# Schlussbericht

**BMBFT-Verbundvorhaben**

SOUTHERN AFRICAN SCIENCE SERVICE CENTRE FOR CLIMATE CHANGE AND ADAPTIVE LAND MANAGEMENT (SASSCAL 2.0)

**PROJEKT TITEL**

**SASSCAL 2.0 – Joint Project: „Verbesserung der Ernährungssicherheit durch die Integration klimaresistenter Pflanzenkulturen in maisbasierten Anbausystemen bei Kleinbauern in Sambia und Namibia (FoSReCs) – Teilprojekt 1: Verbesserung der Wassersicherheit“**

**Förderkennzeichen:** 01LG2025A
**Laufzeit:** 01.01.2023 – 31.03.2026

**Zuwendungsempfänger:** Freie Universität Berlin, Malteserstr 74–100, 12249 Berlin
**Projektleiter:** Prof. Dr. Christoph Merz
**Autoren:** Dr. Majid Taie Semiromi, Dr. Brindha Karthikeyan

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
FONA
Forschung für Nachhaltigkeit

Das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) fördert dieses Projekt im Rahmen SASSCAL 2.0 (https://sasscal.org/)

# Inhalt

1 Teil I: Kurzfassung ..... 3
2 Teil II Eingehende Darstellung der Projektergebnisse ..... 5
2.1 Einleitung ..... 5
2.2 Regionale Hydrogeologie in der Untersuchungsregion ..... 5
2.3 Modellierung Wasserhaushalt ..... 8
2.4 Modellergebnisse ..... 12
2.5 Interpretation der Ergebnisse ..... 20
2.6 Schlussfolgerungen ..... 21
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ..... 22
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse ..... 22
5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ..... 23
6 Veröffentlichungen ..... 23
7 Literaturverzeichnis ..... 23

# 1 Teil I: Kurzfassung

**Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand**

Viele Länder des südlichen Afrikas, darunter auch Sambia und Namibia, sind mit dem Problem der Ernährungsunsicherheit konfrontiert, vor allem bei der Landbevölkerung, die für ihren Lebensunterhalt hauptsächlich von der Regenfeldwirtschaft abhängig ist. Das Ausmaß der Ernährungsunsicherheit erklärt zum Teil die hohen Sterberaten von 30 % bzw. 36 % in den ländlichen Gebieten von Namibia und Sambia. Die unsichere Ernährungslage wird auf den Klimawandel, geringere Wasserverfügbarkeit, abnehmende Bodenfruchtbarkeit, eine geringe Diversifizierung der Pflanzenproduktion sowie Schädlinge und Nachernteverluste zurückgeführt. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sollte in dieser Studie der Ansatz der gebietsspezifischen Anbaudiversifizierung (Area Specific Crop Diversification - ASCD) verfolgt werden, bei dem der Anbau von drei oder mehr verschiedenen Kulturen in einem Gebiet gefördert wird. Um die Bewässerung in der Landwirtschaft und die Wasserversorgung der Bevölkerung zu sichern, wurde parallel ein Wassersicherheitskonzept durch die Behörden erarbeitet. Neben der Förderung dürreresistenter Kulturen werden hierbei klimaangepasste landwirtschaftliche Praktiken gefördert, um die Auswirkungen von Dürren auf die Kulturen zu mildern. Das Projekt FoSReCs lieferte hierfür eine modellbasierte Beurteilung der künftigen Eignung von Kulturpflanzen unter Berücksichtigung aktueller Klimatrends und künftiger Niederschlagsprognosen. Zu den weiteren Aktivitäten gehörten die Durchführung von Schulungsmaßnahmen bezüglich der Ernährung sowie fachliche Unterstützung bei der Erschließung neuer, potenzieller Märkte für die neuen Anbaukulturen.

Das FU-Teilprojekt von FoSReCs konzentrierte sich auf die Bewertung der hydrologischen Situation in Namibia und Sambia mit besonderem Augenmerk auf die Wasserversorgung der Landwirtschaft im Modell-Untersuchungsgebiet Chongwe River in Sambia. Strategien für eine klimaresistente Landwirtschaft müssen konkrete Aspekte des Wassermanagements beinhalten, da die Bewässerung ein wichtiger Bestandteil der landwirtschaftlichen Aktivitäten in der Region ist. Das Ziel einer nachhaltigen Ernährungssicherheit erfordert somit eine angepasste Nutzung der verfügbaren Wasserressource. Modellgestützten Empfehlungen fördern eine resiliente agrarische Landnutzung in Verbindung mit neuen Anbauverfahren und einer verbesserten Wasserverfügbarkeit für die Gemeinden und Dörfer im ländlichen Untersuchungsgebiet.

Auf Grundlage der Zusammenarbeit mit den Kollegen des Zambia Agricultural Research Institute (ZARI) und der Water Resources Management Authority (WARMA) wurde das Wissen über die lokalen hydrologischen Verhältnisse, sowie die Kenntnisse über aktuelle Anbauverfahren und sozio-ökonomischen Verhältnisse in das Modell integriert. Auf dieser Grundlage wurden Empfehlungen für einen nachhaltigen Umgang mit Wasser in der Landwirtschaft entwickelt. Diese können von den nationalen Behörden in ein Wassersicherheitsprogramm zusammengefasst werden, das alle notwendigen Schritte für ein effizientes Wassermanagement, angepasst an die lokalen Gegebenheiten, beinhaltet.

**Wesentliche Ergebnisse im Überblick**

Die Bewertung aktueller und zukünftiger hydrologischen Verhältnisse in der Untersuchungsregion erfolgte durch eine detaillierte hydrologische/hydrogeologische Gebietsanalyse und die Anpassung eines hydrologischen Modells für ein Beispielsgebiet mit primär landwirtschaftlicher Nutzung. Auf

Grundlage der erhobenen Daten konnte die hydrologische Wasserbilanz exemplarisch für ein Einzugsgebiet in Sambia erstellt werden. Zur Anwendung kam das SWAT+-Modell, das zur Bewertung der hydrologischen Bedingungen in Verbindung mit der landwirtschaftlichen Produktion im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses in Sambia genutzt wurde.

Das SWAT+-Modell bietet durch die Integration verschiedener Datensätze - einschließlich Landnutzung, Bodeneigenschaften, Topografie und Klimadaten - einen umfassenderen und funktionalen Ansatz für das Wasserressourcenmanagement. Diese ganzheitliche Perspektive ermöglicht genauere Vorhersagen und eine effiziente Ressourcenzuweisung landwirtschaftlicher Praktiken und unterscheidet sich damit von bisher verfügbaren Modellen. Die Analysen für den Zeitraum 1979–2022 zeigen eine deutliche Veränderung der klimatischen Randbedingungen in der Region des Chongwe-Einzugsgebietes. Der wichtigste Trend ist ein konsistenter Temperaturanstieg. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die künftig eingeschränkte Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet vor allem auf steigende Temperaturen und eine erhöhte Verdunstung zurückzuführen ist und weniger auf einen generellen Rückgang des Niederschlags.

Die Wahl der Kulturpflanzen beeinflusst somit die Gesamtwasserbilanz auf Einzugsgebietsebene nur begrenzt. Die Unterschiede in Evapotranspiration, Bodenwasser und Perkolation bleiben im Vergleich zur klimatischen Variabilität relativ gering. Dennoch hat die Auswahl der Kulturen einen erheblichen Einfluss auf den landwirtschaftlichen Wasserverbrauch, insbesondere auf den Bewässerungsbedarf, der als sensitivster Parameter auf Managementänderungen reagiert.

Die simulationsbasierten Vergleiche zeigen, dass klimaresistente Kulturen wie Sorghum, Perlhirse, Cowpea (Kuhbohne) und Erdnuss deutlich geringere Bewässerungsmengen benötigen als Mais oder Maniok. Während Mais häufig Bewässerungswerte von über 2,0 mm pro Jahr erreicht, bleiben diese bei trockenheitstoleranten Kulturen meist unter 1,7 mm pro Jahr. Diese Reduktion des Bewässerungsbedarfs um etwa 40–60 % entspricht den Ergebnissen regionaler Studien zur Wassernutzungseffizienz. Gleichzeitig zeigen diese Kulturen stabilere Reaktionen über trockene und feuchte Jahre hinweg, was auf eine höhere Resilienz gegenüber klimatischer Variabilität hinweist.

Die relative Bewertung der Wassereinsparung bestätigt diese Muster und zeigt deutliche Unterschiede im Vergleich zum Referenzsystem (Mais). Cassava (Maniok) weist überwiegend negative Werte auf, was einem signifikant höheren Wasserverbrauch entspricht. Im Gegensatz dazu zeigen Sorghum, Pearl Millet und Peanut überwiegend positive Werte im Bereich von +5 bis +30 %, mit den höchsten Einsparungen in ausgeprägten Dürrejahren. Cowpea liegt meist zwischen +5 und +20 %, während Sweet Potato moderate Einsparungen von etwa 0 bis +10 % erzielt. Die stärksten positiven Abweichungen treten insbesondere in klimatisch trockenen Jahren auf, was auf eine höhere Wassernutzungseffizienz dieser Kulturen unter Wasserstressbedingungen hinweist.

Eine Substitution von Mais durch klimaresistente Kulturen führt daher nicht zu grundlegenden Veränderungen der Grundwasserneubildung, kann jedoch die landwirtschaftliche Wasserentnahme deutlich reduzieren. Der zentrale Beitrag der Kulturdiversifizierung für das Wassermanagement liegt somit nicht in einer Veränderung der natürlichen Wasserbilanz, sondern in der Reduktion des anthropogenen Drucks auf die Wasserressourcen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine partielle Substitution von Mais durch Sorghum, Hirse, Leguminosen und ausgewählte Wurzelkulturen die Wasserentnahme im Einzugsgebiet deutlich reduzieren kann, ohne die Produktivität im gleichen Maße zu verringern.

# 2 Teil II: Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

## 2.1 Einleitung

Die Landwirtschaft ist weltweit der größte Nutzer von Süßwasserressourcen und macht etwa 70 % der globalen Wasserentnahmen aus. In Subsahara-Afrika steigt dieser Anteil auf 80–90 %, was die starke Abhängigkeit landwirtschaftlicher Systeme von Wasserverfügbarkeit widerspiegelt (FAO, 2025; Fosso Djoumessi & Cyrille Bergaly, 2023). Gleichzeitig basieren über 90 % der landwirtschaftlichen Flächen auf Regenfeldbau und sichern rund 60 % der ländlichen Lebensgrundlagen, sind jedoch zunehmend durch Klimavariabilität, Wasserknappheit und Landdegradation gefährdet (Rockström et al., 2010). Der Klimawandel verstärkt diese Herausforderungen zusätzlich, indem er hydrologische Prozesse verändert und die Verlässlichkeit von Wasserressourcen reduziert (Suter, 2022).

Das südliche Afrika zählt zu den besonders vom Klimawandel betroffenen Regionen. Prognosen zeigen Temperaturanstiege von etwa 2–4 °C bis zur Mitte des Jahrhunderts sowie zunehmende Niederschlagsvariabilität mit kürzeren Regenzeiten und längeren Trockenperioden (Birch, 2014; Thomas et al., 2022). Diese Entwicklungen führen zu erhöhter Evapotranspiration, reduzierter Bodenfeuchte und steigender Dürrehäufigkeit. Insbesondere Mais als wichtigste Kulturpflanze ist stark betroffen, mit prognostizierten Ertragsrückgängen von 20–40 % bis 2050 (Lobell et al., 2011).

Das Teilprojekt der FUB konzentriert sich daher auf die Wassersicherheit in Namibia und Sambia mit besonderem Augenmerk auf die genannten Herausforderungen für die Landwirtschaft. Strategien für eine klimaresistente Landwirtschaft müssen ein Wassermanagement beinhalten, da Wasser für die Bewässerung ein wichtiger Bestandteil der landwirtschaftlichen Aktivitäten ist. Das Ziel einer nachhaltigen Ernährungssicherheit erfordert eine nachhaltige Nutzung von Wasser. Ziel ist die Unterstützung und Empfehlungen für eine nachhaltige Wasserversorgung für die ländlichen Gemeinden in der Region.

## 2.2 Regionale Hydrogeologie in der Untersuchungsregion

Hierfür wurde in WP1 „Recherche des Untersuchungsgebietes“ eine Analyse der geologischen und hydrogeologischen Daten durchgeführt und vorliegende Kenntnisse zur Geologie und Hydrogeologie Sambias für die künftige Grundwassererschließung zusammengestellt. Die stratigraphischen und lithologischen Merkmale sind für ein umfassendes Verständnis der Grundwasserdynamik und der Verfügbarkeit von Ressourcen in Sambia von zentraler Bedeutung.

Die geologischen Merkmale Sambias werden in vier Haupteinheiten kategorisiert. Die folgenden Informationen wurden auf Grundlage der Europäischen Union - Gemeinsame Forschungsstelle, Sambia (2018) und JICA (1995) zusammengestellt:

i) Das Quartär (Alluvium, Colluvium) besteht aus lockeren und halbverfestigten Sedimenten, einschließlich Sanden, Böden und Lateriten, die dem Pliozän/Pleistozän zuzuordnen sind. Große Ablagerungen alluvialer Sedimente bedecken die westlichen und nordwestlichen Provinzen, während Laterite insbesondere in der östlichen Provinz und anderen Regionen des Landes verbreitet sind. Eine ausgeprägte geologische Diskordanz trennt die überlagernde Alluvialformation von der darunter liegenden Karroo-Formation, wobei die Alluvialschichten die älteren Gesteine diskordant überlagern.

ii) Die Lithologie der Karroo-Formation besteht überwiegend aus feinkörnigen Sedimenten und Schiefer, wobei der untere Teil Kohleablagerungen enthält. Das auffälligste Merkmal dieser Formation ist der Karroo-Basalt, der auf den Karroo-Sedimenten liegt. Die Gesteine und Schichten der Karroo-Formation sind im Wesentlichen für Grundwasser schlecht durchlässig.

Stratigraphisch gesehen umspannt die Karroo-Formation den Zeitraum vom Oberkarbon bis zum Jura, wobei der Karroo-Basalt einen entscheidenden Wendepunkt während der Aufspaltung des Gondwana-Kontinents in getrennte Kontinente markiert.

iii) Die deutlich ältere Katanga-Formation in Sambia ist ebenfalls von großer geologischer Relevanz. Sie wird in verschiedene Gruppen unterteilt, die in den verschiedenen Regionen unterschiedliche Namen tragen: Kundelungu-Gruppe (oberes Katanga), obere Roan-Gruppe (vor dem unteren Katanga), Minenserie und Basalkonglomerat (vor dem unteren Katanga). In weiten Gebieten der Provinzen Luapula und Northern geht die Katanga-Formation seitlich in die Gesteine der Muva-Gruppe über. Die Kundelungu-Gruppe ist durch eine Einlagerung Sanden und Schiefer gekennzeichnet, wobei hier ebenfalls keine bedeutenden Grundwasserleiter zu erwarten sind. Die Roan-Gruppe hingegen besteht aus Metakarbonaten wie Marmor und Dolomit. Sie beginnt an der Basis mit der Mine Series und dem Basalkonglomerat, die beide wichtige Grundwasserleiterhorizone beeinhalten. Die Muva-Gruppe besteht aus Wechsellagerungen von Quarzit und Schiefer, wobei die oberen und unteren Quarzitschichten für Grundwasservorkommen potenziell interessant sind. Stratigraphisch gesehen umspannt die Katanga-Formation Zeiträume, die wahrscheinlich im Proterozoikum beginnen und sich bis zum Beginn des Kambriums erstrecken. Große Teile von Central West und Central North sind von Gesteinen der Katanga-Gruppe geprägt.

*iv)* Was Vorkommen des Prä-Katanga betrifft, so sind die Gesteine und Schichten der Katanga-Formation in der Regel von magmatischen Gesteinen unterlagert, die vor allem aus verschiedenen Granitarten, aber auch von verschiedenen Gneisarten zusammengesetzt sind. Dieses Grundgebirgsgestein, das sich durch seine sehr geringe Durchlässigkeit für Oberflächenwasser auszeichnet, ist das vorherrschende geologische Merkmal in Sambia. *Aquifertypen*

Der poröse/intergranuläre Grundwasserleiter besteht hauptsächlich aus unverfestigten Sanden und Kiesen und birgt aufgrund der von der Korngröße und Kornverteilung abhängigen effektiven Porosität ein großes Grundwasserpotenzial. Er überlagert verschiedene Gesteinsarten der Karroo- und Katangaformation (Gneise und Granite), und ist vor allem in Gebieten wie den Kafue Flats und dem Luangwa Valley zu finden, die mit den geologischen Grabenstrukturen der ostafrikanischen Rift Valleys (Präkreide bis jüngste Vergangenheit) verbunden sind.

Grundwasserleiter gibt es vor allem dort, wo undurchlässiges Gestein das Eindringen von Regenwasser durch den Boden und das lockere Deckgebirge behindert. Trotz ihrer im Allgemeinen bescheidenen Ergiebigkeit (etwa 0,3 Liter pro Sekunde und Meter Absenkung) sind diese Grundwasserleiter für die ländliche Wasserversorgung von großer Bedeutung. Es gibt zwei Haupttypen von Grundwasserleitern, die relativ jungen geologischen Formationen (Pleistozän bis jüngste Vergangenheit) zuzuordnen sind: Grundwasserleiter, die an Grundgestein und Granit gebunden sind (Typ I), und solche, die mit Basalten, Sedimenten der Karroo-Formation und metamorphen Gesteinen der Katanga-Formation verbunden sind (Typ II).

Der Grundwasserleitertyp I herrscht in Gebieten vor, in denen hartes Grundgestein wie Gneise und Granit von lockeren oder halbverfestigten Sedimenten überlagert wird. Diese Sedimente sind das Ergebnis der für das tropische und subtropische Klima typischen In-situ-Verwitterung. Das Regenwasser versickert im Untergrund und wird vom undurchlässigen Granit aufgestaut. An der Grenze zwischen dem Deckgebirge und dem frischen Granit bilden sich Klüfte und Risse. Bei diesem Typ handelt es sich um eine Kombination aus intergranularen und zerklüfteten Grundwasserleitern, die weite Teile Sambias, einschließlich der Grundgebirgsbereiche der Ostprovinz, kennzeichnen.

Der Grundwasserleitertyp II ist in den westlichen und nordwestlichen Provinzen verbreitet, wo das Oberflächenwasser durch relativ undurchlässiges Gestein wie Tonstein oder Schiefer an der Versickerung behindert wird. Im Gegensatz zu Typ I ist das Aquifermaterial in diesen Fällen nicht das Ergebnis von In-situ-Verwitterung. Stattdessen werden die undurchlässigen Gesteinsschichten von fluvialen oder äolischen Sanden und Kiesen überlagert.

Der Joint/Fissured Aquifer in Sambia ist mit einem Netz von Klüften verbunden, die auf tektonische Spannungen zurückzuführen sind. Insbesondere Quarzit, der innerhalb der Schiefer- und Schieferabfolgen in der Katanga-Formation vorkommt, neigt dazu, unter Druck zu brechen, anstatt sich flexibel zu verformen. Mit einer mittleren Ergiebigkeit von etwa 3 bis 7 Litern pro Meter Absenkung spielt dieser Aquifertyp vor allem in der Zentralprovinz eine wichtige Rolle.

Die Basalkonglomerate der Roan-Gruppe, die zur Lowe-Katanga-Formation gehören, stellen einen zerklüfteten Grundwasserleiter dar, der sich aus verwitterten Produkten alter proterozoischer und sogar archaischer Sedimente gebildet hat. Diese metamorphe Abfolge von Gesteinen, die aus tektonischen und eruptiven Ereignissen resultiert, führte zu einer Anhebung und Zerklüftung der alten Schotter und Kiese, wodurch Hohlräume und offene Risse entstanden, die den Grundwasserfluss begünstigten. Diese Konglomerate bestehen aus Klastika verschiedener Größen wie Granit, Arkose, Quarzit, Dolomit und Marmor und sind in der Regel um Granitdome herum zu finden, wie z. B. den Solwezi-Dom im Copperbelt-Gebiet. Begrenzte Gebiete mit Basalkonglomeraten finden sich auch in der Ostprovinz. Dabei handelt es sich in der Regel um Grundwasserleiter mit mittlerer bis hoher Ergiebigkeit, die zu den wichtigsten Grundwasserleitern in Sambia gehören, auch wenn sie bis heute nicht vollständig genutzt werden.

Karst-Aquifere, die für metamorphe Karbonate charakteristisch sind, sind dafür bekannt, dass sie Höhlen unterschiedlicher Größe bilden, die ungleichmäßig verteilt und oft durch ein Netz von Tunneln miteinander verbunden sind. Die Wasserversorgung von Lusaka hängt stark von diesem Aquifertyp ab, und Gebiete wie Kabwe und Mpongwe sind ebenfalls für ihre ergiebigen Karst-Aquifere bekannt.

*Verfügbarkeit von Grundwasser*

Die Nachfrage nach den verfügbaren Wasserressourcen in Sambia ist spürbar angestiegen, wobei die Nutzung des Grundwassers kontinuierlich zunimmt. Gegenwärtig werden etwa 9 % des Wasserverbrauchs in der Region aus Grundwasser gewonnen, wobei der Anteil an der Wasserversorgung der Haushalte mit 28 % erheblich ist. Die ergiebigsten Grundwasserleiter in Sambia befinden sich in den Kalkstein- und Dolomitschichten des Katanga-Systems. Die höchsten Ergiebigkeiten werden in den oberen 30 Metern der Karstformation beobachtet, insbesondere in Gebieten, in denen die Klüfte gut entwickelt sind. Diese Grundwasserleiter spielen eine entscheidende Rolle für die Wasserversorgung von Gemeinden wie Lusaka, Kabwe und Ndole. Bohrlöcher in verkarsteten Abschnitten der Grundwasserleiterhorizonte können bis zu 35-50 Liter pro Sekunde (l/s) liefern. Der Kundelungu-Kalkstein, ein Bestandteil des Katanga-Systems in Zentral-Sambia, weist Fördermengen von bis zu 40 l/s auf. Die Bohrlochtiefe liegt in der Regel zwischen 50 und 70 Metern unter Flur. Der zweitproduktivste Grundwasserleiter befindet sich in den klastischen Sedimenten des Kalahari-Systems, wo die potenzielle Fördermenge zwischen 10 und 20 l/s liegt. Ein großer Teil des Kalahari-Systems zeichnet sich allerdings durch eine relativ geringe Produktivität aus, die auf das verbreitete auftreten feinkörnigen Materials zurückzuführen ist. Im Karoo-System formen grobe Sedimente wie Sandsteine und Konglomerate die am besten nutzbaren Grundwasserleiter. Das

Grundwasservorkommen in den kristallinen Grundgesteinen, die die geologische Landschaft dominieren, ist deutlich begrenzter. Ergiebige Grundwasservorkommen befinden sich allerdings in den Klüften des Grundgebirges sowie im verwitterten Deckgebirge. Die dortigen Grundwasserleiter sind in der Regel zwischen 10 und 15 m dick, können aber an bestimmten Stellen bis zu 30 m Mächtigkeit betragen.

## 2.3 Modellierung Wasserhaushalt

### 2.3.1 Auswahl des Einzugsgebiets

Im Rahmen der Modellierung eines Beispielgebiets wurde eine Bewertung der aktuellen und zukünftigen Wasserverhältnisse in der Region durchgeführt (WP 5). Auf Grundlage der erhobenen Daten konnte modellbasiert eine hydrologische Wasserbilanz exemplarisch für ein Einzugsgebiet in Sambia erstellt werden. Zur Anwendung kam das SWAT+-Modell, das zum einen zur Bewertung der hydrologischen Bedingungen und Wasserbilanzen sowie zur Bewertung der landwirtschaftlichen Produktion auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses in Sambia genutzt wurde.

Das SWAT+-Modell bietet durch die Integration verschiedener Datensätze - einschließlich Landnutzung, Bodeneigenschaften, Topografie und Klimadaten - einen umfassenderen und funktionalen Ansatz für das Wasserressourcenmanagement. Diese ganzheitliche Perspektive ermöglicht genauere Vorhersagen und eine effiziente Ressourcenzuweisung und unterscheidet sich damit von bisher verfügbaren Modellen. Die Anwendbarkeit des Modells erstreckt sich auf verschiedene Nutzergruppen und Branchen, einschließlich Landwirtschaftsplanern, Wasserressourcenmanagern und Politikentwicklern. Seine Fähigkeit, künftige Klimaszenarien zu simulieren und dürreresistente Kulturen zu bewerten, macht es zu einem wertvollen Hilfsmittel für die Entwicklung nachhaltiger landwirtschaftlicher Praktiken und für die Information der nationalen Ernährungssicherheitspolitik.

Zu diesem Zweck wurden nach einer gründlichen Durchsicht der vorhandenen Literatur und Datenquellen (s. WP1) mehrere Einzugsgebiete in ganz Sambia hinsichtlich der Modellierbarkeit bewertet. Die wichtigsten Kriterien, die für diesen Abschnitt herangezogen wurden, waren die Verfügbarkeit von hydrologischen Daten (z. B. Abflussmenge, Flussnetz), Bodenkartendaten, Landnutzungs- und Bodenbedeckungskarten, Klimadaten (z. B. Tagesniederschlag, Minimal- und Maximaltemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung), Wassernutzungsdaten (z. B. Bewässerung, Stausee, Abwassereinleitung) und digitale Höhendaten, die weltweit mit einer Auflösung von 30 Metern verfügbar sind. Darüber hinaus wurden bei der Auswahl der Einzugsgebiete unterschiedliche klimatische Bedingungen und landwirtschaftliche Anbautypen berücksichtigt, um die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserressourcen und Landwirtschaft zu erfassen.

Für die konkrete Modellierung einer Beispielsregion haben wir uns auf Grundlage der Datenverfügbarkeit für das Chongwe River Catchment entschieden (Abbildung 1 a-d). Das Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses, das die allgemeinen Trends in Sambia und im südlichen Afrika exemplarisch widerspiegelt, ist zunehmend von Klimaschwankungen betroffen. Kurzfristige Schwankungen, vor allem im Zusammenhang mit dem El-Niño-Phänomen, treten unregelmäßig alle zwei bis sieben Jahre auf und können bis zu zwei Jahre andauern. Diese Bedingungen führten zu lang anhaltenden Dürren, verminderten landwirtschaftlichen Erträgen und Wasserknappheit. In Verbindung mit den langfristigen Auswirkungen des globalen Klimawandels führt dies zu deutlich

verstärkten Umweltbelastungen und Versorgungsengpässen der landwirtschaftlichen Produktion. Das gilt insbesondere für die Wasserressourcen, die Qualität der Böden und die Gesundheit der Vegetation.

### 2.3.2 Untersuchungsgebiet Chongwe-Fluss

Im Einzugsgebiet des leben etwa 835.000 Menschen, die das Wasser des Flusses für den Hausgebrauch, die Landwirtschaft, die Industrie und andere sozioökonomische Aktivitäten nutzen. Trotz einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von 889 mm hatte die Region in den letzten Jahren aufgrund der wiederkehrenden Austrocknung des Chongwe-Flusses mit schwerem Wassermangel zu kämpfen. Diese Bedingungen wirken sich direkt negativ auf den Lebensunterhalt und die wirtschaftlichen Aktivitäten in den umliegenden Gemeinden aus. Eine wirksame Bewirtschaftung der Wasserressourcen setzt ein umfassendes Verständnis sowohl der Quantität als auch der Qualität des verfügbaren Wassers voraus. Die Modellarbeiten zielen darauf ab, die regionalen Wasserressourcen quantitativ zu bewerten, sowie die Merkmale der einzelnen hydrologischen Komponenten zu analysieren und die Wasserbilanz des Chongwe-Flusseinzugsgebiets hinsichtlich der verschieden Nutzer zu beurteilen. Ziel ist es, technische Empfehlungen für eine nachhaltige und integrierte Bewirtschaftung und Entwicklung der Wasserressourcen in der Region abzuleiten.

Das Chongwe-Einzugsgebiet (CRC) in Sambia stellt ein repräsentatives Beispiel für diese Herausforderungen dar. Es umfasst etwa 5.150 km² im mittleren Sambesi-Becken und versorgt die Region Lusaka mit Wasser für Landwirtschaft, Haushalte und wirtschaftliche Aktivitäten (Bäumle et al., 2013; T. M. Tena et al., 2019). Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei etwa 800–900 mm, weist jedoch eine hohe interannuelle Variabilität auf. Hydrologisch ist das System stark saisonal geprägt, mit hohen Abflüssen während der Regenzeit und stark reduzierten Abflüssen in der Trockenzeit.

Die Wasserbilanz zeigt, dass von etwa 4.603 Mm³ jährlichem Niederschlag rund 4.064 Mm³ durch Evapotranspiration verloren gehen, während nur etwa 322 Mm³ als Abfluss verfügbar sind (T. M. Tena et al., 2019). Dies verdeutlicht die dominierende Rolle der Evapotranspiration im System.

Die Landnutzung ist überwiegend landwirtschaftlich geprägt, wobei Mais etwa 70 % der Anbaufläche einnimmt. Gleichzeitig haben sich Landnutzung und Bewässerung stark verändert: Zwischen 1984 und 2017 nahm die bewässerte Landwirtschaft um mehr als 700 % zu, während Siedlungsflächen um etwa 383 % expandierten (Tewodros M. Tena et al., 2019). Diese Entwicklungen führen zu erhöhtem Wasserdruck, insbesondere während der Trockenzeit.

Vor diesem Hintergrund wird die Substitution von Mais durch klimaresistente Kulturen als zentrale Anpassungsstrategie betrachtet. Kulturen wie Sorghum und Pearl Millet benötigen typischerweise nur 400–500 mm Wasser pro Vegetationsperiode und weisen eine höhere Wassernutzungseffizienz auf, während Leguminosen zusätzlich die Bodenfruchtbarkeit verbessern (Cooper & Noguer, 2013; Hardon, 1998).

Ein wesentlicher innovativer Beitrag dieser Studie liegt in ihrem methodischen Ansatz zur Bewertung klimaresilienter Anbausysteme. Während viele Studien hydrologische Modelle mit zukünftigen Klimaszenarien durchrechnen und dadurch eine große Unsicherheit hinsichtlich der Auswirkungen verschiedener Kulturpflanzenarten auf hydrologische Komponenten und damit auf die Wasserwirtschaft einführen, basiert die vorliegende Analyse ausschließlich auf beobachteten hydroklimatischen Daten aus dem Zeitraum 1979–2022. Dadurch lässt sich der isolierte Einfluss der Umstellung auf die Anbaukultur auf hydrologische Prozesse und den Wasserhaushalt klar quantifizieren.

Dieser Ansatz ermöglicht eine fundierte Bewertung der Auswirkungen von Kulturarten auf Evapotranspiration, Bodenwasser, Versickerung und insbesondere den Bewässerungsbedarf unter realen Bedingungen. Gleichzeitig gewährleistet er eine klare Trennung zwischen klimatischen und bewirtschaftungsbezogenen Einflüssen und bietet damit eine zuverlässige Grundlage für die Entwicklung nachhaltiger Anpassungsstrategien im landwirtschaftlichen Wassermanagement.

Ziel dieser Studie ist es, die hydrologischen und landwirtschaftlichen Auswirkungen einer Substitution von Mais durch sechs klimaresistente Kulturpflanzen – darunter Maniok, Augenbohne, Erdnuss, Perlhirse, Sorghum und Süßkartoffel – für den Zeitraum 1979–2022 im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses (Sambia) mithilfe des „Soil and Water Assessment Tool Plus“ (SWAT+) zu bewerten.

Die Ergebnisse des Modells - einschließlich räumlicher Karten der Grundwasserneubildung, des Wasserertrags, der Evapotranspiration, des Bodenwassergehalts und der Ernteerträge - liefern wertvolle Daten für öffentliche Aufgaben wie die Planung der Wasserzuteilung, die landwirtschaftliche Entwicklung und Strategien zur Anpassung an den Klimawandel. Darüber hinaus wird das Modell genutzt, um den Wasserfußabdruck verschiedener Nutzpflanzen zu bewerten und somit Entscheidungen über die Auswahl von Nutzpflanzen und Bewirtschaftungspraktiken zu treffen, die mit den Zielen einer nachhaltigen Wassernutzung in Einklang stehen. Diese Ergebnisse werden den Partner zur Verfügung gestellt. Ziel ist die Integration in nationale Datenbanken, um politische Entscheidungen zu unterstützen und die Entwicklung umfassender Wassermanagementpläne zu fördern.

### 2.3.3 Geografischer Kontext und Datenintegration

Das Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses umfasst unterschiedliche Geländeformen, die vom Hochland bis zu Überschwemmungsgebieten reichen. Diese geografische Variabilität bietet einen umfassenden Rahmen für die Bewertung von Wasserbewirtschaftungsstrategien unter unterschiedlichen Landnutzungs- und Klimabedingungen. Das SWAT+-Modell für dieses Einzugsgebiet wurde auf der Grundlage offen zugänglicher Datensätze erstellt, die Informationen über Landnutzung, Bodeneigenschaften, Topografie und Klima enthalten. Dies geschah in Zusammenarbeit mit sambischen Partnern, insbesondere mit Water Resources Management Authority (WARMA) und Zambia Agriculture Research Institute, Choma (ZARI).

### 2.3.4 Methodik Modellierung

Zur Analyse der hydrologischen Prozesse und des landwirtschaftlichen Wasserverbrauchs im Chongwe-Einzugsgebiet wurde das prozessbasierte, semi-distributive Modell SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool Plus) eingesetzt. Das Modell integriert klimatische, topographische, bodenkundliche und landnutzungsbezogene Daten, um zentrale Komponenten des Wasserhaushalts wie Niederschlag, Abfluss, Evapotranspiration, Bodenwasser und Grundwasserneubildung zu simulieren (Bieger et al., 2017).

Die Modellierung basierte auf einem digitalen Höhenmodell (SRTM, 30 m), Landnutzungsdaten aus Sentinel-2 (10 m), globalen Bodendaten sowie täglichen Klimadaten (Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte). Zusätzlich wurden Bewässerungsdaten und Abflussmessungen von fünf hydrometrischen Stationen durch die zuständige Wasserbehörde (WARMA) bereitgestellt und für die Modellkalibrierung und -validierung verwendet.

Das Einzugsgebiet wurde in 8 Teileinzugsgebiete untergliedert und anschließend in Hydrological Response Units (HRUs) differenziert, die homogene Kombinationen aus Landnutzung, Boden und

Hangneigung repräsentieren. Dieser Ansatz ermöglicht die Abbildung räumlicher Heterogenität hydrologischer Prozesse innerhalb des Einzugsgebiets.

Die Simulation erfolgte für den Zeitraum 1976–2022, einschließlich einer dreijährigen Aufwärmphase (1976–1978), einer Kalibrierungsphase (1979–2010) und einer Validierungsphase (2011–2022). Die Kalibrierung umfasste die Anpassung sensibler Parameter wie Curve Number, Bodenwasserspeicherkapazität und Grundwasserparameter zur Optimierung der Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen (Moriasi et al., 2007). Die Evapotranspiration wurde mit der Penman–Monteith-Methode berechnet (Allan et al., 1998).

Zur Bewertung von Anpassungsstrategien wurden mehrere Szenarien der Kulturumstellung entwickelt, in denen Mais durch klimaresistente Kulturen (Sorghum, Pearl Millet, Cowpea, Erdnuss, Cassava und Süßkartoffel) ersetzt wurde. Die Auswirkungen dieser Szenarien wurden anhand zentraler hydrologischer und agronomischer Größen analysiert, darunter Evapotranspiration, Bewässerungsbedarf, Bodenwasser, Grundwasserneubildung sowie Erträge. Diese Kenngrößen ermöglichen eine integrierte Bewertung der Wechselwirkungen zwischen landwirtschaftlicher Produktion und Wasserressourcen unter unterschiedlichen Anbausystemen.

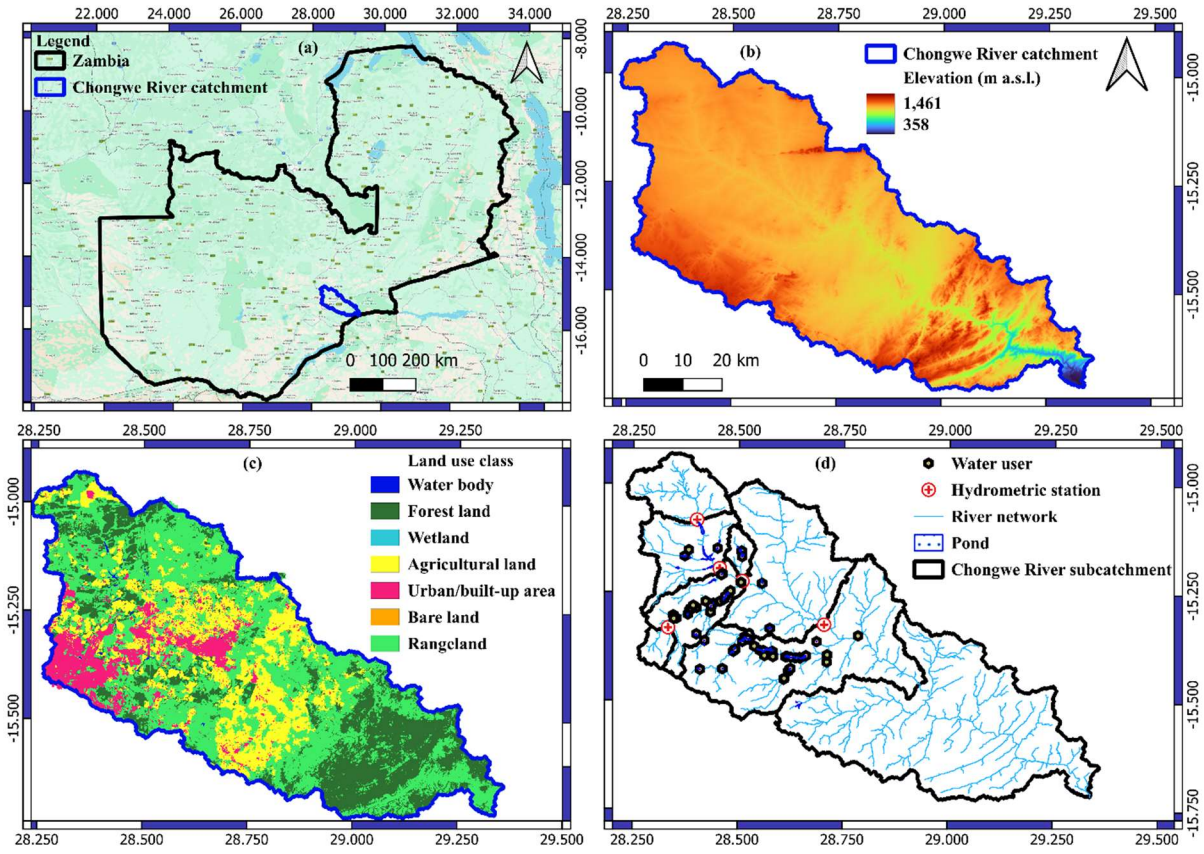


Abbildung 1: (a) Lage des Einzugsgebiets des Chongwe-Flusses auf einer Karte von Sambia; (b) Höhenangaben auf der Grundlage des digitalen Höhenmodells; (c) Verteilung von Landnutzung und Bodenbedeckung; und (d) Flussnetz, Grenzen der Teileinzugsgebiete, hydrometrische Messstationen, Wassernutzer und Teiche innerhalb des Einzugsgebiets.

### 2.3.5 Hydrologische Daten und Imputationstechniken

Obwohl das Einzugsgebiet über umfangreiche Abflussdaten verfügt, gab es gewisse Lücken in den Zeitreihen der 5 hydrometrischen Stationen. Um diese Lücken zu schließen, wurde ein Random-Forest-Algorithmus eingesetzt, um fehlende Abflusswerte zu ergänzen. Dieser Ansatz des maschinellen Lernens erleichterte die Erstellung eines vollständigeren Datensatzes und erhöhte damit die Zuverlässigkeit der nachfolgenden Modellkalibrierungs- und Validierungsprozesse.

### 2.3.6 Modellkalibrierung und -validierung

Das SWAT+-Modell wurde anhand der Daten von fünf hydrometrischen Abflussmessstationen im Einzugsgebiet kalibriert. Der Kalibrierungszeitraum erstreckte sich vom 1. Januar 1976 bis zum 31. Dezember 2010. Während dieser Zeit werden die Modellparameter angepasst, um die simulierten Ergebnisse mit den beobachteten Abflusswerten in Einklang zu bringen. Anschließend wird die Leistung des Modells über den Zeitraum vom 1. Januar 2011 bis zum 31. Dezember 2022 validiert, wobei seine Vorhersagefähigkeiten anhand nicht beobachteter Daten bewertet werden. Leistungskennzahlen wie die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und der mittlere quadratische Fehler (RMSE) werden zur Bewertung der Modellgenauigkeit herangezogen.

## 2.4 Modellergebnisse

### 2.4.1 Räumliche Analyse

Einige der wichtigsten Wasserkomponenten und Ernteerträge, die durch das SWAT+-Modell für das Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses simuliert wurden zeigt folgende Tabelle:

| Water component | Average of long-term amount of water component (mm/y) |
|---|---|
| Total precipitation | 1109 |
| Total snowfall | 0 |
| Total snowmelt | 0 |
| Surface runoff | 286 |
| Lateral flow | 36 |
| Water yield | 323 |
| Percolation | 364 |
| Actual evapotranspiration | 474 |
| Evaporation from the canopy | 16 |
| Transpiration by plants | 203 |
| Evaporation from soil | 254 |
| Surface runoff reaching to river | 286 |
| Average soil water content | 348 |
| Average snowpack (water equivalent) | 0 |
| Potential evapotranspiration | 1802 |

Die räumliche Verteilung der Wasser- und Landnutzungsparameter im Untersuchungsgebiet zeigen folgende Abbildungen:

- Langfristiger Durchschnitt der Grundwasserneubildung (Abbildung 2a)
- Langfristiger Durchschnitt der Wasserbilanz (Abbildung 2b)
- Langfristiger Durchschnitt der Evapotranspiration (Abbildung 2c)
- Langfristiger Durchschnitt des Bodenwassergehalts (Abbildung 2d)

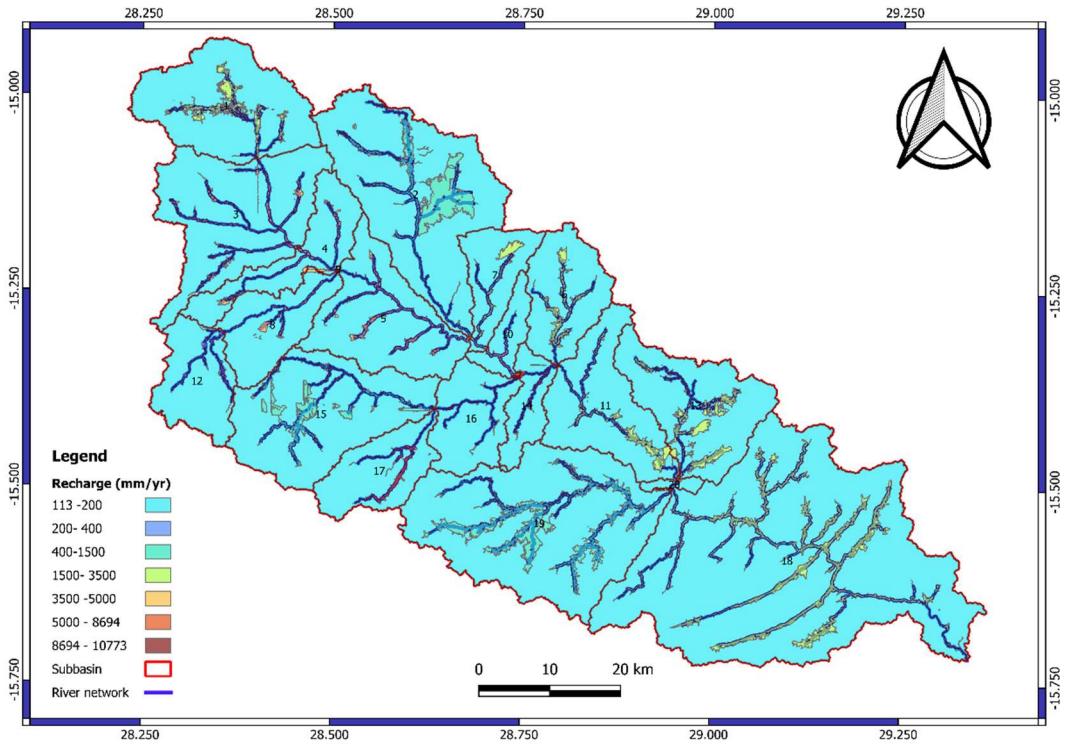


Abb. 2a: Durchschnitt der langfristigen Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses.

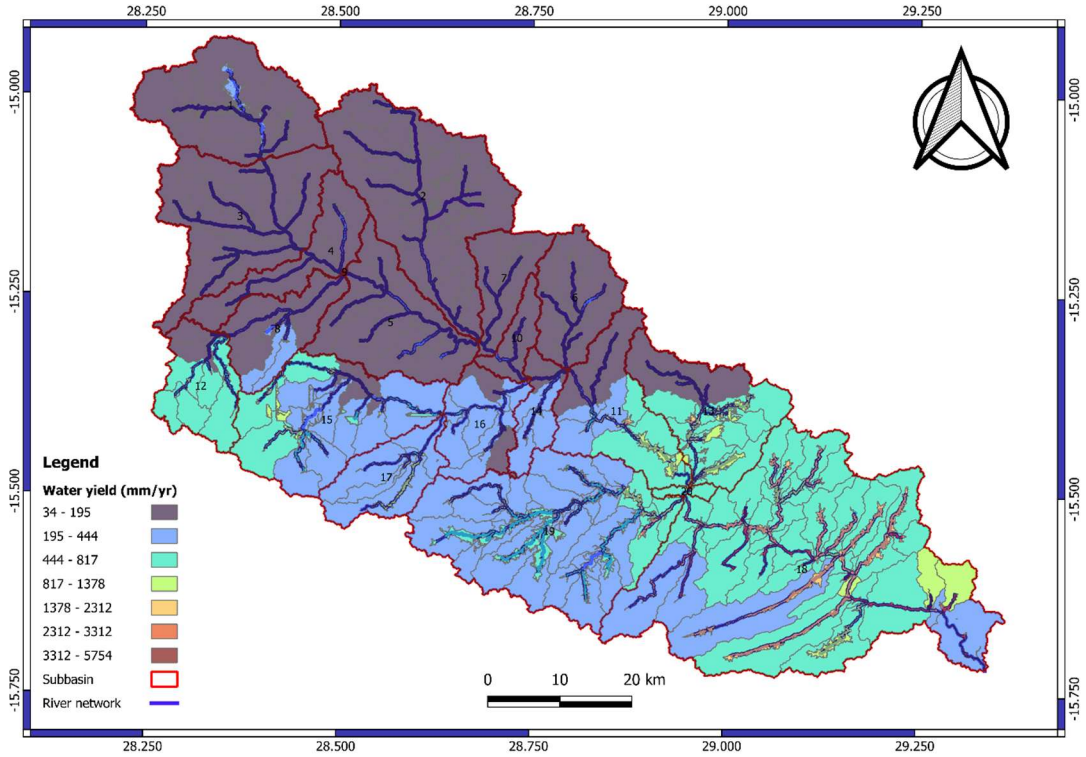


Abb. 2b: Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses mit Werten für Wasserbilanz.

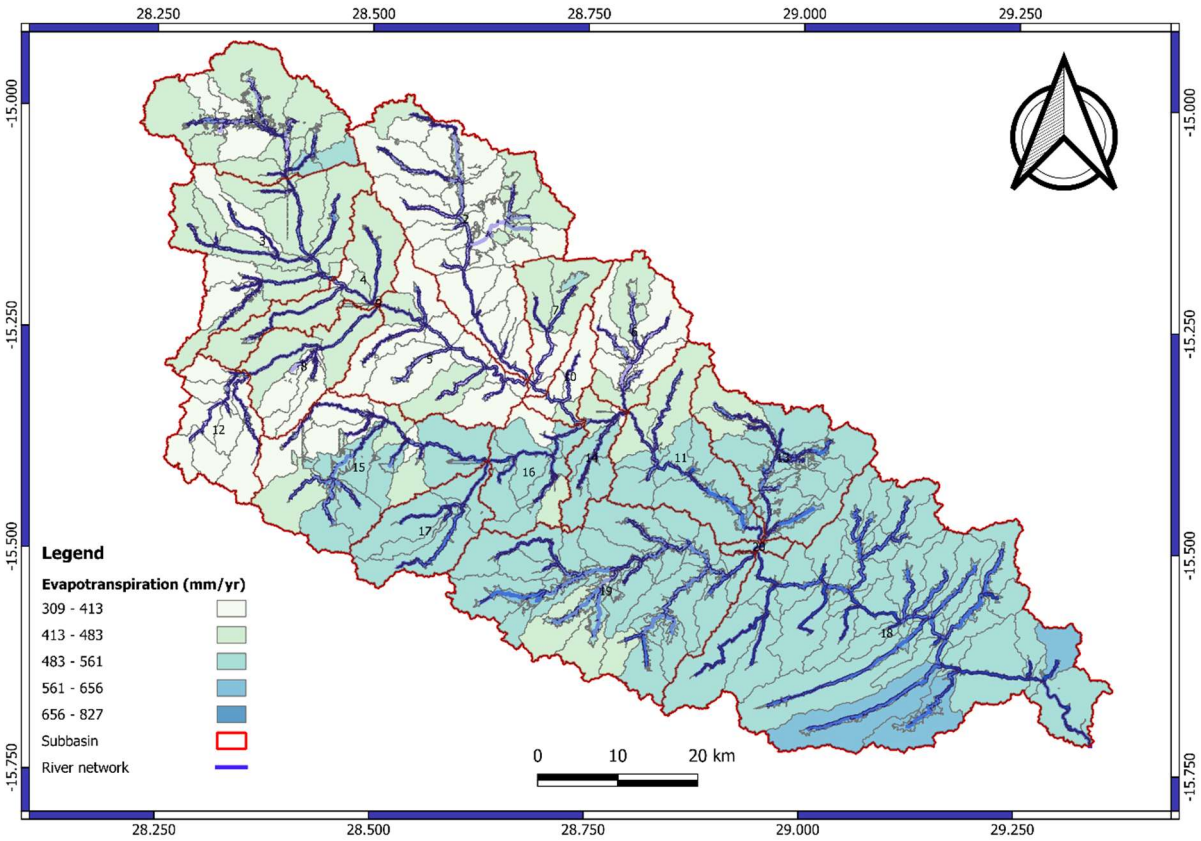


Abb. 2c: Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses mit Werten für die Evapotranspiration.

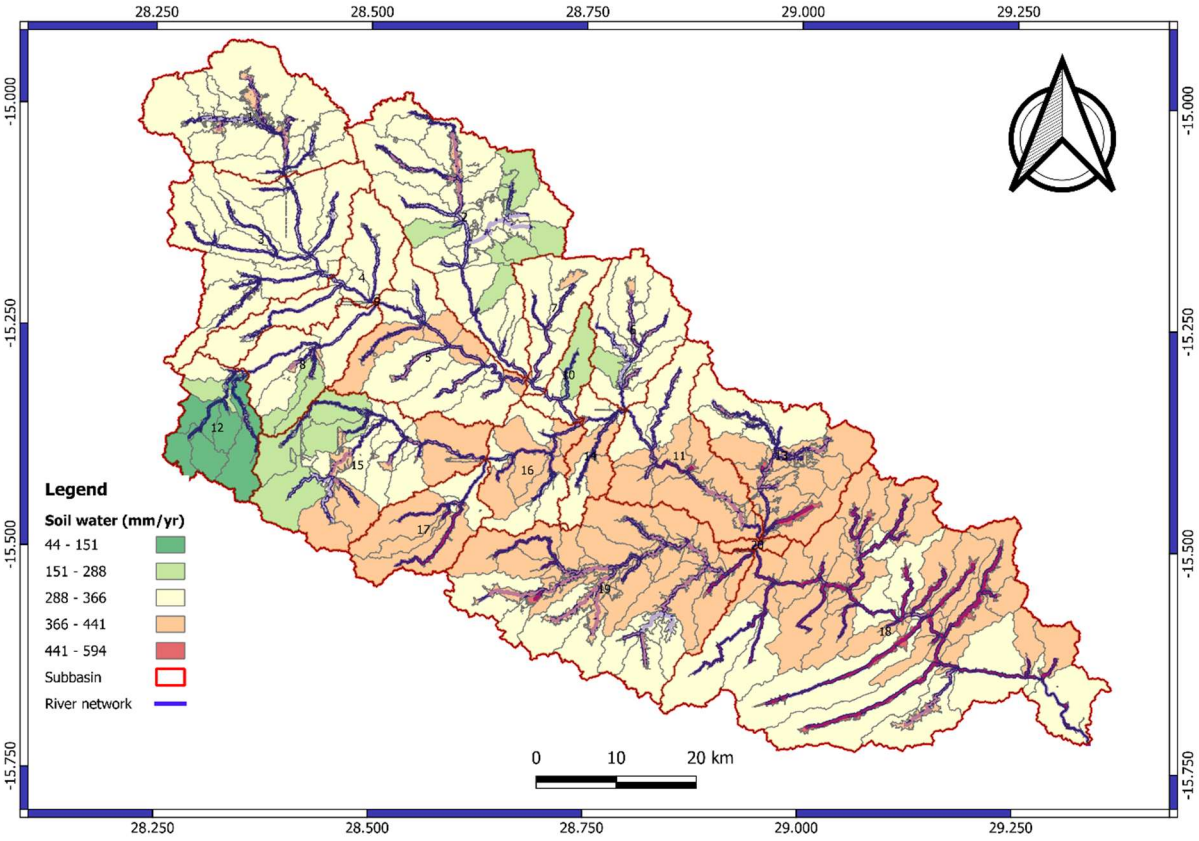


Abb. 2d: Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses mit Werten für den Bodenwassergehalt.

### 2.4.2 Klimatische Dynamik im Chongwe-Einzugsgebiet

Die Analysen für den Zeitraum 1979–2022 zeigen eine deutliche Veränderung der klimatischen Randbedingungen im Chongwe-Einzugsgebiet. Der wichtigste Trend ist ein konsistenter Temperaturanstieg: Die mittlere Jahrestemperatur erhöhte sich von etwa 20,6–23,4 °C in der Periode 1979–1989 auf etwa 21,4–24,4 °C in der Periode 2012–2022. Damit ergibt sich über rund vier Jahrzehnte eine Erwärmung von etwa 0,5 bis 1,0 °C. Diese Entwicklung steht im Einklang mit regionalen Klimaprojektionen für das südliche Afrika, die einen signifikanten Temperaturanstieg und zunehmende klimatische Variabilität prognostizieren (Birch, 2014; Suter, 2022).

Parallel dazu nahm auch die potenzielle Evapotranspiration zu und stieg von etwa 1.680–1.945 mm pro Jahr auf etwa 1.774–2.055 mm pro Jahr. Dies weist auf eine zunehmende atmosphärische Verdunstungsnachfrage hin, die eng mit steigenden Temperaturen verbunden ist und zu einer verstärkten Austrocknung von Böden sowie erhöhtem Wasserbedarf der Vegetation führt (Suter, 2022; Waha et al., 2013).

Im Gegensatz dazu zeigt der Jahresniederschlag zwar eine hohe räumliche und interannuelle Variabilität, jedoch keinen eindeutigen langfristigen Abwärtstrend. Der südöstliche Teil des Einzugsgebiets bleibt relativ niederschlagsreich, während die nordwestlichen Bereiche kontinuierlich trockener sind, was mit früheren Untersuchungen zur räumlichen Niederschlagsverteilung im Einzugsgebiet übereinstimmt (Tena et al., 2019a). Die beobachtete Variabilität steht zudem im Zusammenhang mit großskaligen Klimaphänomenen wie der El Niño–Southern Oscillation (ENSO), die die Niederschlagsdynamik in der Region maßgeblich beeinflusst ((Chisola & Kuraz, 2016; Kanema & Gumindoga, 2022).

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die künftig eingeschränkte Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet vor allem auf steigende Temperaturen und eine erhöhte Evapotranspiration zurückzuführen ist und weniger auf einen generellen Rückgang des Niederschlags. Damit verschiebt sich der klimatische Steuerungsmechanismus des Wasserhaushalts zunehmend in Richtung höherer Verdunstungsverluste und wachsender Wasserstressbedingungen, wie auch für semi-aride Regionen Subsahara-Afrikas allgemein berichtet wird (Suter, 2022; Thomas et al., 2022).

### 2.4.3 Hydrologische und landwirtschaftliche Dynamik unter verschiedenen Anbauszenarien

Die simulationsbasierten Ergebnisse zeigen, dass die hydrologischen Prozesse im Chongwe-Einzugsgebiet primär durch klimatische Faktoren gesteuert werden, während die Wahl der Kulturpflanzen insbesondere den Bewässerungsbedarf sowie die Stabilität der landwirtschaftlichen Produktion beeinflusst. Die räumlichen Muster von Evapotranspiration, Bewässerung und Erträgen folgen konsistent den Gradienten von Niederschlag und Bodenfeuchte. Höhere Werte treten überwiegend in den zentralen und südöstlichen Bereichen des Einzugsgebiets auf, während nördliche und nordwestliche Regionen durch geringere Wasserverfügbarkeit und entsprechend niedrigere Produktivität gekennzeichnet sind. Diese grundlegenden räumlichen Muster werden exemplarisch durch die Bewässerungsverteilung im Mais-Szenario (Abbildung 3) sowie im Sorghum-Szenario (Abbildung 4) verdeutlicht und spiegeln die dominierende Rolle klimatischer und pedologischer Bedingungen wider (T. M. Tena et al., 2019).

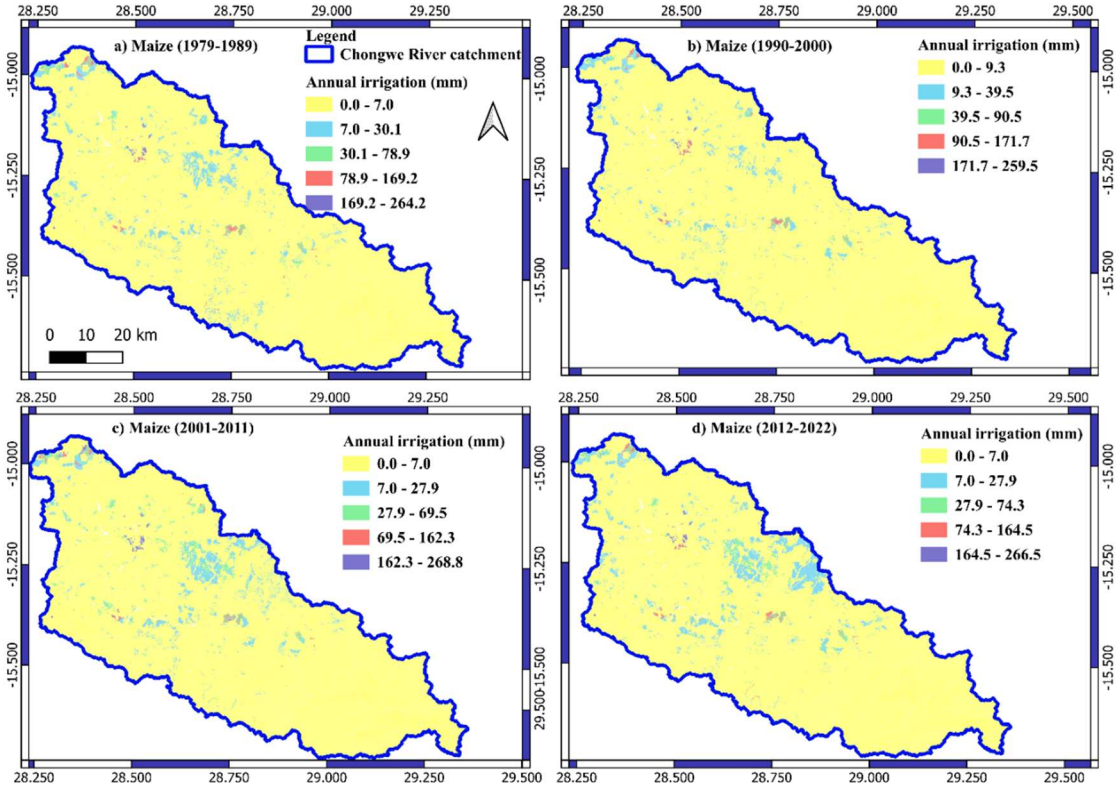


Abb. 3: Räumliche Verteilung der simulierten jährlichen Bewässerung für Mais im EZG des Chongwe-Flusses für die Zeiträume: (a) 1979–1989, (b) 1990–2000, (c) 2001–2011 und (d) 2012–2022.

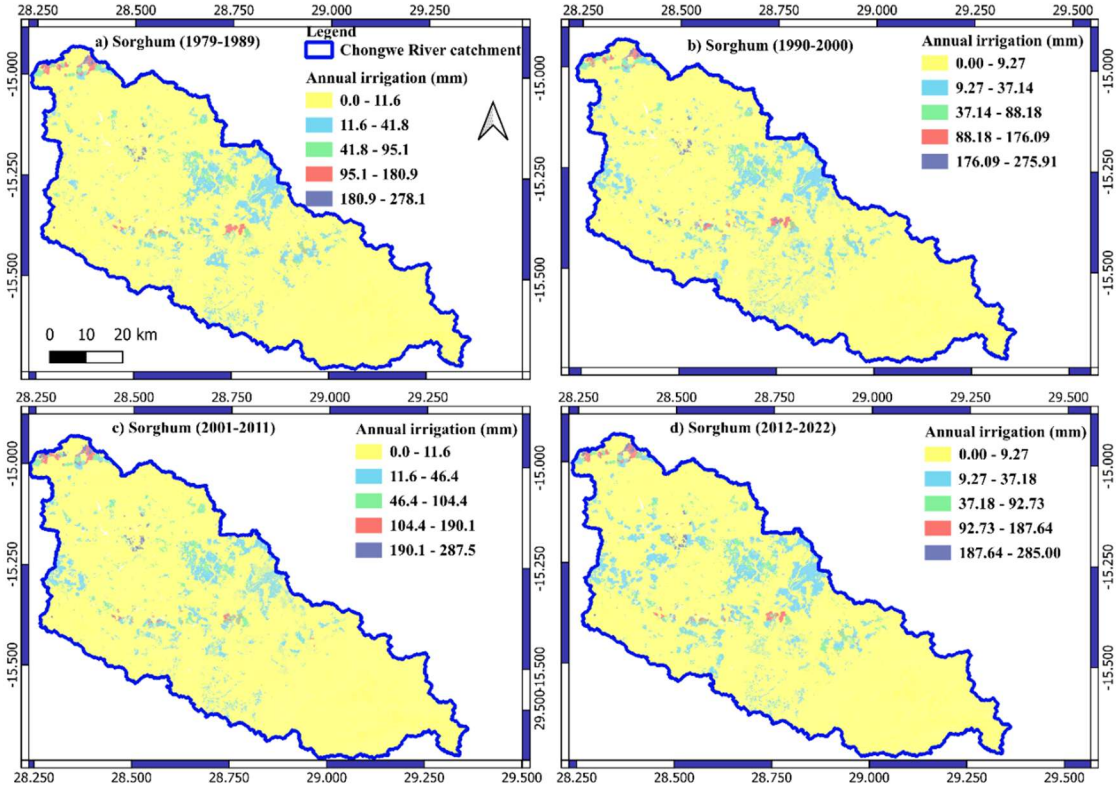


Abb. 4: Räumliche Verteilung der simulierten jährlichen Bewässerung für Sorghum im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses für die Zeiträume: (a) 1979–1989, (b) 1990–2000, (c) 2001–2011 und (d) 2012–2022.

Die tatsächliche Evapotranspiration liegt in allen Szenarien in einem vergleichsweise engen Bereich von etwa 430 bis 535 mm pro Jahr. Die Unterschiede zwischen den Kulturen bleiben in der Regel auf 10 bis 20 mm pro Jahr begrenzt, was darauf hinweist, dass die Evapotranspiration im Untersuchungsgebiet überwiegend durch die verfügbare Bodenfeuchte und weniger durch artspezifische Unterschiede im Wasserverbrauch bestimmt wird. Dieses Verhalten ist typisch für wasserlimitierte Systeme (Fischer et al., 2007). Die zeitliche Dynamik der Evapotranspiration über alle Szenarien hinweg ist in Abbildung 5 dargestellt und zeigt eine starke Kopplung an interannuelle Klimavariabilität.

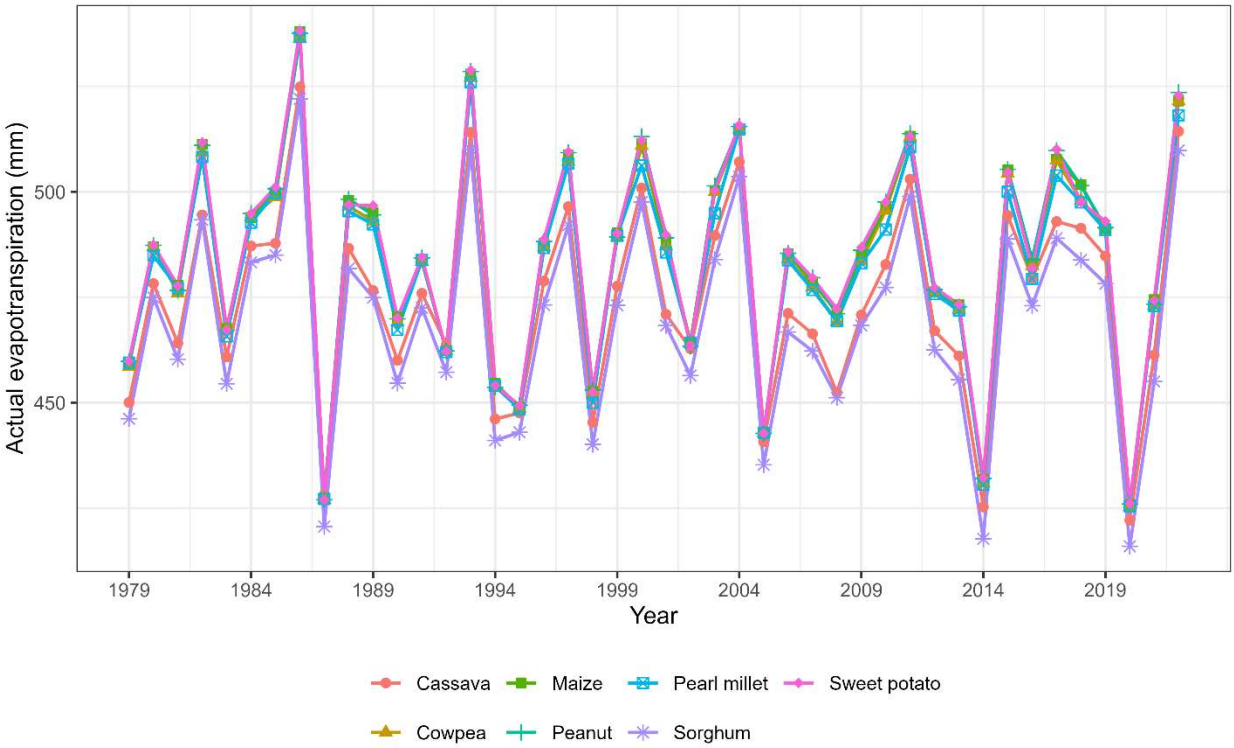


Abb. 5: Zeitliche Schwankungen der simulierten jährlichen tatsächlichen Evapotranspiration (ET) für verschiedene Kulturpflanzenarten im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses in Sambia im Zeitraum 1979–2022.

Das Bodenwasser zeigt ebenfalls eine ausgeprägte Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen und schwankt zwischen etwa 200 und 335 mm. In niederschlagsreichen Jahren steigt die Bodenwasserspeicherung deutlich an, während Dürreperioden zu signifikanten Rückgängen führen. Unterschiede zwischen den Kulturen bleiben im Vergleich zur klimatischen Variabilität gering, wobei Sorghum und Pearl Millet tendenziell etwas höhere Bodenwasserwerte aufweisen. Diese Entwicklung ist in Abbildung 6 zusammengefasst und bestätigt die Bedeutung der Niederschlagsdynamik für die Wasserverfügbarkeit (Benitez-Alfonso et al., 2023).

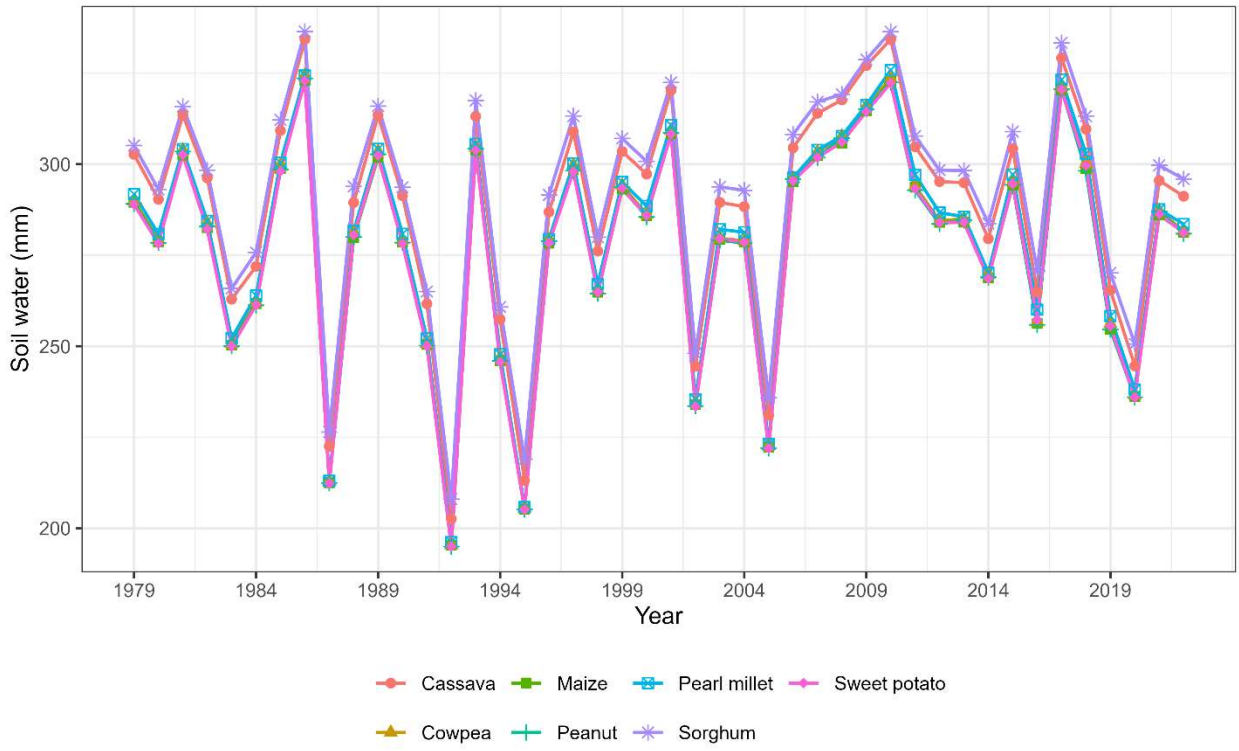


Abb. 6: Zeitliche Schwankungen des simulierten jährlichen Bodenwassers für verschiedene Kulturpflanzenarten im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses, Sambia, im Zeitraum 1979–2022.

Ein ähnliches Muster zeigt sich für die Perkolation als Indikator der Grundwasserneubildung. Die Werte variieren zwischen etwa 140 und 345 mm pro Jahr und reagieren stark auf feuchte und trockene Jahre. Die Unterschiede zwischen den Kulturen bleiben begrenzt, was darauf hinweist, dass die Grundwasserneubildung primär durch Niederschlagsereignisse gesteuert wird (Ndehedehe et al., 2018). Die interannuelle Variabilität der Perkolation ist in Abbildung 7 dargestellt.

Der deutlichste Einfluss der Kulturwahl zeigt sich im Bewässerungsbedarf. Obwohl das Einzugsgebiet überwiegend regenabhängig ist, variieren die Zusatzwassermengen erheblich zwischen den Szenarien. Die mittleren Bewässerungsanforderungen liegen zwischen etwa 1,0 und 2,6 mm pro Jahr. Mais und Cassava weisen die höchsten Werte auf und überschreiten häufig 2,0 mm pro Jahr, während Sorghum, Pearl Millet und Cowpea typischerweise nur etwa 1,0 bis 1,7 mm pro Jahr benötigen. Dies entspricht einer Reduktion des Bewässerungsbedarfs um etwa 40 bis 60 % im Vergleich zu maisdominierten Systemen. Die zeitliche Entwicklung des Bewässerungsbedarfs ist in Abbildung 8 dargestellt und zeigt deutlich erhöhte Werte in Trockenperioden, insbesondere Anfang der 1990er Jahre und Mitte der 2010er Jahre. Die räumliche Konzentration der Bewässerung wird zusätzlich durch die Karten für Mais (Abbildung 3) und Sorghum (Abbildung 4) veranschaulicht. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit regionalen Studien zur Wassernutzungseffizienz trockenheitstoleranter Kulturen (Abdoulaye et al., 2021).

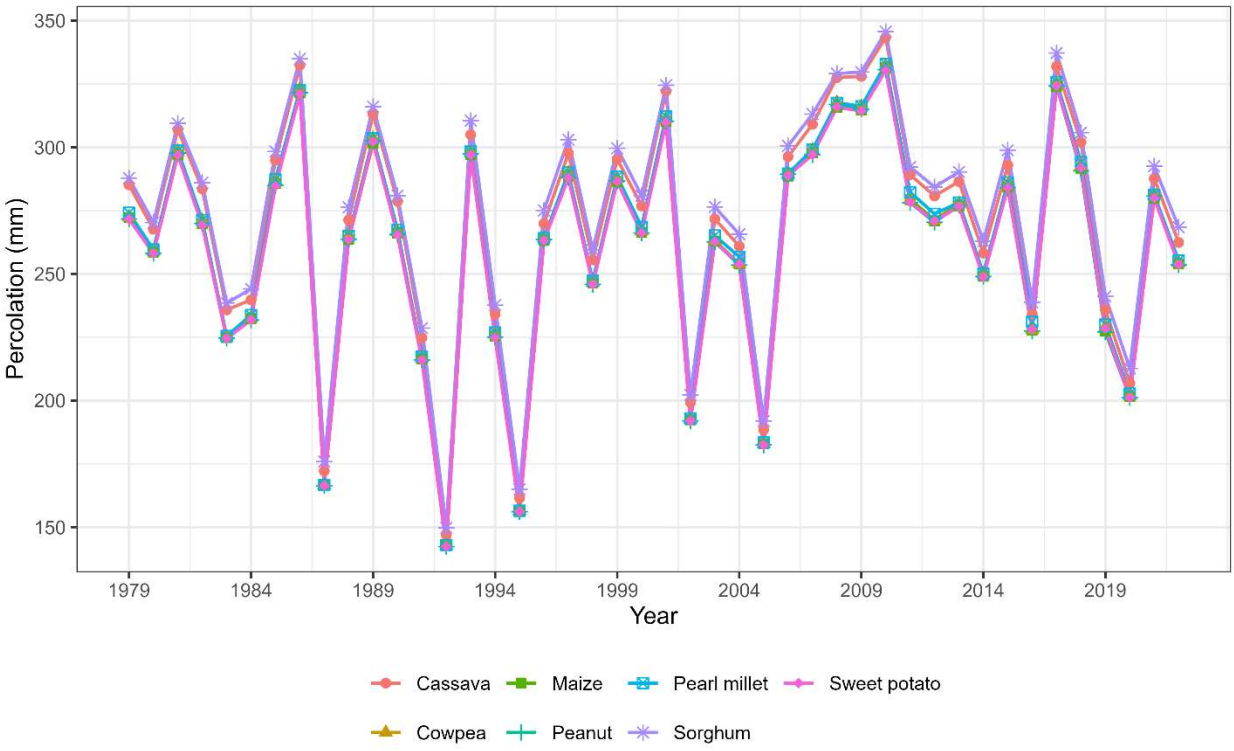


Abb. 7: Zeitliche Schwankungen der simulierten jährlichen Versickerung für verschiedene Kulturpflanzenarten im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses, Sambia, im Zeitraum 1979–2022.

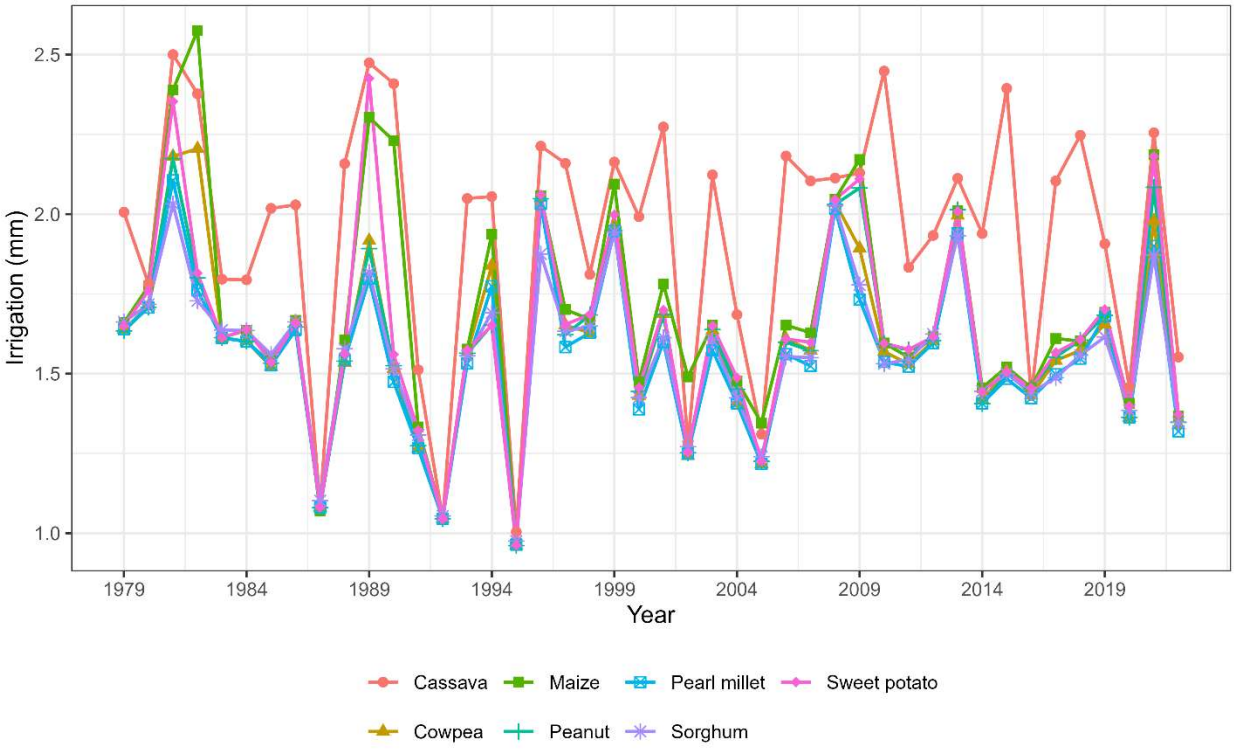


Abbildung 8. Zeitliche Schwankungen der simulierten jährlichen Bewässerung für verschiedene Kulturpflanzenarten im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses, Sambia, im Zeitraum 1979–2022.

Auch hinsichtlich der landwirtschaftlichen Produktivität ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Kulturen. Die simulierten mittleren Erträge betragen etwa 1,8 t/ha für Mais, 1,6 t/ha für Sorghum

und 1,5 t/ha für Pearl Millet, während Leguminosen und Wurzelkulturen Werte zwischen etwa 0,6 und 1,2 t/ha erreichen. Trotz geringfügig niedrigerer Erträge erreichen Sorghum und Pearl Millet etwa 85–90 % des Maisertrags, weisen jedoch eine deutlich geringere interannuelle Variabilität sowie einen reduzierten Bewässerungsbedarf auf. Die zeitliche Entwicklung der Erträge ist in Abbildung 9 dargestellt und zeigt, dass klimaresistente Kulturen stabilere Produktionsmuster unter variablen klimatischen Bedingungen aufweisen. Insgesamt deutet dies auf eine höhere Wasserproduktivität und Resilienz dieser Kulturen hin (Waha et al., 2013).

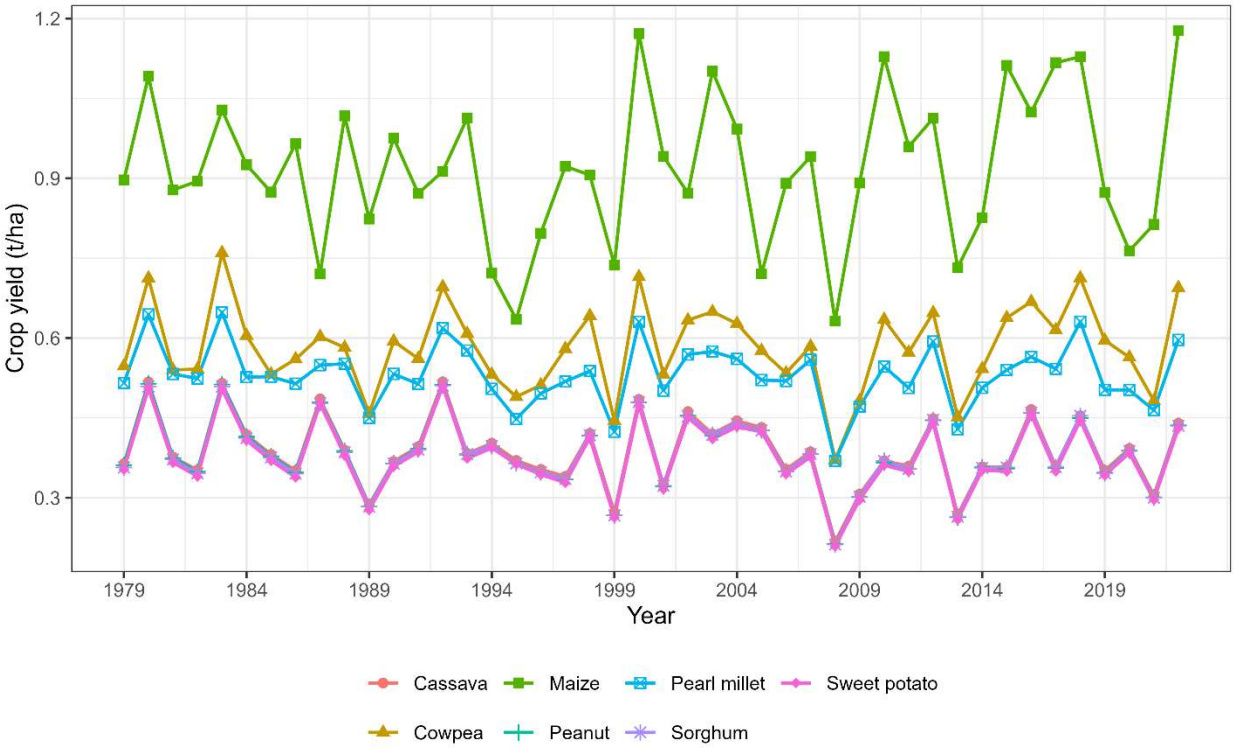


Abb. 9: Zeitliche Schwankungen der simulierten jährlichen Ernteerträge für verschiedene Kulturpflanzenarten im Einzugsgebiet des Chongwe-Flusses in Sambia im Zeitraum 1979–2022.

## 2.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die hydrologische Dynamik des Chongwe-Einzugsgebiets in erster Linie klimatisch gesteuert wird. Die beobachtete Zunahme der Temperaturen sowie der potenziellen Evapotranspiration führt zu einer erhöhten atmosphärischen Wasserentnahme und verstärkt insbesondere in Trockenjahren den Wasserstress. Dies spiegelt sich deutlich in den zeitlichen Schwankungen der Evapotranspiration (Abbildung 5) sowie des Bodenwassers (Abbildung 6) wider, die eng mit der interannuellen Niederschlagsvariabilität gekoppelt sind. Ähnliche Zusammenhänge zwischen Klimavariabilität und Wasserhaushaltskomponenten wurden auch für andere semi-aride Regionen beschrieben (Kanema & Gumindoga, 2022; Suter, 2022).

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass die Wahl der Kulturpflanzen die Gesamtwasserbilanz auf Einzugsgebietsebene nur begrenzt beeinflusst. Die Unterschiede in Evapotranspiration, Bodenwasser und Perkolation bleiben im Vergleich zur klimatischen Variabilität relativ gering, wie die zeitlichen

Entwicklungen dieser Größen verdeutlichen (Abbildung 5–7). Dennoch hat die Kulturwahl einen erheblichen Einfluss auf den landwirtschaftlichen Wasserverbrauch, insbesondere auf den Bewässerungsbedarf, der als sensitivster Parameter auf Managementänderungen reagiert. Die deutlichen Unterschiede zwischen den Szenarien werden in der zeitlichen Entwicklung der Bewässerung (Abbildung 8) sowie in den räumlichen Mustern für ausgewählte Kulturen, insbesondere Mais (Abbildung 3) und Sorghum (Abbildung 4), sichtbar.

Die simulationsbasierten Vergleiche zeigen, dass klimaresistente Kulturen wie Sorghum, Pearl Millet, Cowpea und Erdnuss deutlich geringere Bewässerungsmengen benötigen als Mais oder Cassava. Während Mais häufig Bewässerungswerte von über 2,0 mm pro Jahr erreicht, bleiben diese bei trockenheitstoleranten Kulturen meist unter 1,7 mm pro Jahr. Diese Reduktion des Bewässerungsbedarfs um etwa 40–60 % entspricht den Ergebnissen regionaler Studien zur Wassernutzungseffizienz verschiedener Kulturpflanzen (Abdoulaye et al., 2021; Cooper & Noguer, 2013). Gleichzeitig zeigen diese Kulturen stabilere hydrologische Reaktionen über trockene und feuchte Jahre hinweg, was auf eine höhere Resilienz gegenüber klimatischer Variabilität hinweist. Sorghum weist dabei die günstigste Kombination aus vergleichsweise hohen Erträgen und geringem Wasserbedarf auf, während Pearl Millet ähnliche Vorteile mit leicht höherer Variabilität zeigt.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass Perkolation und Bodenwasser primär durch Niederschlagsverhältnisse gesteuert werden und weniger durch die Kulturwahl beeinflusst werden. Dies wird durch die starke interannuelle Variabilität dieser Größen unterstrichen (Abbildung 6 und 7) und stimmt mit Erkenntnissen aus anderen semi-ariden Einzugsgebieten überein, in denen Grundwasserneubildung überwiegend durch intensive Niederschlagsereignisse bestimmt wird (Ndehedehe et al., 2018). Eine Substitution von Mais durch klimaresistente Kulturen führt daher nicht zu grundlegenden Veränderungen der Grundwasserneubildung, kann jedoch die landwirtschaftliche Wasserentnahme deutlich reduzieren.

Der zentrale Beitrag der Kulturdiversifizierung für das Wassermanagement liegt somit nicht in einer Veränderung der natürlichen Wasserbilanz, sondern in der Reduktion des anthropogenen Drucks auf die Wasserressourcen. Durch die Kombination aus geringerem Bewässerungsbedarf und stabilerer Produktion bieten klimaresistente Kulturen ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz und zur Erhöhung der Resilienz landwirtschaftlicher Systeme unter zunehmend variablen klimatischen Bedingungen (Omotoso et al., 2023; Waha et al., 2013).

## 2.6 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass das Chongwe-Einzugsgebiet ein stark klimadominiertes hydrologisches System ist, in dem steigende Temperaturen und höhere evaporative Nachfrage die Wasserverfügbarkeit zunehmend einschränken. Vor diesem Hintergrund bietet die Diversifizierung maisdominierter Anbausysteme mit klimaresistenten Kulturen ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz und der landwirtschaftlichen Resilienz. Besonders Sorghum erweist sich als die hydrologisch günstigste Alternative zu Mais, da diese Kultur einen vergleichsweise hohen Ertrag bei gleichzeitig geringem Bewässerungsbedarf und stabilen Wasserhaushaltskomponenten aufweist. Auch Pearl Millet, Cowpea und Erdnuss zeigen günstige Eigenschaften und eignen sich als Bestandteile diversifizierter, klimaangepasster Anbausysteme.

Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass eine partielle Substitution von Mais durch Sorghum, Hirse, Leguminosen und ausgewählte Wurzelkulturen die Wasserentnahme im Einzugsgebiet deutlich reduzieren kann, ohne die Produktivität im gleichen Maße zu verringern. Damit liefert die Studie eine belastbare Grundlage für die Entwicklung standortspezifischer Anpassungsstrategien und für ein nachhaltigeres Wasserressourcenmanagement im Chongwe-Einzugsgebiet.

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten entsprachen den im Projektantrag dargelegten Ausführungen und waren in vollem Umfang notwendig und angemessen, um die Projektziele zu erreichen.

## 4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Ziel der Arbeiten der FUB im Rahmen des Forschungsprogramms SASSCAL 2.0 geförderten Projektes FoSReCs („Verbesserung der Ernährungssicherheit durch die Integration klimaresistenter Pflanzenkulturen in maisbasierte Anbausysteme bei Kleinbauern in Sambia und Namibia“) war die Entwicklung eines hydrologischen Modells zur modellbasierten Anpassung landwirtschaftliche Anbausysteme an den zu erwartenden Klimawandel. Genutzt wurde hierfür das SWAT+-Modell mit der Möglichkeit zur Bewertung und Anpassung regionaler landwirtschaftlicher Anbauverfahren. Es handelt sich daher nicht um eine isolierte Bewertung einzelner Wasserhaushaltskomponenten, sondern um eine transdiziplinäre Bewertung potenzieller Anbauverfahren für die Region unter Berücksichtigung der aktuellen ländlichen Nutzungsverhältnisse. Gemeinsam mit Landwirten und Behörden wurde der aktuelle Zustand erfasst und hinsichtlich möglicher neuer Sorten und Anbauverfahren modellbasiert bewertet. Zudem wurden lokale und kommerzielle Landwirte interviewt, um Informationen zu Anbaukulturen, Fruchtfolgen und Bewässerungsquellen zu gewinnen.

Die unsichere Ernährungslage in der Region südliches Afrika ist auf den Klimawandel, geringere Wasserverfügbarkeit, abnehmende Bodenfruchtbarkeit, eine geringe Diversifizierung der Pflanzenproduktion sowie Schädlinge und Nachernteverluste zurückzuführen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen und um die Bewässerung in der Landwirtschaft und die Wasserversorgung der Bevölkerung in Sambia langfristig zu sichern, wird von Seiten der dortigen Behörden zurzeit ein Wassersicherheitskonzept erarbeitet. In dieser Studie wird auch der Ansatz der gebietsspezifischen Anbaudiversifizierung (Area Specific Crop Diversification - ASCD) verfolgt, bei dem der Anbau von drei oder mehr verschiedene Kulturen in einem Gebiet gefördert werden. Neben der Förderung dürreresistenter Kulturen werden im Rahmen dieses Konzeptes klimaangepasste landwirtschaftliche Praktiken (z.B. Beregnungsverfahren) gefördert, um die Auswirkungen von Dürren auf die Kulturen zu mildern. Die modellbasierte Bewertung der Eignung von Kulturpflanzen in ausgewählten Gebieten ist daher für die Entscheidungsträger und Landnutzer vor Ort von immenser Bedeutung. Praktikable und belastbare Ergebnisse erleichtern auch die notwendige Erschließung neuer, potenzieller Märkte für die neuen Kulturen z.B. durch lokale Marktentwicklungsplattformen.

Das SWAT+-Modell bietet durch die Integration verschiedener Datensätze - einschließlich Landnutzung, Bodeneigenschaften, Topografie und Klimadaten - einen umfassenderen und funktionalen Ansatz für das Wasserressourcenmanagement. Diese ganzheitliche Perspektive ermöglicht genaue Vorhersagen und eine effiziente Ressourcenzuweisung landwirtschaftlicher Praktiken und unterscheidet sich damit von bisher verfügbaren Modellen. Die Anwendbarkeit des

Modells erstreckt sich auf verschiedene Nutzergruppen und Branchen, einschließlich Landwirtschaftsplanern, Wasserressourcenmanagern und Behörden. Seine Fähigkeit, künftige Klimaszenarien zu simulieren und dürreresistente Kulturen zu bewerten, macht es zu einem wertvollen Hilfsmittel für die Entwicklung nachhaltiger, klimaangepasster landwirtschaftlicher Nutzung und spielt somit für die Weiterentwicklung der nationalen Ernährungssicherheitspolitik eine wichtige Rolle.

Auf Grundlage der Zusammenarbeit mit den Kollegen des Zambia Agricultural Research Institute (ZARI) und der Water Resources Management Authority (WARMA) wurde das Wissen über die lokalen hydrologischen Verhältnisse, sowie die Kenntnisse über aktuelle Anbauverfahren und sozio-ökonomischen Verhältnisse in das Modell integriert. Auf der anderen Seite kann dieses regional angepasste Modell von den Kollegen der genannten Institute und Behörden genutzt werden um kontinuierlich Empfehlungen für einen nachhaltigen Umgang mit Wasser in der Landwirtschaft weiterzuentwickeln. Diese können von den nationalen Behörden in ein nationales Wassersicherheitsprogramm zusammengefasst werden, das die notwendigen Schritte für ein effizientes Wassermanagement, angepasst an die lokalen Gegebenheiten, beinhaltet.

## 5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Literatur- und Informationsrecherchen wurden regelmäßig durchgeführt und Informationen unter den Projektpartnern soweit möglich ausgetauscht. Sie sind Voraussetzung für den wissenschaftlichen Erfolg des Projekts, haben aber dessen Durchführung oder Ablauf nicht maßgeblich beeinflusst.

## 6 Veröffentlichungen

Eine Präsentation der Modellergebnisse erfolgte auf der AGU im Dezember 2025 sowie auf der SASSCAL 2.0-Abschlussveranstaltung in Lusaka.

## 7 Literaturverzeichnis

Abdoulaye, A. O., Lu, H., Zhu, Y., & Hamoud, Y. A. (2021). Future Irrigation Water Requirements of the Main Crops Cultivated in the Niger River Basin. Atmosphere, 12(4), 439. https://www.mdpi.com/2073-4433/12/4/439

Allan, R., Pereira, L., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 (Vol. 56).

Bäumle, R., Nick, A. S., Kang'omba, S., Klinge, H., Günther, A., Hennings, V. (2013). Groundwater Resources of the Mwembeshi and Chongwe Catchments including the Lusaka Region-A Brief Description of Physiography, Geology, Climate, Hydrology and the Groundwater Systems of the Area.

Benitez-Alfonso, Y., Soanes, B. K., Zimba, S., Sinanaj, B., German, L., Sharma, V., Bohra, A., Kolesnikova, A., Dunn, J. A., Martin, A. C., Khashi u Rahman, M., Saati-Santamaría, Z., García-Fraile, P., Ferreira, E. A., Frazão, L. A., Cowling, W. A., Siddique, K. H. M., Pandey, M. K., Farooq, M., Foyer, C. H. (2023). Enhancing climate change resilience in agricultural crops. Current Biology, 33(23), R1246-R1261. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.10.028

Bieger, K., Arnold, J., Rathjens, H., White, M., Bosch, D., Allen, P., Volk, M., Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, A Completely Restructured Version of the Soil and Water Assessment Tool.

JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 53, 115-130. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482

Birch, E. L. (2014). A Review of “Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability” and “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Journal of the American Planning Association, 80(2), 184-185. https://doi.org/10.1080/01944363.2014.954464

Chisola, M. N., & Kuraz, M. (2016). Patterns and Implications of Hydrologic Regime Change in Chongwe River, Zambia. Journal of Geography and Geology, 8, 1. https://doi.org/10.5539/jgg.v8n3p1

Cooper, P., & Noguer, M. (2013). Climate Change Adaptation Strategies in Sub-Saharan Africa: Foundations for the Future. https://doi.org/10.5772/55133

FAO. (2025). The State of the World’s Land and Water Resources for Food and Agriculture 2025 – The potential to produce more and better. Rome, Italy: FAO

Fischer, G., Tubiello, F. N., van Velthuizen, H., Wiberg, D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. Technological Forecasting and Social Change, 74(7), 1083-1107. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.021

Fosso Djoumessi, Y., & Cyrille Bergaly, K. (2023). Water Use and Agricultural Productivity Growth in Sub-Saharan Africa Water Use and Agricultural Productivity Growth in Sub-Saharan Africa.

Hardon, J. J. (1998). Lost crops of Africa, vol 1, Grains. Development and Change, 29(3), 581-582. <Go to ISI>://WOS:000074530600012

Kanema, E. M., & Gumindoga, W. (2022). Effects of changing climate on the groundwater potential: A case of Chongwe and Rufunsa Districts along the Chongwe River Catchment, Zambia. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 127, 103192. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103192

Lobell, D. B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J. (2011). Climate Trends and Global Crop Production Since 1980. Science, 333(6042), 616-620. https://doi.org/10.1126/science.1204531

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. D., Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the Asabe, 50. https://doi.org/10.13031/2013.23153

Ndehedehe, C. E., Okwuashi, O., Ferreira, V. G., Agutu, N. O. (2018). Exploring evapotranspiration dynamics over Sub-Sahara Africa (2000-2014). Environmental Monitoring and Assessment, 190(7), 400. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6780-6

Omotoso, A. B., Letsoalo, S., Olagunju, K. O., Tshwene, C. S., Omotayo, A. O. (2023). Climate change and variability in sub-Saharan Africa: A systematic review of trends and impacts on agriculture. Journal of Cleaner Production, 414, 137487. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137487

Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S. P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J., Qiang, Z. (2010). Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. Agricultural Water Management, 97(4), 543-550. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.009

Suter, G. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Integrated Environmental Assessment and Management, 18(4), 1117-1118. <Go to ISI>://WOS:000817903300026

Tena, T. M., Mwaanga, P., Nguvulu, A. (2019). Hydrological Modelling and Water Resources Assessment of Chongwe River Catchment using WEAP Model. Water, 11(4). https://doi.org/ARTN 839

10.3390/w11040839

Tena, T. M., Mwaanga, P., Nguvulu, A. (2019). Impact of Land Use/Land Cover Change on Hydrological Components in Chongwe River Catchment. Sustainability, 11(22), 6415. https://www.mdpi.com/2071-1050/11/22/6415

Thomas, T. S., Robertson, R. D., Strzepek, K., Arndt, C. (2022). Extreme Events and Production Shocks for Key Crops in Southern Africa Under Climate Change. Frontiers in Climate, 4. https://doi.org/10.3389/fclim.2022.787582

Waha, K., Müller, C., Bondeau, A., Dietrich, J. P., Kurukulasuriya, P., Heinke, J., Lotze-Campen, H. (2013). Adaptation to climate change through the choice of cropping system and sowing date in sub-Saharan Africa. Global Environmental Change, 23(1), 130-143.