Deutsches Forschungszentrum
für Künstliche Intelligenz
German Research Center for
Artificial Intelligence

Vorhaben	SOILAssist 3 Nachhaltige Sicherung und Verbesserung von Bodenfunktionen durch intelligente Landbewirtschaftung – Ein Echtzeit-Assistenzsystem für die Praxis
Titel	Abschlussbericht
Förderkennzeichen	031B1065B
Zuwendungsempfänger	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH Trippstadter Straße 122, D-67663 Kaiserslautern
Ausführende Stelle	DFKI GmbH - DFKI Niedersachsen, Planbasierte Robotersteuerung, Osnabrück
Projektleiter	Dr. Santiago Focke Martinez
Bewilligungszeitraum	01.02.2022 - 31.01.2025
Autoren	Dr. Santiago Focke Martinez
Erstellungsdatum	13. 03 2025

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 031B1065B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

DFKI Niedersachsen, Planbasierte Robotersteuerung; Hamburger Straße 24, 49084 Osnabrück, Deutschland, Tel.: +49 (0) 541 386050 0, E-Mail: pbr-info@dfki.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Abkürzungsverzeichnis 3
Einleitung 4
Eingehende Darstellung 4
1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 4
1.1. WP 3: Adaptives semantisches Assistenzsystem für Feldoperationen 5
1.2. WP 8: Weiterentwicklung des on-board Assistenzsystems für die praktische Anwendung .. 15
2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 23
3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 23
4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 23
5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 27
6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 27

Abkürzungsverzeichnis

AAS	*Adaptive Assistance System* (Adaptives Assistenzsystem)
CAU	Christian-Albrechts-Universität Kiel (Projektpartner)
CHL	*Connection headland* (Verbindungsvorgewende)
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (Projektpartner)
DMM	Driven-Mass grid-map (Gefahrene-Masse Rasterkarte): Rasterkarte mit der Menge an Masse (Gewicht), die im gesamten Feldbereich gefahren wird.
FDP	*Field-Data Provider* (Felddaten-Anbieter Komponente)
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
MHL	*Main headland* (Hauptvorgewende)
OBAS	*On-Board Assistance System* (On-Board-Assistenzsystem)
OP1	*Operation-type 1* (Erntevorgang 1): Erntemaschine ohne Bunkerkapazität plus eine oder mehrere Transportfahrzeugen
OP2	*Operation-type 2* (Erntevorgang 2): Mähdrescher mit Bunker/Container
PBR	Planbasierte Robotersteuerung, Forschungsbereich DFKI Niedersachsen
SASS	SOILAssist Sensor System
SDSM	*Sensor data and suggestions manager* (Sensordaten- und Vorschlags-/Empfehlungen-manager Komponent)
S_{OPT}	*Soil-protection optimization* (Bodenschutzoptimierung)
T_{OPT}	*Time optimization* (Zeitoptimierung)
Thünen-AT	Thünen Institut für Agrartechnologie (Projektpartner)
Thünen-SSB	Thünen Institut, Stabstelle Klima und Boden (Projektpartner)
UOS	Universität Osnabrück (Projektpartner)
WAM	*Worked-area grid-map* (Bearbeitete-Fläche Rasterkarte): Rasterkarte, die die bearbeitete (geerntete) Fläche des Feldes darstellt.
WP	*Work-package* (Arbeitspaket)

Einleitung

Das vorliegende Dokument stellt den Abschlussbericht des Vorhabens (BonaRes) SOILAssist 3. SOILAssist 3 wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Förderkennzeichen 031B1065B) gefördert.

Die dargestellten Arbeiten umfassen alle vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) geleisteten Arbeiten im Vorhaben SOILAssist 3.

Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Folgenden werden die Arbeiten und wichtigsten Ergebnisse zu den WP3 und WP8 des Projektpartners DFKI vorgestellt. Die Beschreibungen zu den Gemeinschaftsarbeitspaketen (AP0) finden sich im Abschlussbericht des Thünen-Institutes.

Das DFKI war (vollständig oder teilweise) verantwortlich für die geplanten Meilensteine M3.1, M3.2, M3.3, M8.2, M8.3 und die Deliverables D3.2, D3.4, D3.5, D8.2, D8.3, D8.4, D8.5, D8.7 (Tabelle 1, Tabelle 2).

Die Tests im Zusammenhang mit D3.5 waren aus verschiedenen Gründen begrenzt. Einige der Erntekampagnen im Jahr 2024 wurden am Wochenende durchgeführt, wobei die Landwirte den Erntetermin nur sehr kurzfristig ankündigten, was die Teilnahme der Partner DFKI und UOS und die Erfassung der Daten beeinträchtigte. Grund dafür waren die Einschränkungen bei der Festlegung des Erntetermins, die sich aus den Wetterbedingungen und dem Zustand der Ernten ergaben. Daher konnten DFKI und UOS nur an der Zuckerrübenernte im November teilnehmen. Bei dieser Kampagne wich die Feldgrenze leicht von der in der Datenbank gespeicherten ab. Außerdem erntete der Fahrer das Feld auf eine Art und Weise, die nicht den definierten Spezifikationen entsprach, die für die Entwicklung des Routenplaners verwendet wurden (z.B. nicht vollständige Ernte der Vorgewendespuren vor dem Wechsel auf eine andere Spur, Ernte eines Teils des Kernfeldes vor dem Abschluss der Ernte des Vorgewendes und Verwendung

unterschiedlicher Breiten für die beiden (Haupt-)Teilvorgewende). Schließlich waren die Live-Daten der Erntemaschine aufgrund von Komplikationen in D8.1 und D8.2 nicht verfügbar, was bedeutete, dass es keine Online-Informationen über die aktuelle Ertragsmasse im Bunker gab. Die Neuplanungs- und Überwachungsfunktionen sind von der Erfüllung der definierten Prozessvorgaben, der Korrektheit der Feldgeometrien und dem aktuellen Maschinenzustand abhängig; daher war es nicht möglich, während der Erntekampagne entsprechende Online-Tests einiger Funktionen durchzuführen. Die Neuplanungsfunktionen wurden jedoch ausgiebig offline mit simulierten Maschinendaten getestet, einschließlich Tests mit korrigierten Parametern, die von UOS als Teil der Überwachungskomponenten geliefert wurden. Darüber hinaus wurden die gesammelten GPS-Daten auch verwendet, um die Erstellung der für die Neuplanung verwendeten Rasterkarten offline zu testen (siehe nächster Abschnitt). Weitere Tests im Zusammenhang mit D3.5 wurden erfolgreich durchgeführt, darunter die Kommunikation der maschinellen (lokalen) OBAS-Komponenten mit den entfernten Serverkomponenten, der Datenaustausch zwischen den Komponenten, die Protokollierung der verfügbaren Daten, das Prozessmanagement im Server und die Offline-Planungsfunktionen.

Somit wurden Praxisprobleme (wie sie bei praktischen Feldversuchen unter realen Bedingungen sehr leicht auftreten können) durch simulierte Auswertungen komplettiert, so dass alle Module umfangreich und sorgfältig getestet werden konnte. Alle Meilensteine und Deliverables damit erreicht und erfolgreich abgeschlossen.

1.1. WP 3: Adaptives semantisches Assistenzsystem für Feldoperationen

Das WP3 wurde in WP3.1 („Routenplanungssystem für den Bodenschutz“) unter der Leitung des DFKI und WP3.2 („Prozessmonitoring zur Situationsanalyse und Neuplanung“) unter der Leitung von UOS aufgeteilt.

Tabelle 1: Auflistung der Milestones und Deliverables von WP 3

Milestone/Deliverable	Beschreibung
M 3.1	Analyse der Anforderungen für die Integration der Online-Neuplanung in das AAS (Adaptives Assistenzsystem).
M 3.2	Definition der kritischen Prozesszustände.
M 3.3	Analyse der Anforderungen zur Integration von partiellen Vorgewenden.
M 3.4	Semantische Regeln lösen eine bedarfsgerechte Neuplanung in kritischen Situationen aus.
D 3.1	Referenzdatensätze für ausgewählte Feldkampagnen sind vorhanden.
D 3.2	Planungssystem zur Unterstützung partieller Vorgewende.
D 3.3	Erstes Regelwerk zur Erkennung von Prozesszuständen wird definiert und am Datenstrom getestet.
D 3.4	Routenplanungskomponenten unterstützen dynamische Planung.
D 3.5	Tests an einer realen Kampagne.

Tabelle 2: Auflistung der Milestones und Deliverables von WP 8

Milestone/Deliverable	Beschreibung
M 8.1	Definition der neuen externen Maschinendaten, die im OBAS integriert werden sollen.
M 8.2	Analyse der Anforderungen an die Integration von externen Maschinendaten.
M 8.2	Analyse der Anforderungen für die Integration der Online-Neuplanung im OBAS.
D 8.1	Schnittstelle zwischen OBAS und Traktoren.
D 8.2	Schnittstelle zwischen dem OBAS und dem Zuckerrübenroder.
D 8.3	Erweiterung der Architektur des Systems zur Unterstützung der Online-Umplanung.
D 8.4	Aktualisierte Version der on-board GUI.
D 8.5	Endgültige Version des on-board Assistenzsystems.
D 8.6	Bericht über die Anpassung an die Abläufe im Feldverkehr mit Traktoren und bei der Zuckerrübenernte.
D 8.7	Bericht über den Prototypen 3.0 des on-board Assistenzsystems.

WP3.1: Routenplanungssystem für den Bodenschutz

Das Hauptziel von WP3.1 war die Verbesserung und Erweiterung der in den Projektphasen 1 und 2 entwickelten Routenplanungskomponenten. Diese Komponenten, die unter einer Open-Source-Lizenz (Apache License 2.0) als C++-Bibliotheken[1] zur Verfügung stehen, werden verwendet, um die Routen für die an der Ernte beteiligten Maschinen zu generieren und die negativen Auswirkungen der Befahrungen auf den Boden zu reduzieren. In den Phasen 1 und 2 wurde ein Routenplaner entwickelt, der zwei Feldoperationen unterstützt: OP1 und OP2. Bei OP1 erntet eine Erntemaschine ohne eigene Ladekapazität das Feld, unterstützt von einem oder mehreren Transportfahrzeugen, die das Erntegut von der Erntemaschine übernehmen und zu einer Entladestelle fahren. Diese Art von Arbeitsablauf wird z.B. bei der Ernte von Silomais verwendet. In OP2 ist die einzige Maschine, die an dem Vorgang beteiligt ist, eine Erntemaschine mit Bunker. Diese Erntemaschine ist für die Ernte sowie den Transport des Ernteguts zuständig. Diese Art von Arbeitsablauf wird z.B. bei der Zuckerrübenernte eingesetzt. Der Planer

[1] https://github.com/DFKI-NI/arolib/tree/soilassist

unterstützte die Offline-Routenplanung auf völlig ungeernteten Feldern vor Beginn der Erntekampagne.

Der gesamte Planungsprozess gliedert sich in zwei Teile: 1) die Verarbeitung der eingegebenen Feldgeometrien und 2) die Routenplanung für die Maschinen auf der Grundlage der berechneten Feldgeometrien. Eine ausführlichere Erläuterung findet sich im Abschlussbericht zu Phase 2. Die Aufgabe in Teil 1) besteht darin, das Feld in ein umgebendes Vorgewende und eine Innenfeld (IF) Region (das sog. Kernfeld) zu unterteilen und anschließend die Spuren für jede der beiden Regionen zu generieren, denen die Erntemaschine folgen wird, um das Feld abzudecken. Diese Geometrien (Regionsgrenzen und Spuren) werden auf der Grundlage der von der Umgebungsrepräsentationskomponente erhaltenen Felddaten (inkl. der Feldgrenze und des Referenzlinien für die IF-Spuren) und einiger Benutzereingaben (inkl. der Vorgewendebreite, der Arbeitsbreite der ausgewählten Erntemaschine und der Abstand der Spurpunkte) erzeugt. Eine beispielhafte Ausgabe der Feldgeometriebearbeitung ist in Abbildung 1 dargestellt.

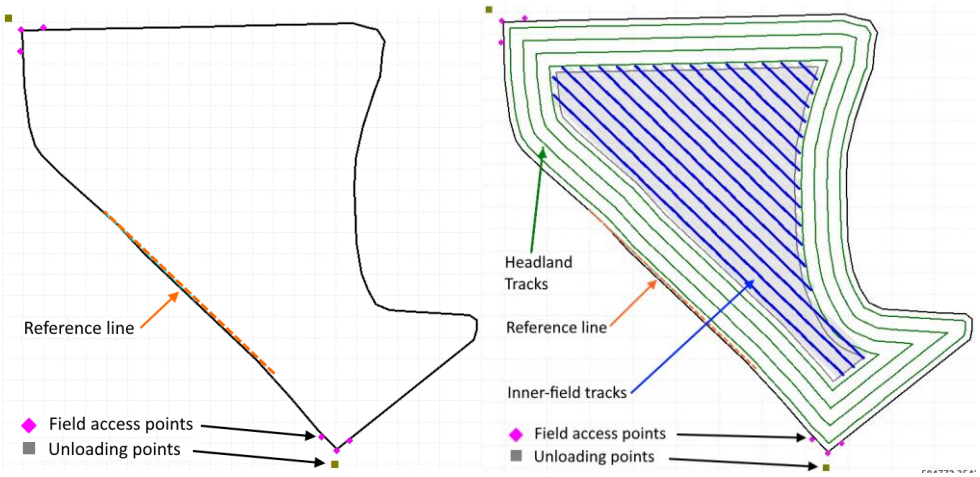

Abbildung 1: Beispiel für die Bearbeitung der Feldgeometrie: Eingabefeld (links) und bearbeitetes Feld (rechts).

Nachdem die Feldgeometrien generiert wurden, erfolgt die Routenplanung. Zunächst wird die so genannte Basisroute für die Erntemaschine erstellt. Diese stellt die Route dar, der die Erntemaschine kanonisch folgen würde, um das gesamte Feld ohne Rücksicht auf die Kapazitätsbeschränkungen der Maschinen abzudecken, wobei sie alle generierten Spuren abfährt, beginnend mit dem Vorgewende (von außen nach innen), gefolgt vom Kernfeld (von einer Seite zur anderen). Eine beispielhafte Basisroute ist in Abbildung 2 (links) dargestellt. Die Basisroute enthält räumlich-zeitliche Informationen sowie Informationen über die zu erntende Ertragsmenge (berechnet auf der Grundlage eines vorgegebenen Ertragsdurchschnitts für das Feld, oder bevorzugt einer Ertragsrasterkarte, sofern verfügbar). Im nächsten Schritt werden auf der Grundlage der Feldgeometrien, der Basisroute, des aktuellen Zustands der Maschinen

(Position, Bunkerauslastung) und anderer Planungsparameter die Routen für die beteiligten Maschinen berechnet. Zunächst wird die Basisroute in Arbeitsfenster unterteilt, die auf den Kapazitätsbeschränkungen (Bunkerkapazitäten) der Maschinen und der zu erntenden Ertragsmenge basieren. Der gesamte Routenplanungsprozess wird in Sub-Pläne (einen pro Arbeitsfenster) unterteilt, die jeweils drei Vorgänge umfassen:

1) Ernten (und Überladen für OP1), bis die Kapazitätsgrenzen erreicht sind.
2) Transport des Ernteguts zu einer Entladestelle.
3) Rückfahrt zum Feld, um mit dem nächsten Fenster fortzufahren (falls erforderlich).

Die zu 2) und 3) gehörenden Routensegmente entsprechen ausschließlich Maschinen mit Bunker-/Ladekapazität und werden mit einer der verfügbaren parametrisierbaren Kostenfunktionen berechnet, die speziell für SOILAssist entwickelt wurden: S_{OPT} und T_{OPT}. S_{OPT} wurde mit dem Ziel definiert, den *Bodenschutz* bei der Fahrt auf dem Feld zu verbessern, und basiert auf der gefahrenen Distanz, der Masse der Maschinen, den zuvor geplanten Pfaden und dem Bodenzustand des zu durchfahrenden Gebiets (der aus einer Bodenzustandskosten-Rasterkarte gewonnen wird). T_{OPT} zielt auf die Optimierung der *Einsatzzeit* ab und kann zum Vergleich und zur Evaluation der aus S_{OPT} resultierenden Routen verwendet werden. Beispielhafte Ergebnisse für S_{OPT} sind in Abbildung 2 dargestellt: In der Mitte ist die Route eines Transportfahrzeugs, das an OP1 mit uneingeschränktem Wechsel der Arbeitsfenster teilnimmt; rechts die Route eines Mähdreschers/Rübenroders in OP2, bei der nur das Kernfeld geerntet werden muss und der Mähdrescher/Rübernroder nur an den Spurenden entladen wird. Abbildung 2 zeigt auch die Bodenkostenkarte, bei der die weißen Bereiche den besonders gefährdeten Bereichen des Feldes entsprechen, die durch die Routensegmente, die der Fahrt von und zu den Entladestellen entsprechen, vermieden werden (diese Bereiche können während der Ernte-/Überladungssegmente nicht vermieden werden).

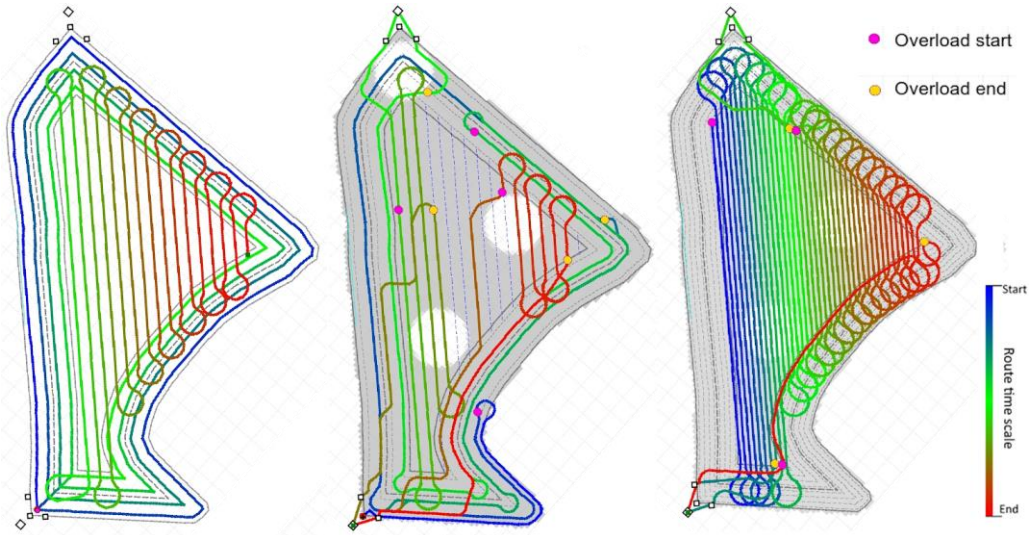

Abbildung 2: Beispiel einer Erntemaschine-Basisroute (links), einer Route eines Transportfahrzeugs im OP1 (Mitte) und einer Erntemaschineroute im OP2 (rechts).

Die wichtigsten Erweiterungen, die in Phase 3 für den Routenplaner entwickelt wurden, betreffen die Unterstützung eines anderen Vorgewende-Typs (M3.3, D3.2) und die Routenplanung auf teilweise abgeernteten Feldern, die zur Neuplanung genutzt werden (M3.1, D3.4). Die Spezifikationen des neuen Vorgewende-Typs wurden gemeinsam mit den Partnern festgelegt und entsprechen einer Reihe von Teilvorgewenden. Die Teilvorgewende sind in Hauptvorgewende (MHL) und Verbindungsvorgewende (CHL) unterteilt. Die Hauptvorgewende befinden sich dort, wo die Fahrspuren des Kernfeldes beginnen/enden, und haben eine oder mehrere Spuren und eine vom Benutzer definierte Vorgewendebreite. Die Verbindungsvorgewende sind einspurige Vorgewende, die die Hauptvorgewende verbinden. Die Vorgewende werden, beginnend mit den äußersten Spuren, nacheinander bearbeitet. Je nach Form der Feldgrenze und der gewünschten Breite des Vorgewendes ergeben sich drei Fälle der geometrischen Darstellung des Feldes. Wenn die Grenzen der zwei ursprünglich erzeugten MHL sich nicht überschneiden, besteht die Menge der Vorgewende aus zwei MHL, die durch zwei CHL verbunden sind. Wenn die Grenzen der zwei ursprünglich erzeugten MHL sich auf einer Seite überschneiden, werden diese Vorgewende zu einer einzigen MHL verschmolzen, und eine CHL verbindet beide Seiten der MHL. Ein dritter Fall tritt ein, wenn sich beide Seiten der ursprünglich erzeugten MHL überschneiden; in diesem Fall muss ein vollständiges Vorgewende verwendet werden. Abbildung 3 zeigt die resultierende geometrische Darstellung mit Teilvorgewenden für mehrere Felder unterschiedlicher Größe und Form. Der Routenplanungsprozess wurde aktualisiert, um diesen neuen Vorgewende-Typ zu unterstützen. Abbildung 4 zeigt beispielhafte Routen, die für eine OP1-Erntemit mit einer Erntemaschine und zwei Transportfahrzeugen generiert wurden (aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur die Route eines Transportfahrzeugs dargestellt).

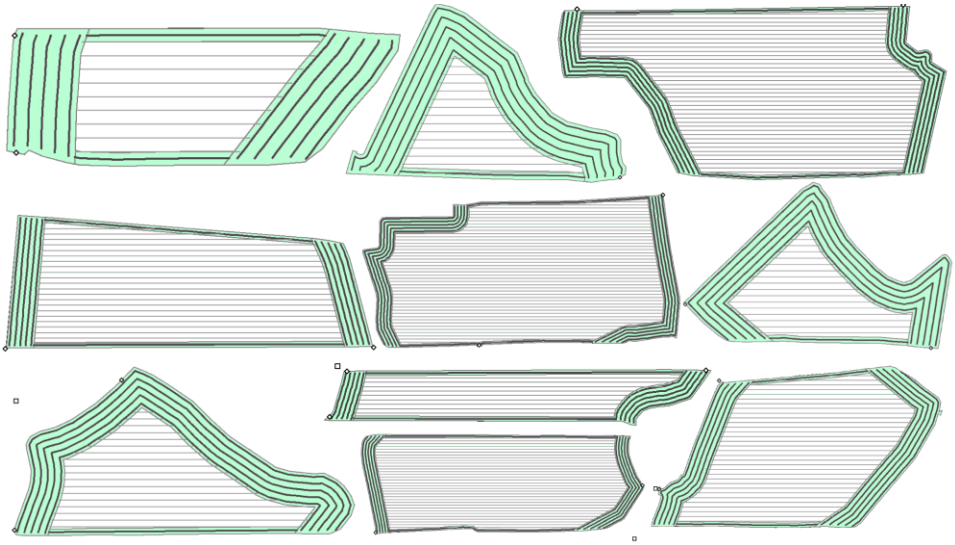

Abbildung 3: Beispiele für die geometrische Darstellung mit Teilvorgewenden für verschiedene Felder.

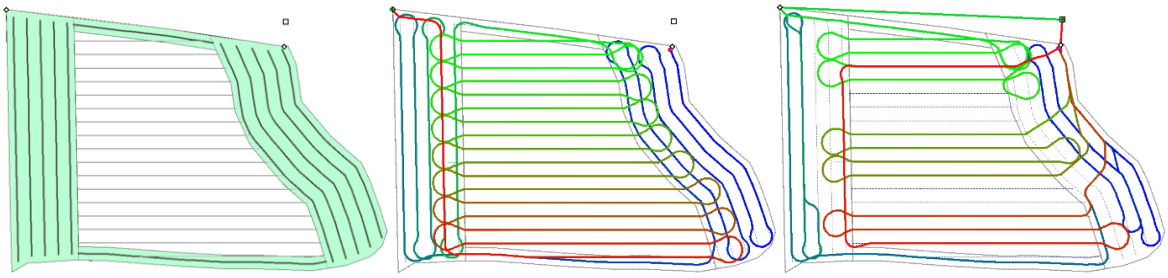

Abbildung 4: Beispiel für die generierten Routen für eine Erntemaschine (Mitte) und eines der zwei Transportfahrzeuge (rechts) für OP1 mit Teilvorgewende (links).

Für die Planung auf teilweise abgeernteten Feldern und die Neuplanung wurde eine Rasterkarte der bearbeiteten Fläche (*Worked-Area Map*, WAM) als Eingabe für den Planer hinzugefügt. Diese Rasterkarte stellt den Erntezustand des Feldes dar und markiert die bereits abgeernteten Bereiche. Mit dieser Rasterkarte und dem aktuellen Standort der Erntemaschine führt der Planer einen Algorithmus aus, um die Basisroute für die noch nicht, bzw. noch nicht vollständig abgeernteten Spuren zu erstellen. Es ist wichtig zu beachten, dass die Einschränkung, das Vorgewende vor dem Kernfeld zu bearbeiten, immer noch gilt. Daher plant der Routenplaner folgerichtig zuerst den nicht abgeernteten Bereich des Vorgewendes, auch wenn einige Bereiche des Kernfeldes bereits abgeerntet wurden. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel mit den geplanten Routen für ein teilweise abgeerntetes Feld mit zwei Bearbeitungszuständen, die durch die Rasterkarten WAM1 und WAM2 für einen OP2-Einsatz mit umgebendem Vorgewende

dargestellt werden. Ebenso zeigt Abbildung 6 ein Beispiel mit den geplanten Routen für einen OP1-Einsatz mit zwei Transportfahrzeugen und Teilvorgewenden. Im Fall des Feldzustandes, der WAM1 entspricht, wurde die Planung durchgeführt, als das Transportfahrzeug TV1 von der Erntemaschine überladen wurde, während für WAM2 das Transportfahrzeug auf dem Weg zur Erntemaschine war, um die nächste Überladung zu beginnen. In beiden Fällen war TV2 auf dem Weg zur Entladestelle, um die Erträge aus dem Bunker abzuladen.

Da S_{OPT} bei der Berechnung der Transitpfade die zuvor befahrenen Bereiche berücksichtigt, wurde die S_{OPT}-Komponente auch aktualisiert, um eine Rasterkarte der befahrenen Masse/Gewicht (*Driven-Mass Map*, DMM) in die Kostenberechnung einzubeziehen. Die DMM enthält die Werte der gesamten Masse, die über das Feld gefahren wurde. Auf diese Weise berechnet der Planer die Transitroutenabschnitte auf der Grundlage der Art und Weise, wie die Maschinen bis zum Zeitpunkt der (Neu-)Planung über das Feld gefahren sind.

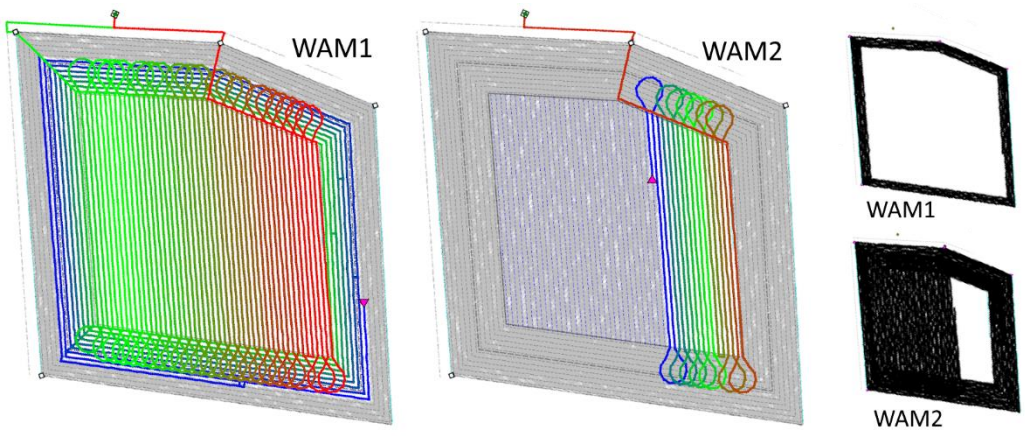

Abbildung 5: Beispiel mit den geplanten Routen für Neuplanung unter Verwendung von zwei WAMs für einen OP2-Betrieb mit umgebendem Vorgewende.

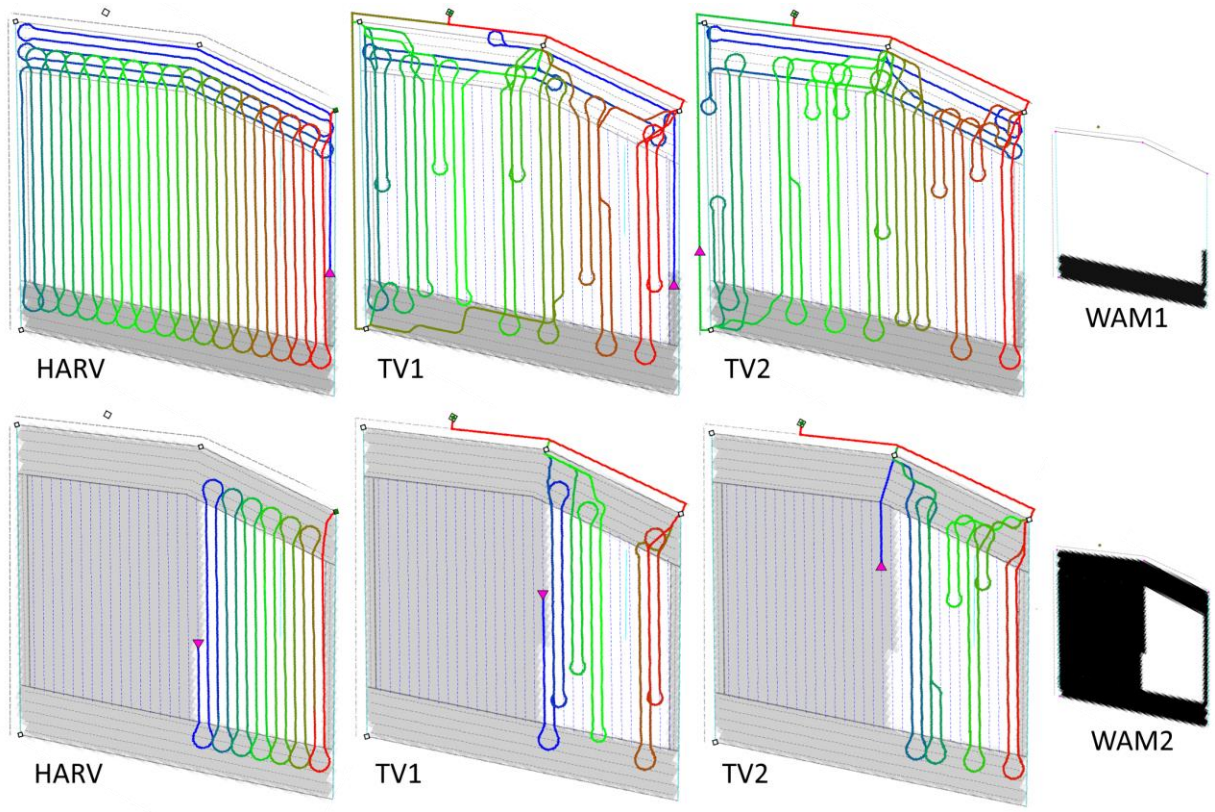

Abbildung 6: Beispiel mit den geplanten Routen für Neuplanung unter Verwendung von zwei WAMs für einen OP1-Betrieb (1 Erntemaschine, 2 Transportfahrzeugs) mit Teilvorgewende.

Außerdem wurden zwei Prototyp-Komponenten für die Generierung von WAM- und DMM-Rasterkarten entwickelt, um die Neuplanungsfunktionen zu testen. Der WAM-Generator verwendet aufeinanderfolgende Standortpunkte und die Arbeitsbreite der Erntemaschine, um Projektionen in die Rasterkarte zu erstellen und die Werte der sich überlappenden Zellen auf „abgearbeitet“-Werte zu setzen. Der DMM-Generator ist komplexer und verwendet die Daten aller Maschinen im Prozess. Er erstellt Projektionen unter Verwendung der Standortpunkte, zusammen mit der Breite und Länge der entsprechenden Maschine. Die Werte der Zellen, die sich mit den Projektionen überschneiden, werden anhand des Gewichts der (leeren) Maschine und des aktuellen Bunkergewichts aktualisiert. Da diese Projektionen im DMM-Generator die gesamte Maschinenfläche berücksichtigen, können Richtungsänderungen, die durch eine geringe GPS-Präzision verursacht werden, zu teilweise falschen Projektionen führen. Daher ist es wichtig, gefilterte Maschinenpositionen zu verwenden, um korrekte Karten zu erzeugen. Der DMM-Generator ermöglicht auch die Filterung der aktuellen DMM-Karte mit einer WAM-Karte, obwohl diese Filterung rechenintensiv sein kann. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen WAM- und DMM- Rasterkarten, die mit den GPS-Daten der Rübenroder erstellt wurden, die während der Zuckerrübenernte 2024 gesammelt wurden. Die DMM wurden mit den entsprechenden WAM gefiltert. Die Abbildungen zeigen die WAM in Graustufen (0: abgearbeitet, 1: nicht abgearbeitet),

während die DMMs die farbcodierten Werte der Masse (kg) zeigen[2].

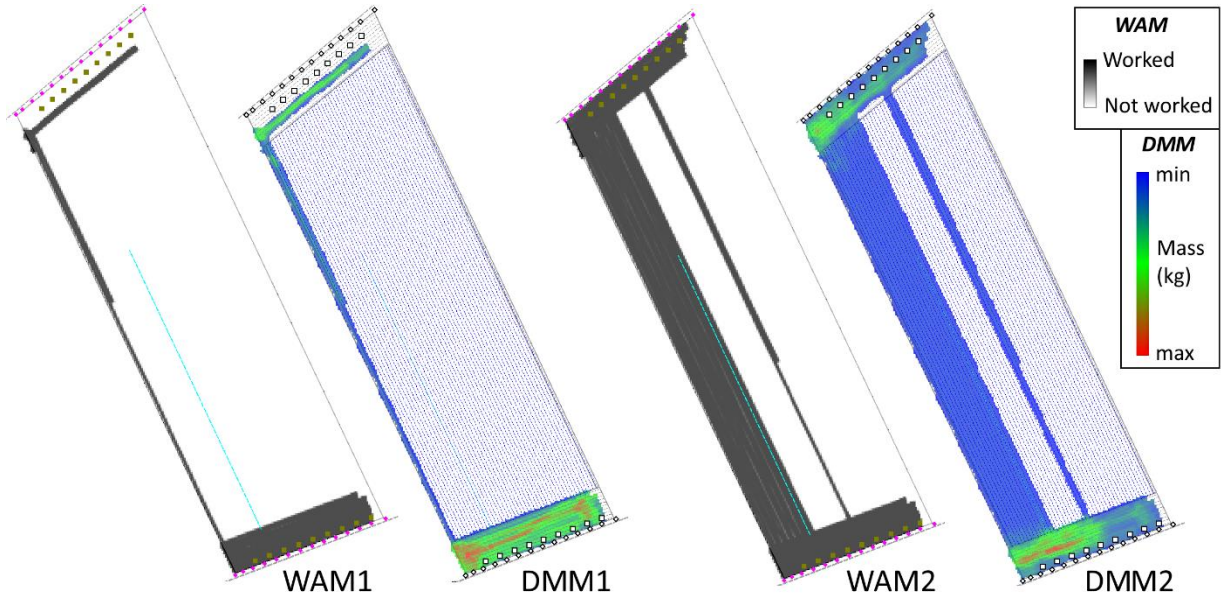

Abbildung 7: WAM- und DMM- Rasterkarten, erstellt mit GPS-Daten der Zuckerrübenernte 2024 (Teil 1).

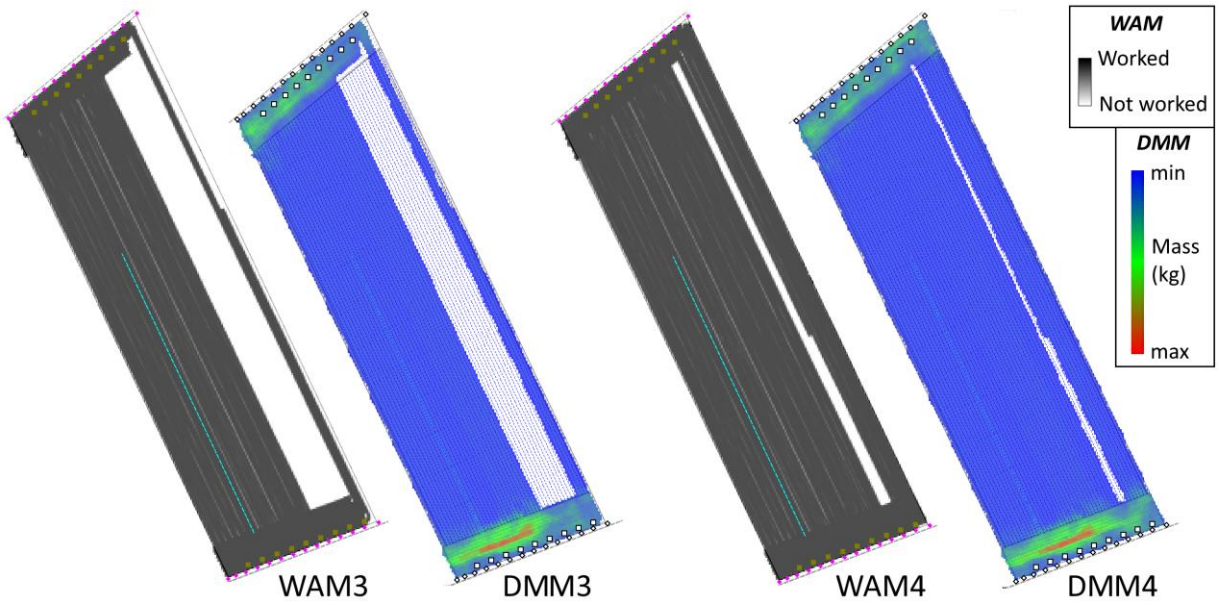

Abbildung 8: WAM- und DMM- Rasterkarten, erstellt mit GPS-Daten der Zuckerrübenernte 2024 (Teil 2).

Zusätzlich zu den neuen Funktionalitäten, die für die 3. Phase entwickelt wurden, wurden viele Funktionen des Routenplaners der 2. Phase verbessert und erweitert. Zu den wichtigsten

[2] Die Farbkodierung bezieht sich auf die Minimal- und Maximalwerte des entsprechenden DMM, daher entspricht die gleiche Farbe nicht dem gleichen Massenwert in verschiedenen DMM- Rasterkarten.

Verbesserungen und Erweiterungen gehören:

- Aktualisierungen zur Unterstützung der Option, die Kernfeldspuren, die sich mit der Kernfeldgrenze schneiden, zu teilen. Dies umfasst die Generierung der Kernfeldspuren und entsprechende Aktualisierungen bei der Generierung des Graphen.
- Verbesserung der Graphen-basierten Pfadsuche durch die Einführung von Nachfolgeknoten-Prüfungen zur besseren Verwaltung von Suchbeschränkungen.
- Aktualisierungen bei der Auswahl von Kernfeldspurenfolgen, einschließlich einer neuen Methode unter Verwendung von Simulated Annealing.

Die Routenplanungsfunktionalitäten wurden in das On-Board-Assistenzsystem integriert.

1.2. WP 8: Weiterentwicklung des on-board Assistenzsystems für die praktische Anwendung

WP8 ist ein gemeinsames WP, das in Abstimmung mit allen Projektpartnern entwickelt wurde. Die wichtigsten Beiträge des DFKI werden im Folgenden vorgestellt.

Systemarchitektur und Datenaustausch zwischen Komponenten

Die zentrale Aufgabe in WP8 ist es, ein System zu entwickeln, das verschiedene Komponenten und Funktionalitäten, die in SoilAssist entwickelt wurden, so integriert, dass sie dem Benutzer für den praktischen Einsatz präsentiert werden können. Abbildung 9 zeigt die für das On-Board-Assistenzsystem (OBAS) entwickelte Systemarchitektur. Auf der Serverseite wird ein Set der einzelnen Serverkomponenten instanziiert, und pro Maschine jeweils ein Set der lokalen Komponenten. Sie setzt sich also aus einer Serverinstanz und einer oder mehrerer lokaler Instanzen zusammen. Die Kommunikation zwischen den Komponenten erfolgt über MQTT und mithilfe der vom DFKI entwickelten ODiL C++ Bibliothek, die ein auf MQTT und Protobuf basierendes Kommunikations-Framework bereitstellt. Jede Instanz kommuniziert intern über einen MQTT-Broker, und der jeweilige MQTT-Broker der lokalen Instanzen fungiert als Brücke zum Server-(Haupt-)MQTT-Broker. Alle vom DFKI entwickelten Komponenten wurden Open-Source veröffentlicht[3].

[3] https://github.com/DFKI-NI/soilassist

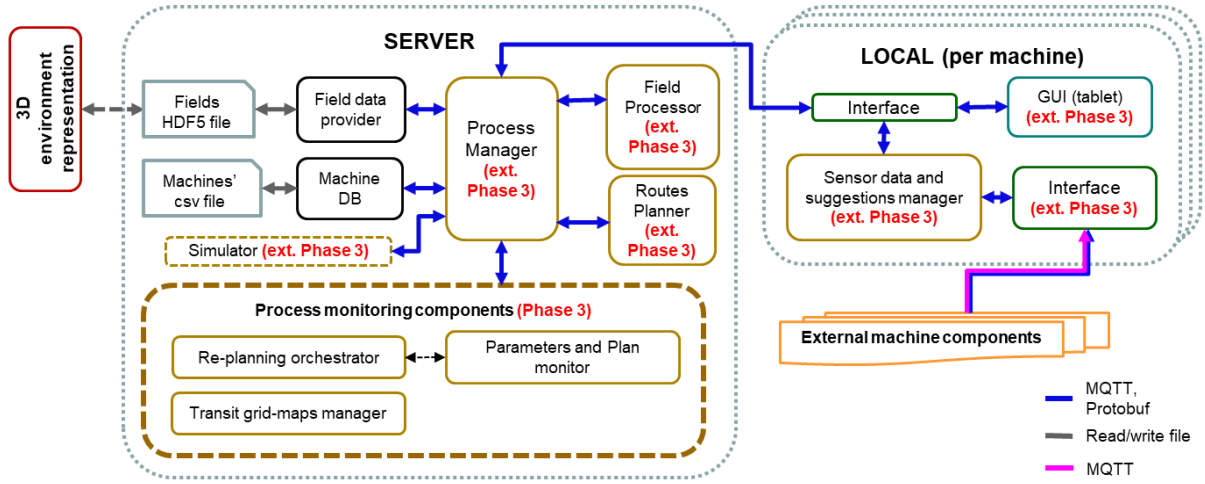

Abbildung 9: Architektur des Assistenzsystems.

Server-Komponenten:

- Felddaten-Anbieter (Field-data Provider, FDP): Diese Komponente enthält die Funktionen, um die verfügbaren Felddaten (Geometrien, Rasterkarten, usw.) aus den von der Umgebungsrepräsentationskomponente erzeugten HDF5-Dateien zu lesen und sie anderen Komponenten zur Verfügung zu stellen.
- Maschinen-DB: Diese Komponente liest den Satz der für die Operation verfügbaren Maschinen und stellt die Daten anderen Komponenten zur Verfügung.
- Feldgeometrie-Prozessor und Routenplaner: Diese Komponenten umfassen die in WP3.1 entwickelten Funktionalitäten, d.h. Verarbeitung der Feldgeometrien und Generierung von Maschinenrouten.
- Maschinensimulator: Diese Komponente dient zur Durchführung von Simulationen auf geplanten Routen.
- Prozess-Manager: Dies ist die zentrale Komponente. Sie verwaltet die Prozessabläufe (Benutzerbefehle, Zustandsmaschine usw.) und Daten (Feld, Maschinen, Pläne, Prozessinformationen, Planungsparameter, usw.). Zu seinen Aufgaben gehören u.a. die Kopplung von Benutzerbefehlen mit den entsprechenden Aufrufen anderer Serverkomponenten, die Übermittlung von Prozessdaten an die lokalen Komponenten, die Erfassung von Maschinen- und Plandaten sowie die Verwaltung von Planungsaufgaben (z.B. Neuplanung, Mehrfachplanung für mehrere potenzielle Referenzlinien).
- Komponenten zur Prozessüberwachung:
  - Transit-Rasterkarten-Manager: Diese Komponente generiert Rasterkarten der bearbeiteten Fläche (WAM) und der befahrenen Masse (DMM) auf Grundlage der übertragenen Maschinendaten (Standort, Bunkermasse) und bietet dem Prozessmanager einen Service, um die Rasterkarten abzufragen, wenn eine Neuplanung ausgeführt werden soll.

- Parameter- und Planmonitor: Diese Komponente prüft die Korrektheit der für die Planung verwendeten Parameter und korrigiert sie gegebenenfalls, z.B. wenn die Maschine einer Kernfeld-Spurrichtung folgt, die von der Referenzlinie abweicht, die zur Generierung der Feldgeometriedarstellung verwendet wurde. Es überwacht und vergleicht den Plan, der ausgeführt wird, mit den aktuellen Maschinendaten, um Abweichungen zu erkennen, die eine Neuplanung auslösen könnten, z.B. Abweichungen von den geplanten Pfaden.
- Neuplanungs-Orchestrator. Diese Komponente verwendet die Ergebnisse der Parameter- und Planmonitor, um Neuplanungsvorschläge (mit korrigierten Parametern) zu generieren und an den Prozessmanager zu senden.

Lokale-Komponenten:

- Sensordaten- und Vorschlags-/Empfehlungsmanager (*Sensor Data and Suggestions Manager*, SDSM): Diese Komponente verwaltet die Sensordaten der Maschine (GPS, Reifendruck usw.) und die damit verbundenen berechneten Werte. Diese Werte werden in lokalen Logdateien aufgezeichnet und an die anderen Komponenten übermittelt. Aus den empfangenen Reifensensorwerten werden die zusätzlichen Daten mithilfe der von Thünen-AT bereitgestellten Modelle berechnet. Zusätzlich generiert sie auf Basis der von Thünen-AT bereitgestellten Regeln Vorschläge für die Fahrer*innen.
- On-Board GUI: Grafische Schnittstelle für die Benutzer*innen (Details im nächsten Abschnitt).
- MQTT-Interface: Bezieht sich auf den MQTT-Broker/Bridge, der die Kommunikation zwischen den lokalen Komponenten und die Kommunikation mit den Server-Komponenten vermittelt.
- MQTT/Odil Interface: Diese Komponente übersetzt rohe MQTT-Nachrichten von externen Komponenten (z.B. den SOILAssist-Sensorsystemen, SASS) in Odil/protobuf-Nachrichten, die die lokalen Komponenten interpretieren können.

Hauptverantwortlich für die Weiterentwicklung des OBAS in der 3. Phase von SOILAssist war der Projektpartner UOS. Das DFKI hat neue Funktionalitäten bereitgestellt, um das OBAS zu erweitern. Es wurden neue Protobuf-Nachrichten definiert, um Online-Maschinendaten in das OBAS zu integrieren, die auf den von Thünen-AT bereitgestellten Maschinendaten basieren (M8.2). Die OBAS-Komponenten wurden aktualisiert, um diese neuen Daten in das System zu integrieren. Zusätzlich entwickelte das DFKI den Prototypen für den Transit-Rasterkarten-Manager unter Verwendung der in WP3.1 entwickelten neuen Rasterkartengeneratoren.

Weiterentwicklung des On-Board Graphical User Interface (GUI)

In Phase 3 war der Projektpartner UOS hauptverantwortlich für die Weiterentwicklung der On-Board-GUI, weshalb dieser Abschnitt nur einen kurzen Überblick gibt. Ausführlichere Informationen finden sich im Bericht der UOS.

Die On-Board-GUI der 2. Phase wurde verbessert und erweitert, um die neuen Funktionalitäten und Daten der 3. Phase zu integrieren. Die grafische Benutzeroberfläche ist eine in JavaScript entwickelte webbasierte Open-Source-Anwendung, die auf einem Android-System (z.B. einem Tablet) oder über einen Webbrowser eines beliebigen Desktop-Rechners/Laptops ausgeführt werden kann. Die grafische Benutzeroberfläche ermöglicht es den Fahrer*innen Prozessparameter festzulegen, eine Maschine für den Prozess zu registrieren und Befehle an die Prozessmanager-Komponente zu senden. Sie zeigt den Benutzer*innen auch Prozessdaten, Pläne und Empfehlungen an.

Abbildung 10 zeigt den Konfigurations-Tab der GUI. Hier können sich die Benutzer*innen mit dem entsprechenden lokalen MQTT-Broker verbinden. Nach dem Verbindungsaufbau ruft die GUI alle aktuellen Daten aus dem Prozessmanager ab und führt die entsprechenden Aktualisierungen in der gesamten GUI durch, einschließlich der Liste der aktuell registrierten Maschinen, die im unteren Bereich angezeigt wird. In diesem Tab können die Benutzer*innen die Maschine, die sie fahren, registrieren, das Feld auswählen und einige für die Erntekampagne spezifische Prozessparameter auswählen (u. a. Vorgewende-Typ, Vorgewende-Breite, Referenzlinie für die Kernfeldspuren und Bodenkosten- Rasterkarte). Nach der Auswahl können die Benutzer*innen die geometrische Darstellung des Feldes erstellen, die Maschinenrouten planen und den Prozess starten.

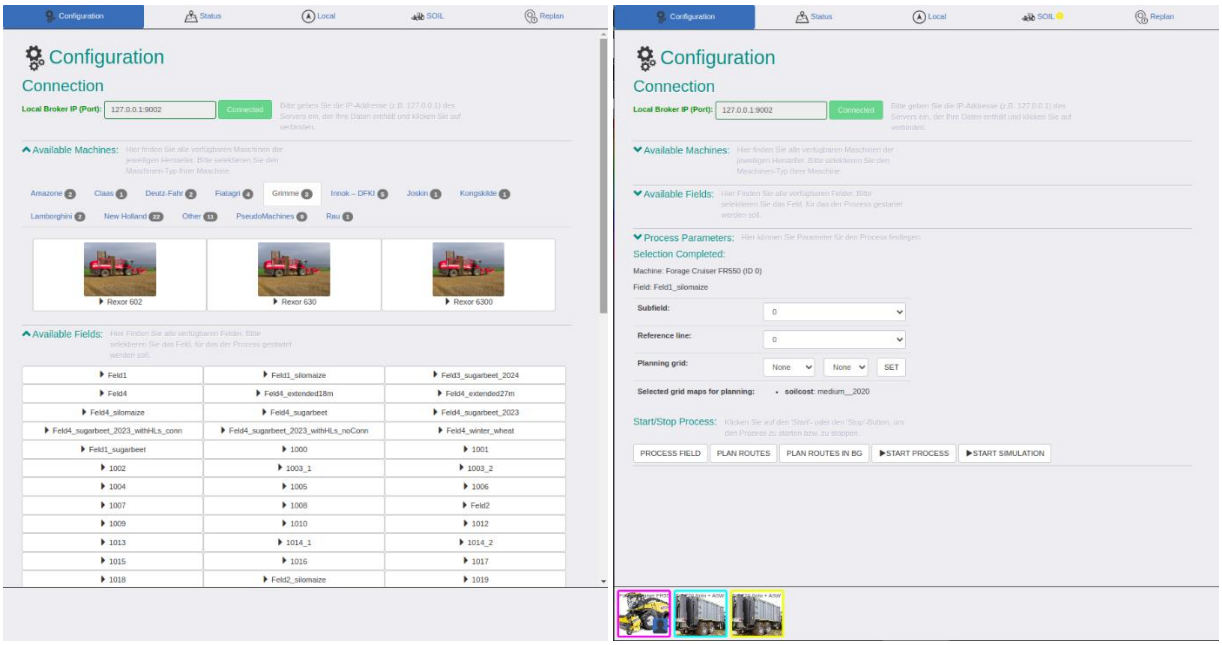

Abbildung 10: On-Board GUI Konfigurations-Tab.

Abbildung 11 zeigt den Status-Tab der GUI. Hier werden aktuelle Felddaten, geplante Routen und Maschinenstandorte angezeigt. Die Benutzer*innen können wählen, wie die Routen angezeigt werden sollen (z.B. einfarbig, mit Unterscheidung von Transit- und Überladungssegmente, oder nach geplanter Zeit) oder die Routen ausblenden. Wenn der Simulator läuft, können auch die Abtastfrequenz und die Geschwindigkeit der Simulation eingestellt werden. Außerdem können die Benutzer*innen auswählen, welche Maschinenroute angezeigt werden soll, indem sie auf das entsprechende Maschinensymbol im unteren Bereich klicken. Verfügbare Rasterkarten können ebenfalls zur Anzeige ausgewählt werden. Der/Die Benutzer*in kann eine beliebige verfügbare Rasterkarte für das ausgewählte Feld anfordern, die in der Karte eingeblendet werden soll (z.B. entsprechend den Bodenmodellen in der Umgebungsrepräsentation), oder eine der für die Planung festgelegten Rasterkarten auswählen (z.B. die Bodenkostenkarte, wie in Abbildung 11 - rechts dargestellt). Der Lokal-Tab ist ähnlich wie der Status-Tab, mit dem Unterschied, dass die Anzeige auf die Maschine zentriert ist und der Fokus auf den bevorstehenden Routensegmenten liegt (Abbildung 12).

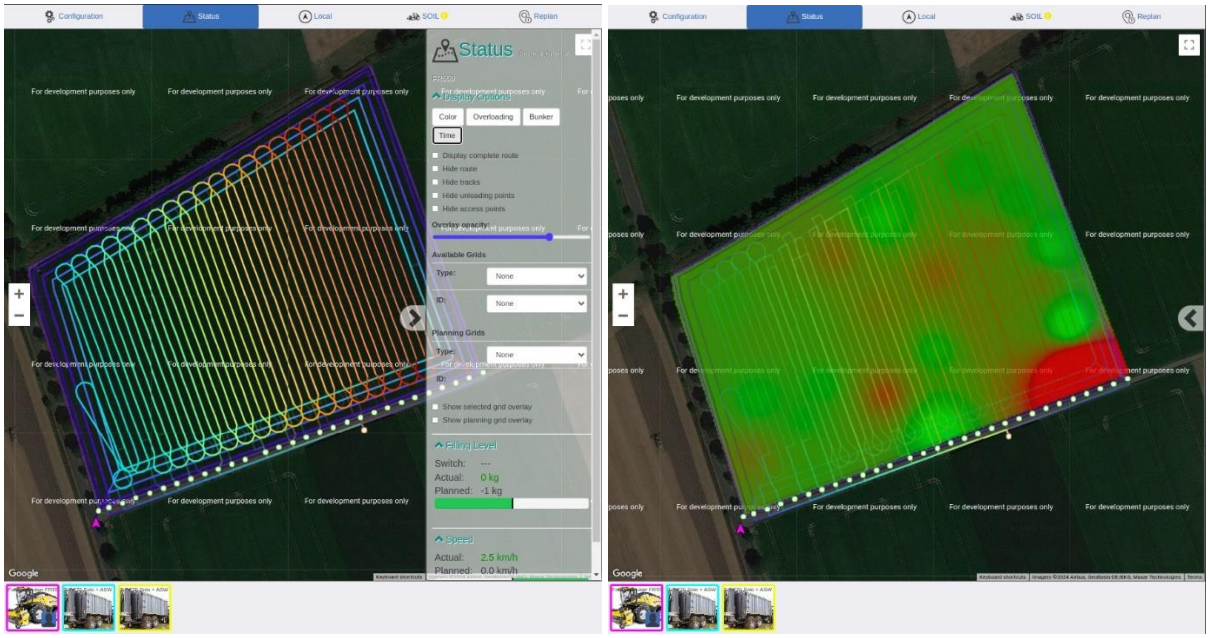

Abbildung 11: On-Board GUI Status-Tab.

Abbildung 12: On-Board GUI Lokal-Tab.

Die neuen Neuplanungsfunktionen wurden auch in die GUI integriert. Der Prozessmanager leitet die Neuplanungsvorschläge an die Benutzer*innen weiter, die diese entweder annehmen oder ablehnen können. Wenn die Vorschläge akzeptiert werden, findet die Neuplanung im Hintergrund statt und die neue geometrische Darstellung der Felder und/oder der Routen werden in der GUI aktualisiert. Abbildung 13 (links) zeigt die Meldung, die die Benutzer*innen

erhalten, wenn ein Neuplanungsvorschlag vom Prozessmanager gesendet wird. Diese Meldung enthält die Korrektur, die vorgenommen werden soll, sowie die Gründe für die Vorschläge. Diese Informationen sind auch auf dem Replan-Tab zu sehen. Abbildung 13 (rechts) zeigt die neue Maschinenroute, nachdem der Vorschlag zur Neuplanung angenommen und die Neuplanung durchgeführt wurde. Die Benutzer*innen können auch die für die Neuplanung verwendeten WAM- und DMM- Rasterkarten anzeigen (Abbildung 14).

Abbildung 15 schließlich zeigt den Tab mit den aktuellen Maschinenreifenwerten und Empfehlungen, am Beispiel des Grimme Rexor 630. Die Reifenwerte werden anhand des definierten Farbcodes angezeigt: grün:=OK; orange:=Warnung; rot:=kritisch. Empfehlungen (aus dem SDSM) zum Erhöhen/Verringern des Reifendrucks, zum Einstellen des Reifendrucks auf einen bestimmten Wert und zum Verringern der Last werden die Benutzer*innen ebenfalls angezeigt.

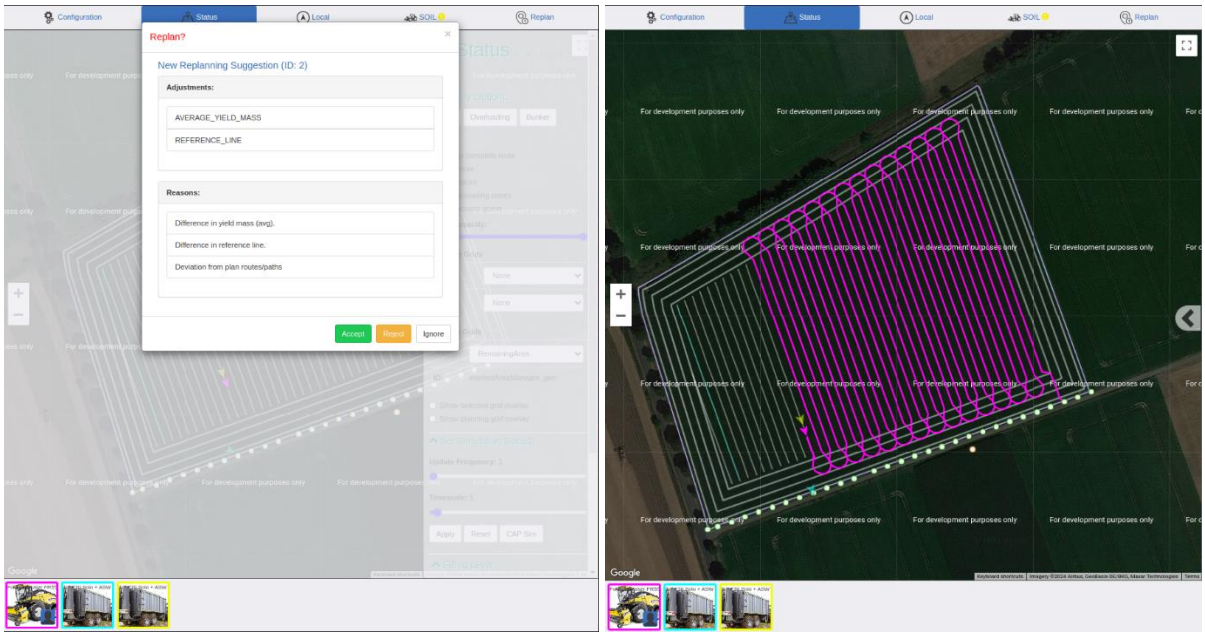

Abbildung 13: Neuplanungsvorschläge (links) und neue Route nach Neuplanung (rechts).

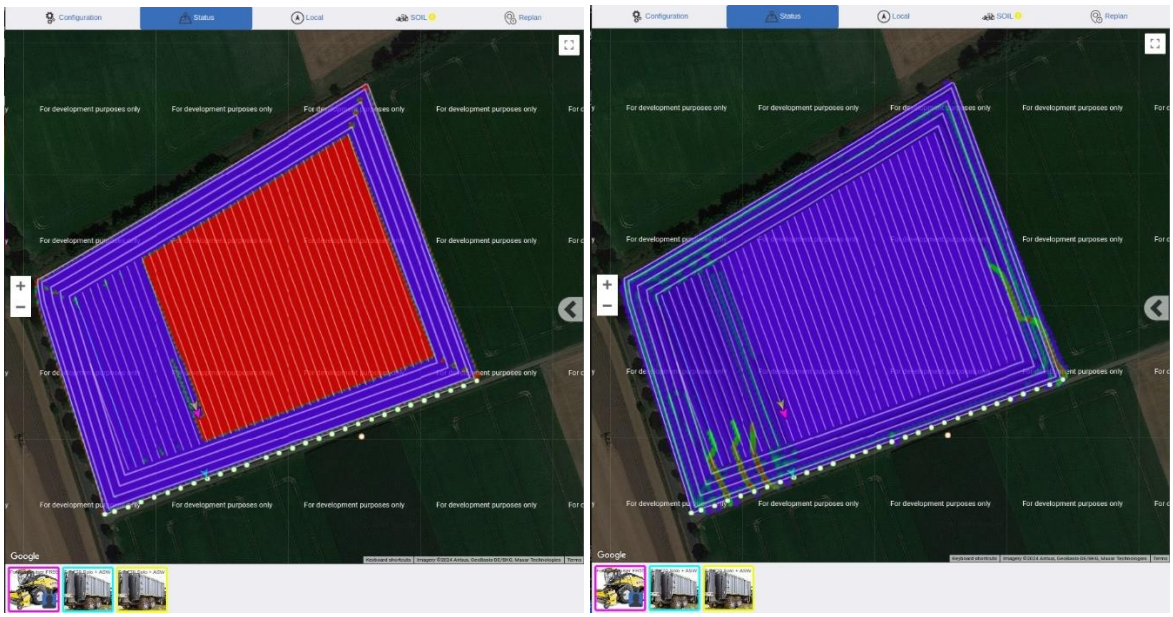

Abbildung 14: WAM- (links) und DMM- (rechts) Rasterkarten, die für die Neuplanung verwendet werden.

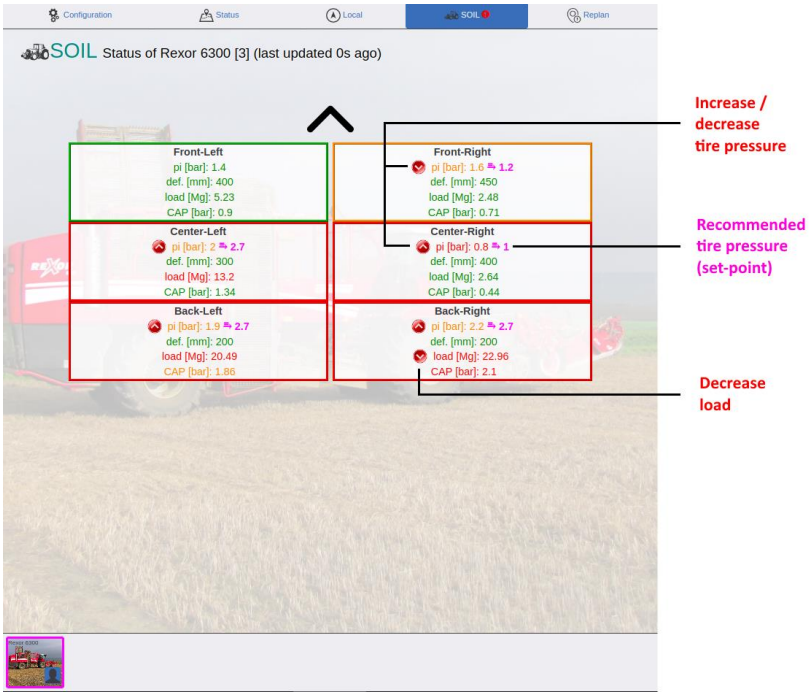

Abbildung 15: On-Board GUI Tab für Maschinenreifenwerte und Empfehlungen.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Alle Positionen (insbes. Personal, Beschaffungen und Verwaltung) lagen ohne große Abweichung zur ursprünglichen Planung im Rahmen der Bewilligung. Lediglich die Reisekosten sind etwas niedriger als beantragt ausgefallen, da eine Reihe von Projekttreffen (u.a. aufgrund von Veränderungen ausgelöst durch die Corona-Pandemie) online stattgefunden haben.

Details zum zahlenmäßiger Verwendungsnachweis werden in einem externen Dokument geliefert

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten am DFKI waren vor dem Hintergrund der Zielstellungen, des Projektablaufs und der durchgeführten Milestones und Deliverables notwendig und angemessen. Die Komponenten zur Verarbeitung von Feldgeometrien und zur Routenplanung (WP3) waren notwendig, um bodenschonende Maschinenrouten zu generieren und diese dem/der Fahrer*in als Handlungsempfehlung zu präsentieren. Die Entwicklung der Server- und lokalen Komponenten des OBAS (WP8) war notwendig, um die Prozessdaten zu verwalten und zu übertragen, Maschinen-, Feld- und Modelldaten zu integrieren und generell die Assistenzfunktionalität in den praktischen Einsatz zu bringen. Die GUI-Entwicklung war notwendig, um die Prozessdaten darzustellen und die Assistenzfunktionalitäten des OBAS den Nutzern anzubieten. Darüber hinaus war die Teilnahme an Sitzungen, Workshops, Konferenzen und Feldversuchen für das Erreichen der Projektziele und der Dissemination der Ergebnisse unerlässlich. Die Arbeiten waren von einem hohen wissenschaftlichen und technischen Anspruch geprägt und rechtfertigen somit den Einsatz der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Die Ergebnisse wurden entsprechend publiziert.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des BonaRes-SOILAssist-Projektes können auf unterschiedlichen Ebenen in wissenschaftlicher, technischer und wirtschaftlicher Hinsicht genutzt werden.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das DFKI strebt generell keine wirtschaftlichen Verwertungen von Projektergebnissen an. Nichtsdestotrotz existieren zahlreiche potenzielle wirtschaftliche Anknüpfpunkte an die Projekterfolge:

Die SOILAssist-Partner*innen haben einen langjährigen und engen Kontakt zu Interessengruppen. Darüber hinaus haben Maschinenherstellende, Herstellende von Landwirtschaftsreifen und -felgen, landwirtschaftliche Lohnunternehmer*innen und Landwirte*innen großes Interesse an den Ergebnissen von SOILAssist bekundet. Neben indirekter Ergebnisverwertung über Maschinenhersteller und Dienstleistungsanbieter im Agrarbereich können Projektergebnisse prinzipiell z.B. im DFKI durch Gründung von Spin-Off-Unternehmen verwertet werden.

Das On-board Assistenzsystem (OBAS) wurde modular implementiert und unter Open-Source-Lizenzen (z.B. Apache License 2.0) veröffentlicht, die prinzipiell eine kommerzielle Nutzung erlauben. Dies ermöglicht auch z.B. die Integration der SOILAssist-Ergebnisse in Software-umgebungen von Landmaschinenherstellern und Anbietern von Farm Management Software. Somit können sie einen Wettbewerbsvorteil durch Maximierung des Bodenschutzes und Optimierung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und Verarbeitung mit daraus resultierenden monetären Vorteilen generieren.

Das SOILAssist Sensor System (SASS) kann auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen für eine Vielzahl weiterer Zwecke eingesetzt werden, z.B. dynamisches Wiegen von Fahrzeugen während der Ernte, Erntesteuerung, Ertragskartierung, Hangstabilisierung von schweren Maschinen etc. Es kann einen Wettbewerbsvorteil für die Herstellenden mit daraus resultierenden monetären Vorteilen generieren. Außerdem können die fortschrittlichen Sensoren für weitere landwirtschaftliche Forschungszwecke genutzt werden.

Die entwickelten Optimierungswerkzeuge für die landwirtschaftlichen Verfahren können für alle Bereiche der landwirtschaftlichen Produktion angewendet werden, um Verarbeitungsketten und Maschinenspezifikationen zu optimieren und somit zu einem verbesserten bodenschonenden Verkehr auf Ackerflächen beizutragen. Darüber hinaus kann es für den landwirtschaftlichen Transport und zur Optimierung von Fabrik- und Verarbeitungskapazitäten erweitert werden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die vom DFKI für die OBAS entwickelten Softwarekomponenten wurden unter Open-Source-Lizenzen veröffentlicht. Dies ermöglicht es nicht nur dem DFKI selber, sondern auch externen Forschern und Entwicklern, die entwickelten Komponenten zu nutzen, zu verbessern und zu erweitern, und die Ergebnisse von SOILAssist in der zukünftigen Forschung zu verwenden.

Die in SOILAssist entwickelten Modelle (FiTraM, FiTIM, SaSCiA, SDiF) werden in wissenschaftlichen Kreisen bereits wahrgenommen und zitiert. Sie können weiterhin für eine Vielzahl von Zwecken in der Boden- und Landnutzungsforschung und für weitere Modellierungsfragen eingesetzt werden. Die Entscheidungsmatrix Befahrbarkeit (DMT) unterstützt Landwirt*innen, Lohnunternehmen etc. bei der mittel- und langfristigen Planung von

bodenschonenden Maßnahmen, Investitionen und Einsatzzeiten von Maschinen. Die DMT lässt eine Einschätzung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Maschinen und Techniken hinsichtlich mechanischer Bodenbelastung zu und kann daher auch in der landwirtschaftlichen Ausbildung, universitären Lehre und in weiteren wissenschaftlichen Projekten eingesetzt werden.

Die erzielten Ergebnisse wurden und werden in die universitäre Lehre integriert. Dies geschieht durch die Projektpartner CAU und UOS, die als Universitäten mit der Lehre beauftragt sind, wie auch durch Thünen-AT, Thünen-SSB und DFKI, die eine enge Anbindung an die universitäre Ausbildung u. a. in Form von Lehraufträgen haben. Damit ist gewährleistet, dass auch die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse an die Studierenden weitergegeben werden.

Die Analysen und Ergebnisse von SOILAssist, ebenso wie die Umsetzungs- und Optimierungsstrategien, werden fortlaufend auf regionalen, nationalen und internationalen Konferenzen, Tagungen und Workshops präsentiert und gemeinsam mit dem Fachpublikum diskutiert. Weiterhin wurden die Ergebnisse in Form von Beiträgen in landwirtschaftlichen Fachzeitschriften, internationalen Journals, Konferenzproceedings und wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen und Werkzeuge können in der aktuellen landwirtschaftlichen Beratung, Ausbildung und Lehre etabliert werden, um den Informationsfluss über bodenschonende Landbewirtschaftung und Bewirtschaftungsstrategien in Wissenschaft und Praxis zu fördern. ‚Best-practice'-Beispiele zeigen dabei das Potenzial eines Transfers in die Praxis und einer Umsetzung von Optimierungsstrategien in der Praxis auf. Sie können darüber hinaus Landwirten*innen helfen, ihr bisheriges Management und ihre Anbaustrategie unter diesen Gesichtspunkten neu zu bewerten und ggf. neue Ansätze zu integrieren.

Die regionsdifferenzierte Identifikation von Synergien von Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtung mit dem Schutz weiterer Ressourcen/Umweltgüter bildet die wissenschaftliche Grundlage für die Politikberatung hinsichtlich Wirksamkeit und Anreizsetzung dieser Maßnahmen. Darüber hinaus werden die von allen Projektpartnern erarbeiteten Handlungsempfehlungen und Werkzeuge der Politikberatung zur Verfügung gestellt. Die gewonnenen Ergebnisse fließen über das Thünen-Institut (Thünen-AT, Thünen-SSB) direkt in die Politikberatung mit ein.

Die im Zuge der Projektlaufzeit generierten Daten wurden in einer gemeinsamen Projektdatenbank gespeichert. Darüber hinaus wurden durch die Projektpartner*innen zusammengestellte Datensätze regelmäßig im BonaRes Repository hochgeladen. Neben einer weiteren langfristigen Sicherung der Daten, weit über die Projektlaufzeit hinaus kann hierdurch auch eine Weiternutzung der Daten durch andere Forschungsvorhaben gesichert werden.

Die Ergebnisse können auch in laufende und zukünftige Forschungsprojekte der Partner integriert werden. So ist das DFKI Niedersachsen (Forschungsbereich PBR) derzeit Partner in mehreren öffentlich geförderten Projekten, in denen die Ergebnisse von SOILAssist integriert, genutzt und erweitert werden können, z.B. LALWeco (BMBF) und AI-Test-Field (BMEL).

Die erzielten Ergebnisse wurden weiterhin mit dem BonaRes-Zentrum (Modul B) ausgetauscht und sind damit in BonaRes nutzbar und können im Gesamtvorhaben BonaRes mit Ergebnissen anderer Forschungsverbünde verknüpft werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Der Agrarsektor gehört national, europäisch und international aktuell zu den prominentesten Anwendungsbereichen in der anwendungsorientierten Forschung zu Automatisierungstechniken, wie z.B. automatische Lenksysteme, Parallelfahrsysteme oder autonome mobile Roboter.

Laufende und zukünftige Projekte der Partner, an denen auch Unternehmen aus dem Agrarsektor beteiligt sind, können von den Ergebnissen von SOILAssist profitieren. So wurde in den letzten Jahren das ZLA - Zukunftslabor Agrar (MWK) gegründet, bei dem DFKI und UOS als Partner eine wichtige Rolle spielen. Das DFKI ist auch an aktuellen Forschungsprojekten beteiligt (z.B. AI-Test-Field, LALWeco), an denen auch Unternehmen der Agrarwirtschaft als Partner beteiligt sind (u.a. Krone, LEMKEN, sowie das DFKI Spin-Off Nature Robots), und schlägt damit eine Brücke zwischen Forschung und Industrie. Außerdem sind das DFKI und die Universität Osnabrück Mitglieder des Agrotech Valley Forums, dessen Ziel es ist, die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen zu fördern und Verbindungen zwischen der Landwirtschaft und den vor- und nachgelagerten Industrien sowie anderen Wirtschafts- und Forschungsbereichen herzustellen. Mehrere regionale Unternehmen sind ebenfalls Mitglieder des Agrotech Valley Forums, darunter Amazone, Grimme, Krone, Kotte und CLAAS.

In diesem Zusammenhang ergeben sich hervorragende Möglichkeiten, die Ergebnisse von SOILAssist mit angrenzenden Bereichen der wissenschaftlichen Grundlagenforschung, z.B. Robotik, Informatik, Bodenkunde, Pflanzenbau, Landmaschinenbau, sowie mit Unternehmen der Landmaschinentechnik und angrenzenden Branchen zu verknüpfen. Damit wird der Wissenstransfer in das Projekt hinein und aus dem Projekt heraus sichergestellt, sowie die langfristige und nachhaltige Nutzung der Projektergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft. SOILAssist sichert den Transfer der Empfehlungen und Ergebnisse in die Politikberatung, die landwirtschaftliche Aus- und Weiterbildung. Durch die Anbindung der Projektpartner an die universitäre Ausbildung (Thünen-AT, CAU, UOS und DFKI) ist gesichert, dass die Projektergebnisse in die universitäre Ausbildung und Lehre einfließen.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Aus Sicht der Informatik wurde bei der Umsetzung und Realisierung des On-Board-Assistenzsystems auf State-of-the-art-Technologien gesetzt, die sich im Berichtszeitraum weiterhin als Standards etabliert haben. Forschung im Bereich der Routenplanung in landwirtschaftlichen Prozessen wurde während der Projektlaufzeit fortgesetzt, aber (unseres Wissens nach) wurden keine neuen Entwicklungen veröffentlicht, die alle Anforderungen, Spezifikationen und Ziele von SOILAssist3 abdecken.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5

Augustin, K., **Focke Martinez, S.**, Duttmann, R., **Hertzberg, J.**, Kuhwald, M. (2023): Effects of varying field geometry and machine configurations on spatial field traffic intensity: a case study for winter wheat harvest. Soil Use and Management. 39(1), pp. 232-248.

Focke Martinez, S., **Hertzberg, J.** (2022): Route-planning in output-material-flow arable farming operations aiming for soil protection, in 42. GIL-Jahrestagung, Künstliche Intelligenz in der Agrar- und Ernährungswirtschaft. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V.. PISSN: 1617-5468. ISBN: 978-3-88579-711-1. pp. 93-98. Tänikon, Online.

Focke Martinez, S., **Hertzberg, J.** (2023): Route-planning in output-material-flow operations using side-headlands, in 43. GIL-Jahrestagung, Resiliente Agri-Food-Systeme. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V.. PISSN: 1617-5468. ISBN: 978-3-88579-724-1. pp. 315-320. Osnabrück.

Focke Martinez, S., Ihorst, I. (2024): Towards on-line monitoring and route re-planning in arable crop harvest, in 44. GIL - Jahrestagung, Biodiversität fördern durch digitale Landwirtschaft. DOI: 10.18420/giljt2024_31. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V.. PISSN: 1617-5468. ISBN: 978-3-88579-738-8. pp. 35-46. Stuttgart.