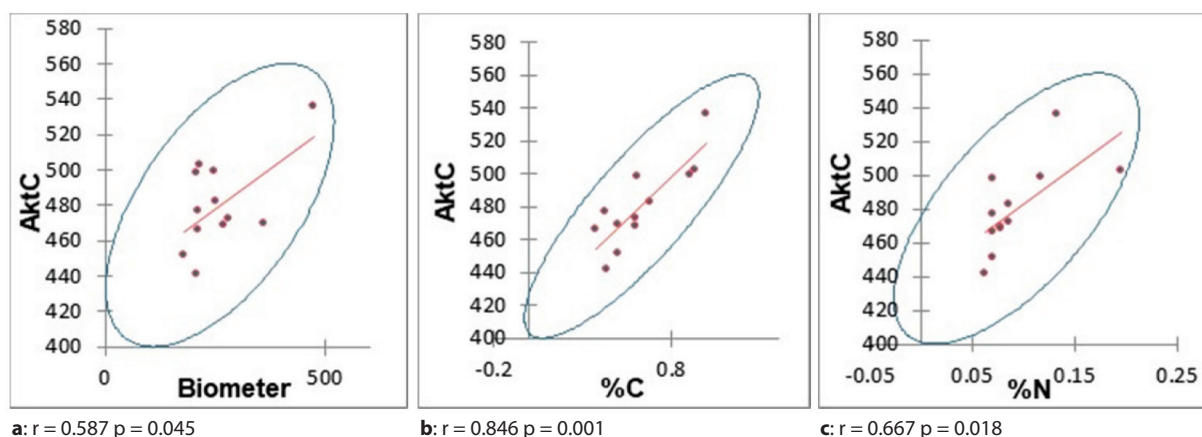
Soos in die geval van die microBIOMETER®, was aktiewe koolstof een van slegs twee grondgesondheidsaanwysers wat getoets is, wat in staat was om tussen die drie lokaliteite (Langgewens, Nortier, Outeniqua) te onderskei wanneer slegs die grond van die mees onversteurde gebiede (veld), in ag geneem is (Figuur 2).

By Nortier, die plaas met die minste intensiewe landbou (geen insette van landbouchemikalieë nie), het aktiewe koolstof betekenisvol positief gekorreleer met microBIOMETER®, % organiese koolstof, asook % ammoniumstikstof (Figuur 4). Aktiewe koolstof is die vorm van koolstof wat gereedlik beskikbaar vir mikrobies is en die microBIOMETER® meet mikrobiële biomassa, dus is hierdie positiewe korrelasie verwag, soos ook gevind deur Gordon (2021), in 'n studie waar die microBIOMETER® se akkuraatheid getoets is. Die positiewe korrelasie met die organiese koolstof en ammoniumstikstof was ook te wagte, aangesien beide direk aan mikrobiële biomassa en daarom mikrobies gekoppel is (Li et al., 2021).

By Langgewens, die enigste plaas wat gebruik is vir die droëlandproduksie van eenjarige gewasse in rotasie, met die gepaardgaande insette van landbouchemikalieë (Tabel I), het aktiewe koolstof nie met enige van die ander metings



Figuur 3: Bestuurspraktykgemiddeldes van mikrobiële biomassa (dpm) soos gemeet deur die microBIOMETER® in die gronde van alle bestuurspraktyke op al drie verskillende plase. Stafies beeld standaardfout uit. Verskillende letters dui op betekenisvolle verskille by $p = 0.05$ van die bestuurspraktykgemiddeldes binne 'n plaas aan. (Verwys na Tabel I vir verklaring van afkortings.)

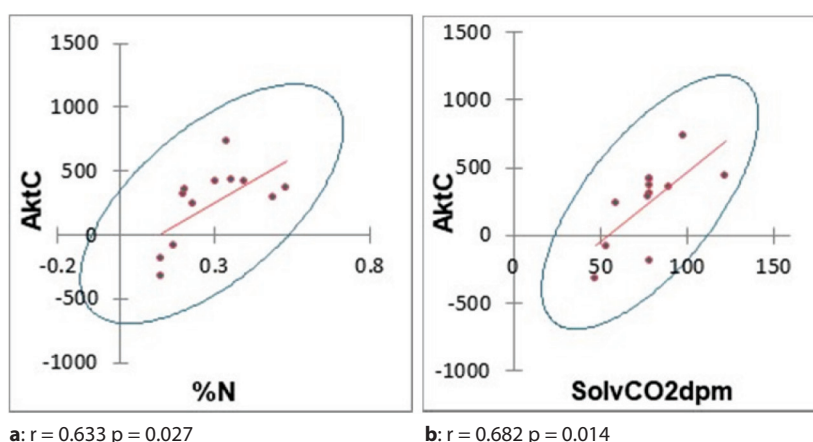


a: $r = 0.587$ $p = 0.045$

b: $r = 0.846$ $p = 0.001$

c: $r = 0.667$ $p = 0.018$

Figuur 4: Nortier – positiewe korrelasie tussen aktiewe koolstof (AktC) en (a) mikrobiële biomassa (Biometer), (b) organiese koolstof (%C) asook (c) ammoniumstikstof (%N). Pearson korrelasiekoeffisiënt (r) en p = spesifieke betekenispeil van die korrelasiekoeffisiënt.



a: $r = 0.633$ $p = 0.027$

b: $r = 0.682$ $p = 0.014$

Figuur 5: Outeniqua – positiewe korrelasie tussen aktiewe koolstof (AktC) en (a) ammoniumstikstof (%N) asook (b) mikrobiële respirasie (SolvCO₂dpm). Pearson korrelasiekoeffisiënt (r) en p = spesifieke betekenispeil van die korrelasiekoeffisiënt.

gekorreleer nie (resultate word nie getoon nie). Dit was onverwags, aangesien die dekgewasse en rotasiegewasse die mikrobiële biomassa verhoog het (soos gevind is met die microBIOMETER®) en hoër worteluitskeidings sou verwag word, veral in die rotasiepersele. 'n Moontlike verklaring kan die hoë insette van landbouchemikalieë op hierdie persele vir die produksie van kontantgewasse wees (Damoran et al., 2016). Chen et al., (2021) het ook 'n negatiewe effek van anorganiese stikstofkunsmis op mikrobiële aktiwiteit berig en het ook gevind dat die jare van seleksie van koringplante opsigself 'n versteurende effek op die geassosieerde mikrobies van die plante kon gehad het. Al die rotasiestelsels was in die koringfase ten tyde van hierdie studie.

By Outeniqua het aktiewe koolstof betekenisvol positief gekorreleer met ammoniumstikstof, (soos ook by Nortier waargeneem), asook met die mikrobiële respirasie (SolvCO₂dpm) (Figuur 5). Die aktiewe koolstof is die vorm van koolstof wat direk opneembaar deur mikrobies is, terwyl ammonium deur mikrobiële afbraak gevorm word. Ohio Staatsuniversiteit verklaar in hulle feiteblad dat grond organiese materiaal die produkte is van onder andere die koolstof- en stikstofsiklusse wat deur grondorganismes onderhou word (Hoorman en Islam,

2010). Hierdie lewende organismes respireer, dus is hierdie korrelasies verstaanbaar.

Nat grond aggregaatstabiliteit

Aggregaatstabiliteit, wat weens Nortier se sandgronde nie daar bepaal is nie, het slegs by Langgewens enige betekenisvolle korrelasies getoon en wel negatief met mikrobiële aktiwiteit (FDA) en positief met mikrobiële respirasie (SolvCO₂dpm), soos in Figuur 6 aangetoon. In hierdie studie is slegs die stabiliteit van 1-2 mm-grootte aggregate bepaal. Alhoewel daar aanvaar word dat meer stabiele grondaggregate 'n indikasie is van hoër mikrobiële aktiwiteit, is dit, soos al die ander prosesse in die grond, baie dinamies en word dit deur 'n magdom faktore (seisoen, temperatuur, vog, moeder materiaal, planttipes, eksterne insette in die vorm van landbouchemikalieë) beïnvloed (Wilpieszski et al., 2019). Hierdie outeurs het gevind dat daar selfs betekenisvolle verskille tussen mikrobeaktiwiteit van mikro- en makroaggregate van dieselfde grondmonster bestaan. Die onverwagte negatiewe korrelasie tussen aggregaatstabiliteit en mikrobiële aktiwiteit, kan moontlik aan 'n verskeidenheid faktore wat nie in hierdie studie bepaal is nie, toegeskryf word, waarvan die hoë insette van landbou-

chemikalieë (die hoogste van die drie plase in hierdie studie) een kan wees. Basak et al. (2022), het berig dat insette van NPK-kunsmis die makroaggregate in hul eksperiment negatief beïnvloed het. Hierdie outeurs het ook gevind dat die mikrobiële aktiwiteit (soos gemeet deur FDA) heelwat hoër was in hulle persele waar organiese voeding saam met kunsmis gegee is as die persele wat net kunsmis ontvang het (soos in hierdie geval), terwyl Wang et al. (2022), negatiewe korrelasies met kunsmis en die spoed van potensieële stikstofsiklusse gevind het. Wat die positiewe korrelasie met mikrobiële respirasie betref, is dit dalk ook te danke aan slegs die 1-2 mm-grootte aggregate wat bepaal is, aangesien Yang et al. (2019) gevind het dat hierdie grootte aggregate die hoogste respirasie getoon het van al die aggreëtgrootteklasse wat hulle getoets het.

Protoë (MWG)

Die logaritmiese transformasie van die geskatte populasie van die protoë het betekenisvolle positiewe korrelasies op slegs twee plase gehad en wel met ammoniumstikstof by Langgewens en mikrobiële respirasie by Outeniqua (Figuur 7).

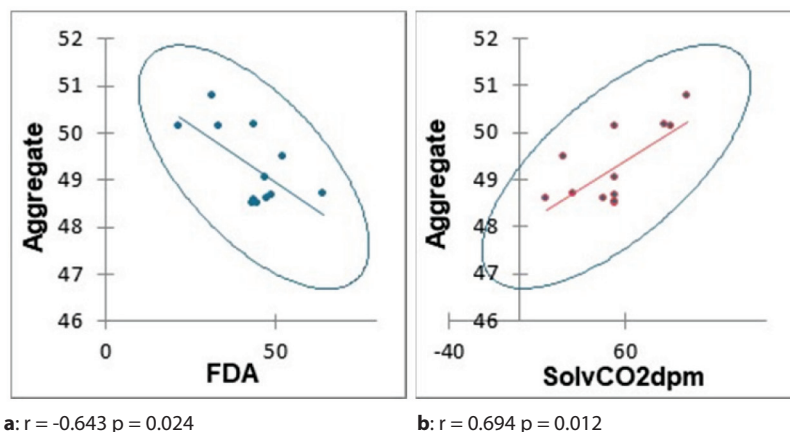
Protoëgetalle is 'n goeie aanduiding van die spoed van die voedingsstofsiklusse, aangesien hulle direk minerale vrystel aan

die grond, plante en ander mikrobe wat in die liggame van hulle prooi vasgevang was (Foissner, 1999). Dit is heel waarskynlik waarom dit 'n positiewe korrelasie met ammoniumstikstof by Langgewens getoon het.

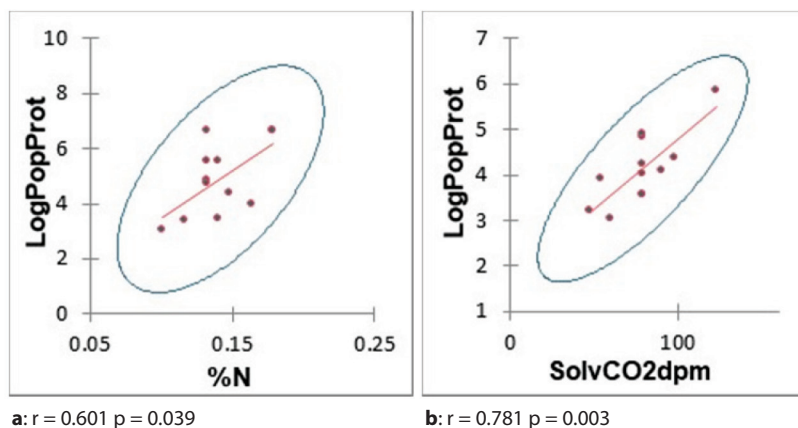
Die betekenisvolle positiewe korrelasie met mikrobiële respirasie ($\text{SolvCO}_2\text{dpm}$) by Outeniqua, maar nie by die Nortier en Langgewens nie, kan moontlik verklaar word aan die hand van die koolstofinhoud wat heelwat hoër by Outeniqua is (Tabel I). Die mikrobe wat as prooi van protoë dien, se voedsel is verskeie koolstoffraksies (Hoyle et al., 2011). Grond met meer koolstof behoort dus meer mikrobe te kan onderhou.

Mikrobiële aktiwiteit (FDA)

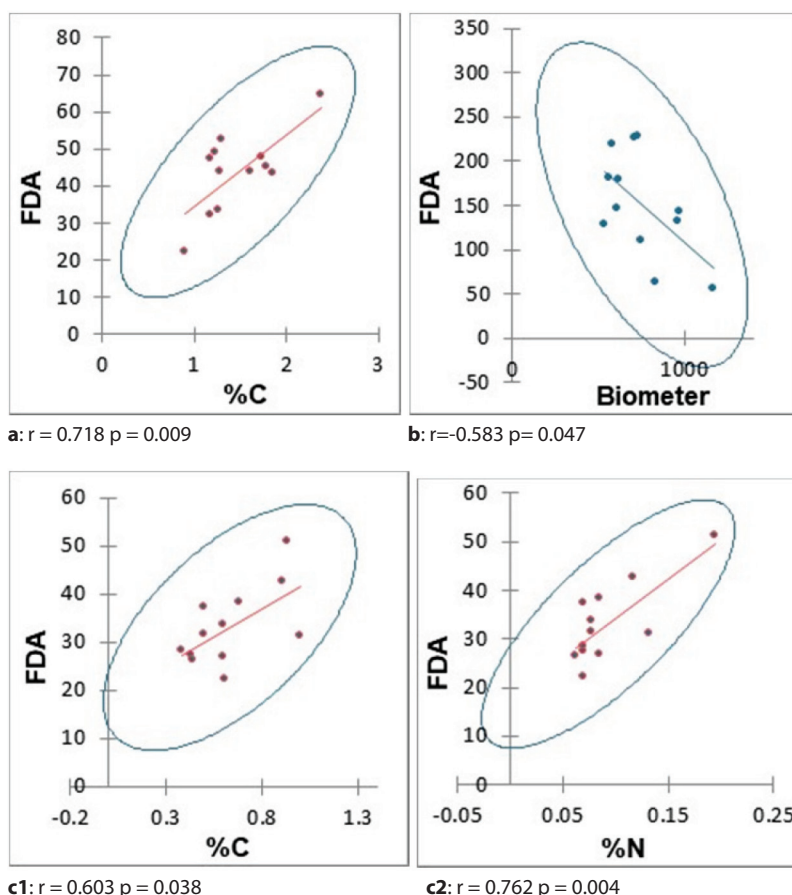
Mikrobiële aktiwiteit, soos gemeet met die fluoresëndia-setaatmetode (FDA), het by Langgewens en Nortier betekenisvol positief met % organiese koolstof gekorreleer, terwyl die enigste betekenisvolle korrelasie by Outeniqua negatief was, en wel met die mikrobiële biomassa, soos gemeet met die microBIOMETER®. By Nortier het die mikrobiële aktiwiteit ook positief met ammoniumstikstof gekorreleer (Figuur 8).



Figuur 6: Langgewens – Nat grond aggregate het negatief gekorreleer met (a) mikrobiële aktiwiteit (FDA) en positief met (b) mikrobiële respirasie ($\text{SolvCO}_2\text{dpm}$). Pearson korrelasiekoeffisiënt (r) en p = spesifieke betekenispeil van die korrelasiekoeffisiënt.



Figuur 7: Die logaritmiese geskatte populasie van protoë (LogPopProt) het positief gekorreleer met (a) persentasie ammoniumstikstof (%N) by Langgewens en met (b) mikrobiële respirasie ($\text{SolvCO}_2\text{dpm}$) by Outeniqua. Pearson korrelasiekoeffisiënt (r) en p = spesifieke betekenispeil van die korrelasiekoeffisiënt.



Figuur 8: Korrelasies van mikrobiese aktiwiteit (FDA) met ander metings soos bepaal in die grond van die verskillende plase. Langgewens (**a** = organiese koolstof, %C); Outeniqua (**b** = mikrobiese biomassa, Biometer) en Nortier (**c1** = organiese koolstof, %C; (**c2** = ammoniumstikstof, %N). Pearson korrelasiekoeffisiënt (r) en p = spesifieke betekenispeil van die korrelasiekoeffisiënt.

Die positiewe korrelasie tussen mikrobiese aktiwiteit en % organiese koolstof soos by Langgewens en Nortier gevind, (Figuur 8a, c1), is verklaarbaar, aangesien die fraksies van organiese koolstof die energiebronne vir mikrobiese metabolisme voorsien (Hoyle et al., 2011). Die negatiewe korrelasie met nat aggregaatstabiliteit by Langgewens (Figuur 6a), kan moontlik aan die hoë landbouchemiese insette toegeskryf word, asook die 1-2 mm aggregate wat bepaal is, soos reeds bespreek.

Die negatiewe korrelasie met mikrobiese biomassa (Biometer) by Outeniqua (Figuur 8b) was onverwags, maar moontlik het die perseel met die afwesigheid van lewende plante (deklaag) en laer koolstof- en stikstofinhoud, hierdie resultaat beïnvloed (Tabel I). Hoyle et al., (2023) het immers aangedui dat mikrobiese biomassa baie vinnig op bestuurspraktyke reageer. By Nortier met sy lae natuurlike organiese koolstof en skraal natuurlike plantegroei, het hierdie korrelasie ook negatief geneig, alhoewel dit nie betekenisvol was nie ($p = 0.81$).

By Nortier het die mikrobiese aktiwiteit ook positief gekorreleer met persentasie ammoniumstikstof (Figuur 8:c2). Die korrelasie by die ander twee plase het positief geneig, maar was nie betekenisvol nie (Outeniqua $p = 0.098$; Langgewens $p = 0.375$). Dit kan waarskynlik weereens verklaar word deur die

afwesigheid van bygevoegde landbouchemiese insette by Nortier en minder landbouchemiese insette by Outeniqua as Langgewens. Wang et al., (2022), het 'n betekenisvolle negatiewe invloed van langtermyn stikstofkunsmis (soos ook by Langgewens en Outeniqua in hierdie studie gebruik word) op die potensiële stikstofsiklustempo's gerapporteer.

Mikrobiese respirasie (Solvita® CO₂-Burst)

By Outeniqua het mikrobiese respirasie, soos bepaal met die Solvita® CO₂-Burst-toetsstel, betekenisvol positief gekorreleer met aktiewe koolstof (Figuur 5b) en die log van die geskatte populasie van die protosoë (Figuur 7b). By Langgewens het die mikrobiese respirasie, soos gemeet deur die microBIOMETER®, positief met die nat grond aggregaatstabiliteit gekorreleer (Figuur 6b).

Hierdie korrelasies is verklaarbaar, aangesien aktiewe koolstof die maklikopneembare vorm van energie vir mikrobies is (Breker, geen datum). Meer mikrobiese voedsel sal lei tot meer respirasie (SolvCO₂) en meer mikrobies sal as meer voedsel vir die protosoë dien. Die hoër protosoëgetalle sal op hulle beurt ook die toename in respirasie en aktiewe koolstof ondersteun, aangesien die koolstof wat in hulle prooi vasgevang was, aan die grond beskikbaar gestel word en hulle self ook respireer.

Stabiele aggregate word dikwels met hoër mikrobiële aktiwiteit en –getalle geassosieer, veral in die 1-2 mm-grootteklas (Yang et al., 2019), soos ook in hierdie studie gemeet.

Gevolgtrekkings

Tydens die evaluering van die microBIOMETER® en die vergelyking daarvan teenoor ander beskikbare grondgesondheidsaanwysers, het die volgende regdeur die proses na vore gekom: elke grond is uniek en elke toets meet iets anders. Daar is nie een toets vir grondgesondheid of -kwaliteit wat universeel as die beste geklassifiseer kan word nie. Selfs 'n toets wat as die beste in 'n spesifieke grond geklassifiseer kan word, mag min of niks in 'n ander grondtipe beteken, indien daar ander klimaatsomstandighede heers, ander plante daar groei of selfs as die monsters net op 'n ander tyd van die jaar geneem is. Die microBIOMETER® toets wel aspekte van grondgesondheid, soos die korrelasie met verskeie ander aanwysers toon.

Die beste is om so veel as moontlik verskillende aspekte van 'n grond te bepaal en slegs grond van dieselfde area met dieselfde geskiedenis en benutting met mekaar te vergelyk. Watter metings ookal gedoen word, behoort die monsters ook op verskeie kere tydens die verloop van die seisoen geneem te word ten einde meer inligting te bekom. Voor en na verandering in bestuurspraktyke (plant, bespuiting, bemesting), sal ook verskillende resultate lewer, maar wat steeds belangrike inligting vir die grondeienaar kan beteken.

Die microBIOMETER® kan 'n groot bydrae lewer tot die monitering van grondgesondheid, aangesien dit een van min toetse vir grondgesondheid tans is wat in die veld uitgevoer kan word en daarom ander aspekte meet as daardie toetse waar grond vervoer moet word en later in 'n laboratorium uitgevoer word. Of dit egter mikrobiële biomassakoolstof akkuraat kan bepaal, is nie in hierdie studie bepaal nie.

Met meer herhalings in dieselfde tipe grond en oor seisoene, mag dit dalk moontlik wees om 'n stel toetse wat die beste in 'n spesifieke tipe grond en spesifieke gewas werk, te identifiseer.

Erkennings

Jako Pieterse van Ecosoil vir gebruik van die microBIOMETER®. Annemarie van der Merwe en haar span wat gehelp het met die veldwerk asook haar bydrae in die keuse van persele en proefleeswerk. Bestuurders van die onderskeie proefplase: Hennie Gerber (Outeniqua), Samuel Laubscher (Langgewens), Christie Rheeder (Nortier).

Befondsing

Wes-Kaapse Departement Landbou

Datums:

Ingedien: 20/10/2023
Aanvaar: 10/06/2024
Gepubliseer: 15/07/2024

Literatuurverwysings

- Adam, G., Duncan, H., 2001, Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils, *Soil Biology and Biochemistry* 33, 943-951. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3).
- Addinsoft, 2022, XLSTAT statistical and data analysis solution. New York USA <https://www.xlstat.com/en> (Version 2021.4.1).
- Anon, 1990, Handbook of standard soil testing methods for advisory purposes, compiled by the non-affiliated soil analysis work committee, Soil Science Society of South Africa, Pretoria, 1990.
- Anon, 2021, Soil health testing. Verkrygbaar by: <https://www.nutrientadvantage.com.au/our-services/lab-services/soil-health-testing>. Toegang verkry op 12 Julie 2023.
- Anon, 2022, Soil Health Suite Biology - Chemistry - Physics. Verkrygbaar by: <https://solvita.com/soillabtest/>. Toegang verkry 30 Mei 2023.
- Anon, 2023a, Agsource soil health testing. Verkrygbaar by: <https://agsource.com/soil-health-testing/>. Toegang verkry 13 Julie 2023.
- Anon, 2023b, Wes-Kaapse Departement van Landbou. Verkrygbaar by: <https://www.elsenburg.com/research-farms/>. Toegang verkry 30 Mei 2023.
- Anon, 2023c, Prolific Earth Sciences, Montgomery, New York. Verkrygbaar by: <https://microbiometer.com/>. Toegang verkry 25 April 2023.
- Anon, 2024, Soil health support centre. Verkrygbaar by: <https://www.soilhealthlab.co.za/index.php/tests-offered/>. Toegang verkry 25 April 2024.
- Basak, N., Mandal, B., Biswas, S., et al., 2022, Impact of long term nutrient management on soil quality indices in rice-wheat system of Lower Indo-Gangetic Plain, *Sustainability* 14(11), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su14116533>.
- Breker, J., geen datum, Active carbon - what does it measure? Verkrygbaar by: <https://www.agvise.com/active-carbon-poxc-what-does-it-measure/>. Toegang verkry 10 Julie 2023.
- Booyens, J., Swanepoel, A., Cupido, C., et al., 2009 (ongepubliseer), Reasearch plan for Nortier research farm. Department of Agriculture, Western Cape.
- Briones, A.M. Jr., Reichardt, W., 1999, Estimating microbial population counts by 'most probable number' using Microsoft Excel®, *Journal of Microbiological Methods* 35, 157-161. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(98\)00111-0](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(98)00111-0).
- Chen, J., Sharifi, R., Khan, M.S.S., et al., 2021, Wheat microbiome: structure, dynamics, and role in improving performance under stress environments, *Frontiers in Microbiology* 12, 821546. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.821546>.
- Chitra, J., 2017, Soil Protozoa, a microbial indicator of soil health: a review, *Advances Biotechnology and Microbiology* 6, 555700. <https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.06.555700>.
- Cui, H., Wang, C., Gu, Z., et al., 2014, Evaluation of soil storage methods for soil microbial community using genetic and metabolic fingerprintings, *European Journal of Soil Biology* 63, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2014.05.006>.
- Damodaran, T., Bagyaraj, D., Revanna, A., 2016, Effect of chemical fertilizers on the beneficial soil microorganisms. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20802.79044>.
- Domeignoz-Horta, L.A., Shinfuku, M., Junier, P., et al., 2021, Direct evidence for the role of microbial community composition in the formation of soil organic matter composition and persistence, *ISME Communications* 1. <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00071-7>.
- Emmert, E.A.B., Gelata, S.B., Rose, C.M., et al., 2021, Effect of land use changes on soil enzymatic activity and soil microbial community composition on Maryland's eastern shore, *Applied Soil Ecology* 161, 10384. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103824>.
- Erasmus, B., van Zyl, J., 2000, The effects of climate change on the farm sector in the Western Cape, *Agrekon* 39, 559-573. <https://doi.org/10.1080/03031853.2000.9523673>.
- Fierer, N., Wood, S.A., Bueno de Mesquita, C.P., 2021, How microbes can, and cannot, be used to assess soil health, *Soil Biology and Biochemistry* 153. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111>.
- Foissner, W., 1999, Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative examples, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74, 95-112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50009-1>.
- Gordon, E.B., 2021, Evaluation of the microBIOMETER® mobile soil test as an indicator of microbial biomass and soil health. Degree of Master of Professional Studies in Agriculture and Life Sciences, Field of International Agriculture and Rural Development, Cornell University.
- Grondklassifikasiewerkgroep, 1991. Grondklassifikasie: 'n Taksonomiese sisteem vir Suid-Afrika. Memoires Natuurlike Landbouhulpbronne in Suid-Afrika Nr. 15, Departement van Landbou-ontwikkeling, Navorsingsinstituut vir grond en besproeiing, Pretoria.
- Guo, M., 2021, Soil Health Assessment and Management: Recent Development in Science and Practices, *Soil Systems* 5(4), 61. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5040061>.
- Hoorman, J.J., Islam, R., 2010, Understanding soil microbes and nutrient recycling. Verkrygbaar by: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-16>. Toegang verkry 30 Mei 2023.

- Hoyle, F.C., Baldock, J.A., Murphy, D.V., 2011, Soil organic carbon - Role in rainfed farming systems. In: Tow, P., Cooper, I., Partridge, I., Birch, C. (Uitg.). *Rainfed Farming Systems*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9132-2_14.
- Hoyle, F., Murphy, D., Sheppard, J., 2023, Factsheet: microbial biomass. Verkrygbaar by: <https://www.soilquality.org.au/factsheets/microbial-biomass>. Toegang verkry 13 Julie 2023.
- Hurisso, T.T., Culman, S.W., Horwath, W.R., et al., 2016, Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization, *Soil Science Society of America Journal* 80(5). <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.04.0106>.
- Johns, C., 2017, Living soils: the role of microorganisms in soil health. Independent strategic analysis of Australia's global interests. Future Directions International, Australia. Verkrygbaar by: <https://apo.org.au/node/96931>.
- Kibblewhite, M.G., Ritz, K., Swift, M.J., 2008, Soil health in agricultural systems, *Philosophical Transactions of the Royal Society Britain* 363, 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>.
- Lane, J., Delavaux, C., Koppen, L., et al., 2022, Soil sample storage conditions impact extracellular enzyme activity and bacterial amplicon diversity metrics in a semi-arid ecosystem, *Soil Biology and Biochemistry* 175. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108858>.
- Li, Z., Zeng, Z., Song, Z., et al., 2021, Vital roles of soil microbes in driving terrestrial nitrogen immobilization, *Global Change Biology* 27(9), 1848-1858. <https://doi.org/10.1111/gcb.15552>.
- Luu, H.T.T., 2019, Biodiversity of ciliated protozoa in soil ecosystems and assessment of their potential as bio-indicators of soil quality. PhD thesis, Bournemouth University, United Kingdom.
- Marais, A., Kotzé, E., Labuschagne, J., et al., 2020, Proposed adaptation of the KMnO₄ oxidation method for determining active carbon for South African soils, *South African Journal of Science* 116, 6443. <https://doi.org/10.17159/sajs.2020/6443>.
- Mbanjwa, V.E., Hughes, J.C., Muchaonyerwa, P., 2022, Organic carbon and aggregate stability of three contrasting soils as affected by arable agriculture and improved pasture in northern KwaZulu-Natal, South Africa, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22, 2378-2391. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00815-x>.
- Moebius-Clune, B.N., Moebius-Clune, D.J., et al., 2017, Comprehensive assessment of soil health - the Cornell Framework Manual, Part II: Soil health assessment (version 2.3), 3rd ed, Cornell University Soil and Crop Sciences section, Emerson Hall, Ithaca, New York. Verkrygbaar by: <https://www.css.cornell.edu/extension/soil-health/manual.pdf>. Toegang verkry op 13 Julie 2023.
- Mustafa, A., Minggang, X., Atizaz, S., et al., 2020, Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China, *Journal of Environmental Management* 270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110894>.
- Ning, Q., Hättenschwiler, S., Lü, X., et al., 2021, Carbon limitation overrides acidification in mediating soil microbial activity to nitrogen enrichment in a temperate grassland, *Global Change Biology* 27(22), 5976-5988. <https://doi.org/10.1111/gcb.15819>.
- Patle, P., Navnag, N.P., Barange, P.K., 2018, Fluorescein diacetate (FDA): measure of total microbial activity and as indicator of soil quality, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7, 2103-2107. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.706.249>.
- Ramesh, T., Bolan, N.S., Kirkham, M.B., et al., 2019, Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review, *Advances in Agronomy, Academic Press* 156, 1-107. <https://doi.org/10.1016/b.s.agron.2019.02.001>.
- Reinecke, A.J., Reinecke, S.A., 2018, Bedreig antropogeniese omgewingsveranderinge grondbiodiversiteit? *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie* 37(1).
- Royal Eijkelpark, geen datum. Wet sieving apparatus manual. Verkrygbaar by: <https://www.royaleijkelpark.com/products/lab-testing-equipment/soil-physical-research/aggregate-stability/wet-sieving-apparatus/>. Toegang verkry op 30 Mei 2023.
- Rønn, R., Ekklund, F., Christensen, S., 1995, Optimizing soil extract and broth media for MPM-enumeration of naked amoeba and heterotrophic flagellates in soil, *Pedobiologia* 39, 10-19. [https://doi.org/10.1016/S0031-4056\(24\)00159-8](https://doi.org/10.1016/S0031-4056(24)00159-8).
- Sain, D.T., 2022, Evaluation of microBIOMETER as a tool to estimate soil health in a west Tennessee cotton crop. Meestersgraad Tesis, Universiteit van Tennessee. Verkrygbaar by: https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/6426.
- Schlöter, M., Munch, J.C., Tittarelli, F., 2006, Managing soil quality. In: Bloem J, Hopkins DW, Benedetti A (Uitg.). *Microbial methods for assessing soil quality*. Oxfordshire: CAB International.
- Tecon, R., Or, D., 2017, Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil, *FEMS Microbiology Reviews* 41, 599-623. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux039>.
- USDA, 1991, Soil Quality Test Kit Guide. Verkrygbaar by https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WI/Soil_Quality_Test_Kit_Guide.pdf. Toegang verkry 30 Mei 2023.
- USDA, 2015. USDA Natural Resources Conservation Service Soil Quality Indicators Verkrygbaar by: https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/indicator_sheet_guide_sheet.pdf. Toegang verkry op 11 Julie 2023.
- Vos, M., Wolf, A.B., Jennings, S.J., et al., 2013, Micro-scale determinants of bacterial diversity in soil, *FEMS Microbiology Reviews* 37(6), 936-954. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12023>.
- Wang, F., Liang, X., Ding, F., et al., 2022, The active functional microbes contribute differently to soil nitrification and denitrification potential under long-term fertilizer regimes in North-East China, *Frontiers in Microbiology* 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1021080>.
- Wiese, J.D., Labuschagne, J., Agenbag, G.A., 2016, Soil water and mineral nitrogen content as influenced by crop rotation and tillage practice in the Swartland subregion of the Western Cape, *South African Journal of Plant and Soil* 33(1), 33-42. <https://doi.org/10.1080/02571862.2015.1057772>.
- Wilpiseski, R.L., Aufrecht, J.A., Retterer, S.T., et al., 2019, Soil aggregate microbial communities: towards understanding microbiome interactions at biologically relevant scales, *Applied Environmental Microbiology* 85, e00324-19. <https://doi.org/10.1128/AEM.00324-19>.
- Yang, C., Liu, N., Zhang, Y., 2019, Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration, *Geoderma* 337, 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.002>.