

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Intelligente Landwirtschaftsoptimierung zur Anpassung an den Klimawandel

Akronym: CICALICA



in der Fördermaßnahme

für die Bekanntmachung „Zusammenarbeit mit dem östlichen und südlichen Mittelmeerraum im Rahmen der Maßnahme PRIMA“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung“

## Autor(en)

Technische Universität München  
Waldinventur und nachhaltige Nutzung  
Projektleitung: Prof. Dr. Thomas Knoke  
Projektbearbeiter: Dr. Omar Hijazi  
[omar.hijazi@tum.de](mailto:omar.hijazi@tum.de)

**Projektlaufzeit:** 01.08.2022 – 31.07.2025  
**Erstellungsdatum:** 19.01.2026

## Projektpartner

Auflistung der Projektpartner (mit im Text verwendeten Kürzeln):

1. Projektkoordinator: Spanish National Research Council (CSIC), Spanien
2. Partner 1: Sistema Azud, S.A. (AZUD), Spanien
3. Partner 2: Technische Universität München (TUM), Deutschland
4. Partner 3: Akdeniz University (AU), Türkei
5. Partner 4: University Cadi Ayyad (UCA), Marokko
6. Partner 5: University of Djilali Bounaama Khemis Miliana (UDBKM), Algerien

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

## Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I Kurzfassung.....	3
I.1	Aufgabenstellung .....	3
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	3
I.3	Wesentliche Ergebnisse im Überblick.....	3
II.	Teil II Eingehende Darstellung.....	5
II.1	Motivation und Aufgabenstellung.....	5
II.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	5
II.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
II.4	Erzielte Ergebnisse .....	7
II.5	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	10
II.6	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	12
II.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes.....	13
II.8	Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.....	14
II.9	Literaturverzeichnis .....	14

## **I. Teil I Kurzfassung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Ziel des Verbundvorhabens CICLICA (Smart agriCulture optimization to CLimate Change Adaptation) war es, innovative und klimaangepasste landwirtschaftliche Bewirtschaftungsstrategien für semiaride Regionen des Mittelmeerraums zu entwickeln, zu erproben und hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen zu bewerten. Vor dem Hintergrund zunehmender Wasserknappheit, steigender klimatischer Extremereignisse sowie wachsender Anforderungen an Ressourceneffizienz adressierte das Vorhaben insbesondere die Optimierung der Wassernutzung in der landwirtschaftlichen Produktion.

Im Fokus stand die Carob-Produktion (*Ceratonia siliqua* L.), eine traditionell im Mittelmeerraum angebaute Dauerkultur mit hoher Anpassungsfähigkeit an Trockenstress. Ziel war es, den Einsatz moderner Bewässerungstechnologien – insbesondere der Subsurface-Drip-Irrigation (SDI) – systematisch zu untersuchen und deren ökologische Auswirkungen im Vergleich zu nicht bewässerten Produktionssystemen zu analysieren. Ergänzend sollten digitale Entscheidungsunterstützungssysteme entwickelt und bewertet werden, um eine fundierte Entscheidungsgrundlage für eine klimaangepasste Bewirtschaftung bereitzustellen.

### **I.2 .Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens**

Zu Beginn des Vorhabens lagen nur begrenzte wissenschaftliche Erkenntnisse zur ganzheitlichen ökologischen Bewertung von Carob-Produktionssystemen vor. Zwar existierten zahlreiche Studien zur Anwendung von Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, LCA) in der Landwirtschaft sowie zur Effizienz moderner Bewässerungssysteme, jedoch fehlten spezifische Untersuchungen zur Kombination beider Ansätze für Carob-Anbausysteme unter realen Praxisbedingungen.

Insbesondere bestand ein Forschungsdefizit hinsichtlich der ökologischen Bewertung von Subsurface-Drip-Irrigation-Systemen, bei denen der zusätzliche Ressourcen- und Materialeinsatz für Infrastruktur, Energie und Wartung potenziellen Produktivitätsgewinnen gegenübergestellt werden muss. Auch lagen bislang keine systematischen Vergleiche zwischen nicht bewässerten, voll bewässerten und defizitär bewässerten Carob-Systemen vor, die sowohl direkte als auch indirekte Umweltwirkungen berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund setzte das Vorhaben auf eine Kombination aus empirischer Datenerhebung in einem praxisnahen Living-Lab-Ansatz, modellgestützter Lebenszyklusanalyse sowie der Entwicklung von Szenarien zur Bewertung unterschiedlicher Bewirtschaftungsstrategien. Im Projektverlauf wurden die ursprünglich geplanten Arbeiten im Wesentlichen umgesetzt; notwendige Anpassungen ergaben sich insbesondere aus der Verfügbarkeit und Qualität praxisrelevanter Daten, konnten jedoch ohne Beeinträchtigung der Zielerreichung berücksichtigt werden.

### **I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick**

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Analysen zeigen, dass nicht bewässerte Carob-Produktionssysteme die geringsten Umweltwirkungen pro Flächeneinheit aufweisen, während bewässerte Systeme aufgrund des zusätzlichen Einsatzes von Infrastruktur, Energie und Wasser höhere absolute Umweltlasten verursachen. Gleichzeitig konnte jedoch nachgewiesen werden, dass bewässerte Systeme durch erhöhte Produktivität deutlich geringere Umweltwirkungen pro Produkteinheit erzielen können.

Besonders das Defizitbewässerungsszenario erwies sich als effizienter Kompromiss zwischen Wasserverbrauch, Ertrag und Umweltwirkung. Es ermöglicht signifikante Wassereinsparungen im Vergleich zur Vollbewässerung bei gleichzeitig stabiler bzw. verbesserter Produktivität. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine differenzierte Bewertung von Bewässerungssystemen erforderlich ist, bei der sowohl Flächen- als auch Produkteinheiten berücksichtigt werden.

Darüber hinaus konnten die im Projekt entwickelten methodischen Ansätze und Entscheidungsunterstützungssysteme als übertragbar auf weitere Dauerkulturen in semiariden Regionen identifiziert werden. Die Ergebnisse liefern somit eine belastbare Grundlage für die Weiterentwicklung klimaangepasster Bewirtschaftungsstrategien und leisten einen Beitrag zur nachhaltigen Transformation landwirtschaftlicher Produktionssysteme im Mittelmeerraum.

## II. Teil II Eingehende Darstellung

### II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Der fortschreitende Klimawandel stellt die Landwirtschaft in semiariden Regionen des Mittelmeerraums vor erhebliche Herausforderungen. Zunehmende Wasserknappheit, steigende Temperaturen sowie eine erhöhte Variabilität von Niederschlagsmustern führen zu wachsenden Ertragsrisiken und einem erhöhten Anpassungsdruck auf landwirtschaftliche Produktionssysteme. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Entwicklung und Bewertung klimaangepasster Bewirtschaftungsstrategien eine zentrale Bedeutung für die langfristige Sicherung landwirtschaftlicher Produktion und Wertschöpfung.

Insbesondere die effiziente Nutzung der Ressource Wasser stellt einen entscheidenden Faktor für die Zukunftsfähigkeit landwirtschaftlicher Systeme in Trockengebieten dar. Während moderne Bewässerungstechnologien das Potenzial bieten, Erträge zu stabilisieren oder zu steigern, gehen sie gleichzeitig mit zusätzlichem Ressourcen- und Energieeinsatz sowie Investitionen in Infrastruktur einher. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Bewässerungssysteme nicht ausschließlich hinsichtlich ihrer produktiven Effekte, sondern auch unter Berücksichtigung ihrer ökologischen Auswirkungen ganzheitlich zu bewerten.

Die Carob-Produktion (*Ceratonia siliqua* L.) eignet sich in besonderer Weise als Untersuchungsgegenstand für diese Fragestellung. Carob gilt als vergleichsweise trockenheitstolerante Dauerkultur, die traditionell überwiegend unter Regenfeldbedingungen angebaut wird und zugleich ein zunehmendes wirtschaftliches Potenzial aufweist. Vor dem Hintergrund des Klimawandels stellt sich jedoch die Frage, inwieweit der gezielte Einsatz moderner Bewässerungssysteme zur Stabilisierung und Steigerung der Produktivität beitragen kann, ohne die Umweltwirkungen unverhältnismäßig zu erhöhen.

Das Verbundvorhaben CICALICA setzte genau an dieser Schnittstelle zwischen Produktivität, Ressourceneffizienz und Umweltwirkung an. Ziel war es, unterschiedliche Bewässerungsstrategien für die Carob-Produktion systematisch zu analysieren und miteinander zu vergleichen. Dabei sollte insbesondere untersucht werden, inwieweit Subsurface-Drip-Irrigation-Systeme (SDI) gegenüber nicht bewässerten Systemen sowie gegenüber alternativen Bewässerungsansätzen ökologische Vorteile oder Nachteile aufweisen.

Aus der beschriebenen Problemlage leitete sich die zentrale Aufgabenstellung des Vorhabens ab, eine belastbare wissenschaftliche Entscheidungsgrundlage für den Einsatz moderner Bewässerungstechnologien in der Carob-Produktion zu schaffen. Hierzu wurden praxisnahe Produktionssysteme in einem Living-Lab-Ansatz untersucht, relevante Betriebsdaten erhoben und mittels Lebenszyklusanalyse ökologisch bewertet. Ergänzend wurden digitale Entscheidungsunterstützungssysteme entwickelt, um die gewonnenen Erkenntnisse für unterschiedliche Akteursgruppen nutzbar zu machen.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt unter Beteiligung wissenschaftlicher Einrichtungen und industrieller Praxispartner durchgeführt. Diese Partnerstruktur ermöglichte eine enge Verzahnung von Forschung und Anwendung sowie den Zugang zu realen Betriebsdaten und praxisrelevanten Fragestellungen. Die Durchführung des Vorhabens erfolgte unter Nutzung bestehender fachlicher Vorkenntnisse im Bereich der Lebenszyklusanalyse, der

Bewässerungstechnik sowie der nachhaltigen Agrarsystemanalyse und baute auf entsprechenden Vorarbeiten der beteiligten Einrichtungen auf.

## **II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens**

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns war der Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich klimaangepasster Bewirtschaftungsstrategien in der Landwirtschaft durch eine Vielzahl einzelner Forschungsansätze geprägt, jedoch fehlte eine integrierte Betrachtung, die Produktivität, Ressourceneinsatz und Umweltwirkungen systematisch miteinander verknüpft. Insbesondere für Dauerkulturen in semiariden Regionen bestand ein erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich der ganzheitlichen Bewertung moderner Bewässerungstechnologien.

### **II.2.1 Stand der Bewässerungstechnologien**

Bewässerungssysteme gelten als zentrales Instrument zur Stabilisierung landwirtschaftlicher Erträge in Regionen mit zunehmender Wasserknappheit. Neben konventionellen Oberflächen- und Sprinklerbewässerungssystemen hatten sich in den vergangenen Jahren insbesondere Tropfbewässerungssysteme als wasser- und energieeffiziente Alternative etabliert. Innerhalb dieser Systemgruppe kommt der Subsurface-Drip-Irrigation (SDI) eine besondere Bedeutung zu, da sie durch die unterirdische Applikation des Wassers Verdunstungsverluste reduziert und eine gezielte Wasserversorgung im Wurzelraum ermöglicht.

Trotz dieser potenziellen Vorteile war der Stand der Technik zu Projektbeginn durch einen begrenzten Erfahrungsschatz hinsichtlich der langfristigen ökologischen Auswirkungen von SDI-Systemen gekennzeichnet. Zwar lagen technische Studien zur Effizienz, Wartung und Lebensdauer einzelner Systemkomponenten vor, jedoch fehlten umfassende Bewertungen, die den gesamten Lebenszyklus der Bewässerungsinfrastruktur – von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung – berücksichtigen. Insbesondere der zusätzliche Material- und Energieeinsatz für Rohrleitungen, Filter, Pumpen und Steuerungseinheiten war bislang nur unzureichend in ökologische Gesamtbewertungen einbezogen worden.

### **II.2.2 Stand der Forschung zur Carob-Produktion**

Die Carob-Produktion ist im Mittelmeerraum traditionell überwiegend regenabhängig organisiert. Entsprechend lag der Fokus der vorhandenen Literatur vor allem auf agronomischen Aspekten wie Ertragsentwicklung, Sortenwahl, Standortbedingungen und Anpassungsfähigkeit an Trockenstress. Studien zur Bewässerung von Carob-Beständen existierten zwar, beschränkten sich jedoch häufig auf einzelne Ertrags- oder Wasserverbrauchparameter und erlaubten keine ganzheitliche Bewertung der ökologischen Auswirkungen.

Insbesondere fehlten vergleichende Analysen zwischen nicht bewässerten, voll bewässerten und defizitär bewässerten Carob-Systemen, die sowohl direkte Emissionen als auch indirekte Umweltwirkungen aus vorgelagerten Prozessen berücksichtigen. Damit bestand eine wesentliche Wissenslücke hinsichtlich der Frage, unter welchen Bedingungen der Einsatz zusätzlicher Bewässerungsinfrastruktur ökologisch gerechtfertigt ist.

### **II.2.3 Lebenszyklusanalyse (LCA) in der Landwirtschaft**

Die Lebenszyklusanalyse hatte sich zu Projektbeginn als etabliertes Instrument zur Bewertung von Umweltwirkungen in der Landwirtschaft etabliert. Zahlreiche Studien untersuchten bereits Ackerbau- und Dauerkultursysteme im Mittelmeerraum unter Anwendung unterschiedlicher

Wirkungsabschätzungsmethoden. Allerdings konzentrierten sich viele dieser Untersuchungen auf einzelne Kulturen oder Produktionsschritte und nutzten vereinfachte Systemgrenzen.

Für die Bewertung von Bewässerungssystemen bestand insbesondere ein Defizit hinsichtlich der konsistenten Abbildung von Infrastruktur, Energieversorgung und Nutzungsszenarien. Zudem wurden Produktivitätseffekte häufig nicht ausreichend in Relation zu den verursachten Umweltwirkungen gesetzt, sodass Aussagen zur Effizienz pro Produkteinheit nur eingeschränkt möglich waren. Auch die Nutzung digitaler Modellierungsumgebungen zur Abbildung komplexer landwirtschaftlicher Systeme war bislang nur in Ansätzen etabliert.

#### **II.2.4 Zusammenfassender Handlungsbedarf**

Zusammenfassend bestand zu Beginn des Vorhabens ein klarer Bedarf an integrierten Bewertungsansätzen, die moderne Bewässerungstechnologien, reale Produktionsdaten und lebenszyklusbasierte Umweltwirkungen systematisch zusammenführen. Insbesondere fehlten belastbare Entscheidungsgrundlagen für die Bewertung von SDI-Systemen in der Carob-Produktion unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bewässerungsintensitäten.

Das Vorhaben CICALICA setzte an diesen Defiziten an, indem es den Stand von Wissenschaft und Technik um eine praxisnahe, lebenszyklusbasierte Bewertung erweiterte und damit eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung klimaangepasster Bewirtschaftungsstrategien schuf.

### **II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Verbundvorhaben CICALICA wurde auf Grundlage einer klar strukturierten Arbeits- und Zeitplanung umgesetzt, die sich an den im Vorhabenantrag definierten Arbeitspaketen orientierte. Ziel der Planung war es, eine systematische und nachvollziehbare Umsetzung der Projektziele sicherzustellen und gleichzeitig eine enge Verzahnung zwischen wissenschaftlicher Analyse und praktischer Anwendung zu gewährleisten.

#### **II.3.1 Arbeitsstruktur und Arbeitspakete**

Das Ziel des Projekts ist die Förderung alternativer mediterraner Landwirtschaftssysteme auf der Grundlage agroökologischer Prinzipien, um dem wachsenden Druck durch die Zerstörung natürlicher Ressourcen und den Klimawandel zu begegnen. Diese Ziele werden durch die Anwendung fortschrittlicher landwirtschaftlicher Verfahren in drei Hauptbereichen erreicht: a) Wassersparstrategien, einschließlich Wasser von geringer Qualität und der Verwendung von nicht-konventionellem Wasser für die Bewässerung, organisches Mulchen und den Einsatz von Präzisionsbewässerungstechnologie; b) biotechnologische Techniken (Management der Wassermenge und -qualität während der Bewässerung mit superabsorbierenden Polymeren); und c) Nutzung der genetischen Regulierung der Wassertoleranz zur Einführung neuer alternativer Pflanzen, zur Steigerung neuer Ökosystemleistungen, zur Verbesserung der Bodengesundheit und des ökologischen Fußabdrucks.

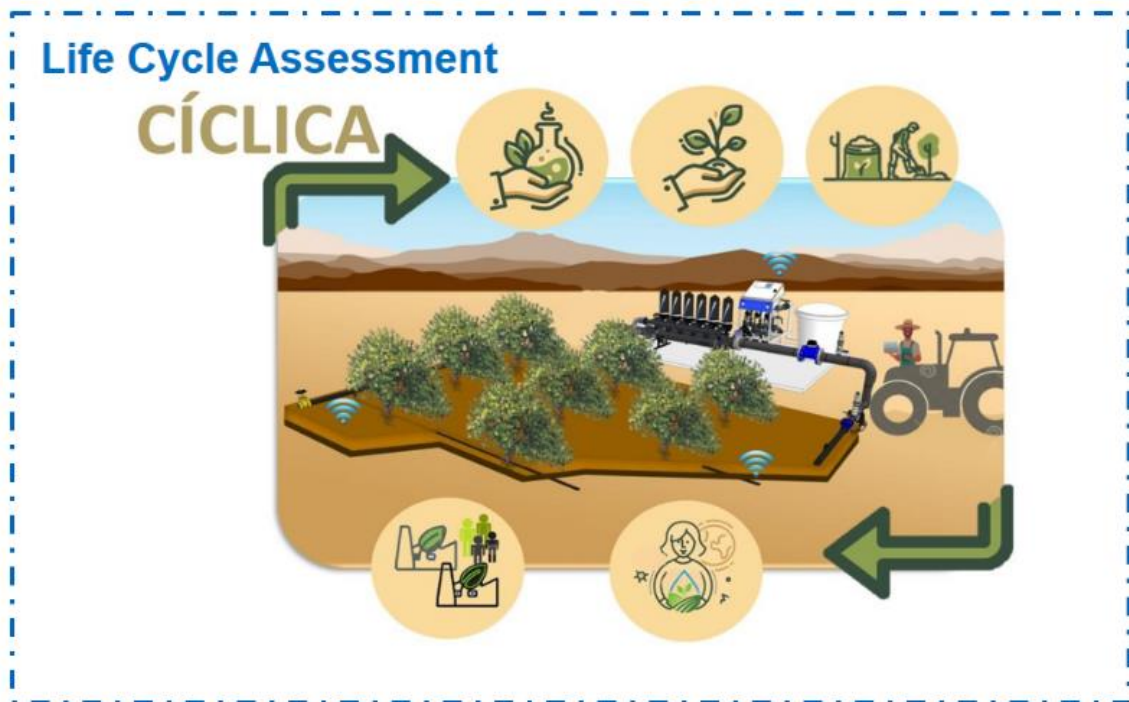
Eine Ökobilanzierung LCA jedes Living Labs (Alternative Pflanzen VS traditionelle Landwirtschaft) wird im Rahmen des Projektes durch TUM- Lehrstuhl für Holzwissenschaft durchgeführt und entwickelt daher entscheidungsunterstützende Informationen und politische

Leitlinien, um die Widerstandsfähigkeit der untersuchten Anbausysteme zu verwalten und zu verbessern. Der Arbeitsplan ist wie im Projektantrag in Tabelle 1 beschrieben:

**Tabelle 1:** Arbeitsplan für die Bearbeitung der Arbeitspakete im vorgeschlagenen Vorhaben

Arbeitspakete		1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr			
AP 1	Projektkoordination und –management												
AP 2	Technologien der Präzisionslandwirtschaft & Anwendung von Wasser zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel												
AP 3	Biotechnologische Anwendungen und genetische Selektion für neue landwirtschaftliche Systeme												
AP 4	Living Labs zur Einführung des alternativen Pflanzenbaus												
AP 5	Politische Leitlinien zur Unterstützung der Widerstandsfähigkeit des Landwirtschaftssystems (TUM)												
5.1	Modellierung der Lebenszyklen definierter Systemgrenzen												
5.2	Auswahl und Modellierung von Substitutions-/Referenzsystemen												
5.3	Erhebung von Daten aus Datenbanken, Literatur und Projektpartnern												
5.4	Bewertung der neu entwickelten System- und Referenzsysteme												
5.5	Entwerfen eines Entscheidungsunterstützungssystems												
AP 6	Dissemination, communication and exploitation												

Innerhalb des Projektes werden als erste Schritte wichtige Prozesse identifiziert und die Systemgrenze definiert (AP 5.1). Diese Schritte sind entscheidend, um eine klare Struktur und einen umfassenden Überblick über das Projekt und die Ökobilanzen zu gewährleisten. Die Definition der Systemgrenze legt den Umfang und den Rahmen des Projektes fest. Sie hilft uns dabei, klar zu definieren, welche Komponenten und Interaktionen innerhalb des Systems berücksichtigt werden sollen und welche außerhalb des Projektes liegen. (Abbildung 1).



**Abbildung 1** Systemgrenze und verwendete Prozesse für die Ökobilanzierung im Rahmen des Projekts CÍCLICA

Die Projektarbeiten gliederten sich in mehrere inhaltlich aufeinander abgestimmte Arbeitspakete. Zentrale Bestandteile waren die Erhebung praxisrelevanter Betriebsdaten, die Modellierung der Produktionssysteme, die Durchführung lebenszyklusbasierter Umweltbewertungen sowie die Aufbereitung der Ergebnisse für unterschiedliche Zielgruppen.

Ein wesentlicher Schwerpunkt lag auf der Datenerhebung in einem praxisnahen Living-Lab-Ansatz. Hierzu wurden reale Produktionssysteme der Carob-Produktion unter verschiedenen Bewässerungsregimen untersucht. Die erhobenen Primärdaten umfassten unter anderem Informationen zu Wasser- und Energieeinsatz, Bewässerungsinfrastruktur, landwirtschaftlichen Arbeitsprozessen sowie Ertragsdaten. Diese Datengrundlage bildete die Voraussetzung für eine belastbare Modellierung der untersuchten Systeme.

Darauf aufbauend erfolgte die Modellierung der Produktionssysteme innerhalb einer etablierten Lebenszyklusmodellierungsumgebung. Die Systemgrenzen wurden so definiert, dass sowohl vorgelagerte Prozesse (z. B. Herstellung der Bewässerungsinfrastruktur) als auch betriebliche Prozesse (z. B. Bewässerung, Ernte, Feldbewirtschaftung) konsistent abgebildet werden konnten. Ergänzend wurden unterschiedliche Szenarien zur Bewertung von Produktivitätssteigerungen und Bewässerungsintensitäten entwickelt.

### II.3.2 Zeitlicher Ablauf und Umsetzung

Der zeitliche Ablauf des Vorhabens orientierte sich an der geplanten Abfolge der Arbeitspakete und wurde im Projektverlauf im Wesentlichen eingehalten. Einzelne Anpassungen ergaben sich insbesondere aus der Verfügbarkeit und Qualität praxisrelevanter Daten sowie aus saisonalen Rahmenbedingungen der landwirtschaftlichen Produktion. Diese Anpassungen führten jedoch nicht zu einer grundlegenden Abweichung von den Projektzielen, sondern dienten der Sicherstellung einer möglichst realitätsnahen Abbildung der Produktionssysteme.

Die Durchführung der Lebenszyklusanalysen erfolgte nach Abschluss der Datenerhebung und Modellierung. Die Ergebnisse wurden iterativ ausgewertet und mit den beteiligten Projektpartnern abgestimmt, um sowohl wissenschaftliche Validität als auch Praxisrelevanz sicherzustellen. Parallel dazu wurden die Grundlagen für digitale Entscheidungsunterstützungssysteme entwickelt, die eine strukturierte Nutzung der Projektergebnisse ermöglichen.

### **II.3.3 Planabweichungen und besondere Herausforderungen**

Während der Vorhabendurchführung traten keine wesentlichen Abweichungen von der ursprünglichen Projektplanung auf, die den Verwendungszweck beeinträchtigt hätten. Herausforderungen ergaben sich insbesondere aus der Heterogenität landwirtschaftlicher Praxisdaten sowie aus der Notwendigkeit, Annahmen transparent zu dokumentieren, wenn bestimmte Informationen nicht in der gewünschten Detailtiefe verfügbar waren. Diese Aspekte wurden im Rahmen der Modellierung nachvollziehbar berücksichtigt und offen ausgewiesen.

### **II.3.4 Verwendung der Zuwendung**

Die Verwendung der bewilligten Zuwendung erfolgte zweckentsprechend und in Übereinstimmung mit der genehmigten Finanzplanung. Die Mittel wurden insbesondere für Personalaufwand zur Datenerhebung, Modellierung und Auswertung, für projektbezogene Reisen im Rahmen der Datenerfassung und des Austauschs mit Praxispartnern sowie für Sachmittel zur Unterstützung der Projektarbeiten eingesetzt. Darüber hinaus wurden Mittel für projektbezogene Dienstleistungen und wissenschaftliche Disseminationsaktivitäten verwendet.

Die eingesetzten Mittel waren notwendig und angemessen, um die geplanten Projektziele zu erreichen und eine qualitativ hochwertige Umsetzung der Arbeiten sicherzustellen. Eine Überschreitung der geplanten Mittelansätze erfolgte nicht; der Mitteleinsatz stand jederzeit in einem angemessenen Verhältnis zum erzielten Erkenntnisgewinn.

## **II.4 Erzielte Ergebnisse**

Im Rahmen des Verbundvorhabens CICLICA wurden umfassende fachliche Ergebnisse erzielt, die eine belastbare Bewertung unterschiedlicher Bewässerungsstrategien für die Carob-Produktion unter ökologischen Gesichtspunkten ermöglichen. Die Ergebnisse basieren auf einer lebenszyklusanalytischen Betrachtung realer Produktionssysteme und erlauben sowohl eine differenzierte Analyse einzelner Umweltwirkungen als auch eine übergreifende Bewertung der Effizienz verschiedener Bewirtschaftungsansätze.

### **II.4.1 Methodische Umsetzung der Lebenszyklusanalyse**

Die Lebenszyklusanalyse wurde gemäß den einschlägigen Normen der ISO-14040/44-Reihe durchgeführt. Ziel war es, die Umweltwirkungen der Carob-Produktion unter verschiedenen Bewässerungsregimen systematisch zu erfassen und vergleichbar darzustellen. Als funktionelle Einheit wurde die Produktion von einem Kilogramm frischer Carob-Schoten definiert. Ergänzend wurden flächenbezogene Ergebnisse ausgewertet, um Effekte der Bewässerung auf unterschiedlichen Bewertungsebenen transparent abzubilden.

Die Systemgrenzen wurden als „Cradle-to-Gate“-Ansatz festgelegt und umfassten sowohl vorgelagerte Prozesse (z. B. Herstellung und Transport der Bewässerungsinfrastruktur, Energieversorgung) als auch betriebliche Prozesse (z. B. Bewässerung, Feldbewirtschaftung, Ernte). Die Modellierung erfolgte unter Nutzung einer etablierten

Lebenszyklusmodellierungsumgebung unter Einbindung anerkannter Datenbanken. Primärdaten aus dem Projektkontext wurden, soweit verfügbar, bevorzugt eingesetzt und durch Sekundärdaten ergänzt.

#### **II.4.2 Untersuchte Szenarien**

Im Projekt wurden drei zentrale Produktionsszenarien betrachtet:

- Ein nicht bewässertes Referenzszenario (Regenfeldbau),
- Ein Szenario mit vollständiger Bewässerung mittels Subsurface-Drip-Irrigation (SDI),
- Ein Szenario mit defizitärer Bewässerung mittels SDI, bei dem der Wasserinput gezielt reduziert wurde.

Diese Szenarien ermöglichten einen systematischen Vergleich zwischen traditioneller Bewirtschaftung und modernen Bewässerungsansätzen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bewässerungsintensitäten.

#### **II.4.3 Umweltwirkungen auf Flächenbasis**

Die flächenbezogene Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass bewässerte Systeme gegenüber dem nicht bewässerten Referenzszenario höhere absolute Umweltwirkungen aufweisen. Dies ist insbesondere auf den zusätzlichen Einsatz von Bewässerungsinfrastruktur, Energie für Pumpen und Steuerungseinheiten sowie den erhöhten Materialeinsatz zurückzuführen. Besonders relevant erwiesen sich hierbei Wirkungsindikatoren wie der Energieverbrauch, der Ressourcenverbrauch sowie bestimmte Emissionskategorien.

Das nicht bewässerte System zeigte erwartungsgemäß die geringsten Umweltwirkungen pro Hektar, da hier keine zusätzliche Infrastruktur und kein zusätzlicher Energieeinsatz erforderlich sind. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der Einsatz von Bewässerungssystemen stets mit zusätzlichen Umweltlasten verbunden ist, die im Rahmen einer Gesamtbewertung berücksichtigt werden müssen.

#### **II.4.4 Umweltwirkungen pro Produkteinheit**

Eine differenzierte Betrachtung der Umweltwirkungen pro Produkteinheit zeigt jedoch ein deutlich verändertes Bild. Durch den Einsatz von Bewässerung konnte die Produktivität der Carob-Produktion gesteigert werden, sodass sich die Umweltwirkungen pro Kilogramm erzeugtem Produkt teilweise signifikant reduzierten. Dieser Effekt war insbesondere im Szenario der defizitären Bewässerung ausgeprägt.

Das Defizitbewässerungsszenario vereinte einen moderaten zusätzlichen Ressourceneinsatz mit einer stabilen bzw. verbesserten Ertragsleistung. Dadurch konnte ein günstiges Verhältnis zwischen Umweltwirkung und Produktivität erreicht werden. Im Vergleich zur Vollbewässerung zeigte sich, dass eine gezielte Reduktion des Wasserinputs ökologische Vorteile bieten kann, ohne die Produktivität unverhältnismäßig zu beeinträchtigen.

#### **II.4.5 Identifikation wesentlicher Einflussfaktoren**

Die Ergebnisanalyse verdeutlichte, dass insbesondere der Wasser- und Energieeinsatz maßgebliche Treiber der Umweltwirkungen sind. Innerhalb der Bewässerungssysteme spielten die Herstellung der Infrastrukturkomponenten sowie der Energiebedarf während der Nutzungsphase eine zentrale Rolle. Gleichzeitig zeigte sich, dass die Lebensdauer der eingesetzten Systeme einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtbewertung hat, da sich die Umweltwirkungen der Infrastruktur über längere Nutzungszeiträume verteilen.

Darüber hinaus wurde deutlich, dass Produktivitätsannahmen einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung pro Produkteinheit haben. Szenarien mit höheren Erträgen weisen bei ansonsten vergleichbaren Systemgrenzen geringere spezifische Umweltwirkungen auf. Diese Erkenntnis unterstreicht die Bedeutung einer integrierten Betrachtung von Umweltwirkung und Produktivität.

#### **II.4.6 Entscheidungsunterstützung und Übertragbarkeit**

Auf Basis der erzielten Ergebnisse wurden Grundlagen für ein digitales Entscheidungsunterstützungssystem geschaffen, das die Bewertung unterschiedlicher Bewässerungsstrategien ermöglicht. Dieses System erlaubt es, zentrale Einflussgrößen wie Wasserverfügbarkeit, Bewässerungsintensität und Produktivität systematisch zu variieren und deren Auswirkungen auf ökologische Kenngrößen abzuschätzen.

Die im Projekt entwickelten methodischen Ansätze sind grundsätzlich auf andere Dauerkulturen und Regionen mit vergleichbaren klimatischen Rahmenbedingungen übertragbar. Damit leisten die Ergebnisse des Vorhabens einen Beitrag zur Weiterentwicklung lebenszyklusbasierter Bewertungsansätze in der klimaangepassten Landwirtschaft.

#### **II.4.7 Bezug zur Zielstellung des Vorhabens**

Die erzielten Ergebnisse entsprechen in wesentlichen Punkten der in der Vorhabenbeschreibung formulierten Zielstellung. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass moderne Bewässerungssysteme unter bestimmten Rahmenbedingungen zu einer verbesserten ökologischen Effizienz beitragen können. Abweichungen von der ursprünglichen Zielstellung ergaben sich lediglich insofern, als bestimmte Annahmen aufgrund der verfügbaren Datenlage angepasst werden mussten; diese Anpassungen hatten jedoch keinen negativen Einfluss auf die Erfüllung des Zweckes.

#### **II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Während der Laufzeit des Vorhabens wurden auf nationaler und internationaler Ebene weitere Forschungsarbeiten bekannt, die sich mit der nachhaltigen Gestaltung landwirtschaftlicher Produktionssysteme in semiariden und ariden Regionen befassen. Insbesondere Studien zur Effizienzsteigerung von Bewässerungssystemen, zur Reduktion von Wasserverbrauch sowie zur Anwendung lebenszyklusbasierter Bewertungsmethoden in der Landwirtschaft bestätigten die hohe Relevanz der im Projekt CICALICA bearbeiteten Fragestellungen.

Mehrere neuere Untersuchungen befassten sich mit der Anwendung von Tropf- und Subsurface-Drip-Irrigation-Systemen in Dauerkulturen und wiesen auf deren Potenzial zur Reduktion von Wasserverlusten und zur Stabilisierung von Erträgen hin. Gleichzeitig wurde in diesen Arbeiten zunehmend auf die Bedeutung einer ganzheitlichen Bewertung hingewiesen, die neben agronomischen Vorteilen auch ökologische Auswirkungen berücksichtigt. Diese Entwicklungen unterstreichen die Aktualität des im Projekt verfolgten Ansatzes.

Darüber hinaus wurde während der Projektlaufzeit ein zunehmender Einsatz von Lebenszyklusanalysen zur Bewertung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsstrategien beobachtet. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Berücksichtigung von Infrastruktur und Energieeinsatz eine zentrale Rolle für die ökologische Gesamtbewertung spielt. Die im Rahmen von CICALICA angewendeten methodischen Ansätze stehen somit im Einklang mit

dem aktuellen Stand der Forschung und tragen zur Weiterentwicklung entsprechender Bewertungsstandards bei.

Insgesamt bestätigen die parallel bekannt gewordenen Forschungsarbeiten die Relevanz und den Innovationsgehalt des Vorhabens. Gleichzeitig ergänzen die im Projekt erzielten Ergebnisse den bestehenden Wissensstand durch eine praxisnahe und systematische Betrachtung der Carob-Produktion unter verschiedenen Bewässerungsregimen.

## **II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die im Rahmen des Verbundvorhabens CICALICA erzielten Ergebnisse weisen einen hohen wissenschaftlich-technischen sowie gesellschaftlichen Nutzen auf und besitzen ein erhebliches Potenzial für die praktische Verwertung. Durch die systematische Analyse unterschiedlicher Bewässerungsstrategien für die Carob-Produktion unter lebenszyklusanalytischen Gesichtspunkten wurde eine belastbare Entscheidungsgrundlage geschaffen, die über den konkreten Projektkontext hinaus Anwendung finden kann.

### **II.6.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen**

Auf wissenschaftlicher Ebene leistet das Vorhaben einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung lebenszyklusbasierter Bewertungsansätze in der Landwirtschaft. Insbesondere die integrierte Betrachtung von Bewässerungsinfrastruktur, Energieeinsatz, Produktivität und Umweltwirkungen schließt eine bislang bestehende Wissenslücke für Dauerkulturen in semiariden Regionen. Die entwickelten methodischen Ansätze sind grundsätzlich auf weitere Kulturen und Regionen übertragbar und können als Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten dienen.

Darüber hinaus wurden im Projekt robuste Modellierungsansätze etabliert, die eine transparente Bewertung komplexer landwirtschaftlicher Systeme ermöglichen. Die Kombination aus praxisnaher Datenerhebung, Szenarienanalyse und digitaler Entscheidungsunterstützung stellt einen innovativen Ansatz dar, der auch in anderen Anwendungsfeldern der nachhaltigen Landwirtschaft genutzt werden kann.

### **II.6.2 Praktischer und wirtschaftlicher Nutzen**

Für landwirtschaftliche Betriebe bieten die Projektergebnisse konkrete Hinweise zur Ausgestaltung klimaangepasster Bewirtschaftungsstrategien. Insbesondere die Identifikation der Defizitbewässerung als ökologisch effizienter Kompromiss zwischen Wasserverbrauch und Produktivität liefert praxisrelevante Erkenntnisse für Regionen mit begrenzter Wasserverfügbarkeit. Landwirte können die Ergebnisse nutzen, um Bewässerungsentscheidungen fundierter zu treffen und langfristige Investitionen in Bewässerungstechnologien besser abzuwägen.

Auch für Anbieter von Bewässerungstechnologien und landwirtschaftlicher Infrastruktur ergeben sich wertvolle Impulse. Die Ergebnisse zeigen auf, unter welchen Rahmenbedingungen moderne Bewässerungssysteme ökologisch sinnvoll eingesetzt werden können und welche Systemkomponenten maßgeblich zur Umweltwirkung beitragen. Dies kann zur Weiterentwicklung ressourceneffizienter Technologien und zur Optimierung bestehender Systeme beitragen.

### **II.6.3 Gesellschaftlicher Nutzen und Beitrag zur Klimaanpassung**

Auf gesellschaftlicher Ebene leisten die Projektergebnisse einen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung knapper Wasserressourcen und zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse unterstützen politische Entscheidungsträger und Verwaltungen bei der Entwicklung von Strategien zur klimaangepassten Landnutzung und zur Förderung effizienter Bewässerungssysteme.

### **II.6.4 Fortgeschriebener Verwertungsplan**

Die im Projekt entwickelten Bewertungsansätze und Entscheidungsgrundlagen sollen über die Projektlaufzeit hinaus genutzt und weiterentwickelt werden. Geplant ist insbesondere die Weiterverwendung der entwickelten Modelle in nachfolgenden Forschungsprojekten sowie die Integration der Ergebnisse in Beratungs- und Informationsangebote für Praxisakteure. Eine Weiterverwertung im Rahmen wissenschaftlicher Publikationen und Fachveranstaltungen ist vorgesehen.

### **II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes**

Im Rahmen des Verbundvorhabens CICLICA fand ein kontinuierlicher Austausch mit weiteren Akteuren außerhalb des unmittelbaren Projektverbundes statt. Ziel dieser Zusammenarbeit war es, zusätzliche fachliche Expertise einzubeziehen, praxisrelevante Erfahrungen zu berücksichtigen und die Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse zu erhöhen.

Insbesondere bestand ein enger Austausch mit landwirtschaftlichen Praxisakteuren, die in die Datenerhebung und Validierung der Annahmen eingebunden waren. Diese Zusammenarbeit ermöglichte den Zugang zu realen Betriebsdaten und stellte sicher, dass die im Projekt untersuchten Szenarien die tatsächlichen Rahmenbedingungen der landwirtschaftlichen Praxis realistisch abbilden. Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse regelmäßig mit den beteiligten Praxispartnern diskutiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet.

Auf wissenschaftlicher Ebene erfolgte eine Vernetzung mit weiteren Forschungseinrichtungen und Fachpersonen, die im Bereich nachhaltiger Landwirtschaft, Bewässerungstechnologien und Lebenszyklusanalyse tätig sind. Der fachliche Austausch diente insbesondere der methodischen Abstimmung, der Diskussion von Annahmen sowie der Einordnung der Projektergebnisse in den aktuellen Stand der Forschung.

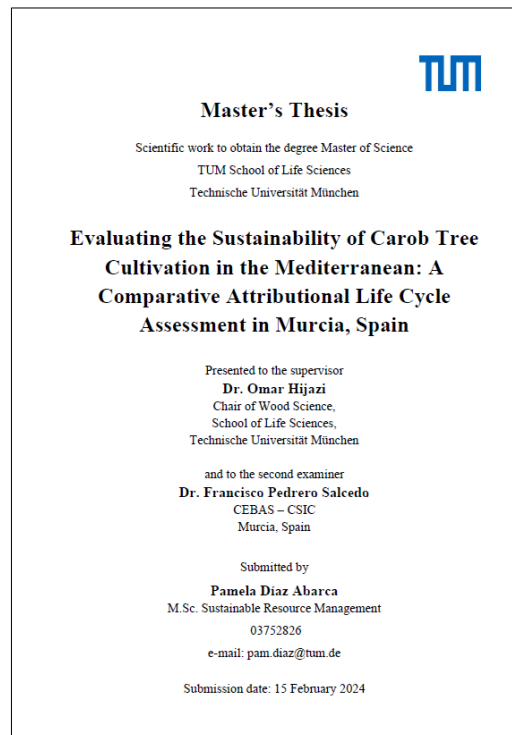
Darüber hinaus wurden Maßnahmen zum Wissenstransfer ergriffen, unter anderem durch die Vorstellung von Zwischenergebnissen im Rahmen von Fachveranstaltungen und Projekttreffen. Schulungsmaßnahmen im engeren Sinne waren nicht Bestandteil des Vorhabens; dennoch trug der regelmäßige Austausch mit Praxis- und Forschungspartnern zur Verbreitung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bei.

### **II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.**

Die Ergebnisse des Verbundvorhabens CICLICA wurden im Projektverlauf in verschiedenen wissenschaftlichen und fachöffentlichen Formaten aufbereitet und verbreitet.

Innerhalb des Projektes wurde eine Masterarbeit von Dr. Omar Hijazi (TUM) und Dr. Francisco Pedrero Salcedo (CSIC) erfolgreich betreut. Im Rahmen dieser Arbeit hat die Studentin Daten sowohl von der Firma Azud als auch vom am spanischen nationalen Forschungsrat (CSIC) erhoben. Title die Masterarbeit war „ *Evaluating the Sustainability of Carob Tree Cultivation in the Mediterranean: A Comparative Attributional Life Cycle Assessment in Murcia, Spain* “ (Abb.

2). Die Betreuung der Masterarbeit wurde durch die Zusammenarbeit zwischen der TUM und dem am spanischen nationalen Forschungsrat (CSIC) in Spanien erfolgreich durchgeführt. Diese Masterarbeit hat uns ermöglicht, wertvolle Erkenntnisse und Ergebnisse im Rahmen des Projektes zu gewinnen.



**Abbildung 2:** Erste Seiten der Masterarbeit

Die Masterarbeit befasste sich mit zentralen methodischen und inhaltlichen Fragestellungen des Vorhabens, insbesondere der lebenszyklusanalytischen Bewertung der Carob-Produktion unter unterschiedlichen Bewässerungsstrategien, und leistete einen wesentlichen Beitrag zur Datengrundlage und Auswertung der Projektergebnisse.

Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse im Rahmen mehrerer internationaler Workshops vorgestellt und diskutiert. Zwei Workshops fanden in Algerien statt und richteten sich an Forschende, landwirtschaftliche Praxisakteure sowie weitere relevante Stakeholder. Ein weiterer Workshop wurde in Marokko durchgeführt. Ziel dieser Veranstaltungen war es, die im Projekt entwickelten methodischen Ansätze, Ergebnisse und Handlungsempfehlungen zu präsentieren und im internationalen Kontext zu diskutieren:

- Algerien 20. bis 22. September 2023:

Während des Aufenthalts konnten entscheidende Daten erhoben werden, um eine fundierte Vergleichsbasis für die Lebenszyklusanalyse (LCA) zu schaffen, die parallel in Spanien durchgeführt wurde. Im Rahmen der Reise wurden folgende maßgebliche Aktivitäten erfolgreich abgeschlossen:

Wissenschaftliches Treffen mit Doktorand:innen des CICLICA-Projekts an der DBUKM in Algerien, bei dem laufende Forschungsarbeiten vorgestellt und diskutiert wurden. Durchführung eines Internationalen Wissenschaftstags an der DBUKM, unter dem Thema:

„Nachhaltige Landwirtschaft von Johannisbrot als Alternative zur Bewältigung von Dürre in der Mittelmeerregion.“ (siehe Abbildung 3)

Diese Reise stellte einen wichtigen Beitrag zur internationalen Vernetzung und zur wissenschaftlichen Zusammenarbeit im Projektkontext dar.



**Abbildung 3:** Fotos von der Dienstreise in Algerien

Im Jahr 2024 wurden im Rahmen des CICLICA-Projekts zwei wichtige internationale Workshops & Tagungen in Marokko und Algerien erfolgreich durchgeführt, die wesentlich zur Umsetzung und zum Fortschritt des Projekts beigetragen haben:

- Marokko – 25. bis 27. September 2024

Teilnahme an der ICWAS Conference an der Faculty of Sciences Semlalia der University Cadi Ayyad in Marrakesch. Die Reise fand im Rahmen von CICLICA statt und diente folgenden Zwecken:

- a. Teilnahme am Projektmeeting CICLICA mit Fokus auf Arbeitspaket 5
- b. Vorstellung eigener Projektergebnisse
- c. Besichtigungen von Feldversuchen und Datenerhebung vor Ort
- d. Austausch mit lokalen Partnern sowie Besuche landwirtschaftlicher Betriebe
- e. Diskussion über zukünftige Projektmöglichkeiten und Kooperationen

- Algerien – 17. bis 19. November 2024

Besuch der UDBKM University in Algerien im Rahmen des CICLICA-Projekts. Ziel war die Vertiefung der Zusammenarbeit und der wissenschaftliche Austausch im Rahmen von Arbeitspaket 5:

- a. Teilnahme am Projektmeeting CICLICA
- b. Besichtigungen von Feldversuchen und Datenerhebung vor Ort
- c. Moderation eines internationalen Workshops, inklusive der Beantwortung von Fragen seitens Landwirten, Studierenden und Wissenschaftler:innen
- d. Austausch zu weiteren geplanten Schritten im Projektverlauf sowie Diskussion über neue Projektansätze und Kooperationsmöglichkeiten

Nach dem Start des CICLICA -Projekts wurde es auf verschiedenen Plattformen präsentiert, darunter Newsletter der Holzforschung München (HFM) in 12/2022.

Ergänzend wurden Ergebnisse des Projekts im Rahmen eines Fachbeitrags auf einer internationalen wissenschaftlichen Tagung der American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) in den USA vorgestellt. Die Präsentation trug zur internationalen Sichtbarkeit des Vorhabens bei und ermöglichte den fachlichen Austausch mit einem internationalen Publikum aus Wissenschaft und Praxis.

Weiterhin beteiligte sich der Projektbearbeiter an einem Doctoral Colloquium am Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Im Rahmen dieser Veranstaltung wurden wissenschaftliche Fragestellungen und methodische Ansätze des Vorhabens im fachlichen Austausch mit Expertinnen und Experten diskutiert. Die Teilnahme diente der wissenschaftlichen Reflexion der angewandten Methoden und trug zur qualitativen Weiterentwicklung der im Projekt eingesetzten Bewertungsansätze bei.

Zusätzlich erfolgten Präsentationen und Vorträge im Rahmen projektbezogener Treffen sowie fachlicher Veranstaltungen. Weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen sind vorgesehen und bauen auf den im Projekt erzielten Ergebnissen auf.

## **II.9 Literaturverzeichnis**

ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.

ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.

European Commission (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Publications on sustainable irrigation and water management in agriculture.

einschlägige wissenschaftliche Fachpublikationen zur Lebenszyklusanalyse in der Landwirtschaft, zu Bewässerungstechnologien sowie zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Dauerkulturen in semiariden Regionen.

projektinterne Berichte und Datengrundlagen des Verbundvorhabens CICALICA.