

EIP-Agri Verbundprojekt „Präzise Kalkung in Brandenburg“ (pH-BB) - Abschlussbericht -

Zuwendungsempfänger:

pH-BB GbR c/o HNE Eberswalde | Schicklerstr. 5 | 16225 Eberswalde | Prof. Dr.-Ing. Kramer,
Eckart: Projektleitung | Tel.: +49 3334 657 329 | ekramer@hnee.de | www.ph-bb.com

Projektkoordination:

pH-BB GbR c/o HNE Eberswalde | Schicklerstr. 5 | 16225 Eberswalde | Prof. Dr.-Ing. Kramer,
Eckart: wissenschaftliche Projektkoordination | MSc Anne Nagel: administrative und
wissenschaftliche Projektkoordination | Tel.: +49 3334 657 432 | ekramer@hnee.de | www.ph-bb.de

Mitglieder der Operationellen Gruppe:

- ATB Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie Potsdam | Dr. Gebbers, Robin; Dr. Vogel, Sebastian; Bettoni, Manuele;
- Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde | Prof. Dr.-Ing. Kramer, Eckart; Schröter, Ingmar; Liftenegger, Alan; Sorge, Stefan
- IGZ Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V. | Dr. Rühlmann, Jörg; Meyer, Swen; Bönecke, Eric,
- Gut Wilmersdorf GbR | Kling, Charlotte
- Land- und Forstwirtschaft Komturei Lietzen GmbH & Co KG | Lück, Katrin; Schubert, Torsten; Gerlach, Lukas
- pH-BB GbR c/o HNE Eberswalde | Prof. Dr. Kramer, Eckart; Nagel, Anne; Zaimeche, Zina
- Landwirtschaft Petra Philipp | Philipp, Golo
- FGL Handelsgesellschaft mbH | Schwarzlose, Ulrike
- LAB Landwirtschaftliche Beratung der Agrarverbände Brandenburg GmbH | Scheibe, Dirk; Fahle, Kevin
- iXmap Services GmbH & Co. KG | Zieger, Karin; Muckel, Jens

Projektlaufzeit: 01.04.2017 – 30.09.2022

Budget: 2.350.493,17 € (Bescheid vom 10.11.2022)

Datum: 30. Dezember 2022

Autoren: Vogel, Sebastian; Bettoni, Manuele; Rühlmann, Jörg; Bönecke, Eric; Meyer, Sven; Kramer, Eckart; Schröter, Ingmar; Sorge, Stefan; Liftenegger, Alan; Nagel, Anne; Zaimeche, Zina; Kling, Charlotte; Lück, Katrin; Schubert, Torsten; Gerlach, Lukas; Philipp, Golo; Schwarzlose, Ulrike; Scheibe, Dirk; Fahle, Kevin; Zieger, Karin; Muckel, Jens



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Landwirtschaftsfonds
für die Entwicklung des
ländlichen Raums



Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung in deutscher Sprache	1
2	Kurzfassung in englischer Sprache	1
3	Situation zu Projektbeginn	1
3.1	Ausgangssituation	1
3.2	Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens	2
4	Projektverlauf	3
5	Projektergebnisse	7
5.1	Ergebnisse	7
5.2	Diskussion der Ergebnisse	33
5.3	Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen	36
5.4	Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen	38
5.5	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	38
5.6	Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen	39
5.7	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen	41
6	Zusammenarbeit der operationellen Gruppe	43
7	Kommunikations- und Disseminationskonzept	45
7.1	Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse	45
7.2	Transfer der Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis	45
7.3	Schlussfolgerungen und Vorschläge zur Weiterentwicklung von EIP-AGRI	46

1 Kurzfassung

Teilflächenspezifische Kalkung bringt ökonomische und ökologische Vorteile. Ihrer Umsetzung standen praktische Probleme und Innovationslücken entgegen. Im Projekt wurden Methoden für die Umsetzung einer präzisen Kalkung entwickelt: Sensorbasierte Kartierungsmethoden für Textur, pH und Humusgehalt, Algorithmen zur Referenzbeprobung, zum „Mittleren Korndurchmesser“ (MKD) sowie zur „stufenlosen“ Kalkausbringung. Nutzbare Produkte sind die pH-BB Toolbox, der Wirtschaftlichkeits-Kalkulator sowie Schulungs- und Vorlesungsmaterialien. Empfehlungen für die Praxis wurden in zwölf Praxisblättern und einer informierenden Befragung zusammengefasst. Mit 60 teils referierten Beiträgen wurde intensiv informiert. Die Ergebnisse werden auf Betrieben genutzt. Weitere Nachfragen liegen vor. Ausreichende Kartierungs- und Beratungskapazitäten sollten geschaffen werden. Die Projektziele wurden erreicht: 1. Bewusstseinsbildung und Motivation, 2. Kartiermethoden, 3. Entscheidungsunterstützungssystem und 4. Verfahrenstechnische Lösungen Weitergehender Handlungs- und Forschungsbedarf wurde benannt.

2 Summary

Site-specific liming has economic and ecological advantages. Its implementation is faced to practical problems and gaps in innovation. Methods for the implementation of precise liming were developed in the project: Sensor-based mapping methods for soil texture, pH and humus content, algorithms for reference sampling, for a "mean grain diameter" (MKD) and for "stepless" lime application. The pH-BB toolbox, the profitability calculator, and the training and lecture materials, are new products. Recommendations for practice were summarized in twelve practice sheets, and in an informative survey. 60 publications, partially peer-reviewed, provide insight information. The projects' results are already used on farms. Many farms made further inquiries. Sufficient mapping and advisory capacities should be established. All project goals were achieved: 1. Raising awareness and motivation, 2. Mapping methods, 3. Decision support system, and 4. Procedural solutions. Further need for action and research is named.

3 Situation zu Projektbeginn

3.1 Ausgangssituation

Die praktischen Probleme und Innovationslücken, die zur Durchführung des Innovationsprojektes veranlassten, waren die folgenden:

- In Brandenburg bestehen innerhalb von Ackerschlägen große standörtliche Unterschiede (MLUV 2011). Die verfügbaren Bodenkarten und die bisher praxisüblich genutzten Beprobungsabstände sind für das Management der realen Bodenvariabilität zu grob. Den Landwirten stehen keine geeigneten Karten zur Verfügung. Fachpraktische Lösungen für eine kleinräumig adäquate Kartierung und Bewirtschaftung sind nur teilweise vorhanden.
- Insbesondere fehlen praxiserprobte Methoden für die Umsetzung einer präzisen Kalkung als Grundvoraussetzung für alle weiteren Düngemaßnahmen: Der pH-Wert ist nur auf 26 % der Ackerflächen optimal (Zimmer & Ellmer 2012¹; LKV 2020²). Der Kalkversorgungszustand der Böden hat signifikanten Einfluss auf Ertrag und Nährstoffeffizienz. Die Bodenazidität beeinflusst als Schlüsselfaktor der Bodenfruchtbarkeit mehrere ertragsrelevante Bodeneigenschaften. Folge von Abweichungen sind erhebliche Ertragseinbußen und

¹ Zimmer, J., Ellmer, F. (2012): Nährstoffversorgung ackerbaulich genutzter Böden im Land Brandenburg. Mitt Ges Pflanzenbauwiss 24 92–93.

² Landeskontrollverband Berlin-Brandenburg eV (2020): Jahresbericht 2020, S. 54

Nährstoffauswaschungen. Eine Zustandsverbesserung ist mit Ertrag stabilisierenden sowie erheblichen positiven ökonomischen und ökologischen Effekten verbunden.

- Es fehlten praxiserprobte sensorbasierte Kartiermethoden für Boden-pH und Textur, mit denen Beprobungsabstände < 30 m möglich sind. Wir empfehlen aufgrund vorhergehender Untersuchungen mindestens eine Probe pro 0,04 ha während VDLUFA und Düngeverordnung eine Mischprobe pro ca. 5 ha nahelegen. Außerdem führte die etablierte Gruppierung der Bodenarten zur Errechnung teilweise nicht plausibler Kalkmengen.
- Aus vorgelagerten Forschungen war bekannt, dass zur Bodenartenschätzung und zur Abgrenzung von Teilflächen die Widerstands-Geoelektrik in Kombination mit einem Gammassensor sehr gute Ergebnisse liefern kann. Das Verfahren war in der Praxis (Beratung, Landwirte) jedoch weder zur Kenntnis genommen noch zur Umsetzungsreife weiterentwickelt. Auch für die mobile Bestimmung von Boden-pH und Humusgehalt standen lediglich prototypische Sensoren und Messmethoden zur Verfügung, mit denen eine VDLUFA-konforme Ermittlung möglich erschien, mit Messpunktabständen ≤ 30 m.
- Für eine tragfähige Kalkdüngungsempfehlung ist eine objektive Methode zur Bestimmung der Bodenart zwingend erforderlich. Eine feinere Klassenunterteilung hinsichtlich Textur und Humus ließ eine besser an den Standort angepasste Düngungsempfehlung erwarten.

3.2 Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

Es wurden die folgenden vier Ziele formuliert:

Ziel 1: **Bewusstseinsbildung und Motivation:** Das Projekt sollte die Relevanz der Bodenazidität in den Fokus rücken und für ein präzises Kalkmanagement sensibilisieren.

Ziel 2: **Kartiermethoden.** Ziel war die Bereitstellung praxistauglicher sensorbasierter Methoden zur räumlich adäquat aufgelösten, kostengünstigen, schnellen und präzisen Erfassung von pH-Wert, Textur und Humus mit einer Messpunktdichte von mind. 1 Punkt pro 0,04 ha und einer Tagesleistung 70 bis 100 ha, unter Verwendung verfügbarer Sensoren bzw. Prototypen.

Ziel 3: **Entscheidungsunterstützungssystem.** Ziel war, Methoden zur Verarbeitung der Kartierungsdaten und zur Ableitung von Düngungsempfehlungen zu entwickeln. Es sollten bessere Empfehlungen zur Düngermenge und Düngerart gegeben werden im Vergleich zur aktuellen VDLUFA-Methodik. Eine nutzerfreundliche Software sollte Kalk-Applikationskarten im agroXML-Format für ISOBUS-fähige Terminals erzeugen.

Ziel 4: **Verfahrenstechnische Lösungen** zur ortsspezifischen Kalkausbringung: Es sollten Empfehlungen zur Auswahl und Nutzung von Technik gegeben werden.

Die Arbeiten wurden entsprechend der o.g. Hauptziele in drei Arbeitskomplexe und zwölf Arbeitspakete gegliedert, vgl. Abb. 3.2.1.

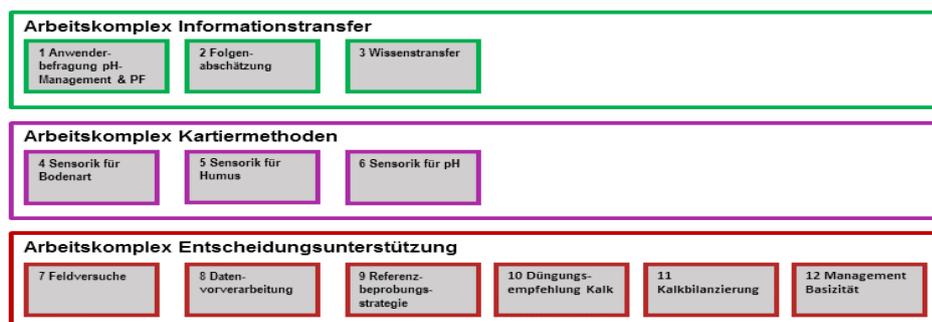


Abbildung 3.2.1: Projektstruktur nach Funktion der Arbeitspakete

Für die Arbeitspakete waren die folgenden Ergebnisse geplant:

Tabelle 3.2.1: Arbeitspakete (AP, vgl. Abb. 3.2.1) und erwartete Ergebnisse

AP	Geplante Ergebnisse
1	<ul style="list-style-type: none"> - Informationen zum Wissen und zur Motivation des pH-Managements in der Landwirtschaft Brandenburgs - Informationen zum Stand des Precision Farmings in der Landwirtschaft Brandenburgs - Feedback und Impulse für die Projektdurchführung
2	<ul style="list-style-type: none"> - Ökonomisch begründete Dienstleistungs- und Investitionsempfehlungen für Betriebe - Ökonomisch begründete Empfehlungen für eine Investitions- und Ausbildungsförderung sowie für ein Beratungsangebot PF in Brandenburg - Empfehlungen für ein Kompetenzzentrum Precision Farming
3	<ul style="list-style-type: none"> - Informations- und Ausbildungsmaterial - Informationsveranstaltungen und Seminare
4	<ul style="list-style-type: none"> - Hochauflösende Karten der Bodenart - Aussagen zur räumlichen Variabilität der Bodenart (Frequenz und Amplitude) in verschiedenen Regionen - Verfahren zur Generierung hochaufgelöster Bodenartenkarten (unterteilt in die acht Mineralbodenarten der Bodenschätzung) incl. Anleitung und Dokumentation - Bewertung der Bodenartenkartierung hinsichtlich der Genauigkeit - Kosten der Bodenartenkartierungsverfahren
5	<ul style="list-style-type: none"> - Hochauflösende Karten der organischen Substanz als Input für die Ermittlung des Düngungsbedarfs - Aussagen zur räumlichen Variabilität der organischen Substanz (Frequenz und Amplitude) in verschiedenen Regionen - Verfahrensbeschreibung Humuskartierung: Algorithmus zur Kartierung der organischen Bodensubstanz - Bewertung der Genauigkeit der Humuskartierung durch den OpticMapper - Kosten der Humuskartierung
6	<ul style="list-style-type: none"> - Hochauflösende Karten des pH-Wertes als Input für die Ermittlung des Düngungsbedarfs - Aussagen zur pH-Variabilität (Frequenz und Amplitude) in verschiedenen Regionen - Verfahren zur Kartierung des pH-Wertes - Verfahrensbeschreibung zur Kartierung des pH-Wertes - Bewertung der Kartiergenauigkeit des pH-Sensors - Verfahrenskosten
7	<ul style="list-style-type: none"> - Versuchspläne - Systematisch aufbereitete Daten - Ertragsfunktionen - Statistischer Vergleich von Kalkdüngungsstrategien
8	<ul style="list-style-type: none"> - Algorithmen für die Prüfung von Ertrags- und Sensordaten (Bodenart, pH, Humus) - Nutzerfreundliche Softwaremodule für die Transformation und Bereinigung von Sensordaten und Ertragsdaten
9	<ul style="list-style-type: none"> - Algorithmus Auswahl der Referenzprobenpunkte - Nutzerfreundliches Softwaremodul zu Auswahl von Punkten für Referenzproben
10	<ul style="list-style-type: none"> - Geprüfte stetige Funktionen zum Beschreiben der Zusammenhänge zwischen pH-Wert, Tongehalt, Humusgehalt und Kalkbedarf beschrieben - Routinen zur Berechnung von Applikationskarten sind als Modul für FMIS implementiert - Schnittstelle (Datenformat) für Streuterminale und Bordrechner gängiger Streuer ist implementiert
11	<ul style="list-style-type: none"> - Datenbank zur Abschätzung der Versauerung und Ca-Entzüge - Nutzerfreundliche Softwaremodule zur Kalkbilanzierung
12	<ul style="list-style-type: none"> - Empfehlungen zur Wahl saurer Düngemittel - Algorithmus zur Berechnung des „Säurebedarfs“ - Nutzerfreundliche Software zum Management von Böden mit pH-Bewertung DE

4 Projektverlauf

Die Bewilligung war mit der Auflage verbunden, nur für die landwirtschaftliche Praxis unbedingt notwendige Untersuchungen beizubehalten und die Projektkosten um ca. 30% zu reduzieren. Zur Umsetzung wurden die Arbeitskapazitätsplanungen für die Projektdurchführung reduziert, Arbeitspakete zur Bewertung von Düngungstechnik und zur Entwicklung einer einfachen Düngungs-App gestrichen sowie die aus wissenschaftlicher Sicht wichtigen Exaktversuche zur Verifizierung und Präzisierung der weiter entwickelten Kalkungsempfehlungen nicht angelegt.

Der bewilligte Maßnahmenbeginn 13.12.2016 verschob sich durch Probleme bei der Personalfindung auf April 2017. Die in den ersten Jahren aufgetretenen Schwierigkeiten mit der anfälligen und verschlissenen Sensortechnik und der laboranalytische Mehraufwand wurden Dank einer finanziellen Aufstockung in 2019 überwunden. Im weiteren Verlauf wurde bedingt durch die SARS-COV-2 Pandemie und ungünstige Wetterbedingungen für Felduntersuchungen in 2019 und 2020 ein Antrag auf Verlängerung des Projektes gestellt. Mit Änderungsbescheid vom 20.09.2021 wurde der Durchführungszeitraum vom 31.12.2021 um eine Vegetationsperiode auf den 30.09.2022 verlängert.

Ab Mitte 2019 wurden die mit der Softwareentwicklung verbundenen Aufgaben von FGL auf iXmap als unmittelbaren Softwareentwickler übertragen. So konnte in direktem Austausch mit iXmap die umfassende pH-BB-Toolbox fertig programmiert werden.

In Tab. 4.1 ist der zeitliche Projektverlauf beschrieben.

Tabelle 4.1: Beschreibung des jahresweisen Projektfortschritts nach Arbeitspaketen

Arbeitspakete	2017	2018	2019	2020	2021	2022
AP 1 Anwenderbefragung	- Erstellung einer wissensvermittelnden Umfrage zur Kalkdüngung und Precision Farming für Landwirte	- Durchführung Umfrage (50 fertige Fragebögen) - Zwischenevaluierung und Nachbesserung bei Umfragebögen	- Durchführung Umfrage - Bewerbung Umfrage mit Teilnahme an Verlosung (Sensorbefragung)	- Durchführung Umfrage	- Zielerreichung, 163 ausgefüllte Fragebögen - Ca. 10 % der LN Brandenburgs (11.849 ha)	- Auswertung der Umfragen
AP 2 Ökonomische Bewertung			- Kostenbewertungen für den Einsatz der Sensorplattform als Dienstleistung		- Weiterführung der ökonomischen Bewertung in Zusammenarbeit mit Experten (Experteninterviews)	- Erstellung Empfehlung zu Investitions-, Ausbildungs-, Beratungsmöglichkeiten sowie Erörterung Kompetenzzentrums
AP 3 Wissenstransfer		- Teilnahme an div. Konferenzen, EIP-Workshops und Feldtagen - div. Vorträge und Veröffentlichungen (siehe Blatt zur Publizität) - Entwicklung Leitfaden für Außenkommunikation - eigene Homepage	- Teilnahme an div. Konferenzen, EIP-Workshops und Feldtagen - div. Vorträge und Veröffentlichungen (siehe Blatt zur Publizität)	- Teilnahme an div. Konferenzen und Feldtagen - div. Vorträge und Veröffentlichungen (siehe Blatt zur Publizität)	- Teilnahme an div. Konferenzen und Feldtagen - div. Vorträge und Veröffentlichungen (siehe Blatt zur Publizität) - Einschränkungen durch COVID-19 - Durchführung Schulung zur Softwareentwicklung	- Teilnahme an div. Konferenzen, EIP-Workshops und Feldtagen - div. Vorträge und Veröffentlichungen (siehe Blatt zur Publizität) - Vorstellung der Software beim MLUK 04.05.2022 - Sondierung der Softwareeinbindung in die GeoBox _{BB}
AP 4 Sensorik Bodentextur	- Sensorbefahrung und Referenzprobennahme auf den Feldversuchsflächen	- Sensorbefahrung, Referenzprobennahme und Erstellung von Bodentexturkarten bei OG-Partnerbetrieben	- Sensorbefahrung, Referenzprobennahme und Erstellung von Bodentexturkarten bei OG-Partnerbetrieben - Bodenfeuchtemessungen parallel zu Geophilus-Messungen nötig	- Sensorbefahrung, Referenzprobennahme und Erstellung von Bodentexturkarten bei OG-Partnerbetrieben	- Sensorbefahrung, Referenzprobennahme und Erstellung von Bodentexturkarten bei OG-Partnerbetrieben - Ergebnisse zur Variabilität der Bodeneigenschaften auf allen OG-Betrieben - Datenbank für Referenzdaten - Datenbank für Sensordaten	- Sensorbefahrungen, Referenzprobennahmen und Erstellung von Bodentexturkarten bei OG-Partnerbetrieben - Anbindung der Datenbank für Sensordaten in Algorithmus
AP 5 Sensorik Boden-Humus	- Sensorbefahrungen und Referenzprobennahme auf den Feldversuchsflächen mit VisNIR-Spektrometer (Multi-Sensor-Plattform)	- Sensorbefahrungen mit VisNIR und neuen Optic Mapper, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Bodenhumusgehaltes bei OG-Partnerbetrieben	- Sensorbefahrungen mit Optic Mapper, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Bodenhumusgehaltes bei OG-Partnerbetrieben	- Sensorbefahrungen mit Optic Mapper, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Bodenhumusgehaltes bei OG-Partnerbetrieben - Neue Multisensorplattform (MSP) - Bewertung Praxistauglichkeit der Sensoren (VisNIR und Optic Mapper)	- Sensorbefahrungen mit Optic Mapper, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Bodenhumusgehaltes bei OG-Partnerbetrieben	- Algorithmus für Humuskartenerstellung in Software implementiert - WebGIS Anwendung

Tabelle 4.1 (Forts.): Beschreibung des jahresweisen Projektfortschritts nach Arbeitspaketen

Arbeitspakete	2017	2018	2019	2020	2021	2022
AP 6 Sensorik Boden-pH	- Sensorbefahrungen und Referenzprobennahme auf den Feldversuchsflächen mit pH-Mapper (Multi-Sensor-Plattform)	- Sensorbefahrungen, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Boden-pH bei OG-Partnerbetrieben	- Sensorbefahrungen, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Boden-pH bei OG-Partnerbetrieben	- Sensorbefahrungen, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Boden-pH bei OG-Partnerbetrieben - Wiederholungsmessungen mit neuer MSP	- Sensorbefahrungen, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Boden-pH - Vergleichende Untersuchungen zur schlagunabhängigen pH-Sensordaten Kalibrierung	- Sensorbefahrungen, Referenzprobennahme und Erstellung von Karten des Boden-pH bei OG-Partnerbetrieben
AP 7 Feldversuche	- Festlegung der Feldversuchsflächen - Kalkungsvorversuche zur Ausbringungsgenauigkeit bei Kalkstreuung	- Durchführung Kalkungsversuche auf Feldversuchsflächen - Erneute Sensorbefahrung Feldversuchsflächen und UAV Überfliegung	- Zwischenbericht	- Aufgrund Trockenheit Vorjahre (Ernteausfälle) → Verlängerung Kalkungsversuche	- Nachholung (wg. Trockenheit) Feldkampagne auf Versuchsflächen	- Auswertung der Kalkungsversuche
AP 8 Datenvorverarbeitung		- Entwicklung von Algorithmen für die Software		- Skripte zur Bereinigung der Sensordaten fertig und in Softwarepaket (r) implementiert	- Algorithmus zur Ertragskorrektur in Bearbeitung	- Skripte in WebGIS Anwendung iXmap implementiert
AP 9 Referenzprobenstrategie		- Erste Referenzprobenstrategie für Bodentextur-, Humus- und Boden-pH-Daten	- Weiterentwicklung und Fertigstellung der Algorithmen und Routinen für die Software		- Referenzprobenstrategie fertig - Minimierung der Referenzproben durch Sensordatenfusion	- Referenzprobenalgorithmus in WebGIS Anwendung iXmap implementiert
AP 10 Düngungsempfehlung Kalk		- Erste Routinen für Applikationskarten von Kalk für auf Feldversuchsflächen		- Erste Etappe der Softwareprogrammierung weitgehend abgeschlossen	- Implementierung Kalkbedarfsalgorithmus in Software	- Außerhalb des Projektrahmens Vergabe der Aufgaben zur Entwicklung einer einfachen Düngungs-App
AP 11 Kalkbilanzierung		- Literaturrecherche Kalkentzüge	- Erstellung eines Konzepts zur Datenaggregation von Kalk-Streukarten - in erster Entwicklungsetappe (von Bodenkarten für Textur/pH/Humus zu Kalk-Streukarten)	- Beginn Implementierung Kalkentzugswerte in Software		- Übernahme Ergebnisse in Praxisblatt
AP 12 Management Basizität		- Bodenuntersuchung auf die Basenneutralisationskapazität (BNK) zur Ableitung des Säurebedarfes basischer Böden - Anlage eines Gipsstreifenversuchs		- Keine signifikante pH-Änderung bei Gips-Versuchen erkennbar → weitere pH-Kartierungen	- Vorhersage von pH-Wert und Kalkbedarf nach BNK mittels Veris-Sensordaten (Vis NIR, pH, EC, OM) erfolgreich getestet	-

5 Projektergebnisse

5.1 Ergebnisse

Im Abschnitt 5.1 werden die Ergebnisse und Erkenntnisse in der Reihenfolge der Arbeitspakete (APs) berichtet. Innovative Erkenntnisse sind ***kursiv und fett*** hervorgehoben.

5.1.1 AP 1 „Anwenderbefragung zum pH-Management und zu Precision Farming“

Die Ergebnisse sind in den Praxisblättern 01 „Bedarf und Nutzen standortspezifischer Kalkung“ und 02 „Leitfaden präzise Kalkung und die pH-BB-Toolbox zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.1 und 8.3.2. Im Rahmen der Umfrage wurden Informationen zum vorhandenen Wissen, zur Motivation und zur bestehenden Praxis des pH-Managements in der Landwirtschaft Brandenburgs erhoben. Hürden im Bezug auf das Precision Farming bei der Kalkung wurden ermittelt. Rückmeldungen und Impulse aus der Praxis wurden in den laufenden Forschungsprozess des Projektes mit eingebunden. Der Fragebogen war so gestaltet, dass er zugleich als ***Informationsgeber zum pH-Management und über neue technische Lösungen*** im Bereich Precision Farming dient.

163 Betriebe nahmen teil, von 161 Betrieben wurden auswertbare Angaben mit der Umfragesoftware QuestionPro erfasst. Die 161 Betriebe bewirtschaften zusammen 121.960 ha Ackerland, 11.849 ha Grünland und 150 ha Dauerkulturen. Das entspricht nahezu 10% der landwirtschaftlichen Flächen Brandenburgs. Zahlenmäßig haben ca. 3% der Brandenburger Betriebe an der Umfrage teilgenommen, wobei eine gute Verteilung auf die gesamte Brandenburger Landesfläche gewährleistet werden konnte (mit Schwerpunkt: Ost-Brandenburg). Die durchschnittliche Betriebsgröße der Teilnehmer liegt bei 832 Hektar, also etwa bei der dreifachen Größe des Brandenburger Durchschnittswerts. Ergebnisse der Umfrage: Die Betriebe ordnen ihre Flächen überwiegend (insgesamt 77 % aller Betriebsflächen) den leichten Bodengruppen (BG 1-3) zu, vgl. Abb.5.1.1. 14 % der Betriebe haben keine Zuordnung der Schläge zu Bodengruppen vorgenommen. 42% ordnen ihre Schläge nur einer Bodengruppe zu. 47% der Befragten haben Kenntnisse über die Heterogenität der Böden ihrer Schläge und können Schlagunterteilungen nach Bodengruppen vornehmen.

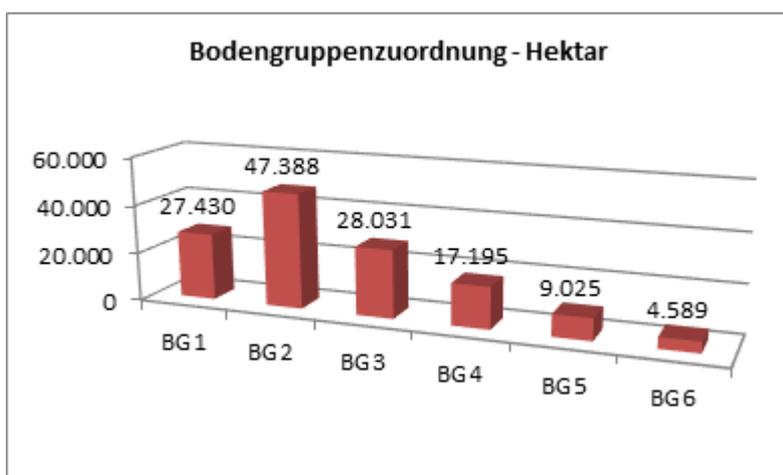


Abb. 5.1.1.: Zuordnung der Betriebsflächen zu Bodengruppen

Fast 72% der Befragten geben an, drei oder mehr Bodengruppen zu bewirtschaften. Für fast 90% der Flächen wurde die Schlagheterogenität des Bodens als mittel bis hoch eingeschätzt. 80% der Betriebe gaben an, den optimalen pH-Wert für ihre Böden zu kennen. 72% orientieren

sich dabei an der Vorgabe des VDLUFA für die Bodenartengruppen. Trotzdem wünschen 94% der befragten Landwirte genauere und 31% von ihnen möglichst kleinräumige Erkenntnisse zur Heterogenität ihrer Böden um den pH-Wert an jeder Stelle optimal regulieren zu können. Im Vergleich zur Erhebung von Zimmer & Ellmer (2012), nach der 26% der landwirtschaftlichen Flächen Brandenburgs in der pH-Gehaltsklasse C liegen, legt die Auswertung einen Anstieg dieses Flächenanteils auf 39% nahe, vgl. Abb. 5.1.2. Unter diese Annahme weisen immer noch 28% der Flächen für Kalk eine Überversorgung (pH-Klassen D, E) und 33% der Flächen eine Unterversorgung (pH-Klassen A, B) auf. Ursache: 82% der Landwirte kennen den jährlichen CaO-Verlust ihrer Schläge nur ungefähr und 16% der Landwirte eher nicht. Zwei Drittel der Befragten kalken unabhängig von den Ergebnissen der letzten Bodenuntersuchung ihre Böden in regelmäßigen Abständen.

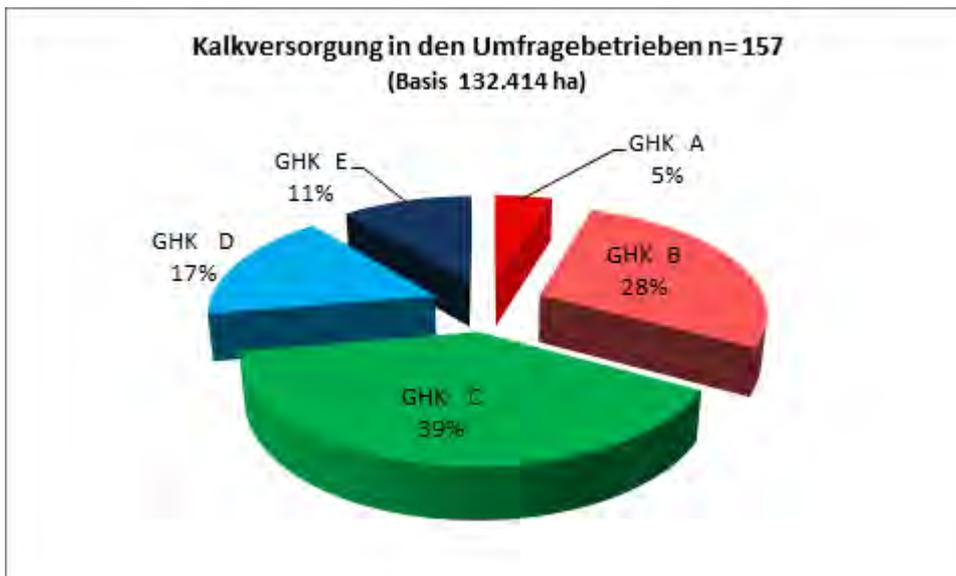


Abb. 5.1.2.: Auswertung der letzten Bodenuntersuchungen (2015 - 2021)

49% der Betriebe hat vor der Bodenuntersuchung keine gezielte Einteilung der Schläge nach Bodenqualität oder Ertragspotential vorgenommen. Die Untersuchungen fanden hier im gleichförmigen 3-, 5-, oder 10-Hektarraster statt oder es wurde je Schlag nur eine Bodenmischprobe erstellt. 51% der Betriebe hat zuvor gezielte, ungleichmäßige Rastereinteilungen vorgenommen. Grundlagen waren dafür in 42% der Fälle **Bodenschätzungskarten**, in 31% der Fälle Luftbilder, 14% der Befragten gaben Ertragskarten, 4% Leitfähigkeitsmessungen und 9% Sonstiges an. **Nur in 3 Fällen** wurde die recht teure, aber objektive Sedimentationsanalyse im Labor beauftragt.

5.1.2 AP2 „Ökonomische und ökologische Folgenabschätzung“

Die Ergebnisse sind im Praxisblatt 11 „Ökonomische Bewertung der präzisen Kalkung“ zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.11. Die entwickelte hochaufgelöste teilflächenspezifische Applikationsberechnung trägt dazu bei, Kalk deutlich effizienter zu nutzen. Die Notwendigkeit und die ökonomischen Potenziale einer räumlich hochauflösenden (enger als 30*30 m) sensorgestützten Bodenkartierung wurden nachgewiesen. Insbesondere bei starken Feldheterogenitäten sind deutliche ökonomische Effekte nachweisbar. Ökonomische Effekte sind einerseits über die Nutzung des Ertragssteigerungspotentials und andererseits über

Ressourceneinsparung beim Kalk realisierbar. Die Werte von Bodentextur, pH-Wert und Humusgehalt des Bodens als bestimmende Parameter für die Kalkungsmenge (Methode VDLUFA) ändern sich im Laufe der Zeit unterschiedlich schnell. Entsprechend sind die Zeitskalen für Wiederholungsmessungen (Sensor-Kartierungsintervall) verschieden. Präzises Management erfordert Mehrkosten für Feldsensorik und Ausbringungstechnik. Für jeden Bodenparameter ergibt sich ein anderer Kostenschwerpunkt (Investition, Verschleiß, Betrieb). Dies kann Leitmotiv für zukünftige Kostensenkung und Weiterentwicklung der Sensortechnik sein.

Zur individuellen **Kostenberechnung der präzisen Kalkung wurde ein Kalkulator** für Betriebe entwickelt. Berücksichtigt werden u.a. Investitionen für eine Anschaffung von Sensoren im eigenen Betrieb, alternativ der Kartierung als Dienstleistung. Für verbreitete Fruchtfolgen in Brandenburg wurde unter Anwendung der im Projekt entwickelten Methoden der Mehrertrag berechnet. In Szenarien wurden die Ertragswerte (dt/ha) in ihren Mindest- (MIN), Durchschnitts- (D) und Höchstwerten (MAX) variiert. Kernergebnis ist, dass sich eine präzise sensorgestützte Kalkung unter allen Annahmen „rechnet“, vgl. Tab. 5.2.1. Variierende Schlag zu Schlag Ergebnisse sind auf das vorhergehende (Fehl-) Management zurückzuführen. Zu beachten ist, dass die sensorgestützte Texturkartenerstellung eine einmalige Investition darstellt, jedoch für weitere Anwendungen der präzisen Landwirtschaft (Aussaat, Bodenbearbeitung, Betriebsgröße, Feldform, etc.) genutzt werden kann.

Empfehlungen für die **Fruchtfolgegestaltung nach Kalkungsbedürftigkeit** können abgeleitet werden. Der Kalkulator ist als Tool für Berater und Dienstleister sowie als Angebot eines vorgeschlagenen Kompetenzzentrums Precision Farming für Brandenburg geeignet.

Ein Beispiel für eine ökonomische Bewertung der einheitlichen Kalkung im Vergleich zur sensorgestützten Teilflächenkalkung ist im Anhang 8.3.11 im Praxisblatt 11 in Tab. 1 enthalten.

5.1.3 AP 3 „Wissenstransfer“

Im separaten **Anhang 8.4** sind alle Aktivitäten zum Wissenstransfer in Praxis und Wissenschaft enthalten. Weil der Anhang nicht öffentlich ist, sind im Folgenden die wichtigsten Beiträge für den direkten und den indirekten Transfer der Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis aufgelistet, s. a. Abschn. 7.2:

5.1.3.1 Praxisadressierte Fachartikel und Transferpublikationen

- Kling, C., Lück, K., Schröter, I., Bönecke, E., Vogel, S., Bettoni, M., Meyer, S., Philipp, G., Scheibe, D., Zieger, K., Nagel, A., Palme, S., Schubert, T., Fahle, K., Sorge, S., Liftenegger, A., Kramer, E., Rühlmann, J. (2022): Kalken je nach Standort. *Bauernzeitung* Nr. 31 vom 5.8.22, S. 29-31.
- Vogel, S.; Lück, K., Gebbers, R., D., Rühlmann, J., Scheibe, D., Kling, Ch., Bönecke, E., Schröter, I., Philipp, G., Nagel, A., Zieger, K., Meyer, S., Gerlach, F., Palme, S., Kramer, E. (2019): Kalkdüngung – aber bitte präzise. *LOP-Pfluglos* 08/2019 S.44-49. URL: http://ph-bb.com/wp-content/uploads/2019/09/LOP_August_2019_pH-BB.pdf
- Scheibe, D. (2019): EIP-Agri - pH-BB: Präzise Kalkung in Brandenburg. *LBV Magazin* (Landwirtschaftliche Beratung der Agrarverbände Brandenburg GmbH)
- Vogel, S., Scheibe, D. (2020): Den pH-Wert für jede Stelle des Schlages optimal einstellen. *Bauernblatt* Schleswig-Holstein und Hamburg 202, 19.9.2020, S. 30-33
- Vogel, S., Schröter, I., Kling, C., Meyer, S., Kramer, E., Rühlmann, J., Gebbers, R., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Nagel, A., Schwarzlose, U. (2020): Praxisnah geforscht: Den pH-Wert für jede Stelle des Schlages optimal einstellen - wie geht das? *Bauernzeitung* | Acker- und Pflanzenbau
- Vogel, S.; Scheibe, D. (2018): pH-Wert nach Bedarf. *Bauernzeitung*. Für Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt. 30. Wo. 2018, S. 26-29.

5.1.3.2 Praxisadressierte Vorträge und Poster

- Gebbers, R., Vogel, S. (2019): Kalk auf den Punkt: Teilflächenspezifische Kalkdüngung. Forenvortrag *Agritechnica*, 15.11.2019, Hannover
- Kling, C. (2019): Präzise Kalkung in BB Brandenburg, *Naturland-Ackerbautagung*, 04.02.2019, Seddin (BB)
- Kling, C. (2019): Präzise Kalkung in Brandenburg – Projektvorstellung und erste Ergebnisse, *Öko-Feldtage*, 03.07.2019, Frankenhausen/Hessen
- Kling, C., Bönecke, E., Schröter, I., Vogel, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Gebbers, R., Kramer, E., Rühlmann, J. (2021): Bedarfsgerechte Kalkversorgung durch Teilflächeneinteilung unter heterogenen Bodenbedingungen. *KTBL-Tage 2021: Boden gut machen – neue Ackerbausysteme*, online, 16. und 17.03.2021
- Kling, C., Bönecke, E., Schröter, I., Vogel, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Gebbers, R., Kramer, E., Rühlmann, J. (2021): Standortgerechte Kalkungsempfehlungen mittels Bodensensoren. *Fortbildung Pflanzenbau 2021*, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen. Kassel, 09. und 10.11.2021, online.
- Kling, C., Vogel, S., Schröter, I., Nagel, A., Lück, K., Philipp, G., Scheibe, D., Fahle, K., Meyer, S., Zieger, K., Schwarzlose, U., Gerlach, F., Palme, S., Kramer, E., Rühlmann, J., Gebbers, R. (2018): Projektuntersuchungen pH-BB: Präzise Kalkung in Brandenburg. Vortrag zum *EIP-Agri-Fachaustausch* Wissenschaft und Praxis „Bodenfruchtbarkeit“, Marquardt, 14. November 2018.
- Kramer, E. (2021): Average particle diameter - basis for efficient fertilizing. *EIP-AGRI seminar* “Healthy soils for Europe”, 13.04.21, online
- Kramer, E., Kling, C., Rühlmann, J., Schröter, I., Bönecke, E., Vogel, S., Fahle, K., Schwarzlose, U., Bettoni, M., Meyer, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Nagel, A., Palme, S., Gerlach, F., Gebbers, R. (2020) Potentiale mobiler Bodensensoren zur standortangepassten Düngung am Beispiel der Kalkung. *Zertifikatskurs „Digitaler Pflanzenbau im Jahreszyklus“*. 21.7.2020. Ostrau. Eingeladener EIP-Transfervortrag.
- Kramer, E., Rühlmann, J., Gebbers, R., Scheibe, D., Palme, S., Kling, Ch., Lück, K., Philipp, G., Meyer, S., Vogel, S., Nagel, A. (2018): Kalkung — Digitale Ermittlung des pH-Wertes: Das EIP Projekt „Präzise Kalkung in Brandenburg“. *Ackerbauforum Landwirtschaft* der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft und des Landwirtschaftsamtes Zeulenroda. Eingeladener Vortrag am 30.01.2018 in Langenwetzendorf.
- Kramer, E.; Rühlmann, J.; Bönecke, E.; Schröter, I.; Scheibe, D.; Fahle, K.; Böttcher, F.; Meyer, S. (2022): Teilflächendifferenziert-optimiertes Nährstoffmanagement im Ackerbau (TONIA). Ziele und Ansätze im EIP-Agri-Verbundvorhaben. 6. Brandenburger *EIP-Erfahrungsaustausch* Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit 22.06.2022. BLAK Seddiner See, Vortrag
- Kramer, E., Rühlmann, J., Schröter, I., Bönecke, E., Vogel, S., Schwarzlose, U., Bettoni, M., Meyer, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Kling, C., Nagel, A., Zaimche, Z., Palme, S., Gerlach, F., Gebbers, R., Schubert, T., Fahle, K., Sorge, S., Liftenegger, A. (2021): Schätzt Du noch oder misst du schon? *Praxisworkshop „pH-BB Toolbox und präzise Kalkung“* in Kooperation mit der Brandenburgischen Landwirtschaftsakademie und dem Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie. 27.10.2021, Potsdam.
- Kramer, E., Rühlmann, J., Schröter, I., Bönecke, E., Vogel, S., Schwarzlose, U., Bettoni, M., Meyer, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Kling, C., Nagel, A., Zaimche, Z., Palme, S., Gerlach, F., Gebbers, R., Schubert, T., Fahle, K., Sorge, S., Liftenegger, A. (2021) Digitale Erfassung der Standortheterogenität: Potentiale mobiler Bodensensoren zur standortangepassten Düngung am Beispiel der Kalkung. *Zertifikatskurs „Precision Farming im Jahreszyklus“*. 28.9.2021, Ostrau. Eingeladener EIP-Transfervortrag.
- Kramer, E., Rühlmann, J., Schröter, I., Bönecke, E., Vogel, S., Schwarzlose, U., Bettoni, M., Meyer, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Kling, C., Nagel, A., Zaimche, Z., Palme, S., Gerlach, F., Gebbers, R., Schubert, T., Fahle, K., Sorge, S., Liftenegger, A. (2022): Wie kann ich die Bodenfruchtbarkeit meiner Böden in der Praxis richtig einschätzen? 26. *Brandenburger Düngetag*, 27. Januar 2022, Prenzlau. Eingeladener EIP-Transfervortrag.
- Kramer, E., Rühlmann, J., Schröter, I., Bönecke, E., Vogel, S., Schwarzlose, U., Bettoni, M., Meyer, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Kling, C., Nagel, A., Zaimche, Z., Palme, S., Gerlach, F., Gebbers, R., Schubert, T., Fahle, K., Sorge, S., Liftenegger, A. (2021): Teilflächenspezifische Kalkung: Standortpotentiale optimal nutzen. *Naturland-Tagung „Digitalisierung im ökologischen Pflanzenbau“*, 23.11.2021, Online
- Liftenegger, A., Sorge, S. (2022) Ökonomische Bewertung von Precision Farming. *Jahrestreffen der HNEE-Partnerbetriebe 2022*, HNE Eberswalde, 07.02.2022, Online
- Liftenegger, A.; Sorge, S.; Kling, C.; Schröter, I.; Nagel, A.; Bönecke, E.; Vogel, S.; Meyer, S.; Philipp, G.; Zaimche, Z.; Zieger, K.; Lück, K.; Scheibe, D.; Fahle, K.; Kramer, E.; Gebbers, R.; Rühlmann, J. (2022): Wirtschaftliche Bewertung der Präzisen Kalkung am Beispiel von Gut Wilmersdorf GbR. *HNEE-Feldtag* 14.6.2022, Wilmersdorf. Vortrag und Poster
- Nagel, A. (2019): Präzise Kalkung in Brandenburg – Projektvorstellung und erste Ergebnisse (Postervorstellung), *BraLa 2019*, 09.05.2019, Paaren/Glien
- Nagel, A., (2022) Die pH-BB Toolbox, 6. Bundesweiter Workshop für Operationelle Gruppen (OGs) und Innovationsdienstleister (IDL), Hannover, 07.-08.09.2022
- Philipp, G. (2021): Pflanzenbau und Humusaufbau im Rahmen eines konventionellen Marktfruchtbetriebes, *Weiterbildungslehrgang Demeter eV*, online 09.10.2021
- Rühlmann, J. (2020): pH-BB – Präzise Kalkung in Brandenburg basierend auf hochaufgelösten Bodensensordaten. 24. *Brandenburger Düngetag*, 30.01.2020 Prenzlau
- Rühlmann, J. (2022): Einfluss von Bodenart und Wasserangebot im Nachbau in der Apfelproduktion: Ergebnisse aus dem Feldversuch Apfel sowie Rückschlüsse aus 3D-Bodenkarten mit geophysikalischen Messungen. Tagung - *Gartenbauverband Berlin-Brandenburg e.V.*, 26.01.2022, Online

- Rühlmann, J., Bönecke, E., Schröter, I., Vogel, S., Schwarzlose, U., Bettoni, M., Meyer, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Zieger, K., Kling, C., Nagel, A., Zaimche, Z., Palme, S., Gerlach, F., Gebbers, R., Schubert, T., Fahle, K., Sorge, S., Liftenegger, A., Kramer, E. (2021): Das Projekt pH-BB: Teilflächenspezifische Kalkung – von den Sensordaten zur Applikationskarte. *Fachtagung „Landwirtschaft im Dialog. Einblicke in die teilflächenspezifische Bewirtschaftung“*. Trebbin 7.10.2021
- Scheibe, D., Kling, C. (2018): Präzise Kalkung in Brandenburg. Poster auf der *BraLa 2018* Paaren/Glien
- Schröter, I. (2018) Präzise Kalkung in Brandenburg. *EIP-Workshop Precision Farming*, Bonn, 5.-6.11.2018
- Schröter, I.; Bönecke, E.; Vogel, S.; Meyer, S.; Kling, C.; Philipp, G.; Lück, K.; Scheibe, D.; Fahle, K.; Nagel, A.; Zaimche, Z.; Liftenegger, A.; Sorge, S.; Zieger, K.; Kramer, E.; Gebbers, R.; Rühlmann, J. (2022): Die pH-BB Toolbox - Ein Werkzeugkasten für die Erstellung von Bodenkarten und zur einfachen Umsetzung der präzisen Kalkung. *HNEE-Feldtag* 14.6.2022, Wilmersdorf. Vortrag und Poster
- Vogel, S. (2021): Teilflächenspezifische Düngung durch sensorbasierte Bodenkartierung. *EIP-Agri Workshop Bodensensorik*, 21.10.2021, Göttingen
- Vogel, S., Philipp, G., Schwarzlose, U. (2018): Präzise Kalkung in Brandenburg: das Verbundprojekt pH-BB. Informationen zur Bedeutung der Acidität, Sensorvorführung. Poster, Vorstellung pH-BB, Vorträge. *Feldtag der FGL*, Steinhöfel
- Vogel, Sebastian (2018): Präzise Kalkung in Brandenburg im Bezug auf die Kalk-Industrie. Nossen, *Landesarbeitskreis Düngung*, 18.10.2018

5.1.3.3 Wissenschaftliche Fachartikel und Transferpublikationen

- Bönecke, E., Meyer, S., Vogel, S., Schröter, I., Gebbers, R., Kling, C., Kramer, E., Lück, K., Nagel, A., Philipp, G., Gerlach, F., Palme, S., Scheibe, D., Zieger, K., Rühlmann, J. (2020): Guidelines for precise lime management based on high-resolution soil pH, texture and SOM maps generated from proximal soil sensing data. *Precision Agriculture*, <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09766-8>
- Horf, M., Bönecke, E., Gebbers, R., Kling, Ch., Kramer, E., Rühlmann, J., Schröter, I., Schwanghart, W., Vogel, S. (2022): Utility of visible and near-infrared spectroscopy to predict base neutralizing capacity and lime requirement of quaternary soils. *Precision Agriculture* (2022). <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09945-9>
- Rühlmann, J., Bönecke, E., Meyer, S. (2021): Predicting the lime demand of arable soils from pH value, soil texture and soil organic matter content. *Agronomy* 2021, 11, 785. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040785>
- Vogel, S., Bönecke, E., Kling, C., Kramer, E., Lück, K., Nagel, A., Philipp, G., Rühlmann, J., Schröter, I., Gebbers, R. (2020): Base neutralizing capacity of agricultural soils in a quaternary landscape of Central Europe and its relationship to best management practices in lime requirement determination. *Agronomy* 2020, 10(6), 877; <https://doi.org/10.3390/agronomy10060877>
- Vogel, S., Gebbers, R., Oertel, M., Kramer, E. (2019): Evaluating causes of biomass variability in grassland by remote and proximal sensing. *Sensors* 2019, 19, 4593. doi: 10.3390/s19204593.
- Vogel, S.; Bönecke, E.; Kling, C.; Kramer, E.; Lück, K.; Philipp, G.; Rühlmann, J.; Schröter, I.; Gebbers, R. (2022): Direct prediction of site-specific lime requirement of arable fields using the base neutralizing capacity and a multi-sensor platform for on-the-go soil mapping. *Precision Agriculture*.p. 127-149. Online: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09830-x>

5.1.3.4 Vorträge und Poster auf wissenschaftlichen Veranstaltungen

- Bönecke, E.; Gebbers, R.; Schröter, I.; Kramer, E.; Rühlmann, J. (2022): Direkte sensorgestützte Vorhersage des teilflächenspezifischen Kalkbedarfs auf Feldskala unter Verwendung der Basenneutralisationskapazität. Jahrestagung der *Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (DBG) 2022, Trier 07.09.2022, Vortrag ID 375.
- Bönecke, E.; Meyer, S.; Vogel, S.; Schröter, I.; Gebbers, R.; Kling, Ch.; Kramer, E.; Rühlmann, J. (2022): Standortangepasstes Kalkbedarfsmanagement mittels Sensor- und modellgestützter Verfahren. 133. *VDLUFA Kongress*, Halle (Saale), 15.9.22
- Bönecke, E.; Schröter, I.; Vogel, S.; Meyer, S.; Kling, C.; Philipp, G.; Lück, K.; Scheibe, D.; Fahle, K.; Schubert, T.; Nagel, A.; Zaimche, Z.; Liftenegger, A.; Sorge, S.; Zieger, K.; Kramer, E.; Gebbers, R.; Rühlmann, J. (2022): Precision Lime Management Improved lime demand algorithm for high-resolution soil maps. Vortrag und Poster. Jahrestagung der *Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (DBG), Trier, 7.9.2022. Poster-Vortrag ID 578.
- Bönecke, E.; Vogel, S.; Schröter, I.; Meyer, S.; Kling, C.; Lück, K.; Philipp, G.; Scheibe, D.; Gebbers, R.; Kramer, E.; Rühlmann, J. (2020): Precision Lime Management: A Sensor-based Soil Mapping Approach. Vorträge und Poster. XVI *European Society for Agronomy Congress*. Sevilla, Spanien (online), 01.-03.09.2020
- Kling, C., Meyer, S., Schröter, I., Vogel, S., Gerlach, F., Lück, K., Nagel, A., Palme, S., Philipp, G., Scheibe, D., Schwarzlose, U., Gebbers, R., Rühlmann, J., Kramer, E. (2019): Berücksichtigung der Bodenvariabilität bei der Kalkausbringung. [lime-application considering soil variability.] In: Mühlrath, Daniel; Albrecht, Joana; Finckh, Maria R.; Hamm, Ulrich; Heß, Jürgen; Knierim, Ute und Möller, Detlev (Hrsg.) *Innovatives Denken für eine nachhaltige Land- und Ernährungswirtschaft. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, Kassel, 5. bis 8. März 2019, Verlag Dr. Köster, Berlin. URL https://orprints.org/id/eprint/36162/1/Beitrag_235_final_a.pdf
- Kling, C., Schröter, I., Meyer, S., Vogel, S., Philipp, G., Lück, K., Scheibe, D., Rühlmann, J., Gebbers, R., Kramer, E. (2019): Potential sensorbasierter Texturkarten zur Bewertung des Kalkversorgungszustandes. In: 62. Jahrestagung der *Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* e. V.: Landscape matters – Agrarlandschaften der Zukunft; 10, bis 12. September 2019, Berlin. Kurzfassungen der Vorträge und Poster. Göttingen 2019. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Band 31: S. 33-34.
- Meyer, S., Kling, C., Vogel, S., Schröter, I., Nagel, A., Kramer, E. (2019): Creating soil texture maps for precision liming using electrical resistivity and gamma ray mapping. In Stafford, J. V. (Ed.) *Precision Agriculture'19 Proceedings of the 12th European Conference on Precision Agriculture*, 8.7.2019, 539 – 546. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_67

- Meyer, S., Rühlmann, J., Bönecke, E., Kramer, E., Marzahn, P. (2022): Prediction of soil texture using optical and microwave earth observation data in a random forest approach. EGU – *European Geosciences Union General Assembly* 2022, Vienna, Austria & Online, 23–27 May 2022.
- Schröter, I., Vogel, S., Mayer, S., Kling, C., Rühlmann, R., Gebbers, R., Kramer, E. (2018): Präzise Kalkung durch Integration hochauflösender Bodensensorik: Erste Ergebnisse des pH-BB Projektes. In: Ruckelshausen, A., Meyer-Aurich, A., Borchard, K., Hofacker, C., Loy, J.-P., Schwerdtfeger, R., Sundermeier, H.-H. F. & Theuvsen, B. (Hrsg.): *Proceedings 38. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V. (GIL)*. 26. und 27. Februar 2018 - Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. S. 223-226.
- Schröter, I.; Kling, Ch.; Vogel, S.; Bönecke, E.; Rühlmann, J.; Kramer, E. (2022): Abschätzung des Humusgehalts auf der Feldskala – Was bringen hochaufgelöste RGB Satellitenbilder von Google Earth, Esri und Bing Maps? *Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG)* 2022, Trier, 6.9.2022. Vortrag ID 660
- Vogel, S.; Gebbers, R.; Schröter, I.; Kramer, E.; Bönecke, E.; Rühlmann, J.; Kling, Ch. (2022): Direkte sensorgestützte Vorhersage des teilflächenspezifischen Kalkbedarfs auf Feldskala unter Verwendung der Basenneutralisationskapazität. 7.9.2022. Jahrestagung der *Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG)*, Trier, 5.-8.9.22. Vortrag ID 375.

Ziel des APs war die Sicherung und Verbreitung der im EIP-Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse zum pH-Management auf allen Akteursebenen. Es wurden interne und externe Kommunikationsplattformen eingerichtet. Eine zentrale projektinterne **Cloud** wurde auf den Servern der HNEE eingerichtet. Sie ermöglichte die strukturierte Ablage aller Dokumente, Daten, Zwischenergebnisse und Zuarbeiten sowie der Literatur und Ergebnisdokumente

Von besonderer Bedeutung war die **Nutzbarmachung geeigneter Werkzeuge für die Datenverarbeitung (QGIS-/R-Workshop)**. Die entwickelten Kurse wurden in das **Lehrangebot der HNEE** übernommen. Ebenso wurden für die Schulung der Praktiker zur Anwendung der Kalkungssoftware „pH-BB Toolbox“ **Workshops zur Entwicklung und Testung der pH-BB-Software** entwickelt und durchgeführt. Für die **externe** Darstellung des EIP- Projektes wurde die **Internetplattform „pH-BB.com“** eingerichtet. Auf ihr wurde die Wissen vermittelnde Projektumfrage realisiert, vgl. Abschn. 5.1.1. An die breite Betriebspraxis waren die **drei Veröffentlichungen in der Bauernzeitung** gerichtet, ebenso die Veröffentlichung in der **Landwirtschaft ohne Pflug**. Dem Ziel, wissenschaftliche Erkenntnisse in die Praxis zu übertragen, diente eine Reihe von **Fachvorträgen**, die Organisation von **Feldtagen**, Posterpräsentationen und **Messeausstellungen** (BRALA; Agritechnica). Außerdem wurden **Ausbildungsbeiträge** im Rahmen der Ausbildung von landwirtschaftlichen Meisterschülern und für PF-Spezialisten (im Land Sachsen gefördert) sowie an der HNEE geleistet.

Besonders weitreichende Ergebnispräsentationen, verbunden mit Feldvorführungen, fanden auf **mehreren Feldtagen** wie bspw. dem im Oktober 2021 beim der agt Agrar GmbH in Trebbin und bei der BLAK (Brandenburgische Landwirtschaftsakademie) **Schulung zur pH-BB Toolbox** am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB). Die im Projekt entstandenen **zwölf Praxisblätter** werden seit November 2022 in der Bauernverbands-Zeitschrift "LBV-Info" als Serie veröffentlicht, vgl. Anhang 8.3.

Regelmäßig beteiligte sich pH-BB an überregionalen Tagungen und Konferenzen. Für das Land Brandenburg wurde im Rahmen einer Fachtagung „EIP und LEADER eigentlich ein Traumpaar“ die Verbindungsmöglichkeit der Förderung erörtert. Am Beispiel des Leader-Projektes „Precision Farming“ konnte gezeigt werden, welche Grundlagen daraus in das EIP-Projekt „pH-BB“ eingeflossen sind.

5.1.4 AP4 „Sensorik für die Bestimmung der Bodenart“

Die Ergebnisse sind im Praxisblatt 03 „Bestimmung der Bodenart mittels mobiler Bodensensoren“ zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.3. Ziele von AP4 waren die

Generierung hochaufgelöster Bodentexturkarten aus Sensordaten und die Entwicklung eines Arbeitsablaufes zur sensorbasierten Kartierung, Sensordatenverarbeitung, -kalibrierung und Kartenerstellung.

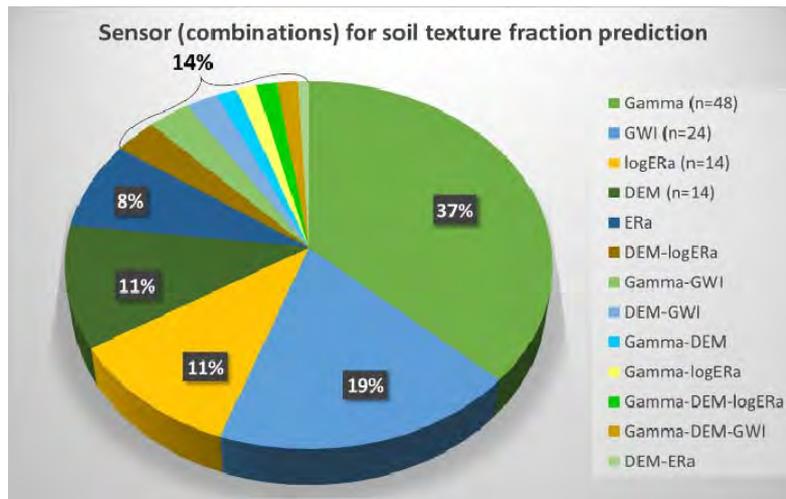


Abbildung 5.4.1: Übersicht über den signifikanten Beitrag von Sensoren und Sensorkombinationen zur Ableitung der Textur für die im Projekt kartierten Schläge

Ergebnisse externer Voruntersuchungen der elektrischen Leitfähigkeit (EC = 1/elektr. Widerstand) von Quarzsand zeigten, dass sich die Einflüsse von Wassergehalt und Trockenrohdichte sehr gut modellhaft abbilden lassen, vgl. Abb. 5.4.2. Zusammen mit Ergebnissen international publizierter Labordaten wurde folgende Gewichtung der Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand festgestellt: Textur >> Wassergehalt > Trockenrohdichte. Deshalb haben wir uns bei der sensorgestützten Bestimmung der Bodentextur auf die Messung des elektrischen Widerstandes (Rho) und die Schätzung des Wassergehaltes fokussiert, da die Trockenrohdichte von untergeordnetem Einfluss ist.

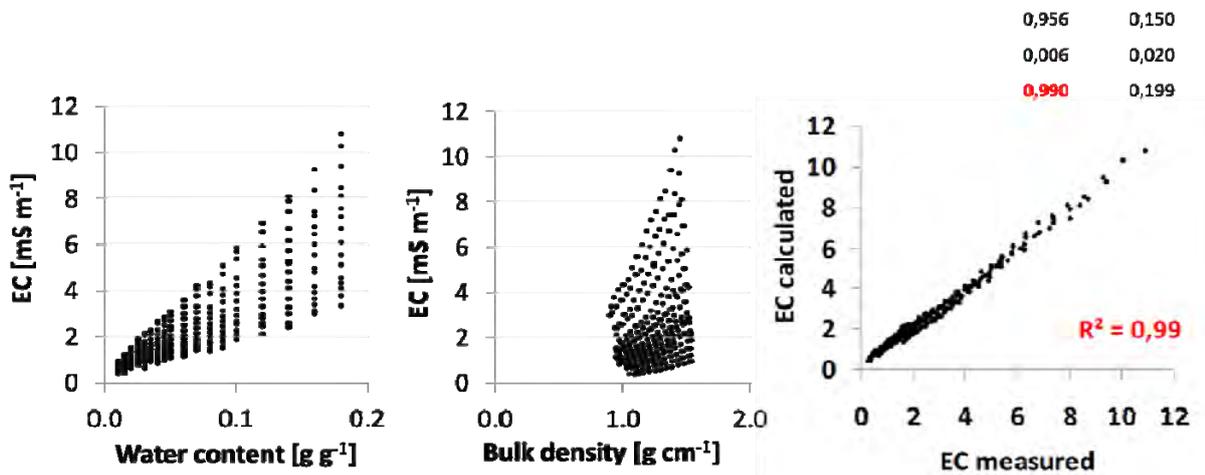


Abb. 5.4.2: Elektrische Leitfähigkeit (EC) von Quarzsandproben in Abhängigkeit vom Wassergehalt (WC) (li.) und von der Trockenrohdichte (BD) (Mitte) sowie Vergleich zwischen gemessener und modellierter (EC=f(WC, BD) elektrischer Leitfähigkeit (re).

Workflow für die sensorbasierte Bodenartenbestimmung im Feld:

- Erhebung der primären Sensordaten mit dem Geophilus Messsystem (Boenecke, 2020):
scheinbare elektrische Widerstände der Bodenschichten 0-30, 0-60, 0-90, 0-120 und 0-150 cm

sowie Gammaaktivität des Oberbodens (0-30 cm), Georeferenzierung mittels dGPS. Datenerfassungsrate 1/sec., Fahrgeschwindigkeit 8-12 km/h, Spurbstand 12-18 m -> 150 - 250 Messpunkte / ha und ≤ 120 ha tägliche Kartierleistung.

- Vorverarbeitung der Primärdaten (Eliminierung von Fehlwerten und Ausreißern, Interpolation, s. AP 8)
- Ermittlung repräsentativer Positionen für die Referenzbeprobung mithilfe spezieller Beprobungsalgorithmen (s. AP 9).
- Untersuchung der Referenzproben im Labor nach DIN ISO 11277 auf Ton- (0–0,002 mm), Schluff- (0,002-0,63 mm) und Sandgehalt (0,63-2 mm)
- Kalibration: Auslesen der Rasterwerte von Rho, Gamma, Gamm/Rho und Geländehöhen; Testung verschiedener Kalibrationsmodelle (s. AP10); das finale Modell nutzt nur signifikante Eingangsgrößen; Ergebnis für alle Messwert-Modell-Vergleiche siehe **Abb. 5.4.3**
- Anwendung des finalen Kalibrationsmodells auf alle Rasterpunkte -> Kartengenerierung -> Ergebnisse beispielhaft für Schlag 21 in Wilmersdorf, vgl. **Abb. 5.4.4**

Weil der elektrische Widerstand des Bodens in Laboruntersuchungen eine starke Abhängigkeit von der Bodenfeuchte aufweist (vgl. Abb. 5.4.1.), haben wir auf verschiedenen Feldern an insgesamt ca. 550 Punkten die Bodenfeuchte (0-20 cm) mittels mobiler TDR Sonde (UGT Münchenberg) gemessen und geprüft, ob die GIS gestützten Indices Topografic Weines Index (TWI) und Saga Weines Index (SWI) als Proxy für die Feuchteverteilung innerhalb des Feldes genutzt werden können. TWI und SWI wurden einem auf Geophilus Sensordaten beruhenden Feuchteindex (GWI) gegenübergestellt, wobei GWI (0-30 cm) = Gamma/Rho. Im Vergleich der Feuchteindices zu den gemessenen Bodenfeuchtwerten zeigte der aus den Geophilus Sensordaten abgeleitete Feuchteindex GWI deutliche Vorteile im ermittelten Bestimmtheitsmaß R^2 , vgl. **Abb. 5.4.5**.

Elektrische Widerstandsmessungen mit rollenden Elektroden zu unterschiedlichen Feuchtezuständen des Bodens wurden durchgeführt, um einen im Hinblick auf die Datenqualität im optimalen Bodenfeuchtebereich zu ermitteln. Dabei stieg die Streuung innerhalb eines Fensters von 5-7 aufeinanderfolgenden Messwerten generell mit zunehmenden elektrischen Widerständen an.

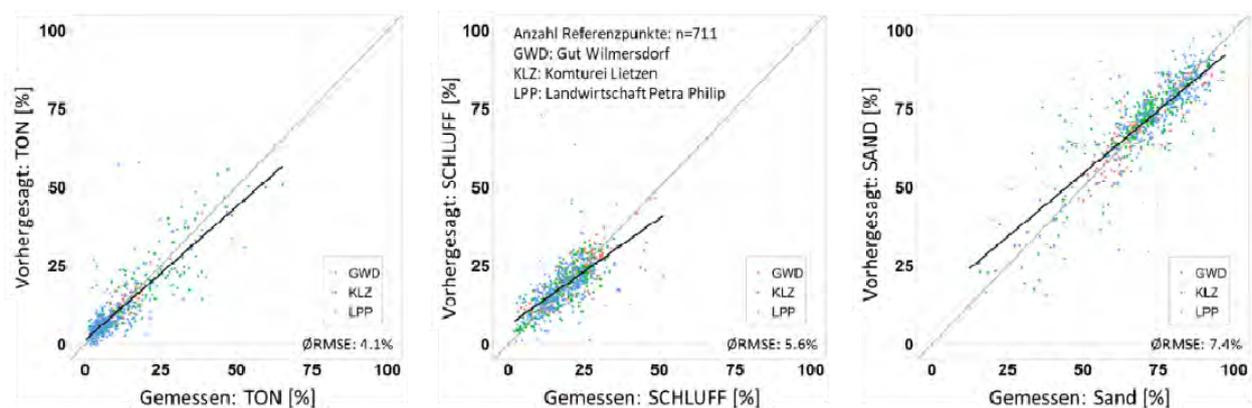


Abbildung 5.4.3: Vergleich der gemessenen und modellierten Körnungsanteile. (Basis: alle kartierten Schlägen im Projekt; RMSE = 4,1% für Ton, 5,6% für Schluff und 7,4% für Sand)

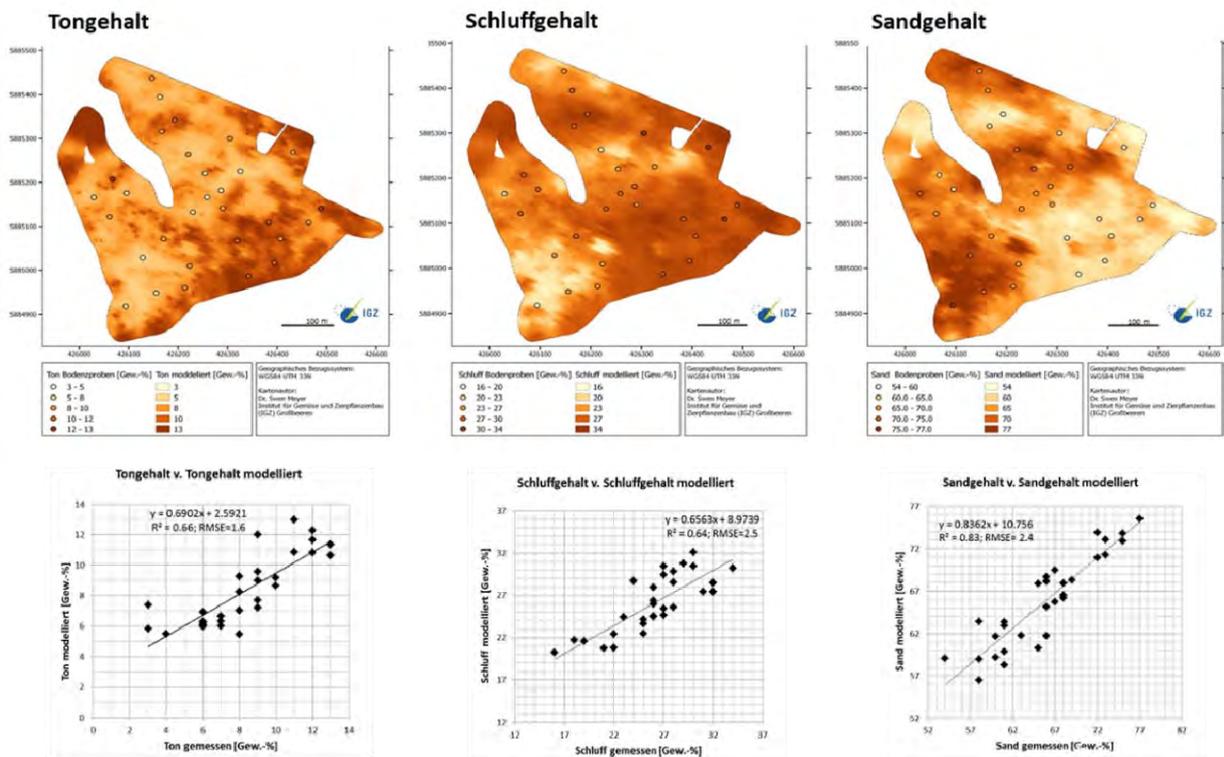


Abbildung 5.4.4: Sensorbasierte Karten der drei Korngrößenfraktionen Ton, Schluff und Sand (oben) und Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Kornfraktionen (unten) am Beispiel Schlag GW21 in Wilmersdorf.

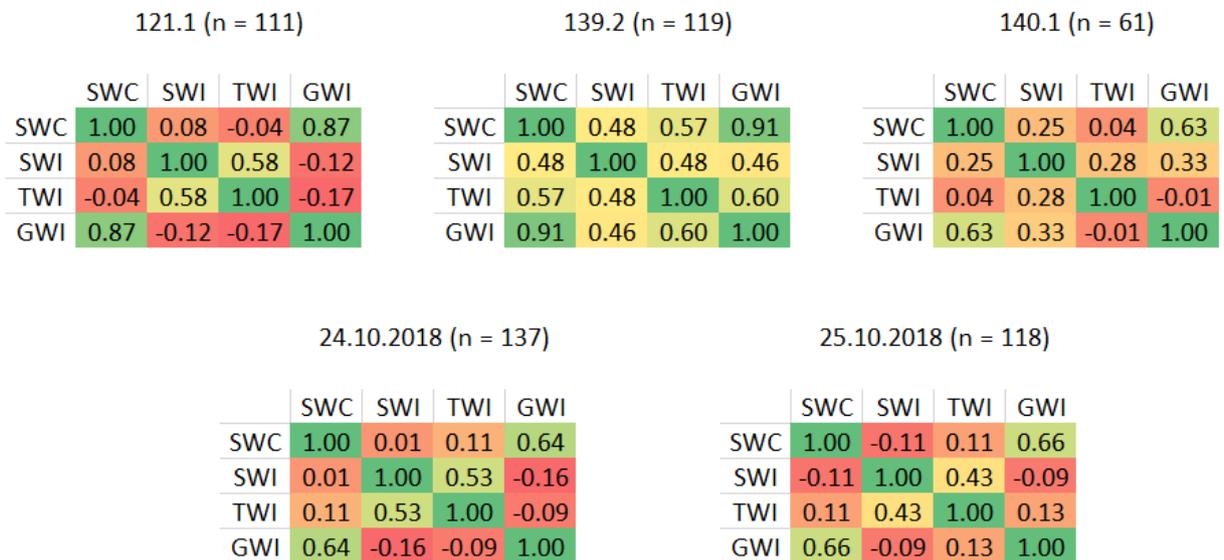


Abbildung 5.4.5: Zusammenhang zwischen gemessener Bodenfeuchte SWC und den Feuchteindices SWI, TWI und GWI im Betrieb Booßen auf den Schlägen 121.1, 139.2 und 140,1 sowie für zwei Datensätze, aufgenommen zu zwei Terminen (24. und 25.10,2018). Dunkelgrün = sehr starker Zusammenhang, hellgrün = hoher Zusammenhang, gelb = mittlerer Zusammenhang, orange = geringer Zusammenhang, rot = kein Zusammenhang.

Ursachen sind:

- die Erhöhung des Durchdringungswiderstandes des Bodens mit abnehmender Feuchte
- die damit verbundene die geringere Eindringtiefe der Elektroden in den Boden
- die Verschlechterung der galvanischen Kopplung zwischen Elektroden und Boden.

Die o.g. Streuung ist von der Signalintensität abhängig und damit Elektrodenabstand. Bei der größten Dipolweite (3 m) beträgt die gemessene Spannung nur noch etwa 2% der am kleinsten Dipol (0,5 m) gemessenen Spannung.

Da ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal des Geophilus darin besteht, den scheinbaren elektrischen Bodenwiderstand in 5 Tiefenstufen bis zu einer Erkundungstiefe von 1,5 m zu messen, ist der Dipol mit der geringsten Signalintensität ausschlaggebend für die erforderliche Feuchte in den oberen 10 cm Bodenschicht, in die die rollenden Elektroden eindringen können. Eine Kontrollmöglichkeit für die Ankopplungsqualität der Geophilus-Elektroden bietet die Frequenzmessung an den Messdipolen. Entspricht diese der Frequenz des Einspeisedipols, ist eine gute Ankopplungsqualität gegeben.

Da Bodentexturkarten – einmal generiert – eine Gültigkeit von vielen Jahrzehnten haben (außer bei Bodenerosion), achten wir auf bestmögliche Messbedingungen: Optimal ist das Frühjahr, wenn der Bodenwassergehalt so weit gesunken ist, dass einerseits eine sichere Befahrbarkeit der Flächen gewährleistet ist und andererseits weitgehend nur texturbedingte Feuchteunterschiede innerhalb des Bodenprofils vorliegen.

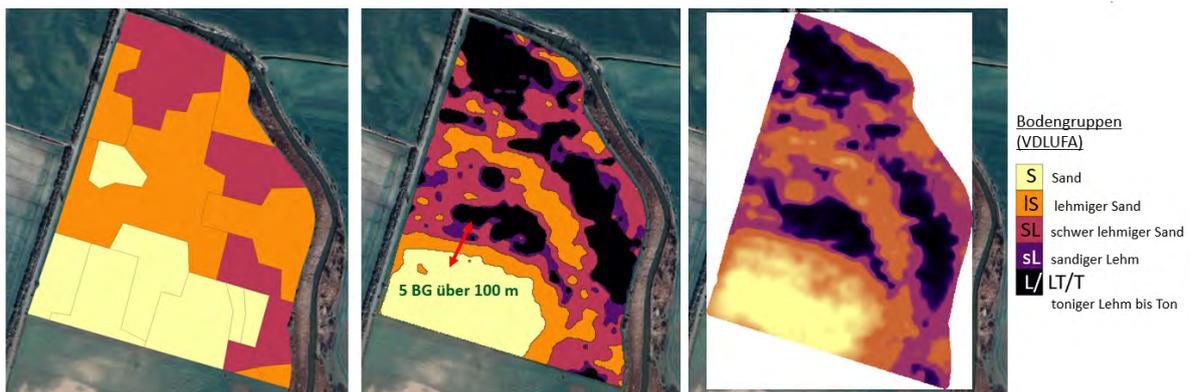


Abbildung 5.4.6: Karten des mittleren Korngrößendurchmessers (Vergleichsbasis: Klassifizierung nach den fünf VDLUFA Bodengruppen): links: Teilflächen entsprechend der Einteilung nach Reichsbodenschätzung, Mitte: sensorbasierte Teilflächen und rechts: sensorbasiert nach Stufenlosansatz (Rühlmann et al. 2021).

Wenn Texturkarten gemäß Abb. 5.4.4 „stufenlos“ vorliegen, können durch Klassifizieren (z.B. nach VDLUFA oder nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5) Teilflächenkarten generiert werden. Beispiele für Teilflächenkarten sind nachfolgend auf Basis des Mittleren Korndurchmesser (MKD) dargestellt - einer aus den drei Kornfraktionen aggregierten Größe (Rühlmann et al. 2021). Der Vergleich zeigt, dass kleinräumige Texturmuster nicht durch herkömmliche Karten abgebildet werden können (Abb. 5.4.6.).

Die Texturangaben in betrieblichen Bodenartenkarten basieren auf unterschiedlichster Datengrundlage (Bodenschätzung/Ertragskarte/Luftbild etc.), überwiegend jedoch auf Fingerprobenergebnissen. Ein Vergleich der betrieblichen und der im Projekt ermittelten sensorbasierten Bodenartenkarten bestätigte z. T. erhebliche Abweichungen, vgl. Abb. 5.4.7.

Abweichungen zwischen beiden Ansätzen – betrieblich und sensorbasiert – sind beispielhaft für die Flächen im Landwirtschaftsbetrieb Petra Philipp gezeigt (Tab. 5.4.1). Im Mittel aller sensorkartierten Flächen sind nur 40% der Flächen betrieblich richtig eingeordnet, 50% der Flächen wurden in den betrieblichen Bodenkarten über- und 10% unterbewertet. Als Ursache sind ungenaue Ergebnissen der Fingerprobenuntersuchungen in den Laboren anzusehen.

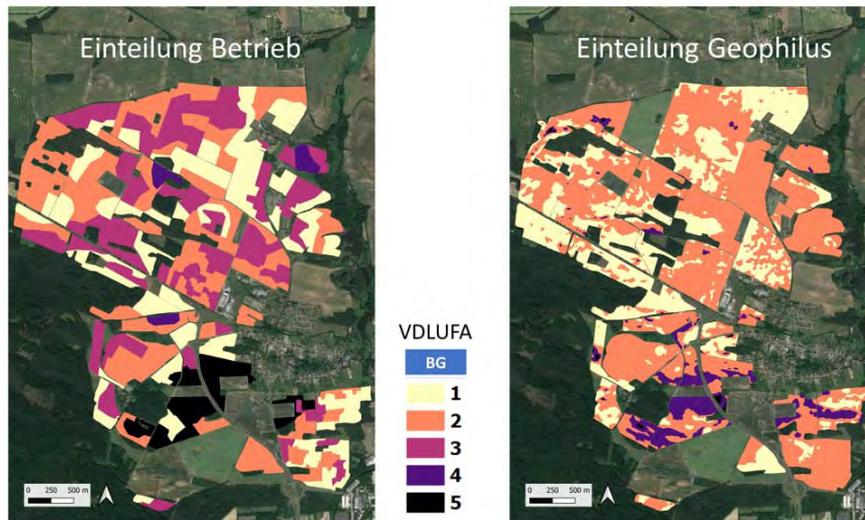
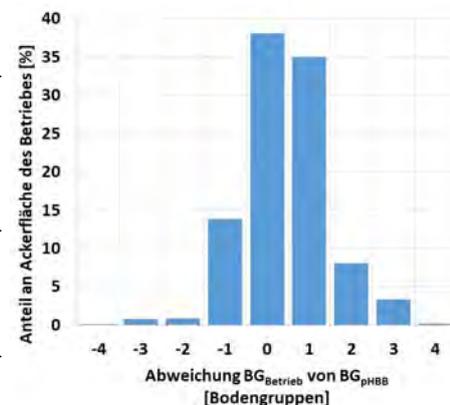


Abbildung 5.4.7: Vergleich von Bodenkarten – (li) betrieblich und (re) sensorbasiert - am Beispiel des Landwirtschaftsbetriebs Petra Philipp.

Tabelle 5.4.1: Übersicht und Anteile der Einordnungen der Betriebsflächen bezüglich der Bodenarten und ihrer Abweichung nach betrieblichen Daten und sensorbasiertem Ansatz.

Betrieb	Kartierte Fläche [ha]	Einordnung der Flächen [%]		
		richtig	überbewertet	unterbewertet
PP Booßen	930	38	45	17
Komturei Lietzen	1470	27	67	6
Gut Wilmersdorf	220	56	40	4
Mittelwert		40	50	10



Zur Validierung dieser Hypothese sendeten wir jeweils elf Bodenproben zur Untersuchung der VDLUFA Bodengruppenzugehörigkeit nach Fingerprobe an fünf Labore. In einem sechsten Labor wurden die Proben mittels Schlämmanalyse auf ihren Ton-, Schluff- und Sandgehalt analysiert (Abb. 5.4.8).

Leichte, sandige Böden wurden demnach grundsätzlich häufiger richtig geschätzt als schwerere, tonreichere Böden, bei denen es bei allen Laboren zu einer zunehmenden Unterschätzungen kommt - der mittlere Anstieg der Regressionsgeraden beträgt nur ca. 0,4!

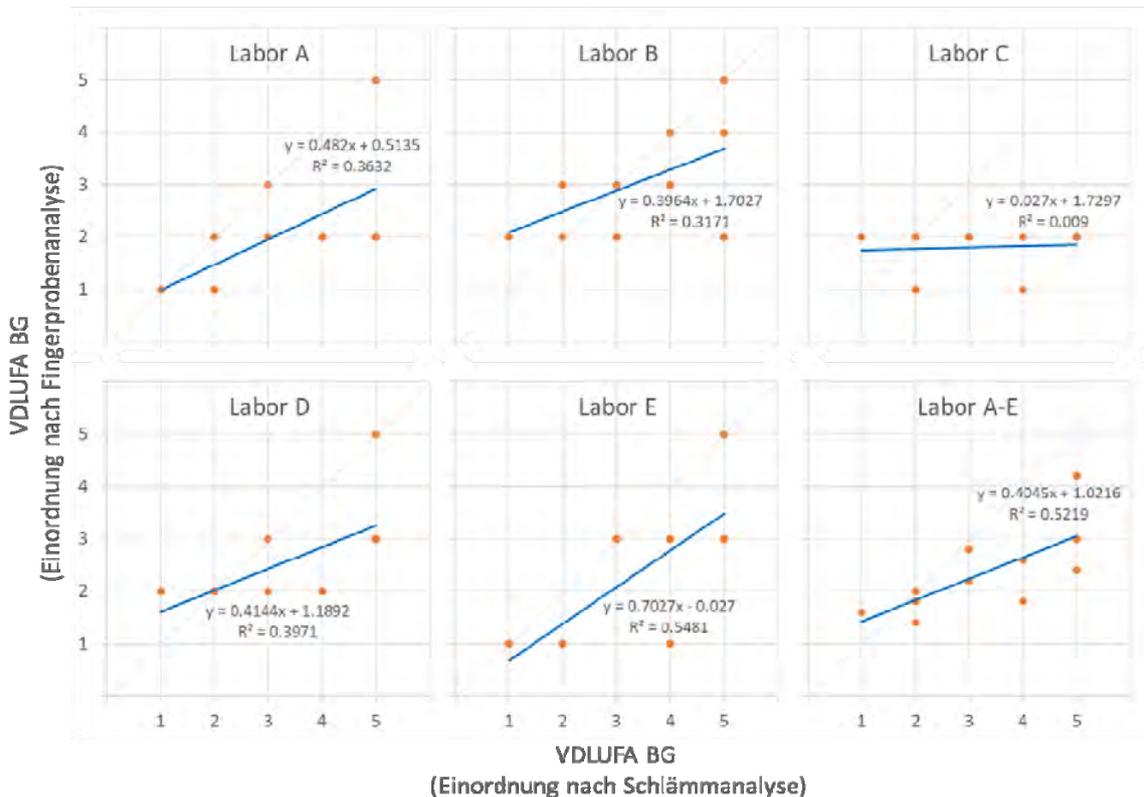


Abb. 5.4.8 Methodischer Vergleich der Bodengruppenbestimmung (BG): Fingerprobe vs. Schlämmanalyse DIN ISO 11277 (Labore A-E (a-e), Mittelwert aller Labore (f)).

5.1.5 AP 5 „Sensorik für die Bestimmung des Boden-Humusgehaltes“

Die Ergebnisse sind im Praxisblatt 05 „Bestimmung des Bodenhumusgehaltes mittels mobiler Bodensensoren“ zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.5. Ziel von AP 5 war die Entwicklung einer Prozesskette für die Sensordatenverarbeitung und Generierung von hochauflösenden Karten des Bodenhumusgehaltes. Die einzelnen Prozessierungsschritte (Algorithmen) wurden mit innerhalb der statistischen Open-Source-Software und Programmiersprache R in Form von R-Skripten bzw. -Funktionen umgesetzt (R Core Team 2020³). Die R-Funktionen mit Testdaten und einer umfangreichen Dokumentation sind als **pHBB R-Paket** verfügbar. Es kann von Benutzern und Entwicklern kostenfrei genutzt werden. Für die nutzfremde Anwendung der pH-BB Toolbox und R-Routinen wurde die **pH-BB Toolbox** in Form einer Web-GIS-Anwendung entwickelt. Zur Erfassung des Humusgehaltes wurde der Veris OpticMapper (Veris Technologies Inc., Salina, KS, USA) als einzig marktverfügbare Lösung beschafft und auf seine Praxistauglichkeit umfangreich untersucht. Die Messfrequenz beträgt 1 Hz, eine Messpunktdichte von 150-200 Datenpunkten pro Hektar wird erreicht. Die Daten müssen auf die vom Hersteller gehostete Fieldfusion Plattform (Cloud) hochgeladen werden. Dort erfolgt eine Qualitätskontrolle und Bereinigung. Anschließend können sie für einen Preis von 1 Euro pro Hektar als ASCII-Datei heruntergeladen werden. Nach Bereitstellung müssen weitere Fehlmessungen und Ausreißerpunkte entfernt werden. Da die OpticMapper Daten zusätzlich ein starkes kurzweiliges Rauschen aufweisen, werden sie mithilfe eines Circular Moving Window (CMW) Filter mit einem Radius von 5 bis 10 m geglättet. Anschließend werden

³ R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

die punktuellen Sensordaten durch geostatistische Interpolation (Block Kriging) zu flächigen OpticMapper-Karten verarbeitet. Danach werden mithilfe des in AP 9 beschriebenen Referenzprobenalgorithmus Positionen für Probenahmen für erforderliche Humus-Laboranalysen ermittelt. Zur räumlichen Prognose des Humusgehalts wurde ein Prognosealgorithmus (R-Funktion) entwickelt. Er vergleicht univariate (lineare Regression (LM)) und multivariate Methoden (multiple lineare Regression (MLR), Regression der partiellen kleinsten Quadrate (PLSR) und Random Forest (RF)). Zur Bewertung der Prognoseergebnisse werden das Bestimmtheitsmaß R^2 , die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und das Streuungsmaß Root Mean Square Error (RMSE) herangezogen und das Prognosemodell mit der besten Vorhersagegenauigkeit für die Humuskartenerstellung verwendet. Zur weiteren Bewertung der Praxistauglichkeit des OpticMappers und zur Verbesserung der Prognosegüte wurden ergänzend weitere verfügbare Sensordaten verwendet: (1) die Gammaaktivität (Gamma) und der scheinbare elektrische Widerstand (ρ_1) der ersten Bodenschicht vom Geophilussensor, (2) die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Oberbodens (ECsh) und pH-Manager-Werte (pHS) der Veris Sensorplattform und (3) frei verfügbare RGB Luftbilder von Online-Kartendiensten wie Bing Maps, Google Maps oder ESRI. Für die Beurteilung der verschiedenen Modelle wurden sämtliche in pH-BB erhobene Sensordaten verrechnet und kombiniert. Als Basis für eine detaillierte statistische Auswertung wurde für einen Schlag ein Datensatz von 250 Humuslaborwerten erhoben. Abbildung **5.5.1B** veranschaulicht die Validierungsergebnisse und Prognosegenauigkeiten der verschiedenen Modellrechnungen. Bei Verwendung eines univariaten linearen Regressionsmodells liefern folgende Sensoren in absteigender Reihenfolge die besten Ergebnisse: der Quotient aus Gamma und ρ_1 (SWI), die gemessene scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Oberbodens (ECsh) und die RGB Luftbildaufnahme des vegetationsfreien Bodens (bR1) (RMSE: 0,43 > 0,44 > 0,51). Der OpticMapper, als eigentlicher Sensor für die Humusprognose, schneidet im Vergleich schlechter ab mit RMSE Werten von 0,61 und 0,67 für Red und IR. Im Vergleich der multivariaten Ansätze wird ersichtlich, dass nur der Random Forest, als nicht linearer statistischer Ansatz, zu einer Verbesserung der Prognosegenauigkeit beiträgt. Die Fusion aller Sensordaten liefert das beste Modellergebnis mit einem RMSE von 0,34. Vergleicht man die RMSE Werte der Datenkombination aus (1) ECsh+bR1 (0,35) und (2) SWI+bR1 (0,38) mit dem Ergebnis aus der Fusion, so gibt es nur einen marginalen Unterschied der Prognosegenauigkeit. Die Auswertung der Prognosegüte von 17 weiteren Schlägen der drei pH-BB Partnerbetriebe bestätigt die Ergebnisse von PP 1392 (Abb. 5.5.1 C-D). Der kombinierte Einsatz von Geophilusdaten (Gamma/ ρ_1) oder der elektrischen Leitfähigkeit (ECsh, Veris MSP3) in Verbindung mit einer vegetationsfreien Luftbildaufnahme liefert die beste Prognosegüte (Abb. 5.5.1D) und besitzen als Prädiktoren die höchste Erklärungskraft (Abb. 1C) für die räumliche Prognose des Bodenhumusgehalts. Die in pH-BB mit dem Prognosealgorithmus erstellten Humusmodelle weisen einen Median beim R^2 von 0,62 und beim RMSE von 0,3 auf (Abb. 5.5.1D). Die im Projekt entwickelte Methodik liefert demnach hinreichend genaue digitale Bodenhumuskarten. Eine geringe Erklärungskraft (NSE < 0,5) erzielten v.a. Schläge, die durch eine sehr geringe schlaginterne Humusvariabilität (Standardabweichung < 0,3) charakterisiert sind. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass aktuelle Sensoren bei geringer Humusvariabilität nicht in der Lage sind die kleinräumigen Humusunterschiede im Feld aufzulösen.

Da die OpticMapper Daten im Feld von der Bodenfeuchte und -temperatur beeinflusst werden, wurde im letzten Projektdrittel von pH-BB ein mobiler Bodenfeuchtesensor der Firma Veris angeschafft.

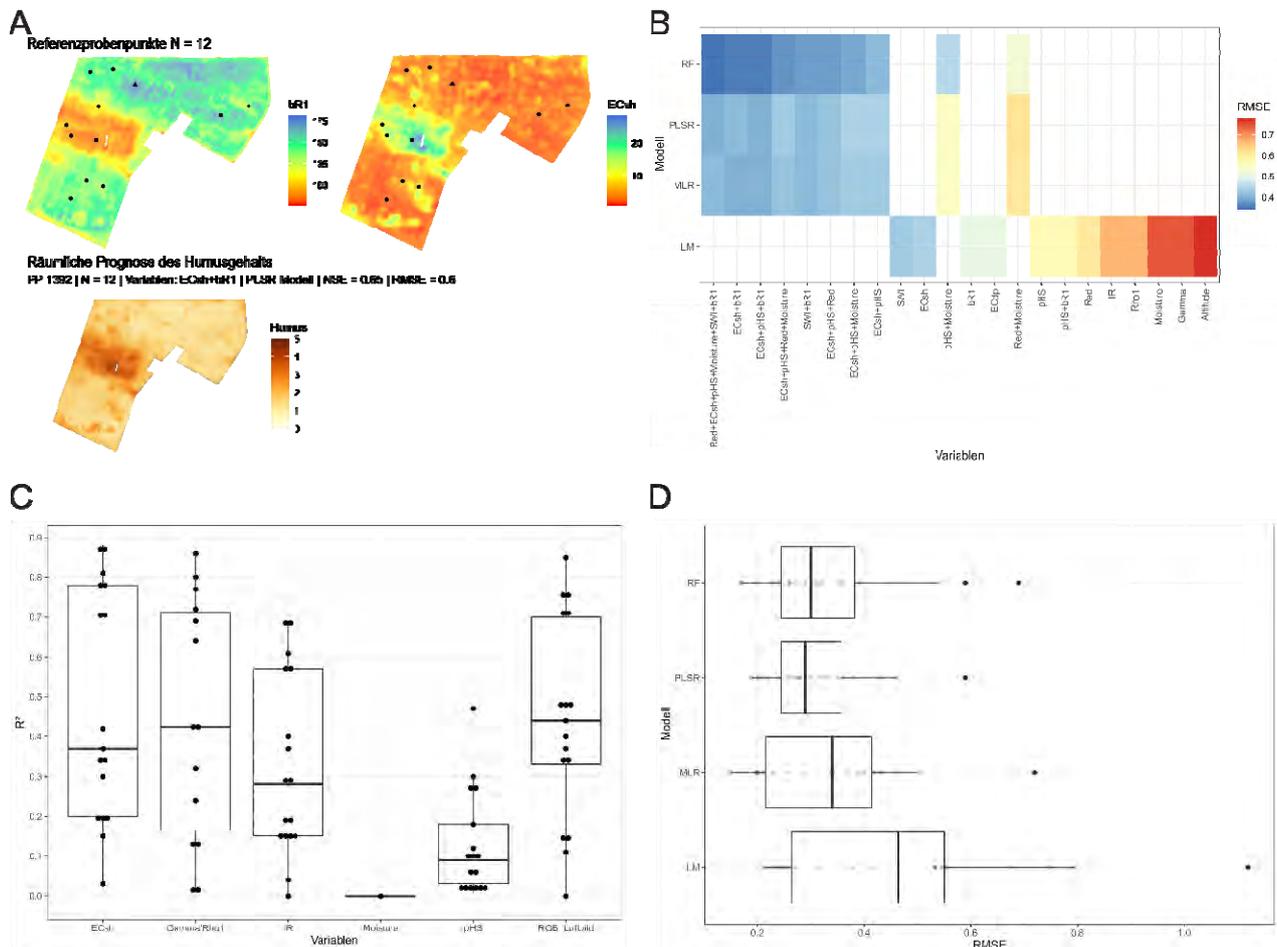


Abbildung 5.5.1: Ergebnisse der räumlichen Prognose des Bodenhumusgehalts: **A:** Mit dem pH-BB Probenahmealgorithmus abgeleitete Referenzprobenpunkte und errechnete Bodenhumuskarte für den Schlag PP 1392 in Booßen. Prädiktoren: ECsh (Veris MSP3) und bR1 (Rot-Kanal einer Luftbildaufnahme des vegetationslosen Bodens von Bing Maps), **B:** Vergleich der Prognosegenauigkeit (RMSE) für verschiedene Sensordatenkombinationen für den Schlag PP 1392, **C:** Boxplots zur Beurteilung der Erklärungskraft der verschiedenen Sensordaten für die räumliche Prognose des Bodenhumusgehalts von 17 Schlägen der 3 Partnerbetriebe, **D:** Boxplots zur Beurteilung der Prognosegenauigkeit der unterschiedlichen multivariaten Verfahren vs. OpticMapper. (1) Lineare Regression (LM) mit OpticMapper Infrarot-Kanal (IR) als Prädiktor, (2) Random Forest (RF), (3) Partial Least Squares Regression (PLSR) und (4) multipler lineare Regression (MLR) mit Verwendung folgender Prädiktoren: ECsh (Veris MSP3), Gamma/Rho1 (Geophilus), Rotkanal eines RGB Luftbilds, pHS (pH-Manager Daten) und IR (OpticMapper).

Die Projektergebnisse in Abb. 5.5.1B zeigen, dass die Zunahme der Bodenfeuchtwerte keinen Beitrag zur Verbesserung der Modellgüte Sensoren leistet. Zur Evaluierung der Bodenfeuchtesensorwerte wurden an 24 Standorten im Feld Stechzylinderproben aus den Oberboden (0-15 cm) entnommen und der volumetrische Wassergehalt bestimmt.

Die Projektergebnisse zeigen, dass zwischen den Sensorpunktdaten des Bodenfeuchtesensors und den gemessenen volumetrischen Wassergehalt der Stechzylinderproben nur eine schwache

positive Korrelation (Pearson-r = 0,47) besteht. Der Bodenfeuchtesensor ist somit (noch) nicht in der Lage die kleinräumigen Bodenfeuchteunterschiede im Feld abzubilden, die notwendig sind, um zur Korrektur bzw. Verbesserung einer Modellgüte beizutragen.

Durch den technischen Fortschritt war es von Interesse, auch den Einsatz frei verfügbarer Luftbildaufnahmen (Sentinel2, RGB Luftbilder) zu untersuchen und zu prüfen, ob deren Genauigkeit durch Hinzunahme von Bodensensordaten verbessert werden kann. Hierzu wurde außerhalb des Projektes eine Masterarbeit vergeben (Post 2020⁴). Im Ergebnis wurden tendenziell bessere Humusvorhersagen erreicht, weiterer Forschungsbedarf besteht.

Schlussfolgerungen: Mit einer schlagspezifischen Kalibrierung von 10 bis 12 Referenzprobenpunkten können aus OpticMapper-Daten mit Hilfe der im Projekt entwickelten pH-BB Toolbox hochauflösende Bodenhumusgehaltskarten erstellt werden. Diese bilden eine sehr gute Grundlage für eine ortsspezifische Kalkbedarfsermittlung und können zusätzlich für weitere Bodenmanagementverfahren (Humusmonitoring, Grunddüngung) eingesetzt werden. Allerdings liefert der kombinierte Einsatz aus Geophilusdaten (Gamma und Rho1) oder einer Leitfähigkeitsmessung (ECa) in Verbindung mit einer vegetationsfreien Luftbildaufnahme ebenfalls sehr gute Modellergebnisse. In Folgeprojekten ist zu validieren, ob der Einsatz des speziellen Humussensors OpticMapper in Zukunft entfallen kann.

5.1.6 AP6 „Sensorik für die Bestimmung des Boden-pH“

Die Ergebnisse sind im Praxisblatt 04 „Bestimmung des Boden-pH mittels mobiler Bodensensoren“ zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.4. Ziel von AP6 war die Erstellung hochauflösender Boden-pH-Wertkarten aus Sensordaten und die Entwicklung eines Arbeitsablaufes zur Sensorkartierung, Sensordatenverarbeitung, -kalibrierung und Kartenerstellung. Die Feldkartierung des Boden-pH-Wertes wurde mit dem „Soil pH Manager“ von Veris Technologies (Salina, USA) durchgeführt, dem derzeit einzig kommerziell erhältlichen Sensorsystem für die fahrzeuggebundene mobile pH- Kartierung. Der pH-Wert wird während der Überfahrt alle 10–12 s gemessen, vgl. Bönecke et al. (2020) und Vogel et al. (2021).

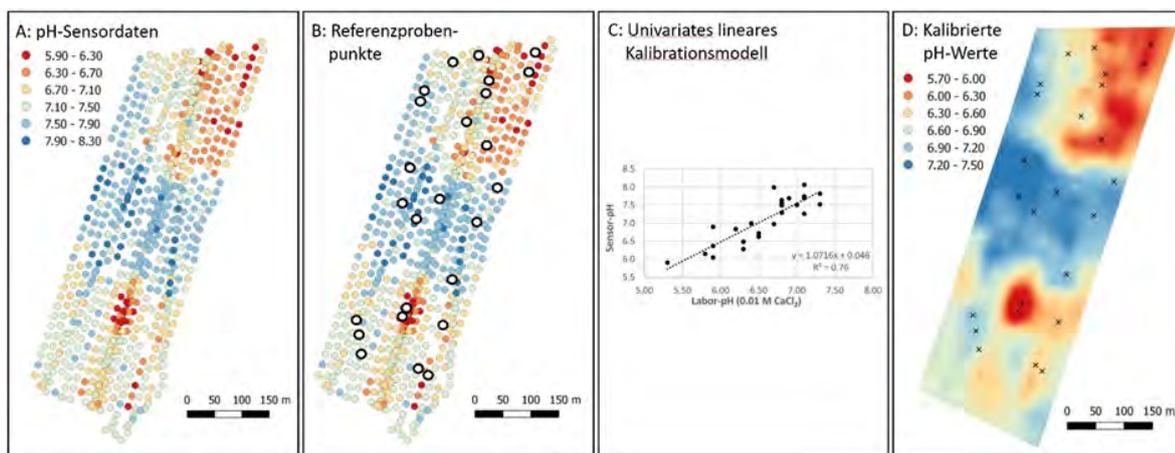


Abbildung 5.6.1: Verschiedene Datenebenen entlang der Prozesskette zur Erstellung hochauflösender pH-Wertkarten: A: pH-Sensordaten, B: Referenzprobenpunkte, C: Univariates lineares Kalibrationsmodell, D: Kalibrierte interpolierte pH-Wertkarte.

⁴ Post, S. (2020): Abschätzung des Humusgehalts auf der Feldskala - Sentinel2 -Satellitendaten und Nahbereichssensorik im Vergleich. Masterarbeit, Öko-Agrarmanagement, Hochschule Für Nachhaltige Entwicklung, Eberswalde.

Nach der Kartierung werden die Sensordaten bereinigt und durch Interpolation in flächenhafte Sensor-pH-Karten umgerechnet. Anschließend werden mithilfe **im Projekt entwickelter Beprobungsalgorithmen** repräsentative Positionen für die Referenzbeprobung ermittelt, vgl. Praxisblatt 06 „Referenzbeprobung und Probenahmestrategie“.

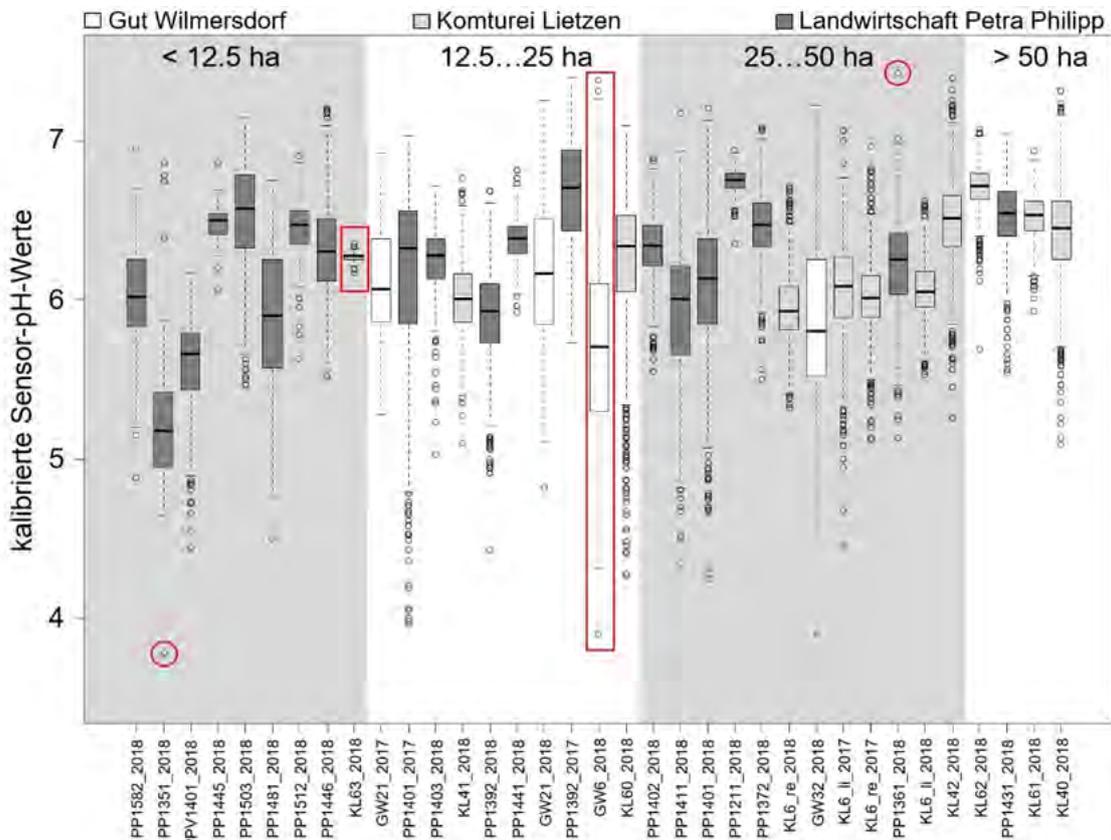


Abbildung 5.6.2: Boxplots der pH-Werte von 35 Schlägen der 3 Partnerbetriebe geordnet nach Schlaggröße. Rot hervorgehoben sind die Schläge mit der kleinsten und größten schlaginternen pH-Variabilität (Rechtecke) sowie extreme niedrige und hohe pH-Werte (Kreise).

Mit Hilfe der linearen Regression wird ein schlagspezifisches Modell zur Kalibration aller im Feld gemessenen Sensor-pH-Werte errechnet. Die hochaufgelösten pH-Karten werden anschließend für die Kalkbedarfsberechnung weiterverarbeitet, vgl. Abb. 5.6.1.

Aus den pH-Kartierungen wird deutlich, wie wichtig eine hochauflösende Erfassung der Bodenacidität in Brandenburg ist. Die schlaginterne pH-Variabilität kann sich von 0,5 bis 3 pH-Einheiten erstrecken, vgl. Abb 5.6.2.

Neben der pH-Messung mittels ionenselektiver Elektroden wurden auf einzelnen Schlägen spektraloptische Verfahren (visNIRS) erfolgreich für die pH-Kartierung getestet. Auf einem Testschlag konnten aus den gleichen Daten zusätzlich auch Bodentextur und Humusgehalt mit hinreichender Genauigkeit vorhergesagt werden.

5.1.7 AP7 „Feldversuche“

Im Frühjahr 2018 wurden auf den drei am Projekt beteiligten Betrieben Großflächenfeldversuche unter Praxisbedingungen als Blockanlage mit 3-facher Feldwiederholung angelegt. Der Prüffaktor „Kalkung“ wurde anhand der drei **Faktorstufen** A) ohne Kalkung (Kontrolle), B) einheitliche Kalkung und C) ortsspezifische Kalkung, untersucht. B) und C) wurden jeweils mit

GRANUKAL® 80/5 gekalkt. Die C) ortsspezifische Variante basiert auf Sensordaten und bedient unter Anwendung des stufenlosen Algorithmus den tatsächlichen Kalkbedarf kleinräumig, vgl. Praxisblatt 08 „Stufenlose Bestimmung der Kalkbedarfsmenge“. Die Erfolgskontrolle fand anhand von Korndruschdaten, drohnenbasierter Erfassung der Pflanzenhöhe des Klee-grases und von pH-Wert-Messungen mit dem pH-Mapper (Veris Technologies) in den Jahren 2018, 2019, 2020 und 2021 statt.

Zur Auswahl der Versuchsflächen wurden anhand kalibrierter Textur-, pH- und Humusdaten Kalkapplikationszonen festgelegt, die mit praxisüblicher Technik umgesetzt werden konnten, vgl. Abb. 5.7.1.

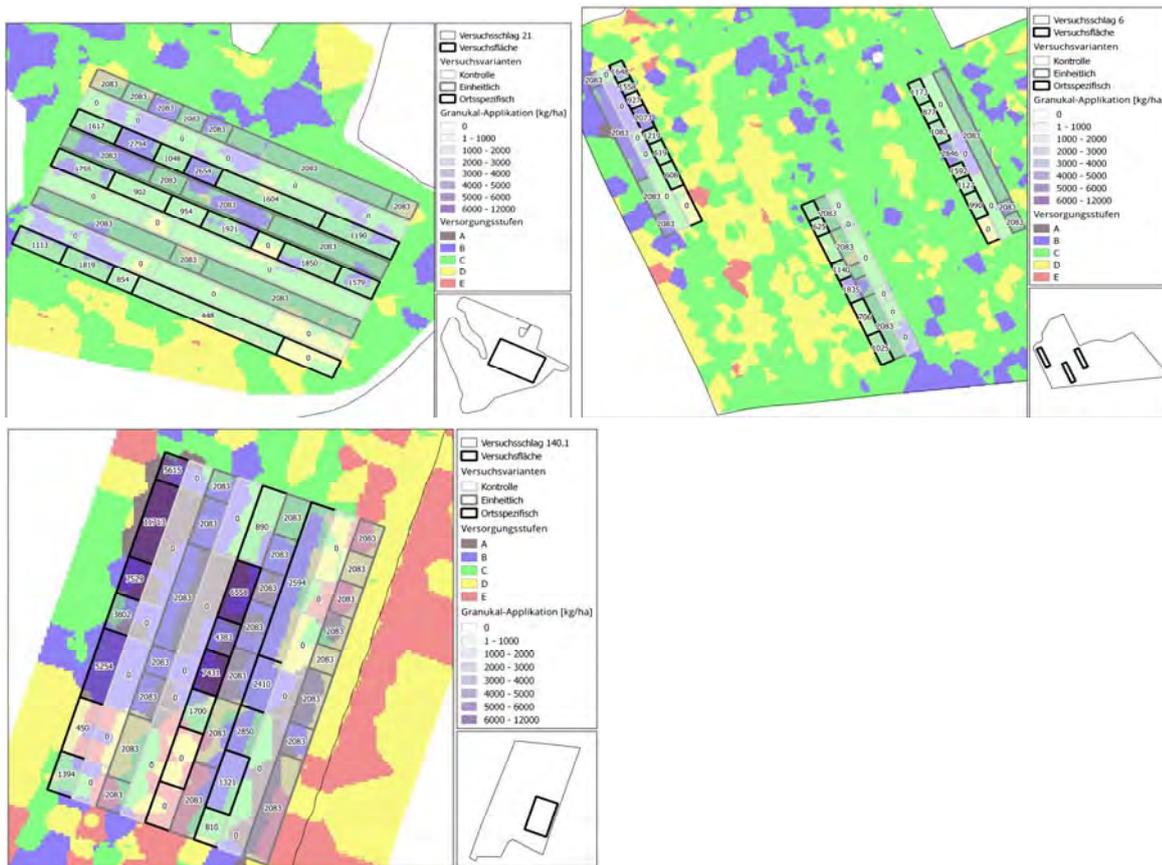


Abbildung 5.7.1: Versuchsflächen auf den Praxisbetrieben Gut Wilmersdorf (o. li.), Komturei Lietzen (o. re.) und Landwirtschaft Petra Philipp (u. li): Parzellen wurden nach Versorgungsstufen und Anforderung an die Streutechnik eingeteilt und sensorgestützt der Kalkbedarf pro Parzelle in den Varianten “Kontrolle”, “Einheitlich und “Ortspezifisch” ermittelt.

Die Ergebnisse für den pH-Wert und die Versorgungsstufen sind in Abb. 5.7.2 dargestellt. Im Ausbringungsjahr 2018 war der pH-Wert nach der Ernte auf allen Betrieben unabhängig von der Variante im Vergleich zum Vorjahr (2017) kaum verändert.

Auf der **Versuchsfläche GW** war zu Versuchsbeginn in allen Varianten 5 bis 13 % in Versorgungsstufe B, 36 bis 51 % in Versorgungsstufe C und 36 bis 53 % in D und E. Die Kalkung hatte nur wenig Effekt auf den pH-Wert, wobei im ersten und in den Folgejahren nach der Kalkung (2019 bis 2021) die ortsspezifisch gekalkte Variante (C) eine geringere Varianz in den pH-Werten aufwies (Abb. 5.7.2A). Dies zeigt sich auch an den Versorgungsstufen: war der Anteil an Versorgungsstufe C auf GW in der ortsspezifisch gekalkten Variante (C) in 2018 noch bei 49 % und der Anteil an Versorgungsstufe B bei 27 %, machte Versorgungsstufe C 2021

bereits 64 % aus. Die mit Kalk unterversorgten Bereiche konnten durch die ortsspezifische Variante C 2021 endgültig beseitigt und in C angehoben werden.

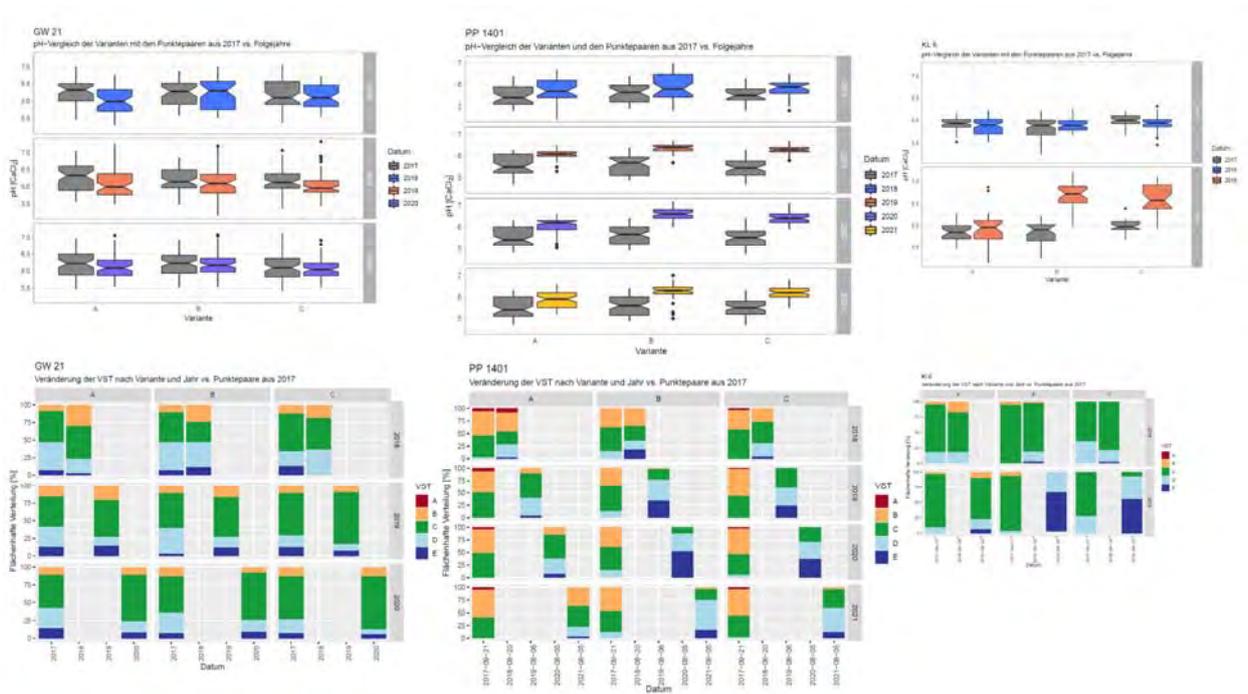


Abbildung 5.7.2: Entwicklung der pH-Werte und Versorgungsstufen in den Jahren nach der Kalkung (Frühjahr 2018) auf der Versuchsfläche Gut Wilmersdorf (GW), Komturei Lietzen (KL) und Landwirtschaft Petra Philipp (PP).

Auf der **Versuchsfläche KL** lagen die pH-Werte erst ein Jahr nach der Kalkung (2019) in den Varianten mit Kalkung höher als vor dem Versuchsbeginn (2017) (Abb. 5.7.2B). Ähnlich wie auf PP war der pH-Wert Anstieg unabhängig davon, ob einheitlich oder ortsspezifisch gekalkt wurde. Wiederum waren mit einheitlicher Kalkung die Flächenanteile drei Jahre nach der Kalkung (2021) von Versorgungsstufe D (61 %) und E (10 %) höher als mit ortsspezifischer Kalkung (D 40 %, E 12 %), vgl. Abb. 5.7.3B. Außerdem überwiegt der Flächenanteil von Versorgungsstufe C von 46 % für die ortsspezifische Kalkung im Jahr 2021 gegenüber dem von 26 % für die einheitliche Kalkung. Im Boniturjahr 2019 waren nur noch in der ungekalkten Variante Flächenanteile von 15 % in Versorgungsstufe B zu verzeichnen, welcher sich bis 2021 aufgrund der fehlenden Kalkung auf 21 % erhöhte.

Da auf der **Versuchsfläche PP** vor Versuchsbeginn mehr als 40 % der Versuchsflächen eine suboptimale Versorgungsstufe (A bis B) aufwiesen, waren die Effekte der Kalkung deutlich sichtbarer. Die pH-Werte wiesen im Vergleich zu den anderen Versuchsflächen ein deutlich geringeres pH-Niveau mit einem Median von 5,5 auf (Abb. 5.7.2C). In den Varianten mit Kalkung waren die pH-Werte 2-3 Jahre nach der Kalkung (2020, 2021) höher und homogener als in der ungekalkten Variante (A), wobei kein Unterschied zwischen einheitlicher (B) und ortsspezifischer (C) Kalkung festzustellen war. Die Flächenanteile in Versorgungsstufe A und B waren 2019-2021 fast vollständig eliminiert, wobei der Anteil in Versorgungsstufe C in der einheitlichen Kalkungsvariante mit 12-21 % (2018-2021) geringer war als mit ortsspezifischer Kalkung (30-37 %; 2018-2021). Der Großteil war in den Jahren 2019-2021 Versorgungsstufe D und E

zuzuordnen (einheitlich: 74-88%; ortsspezifisch 58-71 %). Der Flächenanteil in Versorgungsstufe D und E war jedoch auch in der Variante ohne Kalkung mit 22-39 % (2019-2021) höher als 0 % vor Versuchsbeginn 2017.

Die messbare Ertragswirkung der unterschiedlichen Kalkungsvarianten konnte in den Feldversuchen nicht signifikant nachgewiesen werden, weil die Versuchsjahre 2018 - 2020 von extremer Trockenheit geprägt waren, mit Einfluss auf die Wirkung des Kalkes und auf die Erträge.

5.1.8 Arbeitspaket 8 „Datenvorverarbeitung“

Ziel von AP 8 war die Entwicklung von Algorithmen für die Prüfung von Ertrags- und Sensordaten (Bodenart, pH, Humus) sowie ihre Verwendung in Softwaremodulen für die Transformation und Bereinigung von Sensor- und Ertragsdaten.

In den Abschnitten 5.1.4 bis 5.1.6. sind die Algorithmen für die Prüfung und Verarbeitung der Sensordaten für Textur, pH und Humus beschrieben.

Im Abschnitt 5.1.9 ist der Algorithmus für die Festlegung von Referenzprobepunkten beschrieben, im Abschnitt 5.1.10 die Funktionen zum Beschreiben der Zusammenhänge zwischen pH-Wert, Tongehalt, Humusgehalt und Kalkbedarf sowie in den Abschnitten 5.1.2 und 5.1.11 die pH-BB-Toolbox mit den umgesetzten Softwaremodulen zur Kalkbilanzierung.

Zur Bereinigung der Ertragsdaten aus betriebseigenen Mähdreschern wurden Rohdaten (.aft) mit Notepad geöffnet, der Header sowie die Koordinaten zum Einlesen in QGIS angepasst und als Textdatei gespeichert. In QGIS wurden Werte außerhalb der Schlaggrenzen sowie Extremwerte gelöscht. Über die gewogene Gesamterntemenge wurde das tatsächliche Ertragsmittel berechnet und mit dem gemessenen Ertragsmittel ins Verhältnis gesetzt. Jeder gemessene Ertragswert wurde mit diesem Quotienten verrechnet und als tatsächlicher Ertragswert in einer neuen Spalte hinzugefügt. Die Ertragswirkung der unterschiedlichen Kalkungsvarianten konnte nicht signifikant nachgewiesen werden, vgl. Abschn. 5.1.7

5.1.9 AP 9 „Referenzprobenstrategie“

Die Ergebnisse sind im Praxisblatt 06 „Referenzbeprobung und Probenahmestrategie“ zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.6. Ziel von AP 9 war die Entwicklung eines Referenzprobenalgorithmus für multivariate repräsentative Probenahmepunkte im Feld. Der in pH-BB entwickelte Referenzprobenalgorithmus ist Teil der pH-BB Toolbox und wurde wie die anderen Auswerteroutinen auch innerhalb der statistischen Open-Source Programmumgebung R entwickelt. Für die Ableitung der kalkungsrelevanten Bodenkennwerte (pH-Wert, Bodentextur und Bodenhumusgehalt) werden wie in Abschn. 5.1.4 bis 5.1.6 beschrieben verschiedene Sensordaten verwendet. Tabelle 5.1.9 gibt einen Überblick über die in pH-BB für die Bodenlandschaftsmodellierung (Prognostik) verwendeten und relevanten Sensordaten. Grundsätzlich müssen alle Sensordaten mittels Bodenproben auf VDLUFA-konforme Werte kalibriert werden, weshalb im Nachgang der Feldmessungen je Schlag georeferenzierte Bodenproben für Laboranalysen erforderlich sind. Da in der Praxis eine möglichst geringe Anzahl an Kalibrierproben angestrebt wird, verfügt der **in pH-BB entwickelte Probenahmealgorithmus** über verschiedene Einstelloptionen. Für eine beliebige Anzahl

ausgewählter Sensordaten und eine gegebene Anzahl an Proben werden die optimalen Beprobungsorte im Feld ermittelt.

Tabelle 5.9.1: Übersicht vorhandener Sensoren in pH-BB zur Prognostik kalkungsrelevanter Bodenkennwerte.

Sensoren [Einheit]	Bodenkennwert		
	pH	Bo.textur	Humusgeh.
<i>Geophilus</i>			
Gammaaktivität [Total Counts]		X	X
scheinbarer elektrischer Widerstand [Ohm m]		X	X
<i>Veris V3150/V3100</i>			
scheinbare elektrische Leitfähigkeit [mS/m]		X	X
<i>Veris pH Manager</i>			
pH-Wert (Ionenselektiveelektroden)	X		
<i>Veris OpticMapper</i>			
Reflektanzmessung Red (660 nm) und IR (940 nm)			X
<i>multispektrale Luftbilder (offen bzw. vegetationslos)</i>			
DOP 20 (20 cm Auflösung) Geobroker Brandenburg			X
DOP 40 (40 cm Auflösung) Geobroker Brandenburg			X
RGB Luftbilder (WMTS: Google Maps, Bing Maps, ArcGIS Online)			X
Sentinel-2 (Satellitendaten Copernicus)			X

Zuvor werden die Sensordaten durch geostatistische Interpolation (Kriging) zu flächenhaften Sensorkarten verrechnet (Interpolationsalgorithmus). Die Auswahl repräsentativer Probenahmepunkte erfolgt durch eine fuzzy c-means Clusteranalyse im Algorithmus, welche folgende Kriterien berücksichtigt: (1) eine möglichst große Abdeckung des multivariaten Merkmalsraums (Sensordaten), (2) eine möglichst geringe räumliche Varianz im Bereich der Beprobungspunkte und (3) eine gute Abdeckung der Extremwertbereiche der Sensordaten. Um Probenahmepunkte im Vorgewende zu vermeiden, kann optional eine Pufferdistanz zur Feldgrenze angegeben werden. Eine weitere Besonderheit ist, dass auch eine Sensorvariable stärker gewichtet (favorisiert) werden kann. Damit werden Probenahmepunkte in den Extremwertbereichen der Variable berücksichtigt. In Abb. 5.9.1 sind die Ergebnisse der mit dem pHBB-Referenzprobenalgorithmus ermittelten Beprobungsstandorte und Prognoseergebnisse für die Bodenkennwerte pH und Humus für Schlag PP1392 in Booßen exemplarisch dargestellt. Die auf den Praxisbetrieben gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass ein Umfang von 12 bis 15 Referenzproben ausreichend und ausgewogen ist, um die Bodensensordaten optimal und robust zu kalibrieren (Abbildung 1B und 1E). Der Stichprobenumfang ermöglicht zusätzlich eine unabhängige Validierung (Leave-One-Out-Kreuzvalidierung), um die Genauigkeit der Bodenkarten zur überprüfen. Die Verrechnung von maximal zwei bis drei verschiedenen Sensordaten (Prädiktoren) ist dabei ausreichend, um genaue Bodenkarten für die kalkungsrelevanten Parameter abzuleiten.

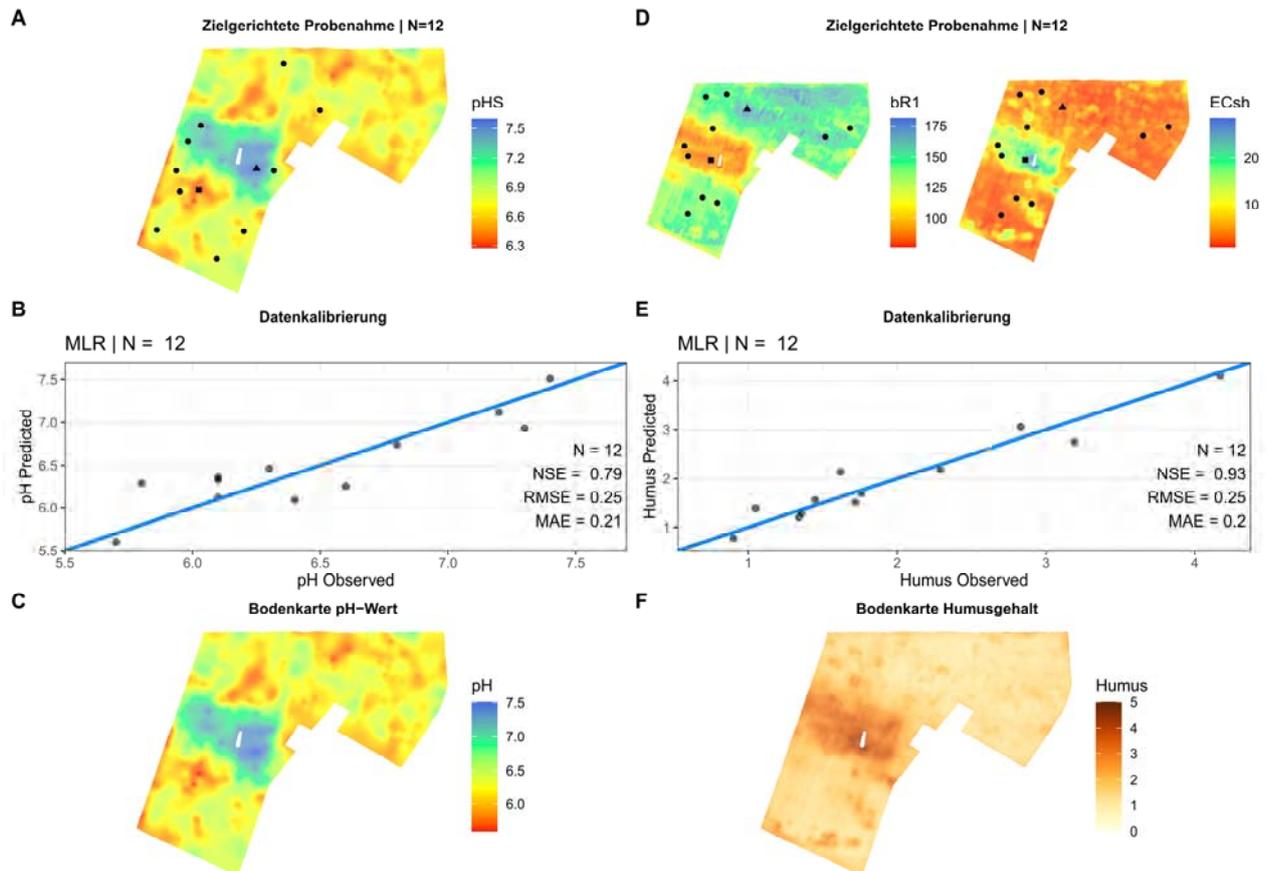


Abbildung 5.9.1: Ergebnisse der mit dem pHBB-Referenzprobenalgorithmus ermittelten Beprobungsstandorte und sensorbasierten Prognose der Bodenkarten für pH-Wert (A-C) und Humusgehalt (D-F) für Schlag PP 1392 in Booßen

5.1.10 AP 10 „Düngungsempfehlung für Kalk“

Die Ergebnisse sind im Praxisblatt 08 „Stufenlose Bestimmung der Kalkbedarfsmenge“ zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.8 sowie Praxisblatt 10 „Erstellung von Streukarten für die Kalkung“, Abschn. 8.3.10. Für die Berechnung der Kalkbedarfsmengen im Ackerbau wurde der VDLUFA Ansatz (v. Wulfen et al., 2008) überarbeitet. Dabei wurde berücksichtigt, dass die sensorbasiert generierten Textur-, pH- und Humusgehaltskarten auch sehr geringe Gehaltsunterschiede ausweisen können. Deshalb wurde der relativ grobe, stufenbasierte VDLUFA Ansatz mit seinen 5 Mineralbodengruppen (BG1-5) und 4 Humusklassen (< 4, 4-8, 8-15 und 15-30% Humus) in einen stufenlosen Ansatz transformiert (Ruehlmann et al. 2021). Die Bodengruppen 1-5 wurden in eine stufenlose Größe, den mittleren Korndurchmesser (MKD) überführt (Abb. 5.10.2, li.). Für die Umwandlung der 4 Humusklassen in eine kontinuierlich skalierte Größe verwendeten wir bei der Kalibration unseres Ansatzes die arithmetischen Mittel der o.g. Humusgehaltsspannen: 2,0; 6,0; 11,5 und 22,5% Humus.

Damit ist es jetzt möglich, jedes Mischungsverhältnis aus Sand, Schluff und Ton und jeden Humusgehalt bei der Berechnung der CaO-Düngungsempfehlung zu berücksichtigen. Die im VDLUFA Tabellenwerk ausgewiesenen 317 CaO Düngungsempfehlungen werden durch den stufenlosen Ansatz mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,99$ reproduziert (Abb. 5.10.1 re.).

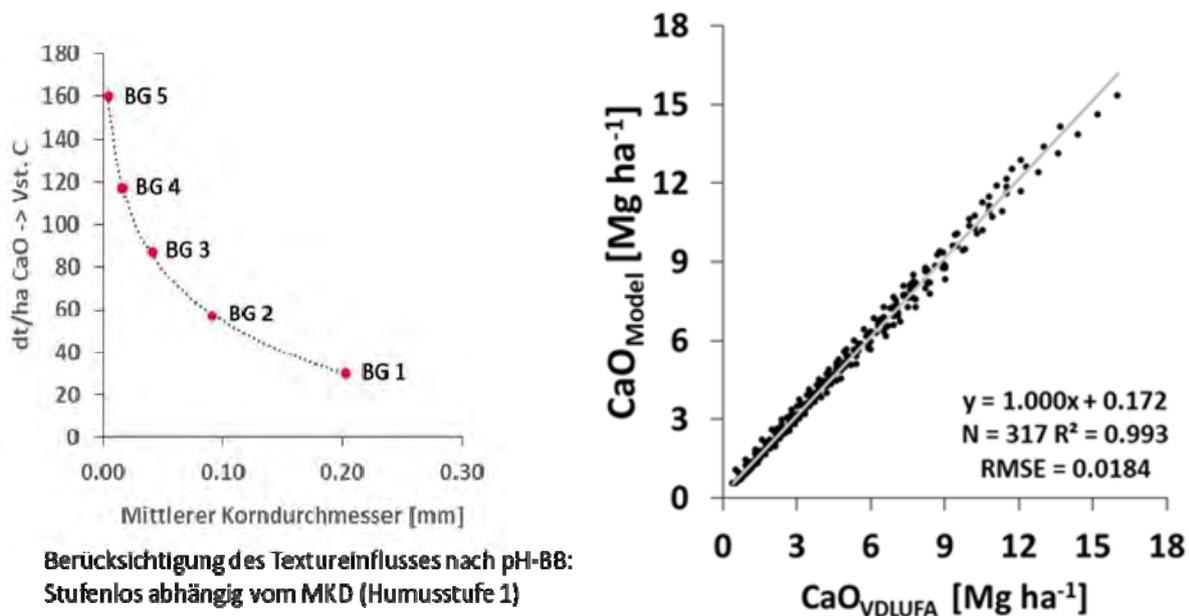


Abbildung 5.10.1: Zum Erreichen der Versorgungsstufe C benötigte CaO-Mengen in Abhängigkeit vom mittleren Korndurchmesser und von der Bodenklasse (li) und Vergleich der empfohlenen CaO Mengen nach VDLUFA-Tabellenwerk und nach pHBB Stufenlosmodell (re).

Für die Wahl des Kalkdüngers sollten folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- der Neutralisationswert als Gehalt an basisch wirksamen Verbindungen von Mg- und Ca-Ionen relativ zu der reinen als CaO ausgewiesenen Düngermenge,
- die Wirkgeschwindigkeit/Reaktivität der im Dünger enthaltenen Bindungsformen (Carbonat, Oxid, Hydroxid, Silikat) sowie deren Mahlfineinheit,
- die Transport-, Lager- und Streufähigkeit in Abhängigkeit vom Schüttgewicht, dem Feuchtegehalt und der Körnung, die die mögliche Verteilgenauigkeit und die Staubbildung beeinflusst, und
- Nebenbestandteile (Begleitnährstoffe, Schadstoffe) oder deren Verhältnis.

Zur Erstellung von Boden- und Applikationskarten wurde die pH-BB-Toolbox als bedienerfreundliche Software entwickelt, vgl. Praxisblatt 02 „Leitfaden präzise Kalkung“ und die „pH-BB-Toolbox“. Daneben wurde eine expertenorientierte Variante in „R“ für die weitere Nutzung aufgebaut. Beide Systeme sind in zwei Arbeitsblöcke gegliedert. Der erste Block besteht aus Teilprozessen zur Generierung hochaufgelöster Bodenkarten. Der zweite Block errechnet Kalkempfehlungen und verwendet dabei die präzisen Informationen zur Ermittlung und on-farm-gerechten Nutzbarmachung der kleinflächigen Kalkbedarfsmengen. Im Arbeitsblock Kalkempfehlung wird für die Ermittlung der Bedarfsmengen der „Stufenlosalgorithmus“ empfohlen. Zur Erstellung finaler Applikationskarten werden die ermittelten CaO-Mengen auf die Bearbeitungsbreite der Düngerstreuer angepasst und an der Fahrspur ausgerichtet. Die finalen Applikationskarten werden, den Praxisanforderungen entsprechend, als ESRI-Shape- oder IsoXML-Dateien ausgegeben.

5.1.11 AP 11 „Kalkbilanzierung“

Ziel von AP 11 war die Zusammenstellung von Daten zur Abschätzung der Versauerung und Ca-Entzüge und deren Aufbereitung für die Nutzung in Module zur Kalkbilanzierung. Die Ergebnisse sind eingegangen in die Entwicklung der pH-BB Toolbox. Sie sind Bestandteile der

Praxisblätter 08 „Stufenlose Bestimmung der Kalkbedarfsmenge“, 09 „Management der Basizität“; 10 „Erstellung von Streukarten für die Kalkung“ sowie 12 „Zoneneinteilung und Anwendungsgebiete von Sensordaten für standortspezifische Bewirtschaftung“, vgl. Abschnitt 8. Für eine Abschätzung der Versauerung und Ca-Entzüge wurden die Ca-Entzüge (Angabe in CaO) von Ackerfrüchten und die Versauerung recherchiert.

Pflanzenentzüge:

Die Entzüge von Calcium aus dem Boden variieren. Hohe Entzüge pro Ernteertrag haben Raps und Sonnenblume (4 kg CaO-Entzug/dt Ertrag), gefolgt von Leguminosen (z.B. Sojabohne). Getreide, Rüben und Kartoffeln hingegen haben recht geringe Entzüge (< 1 kg CaO-Entzug/dt Ertrag). Mit Augenmerk auf die Ca-Entzüge pro Fläche haben jedoch die masseintensiven Früchte (Kartoffeln, Rüben) die höchsten Entzüge mit bis zu 250 kg CaO-Entzug/ha (vgl. Veröffentlichungen vom „Landeskreis Düngung (LAD)“ der Bundesländer).

Natürliche Versauerung

Der höchste Kalkverlust ist durch Auswaschung und Neutralisation zu verzeichnen. In der Literatur zu Kalkverlusten werden die beiden Prozesse nicht einzeln betrachtet, da sie stark miteinander verwoben bzw. voneinander abhängig sind.

Tabelle 5.11.1: Übersicht CaO-Entzüge von Ackerpflanzen. Generell erfolgte die Angabe der CaO-Werte von in Frischmasse (FM). Quellen: Veröffentlichungen vom „Landeskreis Düngung (LAD)“ der Bundesländer und Literatur zur Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere.

Ackerpflanze	TM/FM	Ertrag (dt/ha)	CaO-Entzug/Fläche (kg/ha) [in kg]	CaO-Entzug/Ertrag (kg/dt) [in kg]
Weizen	FM	87	45	0,5
Gerste	FM	65	49	0,6
Roggen	FM	70	42	0,6
Tricale	FM	85	44	0,6
Dinkel	FM			0,8
Hafer	FM	63	37	0,7
Körnermais	FM	87	83	0,9
CCM-Mais	FM	133	87	0,7
Silomais	FM	500	90	0,2
Ackerbohne	FM	45	67	1,5
Sojabohne	FM			2,2
Erbse	FM	45	61	1,5
Raps	FM	39	139	4,0
Sonnenblume	FM	35	120	3,6
Zuckerrübe	FM	550	256	0,4
Futter- u. Masserübe	FM	867	201	0,2
Kartoffeln	FM	383	111	0,3

Nach Übersichten der BAD (2003) liegt die Auswaschung je nach Bodengruppe zwischen 100-500 kg CaO/ha und Jahr, bei den in Brandenburg vorherrschenden Bodengruppen 1-3 bei 100-300 kg CaO/ha und Jahr.

Versauerung durch Saure Mineraldünger

Stickstoffdünger (N-Dünger) wirken meist versauernd. Die in der Landwirtschaft verwendeten N-Dünger unterscheiden sich deutlich in Bezug auf ihre Kalkzehrung. Durch die Gabe von Stickstoffdüngern und deren bodenversauernde Wirkung ergibt sich ein Erfordernis zusätzlicher Kalkdüngung.

Tabelle 5.11.2: Saure Mineraldünger und deren Kalkzehrung

Dünger	Nährstoffgehalt in %		Kalkzehrung in kg CaO je.. dt Produkt
	Gesamt N	Schwefelanteil	
N-Dünger			
Kalkammonsalpeter	27%	-	-13
Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL)	28%	-	-28
Harnstoff	46%	-	-46
NS-Dünger			
Yara Sulfan	24%	6%	-51
Schwefelsaures Ammoniak (SSA)	21%	24%	-63

Rechenbeispiel für 1 Hektar Winterweizen in Brandenburg

Pflanzenentzug Weizen: 45 kg/ha CaO

+ natürliche Versauerung: 250 kg/ha CaO

+ Versauerung durch Stickstoffdünger (7 dt AHL Dünger): 196 kg/ha CaO

= 491 kg/ha CaO

5.1.12 AP 12 „Management der Basizität“

Die Ergebnisse sind im Praxisblatt 09 „Management der Basizität“ zusammenfassend beschrieben, vgl. Anhang 8.3.9. Mithilfe der VDLUFA-Methode lässt sich der Kalkbedarf indirekt auf Basis empirisch ermittelten Beziehungen zwischen den Bodeneigenschaften pH, Textur und Humus und dem Kalkbedarf berechnen. Neben diesem Ansatz wurde im Projekt **zusätzlich eine direkte Methode zur Kalkbedarfsermittlung über die Basenneutralisationskapazität (BNK)** getestet (Horf et al. 2022; Vogel et al. 2020; Vogel et al. 2021, Vogel et al. 2022). Sie beruht auf der Titration einer Bodenprobe mit einer basischen Lösung (z.B. Ca(OH)₂) steigender Konzentration. Nach einer bestimmten Äquilibrierungszeit wird der pH-Wert des Bodens gemessen und gegen die Basenkonzentration zu einer Titrationskurve aufgetragen (Abb. 5.12.1).

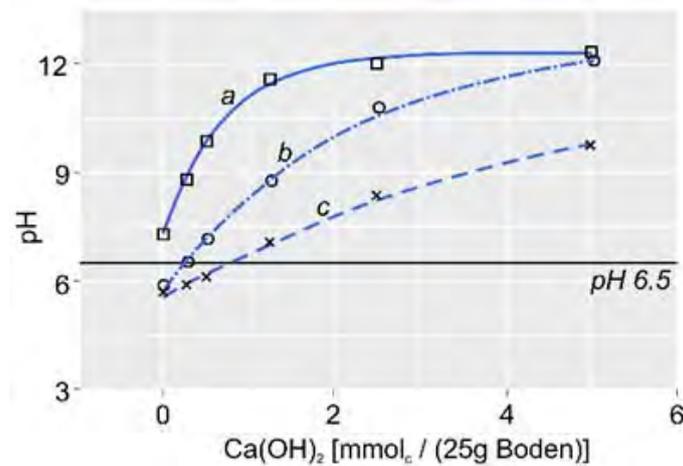


Abbildung 5.12.1: Beispiele für unterschiedliche Geometrien von BNK-Titrationskurven (a, b, c) je nach Bodeneigenschaften (z.B. pH-Pufferkapazität). Die durchgezogene schwarze Linie zeigt den Ziel-pH-Wert von 6,5 an.

Da der Wertebereich dieser Titrationskurve auch über den optimalen Boden-pH-Wert hinausreicht, lässt sich neben dem Kalkbedarf zu saurer Böden auch der Versauerungsbedarf zu basischer Böden bestimmen, Abb. 5.12.2.

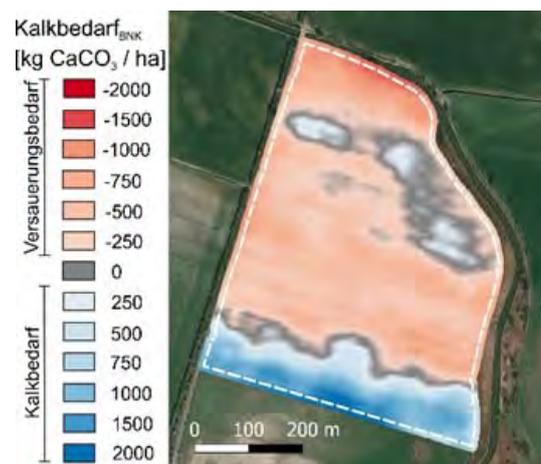


Abbildung 5.12.2: Ortsspezifischer Kalk- bzw. Versauerungsbedarf nach der Basenneutralisationskapazität für einen landwirtschaftlichen Schlag in Brandenburg.

Analog zu den Einflussgrößen für die Bemessung der Kalkdüngung nach der VDLUFA Methode haben wir auch die Basenmenge, die für eine bestimmte pH-Änderung (ΔpH) nötig ist, in Abhängigkeit von der Bodentextur und dem Humusgehalt berechnet (Gl. 5.12.1):

$$\Delta\text{pH} = (\text{pH}_{\text{max}} - \text{pH}_0) \cdot (1 - \text{EXP}(-a \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2)) + b \cdot \text{MPD} - c \cdot \text{SOC} \quad \text{Gl. 5.12.1}$$

Mit: pH_{max} = pH von gesättigtem Calciumhydroxid [Bates et al., 1956]; pH_0 = pH-Wert vor Basenzugabe, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [mmol_c (25 g Boden)⁻¹]; mittlerer Korndurchmesser MPD [10–3 m]; organischer Kohlenstoff SOC [g kg⁻¹]; a, b und c sind dimensionslose, standortübergreifende Fittingparameter. Im Ergebnis der sehr guten Modellgüte kann zumindest für das Untersuchungsgebiet geschlussfolgert werden, dass die BNK des Bodens nicht zwangsläufig ein

Ergebnis von Laboruntersuchungen sein muss, sondern auch mit hinreichender Güte berechnet werden kann, Abb. 5.12.3.

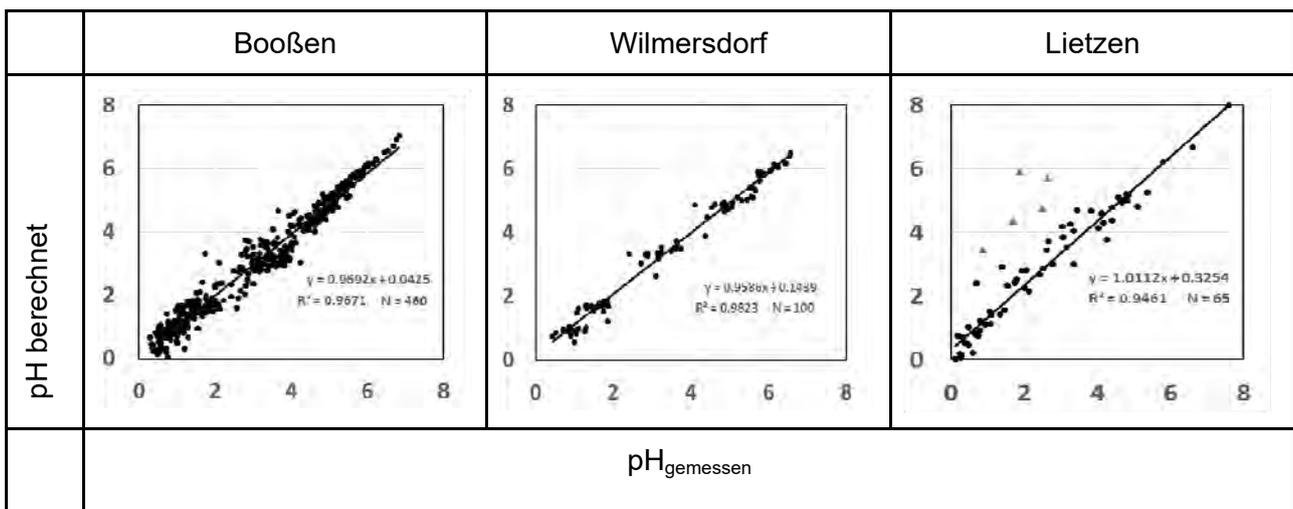


Abbildung 5.12.3: Gemessene pH-Wertänderung nach $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Zugabe vs. nach Gl. 1 berechnete pH-Wertänderung, getrennt für die drei Landwirtschaftsbetriebe dargestellt. Die mit den fünf roten Dreiecken markierten Datenpunkte wurden von der Regression ausgeschlossen.

Vor einer generalisierten Anwendung des Ansatzes ist jedoch eine Validierung an Böden mit anderer Entstehungsgeschichte/anderem geologischen Ausgangsmaterial erforderlich.

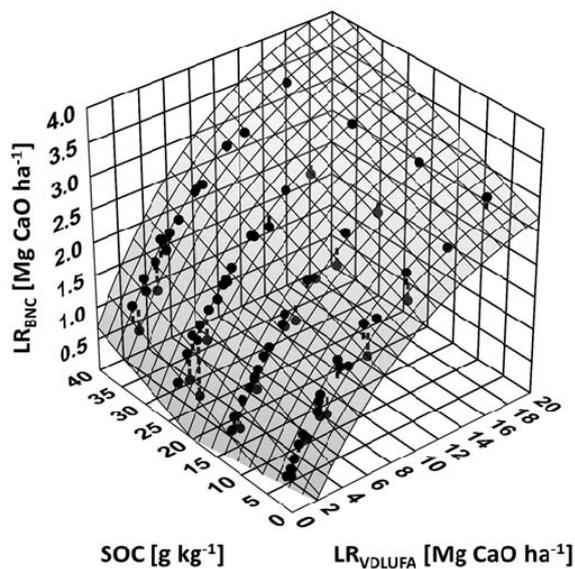


Abbildung 5.12.4: CaO-Bedarf nach BNK (LR_{BNC}) in Abhängigkeit vom CaO-Bedarf nach VDLUFA ($\text{LR}_{\text{VDLUFA}}$) und dem Corg-Gehalt (SOC).

Gleichung 5.12.1 kann auch genutzt werden, den für die jeweilige pH-Wertänderung erforderlichen CaO-Bedarf im Feldmassstab zu berechnen. Dazu kann die bei BNK-Untersuchungen verwendete Dimension $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [$\text{mmolc} (\text{25 g Boden})^{-1}$] auf stöchiometrischer Grundlage in CaO [$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$] umgerechnet werden kann - hier unter Berücksichtigung einer Ap-Horizontstärke von 0,3 m und einer Trockenrohdichte von 1.5 g cm^{-3} .

Da der CaO-Bedarf nach BNK deutlich kleiner ist als der nach VDLUFA kann geschlussfolgert werden, Abb. 5.12.4, dass die VDLUFA-Empfehlungen neben dem CaO Bedarf für die jeweils erforderliche pH-Wert Erhöhung **einen erheblichen Puffer für die Dauer eines Kalkungsintervalls beinhalten**. Dieser Puffer scheint alle Effekte der Versauerung, der Ca-Auswaschung und der Ca-Abfuhr über Ernteprodukte zu berücksichtigen. Andererseits ist zu bedenken, dass bei den BNK-Untersuchungen der Laugenzusatz zum Boden eine viel höhere und schnellere pH-Wirksamkeit aufweist als die Ca-Applikation in Form verschiedenster Kalkdünger. Testweise wurde untersucht, ob Spektroskopie im sichtbaren und nahen Infrarotbereich (visNIRS) eine Möglichkeit für die sensorbasierte Bestimmung der BNK darstellen kann. VisNIRS wurde an getrockneten Bodenproben von pH-BB-Versuchsflächen getestet. Die BNK des Bodens und der entsprechende Kalkbedarf (LR_{BNK}) wurden für einen Ziel-pH-Wert von 6,5 vorhergesagt. Ergebnis ist, dass visNIRS eine schnelle und kostengünstige Methode zur Vorhersage des Kalkbedarfs sein kann (Horf et al. 2022⁵, Vogel et al. 2022⁶).

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Alle im Abschnitt 5.1 aufgeführten Ergebnisse wurden referiert publiziert, vgl. Abschn. 5.1.3. In diesem Prozess wurden alle Daten und Ergebnisse durch externe Experten bewertet und der Beitrag zur Fortschreibung des Wissenstandes in den jeweiligen Fachgebieten bestätigt. Mit Blick auf die späteren Ausführungen zum Nutzen der Ergebnisse für die Praxis, zur Zielerreichung und Anschlussfähigkeit, Abschn. 5.5 bis 5.7, wurden die in den Arbeitspaketen erwarteten Ergebnisse mehrheitlich erreicht, vgl. Tab. 3.2.1 und damit die Ziele des Projektes umgesetzt.

Für die im Abschn. 3.1 beschriebenen Probleme und Innovationslücken wurden die geplanten Lösungen erfolgreich entwickelt:

- Fachpraktische Lösungen für eine kleinräumig adäquate Kartierung und Kalk-Bewirtschaftung wurden entwickelt.
- Bei Schaffung einer hinreichenden Kartierungskapazität können den Landwirten geeignete Karten zur Verfügung gestellt werden.
- Praxiserprobte Methoden für die Umsetzung einer präzisen Kalkung als Grundvoraussetzung für alle weiteren Düngemaßnahmen liegen nun vor.
- Insbesondere steht eine praxiserprobte sensorbasierte Kartiermethode für die Textur und den MKD zur Verfügung, als Schlüssel für die Lösung vieler anderer bewirtschaftungsbedingter Probleme.

Weitergehender Handlungs- und Forschungsbedarf ist in Abschn. 5.1.7 benannt.

Mit spezifischem Bezug zu den einzelnen Arbeitspaketen wird folgende weitere Diskussion geführt:

⁵ Horf, M., Bönecke, E., Gebbers, R., Kling, Ch., Kramer, E., Rühlmann, J., Schröter, I., Schwanghart, W., Vogel, S. (2022): Utility of visible and near-infrared spectroscopy to predict base neutralizing capacity and lime requirement of quaternary soils. Precision Agric (2022). <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09945-9>

⁶ Vogel, S.; Gebbers, R.; Schröter, I.; Kramer, E.; Bönecke, E.; Rühlmann, J.; Kling, Ch. (2022): Direkte sensorgestützte Vorhersage des teilflächenspezifischen Kalkbedarfs auf Feldskala unter Verwendung der Basenneutralisationskapazität. 7.9.2022. Jahrestagung der DBG 2022, Trier, 5.-8.9.22. Vortrag ID 375

AP1 „Wissensvermittlung“: Das Bewusstsein über hohe schlaginterne Bodenheterogenität ist bei den Landwirt:innen prinzipiell da, werden jedoch beim Kalkungsmanagement zu wenig beachtet. Weit über 90% wünscht sich genauere Kenntnisse über die Heterogenität, um das pH-Management zu verbessern. Eine nicht beantwortete Frage ist die nach der Qualität der betrieblichen Bodendaten zur Textur. Im Kontext zu unseren Ergebnissen, dass im Mittel nur für 40% der Ackerfläche die Bodentextur richtig wiedergeben ist, relativiert sich der in der Befragung angegebene Flächenanteil von 39%, der sich nach betrieblicher Einschätzung im optimalen pH-Wertbereich (Vst. C) befindet.

AP2 „Folgenabschätzung“: Die „Investition“ in präzise sensorbasierte Grunddaten- und Applikationskarten führt zu unmittelbaren ökonomischen und ökologischen Effekten. Dies rechtfertigt gesellschaftliche Aufwendungen für deren Umsetzung. Ein wichtiges Ergebnis, das nicht realisiert werden konnte, ist die Bestätigung der Ertragswirkungen der Kalkung in den Feldversuchen. Dürrebedingte Ertragsdepressionen und ausbleibende Kalkwirkungen – das Granulat lag im Herbst ungelöst auf den Boden – ließen keine statistisch gesicherte Auswertung zu. Dennoch haben sich auf den bisher suboptimal versorgten betrieblichen Beobachtungsflächen das Ertragsniveau, die Bestandesentwicklung und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenheit erwartbar deutlich verbessert.

AP 3 „Wissenstransfer“: Wie eingangs dargelegt und im Abschn. 5.1 belegt, wurden die Transferziele erreicht. Durch Trockenheit und Cov-19 Restriktionen verzögerten sich Auswertungen.

AP 4 „Texturkartierung“: Das Geophilus-Messsystem hat sich in der Praxis validiert bewährt. Die Qualität der Texturdaten ist im Vergleich zu betrieblich verfügbaren Daten hoch (Abb. 5.4.3). Für die Berücksichtigung des Bodenfeuchteinflusses zur Kalibrierung der Sensordaten hat sich der Geophilus basierte GWI als tragfähige Lösung herausgestellt. Die geplante Berücksichtigung der Trockenrohdichte aus Penetrometerdaten lies sich im Projekt nicht realisieren. Kompatible Penetrometer waren nicht verfügbar. Für die Einbeziehung der Trockenrohdichte wird die Entwicklung von Pedotransferfunktionen vorgeschlagen, die die Trockenrohdichte als Funktion von Körnung und organischer Bodensubstanz berechnen. Zukünftig sollte die Teilflächenbildung zugunsten „stufenloser“ Karten des mittleren Korndurchmessers für die Bemessung von Grundnährstoffen aufgegeben werden.

AP 5 „Humuskartierung“: Die um den OpticMapper entwickelte Kartiermethode ist praxistauglich. Ziel erreicht. Allerdings ergeben sich aus der Literatur und aus begleitenden Vorversuchen, dass mit anderen Sensorkombinationen sowie mit Fernerkundungsdaten mindestens gleichwertige Humusprognosen erwartet werden können. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht, auch mit Blick auf andere Humus bezogene Fragestellungen. Der bewertete Bodenfeuchtesensor ist nicht in der Lage die kleinräumigen Bodenfeuchteunterschiede im Feld abzubilden. Auch hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf.

AP 6 „pH-Kartierung“: Aus den Ergebnissen wird deutlich, wie wichtig die hochauflösende Erfassung der Bodenacidität in Brandenburg ist. Sowohl das pH-Wertniveau als auch die schlaginterne pH-Variabilität können sehr unterschiedlich ausfallen (Abb. 5.6.2). Während sich die mittleren pH-Werte meist zwischen 5,1 und 6,7 erstrecken, wurden im Extrem pH-Werte zwischen 3,8 und 7,4 gemessen. Das Veris-Messsystem hat sich in der Praxis bewährt. Allerdings ergeben sich aus Fachgesprächen, aus der Literatur und aus begleitenden Vorversuchen Hinweise, dass (i) durch Kombination der pH-Elektroden mit anderen

ionenselektiven Elektroden eine Reduzierung der Referenzproben ergeben kann und (ii) dass andere sensorbasierte Verfahren (visNIRS) die Vorhersage von sowohl pH-Werten als auch Bodentextur und Humusgehalt ermöglichen. Es besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

AP 7 „Feldversuche“: Die Versuchsjahre 2018 - 2020 waren von extremer Trockenheit geprägt. Die Vorzüge ortsspezifischer Kalkung konnten nur bedingt dargestellt werden. Dennoch wurden mit dieser Variante größere Flächenanteile in Versorgungsstufe C gebracht als mit der einheitlichen Kalkungsvariante. Auf gut versorgten Teilflächen wurde mit der ortsspezifischen Kalkung ein geringerer Flächenanteil überversorgt als mit einheitlicher Kalkung. Der CaO-Bedarf nach VDLUFA ist auf 3 Jahre ausgelegt. Eine Erhaltungskalkung mit der empfohlenen CaO-Menge bedeutet, dass in Folgejahren zunächst höhere Versorgungsstufen erwartbar sind, bevor sich Versorgungsstufe C einstellt. Vermahlung und Reaktivität des Kalkdüngers haben Einfluss auf die Umsetzung und Wirkungskdauer.

AP 8 „Datenvorverarbeitung“ und AP 9 „Referenzprobenstrategie“: Die Algorithmen für die Prüfung und Vorverarbeitung der Sensordaten wurden mit Einführung innovativer kombinierter Methoden erfolgreich entwickelt. Der Probenahmealgorithmus ist ein neuartiges Werkzeug, mit dem betriebliche und wissenschaftliche Ansprüche gleichermaßen berücksichtigt werden. Die verschiedenen Einstelloptionen ermöglichen seine breite Anwendung auch für andere Fragestellungen. Dies wird durch die Möglichkeit der stärkeren Wichtung nur einer Sensorvariable unterstützt. Die Algorithmen sind wie geplant in die pH-BB Toolbox integriert und als R-Paket verfügbar. Besonderes Merkmal ist, dass die Algorithmen auch für die Verarbeitung beliebiger anderer flächenbezogener Sensordaten verwendbar sind.

AP 10 „Kalkungsempfehlung“: Die entwickelten stetigen Funktionen zum Beschreiben der Zusammenhänge zwischen pH-Wert, Textur (Ton- und Schluffgehalt), Humusgehalt und Kalkbedarf stellen im Vergleich zum stufenbasierten VDLUFA Ansatz einen großen praktischen Fortschritt dar: Fachlich nicht plausible sprunghafte Änderungen der Kalkstreumenge bei Bodengruppenübergängen entfallen zugunsten stetiger Regelkurven. Die kumulierten Applikationsmengen sinken, bei Einhalten der VDLUFA Empfehlungen. Praktisch kann zukünftig eine schlaginterne Einteilung in Bewirtschaftungszonen entfallen, bzw. ist deren Größe nur noch durch Arbeitsbreite und Regelverhalten der Streutechnik bestimmt. Zur Berücksichtigung von Versauerung und erntebedingten Ca-Entzügen wurden die VDLUFA-Empfehlungen zur Erhaltungs- und Gesundungskalkung mit zeitlichen Aufschlägen berücksichtigt (Jahr der letzten Kalkung). Die Routinen zur Berechnung der Applikationskarten wurden mit der pH-BB Toolbox wie geplant in ein FMIS implementiert. Den Praxisanforderungen entsprechend, ist der Kartenexport als ESRI-Shape- oder IsoXML-Datei für Streuterminals und Bordrechner gängiger Streuer implementiert.

AP 12 „Basizität“: Die Basenneutralisationskapazität (BNK) kann eine wertvolle Ergänzung zum VDLUFA-Methode sein, da sie zusätzliche Angaben zum potenziellen Versauerungsbedarf liefert. Somit kann sie eine bessere Anpassung des pH-Werts einzelner Böden ermöglichen. Der Vorteil der nicht VDLUFA-konformen Kalkbedarfsermittlung über die BNK liegt darin, dass neben dem Kalkbedarf saurer Böden auch der Versauerungsbedarf basischer Böden bestimmt werden kann. Basische Böden im Wurzelhorizont treten punktuell an Moränenkuppen zutage. Die geringen Flächenanteile rechtfertigen keine gesonderte Ausbringung saurer Düngemittel im

Zuge des Kalkmanagements. Für das Management von Flächen in den Kalkversorgungsstufen D und E wird empfohlen die Kalkung zu unterlassen, bis sich der pH-Wert durch natürliche Versauerung in die Versorgungsklasse C geregelt hat. Dies trifft vor allem auf Flächen zu, die aufgrund von in der Vergangenheit nicht an den Bedarf angepasster Kalkung überversorgt sind. Mit Blick auf die Ergebnisse im AP 8 und 11 ist weiter interessant, dass der CaO-Bedarf nach BNK deutlich kleiner ist als der nach VDLUFA. Wie sich der in Kap. 5.1.12 ermittelte Puffer in den VDLUFA-Empfehlungen detailliert zusammensetzt, bedarf weiterer Untersuchungen, die über den Projektrahmen hinausgehen. Ebenso deuten die erzielten ersten Ergebnisse zur sensorbasierten Bestimmung der BNK mit visNIRS auf eine fachpraktisch notwendige Fortsetzung der wissenschaftlichen Untersuchungen hin. Diese wird auch durch Ergebnisse anderer Forschergruppen bestätigt (Horf et al. 2022).

5.3 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

Die Ergebnisse belegen, dass durch präzise Kalkung das Ertragsniveau, die Bestandesentwicklung und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenheit erwartbar deutlich verbessert werden kann. Unsere hierzu berechneten Annahmen für das Land Brandenburg auf Basis mehrjähriger Daten der Ertragsstatistik von ca. 6,1 bis 10,2 %/Jahr Ertragszuwachs mit einem zusätzlichen Marktwert von ca. 81 bis 134 Mio. € / Jahr wurden im Fachaustausch mit Wissenschaftlern, Beratern und Dienstleistern mehrfach in der genannten Größenordnung bestätigt, vgl. Tab. 5.3.1. Aus unserer Überzeugung sollten im Interesse des Landes die vorliegenden Ergebnisse, Erkenntnisse und Lösungen für alle Landwirtschaftsbetriebe zum Einsatz kommen.

Höchste Priorität hat eine sensorbasierte Neuinventarisierung der Textur. Die fehlerhafte Einordnung von 60 % der kartierten Flächen belegt, dass jegliche teilflächenbezogene Düngemaßnahmen nicht zielführend sein können, weil die Textur immer eine entscheidende Regelgröße ist, vgl. Tab. 5.4.1 u. Abb. 5.4.6. Unter- und Überdüngungen sind die Folge. Die Annahme scheint gerechtfertigt, dass Flächen mit Nährstoffüberschüssen (rote, gelbe Gebiete) infolge fehlerhafter Bodenkarten weiterhin überdüngt werden. Das im Land Brandenburg entwickelte Geophilus-Messsystem hat sich in der Praxis validiert bewährt. An Standorten mit höheren Tongehalten und potenziell erhöhter Bodenfeuchte trägt der verbaute Gammassensor entscheidend zur Bodentexturableitung bei. An trockenen, sandigen Standorten bleibt die Widerstandsmessung ein zuverlässiges Messsignal. An Zwischenstandorten hat sich die Korrektur des Widerstands vs. Bodenfeuchte mittels des GWI bewährt. Der Sensor sollte zeitnah zu einem normkonformen Serienmuster ertüchtigt und hergestellt werden. Bei einer unterstellten Einsatzzeit von 100 Tagen pro Jahr (ca. 10000 ha) kann mit 20 Messsystemen die gesamte LN Brandenburgs innerhalb von 6 Jahren kartiert werden. Für die erheblichen Investitionen sind verschiedene Lösungen denkbar, von finanzieller und fachlicher Unterstützung der Betriebe bis hin zur staatlich organisierten Neuinventarisierung, ähnlich der Reichsbodenschätzung. Eine weitere bedeutende Innovation ist die Entwicklung und Einführung des Modells des Mittleren Korndurchmessers (MKD), vgl. Rühlmann et al. 2021 und Abb. 5.10.2.

Die im VDLUFA Tabellenwerk ausgewiesenen 317 CaO Düngungsempfehlungen wurden durch den stufenlosen Ansatz mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,99$ reproduziert, vgl. Abb. 5.10.1 re. Mit Nutzung der steten Regelfunktionen ist auch mit praxisüblicher Streutechnik eine präzise Ausbringung von Kalkdünger möglich. Durch die Einführung des MKD in alle

Tab. 5.3.1: Erwartbare ökonomische Wirkungen präziser Kalkung für Brandenburg

	Ertrag 2015-2020 [t]	Anbaufläche [ha]	Ertrag [t/ha]	Preis [€/t]	Gesamtwert €	26 % C Ertrag [t]	36% D, E 5% Ertragssteig [t]	min [t]	max [t]	potenzieller Ertragszuwachs		potenzieller Wertzuwachs		potenzieller Wertzuwachs / ha * a	
										min [t/a]	max [t/a]	min [€/ha * a]	max [€/ha * a]	min [€/ha * a]	max [€/ha * a]
Fruchtart	11.271.740	2.428.052			1.236.470.546,4					696.352	1.154.552	81.807.461	134.909.368	75	123
WW einschl. Dinkel u Einkorn	1.041.901,0	154.498,0	6,7	216,00	225.050.616,0	270.894,3	393.838,6	10,0	20,0	435.514,6	475.106,9	12.602.834	21.154.758	82	137
Sommerweizen (einschließlich Durum)	12.500,0	3.050,0	4,1	276,67	3.458.333,3	3.250,0	4.725,0	10,0	20,0	5.225,0	5.700,0	1.175	193.667	63	107
Roggen und Winterweizen	721.124,2	172.719,0	4,2	166,25	119.886.892,7	187.492,3	272.584,9	10,0	10,0	274.027,2	301.429,9	12.980	40.383	12	39
Triticale	166.041,0	32.257,0	5,1	180	29.887.380,0	43.170,7	62.763,5	20,0	30,0	75.714,7	82.024,3	15.608	21.917	87	122
Wintergerste	533.397,0	96.697,0	5,5	161,25	86.010.266,3	138.683,2	201.624,1	20,0	30,0	243.229,0	263.498,1	70.408	8.084.965	84	117
Sommergerste	20.496,5	5.144,0	4,0	98,00	2.008.657,0	5.329,1	7.747,7	30,0	50,0	10.125,3	11.683,0	4.263	265.143	52	81
Hafer	39.565,2	17.786,0	2,2	169,00	6.686.513,2	10.286,9	14.955,6	20,0	30,0	18.041,7	19.545,2	5.223	628.532	35	50
Sommerweizen	1.334,0	578,0	2,3	150	200.100,0	346,8	504,3	10,0	20,0	557,6	608,3	75	125	19	33
Körnermais/Mais einschl. Corn-Cob-Mix	124.283,2	20.649,0	6,0	252	31.319.358,0	32.313,6	46.979,1	10,0	20,0	51.950,4	56.673,1	6.960	11.683	85	143
Getreide zur Ganzpflanzenernte	188.492,7	18.000,0	10,5	33,75	6.361.627,5	49.008,1	71.250,2	10,0	20,0	78.789,9	85.952,7	10.556	17.718	20	33
Silo/Grünmais einschl. Lieschkolbenschrot	5.628.656,2	212.100,0	26,5	37,25	209.667.442,2	1.463.450,6	2.127.632,0	10,0	20,0	2.352.778,3	2.566.667,2	315.205	529.094	55	93
Leguminosen zur Ganzpflanzenernte	174.938,7	212.100,0	0,8	160	27.990.186,7	45.484,1	66.126,8	20,0	30,0	79.772,0	86.419,7	16.444	23.092	12	17
Feldgras/Grasanbau auf dem Ackerland	150.102,0	33.100,0	4,5	131	19.663.362,0	39.026,5	56.738,6	10,0	20,0	62.742,6	68.446,5	8.406	14.110	33	56
Kartoffeln zusammen	331.759,5	11.575,0	28,7	268,33	89.022.132,5	86.257,5	125.405,1	10,0	20,0	138.675,5	151.282,3	18.579	31.185	431	723
Zuckerrüben ohne Saatguterzeugung	447.775,7	6.696,0	66,9	29,00	12.985.494,3	116.421,7	169.259,2	30,0	50,0	221.201,2	255.232,1	59.106	93.137	256	403
Erbsen (ohne Frischerbsen)	21.464,7	8.850,0	2,4	234,00	5.022.732,0	5.580,8	8.113,6	10,0	10,0	8.156,6	8.972,2	386	1.202	10	32
Ackerbohnen	992,0	639,0	1,6	260,00	257.920,0	257,9	375,0	30,0	50,0	490,0	565,4	206	34.045	53	84
Sojabohnen	891,8	907,0	1,0	508,00	453.034,4	231,9	337,1	10,0	20,0	372,8	406,7	50	84	28	47
Süßlupinen	11.026,0	8.090,0	1,4	525,00	5.788.650,0	2.866,8	4.167,8	10,0	10,0	4.189,9	4.608,9	198	617	13	40
Wintererbsen	316.375,3	76.991,0	4,1	460,00	145.532.653,3	82.257,6	119.589,9	30,0	50,0	156.289,4	180.333,9	41.762	65.806	250	393
Sommererbsen, Winter- und Sommererbsen	496,5	266,0	1,9	330	163.845,0	129,1	187,7	30,0	50,0	245,3	283,0	66	103	81	128
Sonnenblumen	18.520,7	11.091,0	1,7	600,00	11.112.400,0	4.815,4	7.000,8	10,0	10,0	7.037,9	7.741,6	333	1.037	18	56
Wiesen (hauptsächlich Schnittnutzung)	340.037,7	349.316,0	1,0	150	51.005.650,0	88.409,8	128.534,2	10,0	20,0	142.135,7	155.057,2	19.042	31.964	8	14
Weiden (einschließlich Mähweiden)	979.568,7	974.953,0	1,0	150	146.935.300,0	254.687,9	370.277,0	10,0	20,0	409.459,7	448.683,3	92.079	8.228.377	8	14

Düngebedarfsberechnungen wird es perspektivisch möglich sein, eine schlaginterne Einteilung in Bewirtschaftungszonen zugunsten kontinuierlicher Regelungsfunktionen aufzugeben.

In multivariaten Vorhersagemodellen wurde zudem nachgewiesen, dass der pH-Wert der für die Kalkbedarfsermittlung sensitivste Faktor ist. Für die Praxis ist die Nutzung des Veris pH-Managers auf Basis ionenselektiver Elektroden geeignet. Verbesserte Alternativen sind in Entwicklung. Für die Humusvorhersage können Satellitenbilder in Kombination mit digitalen Geländemodellen zukünftig eine kostengünstigere Alternative darstellen.

Mit Blick auf die von der Praxis erwünschte weitere/bessere Wissensvermittlung zu Bodenheterogenität, Kalkungsmanagement etc. wurden mit den zwölf pH-BB Praxisblättern, der informierenden Umfrage, der pH-BB Toolbox und den entwickelten Sensormethoden wichtige Komponenten in Projekt entwickelt und bereitgestellt. Die Inhalte sollten jetzt nach Förderende in steter Wiederholung an die Praxis herangetragen werden, flankiert von Dienstleistungs- und Beratungsangeboten. Entsprechende Vorschläge sind im Abschnitt 5.7 aufgeführt.

5.4 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen

Mit den Projektergebnissen werden Beiträge zu den förderpolitischen Zielen in den EIP-**Leitthemen 1** „Entwicklung effektiver, umweltgerechter Anbauverfahren, Verbesserung der Produktivität der Pflanzenproduktion und des Gartenbaus über standortangepasste Düngung“ **und 4** „Verbesserung der Wertschöpfung land- und forstwirtschaftlicher Produkte durch Qualifizierung regionaler Wertschöpfungsketten“ geleistet.

Mit Bezug zum EIP-Leitthema 1 leisten die Projektergebnisse Beiträge zur Verbesserung der Produktivität im Acker- und Pflanzenbau sowie im Gartenbau, ökologisch wie konventionell. Diese wurden erreicht durch:

- Veranstaltungen, Veröffentlichungen und Materialien für die Wissensvermittlung und Bewusstseinsentwicklung
- Validierte sensorbasierte Kartierungsmethoden zur präzisen Standortbeschreibung
- Neuartige „stufenlose“ Berechnungsmodelle für die Kalkmengermittlung und Streukartenberechnung, praxistauglich in der pH-BB Toolbox umgesetzt

Mit Bezug zum EIP-Leitthema 4 leistet das Projekt Beiträge zur Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz durch Energieeinsparung, durch Einsparung von Ausgangsstoffen (Kalk) für die (Bio)Landwirtschaft sowie potentiell auch durch Wassereinsparung in Form von höherer Resilienz der Bestände gegenüber Trockenstress. Diese werden erreicht durch:

- Bereitstellung einer vollständigen validierten Prozesskette für die präzise Kalkung, deren brandenburgweite Umsetzung 6,1 bis 10,2 %/Jahr Ertragszuwachs sichert – oder entsprechende Flächenanteile für andere Strategien freimacht.
- In Relation zum Ertrag sinkender Energiebedarf
- Einsparung von Kalk
- bei Umsetzung der Texturkartierung Vermeidung der Überversorgung der Flächen mit anderen Düngern

Zum förderpolitischem Ziel der Verbesserung des Austauschs zwischen Forschung und Praxis hat das EIP-Projekt pH-BB beigetragen, indem:

- regelmäßig und in großem Umfang fachpraktische und wissenschaftliche Erkenntnisse und Ergebnisse direkt und indirekt der Praxis und der Wissenschaft vorgestellt und diskutiert wurden und werden, vgl. Abschn. 5.1.3, 7.2 und Anhänge inkl. der Praxisblätter.
- Die Möglichkeiten für eine stetige Verbreitung und Anwendung vorbereitet wurden, vgl. Abschn. 5.7.
- ein EIP-Folgeprojekt (TONIA) etabliert wurde und somit die Zusammenarbeit von Forschung- und Praxispartnern weiter verstetigt wird.

5.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Direkt nutzbare/verwertbare Empfehlungen aus den Projektergebnissen sind in den zwölf Praxisblättern zusammengefasst: 01 „Bedarf und Nutzen standortspezifischer Kalkung“; 02 „Leitfaden präzise Kalkung“ und die „pH-BB-Toolbox“; 03 „Bestimmung der Bodenart mittels mobiler Bodensensoren“; 04 „Bestimmung des Boden-pH mittels mobiler Bodensensoren“; 05 „Bestimmung des Bodenhumusgehaltes mittels mobiler Bodensensoren“; 06 „Referenzbeprobung und Probenahmestrategie“; 07 „Generierung standort-differenzierter Bodenkarten“; 08 „Stufenlose Bestimmung der Kalkbedarfsmenge“; 09 „Management der Basizität“; 10 „Erstellung von Streu-

karten für die Kalkung“; 11 „Ökonomische Bewertung der präzisen Kalkung“ und 12 „Zoneneinteilung und Anwendungsgebiete von Sensordaten für standortspezifische Bewirtschaftung“. Weitere Empfehlungen sind im informierenden Fragebogen zur präzisen Kalkung enthalten.

Indirekt nutzbare Empfehlungen wurden weitgehend mit den wissenschaftlichen Veröffentlichungen verbreitet. Sie enthalten Anregungen für weiterführende wissenschaftliche Fragestellungen, vgl. Abschn. 5.7.

Nutzbare Produkte sind die pH-BB Toolbox mit umfassendem Handbuch, das zugrunde liegende R-Paket, der Kalkulator für die Wirtschaftlichkeit, die Schulungs- und Vorlesungsmaterialien zur pH-BB Toolbox, zu R, zu QGIS sowie zur Nutzung von ~~Nutzbare Verfahren~~ sind die Kartierungsmethoden für Textur, pH und Humusgehalt, die neuen Algorithmen für die Referenzbeprobung und den MKD.

Die Ergebnisse werden bereits jetzt in der Praxis genutzt. Sie sind auf den Betrieben der OG-Partner im Einsatz. Es liegen viele betriebliche Nachfragen nach konkreten Beratungs- und Kartierungsleistungen vor. Es fehlen die Kapazitäten zu deren zeitnaher Umsetzung. Deshalb haben wir weiterführende Empfehlungen vorgeschlagen, vgl. Abschn. 5.7.

Weitere geplante Verwertung ist mit den verfügbaren Kapazitäten die Teilnahme an weiteren Praxisinformationsveranstaltungen und Tagungen, die Fortsetzung der Ergebnisvermittlung in den Studiengängen an der HNEE, das erfolgreiche Bearbeiten sich anschließender Fragestellungen im Folgeprojekt TONIA, das Einwerben weiterer Fördermittel und das Initiieren weiterer Interessensbündnisse für die Verstetigung und für weiterführende Fragestellungen, vgl. Abschn. 5.7.

5.6 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

Wurden die in der Projektplanung formulierten Ziele erreicht?

Die in Abschnitt 3.2 benannten Ziele des Vorhabens wurden erreicht. Bewusstseinsbildung zur Relevanz der Bodenazidität und **Motivation für ein präzises Kalkmanagement (Ziel 1)** erfolgte. Nicht nur die Partnerbetriebe haben die Relevanz erkannt und setzen die entwickelten Methoden konsequent um, mit den erwarteten ökonomischen und ökologischen Ergebnissen. Über Schulungen, Seminare, die Befragungen sowie durch Praxisworkshops und Fachartikel, vgl. Abschn. 7.2, wurde eine messbare Sensibilisierung erreicht: Viele weitere Betriebe haben die große Relevanz präzisen Kalkmanagements auf Basis präziser Flächeninformationen erkannt. Weit über 90% der befragten 161 Betriebe sind sich der hohen schlaginternen Variabilität der kalkungsrelevanten Parameter Textur, Humus und pH-Wert bewusst, verfügen aber nicht über eine entsprechende Datengrundlage und wünschen sich deshalb eine genauere Kenntnisse über die Heterogenität ihrer Böden. **Sie fragen die entsprechenden Kartierungsleistungen an sowie Zugangsmöglichkeiten zur pH-BB Toolbox.**

Für die ökologische und ökonomische Folgenabschätzung der sensorgestützten Kalkung wurde ein Kalkulator entwickelt und vorgestellt, mit dem die individuellen Eigenschaften eines Betriebes berücksichtigt werden können. Der Kalkulator und die Kernaussage, dass sich sensorbasierte Kartierungen für nahezu jedes Szenario rechnen, wurden u.a. in der Bauernzeitung veröffentlicht (Kling et al. 2022). Wie im Abschnitt „Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen“ (5.7.) berichtet, haben wir auf verschiedenen Kanälen auf Notwendigkeit und Möglichkeiten zur stärkeren Verbreitung hingewiesen und Lösungen angeregt.

Das Ziel, praxistaugliche **sensorbasierte Methoden zur Erfassung von pH-Wert, Textur und Humus** mit hoher Messpunktdichte und Flächenleistung auf Basis marktverfügbarer Sensoren bereitzustellen (**Ziel 2**) wurde wissenschaftlich-technisch übererfüllt. Mit dem Geophilus-Messsystem inkl. der validierten Methode ist nicht allein die Bestimmung der Bodengruppen nach VDLUFA möglich. Es sind kalibrierte Sand-, Schuff- und Tonkarten separat darstellbar, vgl. Abb. 5.4.4. Aus diesen lassen sich die Bodengruppen nach VDLUFA ableiten. Es wurde nachgewiesen, dass die betrieblich vorhandenen BG-Karten auf Basis bei der Reichsbodenschätzung angewandten Fingerprobe zu 60% falsche Informationen enthalten, vgl. Abb. 5.4.7 und Tab. 5.4.1, verbunden mit den entsprechenden ökonomischen und ökologischen Nachteilen. Im Extremfall ergeben sich bis zu vier BG Schätzabweichung, häufig beträgt die Abweichung 1-2 BG. Es wurde nachgewiesen, dass kleinräumige Texturmuster nicht durch herkömmliche Karten abgebildet werden können, Abb. 5.4.6. Der aus der Literatur bekannte zufällige Fehler der Fingerbeprobung wurde im Ringversuch bestätigt, vgl. Abb. 5.4.7. Als Konsequenz ergibt sich das **Erfordernis einer Neuinventarisierung aller Landwirtschaftsflächen**, vgl. Abschn. 5.7. Eine Innovation von noch nicht vollständig diskutierter Bedeutung ist die Entwicklung und Einführung des Modells des Mittleren Korndurchmessers (MKD) (Rühlmann et al. 2021), Abb. 5.10.2.

Für die Humuskartierung wurde ein Verfahren validiert, mit dem aus OpticMapper-Daten mit Hilfe der im Projekt entwickelten pH-BB Toolbox hochauflösende Bodenhumusgehaltskarten erstellt werden können, vgl. Abschn. 5.5 und Abb. 5.5.1. Erweiterte Untersuchungen ergaben erfolgversprechende Hinweise auf die Verwendung frei zugänglicher Satellitendaten. In Folgeprojekten sollte erforscht werden, ob der Einsatz des speziellen Humussensors OpticMapper in Zukunft entfallen kann.

Auch für die Boden-pH-Kartierung wurde unter Verwendung des marktverfügbaren „pH Managers“ von Veris, in Kombination mit im Projekt entwickelten Beprobungsalgorithmen, eine Methodik entwickelt, mit der genaue pH-Wertkarten errechnet werden können, vgl. Abb. 5.6.1. Allerdings haben das Review des fortschreitenden Forschungsstandes sowie die Auswertung von spektraloptischen Kartierungsdaten (visNIRS) Hinweise auf eine alternative Messmethode zur pH-Wertkartierung ergeben, mit der ggf. auch Bodentextur und Humusgehalt zeitgleich mit hinreichender Genauigkeit vorhergesagt werden könnten.

Neben der durch VDLUFA vorgegebenen Methode der Kalkbedarfsermittlung aus pH, Textur und Humusgehalt kann der Kalkbedarf auch direkt durch die Basenneutralisationskapazität (BNK) bestimmt werden. In Projekt wurde nachgewiesen, dass Spektroskopie im sichtbaren und nahen Infrarotbereich (visNIRS) eine schnelle und kostengünstige Methode zur Vorhersage des Kalkbedarfs Alternative darstellen kann, vgl. Abschn. 5.1.12. Auch hierzu sollte weitere Forschung erfolgen.

Die erfolgreiche Entwicklung der sensorbasierten Kartierungsmethoden zusammen mit der Methode zur Bestimmung des MKD nach Rühlmann lagen die Voraussetzungen vor für die Entwicklung besserer Empfehlungen zur Düngermenge und Düngerart, dem **Ziel 3: Entscheidungsunterstützungssystem**. Mit der pH-BB Toolbox wurde der komplette Workflow von der Verarbeitung der Kartierungsdaten über die Ableitung von Kalkungsempfehlungen bis zur Ausgabe von technikspezifischen Streukarten realisiert. Als Neuheit können Streukarten nach dem eigens entwickelten „stufenlosen“ Algorithmus errechnet werden. Dieser ist ebenfalls VDLUFA-konform, „glättet“ jedoch die durch Textur- und Humusgehaltsgruppierung bestehenden sprunghaften Übergänge. Ergebnis ist eine präzisere Ausbringung und eine geringere Kalkbedarfs-

menge. In die Toolbox wurden weiterhin Funktionen zur Kalkwahl, zur Arbeitsbreite und zur Berücksichtigung des Streuverhaltens verschiedener Streuer integriert. Damit wurde auch das **Ziel 4: Verfahrenstechnische Lösungen** zur ortsspezifischen Kalkausbringung erreicht. Es können Kalk-Applikationskarten im agroXML-Format für ganz unterschiedliche Streuertypen ausgegeben werden. Damit wurde ein wichtiger Baustein für den niedrighwelligen Einstieg in präzise Kalkung realisiert.

Welche der gestellten Ziele konnten nicht erreicht werden und warum?

Wie beschrieben, wurden alle Projektziele erreicht. Allerdings haben sich durch den fortschreitenden Wissensstand neue technische und methodische Ansätze ergeben, die in Zukunft zu einfacheren Kartierungssystemen führen können (all-in-one Sensor) und mit denen sich die Kartierungskosten weiter senken lassen können, vgl. Abschn. 5.7.

Durch einen frühzeitigen irreparablen Schadens fiel das von der HNEE zur Verfügung gestellte mobile visNIR-Spektrophotometer aus. Es wird nicht mehr gefertigt. Der alternativ beschaffte OpticMapper hat nicht die gleiche spektrale Bandbreite und Auflösung. Die berichteten interessanten Vorversuche zur Humus- und BNK-Kartierung konnten nicht vertieft werden.

Die indirekte Erfassung des Humusgehalts sowie der anderen zwei kalkungsrelevanten Bodeneigenschaften Bodentextur und pH-Wert mittels visNIR-Spektroskopie sowie die sinnvolle Ergänzung von Bodensensordaten mit frei zugänglichen Fernerkundungsdaten (Sentinel2) und digitalen Geländemodellen (vom Geobroker des LGB in Brandenburg) sollten weiter erforscht werden, um den Arbeitsaufwand, die Kosteneffizienz und die Genauigkeit der Karten für die Praxis weiter zu verbessern.

5.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen

Gibt es weitergehende (wissenschaftliche) Fragestellungen aus den Projektergebnissen, die zukünftig bearbeitet werden sollten?

Folgende wiss. Fragen werden im Folgeprojekt "Teilflächendifferenziert-optimiertes Nährstoffmanagement im Ackerbau" (TONIA) bearbeitet:

- teilschlagdifferenzierte Applikationskarten (10x10 m²) für relevante Nährstoffe auf Grundlage saisonaler Ertragsprognosen und erwarteter Nährstoff-Ernteentzüge; hierzu:
- Ertragsprognosen auf Basis etablierter Pflanzenwachstumsmodelle, mittelfristiger Wettervorhersagen sowie Bodenfeuchteprognosen; hierzu:
- Kleinflächige Bodenfeuchteprognosen durch Weiterentwicklung des AMBAV-Modells und dessen AMBAV Kopplung mit Boden-Pixelgeometrien, Ontogenesemodellen und EZMW Prognosedaten unter Verwendung u.a. von 3D-Karten der Bodentextur; hierzu:
- Entwicklung von Methoden zur präzisen sensorgestützten 3D-Kartierung der Bodentextur.

Folgende, teils wissenschaftliche, Fragestellungen sollten weiter verfolgt werden:

- Die Erkenntnisse zur Fehleinschätzung der Bodentextur auf ca. 60% der Ackerflächen sollten in einem validierenden Großversuch auf Flächen mit N/P-Überschüssen überprüft werden.
- Aufgrund der nachgewiesenen volkswirtschaftlichen ökon. und ökol. Bedeutung präziser Standortinformationen zu Bodentextur, -pH und zunehmend -humusgehalt sollten gezielt Ressourcen für eine sensorbasierte Neuinventarisierung aller Flächen geschaffen werden.
- Ein Kompetenzzentrum Precision Farming sollte als eigenständige Institution der Officialberatung etabliert werden.

- In die etablierte Beratungsförderung sollte als eigener Beratungsschwerpunkt „Bodenbestimmung und Teilschlagspezifika“ aufgenommen werden.
- Eine weitere Wissensvermittlung zu Effekten einer präzisen Kalkung ist zu begrüßen. Als neuer Weg des Wissenstransfers sollte der Zertifikatskurs „Digitaler Pflanzenbau im Jahreszyklus“ aus Sachsen übernommen und personell verstetigt werden.
- Die pH-BB Toolbox zur Berechnung von Kalkungskarten sollte als zukünftiger Kernbestandteil in die GeoBox_{BB} angebunden werden.
- Zur Bewusstseinsbildung der Bedeutung präziser Kalkung sollten Parzellen-Exaktversuche angelegt werden.
- Es sollten neue, ideal direkt messende, Bodensensoren entwickelt werden. Ziel sollte sein, das noch bestehende Erfordernis der Referenzprobenahme zur Kalibrierung der Sensorsignale abzuschaffen.
- Es sollte erforscht werden, ob aus Satellitendaten hochauflösende Bodenhumusgehaltskarten abgeleitet werden können.
- Für die Bestimmung der Trockenrohddichte sollten Pedotransferfunktionen entwickelt werden, die die Trockenrohddichte als Funktion von Körnung und organischer Bodensubstanz berechnen. Geeignete Penetrometer sind i.d.R. nicht verfügbar.
- Alternativ zur etablierten VDLUFA Methodik zur Kalkbedarfsermittlung sollte der Ansatz der direkten Ermittlung durch die Basenneutralisationskapazität (BNK) weiter erforscht werden. Hierzu existieren derzeit prototypische spektroskopische Sensorlösungen (visNIRS, MIRS), die Erfolg versprechen. Ertragseffekte sollten vergleichend zwischen BNK- und VDLUFA-Methode in Langzeitversuchen untersucht werden.
- Zur Boden-pH-Messung sollten alternative Verfahren wie u.a. die visNIR-Spektroskopie weiter erforscht werden, weil die Aussicht besteht, zusätzlich auch Bodentextur und Humusgehalt mit hinreichender Genauigkeit vorherzusagen.
- Zur Erfassung des Humusgehalts sowie der Bodentextur und des pH-Wert sollten ergänzend die Kombination mit weiteren Bodensensordaten, mit Fernerkundungsdaten (Sentinel 2) und digitalen Geländemodellen weiter erforscht werden, um Arbeitsaufwand, Kosteneffizienz und Genauigkeit weiter zu verbessern.

Welche Möglichkeiten zur Umsetzung dieser weiterführenden Fragestellungen werden gesehen?

Die erst genannten Fragen werden im EIP-Projekt TONIA überwiegend gefördert. Zur weiteren Umsetzung fand ein Austausch mit dem Fachreferat 36 „Acker- und Pflanzenbau, Pflanzenschutz, Gartenbau, Düngemittelrecht“ des MLUK statt. Ergebnisse waren ⁷:

- Eine Förderung der Neuinventarisierung ldw. Flächen ist aktuell nicht möglich. Bei Positivlistung wäre perspektivisch eine Förderung über das „Investitionsprogramm Landwirtschaft“ des BMEL vorstellbar.
- Eine weitere Wissensvermittlung zu Ergebnissen einer präzisen Kalkung ist zu begrüßen.
- Zur Bildung eines Kompetenzzentrums „Precision Farming“ wurde auf die Förderperiode 2023-2027 verwiesen.

⁷ Müller, C. (2022): Vermerk über das Gespräch zum EIP Verbundprojekt „Präzise Kalkung in Brandenburg“ am 04.05.2022. MLUK 36, unveröffentlicht.

- Zur Einbindung der pH-BB Toolbox in die GeoboxBB besteht Dialog mit den GeoBox-Entwicklern in RLP. Eine Lösung wird Ende 2023 erwartet. Die Finanzierung für die Anpassung ist derzeit nicht geklärt.
- Für die weitere Wissensvermittlung zur präzisen Kalkung wurde ein Open Access Fachbuch „Sensorgestützte Kartierung von Bodeneigenschaften für die teilflächenspezifische Kalkung. Textur, pH und Humus im Boden: Von den Messwerten zur Streukarte“ konzipiert. Das Konzept wurde von Fachlektoren des Springer Verlags sehr positiv bewertet und zur Veröffentlichung angenommen. Seine Finanzierung ist derzeit nicht geklärt. Einem Antrag an den OA-Brandenburg Fonds folgten sehr umfangreiche Nachforderungen, so dass dieses Projekt vorerst zurückgestellt wurde.

Ein vergleichbarer Austausch zu den Ergebnissen wurde mit dem Brandenburger Landtag sowie mit dem Bauernverband gesucht. Wir erwarten, zu einer der nächsten Sitzungen des LBV eingeladen zu werden. Im Rahmen der begrenzten personellen Ressourcen sucht die OG nach weiteren Möglichkeiten zur Umsetzung.

6 Zusammenarbeit der operationellen Gruppe

Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet (ggf. mit Beispielen, wie die Zusammenarbeit sowohl organisatorisch als auch praktisch erfolgt ist)?

Die Aufgabenteilung erfolgte auf Grundlage der AP-Planungen. Im Projekt wurde von Beginn eine konsensorientierte Arbeitskultur gepflegt. Hierfür wurde in obligatorischen, wöchentlichen Telefonkonferenzen das weitere Vorgehen besprochen und über aktuelle Arbeiten und Ergebnisse informiert. Viele Aufgaben waren so arbeitsintensiv dass sich alle Personen einbringen mussten: Das **Einrichten der Versuchsfelder, die periodischen Kartierungen und Bodenprobenauswertungen** über die gesamte Laufzeit, die **Befragungen**, die **Datenauswertungen**, die **Publikationsvorbereitungen und -nachbearbeitungen**, die Umsetzung von **Schulungen**, die Konzeption und Evaluationen der **Software**. Durch den steten fachlichen Austausch waren alle Partner to-date, dass auch die Beteiligung an vielen **Fachveranstaltungen** sicher gewährleistet war.

Im Rhythmus von 3-4 Monaten (mit einer Auszeit in 2021) erfolgten **Projekttreffen** zur Auswertung und zur Planung des weiteren Vorgehens. Je nach Erfordernis wurden interne thematische **Schulungen** (R, QGIS...) organisiert. Die Zusammenarbeit der OG war im gesamten Projektverlauf sehr engagiert und motiviert.

In der Projektlaufzeit erfolgten drei **Selbstevaluationen**. Sie erbrachten Hinweise in Bezug auf Zusammenarbeit, Zielorientierung und Stolpersteine.

Was war der besondere Mehrwert des Formates einer OG für die Durchführung des Projekts?

Die oben beschriebene intensive Zusammenarbeit der OG mit Partnern aus Praxis, Beratung, Dienstleistung und Wissenschaft erbrachte tatsächlichen Mehrwert. Die Einzelnen brachten unterschiedliche konstruktive Ansichten ein z. B. zum Forschungsdesign, zu Daten und Ergebnissen, erstellten geostatistischen Modellen, Kartierungsmethoden und Programmroutinen. Kompromisse wurden gefunden und Ansätze praxisorientiert verbessert. Die Praxispartner erwarben tieferes Verständnis zu Modellen und Methoden der Datenbereitstellung, der Kartenmodellierung und der Mehrwertes neuer Modellansätze, bspw. des mittleren Korndurchmessers. Sie gaben Hinweise zur Praktikabilität der Referenzprobenstrategie. Das Layout, die Evaluierung der pH-BB Toolbox erfolgte gemeinsam, ebenso die öffentliche

Schulung dazu. Anhand betrieblicher Daten wurde die überregionale Relevanz der Ergebnisse besser abgesichert.

Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projekts vorgesehen?

Durch die notwendige enge Zusammenarbeit hat sich die OG gefestigt, identifiziert sich vollständig mit den Ergebnissen und entwickelte aus ihnen weitergehende Forschungsfragen. Sie resultierten vorerst in der erfolgreichen Beantragung des Folgeprojektes TONIA. Ein Teil der OG-Partner arbeitet in diesem EIP-AGRI Projekt wieder zusammen.

Wurde Kontakt mit anderen OGs geknüpft (in Deutschland oder europaweit)?

Neben Fachveranstaltungen nahmen Vertreter der OG an vielen EIP-Veranstaltungen auf Landes- und Bundesebene teil wie dem Fachaustausch „Bodenfruchtbarkeit“ in Marquardt am 14.11.18, dem EIP-Erfahrungsaustausch Seddiner See am 22.06.22, dem EIP-Workshop Precision Farming in Bonn am 5.-6.11.18, dem Fachaustausch Wissenschaft und Praxis in Alt Madlitz am 13.10.22. Dort standen die OG im Austausch mit anderen OGs z.B. "Stallgrün", "SunBot", "Regionales Bio-Gemüse aus Brandenburg". Bei Teilnahmen an europaweiten EIP-Treffen wurden überregional relevante Projektergebnisse vorgestellt, bspw. auf dem Agri Innovation Summit 2019 in Lisieux (FR) am 25.-26.06.19, dem EIP-AGRI Seminar Healthy soils for Europe am 13.04.21, dem EIP-AGRI Transfertreffen bei Dijon (FR) am 27.-28.11.2019.

Eine intensive Zusammenarbeit entwickelte sich mit wissenschaftlichen Verbänden wie "BonaRes-Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie" (BMBF), dem BMBF-Verbundprojekt „Intelligence for Soil“ (I4S) sowie dem "patchCROP"-Projekt von ZALF und JKI. Es wurde ein Daten- und Erfahrungsaustausch vereinbart für die bessere Absicherung der jeweiligen Projektziele. Hierfür werden Daten sukzessive über die BONARES Datenbank wechselseitig zur Verfügung gestellt. Vorläufiger Höhepunkt war eine gemeinsame Messkampagne in 2021. Unter Beteiligung der Uni Halle, des UFZ Leipzig, des ATB Potsdam, der Uni Bonn, des ZALF, der HNEE und weiterer Akteure aus der sensorbasierten Bodenforschung wurden aktuelle Bodensensoren zeitgleich auf pH-BB Flächen eingesetzt. Erste Ergebnisse sind publiziert, die Arbeitsgruppen übergreifende Auswertung der umfangreichen Messdaten dauert noch an.

7 Kommunikations- und Disseminationskonzept

7.1 Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse

Die pH-BB OG hatte in der Vorhabensbeschreibung ein umfängliches Konzept für die Überleitung der Ergebnisse in die praktische Nutzung vorgelegt und während der Laufzeit weiterentwickelt. Dieses beinhaltete: Schulungen / Seminare; Fachtagungen wissenschaftlicher Institutionen; Feldtage, Tage der offenen Tür, Messen; Publikationen in Fachzeitschriften. Das Konzept wurde bestmöglich umgesetzt. Durch SARS-COV-2 fielen einige Feldtage, Tagungen und Konferenzen aus oder wurden verschoben. Trockene Witterungsverläufe in 2019 und 2020 erschwerten Auswertungen, Publikationen mussten verschoben werden. So kam es zu einer Häufung von Fach- und Tagungsbeiträgen am Projektende. Einige Publikationen und ein Fachbuch werden erst im Nachgang entstehen. Deren Realisierung muss durch andere Finanzquellen ermöglicht werden. In den Anhängen 8.3 bis 8.5 sind die Kommunikations- und Disseminationsaktivitäten aufgeführt.

7.2 Wie erfolgte der Transfer der Ergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis?

Der direkte Transfer in die ldw. Praxis erfolgte durch **erfolgreiche Umsetzung** bzw. Anwendung der Erkenntnisse und Lösungen auf den Partnerbetrieben. Außerdem wurden mit **Schulungen, Seminaren, Feldtagen, Messebeteiligungen und Publikationen in Fachzeitschriften** direkter Transfer für die breite ldw. Praxis realisiert. Der indirekte Transfer in die ldw. Praxis erfolgte über **wissenschaftliche Publikationen** mit mgl. großem Impact sowie über die Beiträge zu **Fachtagungen** wissenschaftlicher Institutionen, vgl. Abschn. 5.1.3. Einen großen Transferimpuls entwickelte der von der DVN organisierte Informations- und Imagefilm zur Präzisen Kalkung auf YouTube:

https://www.youtube.com/watch?v=E2Y_NOcTflo

Weitere Veröffentlichungen und Vorträge sind in Vorbereitung. Zusätzlich entstanden Abschlussarbeiten:

Veröffentlichungen und Vorträge in Vorbereitung nach Berichtsschluss:

- Bönecke, E. (2023): pH-BB – Präzise Kalkung in Brandenburg. Wissenschaftliche DÜNGEKALK-Fachtagung, 27.03. – 28.03.2023 in Fulda. Eingeladener Vortrag. <https://naturkalk.de/duengekalk-fachtagung/>
- Kramer, E., Rühlmann, J., Gebbers, R. (Hrsg. 2023): Sensorgestützte Kartierung von Bodeneigenschaften für die teilflächenspezifische Kalkung. Textur, pH und Humus im Boden: Von den Messwerten zur Streukarte. *Springer-Gabler*, Berlin, Heidelberg. *E-book* Konzept vom Verlag angenommen. Finanzierung nicht gesichert.
- Post, S., Schröter, I., Bönecke, E., Vogel, S., Kramer, E. (2023): Modellierung des organischen Kohlenstoffs in Ackerböden - Sentinel 2- und Naherkundungsdaten im Vergleich. 43. GIL-Jahrestagung, 13.-14.02.2023, Osnabrück. Als Paper mit Poster angenommen, ID 1181.
- Schmidinger, J., Schröter, I., Bönecke, E., Gebbers, R., Rühlmann, J., Kramer, E., Mulder, T., Euvelink, G., Vogel, S. (2023): Effect of sample size, sampling design and calibration model on generating soil maps from proximal sensing data for precision liming. *Precision Agric* (2023) submission in progress
- Schröter, I., Vogel, S., Bönecke, E., Post, S., Rühlmann, J., Kramer, E. (2023): A comparative study to estimate soil organic matter at field scale using VHR-RGB satellite imagery. Abstract BONARES Tagung 2023, Berlin
- Sorge, S., Liftenegger, A., Rühlmann, J. (2023): Expected economic effects for site-specific/precise liming in Brandenburg, Germany.
- Vogel, S. (2023) Sensorgestützte Vorhersage des teilflächenspezifischen Kalkbedarfs mittels Basenneutralisationskapazität. Wissenschaftliche DÜNGEKALK-Fachtagung, 27.03. – 28.03.2023 in Fulda. Eingeladener Vortrag. <https://naturkalk.de/duengekalk-fachtagung>
- Vogel, S., Schröter, I., Bönecke, E., Schwanghart, W., Rühlmann, J., Kramer, E., Gebbers, R. (2023): The effect of soil moisture content and soil texture on fast in situ pH measurements with two types of robust ion-selective electrodes. Abstract BONARES Tagung 2023, Berlin
- Walch, J.; Schröter, I.; Kramer, E. (2023): Handbuch zur „pH-BB“-Toolbox - Ein Werkzeugkasten für die Erstellung von räumlich hochaufgelösten Bodenkarten und zur einfachen Umsetzung der präzisen Kalkung. 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 8. bis 10. März 2023, Frick (CH). Poster angenommen ID: 288

Qualifizierungs- und Abschlussarbeiten im Projekt

- Babogredac, V., 2020: Vergleich der Humuserfassung von Ackerböden mittels zweier spektraloptischer Sensoren. Bachelorarbeit, ATB-Uni Potsdam.
- Bernhard, A., 2020: So viele wie nötig, so wenige wie möglich – Untersuchungen zur Referenzprobenmenge für die Kalibrierung von Sensordaten zur pH-Wert-Kartierung. Bachelorarbeit, ATB-Uni Potsdam.
- Chandran, A., 2022: Comparison of different remote and proximal soil sensing technologies to estimate soil organic carbon at the field scale. Masterarbeit, HNEE-ATB.
- Emmerich, K., 2021: Einfluss von Bodentextur und Bodenfeuchte auf sensorbasierte pH-Messungen mittels ionenselektiver Elektroden. Bachelorarbeit, ATB-Uni Potsdam.
- Gebbers, M., 2022: Vergleich zwischen feldspezifischen und regionalen Kalibrationsmodellen bei der sensorbasierten pH-Kartierung. Bachelorarbeit, ATB-Uni Potsdam.
- Hernandez Duarte, J.P., 2019: Ermittlung des Kalkbedarfs von Ackerböden durch die Basenneutralisationskapazität und spektraloptische Daten. Masterarbeit, ATB-Uni Potsdam.
- Kröcher, J., 2018: Kritischer Methodenvergleich zur Ermittlung des Kalkbedarfs von Ackerböden. Bachelorarbeit, ATB-Uni Potsdam.
- Lenkeit, S., 2019: Untersuchung des Antwortverhaltens einer Antimon-pH-Elektrode bei der Analyse von Böden. Bachelorarbeit, ATB-Uni Potsdam.
- Post, S., 2020, Abschätzung des Humusgehalts auf der Feldskala - Sentinel2 -Satellitendaten und Nahbereichssensoren im Vergleich. Masterarbeit, Öko-Agrarmanagement, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung, Eberswalde.
- Scheel, J., Kröcher, J., 2018: Analyse der Basenneutralisationskapazität zur Ermittlung des Kalkbedarfs zweier landwirtschaftlicher Schläge in Brandenburg. Studienprojekt, ATB-Uni Potsdam.
- Schmidinger, J., 2022: Effect of sample size, sampling design and calibration model on generating soil maps from proximal sensing data for precision liming. Studienprojekt, ATB.
- Walch, J., 2022: Handbuch zur „pH-BB“-Toolbox - Ein Werkzeugkasten für die Erstellung von räumlich hochaufgelösten Bodenkarten und zur einfachen Umsetzung der präzisen Kalkung. Bachelorarbeit. Hochschule für Nachhaltige Entwicklung, Eberswalde.

7.3 Schlussfolgerungen und Vorschläge zur Weiterentwicklung von EIP-AGRI (Fazit zur Eignung der EIP-Förderung zur Generierung von Innovationen und Schließung von Lücken zwischen Praxis und Wissenschaft)

Die EIP-Förderung eröffnet die Möglichkeit, praxisrelevante Problemstellungen der Agrar- und Ernährungswirtschaft (AEW) zu lösen durch das Einbeziehen neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und oft nur prototypisch vorhandener Funktionsmuster aus der Grundlagenforschung. Damit ist sie eine wichtige Brücke von der überwiegend auf Grundlagenforschung ausgelegten vorwettbewerblichen Förderkulisse hin zu anwendungsreifen Ergebnissen. Die Möglichkeit erfolgversprechende vorwettbewerbliche Ansätze mit niedrigem technologischem Reifegrad zur Anwendungsreife zu bringen sollte erhalten bleiben. Für eine Förderempfehlung sollten alle Stellungnahmen zu Projektvorschlägen adäquat einfließen, auch die Stellungnahmen der Fachreferate im MLUK. Förderempfehlungen sollten nicht mehr mit Kürzungsaufgaben verbunden werden. Sicherheitseinbehalte und Sanktionsregeln sollten abgeschafft werden. Laut Richtlinie soll EIP eine bis zu 100%-ige Förderung ermöglichen. Dies ist für Unternehmen der AEW von besonderer Bedeutung, weil finanzielle Eigenanteile oft nicht aufgebracht werden können. In der praktischen Durchführung hat sich die 100%-Förderung als Irreführung herausgestellt. Bei allen tarifgebundenen Partnern entstehen erhebliche finanzielle Defizite, hauptsächlich durch die Festsetzung von zu niedrigen Personalstundensätzen zu Projektbeginn für die gesamte Laufzeit. Tariflich verbindliche Gehaltssteigerungen werden nicht berücksichtigt. Die Bezahlung teurerer Mitarbeiter wird nicht anerkannt, wenn nach früherem Ausscheiden kein anderer gefunden wird. Einzelne Lohnkostenanteile werden nicht erstattet. In Zukunft sollten die tatsächlichen Personalkosten abrechenbar sein, so wie in anderen Förderprogrammen üblich. Die entstandenen Defizite sollten aktiv ermittelt und ausgeglichen werden. Vor diesem prekären Hintergrund haben wir bei der DVN und der EU einen Ausgleichsfonds für betroffene Projektpartner angeregt um die erheblichen Defizite auszugleichen.

Ebenso unüblich für Forschungsprojekte ist die Vorfinanzierung der Projektausgaben. Billigend wird in Kauf genommen, dass hohe 6-bis 7-stellige Beträge vorverauslagt werden müssen, im Falle unseres Projektes zeitweise über 600T €. Als Folge haben Forschungspartner die Beteiligung an EIP-Projekten verboten oder stehen nicht mehr als Partner zur Verfügung. In Zukunft sollten die voraussichtlichen Projektausgaben für einen Zeitraum im Voraus gezahlt werden, so wie in anderen Förderprogrammen üblich.

Der gigantische Verwaltungsaufwand ist abschreckend. Als Folge werden sich viele Praxispartner in Zukunft nicht mehr an EIP-Projekten beteiligen.

Insgesamt ist die Situation für OGs sowie für EIP selbst unnötig ärgerlich. In den Projekten werden hoch relevante Ergebnisse entwickelt. Deren Wertschätzung geht in den Einrichtungen oft unter, infolge der massiven Kritik wegen der skizzierten Defizite. Wir hoffen auf Änderungen in der Ausgestaltung der wichtigen EIP-Förderung.