

Programm: WASCAL II – West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use

Schlussbericht Teil II – Eingehende Darstellung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ)	Förderkennzeichen: 01LG2089A
Vorhabentitel: Teilprojekt 2:	Verbundprojekt CONCERT: Treibhausgasemissionen und deren Minderungsmöglichkeiten bei Klima- und Landnutzungsänderungen in Westafrika – Eine konzertierte regionale Modellierung und Bewertung der Beobachtung Skalenequivalente Charakterisierung der Bodenfeuchte
Teilprojektkoordination:	Name Dr. Heye Bogena, Dr. Roland Baatz Telefon +49 8153 28 1250 E-Mail h.bogena@fz-juelich.de roland.baatz@zalf.de
Laufzeit des Vorhabens:	von: 01.05.2021 bis: 31.12.2024
Autoren:	Dr. Heye Bogena, Dr. Roland Baatz

Jülich, den 13.06.2025

1 Wissenschaftlich-technische Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Einleitung

Die nachhaltige Nutzung von Land- und Wasserressourcen in Westafrika steht angesichts des fortschreitenden Klimawandels, wachsender Bevölkerungszahlen und zunehmender Extremwetterereignisse vor großen Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund verfolgt das vom BMBF geförderte Verbundvorhaben **CONCERT** („Treibhausgasemissionen und deren Minderungsmöglichkeiten bei Klima- und Landnutzungsänderungen in Westafrika – eine konzertierte regionale Modellierung und Bewertung der Beobachtung“) das Ziel, neue Beobachtungs- und Modellierungsansätze zur Verbesserung von Klimaanpassungsmaßnahmen und Emissionsminderungsstrategien zu entwickeln.

Das hier vorgestellte Teilprojekt 2 („Skalenäquivalente Charakterisierung der Bodenfeuchte“) ist in dieses interdisziplinäre Verbundvorhaben eingebettet und wird im Rahmen des **WASCAL II**-Programms durchgeführt. Es befasst sich mit der Entwicklung, Optimierung und Anwendung innovativer Messtechnologien zur Erfassung der Bodenfeuchte sowie deren Integration in landoberflächen- und hydrologische Modelle.

Ziel war es, durch den Einsatz von **Cosmic-Ray-Neutronensonden (CRNS)** ein flächenrepräsentatives, robustes Monitoring der Bodenfeuchte in Westafrika aufzubauen. Dies beinhaltet sowohl die technische Implementierung an ausgewählten Standorten in Ghana als auch die Entwicklung datenbasierter Filter- und Kalibrierungsverfahren zur Reduktion von Unsicherheiten. Zusätzlich wurde ein hochaufgelöstes Landoberflächenmodell (CLM5) auf Ghana angewendet, um die Messdaten in ein konsistentes Simulationsframework zu integrieren.

Die Relevanz dieser Arbeiten ergibt sich aus der zentralen Rolle der Bodenfeuchte in wasserwirtschaftlichen, landwirtschaftlichen und klimabezogenen Fragestellungen. In tropisch-subhumiden Regionen wie Nordghana beeinflusst die Bodenfeuchte maßgeblich die landwirtschaftliche Produktivität, die Dynamik der Verdunstung und damit die Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht. Gleichzeitig fehlen in der Region flächendeckende, verlässliche Messsysteme, die als Referenz für satellitengestützte Fernerkundung oder für hydrologische Modellierung dienen könnten. Das Teilprojekt leistet daher einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der **Beobachtungsinfrastruktur**, zur **Methodenentwicklung im Datenmanagement** und zur **Modellierung hydrologischer Prozesse** unter realen Bedingungen in Westafrika.

1.2 Stand der Technik und konzeptioneller Hintergrund

Die präzise Erfassung der Bodenfeuchte ist ein zentrales Element in der Hydrologie, der Landwirtschaft sowie im Rahmen der Klimamodellierung. Sie beeinflusst maßgeblich den Wasserhaushalt, die Energieflüsse an der Landoberfläche und die Vegetationsentwicklung. In Regionen mit ausgeprägter Trocken- und Regenzeit – wie in Westafrika – entscheidet die Verfügbarkeit von Bodenwasser häufig über Ernteerträge, Wasserversorgung und die Dynamik atmosphärischer Prozesse. Dennoch ist die Beobachtung der Bodenfeuchte auf kontinentaler Ebene nach wie vor mit erheblichen Herausforderungen verbunden.

Limitierungen herkömmlicher Methoden

Konventionelle in-situ-Verfahren wie die **Time-Domain Reflectometry (TDR)** oder kapazitive Sonden liefern punktuelle Informationen über die Bodenfeuchte mit hoher zeitlicher Auflösung. Ihre räumliche Aussagekraft ist jedoch stark begrenzt: ein einzelner Sensor erfasst typischerweise ein Volumen von weniger als einem Liter Boden und ist daher stark von lokalen Bodenheterogenitäten beeinflusst. Eine räumliche Generalisierung der Messergebnisse ist nur durch ein dichtes Netz an Sensoren möglich, was jedoch aufgrund der aufwendigen Installation und Wartung in vielen Regionen – insbesondere in Westafrika – kaum umsetzbar ist.

Satellitengestützte Fernerkundungssysteme bieten dagegen eine flächenhafte Abdeckung und regelmäßige Wiederholraten. Instrumente wie SMOS, SMAP oder Sentinel-1 liefern Bodenfeuchtedaten in einer räumlichen Auflösung von mehreren Kilometern, teilweise auch höher, jedoch meist nur für oberflächennahe Bodenschichten (0–5 cm). Hinzu kommen Unsicherheiten durch atmosphärische Störungen, Vegetationsbedeckung und Signalinterferenzen bei feuchtem oder bewölktem Wetter. Gerade in landwirtschaftlich geprägten Regionen mit kleinräumig variierenden Landnutzungen oder starker Texturheterogenität stoßen satellitenbasierte Methoden an ihre Grenzen.

1.2.1 Einführung in die CRNS-Technologie

Die in diesem Projekt eingesetzte **Cosmic-Ray-Neutronensonden-Technologie (CRNS)** stellt einen innovativen, nicht-invasiven Ansatz zur flächenrepräsentativen Bestimmung der Bodenfeuchte dar. Das Messprinzip beruht auf der Wechselwirkung hochenergetischer kosmischer Strahlung mit Wasserstoffatomen in der oberen Bodenschicht. Die Neutronenzählrate ist dabei invers proportional zur Bodenfeuchte: Je mehr Wasser im Boden gespeichert ist, desto mehr Neutronen werden moderiert und absorbiert, was zu einem Rückgang der Zählrate führt.

Ein zentraler Vorteil von CRNS gegenüber Punktmessverfahren ist die große **räumliche Integrationsreichweite**. Eine Sonde erfasst die Bodenfeuchte über einen Radius von ca. 120–240 Metern und eine Tiefe von bis zu 80 cm – und liefert somit einen Mittelwert über eine landschaftsrelevante Skala. Dadurch wird eine bessere Repräsentativität im Vergleich zu Einzelpunkten erreicht. Die Sonden können kontinuierlich betrieben werden, benötigen relativ wenig Wartung und arbeiten unabhängig von Tageszeit und Wetterbedingungen.

Trotz dieser Vorteile sind CRNS-Messungen nicht frei von Unsicherheiten. Die Zählraten sind statistisch verrauscht (Poisson-Verteilung) und werden von externen Faktoren wie atmosphärischem Druck, Luftfeuchtigkeit, Vegetation und der Höhe über dem Meeresspiegel beeinflusst. Daher sind **Korrekturen und Filterstrategien** erforderlich, um den Einfluss dieser Faktoren zu minimieren und robuste Bodenfeuchtwerte abzuleiten. Hier setzt dieses Teilprojekt an, indem es verschiedene datenbasierte Filterverfahren (z. B. Kalman, Savitzky-Golay) entwickelt und evaluiert hat.

1.2.2 Wasserhaushaltsmodellierung mit CLM5

Neben der Messung stellt die Modellierung der Bodenfeuchte ein zentrales Werkzeug dar, um dynamische Prozesse zu analysieren, Vorhersagen zu erstellen und Szenarien zu simulieren.

In diesem Projekt wurde dazu das **Community Land Model Version 5 (CLM5)** eingesetzt – eines der weltweit führenden Landoberflächenmodelle. CLM5 simuliert den Austausch von Energie, Wasser und Kohlenstoff zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre und ist damit ein wesentlicher Bestandteil des Community Earth System Model (CESM).

CLM5 bietet durch seine modular aufgebaute Struktur eine hohe Flexibilität in der Repräsentation unterschiedlicher Landbedeckungstypen und Bodenprofile. Neuere Entwicklungen wie die dynamische Vegetationsdarstellung, ein verbessertes Schneemodell und detaillierte Hydrologie-Module (z. B. zur Bodenwasserbewegung nach der Richards-Gleichung) machen es besonders geeignet für Anwendungen in heterogenen Landschaften.

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurde CLM5 erstmals in einer räumlichen Auflösung von 1 km über Ghana zur Modellierung des Wasserhaushalts angewendet und mit den neu generierten CRNS-Daten sowie In-situ-Bodenfeuchtemessungen validiert. Die Modellierung erlaubte es, Beobachtungsdaten in ein konsistentes Prozessverständnis zu integrieren und gleichzeitig strukturelle Modellunsicherheiten zu identifizieren. Die Kombination aus **skalierbaren Beobachtungen (CRNS)** und **prozessbasierten Simulationen (CLM5)** bildet somit einen leistungsfähigen Rahmen für die hydrologische Analyse in datenarmen Regionen wie Westafrika.

1.3 Projektverlauf und methodisches Vorgehen

1.3.1 Auswahl, Transport und Installation der fünf CRNS-Stationen

Zu Beginn des Projekts wurde ein detailliertes Standortauswahlverfahren durchgeführt, um geeignete Messorte für die Installation der **Cosmic-Ray-Neutronensonden (CRNS)** in Ghana zu identifizieren. Die Auswahlkriterien umfassten klimatische Repräsentativität (semi-aride, subhumide Zonen), Bodenbeschaffenheit, Landnutzung sowie logistische Erreichbarkeit. Ursprünglich war die Installation auch im benachbarten Burkina Faso vorgesehen, musste jedoch aufgrund geopolitischer Unsicherheiten vollständig nach Ghana verlegt werden.

Fünf Stationen wurden eingerichtet: unter anderem in **Kayoro, Gorigo, Janga** und **Mole Park**. Die Standorte decken ein breites Spektrum an Vegetations- und Bodentypen ab – von degradiertem Grasland über Reisanbauflächen bis hin zu geschützten Waldgebieten. Der Transport der sensiblen Neutronensonden stellte logistisch eine Herausforderung dar, da die Geräte empfindlich auf Erschütterungen und Magnetfelder reagieren. Nach dem Import über Accra wurden die Sonden in Zusammenarbeit mit lokalen Partnerinstitutionen installiert, geortet, kalibriert und an lokale Strom- und Datennetze angeschlossen.

Die Stationen wurden mit zusätzlicher Sensorik für Bodenfeuchte, Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte ausgestattet, um die notwendigen Korrekturen der Neutronenzählrate (z. B. barometrisch, atmosphärisch) vornehmen zu können.

1.3.2 Zusammenarbeit mit lokalen und internationalen Partnern

Ein zentraler Erfolgsfaktor des Projekts war die enge **Zusammenarbeit mit Partnerinstitutionen in Ghana und Deutschland**. Die wissenschaftliche Begleitung und Logistik vor Ort erfolgte in enger Kooperation mit der **Kwame Nkrumah University of Science**

and Technology (KNUST) in Kumasi sowie der **University of Augsburg (UoA)**. Beide Partner waren maßgeblich in die Standortwahl, Installation, Datenübertragung, Kalibrierung und Wartung der Stationen involviert.

Zusätzlich stellte das **WASCAL-Kompetenzzentrum** in Ouagadougou wichtige Kontakte, Referenzdaten und logistische Unterstützung zur Verfügung. Die technische Schulung lokaler Wissenschaftler:innen und Techniker:innen sowie der regelmäßige Austausch über Workshops und gemeinsame Feldkampagnen trugen entscheidend zum Kapazitätsaufbau in der Region bei.

1.3.3 Datenfilterung und Unsicherheitsreduktion

Ein zentrales Anliegen des Projekts war die **Reduktion der Messunsicherheiten der CRNS-Daten**. Die Neutronenzählraten unterliegen stochastischem Rauschen (Poissonverteilung) und sind empfindlich gegenüber atmosphärischen Einflüssen. Aufbauend auf der Studie von **Davies et al. (2022)** wurden verschiedene Filterstrategien auf synthetisch generierte und reale CRNS-Daten angewendet und evaluiert.

Verglichen wurden:

- **Gleitender Mittelwert (MA)** – einfach umzusetzen, aber mit Verzögerungseffekten bei dynamischen Prozessen;
- **Savitzky–Golay-Filter (SG)** – ermöglicht glattes Signal bei Erhalt von Extrema;
- **Kalman-Filter (KF)** – modellbasierter Ansatz mit adaptivem Fehlerausgleich.

Die Ergebnisse zeigten, dass der Kalman-Filter besonders robust gegenüber Störungen war und gleichzeitig die feinstrukturelle Dynamik der Bodenfeuchte (z. B. Regenereignisse) erhalten konnte. Für hydrologische Anwendungen mit saisonaler Auflösung waren jedoch auch SG-Filter mit angepassten Fenstergrößen geeignet. Die Filter wurden in zwei Verarbeitungsszenarien getestet: vor und nach der atmosphärischen Standardkorrektur. Es zeigte sich, dass eine Korrektur der atmosphärischen Effekte **vor** dem Filtern deutlich konsistentere Ergebnisse lieferte.

1.3.4 Entwicklung datengetriebener Skalierungsparameter

Eine weitere methodische Innovation bestand in der Entwicklung eines datengetriebenen Ansatzes zur direkten Bestimmung von **Skalierungsparametern** für die CRNS-Auswertung. Wie in **Baatz et al. (2024)** beschrieben, wurden mithilfe eines nichtlinearen Optimierungsverfahrens die Parameter **Beta, Psi und Omega** geschätzt, die die Beziehung zwischen Neutronenzählrate und Bodenfeuchte für unterschiedliche Standorte individuell abbilden.

Die Methode basiert auf der Minimierung des Fehlers zwischen CRNS-geschätzter und bodengestützt gemessener Bodenfeuchte über einen Kalibrierungszeitraum. Diese Parameter ermöglichen eine deutlich verbesserte Kalibrierung der Sensoren und reduzieren die Notwendigkeit umfangreicher Bodenprobenahmen im Feld. Ihre Gültigkeit wurde an mehreren Standorten – in Ghana, Deutschland und Finnland – erfolgreich getestet.

1.3.5 Setup und Anwendung des CLM5-Modells für Ghana

Ein weiterer Meilenstein des Teilprojekts war die erstmalige Anwendung des **Community Land Model Version 5 (CLM5)** in einer **hochauflösenden Konfiguration (1 km x 1 km)** über die Landesfläche von Ghana. Als atmosphärischer Antrieb diente ein Bias-korrigierter Reanalyse-Datensatz (ERA5), ergänzt durch MODIS-Landnutzungsdaten und SoilGrids-Bodeninformationen. Die Modellinitialisierung erfolgte über ein 80-jähriges Spin-Up mit GSWP3-Forcing, um energetische und hydrologische Gleichgewichte im System zu erreichen.

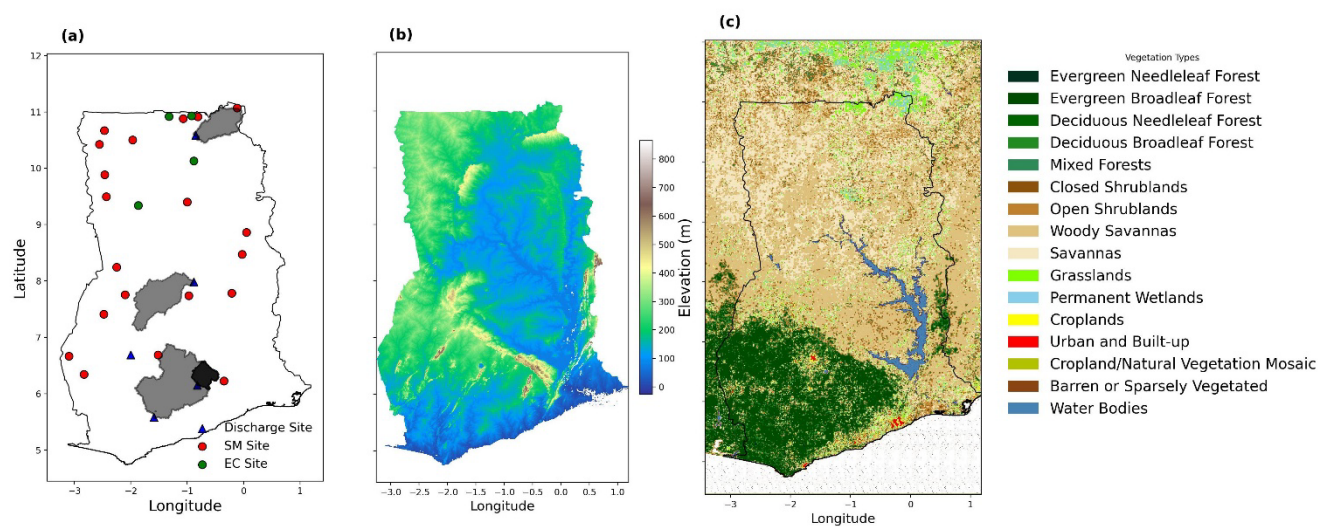


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet mit verschiedenen Beobachtungsstandorten (a) und den Landnutzungs- und Landbedeckungsinformationen (LULC) mit einer Auflösung von 1 km × 1 km (b) über Ghana basierend auf MODIS. Die Einzugsgebiete der vier Abflussmessstationen sind ebenfalls im linken Panel dargestellt und in Grau markiert (adaptiert aus Davies et al. 2025).

Die Simulationen wurden für den Zeitraum 2000–2023 durchgeführt und mit den CRNS-Daten sowie 23 TAHMO-Bodenfeuchtestationen und vier Eddy-Kovarianz-Standorten verglichen. Validiert wurden Bodenfeuchte (Ober- und Unterboden), Brutto-Primärproduktion (GPP), sensible und latente Wärmeflüsse sowie Oberflächenabfluss. Die Ergebnisse zeigten insgesamt eine gute Übereinstimmung, insbesondere während der Regenzeiten. Abweichungen in der Trockenzeit wurden auf Schwächen in der Modellierung des stomatären Widerstands und der Wurzelwasseraufnahme zurückgeführt.

1.4 Ergebnisse

1.4.1 CRNS-Datenqualität und -filterung

Die mit CRNS erhobenen Neutronenzählraten unterliegen stochastischem Rauschen, was insbesondere bei niedrigen Zählraten zu erheblichen Unsicherheiten in den abgeleiteten Bodenfeuchtwerten führen kann. Zur Reduktion dieser Unsicherheiten wurden verschiedene Filtertechniken verglichen: der **gleitende Mittelwert (MA)**, der **Savitzky–Golay-Filter (SG)** und der **Kalman-Filter (KF)**. In Davies et al. (2022) wurde diese Analyse auf Basis synthetischer Daten für vier Stationen (Gorigo, SMEAR II, Rollesbroich, Conde) systematisch durchgeführt.

Abbildung 2 zeigt die Abhängigkeit der Filterleistung von der gewählten Fenstergröße. Die MA- und SG-Filter führten bei kleinen Zeitfenstern (<24 h) zu ungenügender Glättung, bei größeren Zeitfenstern (>72 h) jedoch zu einer Verzerrung der Signalstruktur, wobei insbesondere während dynamischer Phasen (z. B. Regenereignisse) kurzfristige Peaks verloren gingen. **Der Kalman-Filter erwies sich als robuster Kompromiss**, da er sowohl das Rauschen reduzierte als auch scharfe Bodenfeuchtesprünge korrekt abbildete.

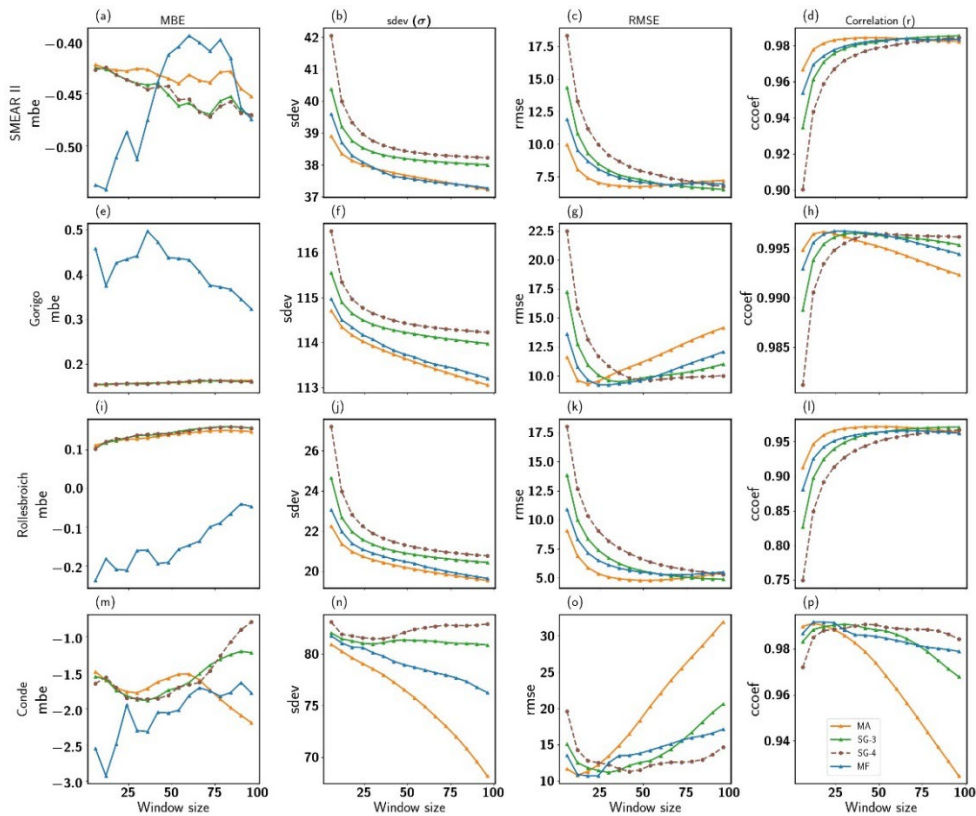


Abbildung 2: Abhängigkeit der Filterleistung von der gewählten Fenstergröße (adaptiert aus Davies et al. 2022).

Weiterhin zeigte die Studie von Davies et al. (2022), dass insbesondere bei der Station Rollesbroich die zeitliche Dynamik durch den Kalman-Filter am besten erhalten blieb. Die mittlere Abweichung (MBE) und der RMSE lagen mit KF deutlich näher am Referenzwert als mit MA oder SG. Der Pearson-Korrelationskoeffizient erreichte in der Kalman-Filterung Werte bis $r = 0.97$, während er bei SG teils unter $r = 0.90$ lag.

Eine ergänzende **Sensitivitätsanalyse** untersuchte die Wirkung der Fensterlänge und Filterart auf die Modellgüte. Die Ergebnisse belegen, dass die optimale Fenstergröße standort- und saisonabhängig ist. Für Anwendungen in Westafrika – mit stark ausgeprägten Trocken- und Regenzeiten – empfiehlt sich eine adaptive Filterstrategie. In der Regenzeit eignen sich kürzere Fenster (z. B. 12–24 h), in der Trockenzeit lange Glättungsintervalle (z. B. 72–96 h), insbesondere für saisonale Analysen.

1.4.2 Entwicklung und Anwendung neuer Skalierungsparameter

Um die Übertragbarkeit und Vergleichbarkeit von CRNS-Messungen an unterschiedlichen Standorten zu verbessern, wurden in **Baatz et al. (2025)** drei **skalierungsrelevante Parameter angepasst: Beta, Psi und Omega**. Diese Parameter steuern die Umrechnung der Zählraten in volumetrische Bodenfeuchte und ersetzen die bisher empirisch bestimmten Faktoren. Die Sensitivität der abgeschätzten Bodenfeuchte zu diesen Parametern ist beträchtlich (Abbildung 3).

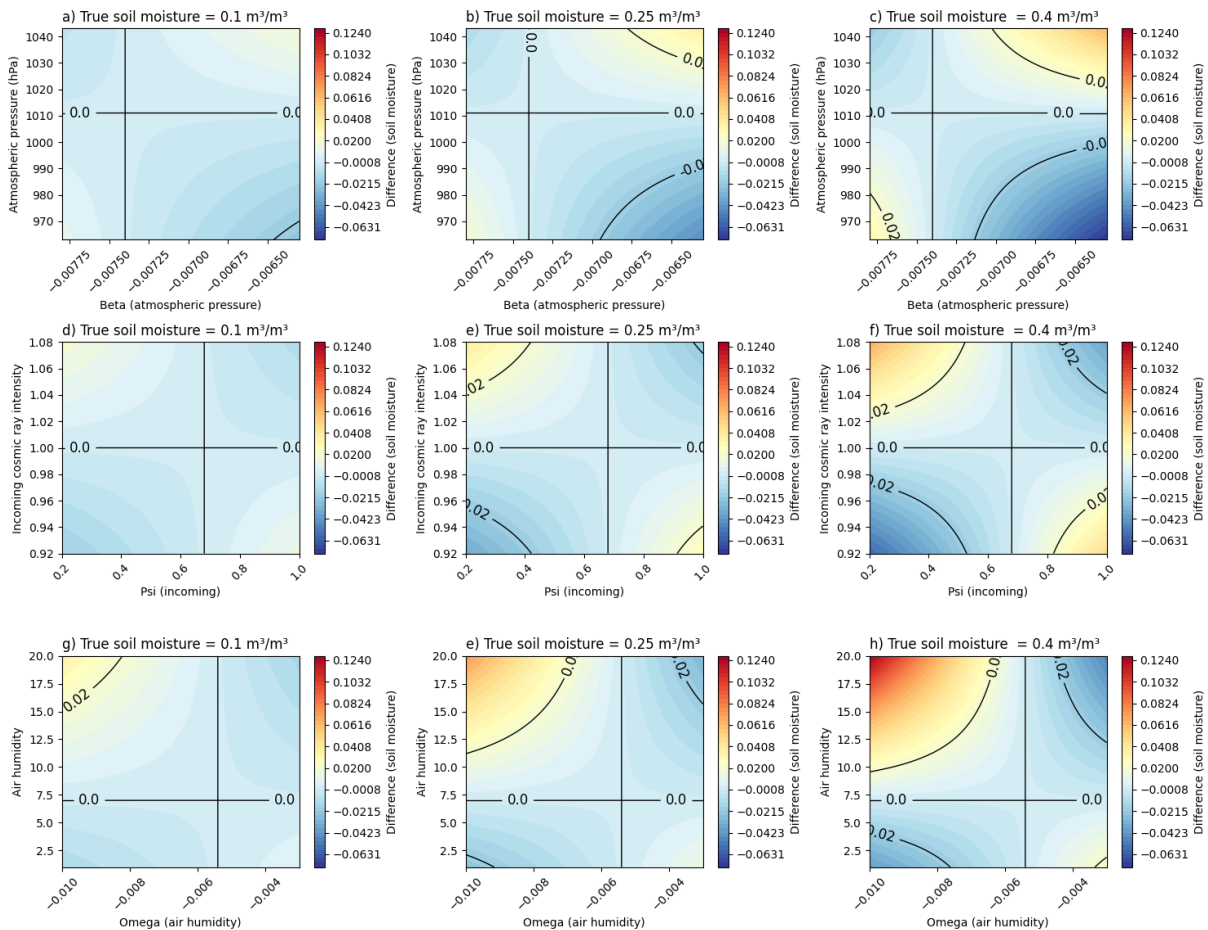


Abbildung 3: Empfindlichkeit der Bodenfeuchte, berechnet als Differenz zwischen geschätzter und tatsächlicher Bodenfeuchte. Die geschätzte Bodenfeuchte hängt vom atmosphärischen Druck (a, b, c), der einfallenden Neutronenintensität (d, e, f) und der Luftfeuchtigkeit (g, e, h) sowie deren jeweiligen Wertebereichen ab. Die tatsächliche Bodenfeuchte blieb konstant, während die geschätzte Bodenfeuchte zusätzlich vom Referenzwert von Omega und dem Referenzwert der Luftfeuchtigkeit abhängt. Die Konturlinien zeigen Bodenfeuchteunterschiede von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (gekrümmt) und $0,00 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (gerade) zu den Referenzwerten. Die Unterschiede zwischen geschätzter und tatsächlicher Bodenfeuchte waren stets am größten bei feuchten Bedingungen, z. B. $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (adaptiert aus Baatz et al. 2025).

Die Schätzung erfolgte über ein inverses Optimierungsverfahren auf Basis mehrmonatiger Vergleichsdaten zwischen CRNS und atmosphärischen Variablen. **Baatz et al. (2025)** zeigen die resultierenden Parameterwerte für verschiedene Standorte. Die Parameter spiegeln Unterschiede in Sensitivität zu verschiedenen Variablen wie Cut-off Rigidity, Höhe der Station über dem Meeresspiegel und Standortbedingter und Sensor-spezifischer Parameter wider. Beispielhaft dazu ist in Abbildung 4 die Relation von psi zur Korrektur von einkommender kosmischer Strahlung zum CRNS Signal dargestellt.

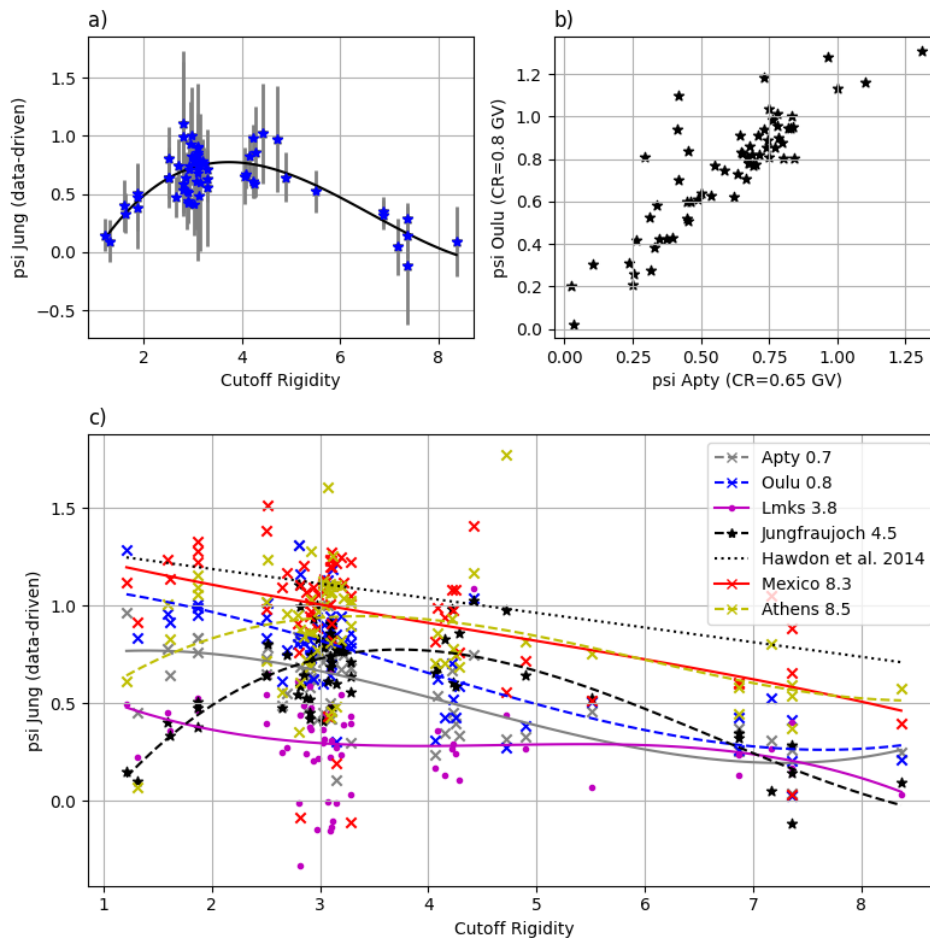


Abbildung 4: Psi, geschätzt für 64 COSMOS-Europe-Standorte und verschiedene NMDB-Monitore: (a) Jungfrauoch, (b) Apty und Oulu. Abbildung (c) enthält zusätzlich Ergebnisse für Lmks, Mexiko und Athen, wobei die Cutoff-Rigidität der NMDB-Monitore in der Legende angegeben ist. Psi-Schätzungen sind als Marker Punkt, Kreuz und Stern dargestellt. Polynomial Regressionen zu den NMDB-Monitoren sind als Linien dargestellt. Hawdon et al. (2014) wird in Bezug auf Jungfrauoch als Referenz angegeben (adaptiert aus Baatz et al. 2025).

1.4.3 Integration in das Landoberflächenmodell CLM5

Gemeinsam mit 23 Bodenfeuchtestationen der TAHMO- und WASCAL-Messnetze wurden die CRNS-Daten genutzt, um die Simulationsergebnisse des Landoberflächenmodells CLM5 zu validieren. Zusätzlich flossen Wasser- und Kohlenstoffflüsse von vier Eddy-Kovarianz-Standorten (Kayoro, Gorigo, Janga, Mole Park) in die Validierung ein. Davies et al. (2025) präsentieren eine **detaillierte Analyse der Modellperformance von CLM5** in Bezug auf verschiedene hydrologische und biogeochemische Variablen und Flüsse unter den

Standortbedingungen in Ghana. Die Korrelation zwischen modellierter und beobachteter Bodenfeuchte zeigt über alle Stationen hinweg deutliche regionale Unterschiede: **Im Norden Ghanas wurden r-Werte zwischen 0,65 und 0,87 erzielt**, während im Süden die Korrelationen mit $r < 0,6$ geringer ausfielen. **Die mittlere Kling-Gupta-Effizienz (KGE) lag bei 0,41**, wobei in bewaldeten und stark variierenden Regionen teils deutliche Ausreißer nach unten beobachtet wurden (Abbildung 5).

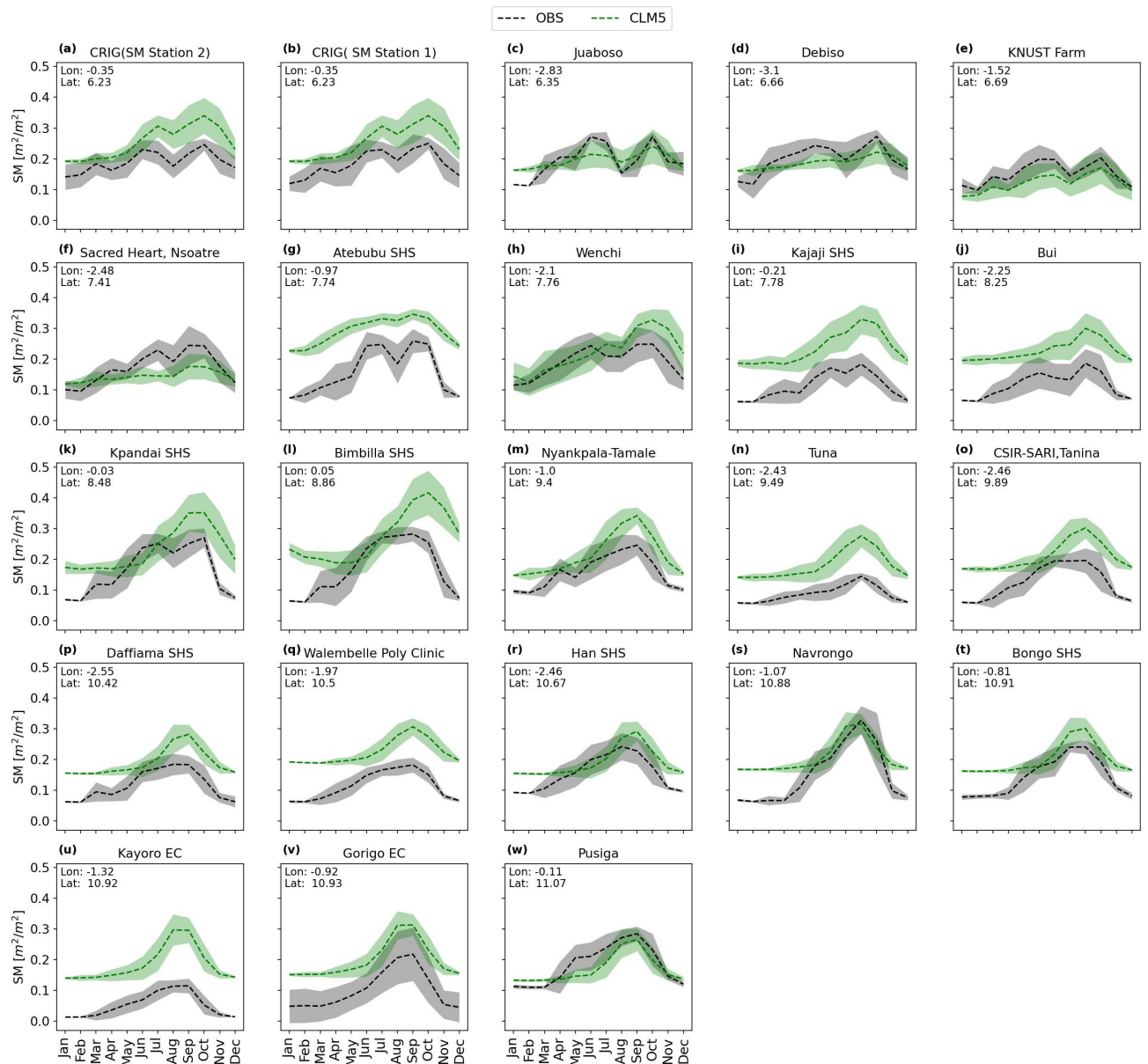


Abbildung 5: Jahreszyklus der vom CLM5 simulierten (grün) und der beobachteten (schwarz) Bodenfeuchte von 23 Stationen in Ghana. Der schattierte Bereich stellt die Standardabweichung dar (adaptiert aus Davies et al. 2025).

Davies et al. (2025) analysieren auch die Jahressgänge der Bodenfeuchte, der Energieflüsse (latente und sensible Wärme) und der Bruttoprimärproduktion (GPP), die mit CLM5 simuliert wurden. Die Modellierung zeigte **während der Regenzeit eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen**, wies **aber während der Trockenzeit systematische Abweichungen auf** - vermutlich aufgrund von überschätzten Evapotranspirationsraten und einer unzureichend abgebildeten Wurzelverteilung in der Modellstruktur.

Die Simulationsgüte von **GPP** wurde mittels der Flussdaten der EC-Stationen validiert. Während der Hauptvegetationsperiode war die **Übereinstimmung sehr gut ($r > 0.75$)**, während in Trockenphasen **GPP unterschätzt wurde** (Davies et al., 2025).

Abschließend untersuchten Davies et al. (2025) auch die **Fähigkeit von CLM5 zur Simulation des Abflusses in Ghana**. Das Modell zeigte eine **gute Repräsentation der saisonalen Abflussdynamik, unterschätzte jedoch die Abflüsse in den nördlichen Einzugsgebieten signifikant** – ein Hinweis auf strukturelle Defizite in der Modellimplementierung, insbesondere aufgrund fehlender Flussroutings in der Standardversion von CLM5.

1.5 Herausforderungen und Lösungen

Im Verlauf des Projekts traten mehrere logistische und technische Herausforderungen auf:

- Der ursprünglich geplante Aufbau von Stationen in **Burkina Faso** musste aufgrund der dortigen politischen Instabilität verworfen werden. Stattdessen wurden alle Messungen nach Ghana verlegt – verbunden mit erheblichem Aufwand für Genehmigungen, Logistik und Standortsuche.
- Eine der fünf **CRNS-Sonden wurde beim Transport beschädigt** und musste durch Ersatzteile aus Deutschland repariert werden. Dies führte zu einer Verzögerung von rund zwei Monaten im Messbeginn an einem Standort.
- Durch die COVID-19-Pandemie kam es zu **Verzögerungen bei der Anreise externer Expert:innen**, was Schulungen und Installationen temporär erschwerte.
- Trotz dieser Hürden konnte das Projekt durch **flexible Planung, starke lokale Partnerschaften (insb. KNUST)** und kontinuierliche Kommunikation mit dem WASCAL-Sekretariat erfolgreich umgesetzt werden. Die Laufzeit wurde einmalig um drei Monate verlängert, um die vollständige Datenerhebung und Auswertung abzuschließen.

1.6 Wissenschaftlicher Fortschritt

Die im Rahmen dieses Teilprojekts entwickelten Verfahren und Ergebnisse leisten einen substanziellen Beitrag zum Stand der Forschung in den Bereichen hydrometeorologisches Monitoring und Modellvalidierung in semi-ariden Regionen. Im Vergleich zu etablierten Verfahren – wie dem satellitengestützten Niederschlagsprodukt **CHIRPS** oder dem hydrologischen Modell **SWAT** – bietet der hier verfolgte Ansatz mittels CRNS eine **direkte, physikalisch basierte Bestimmung der flächenrepräsentativen Bodenfeuchte**, die weder punktuell beschränkt noch ausschließlich oberflächennah ist.

Während CHIRPS eine gute räumliche Abdeckung für Westafrika bietet, zeigten Validierungsstudien (z. B. Atiah et al., 2020), dass extreme Regenereignisse tendenziell unterschätzt und saisonale Muster regional verschoben erfasst werden. SWAT wiederum benötigt eine aufwendige Kalibrierung und ist stark sensitiv gegenüber der Wahl von Boden- und Landnutzungsparametern. Die Kombination aus CRNS und einem physikalisch fundierten Modell wie **CLM5**, ergänzt durch realistische meteorologische Antriebsdaten wie **ERA5**, stellt

in dieser Hinsicht einen methodischen Fortschritt dar, da Messung und Modellierung wechselseitig zur Validierung und Optimierung beitragen können.

Im Bereich der Datenverarbeitung konnten durch die Anwendung fortgeschrittener Filtermethoden (z. B. Kalman-Filter mit adaptivem Fehlermodell) und datengetriebener Skalierungsparameter (Beta, Psi, Omega) neue Standards im Umgang mit CRNS-Daten etabliert werden. Der Vergleich mit COSMOS-Referenzdaten zeigte, dass diese Verfahren auch international reproduzierbare und belastbare Ergebnisse liefern. Durch die Kombination von synthetischen Testdaten, realen Zeitreihen und Standortübergreifender Analyse wurde zudem eine skalierbare Methodik geschaffen, die auch auf andere Regionen übertragbar ist.

1.7 Verwertung und Transfer

Die im Projekt entwickelten Daten und Methoden sind von hohem praktischem Nutzen für verschiedene Anwendungsbereiche und Zielgruppen. Die Zeitreihen der CRNS-Stationen, Modelloutputs von CLM5 sowie die Validierungsergebnisse wurden bereits in wissenschaftlichen Repositorien dokumentiert und fließen in mehrere internationale Dateninitiativen ein. So wurden Manuskripte bei Fachzeitschriften wie *Geophysical Research Letters*, *Hydrological Earth System Science*, *Journal of Hydrology: Regional Studies* und *Sensors* eingereicht bzw. veröffentlicht.

Ein zentrales Ziel ist die Weiterverwendung der Daten im Rahmen der kommenden Forschungsinitiative **WASCAL WRAP 3.0**. Dort sollen die Erfahrungen aus CONCERT in operationelle Anwendungen überführt werden. Auch die Integration in das WASCAL Data Management System (WDMS) ist in Planung, wodurch die Daten langfristig zugänglich und nachhaltig nutzbar bleiben. Darüber hinaus ist vorgesehen, die CRNS-Stationen in der **zweiten Phase des Sonderforschungsbereichs DETECT** der Universität Bonn einzusetzen (Beantragung läuft).

Darüber hinaus leistete das Projekt wesentliche Beiträge zum **Capacity Building in Westafrika**. Über die Partnerschaft mit KNUST wurden mehrere lokale Techniker:innen und Studierende im Bereich Sensorik, Datenanalyse und Modellierung geschult. Zwei Masterarbeiten an KNUST sowie eine **Promotionsarbeit (Patrick Davis)** basieren auf Projektdaten. Durch gemeinsame Workshops und Feldkampagnen konnte zudem die institutionelle Zusammenarbeit zwischen FZJ, ZALF, UoA und afrikanischen Forschungseinrichtungen nachhaltig gestärkt werden.

1.8 Fazit und Ausblick

Das Teilprojekt hat seine Ziele in allen Kernbereichen erreicht und in Teilen übertroffen. Die erfolgreiche Installation und der Betrieb von fünf CRNS-Stationen in Ghana, die Entwicklung robuster Datenverarbeitungsmethoden und die erstmalige Anwendung eines hochauflösenden CLM5-Modells für Ghana bilden eine tragfähige Grundlage für zukünftige Forschungs- und Implementierungsmaßnahmen.

Die entwickelten Methoden zur Unsicherheitsreduktion und Kalibrierung von CRNS haben den methodischen Stand signifikant erweitert und sind international anschlussfähig. Die Modellvalidierung mit 23 Stationen und vier EC-Standorten zeigt die Eignung von CLM5 für tropische Klimazonen, hebt aber auch Herausforderungen in der Trockenzeitmodellierung und Abflussdarstellung hervor.

Für die nächste Projektphase empfehlen sich folgende Schwerpunkte:

- Erweiterung des Messnetzes mit Fokus auf transnationale Einzugsgebiete (z. B. Volta-Fluss);
- Nutzung von Datenassimilation für verbesserte Vorhersagen und Integration satellitengestützter Produkte (SMAP, Sentinel-1);
- Etablierung eines operationellen Datenportals auf WASCAL-Plattform.

Die Daten und Erfahrungen aus dem Projekt sind hochrelevant für die **wasserwirtschaftliche Planung** in Westafrika. Sie bieten neue Möglichkeiten für die Abschätzung von Trockenheitsrisiken, die Dimensionierung von Bewässerungssystemen und die Planung agrarökologischer Maßnahmen in einem sich wandelnden Klima.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Vorhabens wurden Mittel gemäß dem Zuwendungsbescheid in den folgenden Kategorien eingesetzt:

- Personalaufwand für wissenschaftliches und technisches Personal zur Planung, Installation und Auswertung der CRNS-Messstationen sowie zur Durchführung der Modellierung mit CLM5;
- Reise- und Transportkosten für den internationalen Austausch, Installation in Ghana und Koordination mit afrikanischen Partnerinstitutionen;
- Investitionen in Messtechnik, insbesondere fünf CRNS-Sonden, Datenlogger, Netzwerktechnik sowie Ersatzteile;
- Dienstleistungen und Honorare im Rahmen von Bodenkartierungen, Übersetzungsleistungen und lokalen Wartungsarbeiten;
- Sonstiger Sachaufwand für Verbrauchsmaterialien, Kommunikations- und Datenübertragungskosten.

Die Mittel wurden vollständig zweckgebunden verwendet und trugen direkt zur Erreichung der Projektziele bei.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig, um die wissenschaftlichen, technischen und operationellen Zielstellungen des Projekts umzusetzen. Die Auswahl und Installation der CRNS-Stationen in Ghana sowie die parallele Entwicklung und Anwendung von Datenfilterstrategien und Modellen erforderte interdisziplinäres Fachwissen und intensive Vor-Ort-Koordination.

Die Arbeiten wurden unter Berücksichtigung des Standes der Technik, der regionalen Gegebenheiten und der Fördermittelvorgaben mit wissenschaftlicher Gründlichkeit und Effizienz durchgeführt. Die Projektziele konnten im Rahmen der bereitgestellten Mittel und Laufzeit vollständig realisiert werden.

4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Projektergebnisse bieten einen unmittelbaren Nutzen für Forschung, Politikberatung und Entwicklungszusammenarbeit:

- Verbesserung der Beobachtungsinfrastruktur für hydrologische Schlüsselgrößen in Westafrika;
- Entwicklung übertragbarer Methoden zur Datenfilterung und Skalierung bei CRNS;
- Hochaufgelöste Klimasimulationen für Ghana, nutzbar für landwirtschaftliche Planung, Wasserwirtschaft und Risikomanagement;
- Beiträge zu offenen wissenschaftlichen Plattformen (z. B. ISMN) und Empfehlungen für die Integration in operationelle Dienste (z. B. WRAP 3.0).

Die entwickelten Methoden und Datensätze sind skalierbar und können auch in anderen semi-ariden Regionen eingesetzt werden.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurde wissenschaftlicher Fortschritt bei folgenden Vorhaben beobachtet:

- Neue Versionen von Landmodellen wie CLM5.1 und JULES-W1, mit verbesserter Vegetations- und Wasserdarstellung (Davies et al. 2025);
- Studien zu neuartigen CRNS-Zeitreihenfiltern und deren Integration in Monitoring-Systeme (z. B. bei TERENO) (Davies et al. 2022);
- Entwicklung verbesserter globaler CRNS-Kalibrierfunktionen (COSMOS-Upgrade, Baatz et al., 2025);
- Fortschritte im Downscaling und der perspektivischen Assimilation von Satellitendaten in Modellen auf nationaler und kontinentaler Ebene (u. a. CHIRPS+SMAP+ERA5-Komposite) (Davies et al. 2025).

Diese Erkenntnisse wurden in der eigenen Arbeit berücksichtigt und in Dialogform, z. B. auf der EGU oder in Publikationen, aufgegriffen.

6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Zeitschriftenartikel und Manuskripte:

Davies, P.; Baatz, R.; Bogena, H.R.; Quansah, E.; Amekudzi, L.K. (2022): Optimal Temporal Filtering of the Cosmic-Ray Neutron Signal to Reduce Soil Moisture Uncertainty. *Sensors*, 22(23), 9143. DOI: 10.3390/s22239143

Baatz, R.; Davies, P.; Nasta, P.; Bogena, H. (2024): Data-Driven Scaling Methods for Soil Moisture Cosmic Ray Neutron Sensors. *EGUsphere*, Preprint. DOI: 10.5194/egusphere-2024-3108

Davies, P.; Dombrowski, O.; Baatz, R.; Hendricks Franssen, H.J.; Guug, S.; Sy, S.; Bliedernicht, J.; Quansah, E.; Amekudzi, L.K.; Kunstmann, H.; Bogena, H.R. (2025): Multi-variate Validation of a High-Resolution Application of the Community Land Model (CLM5) in Ghana. *Journal of Hydrology: Regional Studies* (in Begutachtung).

Davies, P., Baatz, R., Bogena, H. R., Schattan, P. M., Quansah, E., & Amekudzi, L. K (2024). Revisiting the Barometric Effect on Cosmic Ray Neutron Soil Moisture Sensing. *ESS Open Archive*, <https://doi.org/10.22541/essoar.172901348.80957948/v1>

Konferenzbeiträge

Davies, P.; Baatz, R.; Bogena, H.R. (2023): CRNS-Based Soil Moisture Sensing: Advancements in Data Processing and Model Integration. Vortrag auf der European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Wien, Österreich, April 2023.

Baatz, R.; Davies, P.; Bogena, H.R. (2023): A European Vision for Hydrological Observations and Experimentation. Vortrag auf der EGU Galileo Conference, Neapel, Italien, Juni 2023.

Davies, P.; Baatz, R.; Bogena, H.R. (2024): Refining Barometric Corrections for Improved CRNS Soil Moisture Estimations. Vortrag auf der EGU General Assembly, Wien, Österreich, April 2024

Dissertation:

Davies, P. (2025): Estimation of Soil Moisture Using Cosmic Ray Neutron Sensing Technology in the Savanna Ecosystem. Kwame Nkrumah University of Science and Technology.

7 Referenzen

Davies, P.; Baatz, R.; Bogena, H.R.; Quansah, E.; Amekudzi, L.K. (2022): Optimal Temporal Filtering of the Cosmic-Ray Neutron Signal to Reduce Soil Moisture Uncertainty. *Sensors*, 22(23), 9143. DOI: 10.3390/s22239143

Baatz, R.; Davies, P.; Nasta, P.; Bogena, H. (2024): Data-Driven Scaling Methods for Soil Moisture Cosmic Ray Neutron Sensors. *EGUsphere*, Preprint. DOI: 10.5194/egusphere-2024-3108

Davies, P.; Dombrowski, O.; Baatz, R.; Hendricks Franssen, H.J.; Guug, S.; Sy, S.; Bliefernicht, J.; Quansah, E.; Amekudzi, L.K.; Kunstmann, H.; Bogena, H.R. (2025): Multi-variate Validation of a High-Resolution Application of the Community Land Model (CLM5) in Ghana. *Journal of Hydrology: Regional Studies* (in Begutachtung).

Davies, P., Baatz, R., Bogena, H. R., Schattan, P. M., Quansah, E., & Amekudzi, L. K (2024). Revisiting the Barometric Effect on Cosmic Ray Neutron Soil Moisture Sensing. *ESS Open Archive*, <https://doi.org/10.22541/essoar.172901348.80957948/v1>