

DIRECTION

moDel based decision support for IrRigatEd Cassava producTION (model-basierte Entscheidungshilfe für Bewässerung in der Maniok-Produktion)

JA Postma, P Chiewchankaset, T Khongkhuntian, T Saithong, T Wojciechowski

Date: Dec 17, 2024

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	3
2 Einführung und Ziele	5
3 Ausgeführte Aktivitäten	6
3.1 WP1 Phänotypisierung (PI: Wojciechowski CO-PI: Le Huy Ham, Poramate, Teera und Saowalak)	6
3.1.1 Feldversuche	6
3.1.2 Experimente im Gewächshaus	9
3.2 WP2 Cassava-Bewässerungsmodell (PI: Postma, CO-PI: Treenut). Modellentwicklung.	11
3.3 WP3 App-Entwicklung (PI: Treenut, CO-PI: Postma)	13
3.4 WP4 Jährlicher Workshop mit Stakeholdern und Betriebsüberwachung (PI: Warakorn, CO-PI: Tanyarat und Le Huy Ham)	14
3.5 WP5 Datenmanagement (PI: Dr Teera, CO-PI: Le Huy Ham, dir. Wojciechowski, Dr Saowalak)	16
4 Zusammenfassende Schlussfolgerung	17

1 Zusammenfassung

Die Projektziele waren:

1. Ein neuartiges Modell der Wurzelwasseraufnahme und der Pflanzenproduktion.
2. Besseres Verständnis der Plastizität des Wurzelwachstums als Reaktion auf Wassermangel.
3. Es wurden neuartige Bewässerungstechniken getestet.
4. Neuartige Sensoranwendungen in landwirtschaftlichen Betrieben.
5. Entwicklung neuartiger Handy-Apps.

Wir haben mehrere Manioksorten im Gewächshaus und auf dem Feld getestet und ihre Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit ermittelt. Wir haben Dosis-Wirkungs-Kurven für mehrere Merkmale erstellt und diese zur Entwicklung eines neuartigen Modells für die Bewässerung von Maniok verwendet. Das Bewässerungsmodell wurde an vier Standorten und zwei Jahre lang sowohl auf Versuchsbetrieben als auch auf landwirtschaftlichen Feldern getestet. Im Vergleich zu Regenfeldbau erbrachten die gemäß der Modellempfehlung bewässerten Felder auf den Versuchsfeldern 10–30 % mehr Ertrag und sogar auf den Feldern der partizipierenden Bauern 40 % mehr, je nach Standort und Behandlung, und sparte etwa 50 % Wasser im Vergleich zu einer Behandlung, die die Praktiken der Landwirte nachahmt.

Das DIRECTION-Projekt führte Workshops mit Landwirten und weiteren Interessenvertretern in Ratchaburi, Buriram und Vietnam durch, um sie über die Ergebnisse zu informieren und Feedback zu den Praktiken und Ideen der Landwirte zur Entwicklung mobiler Apps zu sammeln. Mithilfe des plattformübergreifenden Frameworks „flutter“ wurde eine App entwickelt. Die App kann auf Windows-, macOS-, Android- und iOS-Plattformen ausgeführt werden. Die App ermöglicht es dem Landwirt, Felder zu definieren und spezifische Einstellungen für das Feld vorzunehmen, wie z. B. Pflanzdichte, Bodeneigenschaften, Düngung und Tropfraten der Bewässerungsleitungen. Die App kann lokale Wetterdaten von NECTEC-Wetterstationen und dem OpenMeteo-Wetterdienst sammeln. Letzteres bietet auch eine Wettervorhersage. Basierend auf dem eingegebenen Wetter ermittelt die App den aktuellen und zukünftigen Wasserbedarf. Die Prognosen werden jedes Mal aktualisiert, wenn neue Wetterdaten bereitgestellt werden. Die App wurde von Landwirten und Interessenvertretern gut angenommen, und die Industrie zeigte Interesse. Wir schließen daraus:

- Im Vergleich zu Felder ohne Bewässerung kann die modellbasierte Bewässerung den Ertrag steigern, insbesondere in Jahren mit spätem Einsetzen der Regenzeit.
- Im Vergleich zu Felder ohne Bewässerung können Landwirte früher pflanzen, obwohl dafür große Mengen Wasser benötigt werden.
- Im Vergleich zur sensorbasierten Bewässerung bietet die App eine zuverlässige Möglichkeit, die benötigte Wassermenge zu bestimmen, da sich die Unsicherheit und Ausfallrate der Sensoren als hoch erwies.
- Die Nutzung der App ist deutlich günstiger als die Nutzung der Sensoren und weniger riskant, da die Batterien der drahtlosen Sensorstation während des Projekts gestohlen wurden.
- Im Vergleich zur landwirtschaftlichen üblichen Praxis wird die App den Wasserverbrauch drastisch reduzieren, ohne den Ertrag zu verringern.

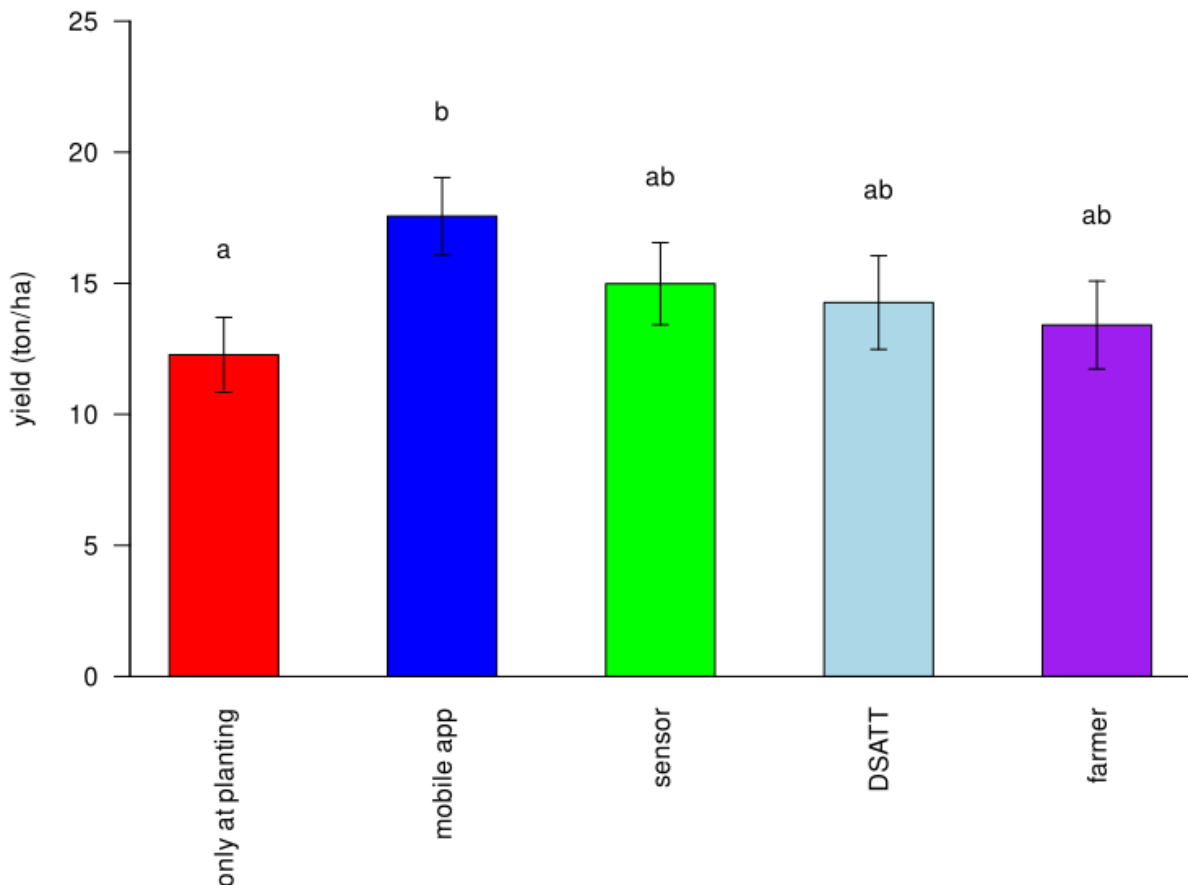


Abbildung 1.1: Korrigierter Ertrag je Ort, Jahr und Genotyp für jede Art von Bewässerung. Durchschnitt +/- Standardabweichung der Mittelwerte aus 9 Versuchen. Buchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede nach dem Tukey-Test.

Trotz der aktuellen Erfolge gaben Landwirte an, dass sie ein ganzheitlicheres Entscheidungsunterstützungssystem benötigen, das nicht nur den Wasserbedarf vorhersagt, sondern beispielsweise auch Ratschläge zur Sortenwahl, Düngung und Pflanzenschutz gibt. Sie wünschen sich genauere Ertragsvorhersagen unter Berücksichtigung dieser Elemente. Dies erfordert jedoch viel mehr Experimente und Tests, die über den Rahmen des Projekts hinausgehen. Darüber hinaus gaben die Landwirte an, dass sie es vorziehen, höherwertige Kulturen wie Süßkartoffeln zu bewässern, anstatt ihre Ausrüstung und ihr Wasser für Maniok zu verwenden. Darüber hinaus haben wir einen Film zur Verwendung in den Workshops der Landwirte gedreht, der die wichtigsten Ergebnisse zeigt, und die Ergebnisse mit weiteren Interessensgruppen zu teilen. Diese Filmzusammenfassung kann auf der GitLab-Website des Projekts unter angesehen werden <https://cassavamodels.gitlab.io/direction-app/>.

2 Einführung und Ziele

Der Klimawandel führt zu größeren Niederschlagsschwankungen, was zu Dürreperioden und extremer Nässe führt. Die Pflanzenproduktion kann widerstandsfähiger gemacht werden, wenn Landwirte die Möglichkeit haben, während Dürreperioden zu bewässern. Landwirte, die bewässern, geben oft zu viel Wasser ein, da sie Schwierigkeiten haben, den Wasserbedarf der Pflanzen genau zu bestimmen. Dies führt zu einem hohen Wasserverbrauch, der Gefahr, dass der Wasserreservoir vor dem Ende der Dürre geleert wird, und zur Auswaschung von Nährstoffen aus dem Boden. Wir haben ein Entscheidungsunterstützungstool für und in Zusammenarbeit mit Maniokproduzenten entwickelt. Die Entwicklung einer Smartphone-App in Verbindung mit einem Pflanzenmodell ermöglicht Landwirten genauere Schätzungen des Wasserbedarfs der Pflanze. In Zusammenarbeit mit Landwirten und Interessenvertretern haben wir die Modellvorhersagen und den Einsatz der App auf experimentellen und realen Farmen getestet. Aus wissenschaftlicher Sicht haben wir ein neues Erntemodell für bewässerten Maniok entwickelt, das einfacher zu verwenden ist, schnell genug, dass es auf einem Telefon ausgeführt werden kann und eine detailliertere Behandlung wurzelbezogener Prozesse bietet, die wichtig sind, um den Zugang von Maniok in tiefere Lagen zu bestimmen Wasser. Der Schlüssel, um zu wissen, wie viel Wasser „ausreichend“ ist, liegt in der Kenntnis der phänotypischen Plastizität von Maniok und der Bodentrockenheit. Wir haben Dosis-Wirkungs-Kurven für mehrere Merkmale erstellt, die die Grundlage für das Pflanzenmodell und die Bewässerungsempfehlungen bilden.

3 Ausgeführte Aktivitäten

3.1 WP1 Phänotypisierung (PI: Wojciechowski CO-PI: Le Huy Ham, Poramate, Teera und Saowalak)

3.1.1 Feldversuche

Über einen Zeitraum von drei Jahren des Projekts wurden Feldexperimente mit Maniokplantagen durchgeführt, um das Wachstum und den Ertrag von Maniok als Reaktion auf die Wasserverfügbarkeit unter verschiedenen Bewässerungssystemen zu untersuchen. Diese Daten wurden in WP2 an die DIRECTION-Modellentwicklung und in WP3 an die mobile Anwendung übergeben. Im ersten Jahr wurde eine Studie zum Pflanzenwachstum unter verschiedenen Bewässerungsregimen anhand der in der Provinz Buriram gepflanzten Manioksorte KU50 durchgeführt. Das Experiment wurde in einem randomisierten Blockdesign (RBD) durchgeführt, das die Einschränkungen bei der Probenentnahme, der Rohrleitungsanordnung des Wassersystems und dem Sensornetzwerk berücksichtigte. Von April 2021 bis Januar 2022 wurden vier Bewässerungsbehandlungen (T1, T3.1, T3.2 und T5) angewendet. Die Einzelheiten der Bewässerungssysteme und der Probenentnahme sind in Bild 3.1 aufgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass Wachstum und Entwicklung der Maniokpflanzen unterschiedlich waren deutlich während der 7-monatigen Ernte. Die endgültigen Ertragsunterschiede waren jedoch nicht signifikant.

Im Jahr 2 wurde das Experiment in zwei Provinzen zwischen März 2022 und Januar 2023 durchgeführt: (1) in Buriram unter Verwendung der KU50-Manioksorte (BRR.KU50) und (2) in Khon Kaen unter Verwendung der Manioksorten KU50 (KKU.KU50) und R9 (KKU.R9), mit fünf Bewässerungsbehandlungen (T1, T2, T3, T4 und T5*) (Bild 3.1). Den Ergebnissen zufolge erzielten die unterschiedlichen Bewässerungen T2 (Bewässerung basierend auf den vom DIRECTION-Modell vorhergesagten Werten) und T5* (Bewässerung basierend auf den Meinungen der Forscher) in der Provinz Buriram die höchsten Erträge auf Basis des Frischgewichts nach 9 MAP, während die Behandlung T1 (Kontrollgruppe) die niedrigsten Erträge aufwies. Ähnlich wie in der Provinz Buriram erzielte die Behandlung T2 die höchsten Erträge im Versuchsfeld in der Provinz Khon Kaen für beide Sorten, R9 und KU50. Unterdessen produzierten die Behandlungen T1 und T3 die geringsten Erträge bei KU50 bzw. R9. Allerdings waren die Ergebnisse statistisch nicht signifikant basierend auf dem Wilcoxon-Rangsummentest (p -Wert $< 0,05$). Der beobachtete unklare Einfluss der Wasserverfügbarkeit durch Bewässerung könnte auf das globale Klima während des La Niña-Phänomens (2020–2022) zurückzuführen sein, das häufig starke Niederschläge mit sich brachte.

Im Jahr 3 wurde ein zusätzliches Experiment initiiert, um die Reaktion des Pflanzenwachstums unter trockenen Wetterbedingungen in der Provinz Ratchaburi zu untersuchen. Insgesamt umfasste die Studie in diesem Jahr drei Provinzen und fünf Versuchsfelder von April 2023 bis Februar 2024: (1) Buriram mit der Manioksorte KU50 (BRR.KU50) und fünf Bewässerungsbehandlungen (T1, T2, T3, T4 und T5*), (2) Khon Kaen mit den Manioksorten KU50 (KKU.KU50) und R9 (KKU.R9) und fünf Bewässerungsbehandlungen (T1, T2, T3, T4 und T5*), (3) Ratchaburi mit der Manioksorte KU50, angebaut in der Trockenzeit (RBR.KU50.Dry), mit drei Bewässerungsbehandlungen (T1, T2 und T3), (4) Ratchaburi mit der Manioksorte KU50, angebaut in der Regenzeit (RBR.KU50.Wet), mit drei Bewässerungsbehandlungen (T1, T2 und T3) und (5) Ratchaburi mit der Manioksorte Rayong15 (R15), angebaut auf dem Bauernfeld (RBR.R15.Farmer), mit zwei Bewässerungsbehandlungen (T1 und T2). Die Details zu den Bewässerungsschemata

Treatment	Age (month after planting; MAP)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Year-1 (Buriram)									
T1: Rainfed (R)	100%FC	R	R	R	R	R	R	R	R
T3.1: 75%FC	100%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC
T3.2: 40%FC	100%FC	40%FC	40%FC	40%FC	40%FC	40%FC	40%FC	40%FC	40%FC
T5: Farmer-based	100%FC	100%FC	75%FC	75%FC	R	R	R	R	R
Year-2 & Year-3 (Buriram, Khon Kaen, and Ratchaburi**)									
T1: Rainfed (R)	100%FC	R	R	R	R	R	R	R	R
T2: DIRECTION-based	100%FC	model	model	model	model	model	model	R	R
T3: Sensor-based	100%FC	50%FC	50%FC	50%FC	50%FC	50%FC	50%FC	R	R
T4: CSM-based	100%FC	model	model	model	model	model	model	R	R
T5*: Full irrigation	100%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC	75%FC

Abbildung 3.1: Die verschiedenen Bewässerungsbehandlungen während der drei Arbeitsjahre des Projekts. FC=Field Capacity, die maximale Menge Wasser, die in Boden gespeichert werden kann ist 100% FC. *) Im 2. und 3. Jahr; Die Bewässerung von T5 basierte auf den Meinungen von Forschern mit unterschiedlichem Fachwissen. Das Muster wird während der gesamten Lebensdauer von 2 bis 9 Monaten nach dem Pflanzen bewässert. Laut Bodenfeuchtigkeitsdaten von Sensoren bei 75 % FC. **) Provinz Ratchaburi nur im T1-T3-Bewässerungsschema getestet.

und der Probenentnahme sind in Abb 3.1 dargestellt. Die Ergebnisse zeigten, dass KU50, die in der Provinz Buriram unter fünf verschiedenen Bewässerungsmethoden angebaut wurde, weiterhin ähnliche Wachstumsresultate wie in den ersten beiden Jahren aufwies. Allerdings waren die Ergebnisse statistisch nicht signifikant basierend auf dem Wilcoxon-Rangsummentest (p -Wert $< 0,05$). Aufgrund eines schweren Ausbruchs der Roten Spinnmilbe, während der Trockenperiode zwischen 5 und 9 MAP in diesem Jahr könnten in den Versuchspartellen in der Provinz Buriram keine Unterschiede zwischen den Bewässerungsmethoden beobachtbar gewesen sein. In den Versuchspartellen in der Provinz Khon Kaen waren die Wachstumsresultate von KU50 und R9 ähnlich denen des zweiten Jahres, aber die Biomasse aller drei Pflanzenteile nahm möglicherweise aufgrund der wiederholten Kultivierung auf demselben Gebiet ab, was zu einem Nährstoffrückgang führte. Trotzdem erzielte die Behandlung T2 die höchsten Erträge für beide Sorten, R9 und KU50. In den Versuchspartellen in der Provinz Ratchaburi in beiden Jahreszeiten (RBR.KU50.Dry und RBR.KU50.Wet) waren die Ergebnisse statistisch nicht signifikant basierend auf dem Wilcoxon-Rangsummentest (p -Wert $< 0,05$). Im Gegensatz dazu zeigte das finale Ernteergebnis in den Versuchspartellen des Bauern in der Provinz Ratchaburi (RBR.R15.Farmer) einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Bewässerungsmethoden (T1 und T2). Die T2-Behandlung (DIRECTION-basiertes Modell) erzielte ein höheres Frischwurzelgewicht nach 9 MAP im Vergleich zur T1-Behandlung (Regenfeldbau).

Im Gegensatz zu Wachstum und Ertrag zeigte die auf dem DIRECTION-Modell basierende Bewässerung eine höhere Effizienz in der Wassernutzung. Betrachtet man die Pflanzenwasserverwendung (PWU; Liter pro Tonne Frischgewicht [FW]) oder die Menge an Wasser, die benötigt wird, um eine Tonne frische Maniokwurzeln zu produzieren, wiesen sowohl die modellbasierten Bewässerungsmethoden (T2 und T4) als auch die sensorbasierten Methoden (T3) geringere PWU-Werte auf im Vergleich zur T5*-Behandlung, die durchgehende Bewässerung während des gesamten Experiments in den Provinzen Buriram und Khon Kaen anwandte. Ähnlich verhielt es sich in der Provinz Ratchaburi, wo die modellbasierte Bewässerungsmethode (T2) niedrigere PWU-Werte aufwies als die sensorbasierten Methoden (T3) in beiden Versuchspartellen (RBR.KU50.Dry und RBR.KU50.Wet).

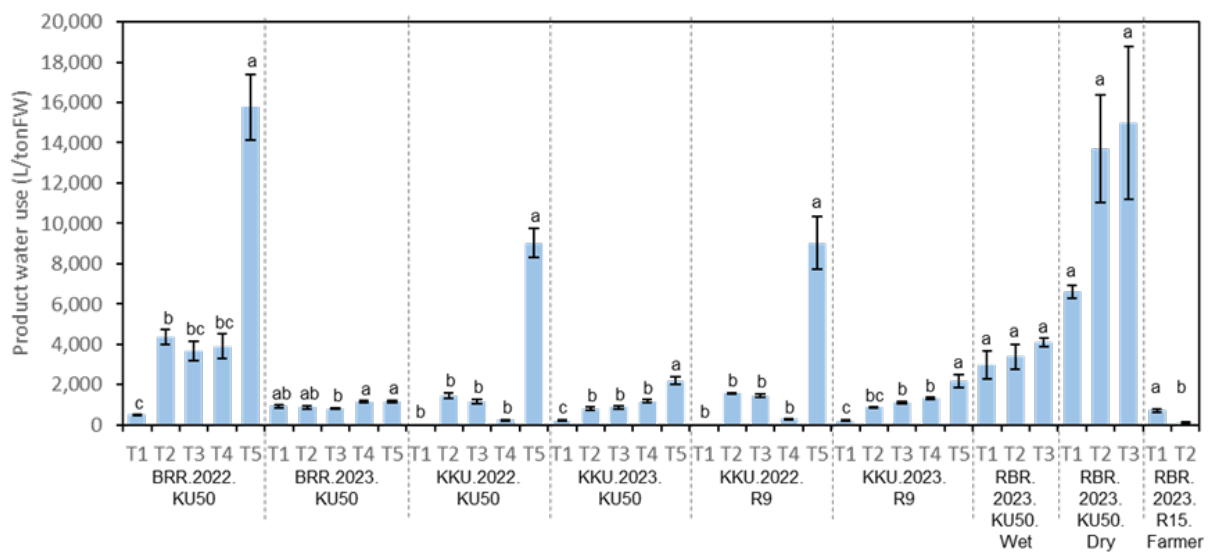


Abbildung 3.2: Die Menge an Wasser, die zur Produktion einer Tonne Frischgewicht Maniokwurzeln (Endertrag) 9 Monate nach der Pflanzung benötigt wird (Pflanzenwasserverbrauch; PWU (L/tonFW)) unter verschiedenen Bewässerungsmethoden im zweiten Jahr (Versuchspartellen in den Provinzen Buriram und Khon Kaen) (BRR.2022.KU50, KKK.2022.KU50 und KKK.2022.R9) und im dritten Jahr (Versuchspartellen in den Provinzen Buriram, Khon Kaen und Ratchaburi) (BRR.2023.KU50, KKK.2023.KU50, KKK.2023.R9, RBR.2023.KU50.Wet, RBR.2023.KU50.Dry und RBR.2023.R15.Farmer). Die statistischen Unterschiede zwischen den Behandlungen (T1 bis T5, Siehe Abb 3.1) in jeder Versuchspartelle wurden mit einer einfaktoriellem ANOVA und Tukey-Test auf einem Konfidenzniveau von 95% getestet (Buchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede an).

Trait	KU50	R72	HB60	R7	R9	R11	KU72	Trait mean
Leaf dry-weight	-1	2.08	2.98	-1	2.75	-1	1.07	0.84
Petiole dry-weight	1.97	2.44	2.38	-1	2.96	-1	-1	0.96
Stem dry-weight	3.01	4.08	4.92	-1	4.51	-1	1.81	2.33
Shoot dry-weight	-1	2.1	3.37	-1	2.65	-1	-1	0.59
Root dry-weight	1.92	4.12	2.7	-1	10.79	1.85	3.88	3.47
Plant dry weight	-1	2.28	4.03	-1	5.62	-1	-1	1.13
Root-to-shoot ratio	1.07	1.09	1.18	-1.15	1.28	1.18	1.11	0.82
Root-to-leaf ratio	1.8	1.97	2.29	-1	7.45	3.7	2.22	2.63
Root-to-petiole ratio	1.52	1.83	-1	-1	3.31	2.91	2.01	1.37
Root-to-stem ratio	1.5	2.55	-1	-1	2.57	2.02	1.75	1.20
Water-use efficiency	-1	2.96	2.38	1.35	6.74	-1	2.3	1.96
Root mass fraction	1.44	1.57	-1	-1.32	2.85	-1	-1	0.22
Leaf mass fraction	-1.34	-1	-1.33	-1	-1.53	-1.3	-1.41	-1.27
Stem mass fraction	1.44	-1	1.13	-1	-1	1.25	-1	-0.03
Genotype mean	0.74	1.93	1.65	-0.87	3.64	0.33	0.70	1.16

Abbildung 3.3: Plastizitätsindizes von Merkmalen und Genotypen unter Dürre- und Wiederbewässerungsbedingungen. Zahlen >1 oder <-1 weisen auf Plastizität hin (fache Änderung des Merkmalswerts über den gesamten Bereich von 20–80 % Feldkapazität). (-1) Für dieses Merkmal wurde keine signifikante Plastizität gemessen.

3.1.2 Experimente im Gewächshaus

Die Auswirkungen einer Dürre auf Nutzpflanzen variieren je nach Dauer, Intensität und Ausmaß. Obwohl Maniok für seine Trockenheitstoleranz bekannt ist, können längere Dürrebedingungen während der Pflanzsaison seine physiologischen, biochemischen und molekularen Prozesse beeinträchtigen und dadurch sowohl die Qualität als auch den wirtschaftlichen Ertrag beeinträchtigen. Während Maniokwurzeln für die Aufrechterhaltung der Pflanzenstabilität und des Ertrags während Dürreperioden von entscheidender Bedeutung sind, gibt es nur begrenzte Erkenntnisse darüber, wie sie sich an solchen Stress anpassen. Daher haben wir Wurzelmerkmale im Zusammenhang mit der Dürreakklimatisierung phänotypisiert.

Wir haben sieben Dürrekontrast-Sorten bewertet: Rayong 11 (R11), Rayong 9 (R9), Kasetsart 50 (KU50), Kasetsart 72 (KU72), Huay Bong 60 (HB60), Rayong 72 (R72) und Rayong 7 (R7) – die in Zusammenarbeit zwischen der Kasetsart-Universität, dem Thai Tapioca Development Institute, der thailändischen Landwirtschaftsabteilung und CIAT-Columbia entwickelt wurden. Diese Genotypen wurden bei sechs Wasserständen bewertet: 80, 70, 50, 40, 30 und 20 % der Feldkapazität. Das Experiment fand von April bis Juli 2023 statt, wobei die Datenerfassung und -analyse zwischen August und Oktober 2023 durchgeführt wurde. Insbesondere zeigte R9 eine hohe Plastizität, während HB60 und R72 eine mäßige Plastizität aufwiesen und KU50, KU72, R11 und R7 eine geringere Plastizität aufwiesen. Diese Ergebnisse legen nahe, dass R9 als wertvolle genetische Ressource für hohe Erträge unter gut bewässerten Bedingungen dienen könnte, wohingegen R72, KU50, KU72, R11 und R7 in dürregefährdeten Gebieten eine vielversprechende Wachstumsleistung zeigten (siehe Abb. 3.3). Die plastischsten (empfindlichsten) Merkmale waren die Wurzel- und Stängel trockenmasse.

Basierend auf den erhaltenen Wachstumsleistungs-, Verfügbarkeits- und Plastizitätsindizes wurden R9, R72 und KU50 für weitere Wurzelphänotypisierungen am Forschungszentrum Jülich (FZJ) ausgewählt, um Merkmale zu identifizieren, die zur Anpassung der Wurzelsystemarchitektur (RSA) an Trockenstress beitragen. Von August bis Oktober 2023 wurden am FZJ zwei Primärexperimente durchgeführt. Das erste Experiment umfasste die Phänotypisierung von R9, R72 und



Abbildung 3.4: Links: Maniok-Pflanze wächst unter kontrollierten Wasserständen. Rechts: Maniokwurzeln sind im Rhizotron sichtbar, wenn sie gut bewässert werden und unter Trockenheit leiden.

KU50 sowohl unter gut bewässerten (70 % FC) als auch unter Dürrebedingungen (30 % FC). Das anschließende Experiment konzentrierte sich ausschließlich auf KU50 und untersuchte dessen Wurzelphänotypen bei drei Wasserständen (70 % FC für gut bewässerte Bedingungen und 40 % und 20 % FC für Dürrebedingungen).

Obwohl sich diese Experimente über drei Monate erstreckten, verzögerten Zeitbeschränkungen die sofortige Analyse der RSA-Merkmale. Infolgedessen wurden die Phänotypisierung der RSA-Merkmale und die Genexpressionsstudien auf Februar und März 2024 am FZJ verschoben. Es wurde RNA extrahiert, und die Sequenzierung zur Identifizierung unterschiedlich exprimierter Gene unter Trockenstress- und gut bewässerten Bedingungen ist im Gange, ebenso wie das Wurzelscannen. Zusätzlich planen wir eine quantitative Bewertung der Korrelation zwischen Bodenfeuchtigkeitsgehalt und plastischen Wurzeleigenschaften bei den ausgewählten Genotypen. Diese quantitative Bewertung wird ein umfassendes Verständnis darüber vermitteln, wie sich diese Genotypen an Wasserstress anpassen und wie sich ihre Wurzeleigenschaften bei unterschiedlichen Bodenfeuchtigkeitsniveaus verhalten. Die erwarteten Forschungsergebnisse werden grundlegende Fragen zur Reaktion und Anpassung von Maniokwurzeln an Trockenheitsbedingungen beantworten, was entscheidend für die Erhaltung ihrer Erträge ist. Diese Ergebnisse sind von großer Bedeutung, da sie unser Verständnis darüber vertiefen, wie Maniokwurzeln mit Trockenstress umgehen und ihn überstehen. Letztendlich wird dieses Wissen zu einem breiteren Verständnis der Resilienz beitragen, insbesondere in herausfordernden Umgebungen, und die Fähigkeit von Maniok betonen, unter wassergestressten Bedingungen zu gedeihen. Wir schließen daraus, dass das Wurzelsystem plastischer ist als der Spross und daher ein besserer Indikator für den Wasserbedarf darstellt. Darüber hinaus wurzelt Maniok langsam, kann aber über die lange Wachstumsperiode große Tiefen erreichen. Wasser ist daher in den frühen Monaten entscheidender und nicht während der letzten Monate der Vegetationsperiode. Die Manioksorten unterscheiden sich stark in ihrer Trockenheitstoleranz, aber alle Sorten litten bei Bodenfeuchtigkeitsgehalten unter 40-50 % der Feldkapazität. Das bedeutet, dass die optimale Bewässerung für alle Sorten in einem ähnlichen Bereich des Bodenfeuchtigkeitsgehalts liegt, und die App kann relativ „sortenunabhängig“ arbeiten. Eine Verbesserung der Trockenheitstoleranz der Sorten könnte außerdem eine Alterna-

tive zur Einführung von Bewässerung sein. Die Landwirte benötigen Kenntnisse darüber, welche Sorten trockenheitstolerant sind, aber wenn sie bewässern können, müssen sie auch wissen, welche Sorten ansprechbar sind und ein hohes Ertragspotential haben. Wir haben unsere App auf Basis der Sorte KU50 entwickelt, die ertragreich und trockenheitstolerant ist. Dennoch ist es nicht die Sorte, die teilnehmende Landwirte bevorzugt anbauen, und zukünftige Arbeiten könnten auf neue Sorten ausgeweitet werden.

3.2 WP2 Cassava-Bewässerungsmodell (PI: Postma, CO-PI: Treenut). Modellentwicklung.

Wir entwickelten zunächst ein Wasserhaushaltsmodell, das den Wassergehalt des Bodens vorhersagt. Dabei wird die Änderung des Bodenwassergehalts als Gleichgewicht von Inputs (Niederschlag, Bewässerung) und Outputs (Verdunstung, Transpiration und Entwässerung) behandelt. Basierend auf einer vereinfachten Transportgleichung wird die vertikale Wasserverteilung im Boden und die Verteilung der Wasseraufnahme im Wurzelsystem simuliert. Wir haben dieses Modell in R implementiert und die vorhergesagten Bodenwassergehalte auf die Daten des ersten Jahres kalibriert. Wir haben dieses Modell als „Line Messenger“-Dienst implementiert, der regelmäßig automatisierte Vorhersagen basierend auf dem aktuellen Wetter liefert, und diese Vorhersagen im zweiten Jahr mit sensorbasierten Messungen getestet. Das Modell konnte den Durchschnitt der Sensordaten mit einem Fehler von $\pm 4\%$ beim Bodenwassergehalt vorhersagen, was im Allgemeinen für Bewässerungsentscheidungen ausreichend ist.

Wir haben ein neuartiges Erntemodell für bewässerte Maniok entwickelt. Das Modell beschreibt das Wachstum von Blättern, Stängeln, Wurzeln und Speicherwurzeln als System algebraischer und Differentialgleichungen und wurde an das Wasserhaushaltsmodell gekoppelt. Das Modell wurde anhand von Felddaten des ersten Jahres kalibriert und später mit Daten aus pflanzenphysiologischen Studien aktualisiert. Diese lieferten bessere Einblicke in die Reaktionen der Pflanzen auf Dürre als die Feldexperimente, insbesondere da die Unterschiede zwischen Regenfeld- und Bewässerungsbehandlungen im ersten Jahr nicht signifikant waren, da das Jahr im Allgemeinen recht gute Niederschläge aufwies. Die genaue Vorhersage des Ertrags für alle Standorte erwies sich als schwierig, da der Ertrag von vielen Faktoren beeinflusst wird, die im Modell nicht berücksichtigt werden. Dennoch wurden häufig relative Unterschiede festgestellt. Derzeit wird ein Manuskript verfasst, das das Nutzpflanzenmodell, seine Parametrisierung und Validierung beschreibt.

Die Sensitivitätsanalyse des Modells ergab, dass Maniok oft einen für die Photosynthese optimalen Blattflächenindex aufweist. Dies wird durch Feldbeobachtungen gestützt, da oft Unkraut unter dem Blätterdach wachsen kann, wenn zu viel Licht den Boden erreicht. Eine langsame Blattflächenentwicklung und ein relativ schnelles Abfallen der Blätter in späteren Perioden können den Nährstoff- und Wasserbedarf der Kulturpflanzen verringern und einer der Gründe dafür sein, dass Maniok in landwirtschaftlichen Systemen mit geringem Input gute Erträge erzielen kann, allerdings geht dies auf Kosten des Ertragspotenzials. Düngung in Kombination mit einer höheren Pflanzendichte könnte die Biomasseproduktion steigern, kann jedoch zu Lasten des Ernteindex gehen. Die Erhöhung des Ernteindex bei dichter Bepflanzung kann ein wichtiges Zuchtziel sein.

Eine frühe Etablierung der Kulturpflanze ist der Schlüssel zu höheren Erträgen und die Wasserverfügbarkeit kann zu diesem Zeitpunkt von entscheidender Bedeutung sein, da die Wurzeln noch nicht tief eingewurzelt sind und sich das Blätterdach noch nicht geschlossen hat. Insgesamt wachsen Maniokwurzeln im Vergleich zu einigen anderen Nutzpflanzen langsam in die Tiefe, doch anhaltendes Wachstum über einen langen Zeitraum führt immer noch zu tiefen faserigen Wurzeln mit Zugang zu tiefem Wasser. Eine Bewässerung in späteren Stadien ist daher selten erforderlich.

Parallel zur Entwicklung des Pflanzenmodells haben wir mithilfe der OpenSimRoot-Simulationsplattform ([Rootmodels.gitlab.io](https://rootmodels.gitlab.io)) ein 3D-Modell von Maniok mit einer ge-

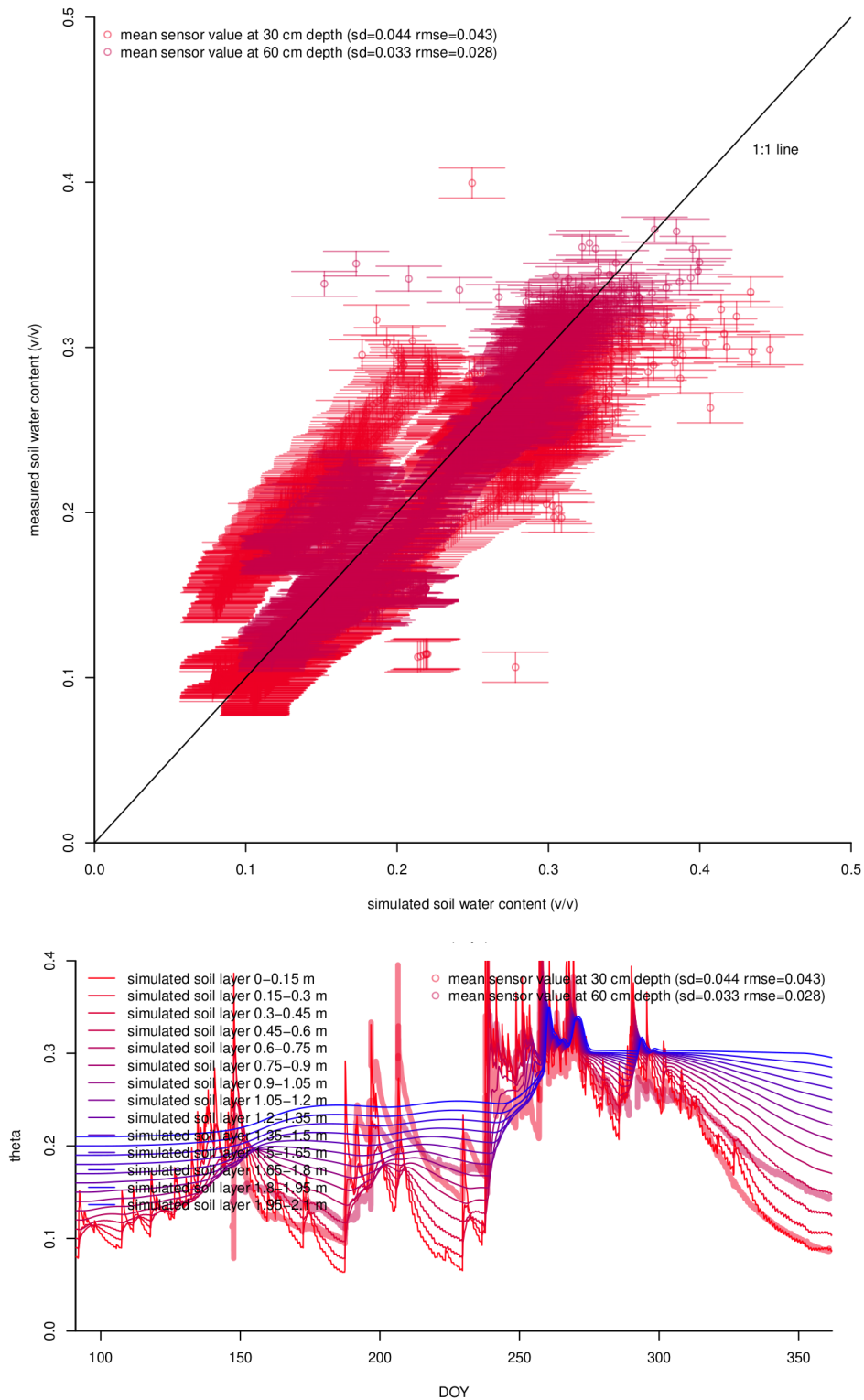
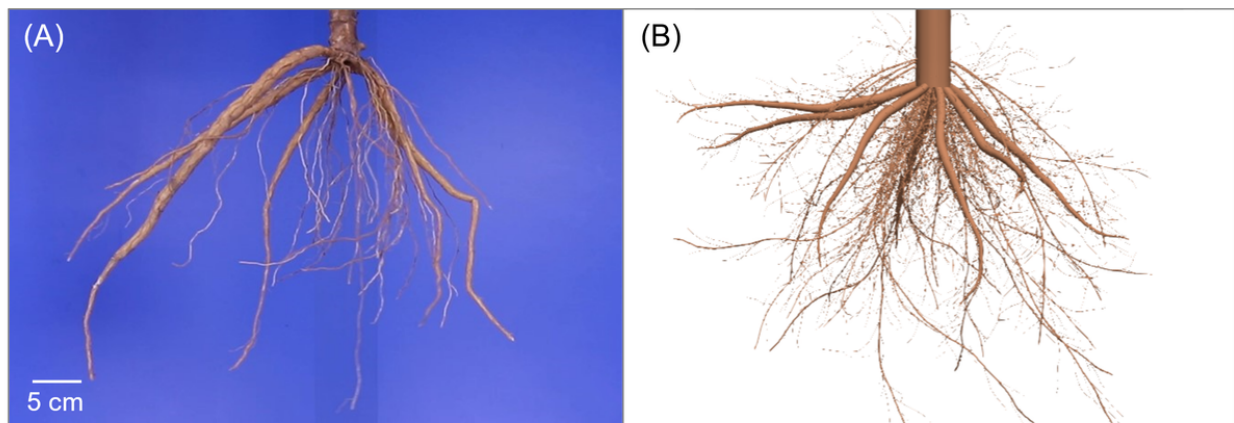


Abbildung 3.5: Oben: Validierung modellierter vs. gemessener Bodenwassergehalte. Beachten Sie, dass auch die Sensordaten einen erheblichen Fehler aufweisen. Der Standardfehler des Mittelwerts über 12 Sensoren wird durch die Fehlerbalken angezeigt. Unten: dieselben Daten, jedoch als Zeitkurven dargestellt. Simulation dünner Linien, dicke Linien bedeuten die 12 Sensoren in zwei Tiefen. SD=standard deviation, rmse=root mean square error, theta=volumetric soil water content, DOY=day of the year



(C)

Characteristics	Cassava Literature	Measurement at CASSAVASTORE Rayong field *	MeOSR Simulation**
Avg. Fine Root Diameter (mm)	0.59 ± 0.07 [1]	-	0.37 ± 0.0
Number of Storage Roots	7 ± 0.21 [2]	6.67 ± 2.51	7 ± 0.80
Avg. Fibrous Root Length (cm)	29.94 ± 0.78 [2]	32.92 ± 15.30	23.69 ± 0.88
Avg. Storage Root Length (cm)	15.61 ± 0.65 [2]	43.51 ± 14.72	28.04 ± 0.03
Max. Storage root width (mm)	25.7 ± 0.03 [2]	17.5 ± 0.22 [3]	10.2 ± 0.06
Storage Root Circumference (mm)	83.4 ± 0.06 [2]	-	32.1 ± 0.20

Abbildung 3.6: Vergleich des im Feld ausgegrabenen Maniok-Wurzelsystems (A) und des simulierten (B) sowie Vergleich der gemessenen mit den simulierten Merkmalswerten (C).

nauerer Behandlung der Boden- und Pflanzenhydrologie entwickelt. Dieses datenintensive 3D-Modell wurde anhand von Daten aus einem anderen Projekt validiert. Das Manuskript Die Beschreibung dieses Modells wurde kürzlich zur Veröffentlichung im International Journal of Plant and Soil angenommen und ein Vorabdruck ist hier verfügbar (<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3442009/v1>). Das 3D-Modell wurde verwendet, um die Wurzelparametrisierung des Pflanzenmodells zu ergänzen, da wir keine Wurzeldata aus den Feldversuchen hatten.

Wir planen, sowohl die Nutzpflanze als auch das 3D-Pflanzenmodell weiterzuentwickeln, indem wir sie mit Stoffwechselmodellen der Photosynthese und Stärkeproduktion koppeln, die vom KMUTT-Team entwickelt wurden.

3.3 WP3 App-Entwicklung (PI: Treenut, CO-PI: Postma)

Wir haben eine Handy-App mit dem Flutter-Framework für die plattformübergreifende App entwickelt. Wir haben dafür eine Benutzeroberfläche entworfen, die auf drei Registerkarten basiert:

Die erste bietet Informationen und App-Spracheinstellungen, die zweite Karte zur Eingabe landwirtschaftlicher feldbezogener Daten und die dritte Karte, die Ertragsprognosen und die vorhergesagten Bewässerungsstunden, die zur Erzielung des Ertrags erforderlich sind. Wir haben die App erfolgreich auf Android- und Apple basierten Telefonen ausgeführt und auch eine Windows- und Mac-Desktopversion erstellt, größtenteils auf Anfrage der Stärkefabrik, die viele Felder zentral verwaltet.

Die Entwicklung der Benutzeroberfläche wurde kontinuierlich aktualisiert, da die Landwirte ihre Beiträge teilten. Wünsche wie 1) Einbeziehung der Wettervorhersage, 2) Kontrolle über sorten- und bodenspezifische Parameter, 3) Unterscheidung zwischen „Grund“- und „Experten“-Einstellungen, 4) Darstellung vereinfachter Balkendiagramme und 4) Schaltflächen für Herunterladbare und hochladbare Bewässerungstabellen gehören zu den von Benutzern gewünschten implementierten Funktionen.

Die App unterstützt mehrere Sprachen über das Flutter-Internationalisierungs-Framework und unterstützt derzeit Englisch, Thailändisch, Vietnamesisch und Chinesisch (aufgrund des Interesses aus China, es für die Maniokproduktion zu verwenden).

Die Benutzeroberfläche ist programmtechnisch von Diensten getrennt, die Daten sammeln und verwalten, vor allem GPS-Standort, Wetterdaten-Downloads sowie die Ausführung und Aktualisierung der Ergebnisse des Simulationsmodells. Das Erntemodell ist somit eine eigenständige Klasse, die in der Programmiersprache DART implementiert ist.

Die vietnamesischen Partner wünschten sich eine serverbasierte Raspberry Pi-Bewässerungslösung, die Bewässerungsventile automatisch öffnen konnte, und implementierten das Simulationsmodell in ihrem System. Es zeigt die Vielseitigkeit des Ansatzes und die Möglichkeit fortschrittlicherer Mess- und Regulierungssysteme.

Der Code der App ist unter einer GPL-Lizenz auf der GitLab-Projektseite verfügbar. (<https://gitlab.com/cassavamodels/direction-app>)

3.4 WP4 Jährlicher Workshop mit Stakeholdern und Betriebsüberwachung (PI: Warakorn, CO-PI: Tanyarat und Le Huy Ham)

Wir haben insgesamt vier Workshops mit Bauerngruppen (Abb. 3.8) in Ratchaburi, Buriram und einen in Vietnam organisiert. Wir besuchten die örtliche Stärkefabrik, die mit vielen weiteren Landwirten in Kontakt steht und daran interessiert ist, Bewässerung bei besonders hochwertigen Wachsstärkesorten einzusetzen. Im letzten Jahr kam eine Delegation von Ajinotakara, einem thailändisch-japanischen Joint Venture-Unternehmen und führenden Hersteller von Mononatrium-L-Glutamat, zum Workshop. Dieses Unternehmen beauftragt Tausende von Landwirten und war sehr an der Bewässerungstechnik interessiert, vor allem, um die Ertragsstabilität zu erhöhen und so eine stabilere Versorgung ihrer Produktionskette sicherzustellen.

Wir haben das praktische Feedback der Landwirte genutzt, um die App zu verbessern. Dazu haben wir von den Landwirten gewünschte Komponenten hinzugefügt und die Berichte vereinfacht. Da unsere Benutzergruppen unterschiedliche Wünsche hinsichtlich der Komplexität der Eingabe und Ausgabe hatten, haben wir einen „Experten“-Modus für geschulte Benutzer und Wissenschaftler und einen „normalen“ Modus implementiert, der für die meisten Landwirte geeignet ist. Die Unternehmen wünschten sich eine Desktop-Version der App, mit der sie mehr Felder verwalten konnten und die Möglichkeit hatten, Daten zwischen Telefon und Desktop zu übertragen, was auch umgesetzt wurde.

Wir fassen die wichtigsten Rückmeldungen der Landwirte zusammen und weisen darauf hin, dass die hier aufgeführten Punkte eine Zusammenfassung langer Diskussionen sind und nicht die Meinung aller Landwirte widerspiegeln:

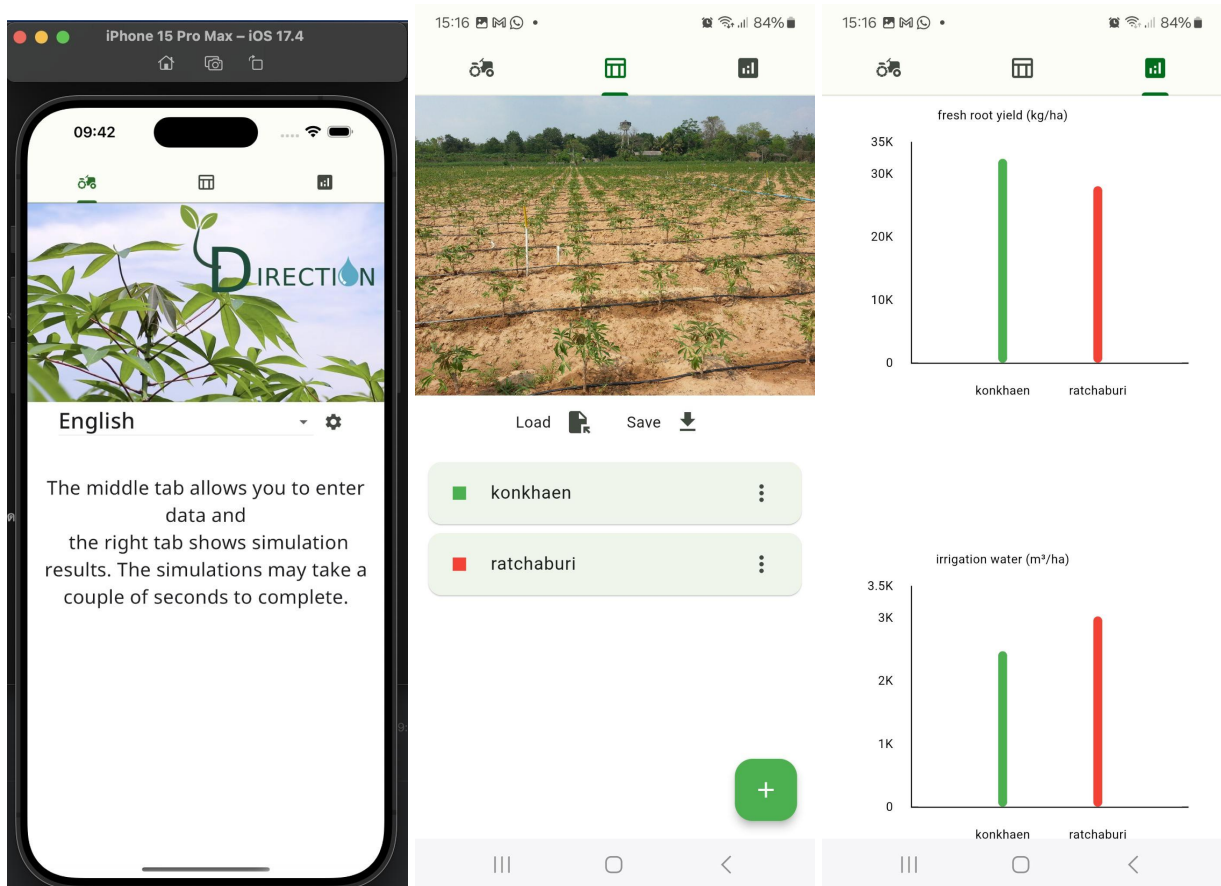


Abbildung 3.7: Screenshots der App-Begrüßungsbildschirme (links), Feldbearbeitungsbildschirme (Mitte) und Prognosebildschirme (rechts), die auf Max- und Android-Geräten ausgeführt werden.



Abbildung 3.8: Der dritte praktische Workshop zur Übertragung der Technologie zur Verwendung der Maniok-Bewässerungsanwendung (DIRECTION App) an Landwirte und interessierte Benutzer (links) und Diskussionen über Kooperationsmethoden zur weiteren Nutzung der Anwendung mit Vertretern aus allen Sektoren (rechts) in der Provinz Ratchaburi während des 7. 8. März 2023.

- Der Landwirt ist besorgt über die Kenntnisse des Wassermanagements für das Bewässerungssystem, da Maniokgebiete größtenteils außerhalb des ausgewiesenen Bewässerungsgebiets liegen; Das geschätzte Wasservolumen in verschiedenen Szenarien in der DIRECTION App wird für die Planung des Wasserreservoirs des Landwirts hilfreich sein.
- Der Preis der Maniokwurzel kann Landwirte dazu ermutigen, in Bewässerungssysteme zu investieren. Landwirte erwogen auch alternative Nutzpflanzen mit höherem Marktwert, wie etwa Süßkartoffeln.
- Das integrierte Wissen über Nährstoffmanagement und Wassermanagement in der App mit dem erwarteten Mindestertrag von 5 Tonnen/Rai (31,25 Tonnen/Hektar) wird den Landwirt dazu ermutigen, in das Bewässerungssystem zu investieren.
- Die Landrotation durch das Pachtsystem für den Maniokanbau hält Landwirte auch davon ab, in Bewässerungssysteme zu investieren.
- Die Dürre im Jahr 2023 veranlasste die Landwirte auch dazu, mehr in Bewässerungssysteme zu investieren, insbesondere die Landwirte, die mehr als 20 Rai (über 3,2 Hektar) angebaut hatten.
- Die Wasserverfügbarkeit für die Bewässerung kann ein Problem darstellen, da die Bewässerungsteiche möglicherweise genauso schnell austrocknen wie das Feld. Wasser sollte daher mit Vorsicht verwendet werden.
- Landwirte geben an, dass sie, wenn sie bewässern könnten, diese meist nutzen würden, um früher, während der Trockenzeit, zu pflanzen (Hrsg. Die Idee wurde im dritten Jahr getestet, erfordert aber zu viel Wasser).

3.5 WP5 Datenmanagement (PI: Dr Teera, CO-PI: Le Huy Ham, dir. Wojciechowski, Dr Saowalak)

Die vom Projekt generierten Daten werden über Google Drive von allen Partnern geteilt. Wir haben auf dem Jülich Data Repository ein 'Project Dataverse' eingerichtet, in dem wir die Daten und ihre Metadaten bei Veröffentlichung teilen (<https://data.fz-juelich.de/>). Der im Projekt generierte Code wird über die GPLv3-Lizenz der Welt offen zugänglich gemacht und kann hier gefunden werden: <https://cassavamodels.gitlab.io/direction-app/>

4 Zusammenfassende Schlussfolgerung

Mobiltelefone können Landwirte mit modellbasierter Bewässerungsberatung unterstützen. Die Technologie ist günstig, da Landwirte wahrscheinlich ein Telefon besitzen, ihre Erträge steigern und vor allem den Wasserverbrauch senken können. Sobald Landwirte bewässern können, könnten sie ihre Anbausysteme ändern, indem sie andere Nutzpflanzen anbauen, früher säen oder die Ernte weiter in die Trockenzeit hinein ausdehnen. Diese Änderungen müssen möglicherweise bei der Förderung von Bewässerungspraktiken berücksichtigt werden. Darüber hinaus wünschen sich Landwirte eine ganzheitlichere Lösung, die verschiedene Nutzpflanzen, Sorten, Bodentypen, Düngung und Pflanzenschutz abdeckt. Eine solche ganzheitliche Lösung ist viel schwieriger bereitzustellen, da sie viel mehr Informationen über verschiedene Nutzpflanzen und Arten sowie eine breitere Testbasis erfordert, als das Projekt bieten könnte. Trotz der vielversprechenden Ergebnisse bleibt die App damit ein Machbarkeitsnachweis, der auf großes Interesse gestoßen ist, für dessen Akzeptanz bei den Landwirten jedoch noch weiterentwickelt werden muss.