

Veröffentlichung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben im BMBF-Programm

BonaRes (Modul A) : I4S - Integriertes System zum ortsspezifischen Management der Bodenfruchtbarkeit, Teilprojekt E: Modellierung von Pflanzenwachstum und Stoffumsatz auf Dauerversuchsflächen mit Boden- und Pflanzensensorik

Teil I Kurzbericht

Förderkennzeichen: 031B1069E

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität München, 80290 München

Ausführende Stelle:

Technische Universität München - Wissenschaftszentrum Weihenstephan - Forschungsdepartment für Pflanzenwissenschaften - Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme 85350 Freising

Projektleitung:

Dr. Kurt Heil

Projektlaufzeit:

01.03.2022 bis 31.05.2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe dieses Projektes ist die Beschreibung, Klassifizierung und flächenhafte Darstellung landwirtschaftlicher Flächen mittels unterschiedlicher bodensensorischer Methoden. Ausgangspunkt ist dabei eine Flächenrauminventur, die wiederum Grundlage für viele Planungen und Entscheidungen ist. Zentral ist dabei der Begriff „Standort“. Dieser wird beschrieben durch die Standortmerkmale, Boden, Relief und Witterung. Der Standort umfasst als ökologische Integrationseinheit die Gesamtheit der an einem Wuchsort auf Pflanzen einwirkenden Umweltbedingungen.

Ziele des Teilprojektes „Modellierung von Pflanzenwachstum und Stoffumsatz (i.W. Wasser, N, C) auf Dauerversuchsflächen mit Boden- und Pflanzensensorik sind:

- Erfassung von Bodenparametern, die für das Pflanzenwachstum am Untersuchungsstandort wichtig sind.
- Einsatz von Sensoren zur vereinfachten flächigen Herleitung von Wachstumsparametern.
- Modellierung der standortsbezogenen Erträge mit gemessenen als auch sensorisch erfassten Parametern.

Die erste Projektphase war charakterisiert durch die Primärdatengewinnung. Diese erhobenen Daten wurden der Datenbank zugeführt. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Datensammlung sind die Grundlage für die zweite Phase dieses Projektes. In dieser Phase wurden alle wesentlichen Messungen durchgeführt und Auswertungen realisiert. In der zuletzt durchgeführten finalen Phase erfolgten weitere Berechnungen, welche z.T. auch Verbesserungen vorhergehender Ableitungen inkludierten.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Durch den Einsatz lehrstuhleigener Geräte als auch durch die Entwicklung eigener Algorithmen konnten punktweise Bodenparameter hergeleitet werden (Heil und Schmidhalter, 2021). Die Zusammenarbeit erstreckt sich auf (i) Messungen auf den Flächen der Partner (Dürnast, Görzig, Müncheberg). (ii) Dabei kommen die Sensoren zum Einsatz, welche vor Ort nicht vorliegen (GammaSpectrometer UB in Dürnast) sowie (iii) gemeinsame Auswertungen (C und N Görzig durch TUM). Im Laufe der Jahre hat sich eine intensive Basis entwickelt, welche auch den Austausch von Auswertungsmethoden beinhaltet (TUM liefert Algorithmen an ZALF, TUM übernimmt Umrechnungsmodul von ATB).

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und auch die Durchführung dieses Teilprojektes lassen sich in folgende Hauptpunkte gliedern, die sich auch in der Gliederung der Arbeitspakete finden:

- i) Einsatz von Bodensensoren vis-NIRS, Elektromagnetik; Eindringwiderstand;
- ii) Bodenkundliche Inventur;
- iii) Zeitreihenmessung von Wassergehalten;
- iv) Modellierung der Erträge und Modellierung der Wasserflüsse, sowie hauptsächlich C und N.

Die inhaltlichen Schwerpunkte in den APs lauten wie folgt:

C1-1 TUM Beitrag zu Koordination und Öffentlichkeitsarbeit: Innerhalb des Verbundes I4S bestand vor allem mit den direkten Partnern ein sehr enger Kontakt. Austausch von Ergebnissen und gemeinsame Auswertung standen im Mittelpunkt.

C1-2 TUM Beitrag für die gemeinsame Projektdatenbank: Über die verbundinterne Cloud wurden Daten und Auswertungen weiterhin zur Verfügung gestellt.

C2-14 bis 16 TUM. Messung mit vis-NIRS- und elektromagnetischen Systemen: Innerhalb des Verbundes

wurden Testkampagnen auf landwirtschaftlichen Versuchsschlägen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Sensoren eingesetzt.

C4-1 bis 5 TUM Zentraler Punkt war hier die Modellierung von Nährstoffen, Wasser, Humus und Ertrag:

Die Messungen auf dem Dauerversuch wurden bis Ende 2023 weitergeführt. Es wurden bei der Modellierung sowohl statistische Modellierungen als auch prozessbasierte Modellierungen genutzt. Letztere wurde mit einem angepassten Programm DAISY durchgeführt. Inzwischen wurde die ursprüngliche Modellierung überarbeitet und damit konnte eine bessere Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Daten erreicht werden.

C5-2, 4 und 6 TUM Düngungsalgorithmen. Zur Erstellung von Düngungsalgorithmen wurden Daten der Dauerversuchsfläche Dürnast 020 zur Verfügung gestellt und erste Berechnungen durchgeführt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

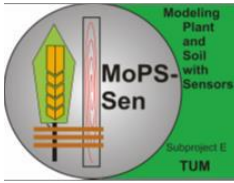
Optimale Nutzung der Ressource Standort: Dieser Punkt beinhaltet das Farming Management-Konzept „Precision Agriculture“. Die Erfassung der standörtlichen Gegebenheiten und dabei besonders des Bodens ist das Ziel des I4S-Verbundes. Bodenfruchtbarkeitsparameter können z.T. ein beträchtliches raumzeitliches Muster aufweisen. Daraus lässt sich wiederum ableiten, dass feldeinheitliche landwirtschaftliche Eingriffe u.U. nicht nur das Potenzial eines Feldes nicht optimal nutzen, sondern auch zu verstärkten Umweltbelastungen führen können.

Nahbereichs-Bodensensorik: Diese Sensorik wurde vor inzwischen nahezu 30 Jahren von elektromagnetischen Sensoren etabliert. So gehört bis heute das EM38 zu den am häufigsten eingesetzten Detektoren für bestimmte Bodenparameter (Wassergehalt, Tongehalt, Leitfähigkeit der Bodenlösung) (Heil und Schmidhalter, 2015; Heil und Schmidhalter, 2017). Die am häufigsten eingesetzte Methodik ist aber die Reflektionsmessung mittels vis-NIR Sensoren.

Modellierung: Verwendung finden in den Land- und Forstwirtschaft hauptsächlich statistische Modelle sowie prozessbasierte Grey-Box-Modelle. Während erstere lediglich Input- und Output Daten in Zusammenhang bringen ohne dass ein interpretierbarer Zusammenhang bestehen muss, werden bei den Grey-Box-Modellen zumindest Prozesse tatsächlich beschrieben, wie z.B. Verdunstung. VDLUFA-Modelle leiten z.B. aus Bodenparametern bestimmte wünschenswerte Bodenzustände her. Komplexere Modelle finden hingegen kaum Anwendung. Dies mag zumindest z.T. daran hängen, dass eine Vielzahl von Eingangsparametern erforderlich ist. Dieser Flaschenhals ist der Ansatzpunkt für den Einsatz und die Entwicklung von Bodensensoren. Diese Bodensensoren werden zusätzliche Informationen liefern und damit die Entwicklung von Boden- und Pflanzenmodellen fördern.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Kooperationen gab es hauptsächlich in Form von Datenaustausch und Ergebnisdarstellungen bei den Verbundtreffen (Bewertung der zu testenden Modellalgorithmen). Innerhalb des Lehrstuhls bestand eine sehr intensive Verbindung mit anderen Projekten im Bereich der Biomassesensorik (DFG-Vorhaben PhenoWheat; BLE-Vorhaben GreenWindows) und des BonaRes- Verbundes InnoSoilPhos. Neuerdings ist noch das BLE-Projekt DigiMan als Partner hinzugekommen. Hier werden die Kenntnisse und Modellierungen direkt eingebracht. Außerhalb des Verbundvorhabens stand die Zusammenarbeit mit dem BonaRes-Zentrum im Vordergrund.



Veröffentlichung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben im BMBF-Programm

BonaRes (Modul A) : I4S - Integriertes System zum ortsspezifischen Management der Bodenfruchtbarkeit, Teilprojekt E: Modellierung von Pflanzenwachstum und Stoffumsatz auf Dauerversuchsflächen mit Boden- und Pflanzensensorik

Teil II Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 031B1069E

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität München, 80290 München

Ausführende Stelle:

Technische Universität München - Wissenschaftszentrum Weihenstephan - Forschungsdepartment für Pflanzenwissenschaften - Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme 85350 Freising

Projektleitung:

Dr. Kurt Heil

Projektlaufzeit:

01.03.2022 bis 31.05.2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

II. Eingehende Darstellung des Projekts

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die nachfolgenden Abschnitte beinhalten die Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufgabenstellung.

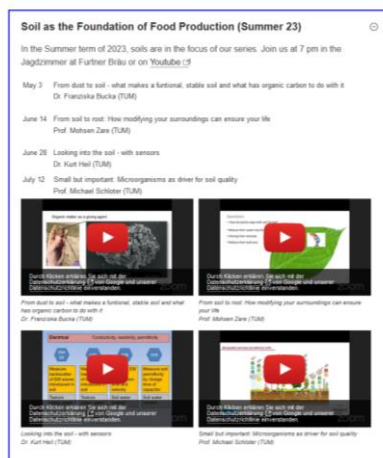
C1-1 TUM Beitrag zu Koordination und Öffentlichkeitsarbeit

Ziele: Mitwirkung im Bereich der Koordination hinsichtlich der Organisation von Projekttreffen, Feldversuchen und Testkampagnen; Veröffentlichung und Präsentation der Ergebnisse

Ergebnisse: Den Partnern wurden die Daten der Feldversuche zur Verfügung gestellt und laufend aktualisiert.

Innerhalb dieses Teilprojektes wurden im Berichtszeitraum eine vergleichsweise große Zahl an Präsentationen (Vorträge, Poster, Messe) vom Verfasser durchgeführt (lokal und auch international):

- 14. und 15.03. 2022 BonaRes Statusseminar online Vortrag “Final integration of sensors, models and decision support system”;
- 11.11.2022 Vortrag im Rahmen des DBG-GPW-Workshops „Modellierung von Fruchtfolgen“ mit dem Titel „Modellierung einer Fruchtfolge mit drei N-Düngestufen“;
- 16. und 17.11. 2022 I4S Projekttreffen UH organisiert;
- Vortrag BonaRes “Thematic Nitrogen Workshop” 19.-21.04.2023, Garmisch-Partenkirchen: Modeling of a crop rotation with the model DAISY;
- Vortrag im Rahmen „AgScience on Tape“ TUM, 28.04.2023: Looking into the soils – with Sensors;



- Farm Vision Day TUM School of Life Sciences auf dem Campus Freising, eigener Stand mit Präsentation verschiedener Bodensensoren der TUM, Ergebnisse auf Postern; 06.05.2023;
- Posterpräsentation Konferenz BonaRes, Berlin, In-Situ Estimation of Upper Soil Properties Using a Multi-Sensor Probe , 15.-17.05.2023;

- Posterpräsentation Conference ECPA, Bologna, 02.-06.06.2023, Application of precision farming technologies in organic farming, Mittermayer, Heil, Schuster, Hagn, Hülsbergen;
- Bayer. Rundfunk, Fernsehaufzeichnung Juli 2023, zum Thema Digitalisierung in der Landwirtschaft; vorgestellt wurden hier der Bodensensor Veris P4000; Sendung „Unser Land“;
- Posterpräsentation Tagung Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 02.-08.09.2023, Halle/Saale: Modellierung einer Fruchtfolge mit drei N-Düngestufen im Lysimeter-Versuch Dürnast mit dem SVAT-Modell DAISY;
- Projekttreffen I4S in Freising 01. und 02.10.2023, Organisation durch Verfasser;
- Agritechnica Hannover, 12.-18.11.2023, Betreuung durch TUM (Heil) zusammen mit Hahn-Schickard (erste 3 Tage); auf dem von der TUM (Weihenstephan, TUM School of Life Sciences) finanzierten Stand wurden nur Geräte (ATB, Hahn-Schickard, TUM) des Verbundes I4S ausgestellt (Abbildung. 1);



Abbildung .1: Ausstellungsstand TUM mit Objekten I4S

- Presentation auf ICPA 21.07.-24.07.2024 Manhattan/Kansas: Poster: Detailed derivation of spatial soil attributes using soil sensor data, terrain analysis and soil maps with random forest classification.

C1-2 TUM Beitrag für die gemeinsame Projektdatenbank

Der Großteil der Daten für das BonaRes-Datencenter wurden bereits 2022 eingereicht. Die Veröffentlichung von Erträgen und Managementmaßnahmen, (Bodenbearbeitung, Aussaat, Ernte, Pestizideinsatz, Düngung) ist inzwischen erfolgt. Z. Zt. fehlen noch einige C- und N-Analysenwerte.

Regelungsbedarf gibt es allerdings noch bei Altdaten (vor BonaRes) wegen Embargo-Festlegungen.

C2-14 bis 16 TUM. Messung mit vis-NIRS- und elektromagnetischen Systemen.

In diesem Kapitel werden die AP's 14 bis 16 zusammen dargestellt, da zu deren Herleitung die gleichen Sensorsysteme und auch Methoden verwendet wurden. Ab 2020 wurde verstärkt das Veris P4000 auf Flächen der TU München und der Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft eingesetzt.

Ein solches Multisensorsystem bietet die Möglichkeit gleichzeitig mehrere Bodenparameter zu messen. Die Veris P4000-Sonde (Abbildung 2) verfügt über eine Halogenlichtquelle mit Saphirfenster und ein Spektrometer zur

Erfassung von NIR-Absorptionsprofilspektren (d. h. $\log_{10}[1/\text{Reflexion}]$) (830-2581 nm), Dipolkontakte für die Erfassung von ECa-Daten (mS m^{-1}) und eine Kraftmesszelle zur Quantifizierung des Cone-Index (CI) (kPa) durch Messung des Eindringwiderstandes an der konischen Spitze der Sonde. Tiefe, ECa, CI und Spektren werden gleichzeitig bis zu einer Tiefe von ~ 1 m gemessen (Abbildung 2). Aus den genannten Parametern werden durch Referenzmessungen Corg- und N-Gehalte, Lagerungsdichte sowie die Textur abgeleitet.

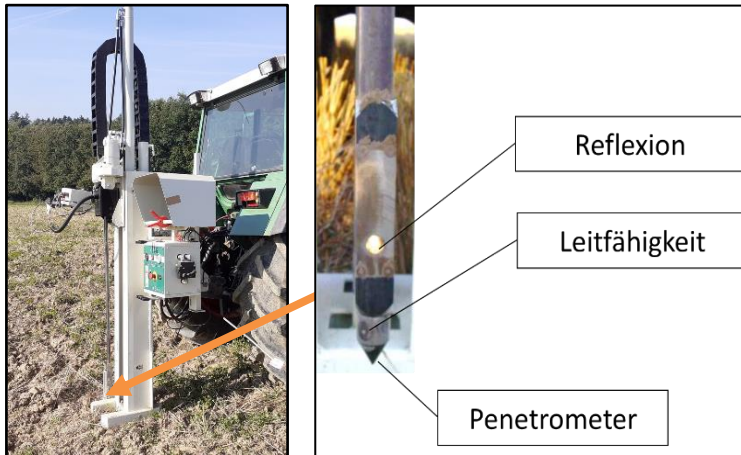


Abbildung 2: Veris P4000 angebaut an Schlepper und Detailkonstruktion des Sensorkopfes

Messungen von Corg, Nt, ECa sowie Eindringwiderstand auf Feldebene sind entscheidend für die Entwicklung und Bewertung von Bewirtschaftungsmethoden. Konkret lautet die Frage wie verschiedene Standorte innerhalb eines Feldes auf Behandlungen reagieren. Da außerdem unterschiedliche Managementmaßnahmen den Bodenzustand an bestimmten Stellen im Bodenprofil beeinflussen, müssen die Schwankungen innerhalb eines Profils quantifiziert werden. Diese Messungen stehen in direktem Zusammenhang mit den Meilensteinen „Modellierung“ und „Bodenfunktionen“. Labormessungen sind zwar sehr genau aber für solche Bewertungen zu arbeitsintensiv.

Mit dem Einsatz des Veris P4000 lassen sich solche Fragen beantworten. Die bisherigen Auswertungen haben allerdings einen hohen Zeitbedarf für die Datenbehandlung aufgezeigt. Hier gibt es nach wie vor Handlungsbedarf. Sind bei den Spektraldaten die Kalibrierungen durchgeführt, müssen die Einzelscans auf Fehler untersucht werden. Fehlmessungen werden verursacht durch grüne Pflanzenteile, Stroh und Steine. Dies wird bei den ersten beiden Fehlerquellen durch Spektralindizes (NDVI) durchgeführt. In einem nächsten Schritt müssen die Einzelscans mittels Medianberechnung zusammengefasst werden. Insgesamt ist hier eine Automatisierung erforderlich.

Abbildung 3 zeigt eine Transsekte mit Tiefenprofilen von ECa- und CI-Messungen. Bei den letztgenannten Werten ist die Pflugsohle unterhalb des Ap-Horizontes meist gut erkennbar. Nur bei Messungen die nicht bis 100 cm Tiefe durchgeführt werden konnten, lassen sich keine klaren Verdichtungen erkennen. Durch Steinansammlungen (Tertiäres Schotter-Molasse-Material) mussten zur Vermeidung von Geräteschäden die Erhebungen gestoppt werden.

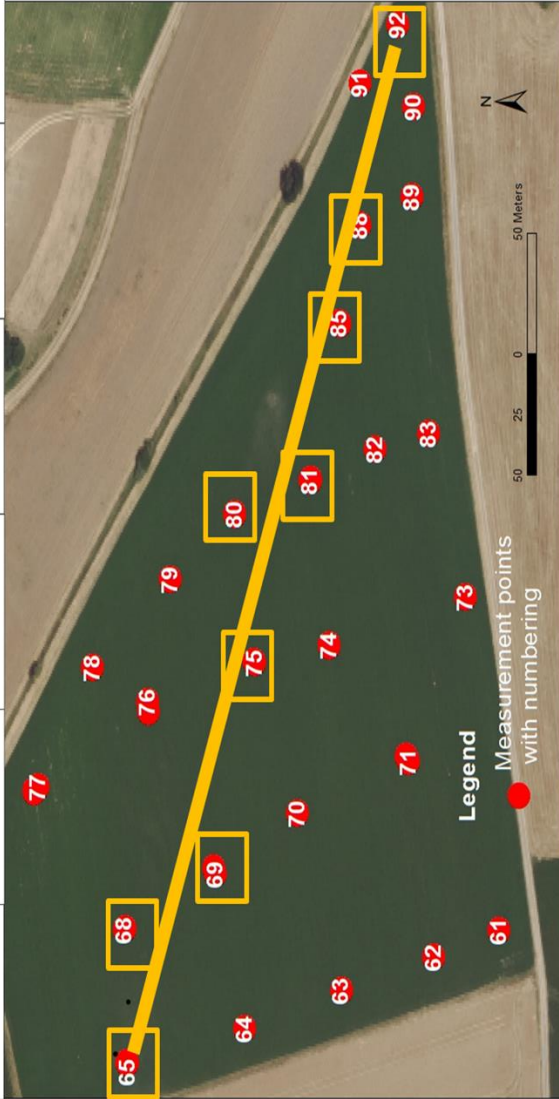
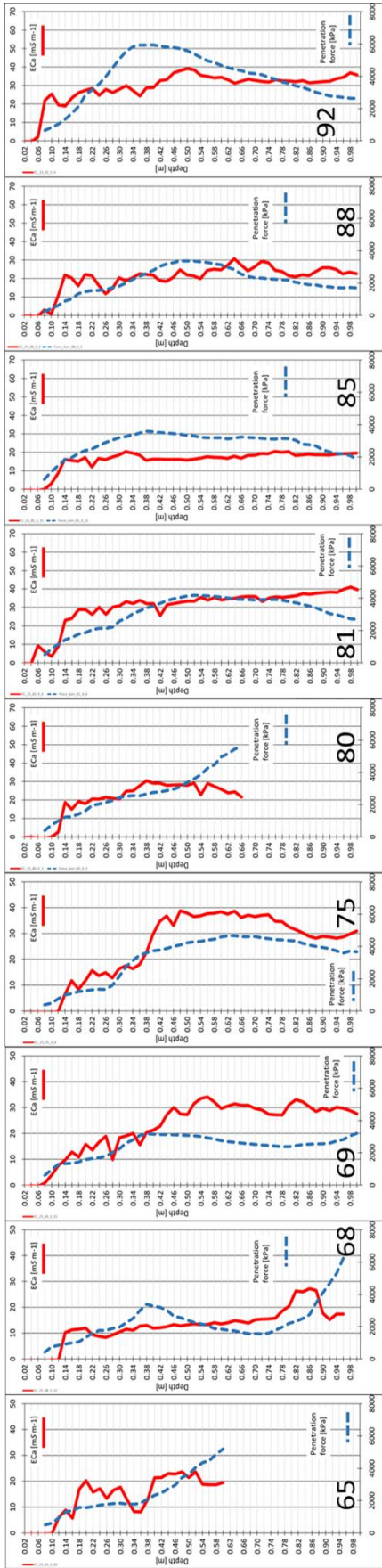


Abbildung 3: Tiefenmessungen der Parameter ECa und Eindringwiderstand (CI) auf einer Transekte der Fläche VH5 Viehhausen

Tabelle 1 zeigt die Ableitung von Bodenparametern und des Ertrags aus den Insitu-Messungen mit dem Multibodensensor Veris P4000. Bei den Bodeneigenschaften lieferte die Anwendung der Absorptionsspektren für die Parameter Corg, Ct und N gute Ergebnisse. Die Variablen C/N, P, pH und K konnten jedoch nur mit geringerer Genauigkeit der Kalibrierung und Validierung reproduziert werden. Die Abstufung innerhalb dieser beiden Gruppen entspricht den in der Literatur beschriebenen Ergebnissen (Heil und Schmidhalter 2021).

Tabelle 1: Berechnungen mit PLSR der Bodenparameter Corg, Ct, N, C/N, pH, P, K und Ertrag

Independent variables: Absorption [%/100]	Soil property	Absorption			
		Calibration		Validation	
		r	RMSE	r	RMSEP
	Corg	0.89	0.10	0.87	1.17
	C _t	0.91	0.11	0.92	1.18
	N	0.87	0.01	0.87	0.37
	C/N	0.71	0.25	0.57	0.90
	pH	0.81	0.16	0.66	0.31
	P _{cal}	0.53	1.59	0.67	1.57
	K _{cal}	0.60	3.11	0.10	4.32
	Yield	Absorption			
		Calibration		Validation	
		r	RMSE	r	RMSEP
	Soja 2020 combine harvester	no valid model		no valid model	
	Winter wheat 2021 combine harvester (1/yield)	0.73	0.03	0.66	0.04
	Winter wheat 2021 satellite	no valid model		no valid model	
Independent variables: Absorption [%/100], Longitude + latitude + EC _a + CI	Soja 2020 combine harvester (yield ²) Selected variables: Absorption, 1/longitude, 1/CI	0.59	3.58	0.59	7.04
	Winter wheat 2021 combine harvester (1/yield) Selected variables: Absorption, 1/longitude	0.72	0.03	0.69	0.04
	Winter wheat 2021 satellite Selected variables: -	no valid model		no valid model	
Independent variables: Absorption [%/100], Longitude + latitude + EC _a + CI + Corg + Ct + N + P _{cal} + K _{cal}	Soja 2020 combine harvester (1/yield) Selected variables: Absorption, latitude ³ , Corg	0.79	0.02	0.82	0.02
	Winter wheat 2021 combine harvester (yield ³) Selected variables: Absorption	0.73	42.74	0.56	51.42
	Winter wheat 2021 satellite Selected variables: -	no valid model		no valid model	

Longitude , latitude [m], CI [kPa], EC_a [mS m⁻¹], Corg [%], N[%], P_{cal} [%], K_{cal} [%], yield [t ha⁻¹]

Die Ableitungen der Ertragswerte lieferten ein unklares Bild. Nur der "Winterweizen 2021 Mährescher" zeigte einen Zusammenhang mit den Absorptionsspektren des Oberbodens. Die anderen Berechnungen ergaben keine gültigen Modelle. Die weiteren Ableitungen mit dem Einfügen der anderen Sensorparameter ECa und CI sowie der Koordinaten der Messpunkte lieferten zusätzliche Erklärungsbeiträge. Die Koordinate "Längengrad" und der CI erhöhten die Ergebnisse der Erträge "Soja 2020" auf r von 0,59. Bei "Winterweizen 2020 Mährescher" erhöhte sich das r der Kalibrierung trotz Einbeziehung der Koordinate "Längengrad" nicht. Die Validierungsregression ergab jedoch ein höheres r. Die Hinzunahme der chemischen Bodenparameter zu den aufgelisteten Variablen führte nur im Fall von Soja 2020 zu einer Verbesserung der Genauigkeit. Die Variable Corg war hier wesentlich. Beide Erhöhungen der unabhängigen Variablen lieferten keine gültigen Modelle für den Winterweizen 2021 Satelliten.

Bei einer weiteren Auswertung sollte die Bedeutung der Bodenverdichtung für den Ertrag nach mehrjährigem Maisanbau herausgearbeitet werden. Hierfür wurde innerhalb dieses Teilprojektes eine Methode entwickelt, die aus zwei besonderen Vorgehensweisen besteht :

(i) Neben den Messwerten (ECa und CI mit dem Veris-Gerät und den Analysen von Corg und Nt wurden weitere Variablen als Prädiktoren eingefügt (Reliefdaten, Bodenschätzung, Koordinaten, Übersichtsbodenkarte).

Höhenrasterdaten von ca. 100 ha des Gebietes mit einer Rasterweite von 1 m wurden vom Landesamt für Digitalisierung, Internet und Vermessung (München) bezogen. Weitere **topographische Parameter** wurden mit dem Softwarepaket System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA2) der Scilands GmbH Göttingen, (www.scilands.de) berechnet. Neben der Höhenlage wurden die in Tab. 2 aufgeführten Parameter als unabhängige Variablen in den statistischen Ableitungen verwendet. Die Aufstellung beinhaltet neben Punktinformationen (Höhe, Neigung, Ausrichtung) auch linien- und flächenbezogene Daten. Linienbezogene Informationen sind Hanglänge, Höhenlinie, Tal Linie und Fließlinie. Flächenbezogene Daten sind Einzugsgebiet, Konvergenz, Höhendifferenz, Feuchtigkeitsindizes (TWI) und Sonneneinstrahlung,

Tabelle 2: Topographie-Parameter, die in den Berechnungen zur Ableitung des Ertrags/Bodenparameter verwendet werden

	Topographic parameter		Steps in SAGA to derive parameters	Abbreviation	Unit
1a	Elevation	Elevation		EL	[m]
1b		Slope Heights	Morpho_rel height	SLP_HGT	[m]
1c		Normalized Heights	Morpho_rel height	NRM_HGT	[-]
1d		Standardized Heights	Morpho_rel height	STD_HGT	[-]
1e		Maximum Height	Hydro_TopInd_Ruggeedness	M_HGT	[m]
1f		Mid-Slope Position	Morpho_rel height	MSL_Po	[-]
2a	Slope		Morph_Slop_Asp_Curv	SLO	[rad]
2b	Catchment Slope		Hydro_TopInd_SAGA	CA_S	
2c	Slope Length		Hydro_Misscell	SL	
3	Aspect		Morph_Slop_Asp_Curv	ASP	[rad]
4a	Valley Depth	Valley Depth (Channels)	Channel_Valey depth	VLDPT_C	[m]

4b		Valley Depth (Relative Height and Slope Position)	Morpho_rel height	VLDPT_RD	[m]
5	Ridge Level		Channel_Valey depth	RL	[-]
6a	Flow Accumulation	Flow Accumulation One Step	Hydro_Hydro_Flow Acc_Flow Acc one step	FA_OS	[-]
6b		Flow Accumulation Mass-flux method	Hydro_FlowAcc_Alternat_Mass	FA_MF	[-]
7a	Classification Curvature	General Curvature	Morph_Slop_Asp_Curv	CUR_G	[-]
7b		Profile Curvature	Morph_Slop_Asp_Curv	CUR_PR	[-]
7c		Plan Curvature	Morph_Slop_Asp_Curv	CUR_PL	[-]
7d		Flow Line Curvature	Morph_Slop_Asp_Curv	CUR_FL	[-]
7e		Curvature Classification	Terrain Classification	CUR_C	[-]
7f		Local Curvature	Morph_Upslope	CUR_L	[-]
7g		Upslope Curvature	Morph_Upslope	CUR_U	[-]
7h		Local Upslope Curvature	Morph_Upslope	CUR_LU	[-]
7i		Downslope Curvature	Morph_Upslope	CUR_D	[-]
7j		Local Downslope curvature	Morph_Upslope	CUR_LD	[-]
8a	Convergence Index	Convergence Index	Morph	CI	[-]
8b		Convergence Index (Search Radius)	Morph	CI_SR	[-]
9	Diurnal Anisotropic Heating		Climate Weather	DAH	[-]
10	Gradient Difference		Morph_Downslope Distance Gradient	GD	[-]
11	Convexity (Terrain Surface Convexity)		Morpho	CON	[-]
12	Landforms (TPI Based Landform Classification)		Terrain Classification	LAN	[-]
13a	Catchment Area	Catchment Area (Melton Ruggedness Number)	Hydro_TopoInd_Ruggeedness	CA_MRN	[m ²]
13b		Modified Catchment	Hydro_TopoInd_SAGA	CA_M	[m ²]
13c		Specific Catchment Area	Hydro_Hydro_Flow Acc_Flow Acc one step	SCA	[m ²]
13d		SAGA-Catchment Area	Hydro_TopoInd_SAGA	CA_SAGA	[-]

13e		Melton Ruggedness Number	Hydro_TopoInd_Ruggeedness	MRN	[-]
14a	LS Factor	LS Factor	Hydro_TopoInd_LS	LSF	[-]
14b		LS Factor (Field Based)	Hydro_TopoInd_LS_Field based	LSF_FB	[-]
14c		LS Factor (One Step)	Hydro_(One step)_Hydro_TopoGraf_Ind	LSF_OS	[-]
15a	Topographic Wetness Index	SAGA Wetness Index	Hydro_TopoInd_SAGAWet	SAGA_TWI	[-]
15b		Topographic Wetness Index	Hydro_TopoInd_TWI_ohne_Trans m	TWI	[-]
15c		Topographic Wetness Index (One step)		TWI_OS	[-]
16a	Channel Network and Drainage Basins	Flow Direction	Channel Network and Drainage Basins	CN_FD	[-]
16b		Flow Connectivity	Channel Network and Drainage Basins	CN_FC	[-]
16c		Strahler Order-Channels	Channels	CN_SOC	[-]
16d		Channel Network and Drainage Basins	Channel Network and Drainage Basins	CN_SO	[-]
16e		Channel Network	Channel_Channel Network	CN	[-]
17	Sink route		Preprocessing	SR	[-]
18	Fill Sinks			FS	[-]
19	Real Surface Area			RSA	[-]
20	Texture (Terrain Surface Texture)			TEX	[-]
21	Vector Terrain Ruggedness			VTR	[-]

Die **Bodenschätzung** wurde durch eine Klassifizierung der Ergebnisse miteinbezogen (Tab. 3)

Tabelle 3: Klassifizierung Bodenschätzung

Attribut Kurzform	Klassifizierung	Nummerische Klassifizierung	Nominal/ Metrisch
Bodenart Kn1	Sand (S) Anlehmiger Sand (SI) Lehmiger Sand (IS) Stark lehmiger Sand Lehm (L) Sandiger Lehm (sL) Ton (T) Schwerer Lehm (LT)	1 2 3 4 5 6 7 8	Nominal
Zustandsstufe Kn2	allmählicher Übergang der humusreichen Krume zum Untergrund scharfe Grenze zwischen Krume und Untergrund	1 7	Nominal
Entstehungsart Kn3	Alluvium (Löss Diluvium Verwitterungsboden gesteinshaltiger Diluvialboden gesteinshaltiger Diluvialboden gesteinshaltiger Alluvialboden	1 2 3 4 5 6	Nominal

Bodenzahl We1		1-100	Metrisch
Ackerzahl We2		1-100	Metrisch

Die **Koordinaten** der einzelnen Ertragsmessungen wurden mit RTK-GPS bestimmt. Alle anderen Messungen wurden in einem Radius von 2 Metern um die Bodenentnahmepunkte durchgeführt.

Jeder Messpunkt wird durch einen Record dargestellt. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt mit den Formatinputs.

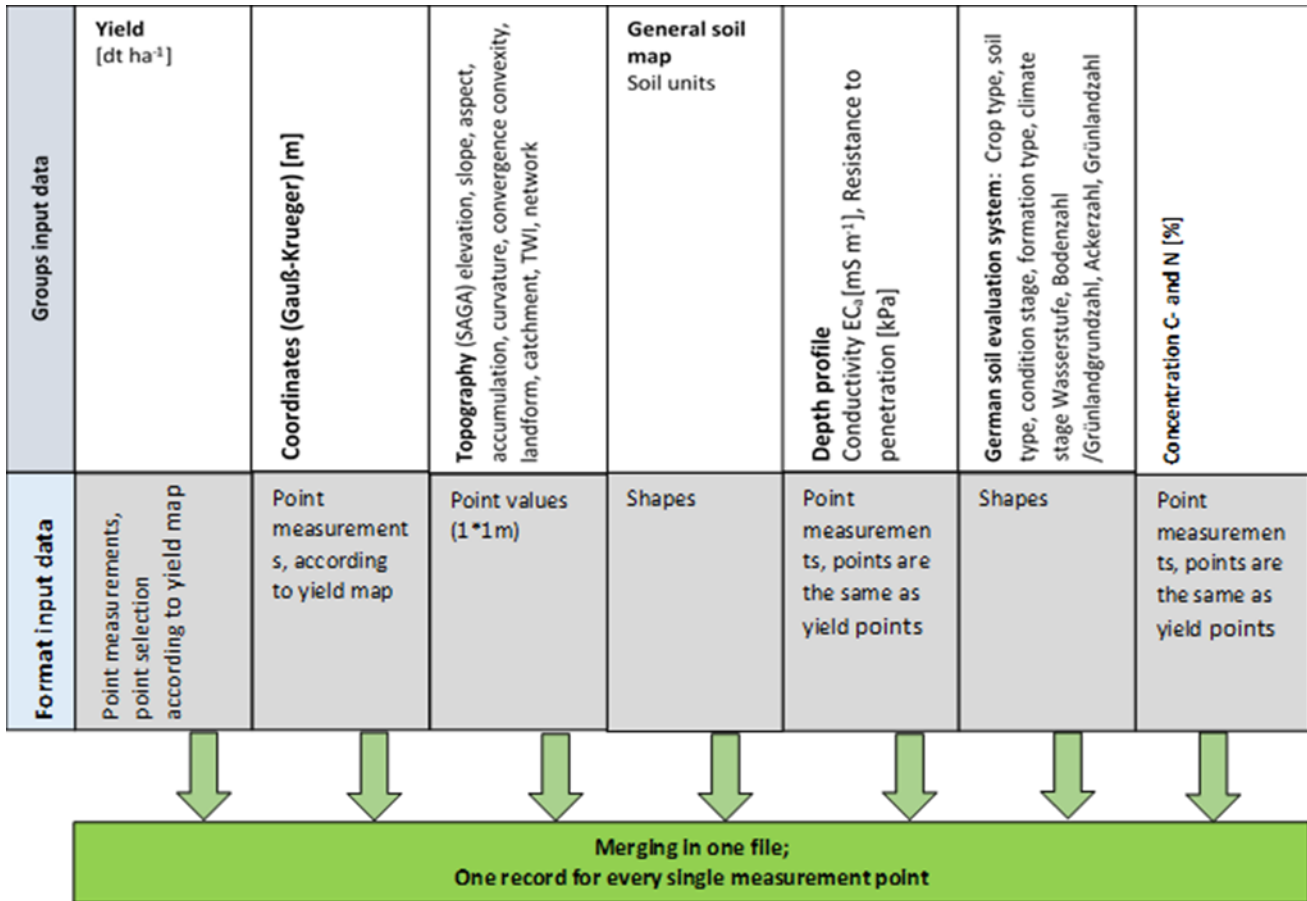


Abbildung 4: Stufen der Datenzusammenstellung zur Berechnung des Ertrages

(ii) Die zweite besondere Vorgehensweise ist die Transformation der numerischen Variablen. Diese werden in ^{^2}, ^{^3}, log10, wurzel und invers überführt. Damit ist gewährleistet, dass auch nicht lineare Beziehungen zwischen der Zielvariable und den Prädiktoren Berücksichtigung finden.

Beide besonderen Vorgehensweisen finden bisher in der landwirtschaftlich orientierten Datenauswertung kaum Berücksichtigung. Allerdings muss auch erwähnt werden, dass zu mindestens in Bayern Höhendaten von dem oben genannten Landesamt erst seit vorletztem Jahr kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Außerdem sind die Ergebnisse der Bodenschätzung erst seit 2024 weitestgehend digitalisiert. Vorher war eine Nutzung nur durch Auslesen von gedruckten Karten möglich.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der beschriebenen Vorgehensweisen zusammengestellt. Auffallend sind die hohen R²-Werte bei den Einzelauswertungen der beiden Flächen. Bei den signifikanten Prädiktoren der VH3 Fläche dominieren die Reliefwerte gefolgt von den CI-Beträgen. Erstere werden bestimmt durch Höhenlage und Fließwege von Wasser (und Boden) (Normalized Heights, Flow Accumulation Mass-flux method, Flow Connectivity). Höhenlage und Massenfluss haben einen ertragsreduzierenden Einfluss. Hingegen hat der Eindringwiderstand in ca. 60 cm Bodentiefe eine eher positive Wirkung auf den Ertrag. Dieser Befund ist im Moment noch unklar. Der Eindringwiderstand direkt unter dem Ap hingegen beeinträchtigt die Ertragshöhe.

Der Schlag VH5 hat eine markante hügelige Ausprägung, während der VH3 weitestgehend einheitlich nach Süden ausgerichtet ist. Auf der erst genannten Fläche lässt sich ein deutlicher Teil der Ertragsvariabilität durch die Übersichtsbodenkarte abbilden. Weiterhin kommen als signifikante Prädiktoren noch Formen der Curvature hinzu. Einen negativen Einfluss weist der Eindringwiderstand direkt unter der Pflugsohle auf. Die Bodenschätzung liefert auch hier keinen signifikanten Erklärungsbeitrag.

Tabelle 4: Modellierung der Erträge mit ECa, CI, Relief, Corg, Nt, Koordinaten, Übersichtsbodenkarte und Bodenschätzung (Fläche VH3 oben, VH5 unten)

Target variable	Predictors	Regression Coefficient	Significance	Standard β -Coefficient	Adj. R ²	VIF	Durbin-Watson
Yield N=27 Winter wheat	Constant	1.649	<0.001		0.866		1.721
	Log10(NRM_HGT	-1.134	<0.001	-0.741		1.058	
	1/FA_MF	-1.619	<0.001	-0.448		1.289	
	Force 55-64cm	2.61E-04	<0.001	0.311		1.154	
	CN_FC ³	0.455	0.009	0.213		1.076	
	1/Force 8-24cm	368.377	0.032	0.18		1.191	

Target variable	Predictors	Regression Coefficient	Significance	Standard β -Coefficient	Adj. R ²	VIF	Durbin-Watson
Yield ² N=26 Triticale	Constant	-1252.028	<0.001		0.94		1.85
	ÜBK	-10.194	<0.001	-0.640		1.13	
	1/RL	637605.696	<0.001	0.506		1.19	
	CUR_L	-502.942	<0.001	-0.753		3.29	
	CUR_G ³	3582172.060	<0.001	0.406		2.58	
	CUR_C ³	0.040586	0.014	0.168		1.61	
	1/Force 36-44cm	-6559.3346	-0.113	0.037		1.004	

Die Ergebnisse dieser AP's bieten neue und umfassende Untersuchungsmöglichkeiten für eine standortkundlich orientierte Landwirtschaft. In diesem Teilprojekt haben sich eine Reihe von Techniken als besonders praktikabel herausgestellt: Leitfähigkeitsmessung mittels induktive Kopplung und galvanische Kopplung sowie Reflexionsspektren und auch Eindringwiderstand. Realisiert werden diesen Messungen mit den Geräten EM38-MK2 und VerisP4000.

Die **Sensorvergleiche** in I4S und besonders in dem hier dargestellten TUM-Projekt ergaben folgende Nutzungsaspekte:

- Bezug zum Zielparameter: Mit jedem der genutzten Geräte werden bestimmte Bodenparameter erfasst (Textur, C, N, Kationenaustauschkapazität, aktueller Wassergehalt, Eindringwiderstand). Als Nachteil hat sich herausgestellt, dass diese Messungen indirekter Natur sind. D.h. es werden Parameter gemessen die erst mit den Zielparametern korreliert werden müssen. Diese Messungen unterliegen aber den Einflüssen der Umgebung (Matrixeffekt, Störgrößen, Querempfindlichkeit). Je indirekter die Messung, desto höher der Kalibrieraufwand (matrixspezifische Kalibrierung).
- Empfindlichkeit/Sensitivität: Die Sensorvergleiche haben ergeben, dass die genannten Geräte den gewünschten

Messbereich abdecken und relevante Unterschiede bei den Zielparametern aufzeigen.

- Anzahl erfassbarer Zielparameter: Es werden mehrere Parameter gleichzeitig erfasst.
- Geometrie der erfassten Probe: Form, Ausrichtung und Größe des erfassten Probenvolumens entspricht der gewünschten Ausdehnung. Veris: Punktmessungen im Bereich wenige cm um den Sensorkopf; EM38-MK2: ca. 1,5 m horizontale Ausdehnung, ca. 1,5 m Tiefe mit Schwerpunkt in 30-40 cm Tiefe.
- Probenkonditionierung: Die Messwerte beider Geräte benötigen eine Konditionierung des untersuchten Bodens, d.h. es müssen Referenzproben untersucht werden, damit die Messwerte der Geräte in boden- und pflanzenrelevante Werte umgerechnet werden können.
- Flächenleistung: Beide Geräte ermöglichen eine ausreichend hohe Flächenleistung (Fläche pro Zeit)
- Zeitliche Auflösung: Eine hohe zeitliche Auflösung ist nur für die Wassergehalte möglich. Nmin-Messungen sind nicht realisierbar.
- Robustheit und Flexibilität bei Einsatz: Beide Geräte sind empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen, Temperatur, Feuchte, Staub, elektromagnetische Strahlung.
- Nutzerfreundlichkeit: Eichung bei EM38-MK2 bei leitfähigem Untergrund schwierig. Nutzung von Veris bei stark verdichtetem und steinhaltigem Boden nicht möglich.
- Marktverfügbarkeit: EM38-MK2 käuflich erhältlich, Veris Spezialanfertigung.
- Kosten: Hier wurden keine Aufnahmen durchgeführt (Kauf, Wartung, Personalqualifizierung, Nutzungsdauer, Kalibrierungsaufwand).

C4-1 bis -4 TUM

In diesen Arbeitspaketen werden Wasserhaushalt, Humus, Nährstoffe und Erträge des Dauerversuchs modellhaft abgebildet. Eine ausführliche Beschreibung von Methodik und Ergebnissen wurde im Zwischenbericht 2022 dargestellt. Deshalb wird an dieser Stelle lediglich eine Zusammenfassung gebracht.

Modellinputs und Sensitivitätsanalyse

Die für die Ausführung von Daisy erforderlichen Inputs umfassen Wetter (täglich)-, Boden-, Ernte- und Managementinformationen. Die Bodenbeschreibung (Textur, organische Substanz, Lagerungsdichte, C, N) wurde für 4 Tiefenstufen bis 1 m Tiefe bestimmt. Daraus wurden mittels der Software Hypres die Bodenparameter, die die Wasserretention und die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit bei verschiedenen Bodenwasserdruckpotenzialen gemäß dem van-Genuchten-Mualem-Modell beschreiben, berechnet und als Input für die Richards Gleichung in Daisy verwendet.

Zur Überprüfung der Anpassungsgüte wurden neben der optischen Überprüfung objektive Maße genutzt (RMSE, R^2 , Nash-Sutcliffe).

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass eine 10-prozentige Änderung des Gehalts an organischer Substanz (Humus) und des C/N-Verhältnisses die simulierte Nitratauswaschung erheblich beeinflusst, während die photosynthetische Leistung der Blätter und die photosynthetische Quanteneffizienz (F_m und Q_{Eff}) sowie die vegetativen und reproduktiven Entwicklungsraten ($DSRate1$ und $DSRate2$) die simulierten Ernteerträge beeinflussen.

Ergebnisse:

Die Modelle der Erträge sowie der Wasserausträge zeigen bei der Betrachtung aller Werte recht genaue Simulationen (Erträge: Kontrolle RMSE: 0,49 dt/ha, hoch gedüngte Variante RMSE: 1,81 dt/ha, Wasserausträge: RMSE: 13-20 mm/Monat).

Mit diesen Parametrisierungen wurden Aspekte des Klimawandels mit Auswirkungen auf Erträge, Sickerwasser- und Nitratausträge modelliert:

Variante 1: Veränderung des Niederschlagsmusters mit Erhöhung der Winterniederschläge um 16% und Verringerung der Sommerniederschläge um 10% im Vergleich zu den Originalbedingungen,

Variante 2: Veränderung des Niederschlagsmusters mit Erhöhung der Winterniederschläge um 16% und Verringerung der Sommerniederschläge um 10% sowie Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 3.9 Kelvin.

Variante 3: Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 3.9 Kelvin und Simulierung von Nässe im Hochwinter (Dezember 100%, Januar 138%, Februar 110%) und Trockenheit im Frühsommer (März 110%, April 100%, Mai 90%, Juni 75%, Juli 95%).

Variante 4: Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 1.1 Kelvin ohne Änderung der Niederschlagsverteilung im Jahresverlauf.

Das Boden-Pflanzen-Atmosphärenmodell Daisy ist insgesamt ein geeignetes Modell zur Simulation der Ertragsleistung am Beispiel der betrachteten Fruchtfolge Winter/Sommerweizen-Wintergerste-Zuckerrübe. So können nur geringe Abweichungen zwischen Simulation und Messwerten für den Beobachtungszeitraum 1993-2006 festgestellt werden. Etwas weniger zuverlässig werden die monatlichen Sickerwassermengen abgebildet, wobei bei halbjährlicher Betrachtung ebenfalls gute Ergebnisse erzielt wurden. Insgesamt relativ große Abweichungen zwischen Modell und Messung ergeben sich dagegen bei der Simulation der Nitratausträge. Diesbezüglich ist es möglich, dass bei der Parametrisierung ein oder mehrere unpassende Parameter gesetzt wurden.

Infolge des Temperaturanstiegs sowie einer Veränderung der Niederschlagsmuster durch den Klimawandel ist den Simulationsergebnissen von Daisy zufolge bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit insgesamt deutlich niedrigeren Trockenmasseerträgen aller drei Früchte zu rechnen. Besonders betroffen von den negativen Auswirkungen häufigerer Hitzetage und frühsommerlicher Trockenperioden ist demnach das Wintergetreide, für das eine bis zu etwa einem Drittel niedrigere Ertragsleistung gegenüber den Klimabedingungen um die Jahrtausendwende prognostiziert wird. Die größten Ernteeinbußen sind zu erwarten, wenn Hitze- und Trockenstress zur Anthese sowie zur Kornfüllung auftreten. Weniger starke Ertragsverluste werden für die gegenüber Hitze und Trockenheit tolerantere Zuckerrübe simuliert. Dennoch sind auch für diese Frucht ohne jegliche Anpassungsmaßnahmen etwa 10% niedrigere Trockenmasseerträge zu erwarten. Adaptionsmöglichkeiten zur Reduktion der negativen Auswirkungen der sich verändernden Klimabedingungen stellen die Züchtung hitze- und trockenheitstoleranterer Sorten sowie frühreifender Sorten dar. Darüber hinaus sollte eine Umstellung von konventioneller Bodenbearbeitung hin zur reduzierten Bearbeitung erfolgen. Präzisionsbewässerung stellt eine weitere, künftig häufiger erforderliche Möglichkeit als Entgegnung auf Trockenstress dar, die es gilt, sorgfältig abzuwägen. Im Gegenzug dazu ist die Applikation geringerer Stickstoffmengen anzustreben, da andernfalls im Zuge von Ertragseinbußen größere Mengen ungenutzt im Boden verbleiben und schließlich der Auswaschung unterliegen können. Für alle drei Früchte konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Temperaturerhöhung zu den Ertragsverlusten führt, während die Verteilung der

Niederschläge bzw. die zusätzliche Abnahme der Sommerniederschläge eine weniger große Rolle spielen. Dies gilt insbesondere für Wintergerste und Zuckerrübe. Für den auf Wassermangel besonders empfindlich reagierenden Weizen ergeben sich allerdings noch stärker ausgeprägte Ertragseinbrüche bei zusätzlicher Reduktion der Niederschläge.

Zukünftig sind als weitere Folge des Klimawandels steigende Nitratausträge zu erwarten. Daisy prognostiziert etwa eine Verdoppelung bis Verdreifachung der NO₃-N- Auswaschungsmengen. Eine derartige Erhöhung würde das Ziel von einer Reduzierung der Zahl sogenannter roter Gebiete, in denen der Grenzwert von 50mg/l Nitrat im Grundwasser überschritten wird, in weite Ferne rücken und stattdessen selbst bei verlustarmen Böden das Erreichen des Grenzwertes wahrscheinlicher werden lassen. Verursacht ist dies einerseits durch steigende Temperaturen mit intensiveren Mineralisierungs- und Nitrifikationsprozessen in Herbst- und Wintermonaten und andererseits durch zunehmenden Sickerwasseranfall wegen höherer Winterniederschläge. Zudem sind wegen häufigerer Hitze- und Trockenperioden Ertragsausfälle und nach der Ernte im Boden teils große Mengen verbliebenen Stickstoffs wahrscheinlicher. Wegen des dadurch erhöhten Risikos für die Auswaschung in den darauffolgenden Wintermonaten gilt es, bedarfsgerecht und weniger intensiv zu düngen. Die Ergebnisse von Daisy haben des Weiteren die Bedeutung des Zwischenfruchtanbaus zur Reduktion der Nitratverluste hervorgehoben, wonach sich je nach Düngestufe bis zu 2.5-fach höhere Auswaschungsmengen während der Monate August bis Mai ohne Pflanzenbedeckung ergeben würden. Dabei hat sich als wichtige zusätzliche Managementmaßnahme das Unterlassen der Zwischenfruchtdüngung ergeben, was zu einer weiteren Verringerung der NO₃-N- Austräge führt. So ist zur Aussaat des Ölrettichs ausreichend Reststickstoff im Boden vorhanden, der eine gute Entwicklung der Zwischenfrucht zur Konservierung eines Großteils des auswaschungsgefährdeten Stickstoffs zulässt.

Zudem ging aus den Simulationen hervor, dass ein Zwischenfruchtumbruch im mittleren Frühjahr etwa Ende März gegenüber einem Umbruch im Oktober nochmals zu einer deutlichen Reduktion der Nitratverluste führt. So kann es beim Herbstumbruch bereits während milder Phasen im Spätherbst und Winter zur Freisetzung größerer Stickstoffmengen kommen, die potentiell der Auswaschung unterliegen. Durch einen auf das Frühjahr verschobenen Umbruch kommen verstärkte Mineralisierungsprozesse erst zum Ende der auswaschungsgefährdeten Saison, aber noch rechtzeitig für die Folgefrucht Zuckerrübe in Gang. Letztlich hat das Simulationsmodell gezeigt, dass die teils hohen Nitrat-Peaks in den Herbst- und Wintermonaten nach Ernte des Weizens durch ein Unterlassen der frühen Einarbeitung von Ernteresten im August zumindest in Jahren mit hohen Temperaturen im Spätsommer etwas gedämpft werden können.

Auswaschungsverluste leicht löslicher Stoffe unabhängig von der Bewirtschaftungsform und den hierzulande vorzufindenden gemäßigt-humiden Klimabedingungen treten in jedem Fall auf und sind nicht zu vermeiden. Daher ist die Annahme einer Null-Emission unter Kulturlandschaften utopisch (Wohlrab et al. 1992).

C4-11 TUM Bodenfunktionen

Zielsetzung ist hier die Erstellung von Kartenunterlagen mit der räumlichen Verteilung von Bodenparametern. Vorhandene Bodenkarten sind nicht genau genug, da die Ausscheidung von Bodeneinheiten meist zu groß ist. Es wurde ein System entwickelt mit einzelnen Informationsschritten, die in einer Endkarte zusammengeführt werden (base layer, indicator layer, subject layer und theme (end) layer) (Abbildung 5 und 6).

Daher wurden zunächst für den Standort Dürnast spezifische Bodenzustände definiert (Bodentyp, geologisches Substrat, Schichtung, Hydromorphie, Leitfähigkeit) und damit in Verbindung stehend Einflußparameter auf das Pflanzenwachstum (Durchwurzelungstiefe, nFk, Nährstoffgehalte incl. C-Gehalt, Grundwasser).

Dieses Flussdiagramm beinhaltet:

- Diskriminanzanalyse zur Berechnung der Ausdehnung und der Grenztiefe von quartären Sedimenten sowie von hydromorphen Horizonten (Sd, Gr, Sg);
- überwachte Klassifizierung mit Hilfe des Top-down-Ansatzes zur Schätzung der Gebietseinheiten auf der Grundlage von Berechnungen, bei denen signifikante Unterschiede im Erscheinungsbild dieser Bodentypen festgestellt werden (gekennzeichnet durch 30 Merkmale: Topographie, Erosionsgrad, Grenztiefe von quartären Sedimenten und Hydromorphie, Textur, C-N-Verteilung, Bodenzustandsstufe nach Bodenschätzungskarte).

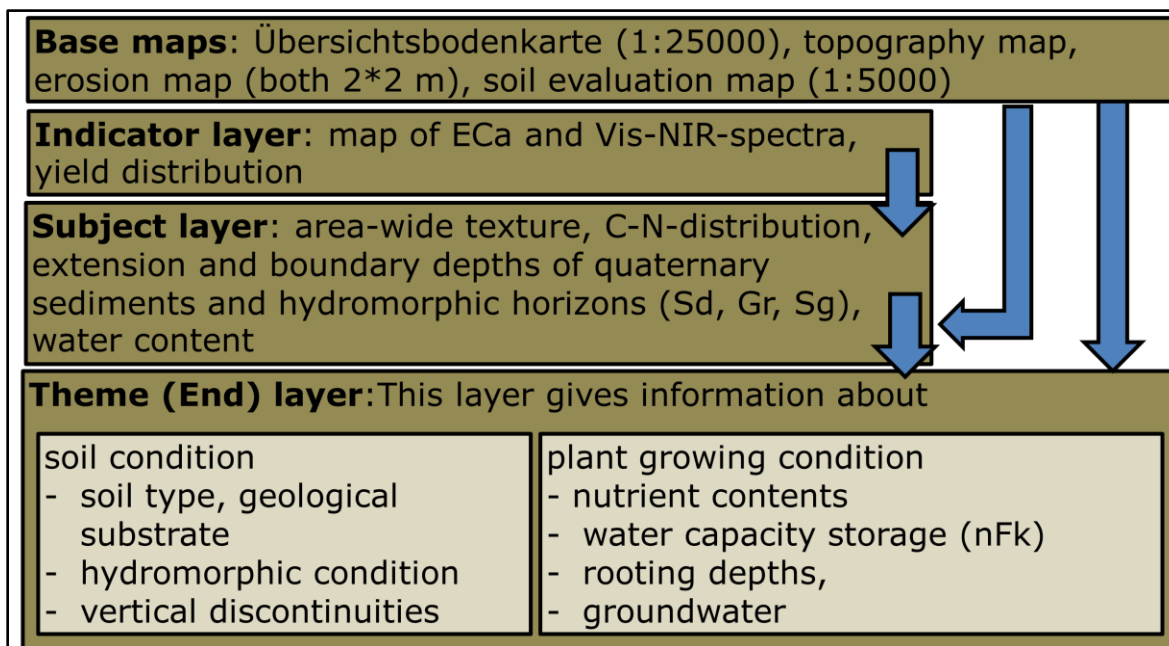


Abbildung 5: Flussdiagramm zur Herleitung von Bodeneinheiten

Die optimierten Bearbeitungsschritte sind nun:

1. Datenaufbereitung Eingangsdaten Raum Dürnast (Punktdateien)
 - z. B. Bodenprofile, Flächendaten (Karten ÜBK, Bodenschätzung, Relief, Erosion); Verknüpfen von Punkt- und Flächendaten (z. B. Regionalisierung der Bodendaten).

2. Entwicklung Algorithmen zur Herleitung spezifischer Fragestellungen (z.B. Hydromorphie).

Hier: Stauhorizont

Index Stauhorizont(0,1) = $a + b_1 * K_s - b_2 * nFK + b_3 * slope - b_4 * \ln(\text{upper border water logging}) + b_5 * \text{Sand+Skelett} - b_6 * \ln(Ton) + b_7 * \text{Kurv} + b_8 * \text{Valleydepth}$

K_s = gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [cm/d],
 nFK = nutzbare Feldkapazität [mm],
 slope = Hangneigung [Grad],
 Stautiefe = Obergrenze des Stauhorizontes [cm],

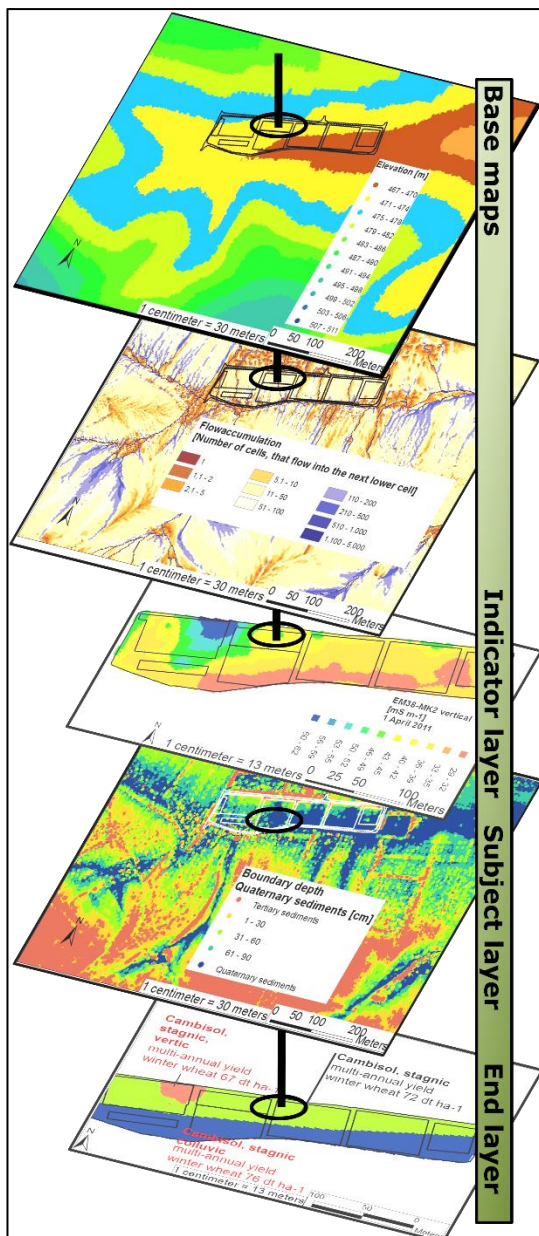


Abbildung 6: Zusammenstellung mehrerer Karten sowie kleinräumiger ECa-Messungen im Rahmen der Schichtenabfolge (Abbildung. 5) zur Herleitung von Bodeneinheiten

Sand+Skelett = Sand+Skelettgehalt

Profil [%], Ton = mittlerer Tongehalt Profil [%],

curv = Vertikalwölbungsradius [m],

Valleydepth = Höhe über Tiefenlinie [m]

3. Tests zur Modellgüte (statistische Tests, Sensitivität etc.) an Bodenprofilen; Beurteilung der Modelleignung; Ziel ist es jetzt ein Basismodell zu entwickeln, dass dann auf andere Punkte übertragen wird.
4. Anpassung des Basismodells mittels Korrekturfaktoren und an physiologische, klimatische Wachstumsgrenzen.
5. Plausibilisierung extremer Ertragsergebnisse; Ev. Ausweisung von Sonderflächen, die nicht/nicht ausreichend genau abgebildet werden können.

Die Bearbeitung/Entwicklung dieses Arbeitspaketes ist abgeschlossen. Es fehlt aber noch die abschließende Bewertung sowie die Publikation.

C5-2 TUM Feldversuche

Die Datenerhebung der Feldversuche für das BonaRes-Projekt wurde abgeschlossen. Es konnte aber erreicht werden, dass die Messungen noch mindestens 2 Jahre (2024 und 2025) fortgeführt werden.

C5-4 TUM Integration der Modelle

In diesem Paket gibt es eine enge Verzahnung mit dem ZALF und der UH. Innerhalb des Gesamtverbundes repräsentieren die Modelle dieses Teilprojektes eher Standorte mit hoher Ertragsleistung. Die beschriebenen Ergebnisse werden diesen Partnern zur Verfügung gestellt.

C5-6 TUM Düngealgorithmen

Die Entwicklung erfordert noch einiges an Fachwissen. Der Vergleich der Modelle ist bisher noch nicht ausreichend realisiert. Mit den einzelnen Modellen können aber Düngungsvariationen durchgeführt und die Erträge abgebildet werden. Als Regulierungsmechanismus für die Düngehöhe von N wird die aktuelle Entwicklung der Bodenwassergehalte sowie Ertrag genutzt. Bei der Grunddüngung wird mit Schwellenwerten gearbeitet.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises SAP Ausdruck

Die zahlenmäßig größte Position war die Finanzierung des Wissenschaftlers (40% Stelle), gefolgt von der Beschäftigung von Hilfskräften sowie Laboranalysen. Bei der Position Gegenstände wurden lediglich Batterien für die Bodenfeuchtesensoren gekauft.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Notwendigkeit, Angemessenheit und Nutzen ergeben sich aus folgenden Punkten:

- (i) Mit der Berücksichtigung von Bodeninformationen sind zum einen signifikante Vorteile in der Durchführung von

Feldversuchen gegeben. Auf der Grundlage dieser Messungen könnte dies einen neuen Standard für Feldversuche darstellen, der auch die Interpretation von subtilen oder geringfügigen Unterschieden im Pflanzenwachstum oder Ertrag erlaubt. Allerdings bedeutet dies nicht etablierte Analyseprotokolle im Feldversuch zu ersetzen, sondern sie durch eine parzellenweise Untersuchung zu ergänzen.

- (ii) Zum anderen erlaubt es der Landwirtschaft Schläge bzw. ganze Betriebe auf Bodeninformationen aufzubauen. Hierzu zählen natürlich in erster Linie Maßnahmen im Rahmen von Precision Farming. Die Qualität der Anwendung wird dabei maßgeblich bestimmt von der Quantität der Referenzdaten, die zur Verfügung gestellt werden. D.h. der Anzahl von Referenzproben die für die Herleitung flächiger Standortinformationen verfügbar sind. Für den Einsatz von EM38 sowie Veris-Messungen sollten je Schlag mindestens 30 Bodenproben bis mindestens 60 cm Tiefe analysiert werden. Weiterhin muss auch gesehen werden, dass mit Bodensensoren nicht immer Beziehungen zwischen Zielgröße und Messwert gefunden werden können, da z.B. wenn die Streuung zu gering ist, oder Schläge zu heterogen sind (Auensedimente sind meist so heterogen, dass kaum Herleitungen möglich sind; steinige Böden bereiten Probleme, da der Steingehalt flächig nicht messbar ist).

Böden sind im Wesentlichen durch Verdichtung, Eutrophierung und Erosion zu mindestens teilweise stark gefährdet. An den Standort und die Witterung angepasste Managementmaßnahmen können hier eine Verminderung herbeiführen. Diese müssen sich an den Bodeneigenschaften orientieren.

Die hohe Variabilität von Bodenkenngrößen wie Textur und Unterboden-C und ganz besonders die Dynamik von zeitlich stark variierenden Größen wie Oberboden-C und -N sowie dem Wassergehalt, machen eine solche Erfassung mit herkömmlichen Verfahren nahezu unmöglich. Hier entstand die Idee des Einsatzes von Bodensensoren.

Basierend auf den Ergebnissen des Einsatzes von Bodensensoren und der flächigen Herleitung von Bodenparametern wurden Pflanzen- und Bodenmodelle entwickelt, die der Steuerung der N-Düngung dienen.

Nach wie vor sind solche modellgestützten Düngungsempfehlungen nur recht eingeschränkt verbreitet. Dies mag zu einem beträchtlichen Teil an der Notwendigkeit von Bodenanalysen liegen, um die Modellierung möglichst realistisch gestalten zu können. Auch wenn Bodensensoren hier deutlich einsparend wirken, zu deren Kalibrierung sind aber trotzdem noch Bodenanalysen nötig.

Im vorliegenden Teilprojekt wurden gute Beziehungen zwischen Ton, Schluff sowie C und N zu Spektral- und ECa-Werten gefunden, sodass hier sehr kleinräumig diese Bodeninformationen dargestellt werden konnten.

Mit der Kombination des Einsatzes von Bodensensorik und Modellierung konnte aufgezeigt werden, dass Stoffumsätze inkl. Erträge recht kleinräumig abgebildet werden können.

Die geleisteten Arbeiten entsprechen den Arbeitsbeschreibungen im bewilligten Antrag. Die eingesetzten Mittel waren notwendig und angemessen.

4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Für den Landwirt ist es entscheidend, die Effizienz zu erhalten oder sogar zu steigern. Ebenso wichtig ist es, auf landwirtschaftlichen Flächen umweltschonend zu arbeiten.

Die Beibehaltung oder Verwirklichung beider Punkte bestimmt den Nutzen der durchgeführten Arbeiten. Die Nutzung wird vor allem durch die finanzielle und technische Machbarkeit bestimmt.

Durch die genaue Erfassung des Standortes können verschiedene Maßnahmen bei der Behandlung von landwirtschaftlichen Kulturen optimiert werden (Bodenbearbeitung, Aussaatintensität, Düngung, Pflanzenschutz, Bewässerung). Dies führt zu Verbesserungen in der Betriebsführung. Durch verbesserte Anbauempfehlungen sind zudem deutliche Produktivitätssteigerungen zu erwarten, die die Anforderungen des Umweltschutzes effizient erfüllen und die Wettbewerbsfähigkeit des Agrarsektors nachhaltig stärken.

Da innerhalb dieses Teilprojektes bisher lediglich käufliche Sensoren zum Einsatz kamen, konzentriert sich die Bewertung von Nutzen und Verwertbarkeit nach den Kriterien „Sensoreinsatz“, „Kartenerstellung“ und „Modellierung mit Düngungsempfehlung“.

(i) Sensoreinsatz: Insbesondere der Einsatz des VerisP4000 hat sich auf jeden Fall bewährt. Das große Interesse bei anderen Forschungseinrichtungen hat zu einer guten Auslastung geführt. Allerdings gab es immer wieder Verzögerung bei zu großer Nässe bzw. zu großer Trockenheit. Werden allerdings sensorische Messungen von Leitfähigkeit flächendeckend und nicht punktuell gewünscht, ist der Einsatz des EM38 besser. Nutzen und Verwertbarkeit ergeben sich für die Zukunft darin, dass mit diesen sensorischen Aufnahmen zum erheblichen Teil zeitlich inhärente Parameter erfasst werden.

(ii) Kartenerstellung: Der Nutzen und Verwendbarkeit derartiger Unterlagen ist unübersehbar. Z.B. das Erkennen von pseudovergleyten schluffigen Böden liefert sofort das Wissen: verdichtungsgefährdet, erosionsgefährdet, hohe Feldkapazität, hohe nutzbare Feldkapazität, ertragsfähiger Boden, Möglichkeit der N-Düngung hoch (nicht auswaschungsgefährdet).

Braunerde aus fein- und mittelsandig: typischer Kartoffel-Roggenstandort; leidet schnell unter Trockenheit; Nährstoffe werden leicht ausgewaschen; Mg-Mangelstandort; leicht zu bearbeitender Boden; Ertragsfähigkeit leichter Standorte hängt vom Humusgehalt ab, der die Nährstoff- und Wasserhaltefähigkeit wesentlich bestimmt.

(iii) Modellierung: Die Modellierungen werden dazu genutzt um verschiedene Managementstrategien (Düngungshöhe und -Zeitpunkt, Bodenbearbeitung, Saatzeitpunkt) und deren Einfluss auf Ernteertrag, Wasserverbrauch und Nitrat-Austrag auszutesten. Einen großen Verwendungsbereich wird der Einfluss von Witterungsgeschehen machen. Im Zentrum steht dabei Niederschlag und Temperatur während der sensiblen Phasen der entsprechenden Früchte.

Die Erfahrungen aus dem Verbundprojekt I4S und besonders aus dem Teilprojekt der TUM mit Bodensensorik wurden bereits vollumfänglich in ein neues Projekt eingearbeitet (Weiterentwicklung und Praxiserprobung digitaler Humus- und Nährstoff-Managementsysteme in Zukunftsbetrieben zum Klimaschutz; **Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)**). Ziel des Projektes ist die Weiterentwicklung und Praxiserprobung digitaler Humus- und Nährstoffmanagementsysteme in vier Zukunftsbetrieben, die mit zwanzig Landwirtschaftsbetrieben in vier Boden-Klimaräumen zusammenarbeiten. Sie bilden ein Netzwerk, in dem digitale Systeme erforscht und weiterentwickelt, validiert und unter Praxisbedingungen getestet werden. Die Betriebe sind zugleich Demonstrationsbetriebe, in denen neue digitale Systeme der landwirtschaftlichen Praxis vorgestellt werden, um einen schnellen Wissenstransfer zu unterstützen. Eine Innovation des Projektes besteht in der Verknüpfung räumlich hochauflösender Bodendaten, Management- und Prozessdaten, Sensor- und Satellitendaten in einem Managementsystem. Ein Forschungsschwerpunkt ist die Validierung der digitalen Technologien anhand von Ground Truth-Daten durch den Vergleich modellierter und gemessener Erträge sowie den Vergleich modellierter

und gemessener Treibhausgasflüsse. Die Abdeckung unterschiedlicher Regionen in Bayern und Brandenburg, die sich in den bodenklimatischen Bedingungen und den landwirtschaftlichen Strukturen stark unterscheiden, dient der Generalisierbarkeit der Projektergebnisse und erhöht damit deren praktischen und wissenschaftlichen Wert. Hier ist vorgesehen die genannten Bodensensoren auf großer Fläche in landwirtschaftlichen Gebieten (Freising, Burghausen (Ostbayern (österreichische Grenze), Ochsenfurt (Nähe Würzburg, eher niederschlagsarmes Gebiet) und Ostbrandenburg) einzusetzen. Messverfahren, Auswertung (Herleitung Algorithmen) werden aus I4S übernommen. Hiermit wird die Technik anhand praktischer landwirtschaftlicher Betriebe großflächig eingesetzt (insgesamt 20 Betriebe in den genannten Regionen, ökologisch, konventionell). Das Forschungsvorhaben soll dazu beitragen, die Stickstoffeffizienz im Pflanzenbau zu erhöhen, Nitratverluste und Lachgasemissionen wirksam zu reduzieren, Bodenkohlenstoffvorräte durch Humusaufbau zu erhöhen sowie die Ertragsfähigkeit der Böden langfristig zu erhalten. Von besonderer Bedeutung ist dabei die aktive Beteiligung von Landwirten, Beratern und des Maschinenrings. Hierdurch soll auch die Anwendbarkeit und die Akzeptanz der digitalen Systeme deutlich verbessert und damit Voraussetzungen für den verstärkten Praxiseinsatz geschaffen werden.

Eine weitere Organisation, die das Veris-Gerät deutlich nachfragt, ist die **Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft**. Die Digitalisierungsstrategie berücksichtigt auch Bodenaufnahmen und die Berechnungen von Bodenparametern.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektzeit wurden keine Publikationen bekannt, die sich der Thematik Bodenvariabilität in der Prozessmodellierung im Zusammenhang mit dem Einsatz sensorischer Systeme zur flächenhaften Erfassung von Bodenzuständen widmen. Regelmäßig wurden über Suchbegriffe die entsprechenden Publikationsorgane abgesucht. Im Bereich der Modellierung gibt es allerdings außerhalb von BonaRes zunehmend Modellanwendungen (z.B. DSSAT), die in eine ähnliche Zielrichtung gehen. Abschließende Einordnungen der Softwareergebnisse nach Reproduzierbarkeit, Einfachheit und Zahl der Eingangsgrößen existieren allerdings nicht.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Teilvorhabens wurden kontinuierlich publiziert und präsentiert. (Tabelle 6).

Tabelle 5: Übersicht zum Stand der Publikationsleistung im Teilprojekt E

Publikationen	Status
Heil K, Klöpfer, C., Hülsbergen, K.J., Schmidhalter U. Effects of extreme meteorological events on long-term yields of winter wheat in in South-west Germany . Agriculture 2023, 13, 1904. https://doi.org/10.3390/agriculture13101904	published
Heil K, Hülsbergen, K.J., Schmidhalter U., Detailed derivation of spatial soil attributes using soil sensor data, terrain analysis and soil maps with random forest classification . Proceedings of the 16th International Conference on Precision Agriculture, 2024	published
Heil K, Schmidhalter U. Modellierung einer Fruchtfolge mit drei N-Düngestufen im Lysimeterversuch Dürnast mit dem SVAT-Modell DAISY . Jahrestagung Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Halle (Saale), 2. – 8. September 2023, Abstractband p. 454.	published

Iluşca, M., Schmidhalter, U., Buchhart, C., Heil, K., Boincean, B. Assessment of Soil Fertility Parameters using Near-Infrared Reflectance Spectroscopy in Northern Republic of Moldova. , Computers and Electronics in Agriculture	submitted
Heil K, Hülsbergen, K.J., Schmidhalter U., Comparisons of Spectral Pre-Treatments of NIR-Measurements to Derive the Soil Texture of a Humus-Clay-Rich Soil. MDPI Sensors	submitted
Rosso, P., Kersebaum, K.C., Groh, J., Gerke, H.H., Heil, K., Gebbers, R. Pedotransfer functions and their impact on water dynamics simulation and yield prediction. k.A.	submitted
Comparison soil sensors electromagnetic induction and galvanic contact	planned
Soil Properties Prediction for Precision Agriculture Using Near-Infrared Spectroscopy	planned
Combination of electrical conductivity patterns with geological and soil maps for precision agriculture	planned
Mapping soil texture with Electromagnetic Induction across Boundaries at the Landscape Scale	planned
Modelling of crop production and nitrate leaching with the DAISY model	planned
Modelling water dynamics with DAISY in a soil of South Germany	planned

Literatur:

- Ad-hoc AG Boden** (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5th edition. German Soil Taxonomy, Schweitzerbart, Stuttgart 438 pp
- Auernhammer, H., Demmel, M., Muhr, T., Rottmeier, J., Wild, K.** (1994): GPS for yield mapping on combines. Comput. Electron. Agric., 11, 53–68.
- Bennett, N.D. Croke, B.F.W., Guariso G., Guillaume J.A.H., Hamilton S.A., Jakeman A.J., Marsili-Libelli S., Newham L.T.H., Norton J.P., Perrin C., Pierce S.A., Robson B., Seppelt R., Voinov A.A., Fath B.D., Andreassian V.** (2013): Characterising performance of environmental models, Environ. Modell. Softw. 40, 1–20.
- Gebbers, R., Adamchuk, V.I.** (2010): Precision Agriculture and Food Security. Science (80), 327, 828–831.
- Hansen, S.** (2002): Daisy Description–Equation Section One, Copenhagen University (<https://daisy-model.googlecode.com/files/DaisyDescription.pdf>), Copenhagen, Denmark.
- Hansen, S., Abrahamsen, P., Petersen, C.T., Styczen, M.,** (2012): Daisy: model use, calibration and validation. Trans. ASABE Am. Soc. Agric. Biol. Eng. 55 (4), 1315–1333.
- Heil, K., Schmidhalter, U.** (2015). Comparison of the EM38 and EM38-MK2 electromagnetic induction-based sensors for spatial soil analysis at field scale. Comp. Electr. Agri. 110, 267–280. doi: 10.1016/j.compag.2014.11.014
- Heil, K., Schmidhalter, U.** (2017). The Application of EM38: Determination of Soil Parameters, Selection of Soil Sampling Points and Use in Agriculture and Archaeology. Sensors, 17, 2540; doi:10.3390/s17112540
- Heil, K., Schmidhalter, U.** (2017). Improved evaluation of field experiments by accounting for inherent soil variability. Sensors 17:2540. doi: 10.1016/j.eja.2017.05.004
- Heil K, Heinemann P. Schmidhalter U** (2018) Modeling the Effects of Soil Variability, Topography, and Management on the Yield of Barley. Front. Environ. Sci. 6:146. doi: 10.3389/fenvs.2018.00146
- Heil K, Schmidhalter U** (2019) Theory and Guidelines for the Application of the Geophysical Sensor EM38. Sensors, 19, 4293; doi:10.3390/s19194293
- Heil K, Schmidhalter U** (2020) Influence of Climate Conditions on the Temporal Development of Wheat Yields in a Long-Term Experiment in an Area with Pleistocene Loess. Climate, 8, 100; doi:10.3390/cli8090100
- Heil K, Schmidhalter U.** (2021) A systematic evaluation on different spectral derived pretreatments for calculation of soil fertility parameters. Sensors, 21, 1423. <https://doi.org/10.3390/s21041423>
- Heil K, Schmidhalter U.** (2021) Sensitivity of Winter Barley Yield to Climate Variability in a Pleistocene Loess Area. Climate, 9, 112. <https://doi.org/10.3390/cli9070112>
- Pätzold, S., Mertens, F.M., Bornemann, L., Koleczek, B., Franke, J., Feilhauer, H., Welp, G.** (2008): Soil heterogeneity at the field scale: a challenge for precision crop protection. Precis. Agric., 9, 367–390.
- Schmidhalter, U., Maidl, F.-X., Heuwinkel, H., Demmel, M., Auernhammer, H., Noack, P.O., Rothmund, M.** (2008): Precision Farming – Adaptation of Land Use Management to Small Scale Heterogeneity. In Perspectives for Agroecosystem Management, Elsevier, pp. 121–199.
- Selige, T., Böhner, J., Schmidhalter, U.** (2006): High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. Geoderma, 136, 235–244.

Stafford, J.V. (2000): Implementing Precision Agriculture in the 21st. Century. J. Agric. Eng. Res., 76, 267–275.

Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B. (1998): Soil chemical analytical accuracy and costs: implications from precision agriculture. Aust. J. Exp. Agric., 38, 765.

Viscarra Rossel, R.A., McBratney, A.B., Minasny, B. (Eds.) (2010): Proximal soil sensing, Springer, Dordrecht.

Viscarra Rossel, R.A., Adamchuk, V.I., Sudduth, K.A., McKenzie, N.J., Lobsey, C. (2011): Chapter Five – Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. Advances in Agronomy, 113, pp. 243–291.

Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A., Sokollek, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt. Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum – Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. Hamburg, Berlin.