

BMBF SPACES Schlussbericht (öffentliche Fassung)

**Teilprojekt 1: Koordination, Datenanalyse (AP1),  
sozioökonomische Untersuchungen (AP5))**

**Verbundprojekt:** ARS AfricaE - Adaptive Resilienz südafrikanischer Ökosysteme

**Zuwendungsempfänger:** Thünen-Institut für Agrarklimaschutz (TI-AK),  
Braunschweig



**Förderkennzeichen:** 01LL1303A

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.08.2014 - 31.01.2018

**Berichtszeitraum:** 01.08.2014 - 31.01.2018

**Verfasser:** Christian Brümmer, Wayne Twine, Mari Bieri

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung zu</b>	<b>2</b>
1.1	Aufgabenstellung . . . . .	2
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde . . . . .	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens . . . . .	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde . . . . .	5
1.4.1	Eddy-Kovarianz-Flussmessungen (AP1) . . . . .	5
1.4.2	Nutzung von Savannen-Ökosystemen (AP5) . . . . .	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>7</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im Detail . . . . .	7
2.1.1	EC-Flussmessungen und Datenintegration . . . . .	7
2.1.2	Sozioökonomische Erhebungen (Arbeitspaket 5) . . . . .	15
2.2	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses</b>	<b>18</b>
	<b>Literatur</b>	<b>20</b>
<b>A</b>	<b>Appendices</b>	<b>23</b>
A.1	Akronyme . . . . .	23
A.2	Standortbeschreibung Tabelle . . . . .	26

# Kurze Darstellung zu

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt Adaptive Resilienz südafrikanischer Ökosysteme - *Adaptive Resilience of Southern African Ecosystems* (ARS AfricaE) hat ein Netzwerk von Forschungsclustern aufgebaut, um die Auswirkungen von menschlichen Eingriffen und/oder Landnutzungsänderungen auf den Wasser- und Kohlenstoffkreislauf und deren Wechselwirkung entlang eines Trockengradienten zu untersuchen. Die Hauptaufgabe des Teilprojekts 1 (TP1) bestand darin, die zentrale Infrastruktur für das Projekt aufzubauen, indem Eddy-Kovarianz - *Eddy Covariance* (EC) Messtürme an den Messstellen errichtet und mit mikrometeorologischen Instrumenten für Flussmessungen von Spurengasen zwischen Savannen-Ökosystemen und der Atmosphäre ausgestattet wurden. Neben der Verarbeitung, Analyse und Bereitstellung von EC-Daten für die anderen Teilprojekte war Thünen-Institut für Agrarklimaschutz (TI-AK) für die übergeordnete Projektkoordination verantwortlich. Darüber hinaus war TI-AK für die Koordination und Vergabe der Unteraufträge aller südafrikanischen Mitarbeiter verantwortlich; ein Überblick über die Ergebnisse der südafrikanischen Kollaborateure ist in diesem Bericht enthalten. Ein ausführlicherer Bericht des Arbeitspaket (AP)5 (WITS) über sozioökonomische Erhebungen zur Brennholznutzung ist ebenfalls in diesem Bericht enthalten.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Arbeitsgruppe von PI C. Brümmer am TI-AK verfügt über langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Anwendung von EC-Techniken. Der Aufbau der Forschungscluster in Südafrika erforderte die Fähigkeit, maßgeschneiderte Lösungen für Sicherheitsfragen, elektrische Energieversorgung und Wartungsarbeiten in abgelegenen Gebieten zu entwickeln. Das Projekt profitierte von den Mitgliedern des ARS AfricaE-Konsortiums, die bereits Erfahrungen mit der Anwendung von EC-Techniken an ähnlichen Standorten, einschließlich des Kruger National Park (KNP) und der Kataba Forest Reserve in Sambia, im Rahmen mehrerer nationaler und internationaler Projekte gesammelt hatten.

Die TI-AK Teilprojektförderung ermöglichte die Einstellung eines Ingenieurs / Technikers, der für den Aufbau und Unterhalt der Forschungsinfrastrukturen in Südafrika zwingend benötigt wurde. Die erfolgreiche Bewältigung der Projektkoordination wurde durch die Einstellung eines Postdoktoranden ermöglicht. Mit einem Stipendium des Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) wurde ein Doktorand beauftragt, die Flussdaten zu verarbeiten und zu analysieren, während die begleitende Betreuung durch PI Brümmer als Sachleistung vom TI-AK zur Verfügung gestellt wurde.

---

Darüber hinaus beruhte der erfolgreiche Abschluss des Projekts auf der guten Zusammenarbeit mit den südafrikanischen Partnern, die eine wichtige Rolle bei der Planung, dem Aufbau und der Wartung der Infrastrukturen spielten. Die Rekrutierung eines DAAD-geförderten Doktoranden sowie zusätzliche Mittel zur Durchführung von Feldarbeiten waren für die Durchführung der sozioökonomischen Erhebungen und das Monitoring der Brennholzgewinnung im Rahmen des AP5 (University of the Witwatersrand (WITS)) unerlässlich.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeit von TP1 begann mit der Identifizierung der deutschen und südafrikanischen Partner bereits im Jahr 2013, als die Idee zum Aufbau eines gemeinsamen multidisziplinären Konsortiums durch den ursprünglichen Projektkoordinator W.L. Kutsch sowie C. Brümmer während der Teilnahme am Savanna Science Network Meeting in Skukuza, KNP, Südafrika, initiiert wurde. Gleichzeitig wurde die erste Forschungspartnerschaften zur Anpassung komplexer Prozesse im System Erde in der Region Südliches Afrika (SPACES)-Ausschreibung im Anschluss an das Deutsch-Südafrikanische Wissenschaftsjahr 2012 auf den Weg gebracht. Das Konsortium wurde so gegründet, dass jeder Partner Südafrikas mit seiner jeweiligen Expertise (d.h. Modellierung im regionalen bis kontinentalen Maßstab, agentenbasierte Modellierung, Fernerkundung, Sozioökonomie, Mikrometeorologie) einen deutschen Partner in seiner Fachrichtung hat. Die Antragsskizze sowie der Vollertrag wurden fristgerecht eingereicht und für den Projektstart im August 2014 bewilligt.

Zu den Aufgaben der Projektkoordination von TP1 gehörten die Berichterstattung, das Monitoring der Meilensteine, die Organisation von projektbezogenen Treffen und die Präsentation des gemeinsamen Projekts bei internationalen Veranstaltungen. Die Umsetzung des wissenschaftlichen Teils des Teilprojekts, einschließlich des Baus der EC-Infrastruktur und der Bereitstellung und Analyse von Flussdaten, wurde in drei Phasen erreicht:

1. **Vorbereitungsphase**, einschließlich der Auswahl der Clusterstandorte, der Einholung der Forschungsgenehmigungen sowie der Vorbereitung und der Installation der Messtürme. Die Auswahl der Clusterstandorte erfolgte zur Identifizierung geeigneter Flächen entlang eines Feuchtigkeitsgradienten, wobei jeder Cluster mindestens zwei Standorte umfasst, die unterschiedliche Landnutzungstypen repräsentieren ("naturnah und "bewirtschaftet"). Die Auswahl der Karoo-standorte erfolgte unmittelbar im Anschluss an das ARS AfricaE-Jahrestreffen 2014 bei einem Feldbesuch mit dem südafrikanischen Partner *Grootfontein Agricultural Development Institute resp. The Small Stock Research Trust (GADI)*. Die Zugangsberechtigungen und Sicherheitsmaßnahmen wurden unmittelbar nach der Auswahl geklärt. Die Planung und Instrumentierung der Karoo-Standorte wurde im April 2015 begonnen, und die Messtürme wurden im September / Oktober 2015 errichtet und in Betrieb genommen. Nach dem ursprünglichen Plan wurde die sambische Forschungsstätte Mongu im November 2014 besucht; die Zusammenarbeit konnte jedoch wegen einer Änderung der Zugehörigkeit des sambischen Wetterdienstes sowie der damit verbundenen Modifikation in den Kooperationsvorschriften mit ausländischen Partnern nicht realisiert werden. Die bereits bestehenden Messturmstandorte am KNP (Skukuza und Malopeni) wurden im Jahr 2015 besucht, als auch die Vegetationsaufnahme für den Standort Skukuza zur Kalibrierung von Satellitenprodukten durchgeführt wurde. Die Verhandlungen über den möglichen Standort des Messturms in Agincourt sowie die Auswahl des Standortes auf dem Gelände der Universität Venda wurden ebenfalls im Jahr 2015 eingeleitet. Der Messturm

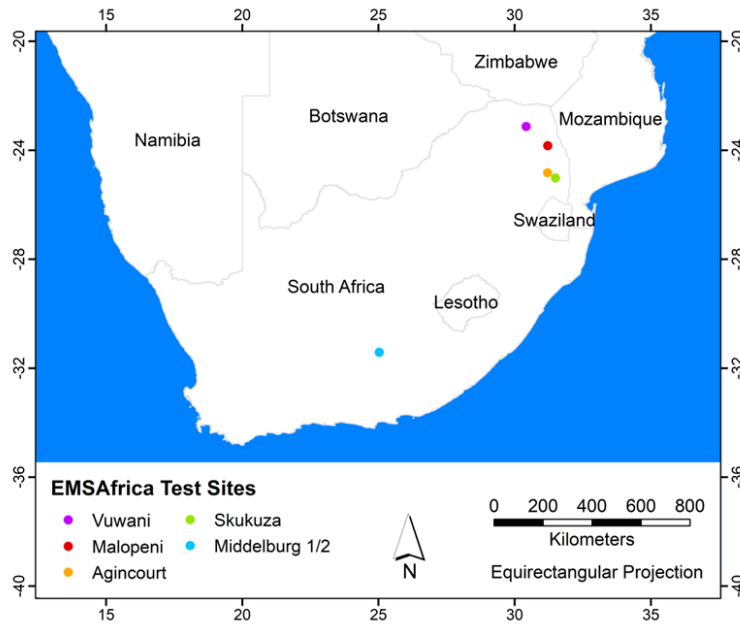


Abbildung 1.1: Die ARS AfricaE Beobachtungsstandorte in Südafrika.

in Agincourt wurde im Frühjahr 2016 errichtet. Die Unterstützung durch den Projektpartner W. Twine (WITS) war in Agincourt von entscheidender Bedeutung, insbesondere bei den Kontakten mit den traditionellen Dorfvorstehern und der lokalen Regierung. Der Vuwani-Messturm wurde im Juni/Julii 2016 errichtet. (Siehe Abbildung 1.1 zu den Forschungsstandorten und Anhang A.2 für die Standortbeschreibungen).

Die Ausbildung von südafrikanischen Wissenschaftlern und Technikern wurde ebenfalls in die Vorbereitungsphase einbezogen (siehe Abschnitt "Capacity Building" unter 2.1).

2. **Installationsphase** der EC-Türme, einschließlich der Fertigstellung der Messturm-Infrastrukturen mit mikrometeorologischen Instrumenten für Messungen von Spurengasflüssen zwischen den Savannenökosystemen und der Atmosphäre (Abbildung 1.2).
3. **Betriebsphase**, einschließlich der Verarbeitung, Analyse und Integration der Daten, sowie kontinuierliche Wartung der Messtürme. Ständige, laufende Wartungsarbeiten sind hauptsächlich mit der Reinigung, Reparatur und Wiederherstellung gestohlener oder defekter Instrumente und der Entwicklung neuer, verbesserter Lösungen im Falle von Mess- und Kalibrationsproblemen verbunden. Die Datenanalyse, die Zusammenstellung der Ergebnisse und die Ableitung von Schlussfolgerungen wurde weitgehend von K. Mukwashi unter der Leitung von PI Brümmer und Prof. C. Thomas (Universität Bayreuth) durchgeführt. Herr Mukwashi wird seine Dissertation in der zweiten Hälfte des Jahres 2018 vorlegen; einige seiner wichtigsten Ergebnisse werden in Kapitel 2.1 vorgestellt.

Die im Rahmen des AP5 durchgeführten Arbeiten basieren auf quantitativen sozioökonomischen Erhebungen. Diese wurden von WITS in 580 ländlichen Haushalten am Forschungsstandort Agincourt im Jahr 2014 durchgeführt. Die Daten wurden gesammelt, um die Verwendung von Brennholz im Haushalt und die Verwendung von Kohle im Untersuchungsgebiet zu quantifizieren.



Abbildung 1.2: Einführung der Karoo-Tower-Infrastruktur in das ARS AfricaE-Konsortium durch den TI-AK-Ingenieur J.-P. Delorme (oben links); Einbau von Erdwärmesonden (unten links); Nahaufnahme des Vuwani Biomet-Systems (oben rechts); Aufarbeitung im Vuwani-Turm (unten rechts).

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

### 1.4.1 Eddy-Kovarianz-Flussmessungen (AP1)

Eddy-Kovarianz (EC) ist eine direkte und kontinuierliche mikrometeorologische Methode zur Messung von Stoffflüssen, die Untersuchungen von tageszeitlichen bis dekadischen Zeitskalen ermöglicht. Ein weiterer Vorteil der Technik ist, dass sie von weniger strengen Annahmen als andere (indirekte) Methoden abhängt. Abhängig von den atmosphärischen Bedingungen sind Flussmessungen repräsentativ für einen Durchmesser von bis zu etwa dem Hundertfachen der Sensorhöhe. Neben flachem Gelände und einem homogenen Anströmbereich erfordert die EC-Technik ein Ultraschallanemometer und einen Gasanalysator mit schnellen Reaktionszeiten (ab 10 Hz) sowie aerodynamisch kleinen Abmessungen. Durch Weiterentwicklungen der EC-Sensorik wurde der Wartungsaufwand und der Stromverbrauch reduziert. Dies hat den Betrieb von Messtürmen in abgelegenen Gebieten erleichtert und die Durchführung des Projektes ARS AfricaE ermöglicht.

Obwohl die meisten Savannengebiete für Ackerbau oder Beweidung genutzt werden, wurden in

---

diesen Gebieten nur wenige Studien mit CO<sub>2</sub>-Flussdaten durchgeführt (Räsänen et al., 2017); die meisten Daten stammen aus Naturschutzgebieten (Archibald et al., 2008). Zudem basieren die meisten EC-Studien auf Kampagnen und haben keine langfristige Perspektive (Ago et al., 2014; Archibald et al., 2008; Brümmer et al., 2008; Quansah et al., 2015; Räsänen et al., 2017; Tagesson et al., 2015; Tagesson et al., 2016; Veenendaal et al., 2004).

#### **1.4.2 Nutzung von Savannen-Ökosystemen (AP5)**

Holzbiomasse ist, in den meisten Gemeinden einschließlich der ländlichen Gebiete westlich des KNPs, die dominierende Energiequelle zum Kochen (Twine et al., 2003; Madubansi und Shackleton, 2007). Aufgrund der Armut sind diese Gemeinden nicht in der Lage, auf alternative Energiequellen umzusteigen, selbst wenn die Holzressourcen erschöpft sind. In der zentralen Lowveld-Region Südafrikas wurden erhebliche Veränderungen der Zusammensetzung und Struktur der Savanne infolge von der Brennholznutzung festgestellt (Higgins et al., 1999; Giannecchini et al., 2007; Fisher et al., 2012). Obwohl der Zusammenhang zwischen menschlichem Einfluss und der Zerstörung von Ökosystemen relativ gut verstanden wird, besteht nach wie vor Bedarf an der Entwicklung geeigneter Modelle zur Förderung der Widerstandsfähigkeit und der nachhaltigen Ressourcennutzung innerhalb dieser Systeme.

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die wichtigsten südafrikanischen Mitarbeiter von TI-AK waren *Council for Scientific and Industrial Research* (CSIR) (A. Mudau), GADI (J. du Toit) und University of Venda (UniVen) (Dr. V. Sankaran, Dr. E. Maluta). Die Rolle dieser Partner in der Vorbereitungs-, Installations- und Betriebsphase der EC-Türme war, wie unter Abschnitt 1.3. erläutert, von wesentlicher Bedeutung; außerdem spielte WITS (W. Twine) eine entscheidende Rolle bei der Vorbereitung, Einrichtung und Wartung des Turms in Agincourt.

Die Forscher und Techniker der Arbeitsgruppe von PI Brümmer am TI-AK unterstützten maßgeblich die Entwicklung der EC-Türme und -Instrumente, die Instandhaltung sowie die Verarbeitung und Analyse der EC-Daten.

Während der Projektlaufzeit von ARS AfricaE hat TI-AK ein erstes Abkommen zur Entwicklung und Etablierung einer Forschungsinfrastruktur-Kooperation mit der vom *Department of Science and Technology* (DST) finanzierten und von *South African Environmental Observation Network* (SAEON) betriebenen südafrikanischen Forschungsinfrastruktur *Expanded Freshwater and Terrestrial Environmental Observation Network* (EFTEON) und ihrem europäischen Pendant *Integrated Carbon Observation System* (ICOS) geschlossen. Darüber hinaus ist das Team sehr eng mit dem Horizon 2020 finanzierten Projekt *Supporting EU-African Cooperation on Research Infrastructures for Food security and Greenhouse gas observations* (SEACRIFOG) verbunden, das ebenfalls von der Arbeitsgruppe von PI Brümmer koordiniert wird.

Prof. Christoph Thomas von der Universität Bayreuth (UBT) ist wissenschaftlicher Betreuer des vom DAAD geförderten Promotionsvorhabens von K. Mukwashi. Herr Mukwashi erhält seinen Dokortitel von der UBT.

# Eingehende Darstellung

## 2.1 Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im Detail

### 2.1.1 EC-Flussmessungen und Datenintegration

Wie in Abschnitt 1.3 dargestellt, konzentrierte sich die Fertigstellung des wissenschaftlichen Teils von TP1 auf die Planung und den Bau der zentralen Infrastrukturen von ARS AfricaE und erfolgte in drei Phasen: Vorbereitungs-, Installations- und Betriebsphase. Die wichtigsten Ergebnisse von TP1 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Vier EC-Messtürme (Karoo/Middelburg 1, 2, Agincourt, Vuwani, Abbildung 2.1) wurden errichtet und mit Messinstrumenten ausgerüstet, um die bestehenden südafrikanischen Infrastrukturen zu ergänzen. Zwei bestehende EC-Messtürme (Skukuza, Malopeni) wurden an das Beobachtungsnetzwerk von ARS AfricaE angeschlossen.
- EC-Daten wurden anderen ARS AfricaE APs und der SASSCAL-Datenbank zur Verfügung gestellt und zur Kalibrierung und Parametrisierung von Vegetationsmodellen (AP2) verwendet.
- EC-Datenanalysen wurden mit Fernerkundungsdaten aus dem AP4 gekoppelt, um das Verständnis der klimatischen Faktoren zu verbessern, die Primärproduktion und Kohlenstoffaufnahme Potenzial in natürlichen und beweideten Savannenökosystemen beeinflussen.

#### EC Messtürme

**Skukuza und Malopeni:** Die beiden EC-Messtürme, die bereits im KNP existierten, bildeten die wichtigsten "naturnahen Standorte, d.h. "Referenzstandorte" für die Untersuchung der Auswirkungen des Landmanagements. Die Messtürme Skukuza und Malopeni werden vom CSIR instand gehalten. Diese Orte sind nur wenig von Menschen beeinflusst, da sie sich in einem geschützten Gebiet befinden. Der Skukuza-Messturm ist seit dem Jahr 2000 in Betrieb, der Malopeni-Turm seit 2007. Insbesondere der Standort Skukuza ist durch frühere Studien (z.B. Scholes et al., 2001) gut erforscht und dokumentiert.

**Agincourt/Bushbuckridge:** In Agincourt/Bushbuckridge wurde vom CSIR ein Messturmstandort eingerichtet, an dem ein relativ hoher menschlicher Einfluss (Dorf/Siedlung) vorherrscht. Dort werden ebenfalls langfristige sozioökonomische Studien von WITS durchgeführt. Die guten, langfristigen Verbindungen des südafrikanischen Kooperationspartners W. Twine (WITS) zu den lokalen Eliten



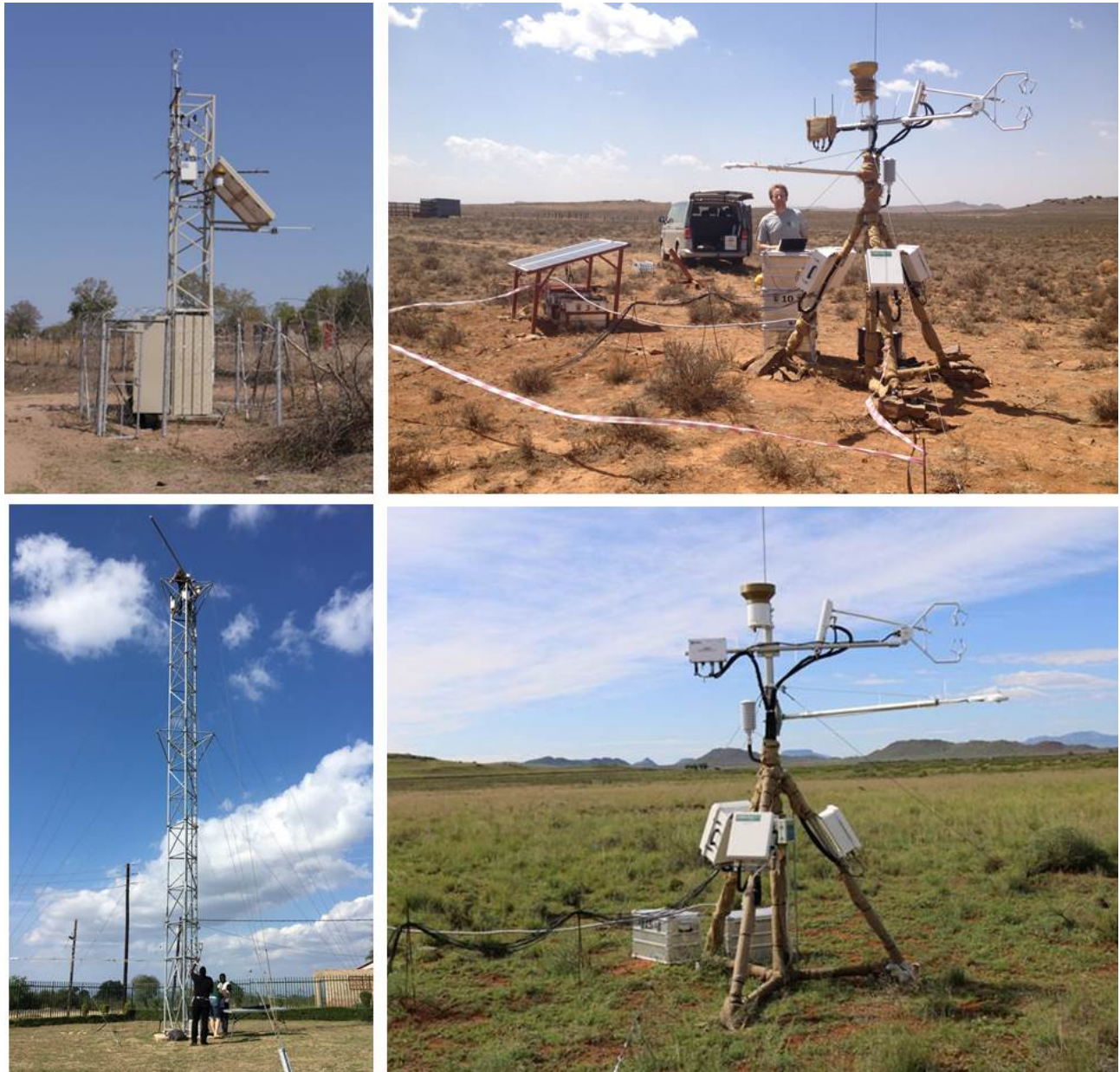


Abbildung 2.1: Die vier neu errichteten Eddy-Kovarianz-Messtürme: Agincourt (oben links), Vuwani (unten links), Karoo 1 (oben rechts) und Karoo 2 (unten rechts).

waren bei der Errichtung des Messturms und bei der Lösung von Sicherheitsproblemen von großem Nutzen. Dieser Forschungsstandort wird vom CSIR betreut.

**Vuwani:** Der nördlichste ARS AfricaE-Messstandort wurde von TI-AK und UniVen in einem vergleichsweise regenreichen Gebiet auf dem Gelände der UniVen am Vuwani Science Resource Centre errichtet. Der Messstandort wird vom UniVen-Team (Dr. E. Maluta, Herr S. Mathebe) betreut. Er befindet sich an einem sicheren, eingezäunten Ort auf dem Grundstück des Vuwani Science Resource Centre. Die Daten können für verschiedene Studentenprojekte an der UniVen verwendet werden. Der Standort Vuwani stellt eine stark vom Menschen veränderte, peri-urbane Umgebung dar.

---

**Karoo/Middelburg 1 und 2:** Die beiden Türme, die vom TI-AK-Team und GADI in Middelburg, Karoo, errichtet wurden, stellen mit durchschnittlich 372 mm Jahresniederschlag die trockensten Messstandorte dar. Der erste Standort steht für eine geringe Bewirtschaftung mit kontrollierter Beweidung. Der zweite Forschungsstandort wurde in der Vergangenheit überweidet, seit etwa acht Jahren ruht die Beweidung hier jedoch (siehe Abb. 2.1 und Anhang A.2). Die bisherigen Auswirkungen der Überweidung sind in der Vegetation noch immer durch den geringen Anteil an nahrhaften Gräsern erkennbar.

### **Bereitstellung und Integration von EC-Messturdaten**

Für die Kalibrierung und Validierung der Vegetationsmodelle durch AP2 wurden EC-Flussdaten von den ARS AfricaE-Messtürmen bereitgestellt und verwendet. Die gemessenen Kohlenstoffflüsse wurden mit modellierten Werten verglichen, um die im adaptiven Dynamic Global Vegetation Model (aDGVM) dargestellten Prozesse besser zu verstehen und zu interpretieren. Weitere Pläne zur Modellkalibrierung und -entwicklung mit EC-Daten sowie gemeinsame Pläne für zukünftige Arbeiten zur Abschätzung des Kohlenstoffhaushalts von Savannenökosystemen unter verschiedenen Emissions- und Landmanagementszenarien werden im Rahmen des Nachfolgeprojekts EMS-Africa in Zusammenarbeit der Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt (JWGU)/Senckenberg Biodiversität und Klima- Forschungszentrum (SBiK-F) und TI-AK realisiert. EC-Flussdaten werden auch in ökophysiologischen Studentenprojekten an der Stellenbosch University (SU) verwendet. In einem weiteren Nebenprojekt wurden EC-Flussdaten und meteorologische Zeitreihen mittels Wavelet-Analyse mit AP3 (Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)) auf Skalenzugehörigkeit und Periodizität überprüft.

Das TI-AK-Team führt die kontinuierliche Verarbeitung, Analyse und Integration der Stoffflussdaten durch. Die meteorologischen Daten der vom TI-AK-Team mit SA-Partnern (Karoo1, Karoo2 und Vuwani) betriebenen Messtürme wurden im Sommer 2018 zusammen mit vollständigen Metadaten an die Wissenschafts-Zentrum für Klimawandel und alternative Landnutzung im südlichen Afrika - *Southern African Science Service Centre for Climate Change and Adaptive Land use* (SASSCAL)-Datenbank übermittelt. Die Einreichung der Stoffflussdaten ist für Anfang des Jahres 2019 geplant, sobald die Dissertation von K. Mukwashi vorliegt.

Schließlich wurde von TP1 eine gemeinsame Publikation des ARS AfricaE Projektansatzes und erster Ergebnisse initiiert und koordiniert und im Juli 2018 einer interdisziplinären Zeitschrift vorgelegt (Berger et al., unpubl.).

### **Analyse und Ergebnisse der EC-Messdaten**

Die Analysen konzentrierten sich auf 1) die klimatischen Faktoren, die die Primärproduktion und das Kohlenstoffaufnahmepotenzial an einem natürlichen Savannen-Ökosystemstandort (Skukuza) beeinflussen, und 2) die Auswirkungen von Klima- und Landmanagement (Beweidung) auf den Kohlenstoffaustausch (Karoo).

In Skukuza haben wir die optimale Brutto-Primärproduktion (d.h. die maximale Gesamtmenge an Kohlenstoff, die von Pflanzen pro Flächeneinheit und Zeit festgelegt wird;  $GPP_{opt}$  in Abbildung 2.2) über sechs Vegetationsperioden (vegetative Funktionsperioden) mit unterschiedlichen Temperatur- und Bodenfeuchtebedingungen verglichen. Abbildung 2.3 (oberer Teil) zeigt den positiven und linearen Zusammenhang zwischen  $GPP_{opt}$  und Bodenfeuchte. Dieses Muster wurde über alle gemessenen

vegetativen funktionellen Jahreszeiten hinweg beobachtet, was darauf hindeutet, dass die Wasser-  
 verfügbarkeit einer der Hauptfaktoren für den  $\text{CO}_2$ -Austausch und die Produktivität in semi-ariden  
 Savannen-Ökosystemen wie Skukuza ist. Neben den Unterschieden zwischen den Bodenfeuchte-  
 klassen variierte der  $\text{GPP}_{\text{opt}}$  auch zwischen Jahren: So wurde beispielsweise der höchste  $\text{GPP}_{\text{opt}}$   
 von  $29.47 \pm 2.3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  bei hoher Bodenfeuchte in den Jahren 2010-2011 (ein Jahr mit  
 überdurchschnittlichen Niederschlägen) beobachtet, während im "Trockenjahr" 2002-2003 ein deut-  
 lich niedrigerer  $\text{GPP}_{\text{opt}}$  von  $13.3 \pm 2.1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ermittelt wurde (niedrigster Niederschlag  
 aus gemessenen Werten zwischen 2000-2014). Die Saison 2002-2003 zeichnet sich auch durch rela-  
 tiv niedrige Werte der Vegetationsindizes aus der Fernerkundung (*Enhanced Vegetation Index* (EVI),  
*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (FAPAR) und *Normalized Difference Ve-*  
*getation Index* (NDVI)) und der Wasserspeicherung (Water Storage Change, WSC) im Vergleich zu  
 anderen Jahren aus (siehe Abbildung A). Wie zu erwarten, wurden die niedrigsten  $\text{GPP}_{\text{opt}}$  Werte im  
 Jahr 2002 unter den trockensten Bodenfeuchtebedingungen gemessen.



Abbildung 2.2: Inter-annuelle Variabilität der optimalen Brutto-Primärproduktion stratifiziert nach  
 Lufttemperatur- und Bodenfeuchteklassen (i) sowie inter-annuelle Variabilität der Vegetationsindizes  
 aus der Fernerkundung (EVI, FAPAR, NDVI) sowie der Änderung im Wasserspeicher (*Water Storage*  
*Change* (WSC)).

Der untere Teil der Abbildung 2.3 zeigt, dass  $\text{GPP}_{\text{opt}}$  bei hoher Bodenfeuchte im Allgemeinen  
 mit steigender Lufttemperatur zunahm, während das Gegenteil bei geringer Bodenfeuchte der Fall  
 war. Beim Übergang von trockenen zu trocknenden Bodenfeuchtebedingungen ging die Produkti-  
 vität meist mit steigender Lufttemperatur zurück. Insbesondere während der Dürreperiode 2002-2003  
 schien die Temperatur keinen Einfluss auf die Produktivität zu haben. Sie blieb stets sehr niedrig.

Um den kombinierten Einfluss von Feuchtigkeit und Lufttemperatur auf das Photosynthesepoten-

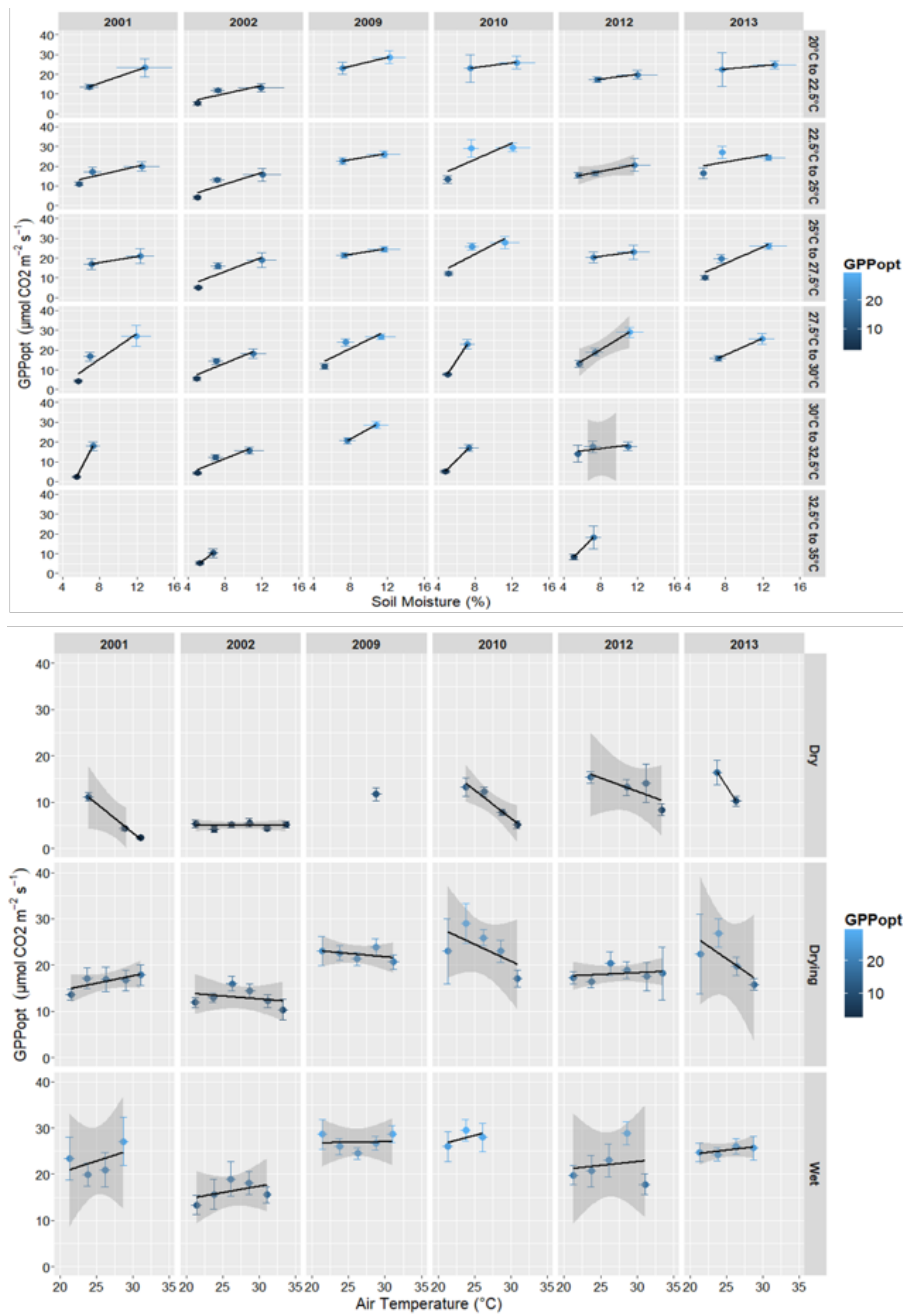


Abbildung 2.3: Funktionelle Beziehung zwischen optimaler Brutto-Primärproduktion ( $GPP_{opt}$ ) und Bodenfeuchte über Lufttemperaturklassen (oben) und Lufttemperatur über vegetativen jahreszeitlichen Funktionsklassen (unten) in Skukuza.

zial des Ökosystems weiter zu untersuchen, haben wir uns auf das Dampfdruckdefizit (*Vapor Pressure Deficit* (VPD)) konzentriert. VPD ist eine Funktion der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit und spielt eine wichtige Rolle beim Gasaustausch der Blätter mit der Atmosphäre und bei der täglichen Entwicklung der Transpiration in semi-ariden Ökosystemen (Jenerette et al., 2009). Wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, nahm der  $GPP_{opt}$  mit zunehmender VPD unter trockenen Bodenbedingungen linear ab. Abhängig von ihrer photosynthetischen Empfindlichkeit gegenüber niedrigen

Luftfeuchtigkeitsbedingungen ist die Abnahme der Produktion damit verbunden, dass Pflanzen ihre Spaltöffnungen bei hohen VPD-Bedingungen schließen. Beim Übergang von trockener zu trocknender Bodenfeuchte beobachteten wir einen Anstieg der  $GPP_{opt}$  mit zunehmender VPD, jedoch bei einem durchschnittlichen VPD über 20 hPa einen Rückgang der  $GPP_{opt}$ . Die Wirkung von VPD auf  $GPP_{opt}$  unter nassen Bedingungen war nicht klar, obwohl ein Anstieg der Bodenfeuchte die Auswirkungen von VPD auf  $GPP_{opt}$  zu verzögern schien.

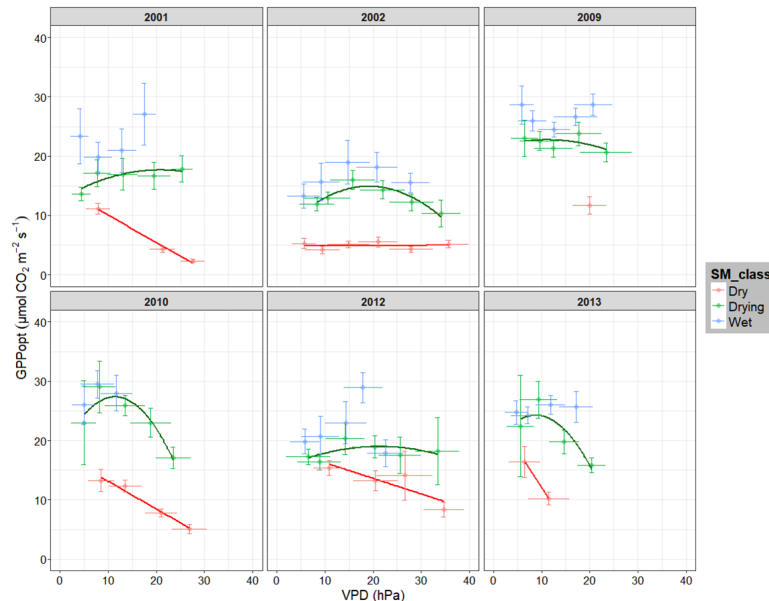


Abbildung 2.4: Abhängigkeit von optimaler Brutto-Primärproduktion ( $GPP_{opt}$ ) auf das Dampfdruckdefizit (VPD) unter verschiedenen Bodenfeuchtegradienten in Skukuza.

Abbildung 2.5 zeigt, dass die Beziehung zwischen  $GPP_{opt}$  und  $NEE_{offset}$  zunächst linear, in ihrer Reaktion auf die beeinflussenden Umweltfaktoren - in diesem Fall Bodenfeuchte - während der Vegetationsperiode, verlief. Wie zu sehen ist, schwächte sich die lineare Beziehung jedoch zu einem gewissen umweltbedingten Schwellenwert ab und wurde nicht-linear, und  $GPP_{opt}$  begann mit zunehmendem  $NEE_{offset}$  eine abnehmende Reaktion zu zeigen. Es zeigte sich, dass selbst wenn die Bedingungen nicht mehr förderlich für eine optimale Photosynthese waren, immer noch höhere  $NEE_{offset}$ -Werte auftreten können, die auf eine anhaltende Bodenatmung zurückzuführen sind. Es ist auch bekannt, dass die Bodenfeuchtigkeit die Auswirkungen anderer Faktoren wie der Temperatur auf die Atmungsprozesse mildert (Yan et al., 2011)

Die Analyse der Karoo-Daten konzentrierte sich darauf, die Auswirkungen des Klimas von den Auswirkungen der menschlichen Bewirtschaftung, d.h. der Viehbeweidung, zu trennen. Abbildung 2.6 zeigt den kumulativen Netto Ökosystem  $CO_2$  Austausch *Net Ecosystem  $CO_2$  Exchange* (NEE) in den beiden Karoo-Ökosystemen (d.h. Karoo 1, extensiv beweidetes Referenzgebiet und Karoo 2, zuvor intensiv beweidet, aber seit acht Jahren brachliegend) in zwei aufeinander folgenden Jahren. Beide Standorte stellen im ersten Jahr der Messung eine  $CO_2$ -Quelle dar. Im zweiten Jahr der Messung wiesen beide Standorte eine höhere  $CO_2$ -Sequestrierung auf, die wahrscheinlich auf höhere Niederschläge zurückzuführen ist. Die zuvor überweidete Fläche wurde im zweiten Jahr zu einer  $CO_2$ -Senke, während Karoo 1 eine Gesamtquelle für  $CO_2$  war. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Beweidung einen signifikanten Einfluss auf den Kohlenstoffaustausch der Savannenökosysteme hat.

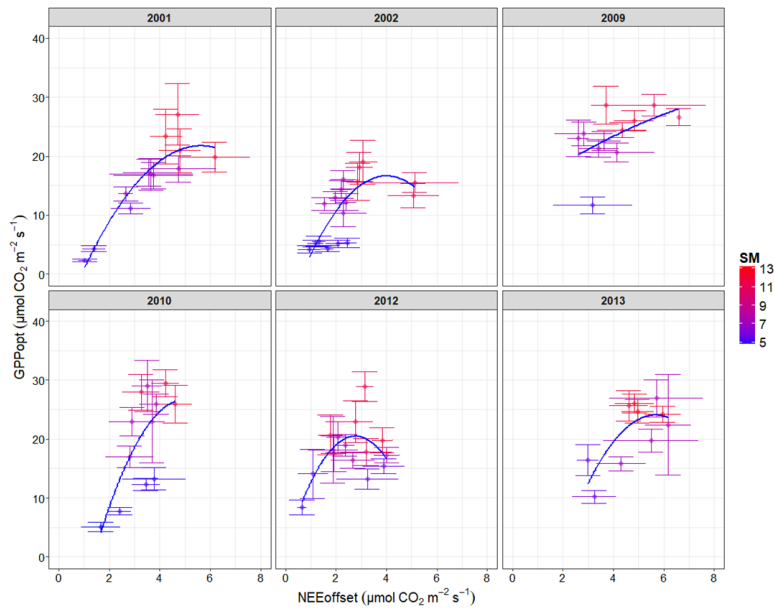


Abbildung 2.5: Zusammenhang zwischen Lichtreaktionsparametern, optimaler Brutto-Primärproduktion ( $GPP_{opt}$ ) und Netto-Ökosystem  $\text{CO}_2$ -Austausch-Offset ( $NEE_{offset}$ ), über die Bodenfeuchte (SM) in Skukuza.

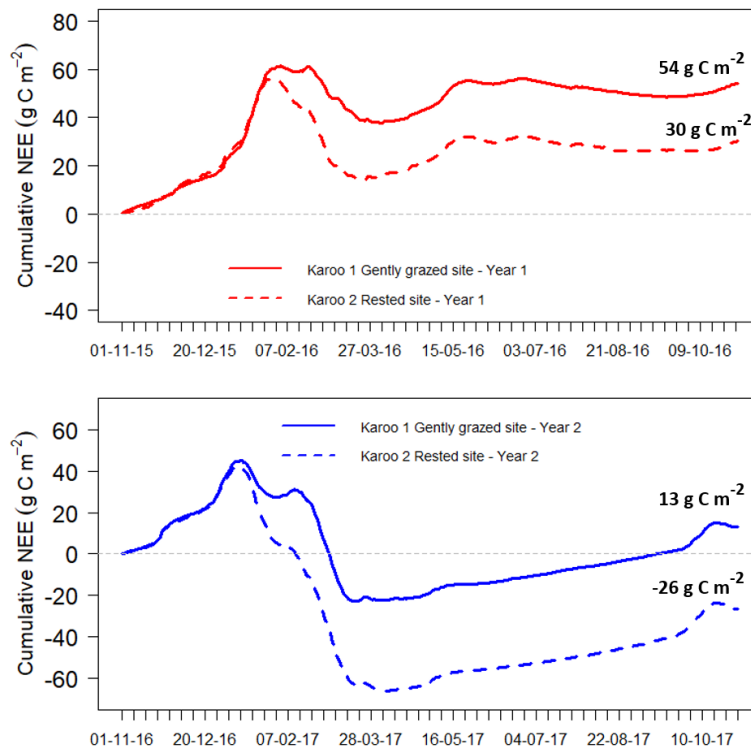


Abbildung 2.6: Vergleich des kumulierten  $\text{CO}_2$ -Austausches (Net Ecosystem Exchange) an den beiden Karoo-Standorten bei unterschiedlichen Beweidungsintensitäten.

---

## **Erreichte Ergebnisse der südafrikanischen Kollaborateure**

### **CSIR**

- Bereitstellung von EC-Flussdaten aus den bereits bestehenden EC-Messtürmen im KNP (Skukuza & Malopeni) aus den Jahren 2001 bis 2007;
- Aufbau und Wartung des Messturms in Agincourt (mit Unterstützung von WITS), Bereitstellung der gemessenen Daten;
- Sachleistungen für die Ausstattung des Turms mit Messgeräten;
- Kontinuierliche Wartung der Türme in Skukuza, Malopeni und Agincourt, gemeinsame Entwicklung und Zusammenarbeit mit TI-AK;
- Bereitstellung von Wetter- und Flussdaten der Messtürme Skukuza, Malopeni und Agincourt an die SASSCAL-Datenbank.

### **Forest Sense CC**

- Erfassung und Aufbereitung historischer Luftbilder sowie weiterer optischer Fernerkundungsbilder für die ARS AfricaE Projektstandorte;
- Konzeption und Durchführung von UAV-Befragungen an den Standorten Vuwani und Middelburg.

### **GADI**

- Kooperation beim Aufbau und Test der beiden Messtürme im Karoo-Cluster, einschließlich Standortauswahl, Vorbereitung und Sicherheitsfragen;
- Kontinuierliche Wartung der Türme und Teilnahme an den Feldkampagnen in Karoo;
- Management und Ausbildung von Außendienstmitarbeitern;
- Bereitstellung langfristiger ökologischer Daten die in den Gebieten erhoben wurden und deren Einspeisung in studentische Projekte und gemeinsame Forschungsarbeiten.

### **Rhodes University**

- Planung einer gemeinsamen Datenpolitik und Verarbeitung/Integration von ARS AfricaE-Daten;
- Gemeinsame Entwicklung von Curriculum und Organisation von sozial-ökologischen Modellierungskursen;
- Studentenaustauschprogramme speziell mit der HAW.

### **University of Venda**

- Mitarbeit beim Aufbau und der Erprobung des Fluxturms im Vuwani Science Resource Centre;
- Kontinuierliche Wartung des Vuwani-Turms.

---

## **SANParks Scientific Services**

- Allgemeine Unterstützung der Feldkampagnen an den Standorten Skukuza und Malopeni;
- Bereitstellung von Zeitreihen und GIS-Daten;
- Einbindung der ARS Africae Partner Prof. Dr. Thomas Clemen und Ulfia Lenfers in strategische Diskussionen über aktuelle und zukünftige Themen im Management des Krüger Nationalparks.

## **WITS**

Die im Rahmen dieses Unterauftrages erbrachten Leistungen werden unter AP5 detailliert beschrieben.

## **Stellenbosch University**

Die im Rahmen dieses Unterauftrages erbrachten Leistungen werden unter AP2 detailliert beschrieben.

### **2.1.2 Sozioökonomische Erhebungen (Arbeitspaket 5)**

AP5 (WITS) führte im Jahr 2014 am Standort Agincourt sozioökonomische Untersuchungen zur Brennholzverwendung in lokalen Gemeinden durch, um frühere ähnliche Untersuchungen zu ergänzen. Wie Abbildung 2.7 zeigt, wurde Brennholz in den letzten fünf Jahren von über 90 % der Haushalte genutzt und war im Jahr 2014 für 63 % der Haushalte die dominierende Energiequelle (mehr als einmal pro Woche). Der durchschnittliche Jahresverbrauch an Brennholz pro Haushalt betrug 2 558 kg, was im Gesamtdurchschnitt der letzten 5 Jahre aller Haushalte 2 132 kg pro Jahr entspricht. Bei einem veröffentlichten Umrechnungsfaktor von 0,5 entspricht dies 1 066 kg Kohlenstoff pro Haushalt und Jahr aus den umliegenden Wäldern. Die durchschnittliche Zahl der Haushalte pro Dorf in den neun Studiendörfern lag im Jahr 2014 bei 974, was bedeutet, dass die jährliche durchschnittliche Aneignung pro Dorf von Kohle aus den Wäldern in Form von Brennholz 1 038 Tonnen betrug. Die monatliche Holzentnahme aus den Wäldern um Agincourt wurde in neun dauerhaften Parzellen von jeweils ca. 0,25 ha Größe entlang von drei vom Dorf ausgehenden Transekten überwacht. Durchschnittlich wurden 2,2 t Holz (oder 1,1 t Kohlenstoff) pro Hektar und Jahr geerntet. Die Ernte variierte jedoch mit der Entfernung vom Dorf, die von ~1,9-3,5 Tonnen Holz pro Hektar und Jahr innerhalb von 0,5-1 km vom Dorf bis zu ~0,9 Tonnen Holz pro Hektar und Jahr in 1,5 km Entfernung vom Dorf reichte. Die hohen Abbauraten der Holzbiomasse im Umkreis von einem Kilometer um das Dorf sind nicht nachhaltig.

Nach dem ursprünglichen Plan sollte der Ansatz auf die Western Province in Sambia übertragen werden. Die geplante Erhebung zur Analyse des Brennholzverbrauchs der lokalen Gemeinden sowie des Fernhandels mit Holzkohle wurde jedoch aufgrund des Ausstiegs der sambischen Partner aus dem Projekt gestrichen.

Der nächste Schritt war, die Ergebnisse der sozioökonomischen Erhebungen mit dem AP3-Modellierungssystem zu kombinieren, um Szenarien zu erstellen, die mit den lokalen Gemeinden kommuniziert werden können. Aufgrund von personellen Veränderungen und teilweise länger als erwartet dauernden Arbeiten wird dieser Teil hauptsächlich im Rahmen des Folgeprojekts EMSAfrica durchgeführt. Darüber hinaus werden während der Projektlaufzeit von EMSAfrica die von WITS gespeicherten Haushaltsdatensätze gemeinsam von den WITS- und HAW-Teams analysiert, um die sozioökonomische Komponente des Multi-Agenten-basierten Entscheidungsunterstützungssystem -



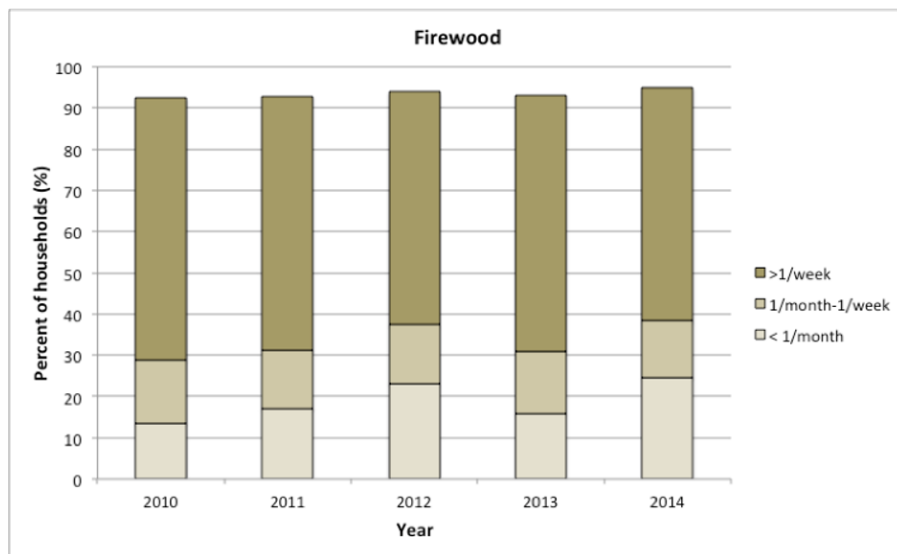


Abbildung 2.7: Prozentuale Verwendung von Brennholz in den Haushalten von 2010-2014.

*Decision Support System (DSS)* zu entwickeln. Durch die direkte Zusammenarbeit mit dem WITS-Forschungsteam um Prof. Twine und den Stakeholdern erhält EMSAfrica authentischen Zugang zu denjenigen, die ländliche Haushalte in der Region vertreten. Umgekehrt werden Doktoranden von Prof. Twine in jährlichen Lehrveranstaltungen, sogenannten Short Courses, in sozial-ökologischer Modellierung unterrichtet.

## 2.2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

ARS AfricaE führte einen multidisziplinären Ansatz ein, bei dem EC-Flussdaten mit ökophysiologischen Messungen vor Ort verknüpft und zusammen mit Fernerkundungsdaten zur Verbesserung von Vegetationsmodellen verwendet wurden. Die Infrastruktur wurde entlang eines Trockenheitsgradienten und unter verschiedenen Managementvarianten aufgebaut, um die Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem langfristig analysieren zu können. Die integrative Nutzung von EC-Flussdaten wird im Rahmen des Folgeprojekts EMSAfrica weiterentwickelt (z.B. Bewertung und Verbesserung dynamischer Vegetationsmodelle; Abschätzung der zukünftigen Kohlenstoffbilanz der Savanne unter verschiedenen Emissions- und Landnutzungsszenarien; Weiterentwicklung gemeinsamer Aktivitäten mit der Fernerkundungscommunity).

Durch den Aufbau eines Netzes von EC-Messtürmen war das Teilprojektteam direkt an der Stärkung der südafrikanischen Langzeitinfrastruktur zur Überwachung des Biosphäre-Atmosphäre-Austauschs von CO<sub>2</sub> beteiligt. Besonders in Savannen-Ökosystemen, in denen die Produktivität stark von der Niederschlagsmenge abhängt, die wiederum große interannuelle Schwankungen aufweist, sind langfristige Messungen erforderlich, um das Verständnis der Kohlenstoffbilanz des Ökosystems zu verbessern. Savannen bedecken 11,5 % der weltweiten Landfläche, sind aber nach wie vor in globalen Beobachtungsnetzen weitgehend unterrepräsentiert, obwohl ihr geschätztes Kohlenstoffspeicherungspotenzial zwischen 0,16 und 1,00 Pg C pro Jahr global signifikant ist.

Die im Rahmen des ARS AfricaE-Projekts errichteten Türme werden in Zusammenarbeit mit

---

SAEON im Rahmen des Folgeprojekts EMSAfrica in das EFTEON-Netzwerk eingegliedert. Dies wird Südafrika in die Lage versetzen, landesweite THG-Messungen besser durchzuführen. Zudem werden sie für eine Vielzahl von ökologischen und geochemischen Studien im Land relevant zu sein. Das TI-AK-Team war auch an der Ausbildung von Studenten und südafrikanischen Außendienstmitarbeitern beteiligt, insbesondere in den technischen Aspekten der EC-Technik. Darüber hinaus unterstützt das TI-AK-Team Südafrika beim Aufbau einer Verbindung zum ICOS-Netzwerk.

Die vom AP5 bereitgestellten Informationen über die Nutzung von Brennholz in lokalen Gemeinden sind für die Entwicklung nachhaltiger Landnutzungslösungen von großer Bedeutung und werden für den Aufbau eines entsprechenden Entscheidungsunterstützungssystems während der EMSAfrica-Projektphase genutzt.

# Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Berger, C., Bieri, M., Brümmer, C., Clemen, T., Hickler, T., Lenfers, U., Martens, C., Midgley, G., Scheiter, S., Schmulius, C., Stevens, N., Twine, W. (unpubl.). Linking scales and disciplines: An integrative approach to climate-relevant ecosystem management support in Southern Africa Submitted to *Climatic Change*.

Brümmer, C., Mukwashi, K., Falge, E.M., Mudau, A., Odipo, V., Schmulius, C., Lenfers, U., Thiel-Clemen, T., Thomas, C.K., Kutsch, W.,L., Scholes, R.J., Berger, C. (2016). Factors influencing inter-annual variability of growing season optimum gross primary production and ecosystem respiration in a semi-arid savanna ecosystem: A case study of Skukuza, South Africa. American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016, abstract id. B13B-0566

Falge, E., Brümmer, C., Schmulius, C., Hüttich, C., Scholes, R.J., Midgley, G., Hickler, T. et al. (2015). SPACES Project ARS AfricaE – Adaptive Resilience of Southern African Ecosystems,” *Geophysical Research Abstracts* Vol. 17, EGU2015-4869-1, 2015. Poster presentation.

Falge, E., Brümmer, C., Schmulius, C., Hüttich, C., Scholes, R.J., Midgley, G., Hickler, T. et al. (2015). “SPACES Project ARS AfricaE – Adaptive Resilience of Southern African Ecosystems,” Poster presentation at the Savanna Science Network Meeting, Skukuza, 2015.

Falge, E., Kutsch, W., Berger, C., Bradshaw, K., Brümmer, C., du Toit, J., Hickler, T., Hüttich, C., Iiyambo, T., Lenfers, U., Lück, W., Martens, C., Midgley, G., Mudau, A., Mukwashi, K., Odipo, V., Scheiter, S., Schmulius, C., Scholes, R.J., Stevens, N., Thiel-Clemen, T., Twine, W. (2015). Assessing ecosystem response to multiple disturbances and climate change in South Africa using ground- and satellite-based measurements and models. Poster at the AGU, San Francisco, 2015.

Iiyambo, Tetukondjele. (Unpubl.) The Redirection of the Carbon Cycle by Households in a Savanna Socio-Ecological System in Rural South Africa. PhD Thesis, University of Witwatersrand, to be submitted 2019.

Kutsch, W. L., Falge, E. M., Brümmer, C., Mukwashi, K., Schmulius, C., Hüttich, C., Odipo, V. et al. (2015). Assessing Ecosystem Response to Multiple Disturbances and Climate Change in South Africa Using Ground- and Satellite-Based Measurements and Model.” In *AGU Fall Meeting Abstracts* 11. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFM.B11A0411K>.

---

Lück, W., Schullius, C., Berger, C., Hüttich, C., Odipo, V., Kutsch, W., Falge, E., Smit, I. (2016). Space-time multi-source data cube for quantitative analysis of savanna systems - First results from the ARS AfricaE Skukuza flux tower site. Poster presentation at the 2016 Savanna Science Network Meeting (SSNM), March 13-17, Skukuza, South Africa, 2016.

Mukwashi, Kanisios. (Unpubl.) Explaining Temporal Variability of and Quantifying the Impact of Livestock Grazing Intensity on Carbon and Energy Exchange in Semi-Arid Natural and Managed Savanna Ecosystems in South Africa. PhD Thesis, University of Bayreuth, to be submitted July 2018.

# Literatur

- Ago, E., E. Agbossou, S. Galle, J.-M. Cohard, B. Heinesch und M. Aubinet (2014). 'Long term observations of carbon dioxide exchange over cultivated savanna under a Sudanian climate in Benin (West Africa)'. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 197.Supplement C, S. 13–25. ISSN: 0168-1923. DOI: [10.1016/j.agrformet.2014.06.005](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.005). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192314001476> (besucht am 22. 12. 2017).
- Archibald, S., A. Kirton, M. v. d. Merwe, R. J. Scholes, C. A. Williams und N. Hanan (2008). 'Drivers of interannual variability in Net Ecosystem Exchange in a semi-arid savanna ecosystem, South Africa'. In: *Biogeosciences Discussions* 5.4, S. 3221–3266.
- Barton, J., J. Bristow und F. Venter (1986). 'A summary of the Precambrian Granitoid rocks of the Kruger National Park'. In: *Koedoe* 29, S. 39–44.
- Brümmer, C., U. Falk, H. Papen, J. Szarzynski, R. Wassmann und N. Brüggemann (2008). 'Diurnal, seasonal, and interannual variation in carbon dioxide and energy exchange in shrub savanna in Burkina Faso (West Africa)'. en. In: *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113.G2, G02030. ISSN: 2156-2202. DOI: [10.1029/2007JG000583](https://doi.org/10.1029/2007JG000583). URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JG000583/abstract> (besucht am 22. 12. 2017).
- Colgan, M. S., G. P. Asner, S. R. Levick, R. E. Martin und O. A. Chadwick (2012). 'Topo-edaphic controls over woody plant biomass in South African savannas'. en. In: *Biogeosciences* 9.5, S. 1809–1821. ISSN: 1726-4189. DOI: [10.5194/bg-9-1809-2012](https://doi.org/10.5194/bg-9-1809-2012). URL: <http://www.biogeosciences.net/9/1809/2012/>.
- DFED, L. (2004). *Limpopo State of the Environment Report (Phase 1)*. Techn. Ber. Limpopo Department of Finance und Economic Development.
- Du Toit, J. und T. O'Connor (2014). 'Changes in rainfall pattern in the eastern Karoo, South Africa, over the past 123 years'. en. In: *South African Water Research Commission* 40.3, S. 453.
- Feig, G. T., W. R. Joubert, A. E. Mudau und P. M. S. Monteiro (2017). 'South African carbon observations: CO<sub>2</sub> measurements for land, atmosphere and ocean'. en. In: *South African Journal of Science* 113.11/12, S. 4–4. ISSN: 1996-7489. DOI: [10.17159/sajs.2017/a0237](https://doi.org/10.17159/sajs.2017/a0237). URL: <https://www.sajs.co.za/article/view/3852>.
- Fisher, J. T., E. Witkowski, B. Erasmus, J. Van Aardt, G. P. Asner, K. J. Wessels und R. Mathieu (2012). 'Human-modified landscapes: patterns of fine-scale woody vegetation structure in communal savannah rangelands'. en. In: *Environmental Conservation* 39.01, S. 72–82. ISSN: 0376-8929, 1469-4387. DOI: [10.1017/S0376892911000592](https://doi.org/10.1017/S0376892911000592). URL: [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S0376892911000592](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0376892911000592).
- Giannecchini, M., W. Twine und C. Vogel (2007). 'Land-cover change and human-environment interactions in a rural cultural landscape in South Africa'. en. In: *The Geographical Journal* 173.1, S. 26–42. ISSN: 0016-7398, 1475-4959. DOI: [10.1111/j.1475-4959.2007.00227.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.00227.x). URL: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-4959.2007.00227.x>.
- Higgins, S. I., C. M. Shackleton und E. R. Robinson (1999). 'Changes in woody community structure and composition under contrasting landuse systems in a semi-arid savanna, South Africa'. en. In: *Journal of Biogeography* 26.3, S. 619–627. ISSN: 1365-2699. DOI: [10.1046/j.1365-2699.1999.t01-1-00317.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.t01-1-00317.x). URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2699.1999.t01-1-00317.x/abstract>.

- 
- Jenerette, G. D., R. L. Scott, G. A. Barron-Gafford und T. E. Huxman (2009). 'Gross primary production variability associated with meteorology, physiology, leaf area, and water supply in contrasting woodland and grassland semiarid riparian ecosystems'. en. In: *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 114.G4. ISSN: 2156-2202. DOI: [10.1029/2009JG001074](https://doi.org/10.1029/2009JG001074). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009JG001074>.
- Kirton, A. und R. Scholes (2009). *Site characterization of the Malopeni Flux Tower Site, Kruger National Park, South Africa*. Techn. Ber.
- Madubansi, M. und C. M. Shackleton (2007). 'Changes in fuelwood use and selection following electrification in the Bushbuckridge lowveld, South Africa'. In: *Journal of Environmental Management* 83.4, S. 416–426. ISSN: 0301-4797. DOI: [10.1016/j.jenvman.2006.03.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.014). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479706001514>.
- Mucina, L. und M. C. Rutherford (2006). *The vegetation of South Africa, Lesotho and Swaziland*. English. Pretoria, South Africa: SANBI. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20073221934>.
- O'Connor, T. G. und P. W. Roux (1995). 'Vegetation Changes (1949-71) in a Semi-Arid, Grassy Dwarf Shrubland in the Karoo, South Africa: Influence of Rainfall Variability and Grazing by Sheep'. In: *Journal of Applied Ecology* 32.3, S. 612–626. ISSN: 0021-8901. DOI: [10.2307/2404657](https://doi.org/10.2307/2404657). URL: <http://www.jstor.org/stable/2404657>.
- Odhambo, J. J. und L. E. Nematodzi (2007). 'Soil fertility management practices by smallholder farmers in Vhembe District, Limpopo Province'. en. In: *South African Journal of Agricultural Extension* 36.1, S. 53–61. ISSN: 2413-3221. URL: <https://www.ajol.info/index.php/sajae/article/view/3708>.
- Quansah, E., M. Mauder, A. A. Balogun, L. K. Amekudzi, L. Hingerl, J. Bliefernicht und H. Kunstmann (2015). 'Carbon dioxide fluxes from contrasting ecosystems in the Sudanian Savanna in West Africa'. en. In: *Carbon Balance and Management* 10.1. ISSN: 1750-0680. DOI: [10.1186/s13021-014-0011-4](https://doi.org/10.1186/s13021-014-0011-4). URL: <http://www.cbmjournal.com/content/10/1/1>.
- Räsänen, M., M. Aurela, V. Vakkari, J. P. Beukes, J.-P. Tuovinen, P. G. Van Zyl, M. Josipovic, A. D. Venter, K. Jaars, S. J. Siebert, T. Laurila, J. Rinne und L. Laakso (2017). 'Carbon balance of a grazed savanna grassland ecosystem in South Africa'. en. In: *Biogeosciences* 14.5, S. 1039–1054. ISSN: 1726-4189. DOI: [10.5194/bg-14-1039-2017](https://doi.org/10.5194/bg-14-1039-2017). URL: <https://www.biogeosciences.net/14/1039/2017/> (besucht am 25. 12. 2017).
- Scholes, R. J., N. Gureja, M. Giannecchini, D. Dovie, B. Wilson, N. Davidson, K. Piggott, C. McLoughlin, K. v. d. Velde, A. Freeman, S. Bradley, R. Smart und S. Ndala (2001). 'The environment and vegetation of the flux measurement site near Skukuza, Kruger National Park'. en. In: *Koedoe* 44.1, S. 73–83. ISSN: 2071-0771. DOI: [10.4102/koedoe.v44i1.187](https://doi.org/10.4102/koedoe.v44i1.187). URL: <https://koedoe.co.za/index.php/koedoe/article/view/187>.
- Shackleton, C. M., C. M. Dzerefos, S. E. Shackleton und F. R. Mathabela (2000). 'The use of and trade in indigenous edible fruits in the Bushbuckridge savanna region, South Africa'. In: *Ecology of Food and Nutrition* 39.3, S. 225–245. ISSN: 0367-0244. DOI: [10.1080/03670244.2000.9991616](https://doi.org/10.1080/03670244.2000.9991616). URL: <https://doi.org/10.1080/03670244.2000.9991616>.
- Tagesson, T., R. Fensholt, B. Cappelaere, E. Mougin, S. Horion, L. Kergoat, H. Nieto, C. Mbow, A. Ehammer, J. Demarty und J. Ardö (2016). 'Spatiotemporal variability in carbon exchange fluxes across the Sahel'. en. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 226-227, S. 108–118. ISSN: 01681923. DOI: [10.1016/j.agrformet.2016.05.013](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.013). URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192316302787>.
- Tagesson, T., R. Fensholt, F. Cropley, I. Guiro, S. Horion, A. Ehammer und J. Ardö (2015). 'Dynamics in carbon exchange fluxes for a grazed semi-arid savanna ecosystem in West Africa'. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 205, S. 15–24.
- Toit, J. C. du und T. G. O'Connor (2017). 'Minimum temperatures and frost at Grootfontein in the eastern Karoo, South Africa, over 98 years'. en. In: *Transactions of the Royal Society of South Africa* 72.1, S. 39–46. ISSN: 0035-919X, 2154-0098. DOI: [10.1080/0035919X.2016.1218373](https://doi.org/10.1080/0035919X.2016.1218373). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0035919X.2016.1218373>.

- 
- Toit, J. du und T. Nengwenani (2016). 'Vegetation changes at the Boesmanskop Research Trials, Grootfontein, 2007-2015'. In: *Grootfontein Agric* 16, S. 21–32.
- Twine, W., R. Holdo und J. James (2016). 'Fuelwood sustainability revisited: integrating size structure and resprouting into a spatially realistic fuelshed model'. In: *Journal of Applied Ecology* 53.6, S. 1766–1776.
- Twine, W., D. Moshe, T. Netshiluvhi und V. Siphugu (2003). 'Consumption and direct-use values of savanna bio-resources used by rural households in Mametja, a semi-arid area of Limpopo province, South Africa'. In: *South African Journal of Science* 99, S. 467–473.
- Veenendaal, E. M., O. Kolle und J. Lloyd (2004). 'Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa'. en. In: *Global Change Biology* 10.3, S. 318–328. ISSN: 1365-2486. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2003.00699.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2003.00699.x). URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2003.00699.x/abstract> (besucht am 25. 12. 2017).
- Venter, J. C. und M. T. Mebrhatu (2005). 'Modelling of rainfall occurrences at Grootfontein (Karoo, South Africa)'. In: *South African Journal of Plant and Soil* 22.2, S. 127–128. ISSN: 0257-1862. DOI: [10.1080/02571862.2005.10634694](https://doi.org/10.1080/02571862.2005.10634694). URL: <https://doi.org/10.1080/02571862.2005.10634694>.
- Yan, L., S. Chen, J. Huang und G. Lin (2011). 'Water regulated effects of photosynthetic substrate supply on soil respiration in a semiarid steppe'. en. In: *Global Change Biology* 17.5, S. 1990–2001. ISSN: 1365-2486. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2010.02365.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02365.x). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2010.02365.x>.

# Appendices

## A.1 Akronyme

<b>aDGVM</b>	adaptive Dynamic Global Vegetation Model
<b>AP</b>	Arbeitspaket
<b>ARS AfricaE</b>	Adaptive Resilienz südafrikanischer Ökosysteme - <i>Adaptive Resilience of Southern African Ecosystems</i>
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<b>CSIR</b>	<i>Council for Scientific and Industrial Research</i>
<b>DAAD</b>	Deutscher Akademischer Austauschdienst
<b>DSS</b>	Entscheidungsunterstützungssystem - <i>Decision Support System</i>
<b>DST</b>	<i>Department of Science and Technology</i>
<b>DVMs</b>	Dynamic Vegetation Models
<b>EC</b>	Eddy-Kovarianz - <i>Eddy Covariance</i>
<b>EMSAfrica</b>	<i>Ecosystem Management Support for Climate Change in Southern Africa</i>
<b>EFTEON</b>	<i>Expanded Freshwater and Terrestrial Environmental Observation Network</i>
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EVI</b>	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
<b>FAPAR</b>	<i>Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation</i>
<b>FLUXNET</b>	<a href="https://fluxnet.ornl.gov/">https://fluxnet.ornl.gov/</a>
<b>FONA</b>	Forschung für nachhaltige Entwicklung
<b>FSU</b>	Friedrich-Schiller-Universität Jena
<b>GADI</b>	<i>Grootfontein Agricultural Development Institute resp. The Small Stock Research Trust</i>
<b>GCMs</b>	<i>General Circulation Models</i>
<b>GEO</b>	Group on Earth Observations
<b>GHG</b>	Treibhausgas - <i>Greenhouse Gas</i>
<b>GIS</b>	<i>Geographic Information System</i>
<b>GLMs</b>	<i>Global Climate Models</i>
<b>GPP</b>	Bruttoprimärproduktion - <i>Gross Primary Production</i>
<b>HAW</b>	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg



---

<b>HLPD</b>	<i>High-level policy dialogue</i>
<b>ICOS</b>	<i>Integrated Carbon Observation System</i>
<b>IPBES</b>	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
<b>JWGU</b>	Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt
<b>KNP</b>	Kruger National Park
<b>LAI</b>	Leaf Area Index
<b>LLL</b>	Limpopo Living Landscapes - Dynamik ökologischer und sozio-ökonomischer Prozesse in der Limpopo Region Südafrikas unter dem Eindruck des globalen Wandels
<b>LPJ-GUESS</b>	Lund-Potsdam-Jena General Ecosystem Simulator
<b>MODIS</b>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>NDVI</b>	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
<b>NEE</b>	<i>Net Ecosystem CO<sub>2</sub> Exchange</i>
<b>NEP</b>	Net Ecosystem Production
<b>NPP</b>	<i>Net Primary Productivity</i>
<b>PIs</b>	Principal Investigators
<b>RI</b>	<i>Research Infrastructure</i>
<b>RU</b>	Rhodes University
<b>SA</b>	South Africa
<b>SAEON</b>	<i>South African Environmental Observation Network</i>
<b>SALLnet</b>	South African Limpopo Landscapes Network
<b>SASSCAL</b>	Wissenschafts-Zentrum für Klimawandel und alternative Landnutzung im südlichen Afrika - <i>Southern African Science Service Centre for Climate Change and Adaptive Land use</i>
<b>SAWS</b>	<i>South African Weather Service</i>
<b>SBiK-F</b>	Senckenberg Biodiversität und Klima- Forschungszentrum
<b>SDGs</b>	Sustainable Development Goals
<b>SDG13</b>	<i>Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen</i>
<b>SDG15</b>	<i>Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern</i>
<b>SDG17</b>	<i>Umsetzungsmittel stärken und die Globale Partnerschaft für nachhaltige Entwicklung mit neuem Leben erfüllen</i>
<b>SEACRIFOG</b>	<i>Supporting EU-African Cooperation on Research Infrastructures for Food security and Greenhouse gas observations</i>
<b>SPACES</b>	Forschungspartnerschaften zur Anpassung komplexer Prozesse im System Erde in der Region Südliches Afrika
<b>SU</b>	Stellenbosch University
<b>SUCSES</b>	Sustainability in Communal Socio-Ecological Systems
<b>TI-AK</b>	Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
<b>TP</b>	Teilprojekt
<b>UBT</b>	Universität Bayreuth
<b>UNFCCC</b>	United Nations Framework Convention on Climate Change

---

<b>UniVen</b>	University of Venda
<b>VPD</b>	<i>Vapor Pressure Deficit</i>
<b>WITS</b>	University of the Witwatersrand
<b>WSC</b>	<i>Water Storage Change</i>
<b>WRF</b>	WITS Rural Facility

# A.2 Standortbeschreibung Tabelle

Cluster	Standortname	Koordinaten	Landnutzung	Höhe über Meer	Niederschlag/Regime	Temperaturen/Regime	Boden	Geologie	Vegetation
Cluster 1: Mittlerer bis hoher Niederschlag	Malopeni	-23,83° 31,21°	Nationalpark, kein Management, Nationalparksgrenze	385 m ü.N.N.	Hauptsächlich im Sommer (Oktober bis März); mittlerer Jahresniederschlag 473 mm	Mittlere Sommermaxima 30,5°C, Mittlere Sommerminima 19,4°C, Mittlere Wintermaxima 26,7°C, Mittlere Winterminima 12,4°C	Fachgründige sandige Lehme, Luvisol (Alfisol)	Grundgestein aus dem Archalkium, Granite und Gneise	Baumbedeckung etwa 30%, hauptsächlich Arten <i>Colophostephanium mopane</i> , <i>Combretum apiculatum</i> , <i>Acacia nigrescens</i> , Gräser/Stauden dominiert durch <i>Schmidia pappophoroides</i> , <i>Panicum maximum</i> .
	Vuwani	-23,14° 30,43°	randsstädtisch, lockere Bebauung	629 m ü.N.N.	mittlerer Jahresniederschlag stark schwankend zwischen 500 und 1000 mm	Heiße Sommer, mittlere Temperaturen 24-26°C (max. 40°C); kühle Winter mit Minima um 10°C, in der Regel frostfrei	N/A	Komplexe Formationen aus dem Archalkium mit Migmatiten, Gneisen und ultrametamorphen Zusammensetzungen	Lowveld Sour Bushveld
Cluster 2: Mittlerer Niederschlag	Agricourt/ Bushbuck- ridge	-24,82° 31,21°	dörflicher Siedlungsbereich	534 m ü.N.N.	Hauptsächlich von November bis Februar, schwankt zwischen 800mm am Fuße steeper Böschungen im Westen und 550 mm in anderen Gebieten	Heiße Sommer (mittlere Maxima um 40°C); milde Winter; seltener Frost	Sandige, unfruchtbare Böden auf den Hügelkammen und natrium-haltige Tone an den unteren Hängen	Granite und Gneise	Savannenwaldgebiet, Granit Lowveld Bushveld. Baumbestand dominiert durch breitblättrige Arten wie <i>Sclerocarya birrea</i> , <i>Terminalia sericea</i> und <i>Combretum collinum</i> auf den sandigen Hügelkammen und feublättrige Arten wie <i>Dichrostachys cinerea</i> und <i>Acacia swazica</i> im tonigen naturneichen Tiefland
	Stukuzza	-25,02° 31,49°	Nationalpark, kein Management, nächste Nationalparksgrenze etwa 10 km entfernt	365 m ü.N.N.	Hauptsächlich von November bis Februar, im Mittel 547 mm	Heiße, regenreiche Sommer, warme und trockene Winter. Mittleres Jahresmaximum 29,5°C, mittleres Minimum 14,3°C	Fruchtbar, tonige Böden, auf den Graten eher sandig, < 80 cm	Bereich des Lowvelds: Granite und Gneise aus dem Archalkium, Neispruit Serie	Baum-Gras-Savanne, Saumbiotop zwischen <i>Combretum</i> und <i>Acacia</i> Savanne. Sandiges Hochland dominiert von <i>Combretum apiculatum</i> mit faserigen Gräsern, z.B. <i>Pogonanthia squarrosa</i> . Auf den tonigen Böden dominieren die Baumarten <i>Acacia nigrescens</i> , <i>Sclerocarya birrea</i> sowie die Gräser <i>Panicum maximum</i> und <i>Urochloa mossambicensis</i> .
Cluster 3: Semi-arid, geringer Niederschlag	Karoo 1	-31,52° 25,01°	Moderat beweidet (Kontroll-fläche)	~1300 m ü.N.N.	Regenzeit Mitte bis Spätsommer, langjähriges Jahresmittel 372 mm	Kühle, trockene Winter bei Tagestemperaturen von 14 bis 25°C, Nachtemperaturn von -4 bis +4°C. Warm-heiße Sommer bei Tagestemperaturen zwischen 30 und 35°C, Nachtemperaturn zwischen 10 und 16°C	Fachgründige Lössose, schwach entwickelte Böden aus Festgestein	Tonsteine und Sandsteine aus der Beaufort Gruppe	Östliche Obere Karoo. Mischung aus Sträuchern und schmackhaften Gräsern. Hauptsächlichste Arten sind <i>Digitaria eriantha</i> (36,6%), <i>Pentzia globosa</i> (7,8%), <i>Sporobolus fibrilatus</i> (6,5%), <i>Eriosephalus ericoides</i> (5,8%)
	Karoo 2		Verschiedene Beweidungsstufen, aktuell unbeweidet, jedoch massive Überweidung in der Vergangenheit						Meist Gräser von geringer Qualität. Hauptsächlichste Arten sind <i>Aristida diffusa</i> (42,5%), <i>A. congesta</i> (12%), <i>Tragus koelerioides</i> (7,5%), <i>Eragrostis lehmanniana</i> (5,5%)

---

## **Standortbeschreibung Referenzen**

**Agincourt:** Twine et al. 2016; Mucina und Rutherford 2006; Shackleton et al. 2000

**Karoo:** J. C. d. Toit und T. G. O'Connor 2017; Du Toit und T. O'Connor 2014; Venter und Mebrhatu 2005; O'Connor und Roux 1995; J. d. Toit und Nengwenani 2016; du Toit, J., pers. comm. 03.04.2018

**Malopeni:** Kirton und R. Scholes 2009

**Skukuza:** R. J. Scholes et al. 2001; Barton et al. 1986; Colgan et al. 2012

**Vuwani:** DFED 2004; Odhiambo und Nematodzi 2007

**All sites (locations):** Feig et al. 2017