

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Klimaschutz und Klimaanpassung in Südafrika

Dr. Florian Schierhorn

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Diese Studie wurde für die GFA Consulting Group im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) durchgeführt.

Mai 2023

**Korrespondenzadresse:**

Dr. Florian Schierhorn

Leibniz-Institut für Agrarentwicklung in Transformationsökonomien (IAMO)

E-Mail: [schierhorn@iamo.de](mailto:schierhorn@iamo.de)



## Inhalt

<b>Glossar .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>6</b>
1.1    Landwirtschaft in Südafrika.....	6
1.2    Klimaforschung in Südafrika .....	8
1.3    Wie beeinflusst der Klimawandel die Landwirtschaft in Südafrika? .....	9
<b>2 Klimaschutz in Südafrika: Forschungsstand .....</b>	<b>10</b>
2.1    Klimaschutz im Ackerbau .....	10
2.1.1    Klimaschutz durch Conservation Agriculture (CA) .....	11
2.1.2    Klimaschutz durch Direktsaat .....	14
2.1.3    Ertragseffekte durch CA.....	15
2.2    Klimaschutz: Zusammenfassung, Fazit und Empfehlungen für zukünftige Projekte .....	16
<b>3 Klimaanpassung in Südafrika: Forschungsstand .....</b>	<b>18</b>
3.1    Klimaanpassung durch Conservation Agriculture (CA) .....	18
3.2    Treiber und Hemmnisse für die Anpassung an den Klimawandel.....	20
3.2.1    Klimaanpassung der Kleinbauern.....	21
3.2.2    Klimaanpassung des Viehsektors.....	21
3.2.3    Bildung und Beratung zur Klimaanpassung .....	22
3.3    Klimaanpassung: Zusammenfassung, Fazit und Empfehlungen für zukünftige Projekte.....	23
<b>4 Literatur .....</b>	<b>25</b>

## **Glossar**

BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMEL	Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft
CA	Konservierende Bodenbearbeitung (conservation agriculture)
CSA	Climate Smart Agriculture
CSIR	Council for Scientific and Industrial Research
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
GgC	Gigagramm Kohlenstoff
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
SOC	Bodenkohlenstoff (soil organic carbon)
TgC	Teragramm Kohlenstoff
THG	Treibhausgase

# 1 Einleitung

Dürren und Hitzewellen setzen die südafrikanische Landwirtschaft zunehmend unter Druck. Das wirtschaftlich fortschrittlichste Land Afrikas ist dringend auf Strategien zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung in der Landwirtschaft angewiesen. Dabei gibt es vielversprechende Anbaustrategien, die sowohl dem Klimaschutz als auch der Klimaanpassung dienlich sein können. Diese Anbaustrategien werde ich in dieser Studie detailliert vorstellen und mit Blick auf ihre Effektivität, Emissionen zu reduzieren und extreme Klima- und Wetterverhältnisse auszugleichen, einordnen. Ich werde dazu vorrangig aktuelle und methodisch solide wissenschaftliche Studien aus. Doch zunächst werde ich die Agrarstrukturen Südafrikas und die heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen beschreiben. Abschließend formuliere ich, auf der Basis der teils dichten Studienlage, Empfehlungen für effektiveren und langfristigen Klimaschutz und Klimaanpassung in Südafrika.

## 1.1 Landwirtschaft in Südafrika

In der Republik Südafrika spielt die Landwirtschaft eine herausgestellte Rolle. Zwar trägt der Agrarsektor lediglich 2,5% zum BIP bei, und anhaltende Dürreperioden in den letzten Jahren haben den Sektor wirtschaftlich eher weiter schrumpfen lassen. Trotzdem sind mehr als 650.000 Menschen (4,5% aller Werktätigen) hauptberuflich in der Landwirtschaft tätig (formaler Anteil im Sektor). Hinzukommen etwa 1,3 Millionen Kleinbäuerinnen und Kleinbauern sowie eine unbekannte Zahl informell in dem Sektor tätigen Personen. Der Agrarsektor Südafrikas trägt erheblich zur Ernährungssicherheit in der gesamten Region des südlichen Afrikas bei (Tibesigwa et al., 2017).

Die wichtige Rolle des Sektors drückt sich auch in den Landnutzungsstatistiken aus. Aktuell werden etwas mehr als 100 Millionen Hektar, das sind etwa 80% der Gesamtfläche des Landes, landwirtschaftlich genutzt. Ungefähr 84 Millionen Hektar werden als Weideland, knapp 17 Millionen Hektar als Ackerland genutzt. Der geringe Anteil des Ackerbaus ist der geringen bodenklimatischen Eignung weiter Teile des Landes geschuldet. Nur drei Prozent der Ackerflächen wird als sehr fruchtbar eingestuft. Die Ackerkulturen werden überwiegend im Regenfeldbau angebaut, sie sind also ausschließlich von den Niederschlagsmengen und dem Wasserspeichervermögen der Böden abhängig.

Dabei sind die klimatischen Bedingungen in Südafrika eine Herausforderung für die Landwirtschaft. Mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von über 17 °C ist das Klima in weiten Teilen des Landes warm (Strydom & Savage, 2018). Die wärmsten Gebiete sind die Küstenregionen von KwaZulu-Natal, eine Provinz an der Ostküste Südafrikas, die Lowveld-Tiefebene, das Limpopo-Tal, und die zentralen Regionen der Provinz Nordkap im Nordwesten Südafrikas (Thinda et al., 2020). In diesen genannten Regionen liegen die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmen-

gen bei etwa 500 mm oder weniger. Zudem schwanken die Niederschlagsmengen zeitlich während der Wachstumsperiode, wodurch die Ackerkulturen immer wieder unter Trockenstress gesetzt werden. Die Folge sind geringere Erträge (relativ zum Durchschnitt), die für die kommerziellen Betriebe und insbesondere für die landwirtschaftlichen Kleinunternehmen problematisch sind.

Südafrika verfügt über eine duale Agrarstruktur. Einerseits existiert der kommerzielle und großstrukturelle Sektor, andererseits der kleinbäuerlich geprägte und auf Subsistenzwirtschaft ausgerichtete Bereich (Popoola et al., 2020). Der kommerzielle Sektor trägt mit etwa 20.000 kleinen bis mittelgroßen ökonomischen Agrarbetrieben, die im Bereich des Ackerbaus und der Viehproduktion relativ zum landesweiten Durchschnitt hohe Erträge erzielen, erheblich zur Ernährungssicherheit in Südafrika und der gesamten Region des südlichen Afrikas bei (Tibesigwa et al., 2017). Jedoch hat der Sektor die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen der Transformation seit dem Ende der Apartheid im Jahr 1992 noch nicht vollständig hinter sich gelassen. Die Umgestaltung des politischen Systems zog eine weitgehende Deregulierung der Landwirtschaft nach sich. Die kommerziellen Agrarbetriebe mussten sich auf freie und globalisierte Marktbedingungen anpassen und dieser Strukturwandel ist, ähnlich wie in anderen Transformationsländern, bis heute nicht vollständig abgeschlossen (Talanow et al., 2021). Vor diesem Hintergrund wird diskutiert, dass südafrikanische kommerzielle Landwirte erheblichen technischen und organisatorischen Nachholbedarf – insbesondere in den Bereichen Aus- und Weiterbildung – haben, der wiederum ihre Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel behindert (Findlater et al., 2019).

Tatsächlich sind die kommerziellen Betriebe wohl deutlich besser auf die klimatischen Herausforderungen eingestellt als die landwirtschaftlichen Kleinunternehmen. Die meisten der etwa zwei Millionen subsistenzorientierten Kleinunternehmen bauen ihre Feldfrüchte im Regenfeldbau an und haben mit immer länger anhaltenden Dürren zu kämpfen. In den Dürrejahren von 2014 bis 2016 meldeten sieben von neun Provinzen massive wetterbedingte Ertragseinbrüche. Der überwiegende Teil der Kleinbetriebe ist jedoch in der Viehwirtschaft tätig, ein Sektor, auf den über 40% des Gesamtwerts der landwirtschaftlichen Produktion entfallen und der etwa 80% der verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche beansprucht. Obwohl die Viehzucht nur einen geringen Anteil zum BIP des Landes beiträgt, bildet sie oft die Haupteinkommensquelle für kleinbäuerliche Betriebe in ländlichen Gebieten (Molieleng et al., 2021). Die subsistenzorientierte Viehwirtschaft wird häufig durch degradierte Weideflächen sowie fehlendem Zugang zu Kapital und Land beeinträchtigt. Zudem ist der Bildungsstand unzureichend und nur selten erhalten die Kleinbäuerinnen und Kleinbauern (sowohl in der Viehzucht, als auch im Ackerbau) zielführende Beratung, um sich an die dynamisch verändernden klimatischen Bedingungen anpassen zu können.

## 1.2 Klimaforschung in Südafrika

Zukünftige Aktivitäten im Bereich Klimaschutz und Klimaanpassung sollten die bestehenden Forschungskapazitäten in Südafrika nutzen. Daher gebe hier ich einen knappen Überblick über die südafrikanische Klimaforschung.

Das Land ist im Bereich der Klima- und Agrarforschung gut bis exzellent aufgestellt und kann auf thematisch breit gefächerte, teilweise gut ausgestattete und vernetzte Institutionen bauen. Die große Zahl der Publikationen im Bereich der Klima- und Agrarforschung unterstreichen den Zustand des südafrikanischen Forschungssektors. Südafrika verfügt über das wohl fortschrittlichste Forschungs-, Beobachtungs- und Klimamodellierungsprogramm auf dem afrikanischen Kontinent. Dieses Fachwissen verteilt sich auf eine Reihe von Universitäten und außeruniversitäre Institutionen, wobei die wichtigsten Bereiche der Erdsystemwissenschaften, einschließlich Atmosphäre, Ozeane, Landoberfläche, Biogeochemie und Hydrologie, abgedeckt werden. Die Zahl der südafrikanischen Forscher, die an internationalen Forschungsprogrammen und an wissenschaftlichen Gremien wie dem IPCC beteiligt sind, ist hoch, ebenso wie die Anzahl der von südafrikanischen Autoren in internationalen Fachzeitschriften veröffentlichten Artikel.

Die beiden wichtigsten Institutionen, an denen Klimamodelle betrieben und weiterentwickelt werden, sind die Universität Kapstadt und der *Council for Scientific and Industrial Research (CSIR)* (Ziervogel et al., 2014). An der Universität Kapstadt werden in der Climate System Analysis Group und der Abteilung für Ozeanographie globale und regionale Atmosphären-, Ozean- und gekoppelte Modelle erstellt. Hier liegt der Schwerpunkt auf Studien zu Ozean-Atmosphären-Prozessen, saisonalen Vorhersagen und Projektionen des Klimawandels (Ziervogel et al., 2014). Der CSIR, ansässig in Pretoria, setzt den Schwerpunkt auf globale und regionale Modelle, die saisonale Vorhersagen und mittel- bis langfristige Projektionen erstellen. Diese Modelle sind mit den Prozessen auf der Landoberfläche gekoppelt. Die beiden Zentren haben leicht unterschiedliche Schwerpunkte. Die Climate System Analysis Group arbeitet seit vielen Jahren im Bereich der statistischen Herunterskalierung mittels neuronalen Netzen. Es werden dort aber auch regionale Klimamodelle wie das MM5 und das *Weather Research and Forecast model 25* gerechnet. Das CSIR hat sich auf die Verwendung des CCAM-Modells mit variabler Auflösung konzentriert. Dieses Modell ist global aufgesetzt, wird aber auch, mit höherer Auflösung in einigen experimentellen Simulationen bis hinunter auf Kilometerskala, für die Region des südlichen Afrikas betrieben. Der große Vorteil dieser im Land verfügbaren Modellierungsexpertise und -erfahrung besteht darin, dass die statistischen und dynamischen Modellierungswerkzeuge, mit denen die Projektionen des Klimawandels erstellt werden, in erheblichem Umfang evaluiert und weiterentwickelt wurden. Insofern unterscheidet sich Südafrika von fast allen anderen afrikanischen Staaten, in denen die Daten für Klimaprojektionen aus externen Quellen bezogen werden. Südafrika ist zudem ein führendes Land im Bereich der Forschung über die Effekte von *Climate Smart Agriculture (CSA)* und

*Conservation Agriculture* (CA). Wichtige primäre Forschungsergebnisse liefern zwei Versuchsstationen in der westlichen Provinz Westkap.

### **1.3 Wie beeinflusst der Klimawandel die Landwirtschaft in Südafrika?**

Südafrika ist als semiarides und wasserarmes Land besonders anfällig für den Klimawandel und seine Auswirkungen (Talanow et al., 2021). Die jährlichen Durchschnittstemperaturen sind in den letzten fünf Jahrzehnten um mindestens das eineinhalbfache des globalen Durchschnitts (0,65 °C) gestiegen (Ziervogel et al., 2014). Die stärkste Erwärmung wurde im Westen, dem Nordkap sowie in den nordöstlichen Provinzen Limpopo und Mpumalanga beobachtet und erstreckt sich nach Süden bis zu den Küstengebieten von KwaZulu-Natal (Kruger & Nxumalo, 2017). Darüber hinaus wurde ein Anstieg nicht nur bei den jährlichen und saisonalen Durchschnittswerten der Mindest- und Höchsttemperaturen, sondern auch bei den Extremtemperaturen beobachtet. Insbesondere an Hitzetagen ist ein starker Anstieg zu verzeichnen, während die Anzahl kalter Nächten im ganzen Land abnimmt. Studien zu Niederschlag deuten positive Trends in Zentralsüdafrika an. Statistisch negative Trends beschränken sich auf die nordöstlichen Teile von Limpopo und Mpumalanga im Nordosten und die Winterregenregion im Südwesten. Im größten Teil des Landes sind die aufgezeichneten Trends bei den Niederschlägen statistisch nicht signifikant. Es wurde jedoch bewiesen, dass die schweren Dürren in den Jahren von 2015 bis 2018 in der südafrikanischen Provinz Westkap auf den anthropogenen Klimawandel zurückzuführen sind (Otto et al., 2018).

Für die Zukunft werden für Südafrika deutlich wärmere und trockenere Bedingungen prognostiziert. Es wurde berechnet, dass sich der afrikanische Kontinent um drei bis vier Grad (und damit deutlich stärker als im globalen Durchschnitt) erwärmen wird, wenn die internationalen Klimaziele verfehlt werden (Bryan et al., 2013). Folglich werden die Niederschläge in Südafrika in ihrer Jahressumme wahrscheinlich abnehmen. Sehr wahrscheinlich wird – durch höhere Temperaturen und höhere Verdunstung – weniger Wasser in Südafrika zur Verfügung stehen. Allerdings hängt die Höhe der bodennahen Verdunstung auf landwirtschaftlichen Flächen stark von den Anbausystemen ab. Es gilt auch als sehr wahrscheinlich, dass durch höhere Temperaturen und stärkere Verdunstung weniger Wasser zur Verfügung stehen wird und die Niederschläge unregelmäßiger fallen werden. Das Risiko starker Dürren und anderen Extremwetterereignisse wird zukünftig weiter steigen (Nhemachena et al., 2020).

Die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion in Afrika wurden bereits hinlänglich wissenschaftlich dokumentiert. Bereits im Jahr 2013 hat der IPCC berichtet, dass der Klimawandel negative Auswirkungen auf die Lebensgrundlagen der Menschen, die Landwirtschaft, die Süßwasserversorgung und andere natürliche Ressourcen begünstigt. Zahlreiche Dürren haben in den letzten Jahrzehnten zu Ertragseinbußen geführt und damit die Ernährungslage im südlichen Afrika verschlechtert. Erst kürzlich, im Jahr 2019, hat eine Dürre in

Südafrika starke Produktionseinbrüche im Pflanzenbau und der Tierproduktion verursacht, wodurch der Beitrag der Landwirtschaft zur südafrikanischen Wirtschaft um mehr als 13 % gesunken ist (Mashabela et al., 2022).

Der Klimawandel hat somit negative Auswirkungen auf die Agrarproduktion und stellt insbesondere die Millionen kleinbäuerlichen Betriebe, die ihren Lebensunterhalt vorwiegend durch Regenfeldbau bestreiten, vor riesige Herausforderungen. In Südafrika sind ländliche Kleinbäuerinnen und -bauern durch den Klimawandel gefährdet, denn die Ernährungsunsicherheit wird – ohne massive Anpassungsmaßnahmen – vergrößert. Die Produktionssysteme der kleinbäuerlichen Betriebe sind dem zunehmenden Hitze- und Wasserstress weitestgehend schutzlos ausgesetzt. Auch die Produktivität der Viehwirtschaft wird sich voraussichtlich verringern. Es wurde betont, dass die kleinbäuerliche Landwirtschaft eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Ernährungssicherheit auf betrieblicher Ebene spielt (Baiphethi & Jacobs, 2009). Man wies ferner darauf hin, dass Kleinbäuerinnen und Kleinbauern eine wichtige Rolle beim Aufbau einer widerstandsfähigen Existenz (Resilienzaufbau) spielen und die Ernährungssicherheit armer Bauerngemeinschaften erhöhen.

In diesem Report werden die wichtigsten Studien zu Klimaschutz und Klimaanpassung in Südafrika ausgewertet. Teilweise ist die Studienlage ungenügend. In diesen Fällen werden Forschungsartikel aus dem südlichen Afrika in den Review aufgenommen. Ein Schwerpunkt liegt auf Klimaschutz- und -anpassungseffekten, die durch konservierende Anbaumethoden (Conservation agriculture, CA), wie etwa der Direktsaat, erzielt werden. Auf Grundlage der Literatur diskutiere ich Faktoren, die Landwirte vom Einsatz von CA-Methoden abhalten. Ich gebe Empfehlungen, wie staatliche und nichtstaatliche Institutionen Klimaschutz und Klimaanpassung in Südafrika effektiv fördern können. Der Schwerpunkt des Berichts liegt auf Ackerbau, aber ich werte auch Literatur zu Klimaschutz und -anpassung mit Bezug zum südafrikanischen, kleinbäuerlich geprägten Viehsektor aus.

## **2 Klimaschutz in Südafrika: Forschungsstand**

### **2.1 Klimaschutz im Ackerbau**

Der Ackerbau in Südafrika ist ein wichtiger Verursacher von Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig verfügt der Sektor, wie die folgende Literaturlauswertung zeigt, durch die Anwendung von klimaschonenden Produktionsmethoden erhebliches Potential für die Einsparung großer Mengen von Treibhausgasen und kann darüber hinaus weitere wichtige ökologische Funktionen (z.B. Erhalt der Biodiversität) erfüllen. In Südafrika ist in diesem Themenbereich ausgiebig geforscht worden.

## 2.1.1 **Klimaschutz durch Conservation Agriculture (CA)**

Die konservierende Landwirtschaft (CA, *Conservation Agriculture*) ist eine klimagerechte landwirtschaftliche Praxis, die darauf abzielt sowohl die Ökosystemdienstleistungen als auch die Lebensbedingungen der Landwirte zu verbessern (Mulimbi et al., 2023). CA ist ein möglicher Ansatz hinter dem Konzept der klimaintelligenten Landwirtschaft (Climate Smart Agriculture, CSA), die Landwirte einsetzen, um auch unter schwierigen Bedingungen Lebensmittel und Feldfrüchte anzubauen. Die drei übergeordneten Prinzipien von CA sind: 1. Minimale Bodenbearbeitung, 2. Permanente Bodenbedeckung (z.B. via Mulchen), 3. Diversifizierung der Kulturpflanzenarten (Fruchtfolgen). CA gilt als nachhaltiger landwirtschaftlicher Ansatz, der bei der Bewertung des Erfolgs sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt. Wie bei den meisten landwirtschaftlichen Praktiken sind die Vorteile von CA regional unterschiedlich (Giller et al., 2009), wobei einige Vorteile (wie z. B. höhere Erträge) meist erst nach mehreren Vegetationsperioden zum Tragen kommen.

Südafrika gehört auf dem afrikanischen Kontinent und weltweit zu den Ländern, in denen der Einsatz von CA-Ansätzen am weitesten verbreitet ist. Für das Jahr 2020 wurde geschätzt, dass auf 25 % der südafrikanischen Anbaufläche mindestens ein Element der konservierenden Landwirtschaft eingesetzt wird (Kassam et al., 2022). Knapp 30 % der afrikanischen CA-Anbauflächen befanden sich 2015/16 in Südafrika (Kassam et al., 2022). Allerdings haben nur 14 % dieser Landwirte das gesamte Spektrum an CA-Methoden eingesetzt, der Rest hatte nur eine oder zwei Methoden eingeführt (Findlater et al., 2019). CA wird in der Regel in der großflächigen kommerziellen Produktion eingesetzt, während die Akzeptanz und Verbreitung bei den Subsistenzbetrieben in Südafrika begrenzt ist (Mulimbi et al., 2023). CA wurde im Jahr 2020 nur auf 0,84 % der Subsistenzbetriebe in Südafrika angewendet. Die CA-Anbaufläche in Südafrika ist von 2016 bis 2019 um 366 % gestiegen (Kassam et al., 2022).

Wie wurden die Landwirte auf ihrem Weg zur Übernahme von CA in Südafrika institutionell unterstützt? Die ersten kommerziellen Landwirte in Südafrikas, die auf CA-Systeme umgestellt haben, hatten keinerlei staatliche oder nichtstaatliche Unterstützung erhalten (Findlater et al., 2019). Ihr Antrieb zum Wechsel kann vor allem auf die grassierende Bodenerosion sowie auf die sich verschlechternde wirtschaftliche Lage zurückgeführt werden. Ab etwa den 2000er Jahren wuchs die finanzielle und wissenschaftliche Unterstützung für CA-Methoden in Südafrika. Erste regionale Initiativen wie der *KZN No-Till Club* haben durch Workshops und Forschungsprojekte in den Betrieben sowie Veröffentlichungen positive Wirkungen hinsichtlich der Akzeptanz von CA erzielt. Das *Conservation Agriculture Farmer Innovation Programme*, das vom Projekt *The Maize Trust* finanziert und von *Grain SA* umgesetzt wird, wurde 2013 mit dem Ziel ins Leben gerufen, die CA-Forschung unter kommerziellen, semikommerziellen und kleinbäuerlichen Landwirten zu formalisieren und zu koordinieren. Eine Schlüsselinitiative im Sandbodengebiet im nordwestlichen Teil des Free State war das *Sandy Soils Development Committee* (van Antwerpen et al., 2021). Die

wichtigste Agentur für die Umsetzung von CA-FIP-Kleinbauernprojekten in KwaZulu-Natal und Ostkap war die *Mahlathini Development Foundation* (MDF). Verschiedene unabhängige und offizielle Forscher des *Agricultural Research Council* (ARC) und Universitäten waren und sind an anderen CA-Projekten beteiligt. Zu Beginn dieses Zeitraums wurden verschiedene CA-Projekte im Zusammenhang mit *LandCare* bei Kleinbäuerinnen und Kleinbauern durchgeführt, meist von der ARC auf Provinz- und lokaler Ebene, die von der nationalen und der Provinzregierung finanziert wurden (Goddard et al., 2020). Das südafrikanische *LandCare*-Programm und die CA-Politik haben diese Ansätze ebenfalls aufgenommen. Damit hat die südafrikanische Regierung dem CA-Mainstreaming den Weg bereitet (Goddard et al., 2020).

Im Jahr 2021 lag die CA-Anbaurrate in Westkap, einer wichtigen Anbauregion im Südosten Südafrikas, bei schätzungsweise 51 % der jährlichen Anbaufläche und war damit die größte Fläche und der höchste Prozentsatz in Südafrika (Mulimbi et al., 2023). In Westkap wird hauptsächlich der Weizen in Rotation mit Leguminosen angebaut. In einer Umfrage wurde gezeigt, dass etwa die Hälfte der kommerziellen Weizenproduzierenden in dieser Region alle drei CA-Prinzipien anwenden (Mulimbi et al., 2023). Die andere knappe Hälfte der Befragten nutzt mindestens eines der drei CA-Prinzipien. Das bedeutet, dass so gut wie alle kommerziellen Weizenproduzierende in Westkap mindestens ein CA-Prinzip umsetzen. In einer Studie, die in der Provinz KwaZulu (Ostküste) durchgeführt wurde, waren der Einsatz von organischem Dünger, Fruchtfolgen und Anbaudiversifizierung (in dieser Reihenfolge) die beliebtesten Praktiken unter den befragten Landwirtinnen und Landwirten (Abegunde et al., 2020). Da die südafrikanischen Landwirtinnen und Landwirte fast ausschließlich ohne künstliche Bewässerung produzieren, ist die weit verbreitete Anwendung von CA vermutlich eine Antwort auf die schlechte Bodenqualität sowie die geringen und zunehmend unregelmäßigen Niederschläge (van Antwerpen et al., 2021).

Die Literatur zeigt, dass CA im südlichen Afrika das Potenzial hat – im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung – ökologische Vorteile zu bieten (Thierfelder et al., 2017). Zu den wichtigsten Umweltvorteilen gehören eine erhöhte Wasserinfiltration, geringere Bodenerosion und Bodenabfluss, eine verbesserte Bodenstruktur, erhöhte Biodiversität sowie eine verbesserte Boden-, Luft- und Wasserqualität und Kohlenstoffbindung im Boden (Thierfelder et al., 2015). Es wurde etwa für Weizenanbausysteme gezeigt, dass CA geringere negative Umweltwirkungen erzeugt als das konventionelle Vergleichssystem (Mulimbi et al., 2023). Diese Ergebnisse deuten an, dass der CA-Weizenanbau (vor allem durch Direktsaat) geringere Auswirkungen auf die Umwelt zeigt als der konventionelle Weizenanbau.

In Bezug auf den Klimaschutz und auf zukünftige Klimaschutzprojekte in Südafrika sind die Analysen interessant, die den Einfluss von CA auf die Kohlenstoffpools in den Böden untersucht haben. Es gibt zahlreiche Studien, die zu dieser Fragestellung im südlichen Afrika veröffentlicht wurden. Allerdings gehen die Forschungsergebnisse auseinander. In Simbabwe wurden beispielsweise positive Veränderungen des Bodenkohlenstoffs (SOC) im Boden durch CA in den obersten

20 cm Bodentiefe gemessen (Thierfelder & Wall, 2012). Auf Sandböden war der positive SOC-Effekt am stärksten. In einer Studie, die in Sambia durchgeführt wurde, hatten CA-Flächen höhere SOC-Werte als konventionell bewirtschaftete Flächen (Thierfelder et al., 2015). Nach fünf Jahren Anwendung von CA war der SOC bei Direktsaat mit einer Mais-Baumwoll-Fruchtfolge um 46 % höher als bei einer konventionellen Pflugbehandlung des Mais-Monokultur-Systems. Bei der konventionellen Methode nahm der SOC über den Untersuchungszeitraum kontinuierlich ab. Auch in einer in Simbabwe durchgeführten Untersuchung wurde ein höherer SOC-Wert in dem Direktsaat-Brache-System als im konventionellen Bodenbearbeitungssystem nachgewiesen (Nyamadzawo et al., 2008). Hier wurde der erhöhte Anteil an organischem Kohlenstoff im Boden jedoch auch auf den erhöhten Biomasseinput zurückgeführt, der während der Brache-Phase produziert wurde. In einer weiteren Studie in Zentralmosambik wurde Mais über fünf Jahre in Rotation mit Erbsen angebaut und auch hier führte diese Fruchtfolge im Vergleich zu einer konventionellen ohne Zwischenfruchtanbau zu einem Anstieg des SOC (Rusinamhodzi et al., 2012). Der Effekt war positiv mit der Länge des Zwischenfruchtanbaus korreliert. Ähnliche Ergebnisse wurden in Malawi erhoben, wo ein Anstieg des SOC um 76% gemessen wurde, wenn Mais mit Leguminosen als Zwischenfrucht angebaut wurde (Ngwira et al., 2012). Ein Anstieg des SOC wurde auch in Versuchen in Simbabwe in einer Weizen-Baumwoll-Folge (Gwenzi et al., 2009) und in einer Mais-Sojabohnen-Folge (Mujuru et al., 2013) beobachtet.

Der positive Einfluss von CA auf die organische Bodensubstanz ist angesichts des häufig schlechten Zustands der Böden in Südafrika bedeutungsvoll. Etwa 60 % der Böden in Südafrika haben einen geringen Gehalt an organischer Substanz und sind anfällig für Degradation (Gura & Mkeni, 2019). Der Gehalt an organischer Substanz in den Ackerböden, auf denen Getreide in Monokulturen und mit intensiver Bodenbearbeitung angebaut wird und die nur kurz oder nicht brachliegen, nimmt weiter ab. In der Region Ostkap wurde die Bodendegradation ebenfalls als eine der Hauptursachen für die geringe Pflanzenproduktivität identifiziert (Mandiringana et al., 2005). Es wird allgemein angenommen, dass die Degradation durch die Verarmung der organischen Substanz aufgrund konventioneller Bodenbearbeitungsmethoden verursacht wird, die eine Störung des Bodens mit sich bringen.

Ein weiterer positiver Klimaschutzeffekt von CA kann über den geringeren Einsatz von synthetischen Düngemitteln erzielt werden. Das ist wichtig für Südafrika, denn die Ausbringung synthetischer Düngemittel ist, mit einem nationalen Gesamtausstoß von 3,0 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq., die Hauptquelle der THG-Emissionen aus der Produktion von Feldfrüchten in Südafrika (Tongwane et al., 2016). Diese Emissionen haben einen Anteil von 57 % an den gesamten nationalen THG-Emissionen aus dem Feldanbau in Südafrika.

## 2.1.2 **Klimaschutz durch Direktsaat**

Das Direktsaatverfahren ist ein Element der konservierenden Landwirtschaft. Ich widme diesem Bereich jedoch einen eigenen Abschnitt, da sehr viel zu CA in Südafrika geforscht wurde und ich die Ergebnisse in diesem Bericht etwas gesondert präsentieren und einordnen möchte.

Das Direktsaatverfahren (engl.: no-till) ist eine landwirtschaftliche Technik für den Anbau von Feldfrüchten, bei der der Boden nicht oder nur minimal durch Bodenbearbeitung gestört wird. Die Direktsaat wurde häufig als vielversprechende Methode zum Aufbau von organischer Bodensubstanz und damit zur Speicherung von Kohlenstoff im Boden bewertet (siehe z.B. das Review Papier von Stockmann et al. (2013)). In den letzten Jahren haben zahlreiche Veröffentlichungen gezeigt, dass Direktsaat eher keinen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten wird (Murphy, 2020; Powlson et al., 2014). In einer globalen Meta-Studie wurde exemplarisch gezeigt, dass Direktsaat nicht zu einer Erhöhung des SOC führt, wenn die Veränderungen auch bis in tiefere Bodenschichten gemessen werden (Chenu et al., 2019). So ist es möglich, dass durch das Pflügen Kohlenstoff in die unteren (nicht gemessenen) Schichten verlagert wird. Wenn dann Gesamtkohlenstoffmengen tiefgehender Bodensäulen verglichen (Direktsaat versus Pflugeinsatz) werden, könnte der gemessene Unterschied gering ausfallen oder nicht vorhanden sein.

Bis heute ist die Literaturlage etwas unübersichtlich und teils widersprüchlich. Ich werde im Folgenden schwerpunktmäßig die Studien zu Direktsaat besprechen, die im südlichen Teil Afrikas oder ähnlichen Klimazonen durchgeführt wurden.

Eine interessante Analyse zu diesem Thema wurde in einem kleinbäuerlichen Anbausystem in Südafrika durchgeführt. Das Hauptziel der Untersuchung war der Vergleich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und des SOC-Bestands im Boden zwischen verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen. Die erste Schlussfolgerung, die sich aus den Ergebnissen dieser Studie ergab, ist, dass Direktsaat in Kombination mit kontrollierter Beweidung nach der Ernte (und Verwertung der Ernterückstände von Mais) das Potenzial hat, die CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 55 % im Vergleich zum konventionellen System zu reduzieren. Die zweite Schlussfolgerung ist, dass die Kombination aus Direktsaat und kontrollierter Beweidung nach der Ernte zu einer relativ schnellen Speicherung von Kohlenstoff in den Boden der Untersuchungsregion führt. Weltweit wurden mehrheitlich langsamere Sequestrationsraten als in dieser Studie gemessen. In diesem System wurde gleichzeitig der SOC-Gehalt in den Böden und die oberirdische Biomasseproduktion erhöht und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß verringert (Abdalla et al., 2021). Daher könnte die kontrollierte Beweidung nach der Ernte (d. h. eine hohe Besatzdichte für kurze Zeit) in Direktsaatsystemen eine effektive Bodenbewirtschaftungsstrategie sein, um den Klimawandel abzuschwächen. Allerdings müssten die potenziell negativen Auswirkungen der Bodenverdichtung aufgrund der hohen Besatzdichte berücksichtigt werden, was in dieser Studie nicht gemacht wurde.

In einer weiteren Untersuchung wurden – mittels 1.043 Weizenbeobachtungen auf den Versuchstationen in der Region Westkap und einer Ökobilanzierung – die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Umstellung von konventionellem Weizenanbau auf Direktsaat analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Direktsaat rentabler ist und eine geringere Klimawirksamkeit aufweist als der konventionelle Weizenanbau mit Bodenbearbeitung. In der Versuchstation in Langgewens war das Direktsaatverfahren bei der Weizenproduktion 113 % effizienter als bei der konventionellen Bodenbearbeitung. Ferner hat die Einführung von Direktsaat zu einer Verringerung der Umweltschäden im Wert von 269,2 bis 402,5 Mio. R in Westkap geführt, wobei die Studie keine konkreten Informationen liefert, wie diese Kosten berechnet wurden. Allerdings wurde in dieser Studie auch festgestellt, dass der Aufbau von Kohlenstoff im Boden nach der Umstellung zu Direktsaat einen langfristigen Prozess darstellt.

### 2.1.3 Ertragseffekte durch CA

Die meisten Studien stimmen darin überein, dass die Anwendung der Prinzipien der konservierenden Landwirtschaft (CA) keine unmittelbaren Ertragsvorteile mit sich bringt. Ferner vergehen, z.B. beim Mais, im Durchschnitt zwei bis fünf Jahre, bis Ertragsvorteile zum Tragen kommen (Thierfelder et al., 2017). Diese Verzögerung hat vordergründlich biophysikalische Gründe. Die Umstellung auf Direktsaat mit Rückstandsrückhaltung führt zu einer kurzfristigen Stickstoffimmobilisierung, zu einer Erhöhung der Bodenverdichtung, einer geringeren Mobilisierung von Nährstoffen aus der C-Mineralisierung, einem vorübergehend erhöhten Unkrautdruck und einer potenziellen Zunahme einiger Schädlinge und Krankheiten (Gentile et al., 2011). Darüber hinaus müssen Landwirte bei der Umstellung auf CA auch neue Bewirtschaftungstechniken erlernen, wie z. B. neue Bodenvorbereitungs- und Pflanztechniken sowie Strategien für den Umgang mit Rückständen, Unkraut und Pflanzen. Wissen und neue technische Fähigkeiten sind also erforderlich, was die Leistung von CA-Systemen möglicherweise verzögert. Die langsame Ertragsreaktion von CA-Systemen wurde als ein Haupthindernis für ihre sofortige Einführung hervorgehoben (Giller et al., 2009). Es wird davon ausgegangen, dass die kleinbäuerlichen Betriebe im südlichen Afrika, die unter Geld- und Ressourcenmangel und Ernährungsunsicherheit leiden, sofort nach der Übernahme der neuen Technologien auf relativ hohe Erträge angewiesen sind, um überleben zu können (Corbeels et al., 2014). Es wird jedoch argumentiert, dass dort, wo besonders hoher Wassermangel herrscht, die Wahrscheinlichkeit einer Übernahme von CA steigt (Baudron et al., 2015). CA erhöht in der Regel den Humusgehalt und damit die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Der Verzicht auf den Pflug und die ständige Pflanzendecke reduzieren zudem die Wasserverdunstung, sodass größere Wassermengen im Boden bleiben.

Ich komme damit zu den Gründen für die Einführung von CA, was ebenfalls für mögliche Investitionen in CA und Projektideen für die Förderung von CA von Bedeutung ist. Die Einführung von CA in der kommerziellen Produktion in Südafrika wird häufig mit den geringeren Kosten und der reduzierten Bodendegradation in Verbindung gebracht (Mulimbi et al., 2023). Weitere Motive für

die Einführung von CA in Südafrika sind die Abmilderung der Auswirkungen von Klimaschocks (z.B. Extremwetterereignisse, langfristige Klimaveränderungen), ein wachsendes Bewusstsein unter den Erzeugern und größere Bemühungen zur Verbesserung des Ressourcenmanagements (Mulimbi et al., 2023). Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Entscheidung für die Einführung von CA durch kommerzielle Landwirtinnen und -wirte in Südafrika vor dem Hintergrund fehlender Anreize durch staatliche Programme (Findlater et al., 2019) individuell motiviert ist. In der Provinz Westkap wurde die Einführung von Direktsaat auch durch die Verfügbarkeit von Direktsaatmaschinen erleichtert, die in den späten 1990er Jahren möglich wurde (Strauss et al., 2021). Die höheren Kosten für geeignete Pflanzmaschinen und der Mangel an technischem Fachwissen hemmten anfangs die Einführung von CA in der kommerziellen Landwirtschaft Südafrikas (Mulimbi et al., 2023).

## **2.2 Klimaschutz: Zusammenfassung, Fazit und Empfehlungen für zukünftige Projekte**

Südafrika ist im Bereich der Klimamodellierung auf dem afrikanischen Kontinent führend. Erstaunlicherweise ist der Forschungsstand hinsichtlich der Treibhausgasemissionen (und deren Einsparpotenziale) des AFOLU(Agriculture, Forestry and Other Land Use)-Sektors aber noch relativ überschaubar. Das gilt insbesondere für den ländlichen und kleinbäuerlich geprägten Teil des Landes (Molieleng et al., 2021). Hier ist die extensive Viehwirtschaft dominierend, der Forschungsstand über die von diesem Sektor verursachten THG-Emissionen und die entsprechenden Mitigationspotenziale ist jedoch unzureichend. Der kommerziell bewirtschaftete Teil des Landes wurde hingegen intensiver erforscht. In diesem Bereich wurden zahlreiche Artikel in international anerkannten Fachzeitschriften veröffentlicht.

In der Literatur wird angedeutet, dass die THG-Emissionen in der Viehzucht je nach Jahreszeit variieren, wobei die THG-Emissionen in der Trockenzeit höher sind als in der Regenzeit. Die Viehwirtschaft ist auch für Überweidung, Bodendegradation und den Verlust von Waldflächen in Südafrika verantwortlich. Diese Praktiken setzen große Mengen an Treibhausgasen in die Atmosphäre frei. Hier ergeben sich große THG-Einsparungspotenziale. Nationale und internationale Forschungsprojekte, die die Emissionen des kleinbäuerlich geprägten Viehsektors untersuchen und entsprechende Minderungsstrategien (etwa durch Effizienzsteigerungen) entwickeln, sollten aus meiner Sicht gefördert werden.

In meiner Literaturlauswertung wird die große Anzahl und teils hohe Qualität der Studien über die Klimawirksamkeit von CA gezeigt – ein Ansatz, der vor allem von den kommerziell ausgerichteten Landwirten in Südafrika angewendet wird. In Südafrika ist man bezüglich der Verbreitung von CA im globalen Vergleich fortschrittlich. In nahezu allen Analysen wird bestätigt, dass CA zum Aufbau von organischer Substanz in den Böden und damit zur Speicherung von Kohlenstoff führen kann. Allerdings beziehe ich mich auf Untersuchungen, die im südlichen Afrika durchgeführt wurden und nicht direkt in Südafrika. Angesichts der aufgezeigten positiven Umwelteffekte empfehle

ich, den Einsatz von CA umfassender zu fördern. Obwohl die Erzeuger wahrscheinlich keine Zahlungen für die Umweltvorteile erhalten werden, die sie durch die Umstellung von konventioneller auf CA erzielen, könnte die südafrikanische Regierung versuchen, finanzielle Anreize (z. B. Steuererleichterungen, Mikrokredite) und Beratung für die Einführung von CA zu schaffen, um eine nachhaltigere Landwirtschaft zu fördern. Schwerpunktmäßig sollte der kleinbäuerliche Sektor gefördert werden. Dieser steht dem kommerziellen Agrarsektor in der Nutzung von CA weit hinterher, da die Kleinbäuerinnen und -bauern nicht über die finanziellen Voraussetzungen und/oder das hinreichende Wissen über CA verfügen.

Wichtig für den weiteren Ausbau der konservierenden Landwirtschaft ist daher die verbesserte Beratung von Landwirtinnen und Landwirten. In einer Studie, die in KwaZulu-Natal an der Ostküste Südafrikas durchgeführt wurde, hatten die Landwirtinnen und Landwirte häufiger CA-Methoden eingesetzt, wenn sie Beratungsdienste in Anspruch genommen haben (Abegunde et al., 2020). Es ist wahrscheinlich, dass ein häufiger Kontakt mit landwirtschaftlich Beratenden die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass das Bewusstsein für den Klimawandel und CA/CSA-Praktiken, die zur Anpassung an Klimaschwankungen und -schocks eingesetzt werden können, wächst. Es wurde demonstriert, dass bessere Lese- und Schreibfähigkeit die Einführung von Innovationen und CA-/CSA-Praktiken begünstigen (Abegunde & Obi, 2022). Unter Umständen kann jedoch die bessere Schulbildung auch einen negativen Einfluss auf die Einführung von CA/CSA-Praktiken haben (Wekesa et al., 2018). In dieser Studie wird argumentiert, dass sich Landwirtinnen und Landwirte mit einem höheren Bildungsgrad gegen ein CSA-Paket entscheiden würden, wenn es keine Maßnahmen zur Risikominderung böte, die ihre Investitionen gegen die Risiken des Klimawandels schützen könnten.

In der Literatur wird aufgezeigt, dass CA zur Bindung von Kohlenstoff in den Böden des südlichen Afrikas führen kann. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass der Kohlenstoffgehalt des Bodens unter bestimmten Umständen durch CA ansteigt, während er in anderen Fällen abnimmt oder auf gleichem Niveau bleibt. Der Kohlenstoffgehalt der Böden wird durch die komplexen Zusammenhänge zwischen den biophysikalischen Bedingungen (vor allem Boden und Wetter) und den Anbaumethoden (wie CA) gesteuert. Es müsste daher räumlich differenzierter untersucht werden, welche Klimawirkung die CA-Methoden kurz- oder langfristig haben. Forschungsprojekte sollten aus meiner Sicht gefördert werden, um die vielfältigen ökologischen und ökonomischen Effekte von CA zu untersuchen und die CA-Techniken effizienter einzusetzen.

An die Effekte des Direktsaatverfahrens in Südafrika auf die Klimawirksamkeit sollten, laut der Mehrzahl der hier ausgewerteten Studien, erstens nicht zu hohe Erwartungen gesetzt und diese zweitens weiter untersucht werden. Direktsaat führe wahrscheinlich nur dann zum Aufbau organischer Bodensubstanz, wenn es mit einer Mulchauflage (aus Ernteresten oder durch Zwischenfrüchte) kombiniert würde. Generell sei das Direktsaatverfahren eher sinnvoll für trockene und

warme Standorte, also Bedingungen, die häufig in Südafrika vorherrschten. Dort könne Direktsaat neben positiven Klimaschutzeffekten auch die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens erhöhen und sei damit auch eine vielversprechende Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel (siehe folgendes Kapitel). Allerdings wird in der Literatur bestätigt, dass die Klimaschutzeffekte von CA-Methoden wie der Direktsaat schwer zu verallgemeinern seien, denn die Standortbedingungen, vor allem die Boden- und Umweltbedingungen, beeinflussten die Kohlenstoffsequestration substantiell. Dazu käme der starke Einfluss des Bodenmanagements. Es ließe sich ableiten, dass das Direktsaatverfahren in Verbindung mit anderen CA-Methoden (z.B. permanente Bodenbedeckung) ein großes Potential für die Speicherung von Kohlenstoff im Boden sei.

### **3      Klimaanpassung in Südafrika: Forschungsstand**

#### **3.1      Klimaanpassung durch Conservation Agriculture (CA)**

Die Landwirtschaft in Südafrika wird angesichts zunehmender Temperaturen, erhöhtem Wassermangel und längeren und stärkeren Dürrephasen und Hitzewellen vor große Herausforderungen gestellt. Mit Blick auf den internationalen Forschungsstand sind die CA-Methoden im Ackerbau vielversprechend. Die zentrale Frage lautet, ob CA-Ansätze Ertragsvorteile gegenüber dem konventionellen Anbau in Südafrika liefern, wenn die klimatischen Bedingungen außergewöhnlich trocken und heiß sind. Wenn das der Fall ist, kann CA als eine wirksame Anpassungsoption an den Klimawandel in der Region verstanden werden. Auch in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von CA ist der kurz- und mittelfristige Ertragseffekt von CA entscheidend.

Zahlreiche Studien haben sich auf die Untersuchung der Auswirkungen von CA auf die Maiserträge unter den vorherrschenden Bedingungen im südlichen Afrika konzentriert (ein empfehlenswerter Review dazu siehe: (Thierfelder et al., 2015)). In Malawi, Mosambik, Sambia und Simbabwe wiesen mehr als 80 % der untersuchten Fälle höhere Maiserträge als im konventionellen Vergleichssystemen auf (Thierfelder et al., 2015). Diese Untersuchungen zeigten außerdem auf, dass der Ertragsvorteil bei Mais mit der Zeit größer würde, was mittel- bis langfristig für den Einsatz von CA spräche. Eine Meta-Studie berichtete jedoch, dass fünf der ausgewerteten 23 Studien Ertragsrückgänge infolge von CA aufgezeigt hätten (Thierfelder & Wall, 2012). Der Ertragseffekt von CA sei also von den spezifischen Standortbedingungen (wie Boden, Klima, historische Landnutzung) abhängig und daher müsse auch regional-spezifisch analysiert werden, ob CA als effektive und langfristige Anpassungsmethode wirken könne. Zudem sei der Ertragseffekt von den Kulturpflanzen, den Fruchtfolgen und den Anbaubedingungen abhängig.

Entscheidend für die Wirksamkeit von CA sind die klimatischen Bedingungen des Standorts. In einer sehr häufig zitierten Studie wurden Ertragsvorteile beim Mais in CA-Systemen gegenüber

konventionellem Anbau im südlichen Afrika nachgewiesen, wenn unregelmäßige Regenfälle zu längeren Trockenphasen führten (Thierfelder et al., 2015). In einem Jahr mit mehr als 40 Tagen ohne Niederschläge (wie im Jahr 2014/2015) während der kritischen Wachstumsphase (der sogenannten *Anthesis Phase*) waren die Erträge in den verschiedenen Standorten 38 % bis 66 % höher im Vergleich zu den Standorten, die keine CA-Methoden eingesetzt hatten. Waren die Niederschläge gleichmäßiger verteilt, ergab sich ein Ertragsvorteil von lediglich 12-16 %.

Dies lässt den Schluss zu, dass sich die CA-Methoden positiv auf die Bodenstruktur und die Bodenfeuchte auswirken. Daher sind CA-Agrarsysteme vermutlich besser auf stärkere Klimaschwankungen eingestellt. Es ist allgemein anerkannt, dass CA-Methoden die Infiltration in den Boden erhöhen. Gleichzeitig, aufgrund der erhöhten biologischen Aktivität, der komplexeren Porenstruktur und des Oberflächenschutzes durch Ernterückstände in CA-Anbausystemen, wird die Verdunstung verringert. In Maisanbausystemen führt die kombinierte Wirkung von erhöhter Infiltration und verringerter Verdunstung zu einer höheren Bodenfeuchtigkeit. Dadurch können längere Perioden mit großer Hitze und ausbleibenden Niederschlägen überbrückt werden. Zu viel Niederschlag kann jedoch auch zu Ertragsminderungen auf CA-Feldern führen, da sich in Zeiten starker Regenfälle zu viel Wasser ansammelt. CA-Anbausysteme ermöglichen den Landwirtinnen und -wirten im südlichen Afrika früh auszusäen, was sich positiv auf die Getreideerträge auswirkt. Auch in anderen Regionen weltweit wurde gezeigt, dass CA besonders vorteilhaft auf die Erträge wirkt, wenn die klimatischen Bedingungen trocken sind (siehe Klimastudien des IAMO zu anderen Ländern). Zusammenfassend kann CA als eine potenziell wirkungsvolle Anpassungsmaßnahme an die sich dynamisch veränderlichen Klimaverhältnisse in Südafrika eingestuft werden (Thierfelder & Wall, 2010).

Neben CA gibt es weitere Methoden im Ackerbau, die für die Anpassung an den Klimawandel wirksam sein könnten und in Südafrika teilweise bereits eingesetzt werden (Bryan et al., 2009). Es gibt Hinweise, dass einige Agrarbetriebe bereits Techniken nutzen, die das Regenwasser auffangen, speichern und bei Bedarf den Pflanzen zur Verfügung stellen. Zudem werden alternative, dem Klima besser angepasste Kulturpflanzen angebaut (Deressa et al., 2009). Die Süßkartoffel, beispielsweise, ist eine dürre- und hitzetolerante und potenziell ernährungssichernde Kulturpflanze, die in Südafrika angebaut wird. Vereinzelt nutzen Landwirtinnen und -wirte in Südafrika auch Agroforstsysteme und/oder experimentieren mit verschobenen Aussaat- und Erntezeitpunkten, um Hitze- und Dürrephasen auszuweichen. In der südafrikanischen Provinz KwaZulu-Natal wird Gülle auf die Felder aufgebracht, um die Bodenfruchtbarkeit und die Bodenstruktur zu verbessern (Molieleng et al., 2021). Es gibt also eine breite Palette an potenziell wirksamen agronomischen Anpassungsmethoden an die Auswirkungen des Klimawandels.

### **3.2 Treiber und Hemmnisse für die Anpassung an den Klimawandel**

Den Landwirtinnen und -wirten in Südafrika stehen also vielfältige Möglichkeiten zur Verfügung, ihre Systeme besser an die sich veränderlichen Klimabedingungen anzupassen. Einige Landwirtinnen und -wirte in Südafrika setzen bereits Anpassungsmaßnahmen um. Im Folgenden werde ich Studien aus, worin untersucht wurde, warum Landwirtinnen und -wirte in Südafrika Anpassungsmaßnahmen trafen und welche Bedingungen sie davon abhielten. Diese Studien sind wichtig für alle zukünftigen Aktivitäten, mit denen beabsichtigt wird, die südafrikanische Landwirtschaft wirkungsvoll an den Klimawandel anzupassen.

Wichtig ist hier zunächst, dass die Produktionsart das Anpassungsverhalten der Landwirte in Südafrika maßgeblich beeinflusst (Talanow et al., 2021). Landwirtinnen und -wirte, die Getreide anbauen, sind fast ausschließlich im Bereich des Bodenmanagements aktiv, selten in dem der künstlichen Bewässerung. Im Weinbau hingegen nehmen Landwirtinnen und -wirte Klimaanpassungen auf dem Gebiet der künstlichen Bewässerung vor. In einer Studie wurde gezeigt, dass die produzierenden Betriebe im Weinbau in Südafrika den Bewässerungszeitpunkt gemäß der früher einsetzenden Wachstumsperioden der Reben anpassen (Araujo et al., 2016).

Ich komme zu der Frage, was Agrarbetriebe in Südafrika davon abhält, Klimaanpassungen vorzunehmen. In einer früheren Studie berichteten 36 Prozent der Befragten in Südafrika, dass fehlende eigene finanzielle Rücklagen und/oder fehlender Zugang zu Krediten kritische Hindernisse für die Einführung und Anwendung von Anpassungsmaßnahmen waren (Bryan et al., 2009). Weitere genannte wichtige Erschwernisse waren: fehlender Zugang zu Wasser für die Bewässerung (acht Prozent), fehlender Zugang zu Informationen über den Klimawandel und geeignete Anpassungsmaßnahmen (fünf Prozent), fehlender Marktzugang (drei Prozent) und unsichere Eigentumsrechte (ein Prozent). In einer aktuelleren Studie aus dem Jahr 2021, die ebenfalls auf einer Befragung basiert, wurden Klimaanpassungen häufiger umgesetzt, wenn die befragten Landwirtinnen oder Landwirte bereits negative Erfahrungen mit extremen klimatischen Bedingungen in Südafrika gemacht hatten (Talanow et al., 2021). Diese Studie stützt die Theorie, dass Risikoerfahrungen das Risikoverhalten nachhaltig beeinflusst (Clayton et al., 2015). Die Landwirtinnen und Landwirte setzten eine breite Palette von Anpassungsstrategien um, die am häufigsten genannten Strategien zielten aber darauf ab, die Produktivität der Ernte und die Bodenqualität zu erhalten. Die verringerte Klimaanfälligkeit wurde selten explizit genannt und war daher von eher indirektem Nutzen. Beispielsweise erwähnten die befragten Landwirtinnen und -wirte den verstärkten Einsatz von Düngemitteln als Reaktion auf den zunehmenden klimatischen Stress. Allerdings wird in der Fachliteratur diskutiert, ob diese Strategie von einigen Landwirtinnen und Landwirten eher genannt wurde, um den Interviewenden diese Informationen zu liefern, die diese erwarteten (Tessema et al., 2019). Unabhängig davon sind viele der in dieser Studie genannten

Anpassungsmaßnahmen, wie etwa der Düngereinsatz, eher als kurzfristige und indirekte Reaktionen auf zusätzlichen Klimastress einzustufen. Proaktive und langfristige Anpassungsmaßnahmen, wie die Diversifizierung von Kulturen, die Einführung trockenheitstoleranter Sorten oder technologische und infrastrukturelle Verbesserungen, wurden weitaus weniger häufig genannt.

Eine weitere aufschlussreiche Studie hat sowohl die Faktoren für den Einsatz als auch die Intensität der realisierten Anpassungsmaßnahmen untersucht (Thinda et al., 2020). Hier wurden vor allem kleinbäuerliche Strukturen beleuchtet, was erwähnenswert ist, weil der größte Teil der Forschung in diesem Bereich auf die kommerzielle Landwirtschaft in Südafrika ausgerichtet und die Subsistenzlandwirtschaft weniger gut erforscht ist. Verschiedene sozioökonomische Faktoren wie Geschlecht, Alter und Erfahrung im Ackerbau, institutionelle Faktoren wie der Zugang zu Beratungsdiensten und zu Informationen über den Klimawandel beeinflussten signifikant die Anwendung von Anpassungsstrategien an denselben. Das Geschlecht war negativ und statistisch signifikant mit der Annahme von Anpassungsstrategien an den Klimawandel korreliert (Thinda et al., 2020). Das Ergebnis zeigt, dass Haushalte mit einem weiblichen Haushaltsvorstand mit einer höheren Wahrscheinlichkeit Anpassungen an den Klimawandel durchführen als männlich geführte Haushalte. Alter, Bildungsniveau, landwirtschaftliche Erfahrung, innerbetriebliche Ausbildung, außerbetriebliches Einkommen, Zugang zu Informationen und Standort des Betriebes waren die wichtigsten Determinanten hinsichtlich der Intensität der eingesetzten der Anpassungsstrategien.

### **3.2.1      Klimaanpassung der Kleinbäuerinnen und Kleinbauern**

Die Ergebnisse einer Studie zeigen, dass sich der Klimawandel negativ auf die Lebensgrundlage der kleinbäuerlichen Betriebe in Südafrika auswirkt (Ubisi et al., 2017). Die in der Studie erfassten Landwirtinnen und Landwirte haben mit extremen Wetterereignissen wie Dürren und langfristigen Klimaveränderungen wie geringeren Niederschlägen zu kämpfen, was sich häufig negativ auf ihre Ernten auswirkte, da es aufgrund langanhaltender Dürren zu vielen Ernteausfällen kam. Die Kleinbäuerinnen und -bauern bewältigten diese Situation, indem sie einige Bewältigungsstrategien anwandten, wie z. B. weniger Lebensmittel pro Tag zu essen, die Ernährung umzustellen, Geld zu leihen. Einige erhielten Lebensmittelpakete von ihren Verwandten. Angesichts dieser Strategien zur Sicherung des Lebensunterhalts sind die kleinbäuerlichen Betriebe nach wie vor von Armut und Ernährungsunsicherheit bedroht, da ihr Lebensunterhalt von der Regenfeldwirtschaft abhängig ist. Diese Situation zeigt, wie empfindlich insbesondere Kleinbäuerinnen und -bauern auf den Klimawandel und seine Schwankungen reagieren, da die Landwirtschaft ihre Haupteinkommensquelle ist und sie ihren Lebensunterhalt mit der Landwirtschaft bestreiten.

### **3.2.2      Klimaanpassung des Viehsektors**

Der Viehsektor spielt insbesondere im ländlichen Raum Südafrikas eine wichtige Rolle und ist häufig die Haupteinkommensquelle für Millionen von Kleinbäuerinnen und -bauern im Land. Da-

her ist eine gezielte Klimaanpassung innerhalb des Viehsektors von großer Bedeutung. Vielversprechend sind in dieser Hinsicht *Silvopastorale Agroforstsysteme*, welche durch extensive Beweidung unter verstreuten natürlichen Baum- und Strauchbeständen charakterisiert sind. Diese Systeme werden bereits erfolgreich in Südafrika eingesetzt. Durch den Schattenwurf wird die Wasserbilanz der Böden stark verändert, sodass die Flächen auch in der Trockenzeit beweidet werden können.

Ein weiterer Aspekt ist die Wahl der Nutztier rasse, denn diese sind unterschiedlich gut an Klimaextreme angepasst. Einheimische Nutztier rassen (z.B.: Afrikaner, Nguni, Buren-Ziegen, Bonsmara und SA Mutton Merino) haben sich über viele Generationen durchgesetzt und damit an die örtlichen (teils extremen) Klimaverhältnisse angepasst. Diese traditionellen/lokalen Rassen sind häufig weniger produktiv, gelten aber als gut an Hitze- und Dürre angepasst. Zwar sind diese einheimischen Nutztier rassen bereits heute in Südafrika weit verbreitet, aber Aufklärung und Beratung der Kleinbäuerinnen und -bauern ist weiterhin notwendig, um die jeweiligen Rassen auszuwählen, die regional am besten auf die aktuellen und langfristigen Klimaverhältnisse eingestellt sind.

Für eine effiziente Klimaanpassung sollte die Wahl der Rasse Hand in Hand mit dem Management der Weideflächen gehen. Laut einer Studie ist das Weideland Südafrikas über seine langfristige Tragfähigkeit hinaus bestockt (Gbetibouo & Ringler, 2009). Die South African Wildlife Foundation hat außerdem berichtet, dass der Überbesatz in den kommunalen Weidegebieten von Limpopo, KwaZulu-Natal und den östlichen Kap-Provinzen, auf die mehr als die Hälfte der südafrikanischen Rinderproduktion entfällt, am deutlichsten ist. Der hohe Viehbesatz führt zur Verdichtung und Verkrustung des Bodens und zur Verdrängung der Vegetation. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit kann durch einfache Techniken wie der Umzaunung der Weideflächen, die Zugabe von Düngemitteln und der Kultivierung von klimaangepassten und nährreichen Gräsern erreicht werden (Molieleng et al., 2021). Dabei gibt es Hinweise auf positive Entwicklungen im Viehsektor. In Südafrika existieren bereits in einigen Gemeinden Landschaftspflegeprogramme, die darauf abzielen, den nachhaltigen Umgang mit den vorhandenen Agrarflächen zu schulen. Dabei soll die Vegetation und die biologische Vielfalt geschützt und das häufig knappe Wasser besser konserviert werden. In der Nordwestprovinz Südafrikas werden Futtermittelbänke angelegt, um die Weiden zu schonen und die nachhaltige Viehhaltung zu fördern. In einem Artikel in der Zeitschrift *Farmers Weekly*, wird über positive Trends im Bereich des Weidemanagements in Südafrika berichtet. Dieser Trend sollte weiter gefördert werden.

### **3.2.3 Bildung und Beratung zur Klimaanpassung**

Landwirtschaftliche Beratung ist eine wesentliche Voraussetzung für Klimaanpassung im südlichen Afrika (Molieleng et al., 2021). In Südafrika übernimmt der Staat wichtige Beratungsfunktionen, etwa beschäftigt das Ministerium für Landwirtschaft, Landreform und ländliche Entwicklung qualifizierte Mitarbeiter für diese Aufgaben. Sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Einführung von klimaangepassten Praktiken in der kommunalen Viehhaltung. Die Hauptaufgaben der

landwirtschaftlich Beratenden sind die Förderung einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktivität durch Bewusstseinsbildung, Kapazitätsaufbau und die Bereitstellung aktueller Informationen über den Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen.

Allerdings zeigen Studien, dass das Beratungssystem bislang noch ungenügend entwickelt ist (Molieleng et al., 2021). In der südafrikanischen Provinz Ostkap gaben 68 % der Landwirte an, sie hätten nur begrenzten oder gar keinen Zugang zu landwirtschaftlichen Beratungsdiensten. Dies scheint die Norm zu sein, da die Begünstigten des Nguni-Rinderprojekts in der Gemeinde Raymond Mhlaba ebenfalls angaben, dass die Landwirtinnen und -wirte nicht von Beratungsdiensten profitieren konnten. Es wurde gezeigt, dass fehlende und/oder inhaltlich unzureichende Beratung mit einer geringen Anpassungsquote korreliert. Einer der Gründe für die mangelnden Dienstleistungen von landwirtschaftlich Beratenden ist, dass sie möglicherweise nicht für die aktuellen Herausforderungen des Klimawandels ausgebildet sind. Zudem ist die Qualität der Beratungsdienste, die von der Regierung bereitgestellt werden, um den kommunalen Landwirtinnen und Landwirten zu helfen, häufig unzureichend. Es wurde gezeigt, dass acht von zehn landwirtschaftlich Beratenden im öffentlichen Dienst in Südafrika nicht ausreichend qualifiziert sind, um ihre Aufgaben zu erfüllen (Molieleng et al., 2021). Auf der Basis der ausgewerteten Literatur empfehle ich, dass die Beratungsdienste in Südafrika ausgebaut werden, um die kommunalen Viehzüchter in Südafrika besser hinsichtlich klimaangepasster CSA-Praktiken aufzuklären.

### **3.3      Klimaanpassung: Zusammenfassung, Fazit             und Empfehlungen für zukünftige Projekte**

Basierend auf der ausgewerteten Literatur gebe ich im Folgenden einige Empfehlungen, wie Klimaanpassungen in der südafrikanischen Landwirtschaft weiter ausgebaut werden können. Hier wende ich mich schwerpunktmäßig an nationale und internationale Geberorganisationen und die Regierung.

Wie die Literatur übereinstimmend zeigt, ist fehlende Beratung und/oder fehlerhafte Beratung eine wichtige Ursache für das geringe Anpassungsniveau in Südafrika. Die Regierung sollte daher intensiv in ihr bestehendes Beratungssystem investieren. Dafür muss die Interaktion zwischen den Beraterinnen und Beratern sowie den kleinbäuerlichen Betrieben verstärkt werden. Die Beraterinnen und Berater müssen inhaltlich geschult werden, um wissenschaftlich fundierte und praxisnahe Strategien zur effizienten Anpassung vermitteln zu können.

Die Literaturlauswertung ergibt weiter, dass die Ausbildung im Agrarsektor, insbesondere der Kleinbäuerinnen und -bauern, der Schlüssel zur Realisierung von Klimaanpassung in Südafrika ist. Nationale und internationale Projekte sollten darauf ausgerichtet sein, die Ausbildung im Bereich der Subsistenzwirtschaft zu fördern, Demonstrationstrainings in den Betrieben anzubieten und Informationen über Anpassungsstrategien an den Klimawandel zu verbreiten. Diese Einschätzung wird auch in der Fachliteratur vertreten (Thinda et al., 2020). Wesentlich ist aus meiner

Sicht, dass die Regierung mit allen aktiven Interessengruppen und Geberorganisationen kooperiert. Umfassende Programme zur Beratung und Ausbildung von Landwirtinnen und -wirten sollten so geplant werden, dass die Kleinbäuerinnen und -bauern nicht nur in verbesserten landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmethoden unterrichtet werden, sondern auch lernen, ihre Anpassungsfähigkeit an die komplexen Auswirkungen des Klimawandels zu stärken.

Die Literatur zeigt, dass der Zugang zu Medien entscheidend dafür ist, wie gut sich die landwirtschaftlichen Betriebe in Südafrika an die sich dynamisch veränderlichen Klimaverhältnisse anpassen. Radio, Fernsehen, lokale Zeitungen und – immer wichtiger – das Internet und Mobiltelefone sind wichtige Übermittler von Informationen über Extremwetterereignisse, Klimaveränderungen und Anpassungsmaßnahmen. Die Regierung sollte den Zugang für die Agrarbetriebe, insbesondere im ländlichen und abgeschiedenen Raum, zu diesen Medien verbessern.

Insbesondere im kleinbäuerlich geprägten Viehsektor besteht Handlungsbedarf. Die Viehbauern müssen besser beraten und auch finanziell und technisch besser ausgestattet werden, um ihre Weide- und Fütterungssysteme stärker an die steigenden Herausforderungen anpassen zu können. Die südafrikanische Regierung, das Ministerium für Landwirtschaft und ländliche Entwicklung und der private Sektor müssten aktiv den aktuellen Bedarf der Landwirte für eine effektivere Klimaanpassung bewerten und den Landwirten, je nach Bedarf und Standort, spezifische CSA-Weidemanagement- und Fütterungshilfen zur Verfügung stellen.

## 4 Literatur

- Abdalla, K., Mutema, M., Chivenge, P., & Chaplot, V. (2021). Controlled grazing of maize residues increased carbon sequestration in no-tillage system: A case of a smallholder farm in South Africa. *Agronomy*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy11071421>
- Abegunde, V. O., & Obi, A. (2022). The Role and Perspective of Climate Smart Agriculture in Africa: A Scientific Review. *Sustainability (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/su14042317>
- Abegunde, V. O., Sibanda, M., & Obi, A. (2020). Determinants of the adoption of climate-smart agricultural practices by small-scale farming households in King Cetshwayo district municipality, South Africa. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/SU12010195>
- Araujo, J. A., Abiodun, B. J., & Crespo, O. (2016). Impacts of drought on grape yields in Western Cape, South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1), 117–130. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1336-3>
- Baiphethi, M. N., & Jacobs, P. T. (2009). The contribution of subsistence farming to food security in South Africa. *Agrekon*, 48(4), 459–482. <https://doi.org/10.1080/03031853.2009.9523836>
- Baudron, F., Thierfelder, C., Nyagumbo, I., & Gérard, B. (2015). Where to Target Conservation Agriculture for African Smallholders? How to Overcome Challenges Associated with its Implementation? Experience from Eastern and Southern Africa. *Environments*, 2(3), 338–357. <https://doi.org/10.3390/environments2030338>
- Bryan, E., Deressa, T. T., Gbetibouo, G. A., & Ringler, C. (2009). Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: options and constraints. *Environmental Science and Policy*, 12(4), 413–426. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.11.002>
- Bryan, E., Ringler, C., Okoba, B., Roncoli, C., Silvestri, S., & Herrero, M. (2013). Adapting agriculture to climate change in Kenya: Household strategies and determinants. *Journal of Environmental Management*, 114, 26–35. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2012.10.036>
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., & Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Clayton, S., Devine-Wright, P., Stern, P. C., Whitmarsh, L., Carrico, A., Steg, L., Swim, J., & Bonnes, M. (2015). Psychological research and global climate change. *Nature Climate Change*, 5(7), 640–646. <https://doi.org/10.1038/nclimate2622>
- Corbeels, M., de Graaff, J., Ndah, T. H., Penot, E., Baudron, F., Naudin, K., Andrieu, N., Chirat, G., Schuler, J., Nyagumbo, I., Rusinamhodzi, L., Traore, K., Mzoba, H. D., & Adolwa, I. S. (2014).

Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 155–170.

<https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2013.10.011>

Deressa, T. T., Hassan, R. M., Ringler, C., Alemu, T., & Yesuf, M. (2009). Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global Environmental Change*, 19(2), 248–255. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2009.01.002>

Findlater, K. M., Kandlikar, M., & Satterfield, T. (2019). Misunderstanding conservation agriculture: Challenges in promoting, monitoring and evaluating sustainable farming. *Environmental Science & Policy*, 100, 47–54. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2019.05.027>

Gbetibouo, G. A., & Ringler, C. (2009). Mapping South African Farming Sector Vulnerability to Climate Change and Variability A Subnational Assessment. [www.ifpri.org/pubs/other-pubs.htm#dp](http://www.ifpri.org/pubs/other-pubs.htm#dp).

Gentile, R., Vanlauwe, B., Chivenge, P., & Six, J. (2011). Trade-offs between the short- and long-term effects of residue quality on soil C and N dynamics. *Plant and Soil*, 338(1), 159–169.

<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0360-z>

Giller, K. E., Witter, E., Corbeels, M., & Tittonell, P. (2009). Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1), 23–34.

<https://doi.org/10.1016/J.FCR.2009.06.017>

Goddard, T., Basch, G., Derpsch, R., Hongwen, L., Jin, H., & Karabayev, M. (2020). Institutional and policy support for conservation agriculture uptake. In A. Kassam (Ed.), *Advances in conservation agriculture* (Vol. 1). Burleigh Dodds Science Publishing.

Gura, I., & Mnkeni, P. N. S. (2019). Crop rotation and residue management effects under no till on the soil quality of a Haplic Cambisol in Alice, Eastern Cape, South Africa. *Geoderma*, 337, 927–934. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.042>

Gwenzi, W., Gotosa, J., Chakanetsa, S., & Mutema, Z. (2009). Effects of tillage systems on soil organic carbon dynamics, structural stability and crop yields in irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.)–cotton (*Gossypium hirsutum* L.) rotation in semi-arid Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 83(3), 211–221. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9211-1>

Kassam, A., Friedrich, T., & Derpsch, R. (2022). Successful Experiences and Lessons from Conservation Agriculture Worldwide. *Agronomy*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy12040769>

Kruger, A. C., & Nxumalo, M. (2017). Surface temperature trends from homogenized time series in South Africa: 1931–2015. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2364–2377.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.4851>

- Mandiringana, O. T., Mnkeni, P. N. S., Mkile, Z., van Averbek, W., Van Ranst, E., & Verplancke, H. (2005). Mineralogy and Fertility Status of Selected Soils of the Eastern Cape Province, South Africa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(17–18), 2431–2446.  
<https://doi.org/10.1080/00103620500253514>
- Mashabela, K., Dube, T., Mollel, M. H. N., Letsoalo, J. M., & Radingoana, M. P. (2022). Assessing accessibility and availability of portable water supply in selected communities of Lepelle-Nkumpi local municipality, Limpopo province of South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103181>
- Molieleng, L., Fourie, P., & Nwafor, I. (2021). Adoption of climate smart agriculture by communal livestock farmers in South Africa. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 18). MDPI.  
<https://doi.org/10.3390/su131810468>
- Mujuru, L., Mureva, A., Velthorst, E. J., & Hoosbeek, M. R. (2013). Land use and management effects on soil organic matter fractions in Rhodic Ferralsols and Haplic Arenosols in Bindura and Shamva districts of Zimbabwe. *Geoderma*, 209–210, 262–272.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.025>
- Mulimbi, W., Nalley, L. L., Strauss, J., & Ala-Kokko, K. (2023). Economic and environmental comparison of conventional and conservation agriculture in South African wheat production. *Agrekon*.  
<https://doi.org/10.1080/03031853.2023.2169481>
- Murphy, B. (2020). Soil Carbon Sequestration as an Elusive Climate Mitigation Tool. *No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture*, 337–353. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7_20)
- Ngwira, A. R., Aune, J. B., & Mkwinda, S. (2012). On-farm evaluation of yield and economic benefit of short term maize legume intercropping systems under conservation agriculture in Malawi. *Field Crops Research*, 132, 149–157. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2011.12.014>
- Nhemachena, C., Nhamo, L., Matchaya, G., Nhemachena, C. R., Muchara, B., Karuaihe, S. T., & Mpandeli, S. (2020). Climate Change Impacts on Water and Agriculture Sectors in Southern Africa: Threats and Opportunities for Sustainable Development. *Water*, 12(10).  
<https://doi.org/10.3390/w12102673>
- Nyamadzawo, G., Chikowo, R., Nyamugafata, P., Nyamangara, J., & Giller, K. E. (2008). Soil organic carbon dynamics of improved fallow-maize rotation systems under conventional and no-tillage in Central Zimbabwe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(1), 85–93.  
<https://doi.org/10.1007/s10705-007-9154-y>
- Otto, F. E. L., Wolski, P., Lehner, F., Tebaldi, C., van Oldenborgh, G. J., Hogesteege, S., Singh, R., Holden, P., Fučkar, N. S., Odoulami, R. C., & New, M. (2018). Anthropogenic influence on the drivers of the Western Cape drought 2015–2017. *Environmental Research Letters*, 13(12), 124010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae9f9>

- Popoola, O. O., Yusuf, S. F. G., & Monde, N. (2020). Information sources and constraints to climate change adaptation amongst smallholder farmers in Amathole District Municipality, Eastern Cape Province, South Africa. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14).  
<https://doi.org/10.3390/su12145846>
- Powelson, D. S., Stirling, C. M., Jat, M. L., Gerard, B. G., Palm, C. A., Sanchez, P. A., & Cassman, K. G. (2014). Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change* 2014 4:8, 4(8), 678–683. <https://doi.org/10.1038/nclimate2292>
- Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangara, J., & Giller, K. E. (2012). Maize–grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Research*, 136, 12–22.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.014>
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D. A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P. C., Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80–99. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2012.10.001>
- Strauss, J. A., Swanepoel, P. A., Smith, H., & Smit, E. H. (2021). A history of Conservation Agriculture in South Africa. *South African Journal of Plant and Soil*, 38(3), 196–201.  
<https://doi.org/10.1080/02571862.2021.1979112>
- Strydom, S., & Savage, M. J. (2018). Observed variability and trends in the microclimate of the midlands of KwaZulu-Natal and its influence on fire danger. *International Journal of Climatology*, 38(2), 751–760. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.5207>
- Talanow, K., Topp, E. N., Loos, J., & Martín-López, B. (2021). Farmers' perceptions of climate change and adaptation strategies in South Africa's Western Cape. *Journal of Rural Studies*, 81, 203–219. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.026>
- Tessema, Y. A., Joerin, J., & Patt, A. (2019). Climate change as a motivating factor for farm-adjustments: Rethinking the link. *Climate Risk Management*, 23, 136–145.  
<https://doi.org/10.1016/J.CRM.2018.09.003>
- Thierfelder, C., Chivenge, P., Mupangwa, W., Rosenstock, T. S., Lamanna, C., & Eyre, J. X. (2017). How climate-smart is conservation agriculture (CA)? – its potential to deliver on adaptation, mitigation and productivity on smallholder farms in southern Africa. In *Food Security (Vol. 9, Issue 3, pp. 537–560)*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0665-3>

Thierfelder, C., Rusinamhodzi, L., Ngwira, A. R., Mupangwa, W., Nyagumbo, I., Kassie, G. T., & Cairns, J. E. (2015). Conservation agriculture in Southern Africa: Advances in knowledge. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(4), 328–348. <https://doi.org/DOI:10.1017/S1742170513000550>

Thierfelder, C., & Wall, P. C. (2010). Investigating Conservation Agriculture (CA) Systems in Zambia and Zimbabwe to Mitigate Future Effects of Climate Change. *Journal of Crop Improvement*, 24(2), 113–121. <https://doi.org/10.1080/15427520903558484>

Thierfelder, C., & Wall, P. C. (2012). Effects of conservation agriculture on soil quality and productivity in contrasting agro-ecological environments of Zimbabwe. *Soil Use and Management*, 28(2), 209–220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00406.x>

Thinda, K. T., Ogundeji, A. A., Belle, J. A., & Ojo, T. O. (2020). Understanding the adoption of climate change adaptation strategies among smallholder farmers: Evidence from land reform beneficiaries in South Africa. *Land Use Policy*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104858>

Tibesigwa, B., Visser, M., & Turpie, J. (2017). Climate change and South Africa's commercial farms: an assessment of impacts on specialised horticulture, crop, livestock and mixed farming systems. *Environment, Development and Sustainability*, 19(2), 607–636. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9755-6>

Tongwane, M., Mdlambuzi, T., Moeletsi, M., Tsubo, M., Mliswa, V., & Grootboom, L. (2016). Greenhouse gas emissions from different crop production and management practices in South Africa. *Environmental Development*, 19, 23–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envdev.2016.06.004>

Ubisi, N. R., Mafongoya, P. L., Kolanisi, U., & Jiri, O. (2017). Smallholder farmer's perceived effects of climate change on crop production and household livelihoods in rural Limpopo province, South Africa. *Change and Adaptation in Socio-Ecological Systems*, 3(1). <https://doi.org/10.1515/cass-2017-0003>

van Antwerpen, R., Laker, M. C., Beukes, D. J., Botha, J. J., Collett, A., & du Plessis, M. (2021). Conservation Agriculture farming systems in rainfed annual crop production in South Africa. *South African Journal of Plant and Soil*, 38(3), 202–216. <https://doi.org/10.1080/02571862.2020.1797195>

Wekesa, B. M., Ayuya, O. I., & Lagat, J. K. (2018). Effect of climate-smart agricultural practices on household food security in smallholder production systems: micro-level evidence from Kenya. *Agriculture & Food Security*, 7(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0230-0>

Ziervogel, G., New, M., Archer van Garderen, E., Midgley, G., Taylor, A., Hamann, R., Stuart-Hill, S., Myers, J., & Warburton, M. (2014). Climate change impacts and adaptation in South Africa. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(5), 605–620. <https://doi.org/10.1002/wcc.295>