

## Potenziale der teilflächenspezifischen Kalkversorgung von Grünland

### Potentials of site specific liming on grassland

#### FKZ: 12NA031

##### Projektnehmer:

Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde  
Fachbereich Landschaftsnutzung und Naturschutz  
Schicklerstr. 5, 16225 Eberswalde  
Tel.: +49 3334 657-308  
Fax: +49 3334 657-282  
E-Mail: Eckart.Kramer@hnee.de  
Internet: <https://hnee.de>

##### Autoren:

Gebbers, Robin; Kramer, Eckart

#### FKZ: 12NA116

##### Projektnehmer:

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V.  
Abteilung Technik im Pflanzenbau  
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam  
Tel.: +49 331 5699-0  
Fax: +49 331 5699-849  
E-Mail: [atb@atb-potsdam.de](mailto:atb@atb-potsdam.de)  
Internet: <https://hnee.de>

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Die inhaltliche Verantwortung für den vorliegenden Abschlussbericht inkl. aller erarbeiteten Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen liegt beim Autor / der Autorin / dem Autorenteam. Bis zum formellen Abschluss des Projektes in der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft können sich noch Änderungen ergeben.

## Schlussbericht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (Leitung) Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam und Bioökonomie e.V.	<b>Förderkennzeichen:</b> 2812NA031 2812NA116
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Potenziale der teilflächenspezifischen Kalkversorgung von Grünland	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2014 – 31.12.2017	

## Kurzfassung

### Potenziale der teilflächenspezifischen Kalkversorgung von Grünland

Gebbers, R., Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam und Bioökonomie e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, rgebbers@atb-potsdam.de

Kramer, E., Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Schicklerstr. 5, 16225 Eberswalde, ekramer@hnee.de

Gegenstand war der Erhalt einer optimalen Boden-Acidität im Grünland. Ziele des Vorhabens waren:

- (i) Entwicklung, Tests und Bewertungen von pH-Sensorsystemen,
- (ii) Entwicklung von Auswertungsmethoden für die sensorgestützte Bodenkartierung sowie von sensorgestützten Entscheidungsunterstützungsalgorithmen zur adaptiven Kalkung,
- (iii) Ermittlungen der Bodenvariabilität durch Bodensensoren und ihr Zusammenhang mit wesentlichen Eigenschaften des Grünlands.

Im Projektverlauf gab es Schwierigkeiten: Budgetkürzungen, Fachkräftemangel, technische Probleme und Schäden, Trockenphasen sowie ein Arbeitsunfall beeinflussten Projektziele und Zeitplanung. Eine Verlängerung und Aufstockung des Projektes kam nicht zustande. Die Ergebnisse wurden nicht vollständig erreicht.

Erster Untersuchungsgegenstand war die Verletzung der Grasnarbe infolge des mechanischen Bodenkontaktes der Sensoren. Sensoranordnungen sowie Lösungen zum Schließen der Furchen wurden untersucht: Radwalzen, ein modifiziertes Pflugschar sowie im Zuge der Entwicklung alternativer Lösungen zur automatisierten Probeentnahme eine durch den Boden gezogene Kettensäge, ein Kernbohrgerät und ein schmalerer Messschuh. Im Ergebnis wurde entschieden, ein alternatives absätziges Messverfahren mit Kernbohrgerät zu favorisieren.

Weiterer Untersuchungsschwerpunkt war die Zuverlässigkeit des Veris MSP Systems. Nach Störungen in der Software, bei der Datenaufzeichnung, einem Kabelbrand sowie Neubau der Stromversorgung wird der Einsatz im Grünland nicht empfohlen.

Es wurde notwendig alternative Messverfahren mit handgehaltenen Sensorsystemen entwickelt. Dies ist durch die absehbare Verfügbarkeit autonomer Mobile gerechtfertigt, mit denen eine absätzige Kartierung möglich wird. Ergebnis ist ein pH-Modul auf Basis von Antimon-pH-Elektroden. Mit der Entwicklung eines Spektrometer-Moduls wurde begonnen.

Untersuchungen zur Variabilität und zum Kalkbedarf belegen die kleinräumige Variation von Grünlandvegetation und Boden-pH, engmaschige Beprobungen sind notwendig. Der Boden-pH wirkt neben anderen Faktoren ertragslimitierend und beeinflusst die Artenzusammensetzung. Primär besteht daher großer Entwicklungsbedarf für robuste Sensorlösungen zur engräumigen Bodenuntersuchung auf Grünland.

## Summary

Potentials of site specific liming on grassland

Gebbers, R., Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam und Bioökonomie e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, rgebbers@atb-potsdam.de

Kramer, E., Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Schicklerstr. 5, 16225 Eberswalde, ekramer@hnee.de

The project's scope was to adjust soil acidity on heterogeneous grassland. Objectives of the project were:

- (i) development, tests, and assessments of soil pH sensor systems,
- (ii) development of analysis methods for sensor based soil mapping, and of sensor based decision support algorithms for adaptive liming,
- (iii) investigation of soil variability by use of soil sensors, and its relation to relevant grassland properties.

There were difficulties in the course of the project. Aims and planning were affected by budget cuts, skills shortage, technical problems and damages, drought, and an accident. A prolongation and budget increase were not approved. The project results were not achieved completely.

First objective focused on the damage of the sod through the contact of the sensors with the soil. Different sensor arrays were investigated as well as tools for closing the furrows including rollers and a modified plough blade. Alternative approaches we developed for automatised sampling included a pulled chain saw, a coring machine, and a slimmer sensor head. Finally, a discontinuous measuring system based on a coring machine was favoured.

The reliability of the Veris MSP System was a further subject of investigation. We cannot recommend its use for mapping in grassland because of problems with the software, a cable fire. The electric mishap resulted in the re-design of the complete power supply.

It became necessary to develop alternative mapping methods by using hand-held sensor systems. They enabled a discontinuous mapping in a stop-and-go mode. This approach can be transferred to autonomous robotic platforms which will be available in the future. The development of a soil pH-mapping unit based on antimony pH-electrodes and a spectrometer module for assessing soil organic matter were successfully completed.

Our investigations regarding variability and liming requirement did confirm the small-scale variation of grassland vegetation and soil pH. To capture this variability dense sampling by automated sensor systems is required. In conjunction with other factors, soil pH affects both harvest and species composition. In conclusion, there is an urgent need to develop robust sensors for high-resolution soil mapping in grassland.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Summary	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
1 Einführung	6
1.1 Gegenstand des Vorhabens	6
1.2 Ziele und Aufgaben des Projekts, Bezug zu einschlägigen Zielen des BÖLN	6
1.3 Planung und Ablauf des Projektes	7
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den Angeknüpft wurde	7
2.1.1 Ermittlung des Kalkbedarfs und des Boden-pH-Wertes	7
2.1.2 Messung des pH-Wertes	8
2.1.3 Messung des Tongehalts	8
2.1.4 Messung der organischen Substanz	10
2.1.5 Kartierungsmethoden zur Erfassung der räumlichen Variation des Kalkbedarfs	11
2.1.6 Dosierungsempfehlungen zur teilflächenspezifischen pH-Wert-Regulierung	12
2.1.7 Kalkungsbedürftigkeit und Wirtschaftlichkeit der Kalkung	13
2.1.8 Ökonomische und ökologische Bewertung von Grünland	13
3 Material und Methoden	14
3.1 Entwicklung von pH-Sensorsystemen speziell für Grünland	14
3.2 Analysen im Labor	14
3.3 Erfassung der Boden- und Vegetationsvariabilität	14
3.4 Datenanalysen	14
3.5 Standorte	15
4 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse	15
4.1 Untersuchungen zur Nutzbarkeit der Veris MSP Sensorplattform	15
4.1.1 Verletzung der Grasnarbe	15
4.1.2 Zuverlässigkeit des Veris MSP Systems	19
4.2 Alternative Lösung zur automatisierten Probeentnahme während der Fahrt	20
4.3 Entwicklung von mobilen, handgehaltenen Sensorsystemen	21
4.4 Untersuchungen zur Variabilität und zum Kalkbedarf	23
4.5 Ergebnisse	25
4.5.1 Korrelation Luftbild – Biomasse	25
4.5.2 Räumliche Variabilität der Trockenmasse	26
4.5.3 Zusammenhang zwischen pH und Biomasse	27
4.5.4 Räumliche Variabilität des pH-Wertes	27
4.5.5 Abschätzung des Kalkbedarfs	28
4.5.6 Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit (EC) und Biomasse	29
5 Diskussion der Ergebnisse	30
6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse	30
6.1 Wurden praxisrelevante Ergebnisse erzielt?	30
6.2 Falls ja: Erstellung eines Merkblatts	31
7 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten und tatsächlich erreichten Ziele; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen	31
8 Zusammenfassung	31
9 Literaturverzeichnis	32
10 Veröffentlichungen zum Projekt	36
10.1 Realisierte Veröffentlichungen	36
10.2 Geplante Veröffentlichungen	36

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verletzung der Grasnarbe (a) Messung mit der Veris Plattform auf langjährigem Grünland. (b) Furche durch den Spektrometerkopf	16
Abbildung 2: Verletzung der Grasnarbe. Furche nach 6 Monaten auf altem Grünland. (a) seitliche Ansicht, (b) Blick von oben	16
Abbildung 3: Verletzung der Grasnarbe. (a) Frische Furchen durch pH-Probenehmer und Spektrometerkopf auf lückigem Grünland. (b) Frische Furche durch pH-Probenehmer alter Grasnarbe	17
Abbildung 4: Verletzung der Grasnarbe. Spektrometerkopf (links) und Probenehmer pH (rechts) im Eingriff	17
Abbildung 5: Verletzung der Grasnarbe. Prüfung der Furchenschließung durch eine nachlaufende Radwalze	18
Abbildung 6: Verletzung der Grasnarbe. Modifiziertes Pflugschar als Furchenschließer. Aufgrund der notwendigen Auflast ist diese Lösung ungeeignet	18
Abbildung 7: (a) Defekt durch Kabelbrand im Veris Messgerät; (b) neue Stromversorgung mit Schutzschaltern	19
Abbildung 8: Konzeptstudie für einen neuen Bodenprobenehmer. (a) Übersicht; (b) Detail, mit Bodenaushub; (c) Eingriff in den Boden	20
Abbildung 9: Konzeptstudie für einen neuen Bodenprobenehmer. Eingriff in den Boden	20
Abbildung 10: Neuer pH Sensor. (a) pH-Messeinheit; (b) Steuereinheit für den pH-Probenehmer	21
Abbildung 11: Neuer pH Sensor. (a) Gesamtsystem mit Outdoor-Notebook, Antimon-Elektroden, Flasche mit Reinigungswasser, Elektrik; (b) Manuelle Messung auf jungem Grünland; (c) Abdrücke der Elektroden im Boden	22
Abbildung 12: Neuer pH Sensor. Untersuchungen zum Antwortverhalten	22
Abbildung 13: Neu entwickeltes Spektrometersystem	23
Abbildung 14: Luftbild mit Beprobungspunkten für Biomasse(Okttober 2016)	24
Abbildung 15: Luftbild mit Beprobungspunkten zur Bodenuntersuchung (Beprobung im März 2017)	25
Abbildung 16: Zusammenhänge zwischen Biomasse und Luftbild vom 24.10.2016	25
Abbildung 17: Regression zwischen Trockenmasse und NDVI (links) und flächendeckender Schätzung der Trockenmasse (rechts)	26
Abbildung 18: Variogramm zur räumlichen Autokorrelation der Biomasse (trocken), geschätzt aus dem Luftbild	26
Abbildung 19: Quantilregression zum Zusammenhang zwischen Boden-pH-Wert und oberirdischer Trockenmasse der Pflanzen	27
Abbildung 20: Variogramm zur räumlichen Autokorrelation der Boden-pH-Werte	27
Abbildung 21: Ausgewählte Titrationskurven für die Bestimmung der BNK	28
Abbildung 22: Übersicht aller Titrationskurven der BNK	28
Abbildung 23: Abschätzung des Kalkbedarfs für die Bodenproben anhand der BNK-Kurve	29
Abbildung 24: TM aus NDVI (links) und elektrische Leitfähigkeit des Bodens	29
Abbildung 25: Modellierung der limitierenden Wirkung von Textur/Feuchte (Elektrische Leitfähigkeit (EC) als Proxy) auf die Biomasse eines Lupinen-Gras-Gemenges mittels Quantilregression.	30

# 1 Einführung

## 1.1 Gegenstand des Vorhabens

Gegenstand des Vorhabens war der Erhalt einer optimalen Boden-Acidität im Grünland. Durch zunehmende Versauerung infolge natürlicher Prozesse und in der Regel mangelhafte Kalkversorgung verschiebt sich die Zusammensetzung der Pflanzenbestände zugunsten minderwertiger Arten, die gut an niedrige pH-Werte angepasst sind, im Extremfall bis zur vollständigen Dominanz des Kleinen Sauerampfers. Bei steigendem Anteil minderwertiger Arten nehmen Ertragsleistung und Nutzungselastizität ab, Schmackhaftigkeit und Futteraufnahme sinken. Leistungsfähige Arten sowie Standardmischungen für mittelintensive bis intensive Nutzung bevorzugen pH-Bereiche im höheren leicht sauren Bereich. Kalkmangel wirkt sich somit nachhaltig negativ auf Ertrag, Bestandselastizität und Futterwert aus.

In eigenen Untersuchungen auf Ackerflächen wurden Variationen des Boden-pH von 4,0 bis 7,5 innerhalb von 100 m Abstand gemessen, im Extrem 1,0 pH Unterschied über 12 m. In Veröffentlichungen Dritter wurden vergleichbare hohe Unterschiede bestätigt (Walker, Haugen, Wang, 1996). Diese Untersuchungen weisen darauf hin, dass auch auf Grünlandstandorten vergleichbar hohe pH-Variabilitäten vorzufinden sind, verbunden mit den genannten nachteiligen Effekten.

Eigene geostatistische Analysen belegen, dass auf Diluvialböden Beprobungsabstände von weniger als 30 m notwendig sind um pH-Variationen innerhalb von Ackerflächen hinreichend genau zu erfassen. Durch räumlich differenzierte Kalkdüngung kann auf diese Variabilität reagiert werden. Die ortsspezifische Kalkung im Rahmen von Precision Agriculture vermeidet Über- und Unterversorgung und trägt so zum Umweltschutz sowie zur Sicherung der Lebensmittelproduktion bei (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Diese Variationen lassen sich mit der anerkannten VDLUFA Standard-Rasterbeprobung nicht mehr erfassen. Die Beprobungsdichte ist jedoch der wichtigste Faktor für eine umweltschonende und effiziente Düngung (Gebbers 2008, Gebbers et al. 2009). Deshalb wurden ein Sensorsystem und eine Methodik zur räumlich hoch aufgelösten, quasi-kontinuierlichen „on-the-go“-Kartierung auf Ackerflächen entwickelt (Adamchuk et al., 2005). Tastversuche im Grünland zeigten, dass das Sensor- bzw. Messwerterfassungssystem an die besonderen Bedingungen im Grünland angepasst werden muss. Dies bezieht sich insbesondere auch die höhere Lagerungsdichte und die stärkere Durchwurzelung von Grünlandböden im Vergleich zu Ackerböden, die zu einer erhöhten mechanischen Belastung sowie zur Verstopfung des Probenehmers führen. Die für die „on-the-go“-Kartierung auf Ackerflächen entwickelte Messmethode, welche auf Potentiometrie mit Antimon-Elektroden beruht, ist grundsätzlich geeignet, muss jedoch ebenso an die anderen Bedingungen des Grünlands angepasst werden. Dies betrifft insbesondere die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Messung.

Neben der Lösung der grundlegenden technologischen Probleme sind im gleichen Maße die agronomischen Fragen der auf der pH-Messung aufbauenden adaptiven Kalkdüngung zu bearbeiten. Zu diesen Fragen zählen: Wie hängt die Grünlandpflanzenpopulation mit den von den Bodensensoren erfassten Eigenschaften zusammen? Welchen Einfluss hat eine gezielte Kalkungsstrategien auf die Artenzusammensetzung im Grünland? Welche Kalkdüngungsempfehlungen sind aus den Sensordaten abzuleiten? Welche ökonomischen Effekte hat die gezielte Kalkung? Wie ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei der Anwendung von Precision Farming Technologien im Grünland?

## 1.2 Ziele und Aufgaben des Projekts, Bezug zu einschlägigen Zielen des BÖLN

### Ziele des Vorhabens

1. Entwicklung von pH-Sensorsystemen speziell für das Grünland, Tests und Bewertungen.

2. Entwicklung der Auswertungsmethoden für die sensorgestützte Bodenkartierung und Entwicklung von sensorgestützten Entscheidungsunterstützungsalgorithmen zur adaptiven Kalkung.
3. Ermittlungen der Bodenvariabilität durch Bodensensoren und ihr Zusammenhang mit wesentlichen Eigenschaften des Grünlands (Artenzusammensetzung, Futterwert) auf Ökologischen Betrieben in Brandenburg. Ökonomische und ökologische Analysen einer angepassten Kalkversorgung.

### **Bezug zu einschlägigen Zielen des BÖLN**

Das Projekt bezieht sich auf Bekanntmachung Nr. 13/11/51 zur Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben) im Bereich „Optimierung der Dauergrünlandwirtschaft unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten“ im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN) vom 21.11.2011. Spezifisch bezieht sich das Projekt auf den Forschungsschwerpunkt 1.1 „Verbesserung des Grünlandmanagements nach ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten“, mit dem Ziel der Erhöhung der flächenbezogenen Grobfuttereffizienz unter Berücksichtigung natur- und umweltschutzfachlicher Aspekte.

Grünland spielt im Ökologischen Landbau eine besondere Rolle da im Sinne einer Kreislaufwirtschaft und der Nutzung natürlicher Düngemittel die Tierhaltung nicht vom Ackerbau abgekoppelt sein sollte und die Futtermittellieferung möglichst naturnah, d.h. mit Grünfütter und Heu von Grünland erfolgen sollte. Die Gewinnspannen bei der Grünlandbewirtschaftung sind allerdings relativ gering und es sind Innovationen nötig um hier eine Verbesserung herbeizuführen und die Grünlandbewirtschaftung gegenüber Acker- und Gemüsebau oder anderer Nutzung (bzw. Stilllegung) attraktiver zu machen. Neben der pflanzenbaulichen und ökonomischen Verbesserung des Grünlandmanagements war durch das Vorhaben auch ein Beitrag zur Förderung der Vegetationsvielfalt auf Dauergrünlandflächen (Nutzungselastizität, Artenzusammensetzung) und auch des Bodenlebens zu beabsichtigt, weil die überwiegende Mehrheit des Edaphons bei zunehmender Versauerung ebenfalls beeinträchtigt wird. Zudem sollten Grundlagen für die Erforschung des Grünlandpotenzials für die Sicherung der Tiergesundheit geschaffen. Und schließlich sollten Erkenntnisse für die Entwicklung von Landtechnik gewonnen werden.

### **1.3 Planung und Ablauf des Projektes**

Nach verschiedenen technischen und organisatorischen Schwierigkeiten bei der Umsetzung der geplanten Projektdurchführung wurde Anfang 2017 ein Änderungs- und Aufstockungsantrag eingereicht. In diesem sind die Änderungen gegenüber dem geplanten Ablauf beschrieben. Es ließ sich nicht sicher darstellen, dass alle Randbedingungen sicher beherrscht werden und das Vorhaben mit den vorgeschlagenen Änderungen erfolgreich vollständig abgeschlossen wird.

## **2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den Angeknüpft wurde**

Der im Projekt verfolgte interdisziplinäre Ansatz berührt eine Vielzahl von Teilaspekten die im Folgenden dargelegt werden.

### **2.1.1 Ermittlung des Kalkbedarfs und des Boden-pH-Wertes**

Die zielgerichtete Regulierung der Bodenacidität ist Teil der landwirtschaftlichen Praxis zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, des Bodenlebens sowie insbesondere der Nährstoffverfügbarkeit und -effizienz für die Pflanzen (Schilling et al. 1987a; Ziechmann & Müller-Wegener 1990, Müller et al. 1989). Die direkte Bestimmung des Kalkbedarfs durch Pufferkurven ist sehr aufwändig. Anhand langjähriger Parzellenversuche wurden durch den VDLUFA optimale pH-Bereiche (als Merkmal der aktiven Acidität) bestimmt und liegen als detailliertes Bewertungsschema vor (Schilling 2000, VDLUFA

2000 a, b, Scheffer, Schachtschabel 1998). Verschiedene natürliche und anthropogene Einflüsse führen zu einer kontinuierlichen Versauerung, auch im Grünland, die auszugleichen ist (Schilling et al. 1987b). Dazu zählen die natürliche Auswaschung von Kationen (K und Ca), insbesondere auf sandigen Böden, sowie saure Niederschläge (durch CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), die natürliche Zersetzung der organischen Substanz sowie die Verwendung saurer Düngemittel. Die wirtschaftlichen, naturschutzfachlichen und biodiversitären Auswirkungen sind vielfältig belegt (Burkart et al. 2004, Dierschke 2007, Dierschke und Briemle, 2002). Besonders in eiszeitlich geprägtem, stark reliefiertem Gelände ist damit zu rechnen, dass laterale Stoffflüsse und Erosionsprozesse zu einer hohen Heterogenität der Bodenausgangssubstrate beitragen (Klemm et al. 1998). Diese Erwartung wurde bei eigenen Untersuchungen bestätigt (Borchert et al. 2010).

### 2.1.2 Messung des pH-Wertes

Die pH-Messung im Labor erfolgt üblicherweise potentiometrisch mit pH-Elektroden. Die in diesen Elektroden verwendeten konditionierten Glasmembranen sind jedoch mechanisch sehr empfindlich und eine direkte Messung im Boden verbietet sich. Für die kostengünstige und schnelle Messung *in situ* musste daher eine andere Lösung gefunden werden. Seit etwa 2007 ist mit der *Mobile Sensor Platform* von Veris Technologies (MSP) die effiziente Erfassung des pH und dessen räumlicher Verteilung möglich (Kramer et al. 2011, Schirrmann et al. 2011 a und b). Bei der MSP kommen verschleißfestere Antimon-Elektroden zum Einsatz. Deren Genauigkeit ist etwas geringer als die von Glaselektroden bei der Messungen des pH im Labor (Adamchuk et al. 2005, Schirrmann et al. 2011a). Andere Sensoren befinden sich im Entwicklungsstadium, z. B. ionenselektive Feldeffekttransistoren (ISFET, ChemFET) (Viscara Rossel et al. 2005). Als weitere Alternativen werden auch die Anwendung spektral-optischer Methoden sowie die Sensorfusionen d.h. die Kombination von unterschiedlichen Sensoren, untersucht (Schirrmann 2011b). Diese eigenen Arbeiten an einem neuen Multi-Parameter-Sensor werden bzgl. der Qualifizierung der Algorithmen durch die im Vorhaben erhobenen Messwerte unterstützt

### 2.1.3 Messung des Tongehalts

Die Standard-Messung des Tongehalts im Labor (Pipett-Methode nach Köhn) ist äußerst zeitaufwändig und verlangt ein hohes Maß an Erfahrung und Genauigkeit. Die Kosten für eine Analyse können leicht 50 EUR übersteigen (je nach Angebot des Labors). Im Unterschied zur pH-Messung gibt es für die Texturbestimmung keine *direkten* Messmethoden, die echtzeitfähig sind.

Als indirekte Methoden haben sich im Precision Farming vor allem geoelektrische Verfahren bewährt (Gebbers, Lück 2006 a). Mit diesen Methoden wird der scheinbare elektrische Widerstand des Bodens bestimmt. Er wird durch viele Bodenfaktoren beeinflusst. Dazu zählen: Wassergehalt, Tongehalt, Konzentration und Mobilität der Ionen, Ionen-Austauschkapazität, Gehalt an organischer Substanz, Temperatur, Porenkontinuität, und Lagerungsdichte.

Der elektrische Widerstand ist somit ein Summenparameter, von dem aus nicht deterministisch auf einen einzigen anderen Parameter geschlossen werden kann. Bei multivariaten statistischen Analysen zeigen sich jedoch oft enge Beziehungen zum Tongehalt. Es wird allerdings immer notwendig sein, die Beziehung zwischen elektrischem Widerstand und Tongehalt über Laboranalysen standortspezifisch zu kalibrieren. Dies wird jedoch durch die geoelektrische Kartierung selbst erleichtert, da sie durch Ausweisung von Bereichen mit hohen und niedrigen Widerständen eine gezielte Probenahme ermöglicht.

In der Praxis geoelektrischer Kartierung kommen zwei Methoden zu Einsatz: die auf galvanischer Ankopplung beruhende Widerstands-Geoelektrik und die auf elektromagnetischer Induktion beruhende Leitfähigkeitsmessung.

Die galvanische Widerstandsmessung setzt den direkten, galvanischen Kontakt von Elektroden mit dem Boden voraus. Üblicherweise wird die so genannte Vierpunktmethode benutzt. Dabei speisen

zwei Elektroden den Strom in den Boden ein, während an zwei weiteren Elektroden der Spannungsabfall gemessen wird. Geräte zur flächendeckenden Kartierung besitzen so genannte „rollende Elektroden“ die mit einem gewissen Gewicht belastet werden. Geräte zur mobilen Messung durch die Vierpunktmethode sind relativ schwer und robust gebaut. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist ihre Empfindlichkeit für den Bodenkontakt. Große Trockenheit, ein hoher Steingehalt oder eine dicke Auflage aus Ernteresten kann die Messungen stören. Durch Erhöhung der Auflast auf den Elektroden und durch langsame Fahrweise lassen sich diese Probleme jedoch weitgehend beherrschen. Kommerziell werden Geräte zur mobilen Messung des elektrischen Widerstands von den Firmen Veris Technologies und Geocarta angeboten. Das Veris 3100 wurde speziell für die Landwirtschaft entwickelt. In den USA und Australien hat es größere Verbreitung gefunden, in Europa sind nur wenige Geräte im Einsatz. In Test hat das Gerät gute Zuverlässigkeit, Bedienbarkeit und Genauigkeit gezeigt (Gebbers, Lück 2005, Gebbers, Lück 2006 b). Die Technik des Veris 3100 wird auch in der neuen Multi-Sensor-Plattform Veris MSP eingesetzt, welche die Messung des elektrischen Widerstands mit der Kartierung des pH-Wertes kombinieren kann. Das Gerät erfasst zwei Tiefen, die effektiven Messtiefen (70 % kumulierter Signalanteil) betragen 0,18 m und 0,55 m.

Geräte zur Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit durch elektromagnetische Induktion sind hingegen klein und leicht und somit sehr gut zu handhaben. Sie haben daher im Precision Farming große Verbreitung gefunden. Das meistgenutzte Gerät ist das EM38 der Firma Geonics. Andere Hersteller sind die z.B. die Firmen Dualem und Gf-Instruments. Bei der Messung durch elektromagnetische Induktion wird durch eine Primärspule ein Magnetfeld in den Boden gesendet. Hier wird ein Stromfluss induziert der wiederum ein sekundäres Magnetfeld erzeugt. Der Empfänger separiert die beiden Magnetfelder anhand der Phasenverschiebung und berechnet die scheinbare elektrische Leitfähigkeit in  $\text{mS}\times\text{m}^{-1}$ . Die Messtiefe (70 % des Signals) des EM 38 beträgt bei vertikal-koplanarer Anordnung der Spulen etwa 1,59 m und bei horizontal-koplanarer Anordnung 0,76 m. Das EM38 muss vor und während der Messung regelmäßig kalibriert werden. Es ist kaum möglich, absolute Messwerte zu erhalten, was den Vergleich von Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten erschwert. Weiterhin lassen sich Messgeräte, die auf elektromagnetischer Induktion basieren leicht durch externe Magnetfelder stören, die z.B. bei Gewittern oder im Bereich elektrischer Anlagen auftreten. Wegen der bisherigen besonderen Empfindlichkeit des EM 38 für Temperaturschwankungen bietet der Hersteller seit 2004 eine temperaturstabilisierte Version an. Dennoch zeigen Messungen im Horizontalmodus (für den Oberboden) einen hohen Rauschanteil, so dass diese Messkonfiguration in der Praxis kaum benutzt wird. Die Messungen im Vertikalmodus sind zwar stabiler, erfassen jedoch bei einer effektiven Messtiefe von 1,5 m und einem Sensitivitätsmaximum bei 0,77 m Bodenschichten, die für die Bestimmung des Tongehaltes im Rahmen der Kalkdüngung ungeeignet ist.

Die kapazitiv gekoppelte Widerstandsmessung als weitere geoelektrische Methode (Ohm-Mapper) hat sich im Praxistest als ungeeignet für die Kartierung auf Ackerböden erwiesen (Gebbers, Lück 2007). Eine Ursache dafür ist, dass die kapazitive Ankopplung gut für Untergründe mit hohem elektrischem Widerstand (Gestein, Beton) geeignet ist aber auf leitfähigeren Untergründen Schwierigkeit hat.

Als weitere Sensoren, die elektrische Eigenschaften des Bodens erfassen und potenziell zur Kartierung der Textur geeignet sind, sind TDR und Geo-Radar zu nennen. Die Messung mit TDR-Sonden ist nur im absätzigen Verfahren möglich (Thomsen, Drøsher, Steffensen 2005). Versuche zur kontinuierlichen mobilen Messung sind aufgrund des ungleichmäßigen Bodenkontaktes und der Materialabnutzung gescheitert. Geeignete Geo-Radar-Antennen sind sehr teuer und die Datenauswertung ist schwierig. TDR und Geo-Radar haben somit gegenwärtig keine praktische Relevanz für Kartierungszwecke in der Landwirtschaft.

Die Verwendbarkeit der Gamma-Spektrometrie zur Erfassung verschiedener Bodeneigenschaften wird diskutiert (Sauer 2002, Ruffel et al. 2006). Man nimmt an, dass die vom  $^{40}\text{K}$ -Isotop ausgehende Gammastrahlung Hinweise auf den Tongehalt geben kann. Die positiven Ergebnisse aus Australien (Ruffel et al. 2006) konnten jedoch durch (Tauchnitz 2005) nicht nachvollzogen werden. Möglicherweise liegt dies an den großen geologisch-mineralischen Unterschieden zwischen Australischen und Deutschen Böden. Gamma-spektrometrische Messungen werden in Deutschland bislang nur durch einen Niederländischen Dienstleister angeboten (The Soil Company B.V. Groningen).

Eine neue Entwicklung ist der Bodensensor der Fachhochschule Osnabrück (Hinck, Emeis, Müller 2005). Er basiert auf hochfrequenter Messung zwischen zwei durch den Boden geführten Kondensatorplatten. Da sich dieses System noch Entwicklung befindet, kann seine praktische Eignung nicht bewertet werden.

Hinsichtlich der Kartierung des Tongehaltes ist festzustellen, dass es kein direktes, online-fähiges Messverfahren gibt. Unter den verwendeten Sensoren, liefert die Widerstands-Geoelektrik in der Praxis die besten Ergebnisse. Deshalb sprechen neben der günstigeren Messtiefe des Veris-Gerätes auch andere, prinzipbedingte Gründe für die Widerstands-Geoelektrik (Dabas, Tabbagh 2003, Gebbers, Lück 2005). Sie liefert absolute Werte, da eine Kalibrierung nicht notwendig ist. Sie besitzt weiterhin eine geringere Störanfälligkeit (Temperatur, elektromagnetische Strahlung), Fehler sind leichter zu identifizieren. Auf geschichteten Böden reagiert die elektromagnetische Induktion präferenziell auf leitfähigere Strukturen. Das führt auf sandüberlagerten Böden zu einer Überschätzung des Tongehaltes. Die Widerstands-Geoelektrik ist dagegen besonders sensitiv für niedrige Tongehalte (hohe Sandgehalte) im Oberboden. Dies ist eine willkommene Eigenschaft, da „Sandlinsen“ besondere Problemzonen darstellen und ihre Identifikation besonders wichtig ist.

Auch durch spektral-optische Methoden kann auf die Bodentextur geschlossen werden (Shibusawa et al. 1999). Es wird erwartet, dass die Kombination von Geoelektrik und optischer Spektroskopie die Schätzung des Tongehalts deutlich verbessert. Dies wird im Verlauf des Vorhabens ebenfalls geprüft.

#### 2.1.4 Messung der organischen Substanz

Zur Bestimmung des Gehalts organischer Substanz im Labor werden drei Verfahren angewandt: die Bestimmung des Glühverlusts durch Glühen bei 430 °C; die Bestimmung des C-Gehalts durch nasse Veraschung (Lichterfeld Methode) und die trockene Veraschung bei 1200 °C mit der Bodenprobe mit coulometrischer Bestimmung des C-Gehalts. Die Methoden haben Vor- und Nachteile, die in Schlichting, Blume, Stahr (1995) diskutiert werden

Zur schnellen Schätzung der organischen Substanz in landwirtschaftlich genutzten Böden werden fast ausschließlich spektral-optische Methoden eingesetzt (Adamchuk et al. 2004). Spektral-optische Verfahren beruhen auf der Zerlegung elektromagnetischer Strahlung des sichtbaren (VIS: 380 – 780 nm) und nah-infraroten Bereichs (NIR: 780 – 2500 nm) und der Messung der Intensitäten des so gewonnenen Spektrums.

Die Bodenfarbe, d.h. die Reflexion des Lichts im sichtbaren (VIS) Spektrum, ist ein offensichtliches Merkmale zur Unterscheidung von Böden. Daher wird seit langem die Fernerkundung als Hilfsmittel zur Bodenkartierung im Landschaftsmaßstab genutzt (Steven, Clark 1990, Campbell 1996, Ad-hoc-AG Boden 2005). Sie ist durch die Verfügbarkeit neuer Satellitensysteme und die hohe Flächenleistung auch weiterhin Gegenstand aktueller agrarwissenschaftlicher Forschungen (z.B. Selige, Schmidhalter 2005). Für den Einsatz in der Landwirtschaft habe Fernerkundungsmethode jedoch Nachteile, da die Aufnahmesituation mehrere Anforderungen erfüllen sollte: Für die Erfassung von Bodeneigenschaften muss der Boden unbedeckt sein (keine Pflanzen oder Pflanzenrückstände), der Himmel muss wolkenlos sein und die Sonne muss möglichst im hohen Winkel stehen, um Schattenwurf zu vermeiden. Dies führt dazu, dass Fernerkundungsdaten selten zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Weiterhin sind Bilder mit hoher spektraler Auflösung noch sehr teuer (z.B. HyMap Hyperspektralbilder). Demgegenüber werden Messungen mit Nahbereichssensoren *im* Boden weder durch Witterung noch durch die Bodenbedeckung gestört.

Eine Vielzahl von Bodeneigenschaften beeinflussen das Reflexionsspektrum: Bodenfeuchte, Textur, organische Substanz, Eisenoxide, Mineralzusammensetzung etc. (Baumgardner et al. 1985). Allerdings ist die Wirkung dieser Bodeneigenschaften in verschiedenen Bereichen des Spektrums unterschiedlich. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die multiplen Einflüsse zu separieren. Die Spektrometrie von Böden ist allerdings ein weitgehend empirisches Verfahren. Es ist selten von vornherein genau bekannt, welche Wellenlängen des Reflexionsspektrums mit den interessierenden Bodeneigenschaften am besten korrelieren und wie das Schätzmodell zu parametrisieren ist. Es sind daher immer Referenzuntersuchungen mit Standardverfahren im Labor nötig. In der Regel werden die Refe-

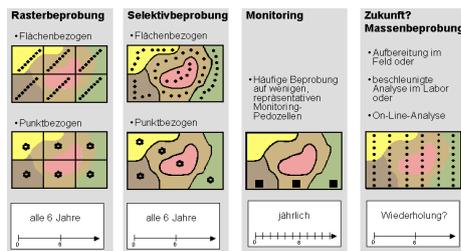
renzproben in einen Kalibrierungs- und einen Validierungsdatensatz aufgeteilt. In zwei Schritten erfolgen zunächst die Kalibrierung anhand eines Teils der Referenzproben und die Validierung am anderen Teil. Zur Entwicklung des Schätzmodells werden multivariate statistische Verfahren angewendet. Die Partial Least Squares Regression (PLSR) (Čížek 2004) ist dabei eine der bevorzugten Methoden.

Wie erwähnt, sind die geeigneten Wellenlängen nicht von vornherein mit Sicherheit bekannt. Zwar bemüht man sich, Bodenspektren zu systematisieren (Shepherd, Walsh 2002), in der Literatur sind jedoch sehr unterschiedliche Angaben über die Zusammenhänge von Wellenlängenbereichen oder bestimmter Wellenlängen und Bodeneigenschaften zu finden. Wären optimale Wellenlängen bekannt, könnte man statt teurerer Spektrometer günstigere, unempfindlichere Fotodioden einsetzen, welche nur ausgewählte Wellenlängenbereiche messen. So berichten Sudduth, Hummel (1996) und Hummel et al. (2001) von der Eignung des NIR-Bereichs zur Schätzung der organischen Substanz, der Bodenfeuchte und der KAK in weiten Teilen der USA (US corn belt). Dagegen stellen Viscarra Rossel, McBratney (1998) anhand Australischer Böden fest, dass NIR-Spektroskopie keine guten Schätzungen der organischen Substanz liefert. Reeves et al. (2002) und Fystro (2002) konnten zeigen, dass VIS- und NIR-Spektroskopie gut geeignet sind. Mouazen, Baerdemaeker, Ramon (2006) verglichen die Leistung eines VIS-NIR-Spektrometers mit eingeschränktem langwelligem Bereich (300 – 1700 nm) mit der Leistung eines vollwertigen VIS-NIR Spektrometers (350 – 2500 nm). Dabei erwies sich die Überlegenheit des VIS-NIR Spektrometers mit voller Bandbreite für die Bestimmung von C und N in Belgischen Böden.

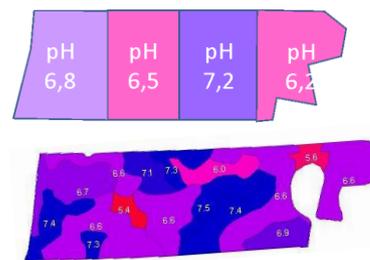
Erste Entwicklungen von mobilen Spektrometereinheiten zur Messung im Boden werden von Sudduth, Hummel (1993) in den USA und Shibusawa et al. (2003) in Japan beschrieben. Forschungsarbeiten laufen ebenfalls in Belgien (Mouazen, Baerdemaeker, Ramon 2005) und Schweden (Stenberg et al. 2007). Als erstes Privatunternehmen bietet die Firma Veris Technologies ein Bodenspektrometer als Komponente der Veris Mobile Sensor Platform (MSP) an; VIS- und NIR-Spektrometer sowie die Kombination von beiden stehen zur Auswahl. In Lund et al. 2005 wird vom erfolgreichen Test des Systems auf 1200 ha in verschiedenen Staaten der USA berichtet. Es wurden dabei durchschnittlich 20 Messungen pro Hektar durchgeführt.

### 2.1.5 Kartierungsmethoden zur Erfassung der räumlichen Variation des Kalkbedarfs

Die Untersuchung des pH-Wertes erfolgt nach guter fachlicher Praxis regelmäßig im Rahmen der Untersuchung der Grundnährstoffe P, K, und Mg (VDLUFA 2000 b). Hinsichtlich der Größe der Beprobungsflächen und den zeitlichen Abständen der Untersuchungen wird sich meist an den gesetzlichen Richtlinien der Düngeverordnung (Phosphat-Untersuchung) orientiert (Düngeverordnung 2007). Für die Probenahmeplanung wird hier vorgegeben, dass die Teilflächen nicht größer als 5 ha sein sollten und die Untersuchung spätestens nach 6 Jahren wiederholt werden muss. Die Beprobung erfolgt mit einem Bohrstock, der per Hand oder automatisch bis in die Tiefe der Bodenbearbeitung getrieben wird (üblicherweise 25 cm). Üblicherweise werden von einer Fläche mehrere solcher (Teil-)Proben gezogen und zu einer Mischprobe vereinigt. Genaue Vorgaben zum Beprobungsschema, d.h. zur räumlichen Anordnung der Beprobungspunkte und zur Anzahl von Teilproben für eine Mischprobe (Abbildung 1) macht der Gesetzgeber nicht. In VDLUFA 2000 c gibt der VDLUFA die Rasterbeprobung mit mehr oder weniger quadratischen Teilflächen und etwa 20 Teilproben für eine Mischprobe vor. Aus Abbildung 1, links oben und Abbildung 2 ist gut erkennbar, dass diese Art der Beprobung auf variablen Böden leicht zu Fehleinschätzungen führen kann.



**Abbildung 1: Aktuelle und zukünftige Beprobungsstrategien**



**Abbildung 2: pH-Karte nach Standard-Rasterbeprobung (o.) im Vergleich zur Kartierung mit der MSP (u.)**

Zur Probenahme speziell für die teilflächenspezifische Düngung hat der VDLUFA einen Standpunkt erarbeitet (VDLUFA 2000 c). Hier wird empfohlen, punktförmig Proben auf einem 1 ha Raster zu nehmen (Abbildung 1, links unten). Aus ökonomischen Gründen ist, bei Verwendung der konventionellen Beprobungs- und Analysemethoden, eine weitere Verkleinerung des Rasters (unter 1 ha) nicht üblich. In der Wissenschaft und Beratungspraxis werden daher Methoden zur gezielten Beprobung unter Nutzung von Vorinformationen vorgeschlagen (Abbildung 1, Mitte). In zahlreichen wissenschaftlichen Beiträgen werden solche Ansätze diskutiert (Cambardella, Karlen 1999, Lütticken 2000, Mallarino, Wittry, 2004, Schmidt, Taylor, Milliken 2002, Thompson et al. 2004). Die Vorteilhaftigkeit der Selektivbeprobung ist jedoch nicht eindeutig zu belegen (Mallarino, Wittry, 2004). Dies hängt sicher auch mit der Eignung der Vorinformationen zusammen, die jedoch in der Regel nicht bekannt ist (typisch ist die Nutzung von Karten der elektrischen Leitfähigkeit (EC). Die EC hat jedoch meist keinen direkten kausalen Zusammenhang mit dem Vorkommen eines einzelnen Nährstoffs im Boden). Als Konsequenz ist der Übergang zu möglichst direkt messenden Sensorsystemen notwendig, die kostengünstig eine hohe räumliche Beobachtungsdichte erlauben. Dieser Ansatz wird hier als Massenbeprobung bezeichnet (Abbildung 1, rechts). Die entsprechenden technischen Ansätze wurden in den vorherigen Abschnitten zur Sensortechnik besprochen. Aus der Perspektive der Kartierungsmethodik ist entscheidend, dass die mobilen Sensoren in der Regel zwar ungenauer als Labormethoden bei der Einzelmessung sind, dass aber durch die Vielzahl der Einzelmessungen in der Fläche die sensor-basierten Karten wesentlich genauer sind, als Karten, die mit den konventionellen Methoden erzeugt werden. Dies wird durch unsere Ergebnisse beim Einsatz der Veris MSP für die pH-Massenbeprobung auch in der Praxis belegt (Gebbers et al. 2011a, Schirrmann et al. 2011 a), Abbildung 2.

### 2.1.6 Dosierungsempfehlungen zur teilflächenspezifischen pH-Wert-Regulierung

Eine direkte Bestimmung des Kalkbedarfs ist über die Bestimmung der Basen-Neutralisations-Kapazität möglich. Sie hängt - vereinfacht - ab von der aktiven Acidität (freie Protonen der Bodenlösung) und der Reserve-Acidität (an Austauschern gebundene Protonen). Die standardmäßige Bestimmung der Basen-Neutralisations-Kapazität erfolgt im Labor durch Titration. Dies ist in der Praxis aus Kosten- und Zeitgründen nicht möglich und erfolgt daher in den seltensten Fällen. Stattdessen wird auf Messungen des pH-Wertes und Informationen über die Bodentextur und organische Substanz zurückgegriffen. In Abhängigkeit von Bodengruppe (Textur) und Humusgehalt wurden vom VDLUFA bundesweit Richtwerte für optimale pH-Bereiche aufgestellt (Müller et al. 1989; Schilling et al. 1987b), ebenso Hinweise für die Auswahl geeigneter Kalkdünger (Anonym 2011a). Problematisch bei diesen bundesweiten Richtlinien ist jedoch, dass regionale Besonderheiten nicht berücksichtigt werden. Beispielsweise wurden 1997 die Zielvorgabe für eine Erhaltungskalkung auf Grünland auf einen pH-Wert von 6,0 statt bisher 5,5 geändert. Als Folge wurden z. B. im Allgäu etwa die Hälfte der Bodenproben als „kalkbedürftig“ erkannt (Schröpel 2001). Auch im Land Brandenburg führt die Anwendung der VDLUFA-Empfehlungen zu teilweise zu überhöhten Kalkmengen. Mittels kombinierter

Bodensensoren besteht dagegen die Möglichkeit, den Kalkbedarf direkt zu erfassen und so zu wesentlich präziseren Kalkdüngungsempfehlungen zu gelangen (Gebbers et al., 2011a).

### 2.1.7 Kalkungsbedürftigkeit und Wirtschaftlichkeit der Kalkung

Saure Standorte verursachen je nach Kultur Ertragseinbußen bis zu 35%. Z. B. bedürfen im Land Brandenburg bis 52% der Ackerflächen einer Gesundungskalkung, 24% einer Erhaltungskalkung. Die Situation ist in vielen anderen Regionen ähnlich, eine Kalkbilanz für Deutschland weist eine Fehlmenge von bis zu 150 kg CaO/ha\*a aus (Molitor 2011). Die ökonomische und umweltrelevante Bedeutung einer teilflächenspezifischen Kalkung wurde von Wang et al. (2003) und Bongiovanni & Lowenber-DeBoer (2000) beschrieben. Eigene Bewertungen ergaben, dass ein Mehraufwand von ca. 20 €/ha\*a für eine teilflächenspezifische Beprobung und Kalkung durch den erwarteten Mehrertrag von 5-10 % deutlich kompensiert wird. Die Effekte einer höheren NPK und Mg – Düngeneffizienz sowie einer besseren Entwicklung des Bodenlebens sind hierbei noch nicht bewertet (Palme 2011, Gebbers et al. 2011b, Schirrmann et al. 2014). Vergleichbare Ergebnisse sind für Grünlandstandorte von ebenso großem Interesse.

### 2.1.8 Ökonomische und ökologische Bewertung von Grünland

Grünlandflächen beherbergen spezifische Habitate und Arten, die in ihrem Fortbestand auf eine angemessene landwirtschaftliche Bewirtschaftung angewiesen sind. Landwirtschaftliche Intensivierung gilt als eine Ursache für den Artenrückgang, weshalb betriebliche Bewirtschaftungsmaßnahmen als ein Schlüsselement zur Erhaltung der Artenvielfalt angesehen werden (Friedel et al. 2013). In Grünlanduntersuchungen wurde nachgewiesen, dass seit einigen Jahrzehnten Grünlandarten verschwinden und dabei insbesondere die Kenn- und Indikatorarten der Grünlandvegetation rückgängig sind (Stroh et al. 2009). Vor diesem Hintergrund ist von Interesse, ob eine standortspezifische Kalkung eine Nutzungsintensivierung darstellt, die wichtige Arten der Grünlandvegetation beeinflusst. An Ansätzen zur Erhebung der unterschiedlichen Biodiversität von Grünland wird deshalb intensiv geforscht. Seit einiger Zeit wird der High Nature Value-Farmland (HNV-Farmland) Indikator als Pflichtindikator der ELER-Verordnung (Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums) erhoben. Er wird als Stichprobenindikator betrachtet, mit dem sich die Entwicklung der Qualität des Grünlands abschätzen lässt. Der Wissenschaftliche Beirat für Biodiversität und Genetische Ressourcen beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz empfiehlt, den HNV Farmland-Indikator zum Monitoring der Grünlandqualität auszubauen (Gerowitt et al. 2013). Der HNV Farmland-Indikator ist ein Agrar-Umweltindikator, der den Naturschutzwert aufzeigen soll. Er dient als Basis-Indikator zur Beurteilung der Wirkungen von durchgeführten (Agrarumwelt-) Maßnahmen und wird für die Ergebnis- und Wirkungsindikatoren ausgewertet. Er ist Teil des Indikatorensets der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt und des Kernindikatorensets der Bundesländer. Das Bundesamt für Naturschutz hat eine Erfassungsanleitung für den HNV-Farmland-Indikator veröffentlicht (BfN 2013).

In der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (Anonym 2007) ist eine Vielzahl weiterer Indikatorenssysteme beschrieben. Für das vorliegende Projekt ist die Ermittlung von Indikatoren aus dem Kernindikatorensystem Umwelt (KIS) von besonderem Interesse, hierbei insbesondere die Indikatoren „Gefährdete Arten“ und „Invasive Arten“.

Weiterhin wurde im EU FP7-Projekt „BIOBIO“ ein Set von Bewirtschaftungsindikatoren für Biodiversität auf der Ebene landwirtschaftlicher Betriebe im Ökologischen Landbau und in extensiven Anbausystemen entwickelt und erprobt (Dennis et al. 2012, Herzog et al. 2012). Hierbei wurden vielfältige praxisrelevante Aspekte berücksichtigt, u. a. Bewirtschaftungsindikatoren zum Aspekt „Störung durch mechanische Eingriffe“. Mit diesen Indikatoren kann die Intensität der Bewirtschaftung und damit der generelle Druck auf die Artenindikatoren hinsichtlich des Technikeinsatzes erfasst werden. Für das Projekt werden die Indikatoren Field operations (FieldOp) in angepasster Form ermittelt.

Hinsichtlich der ökonomischen Effekte des veränderten Grünlandmanagements ist eine vergleichende Gegenüberstellung der Kosten einer teilflächenspezifischen Grünlandkartierung und -kalkung für den Nutzungstyp Weide mit der Veränderung von Aufwuchsmenge, Futterwert und Störungen durch mechanische Eingriffe von Interesse. Treten durch unsachgemäßes Management vermehrt giftverdächtige und giftige Pflanzen auf sowie besonders harte Arten mit geringem Futterwert, so kann sich der Ertrag um über 50 % vermindern (Henseleit et al. 2006). Die Kostenermittlung für die Grünlandkartierung, die Ermittlung von Zusatzkosten für eine teilflächenspezifische Grünlandkalkung, ausgehend von betriebsüblicher Technik soll den Veränderungen von Aufwuchsmenge und Futterwert gegenübergestellt werden. Weiterhin sind die Störungen durch mechanische Eingriffe zu erfassen (FieldOp, s. o.), u. a. Narbenschäden und der Aufwand für ihre Beseitigung sowie die Bodenverdichtung.

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Entwicklung von pH-Sensorsystemen speziell für Grünland**

Als verfügbare, kommerzielle Lösung zur pH-Kartierung wurde ein Bodensensorsystem vom Hersteller Veris Technologies eingesetzt.

Das System wurde modifiziert um es an die Anforderungen der Messung auf Grünland anzupassen. Hierzu wurden teilweise hauseigene Materialien und Bauteile verwendet.

Für den Bau transportabler, handgehaltener Sensoren wurden Bauteile für ein optisches Spektrometer und pH-Messtechnik auf Basis von Antimon-Elektroden beschafft. Dazu wurde auch ein Outdoor-Notebook erworben.

#### **3.2 Analysen im Labor**

- Bodenfeuchte: Wiegen vor und nach Trocknung im Trockenschrank
- Kalkbedarf: Als Methode zur exakten Bestimmung des Kalkbedarfs wurde die Erfassung der Basenneutralisationskapazität (BNK) in Kombination mit einer Parametrisierung der BNK durch nicht-lineare Regression verwendet. Die BNK wurde nach Meiwes, K.J. et al. 1984 und Utermann, J. 2000 gemessen.
- pH-Wert: Messung des pH-Wertes in  $\text{CaCl}_2$ -Extrakt nach VDLUFA
- Korngrößenverteilung (Textur): Sedimentationsmethode nach Köhn

#### **3.3 Erfassung der Boden- und Vegetationsvariabilität**

Zur Erfassung der Boden- und Vegetationsvariabilität wurden Bodensensormessungen, Boden- und Vegetationsbeprobungen sowie Luftbilder verwendet. Die Bodensensoren sind unter Abschnitt 3.1 beschrieben. Die Bodenproben wurden mit Rillenbohrern aus der oberen Schicht 0 bis 30 cm) entnommen und im Labor analysiert (Abschnitt 3.2). Pflanzenproben wurden durch Schnitt von 1 m<sup>2</sup> gewonnen. Weiterhin wurde der Pflanzenbestand flächendeckend Mittels RGB-Luftbildern erfasst. Dazu wurde ein Hexacopter mit einer Sony alpha 6000 Kamera und einem 12 mm Objektiv benutzt. Die Bilder wurden zu einem Orthofoto-Mosaik zusammengesetzt. Zur Quantifizierung der Variabilität wurden Variogramme berechnet

#### **3.4 Datenanalysen**

Die Analyse der Daten erfolgte mit:

- Microsoft Excel zur Dateneingabe und Vorverarbeitung
- MS Access zur Datenverwaltung
- QGIS (Geo-Informationssystem ) zur Visualisierung, Beprobungsplanung und Erzeugung räumlicher Abfragen
- Agisoft Photscan zur Erzeugung von Orthofoto-Mosaiken aus Luftbildern
- MATLAB zur statistischen Auswertung (Programmierung eigener Auswertungsalgorithmen).

### 3.5 Standorte

Vortests erfolgten auf verschiedenen Praxisflächen in der Uckermark (Brodowin, Wilmersdorf). Intensive Untersuchungen erfolgten auf Flächen des ATB in Potsdam.

## 4 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

### 4.1 Untersuchungen zur Nutzbarkeit der Veris MSP Sensorplattform

#### 4.1.1 Verletzung der Grasnarbe

Die Veris MSP Plattform bietet potenziell die Möglichkeit über drei Sensorsysteme für die Kalkdüngung relevante Bodeneigenschaften zu erfassen. Mit dem pH-Sensor sollte die aktuelle Acidität erfasst werden, die elektrische Leitfähigkeit sollte als Indikator für die Textur dienen und aus den optischen Bodenspektren organische Substanz geschätzt werden.

Für den Einsatz aller drei Sensoren ist ein mechanischer Kontakt mit dem Boden und somit auch mit der Grasnarbe nötig. Die durch die rollenden Elektroden des geo-elektrischen Sensors verursachten Schlitzte von ca. 0,5 cm Breite und 1-5 cm Tiefe verursachen jedoch nur minimale Schäden. Wesentlich stärker fällt die Schädigung der Grasnarbe durch den Probeschuh des pH-Sensors und den Messkopf des Spektrometers aus.

Der Messkopf des Spektrometers taucht permanente in den Boden ein und erzeugt ein etwa 4 cm breite und (je nach Einstellung) ca. 7 cm tiefe Furche (Abbildung 3). Die Furche bleibt auch über 6 Monate sichtbar (Abbildung 4).



**Abbildung 3: Verletzung der Grasnarbe (a) Messung mit der Veris Plattform auf langjährigem Grünland. (b) Furche durch den Spektrometerkopf**



**Abbildung 4: Verletzung der Grasnarbe. Furche nach 6 Monaten auf altem Grünland. (a) seitliche Ansicht, (b) Blick von oben**

Der Eingriff durch den Probenschuh des pH-Sensors ist noch massiver. Die Breite der Furch ist größer als 15 cm und die Tiefe beträgt 10 bis 20 cm (Abbildung 5). Der Schuh taucht alle 10 bis 20 Sekunden für etwa 1 bis 2 Sekunden in den Boden ein. Je nach Fahrgeschwindigkeit fällt die Verletzung der Grasnarbe unterschiedlich stark aus.



**Abbildung 5: Verletzung der Grasnarbe. (a) Frische Furchen durch pH-Probennehmer und Spektrometerkopf auf lückigem Grünland. (b) Frische Furche durch pH-Probennehmer alter Grasnarbe**

Als erster Schritt zur Verringerung der Beschädigung wurde das Veris MSP System so umgebaut, dass pH-Schuh und Spektrometerkopf hintereinander laufen (Abbildung 6). Allerdings führt dies zu einer Beeinflussung der Spektrometermessungen bzw. der Ankopplung des Spektrometerkopfes.



**Abbildung 6: Verletzung der Grasnarbe. Spektrometerkopf (links) und Probennehmer pH (rechts) im Eingriff**

Als weiterer Schritt wurden Lösungen zum Schließen der Furche untersucht. Einen nachlaufenden Radwalze (Abbildung 7) erwies sich als ungeeignet, weil durch sie weiter seitlich abgelagertes Material nicht wieder in die Furche bewegt wurde sondern liegen blieb. Dieses Problem ließ sich durch ein modifiziertes Pflugschar lösen (Abbildung 8). Allerdings lieferte dieser Lösungsansatz nur bei hoher Auflast befriedigende Ergebnisse.



Abbildung 7: Verletzung der Grasnarbe. Prüfung der Furchenschließung durch eine nachlaufende Radwalze



Abbildung 8: Verletzung der Grasnarbe. Modifiziertes Pflugschar als Furchenschließer. Aufgrund der notwendigen Auflast ist diese Lösung ungeeignet

#### 4.1.2 Zuverlässigkeit des Veris MSP Systems

Das Veris MSP System erwies sich im Laufe des Projekts als so unzuverlässig, dass hier keine Empfehlung für den Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis ausgesprochen werden kann.

Die Installation der Veris Spektrometer-Software auf dem für das Projekt beschafften Outdoor-Notebook erwies sich als überaus schwierig, zeitaufwändig und letztendlich nicht durchführbar. Trotz bestätigter Kompatibilität mit dem 64-Bit Betriebssystem musste letztendlich ein Windows 7, 32 Bit Betriebssystem neu installiert werden. Hierzu wurde eine neue Festplatte beschafft, um im Falle des Nicht-Erfolgs der Neuinstallation den Originalzustand wiederherstellen zu können. Außerdem konnte nur durch das Abschalten fast aller Schnittstellen eine stabile Kopplung der Spektrometer über USB erreicht werden. Auch diese Störungssuche war extrem zeitaufwändig.

Im Oktober 2015 wurden Störungen bei der Datenaufzeichnung des pH Managers offensichtlich: Vermeintlich durchgeführte Aufzeichnungen wurden nach Abschluss der Kartierungen teils unvollständig oder gar nicht auf der Speicherkarte abgelegt. Nach wiederum zeitaufwändiger Fehlersuche wurde durch die Beschaffung und den Austausch des im Datenlogger verbauten Card-Interfaces der Fehler behoben.

Als Ursache vermuten wir Spannungsspitzen, Unterversorgung und / oder Fehlpolungen in der Kopplung der Messgeräte über die Stromversorgung mit den jeweils verwendeten Schleppern. Es stellte sich heraus, dass standardisierte Gerätesteckdosen auf den Schleppern zum Teil falsch gepolt angeschlossen sind, mit fatalen Folgen für die Elektronik der Sensoren.

Im Februar 2016 kam es zu einem elektrischen Kabelbrand im Veris Messcomputer. Dieses führte zu einem Totalausfall der automatischen Probennahme und der pH-Messung. Eine Reparatur des Messcomputers wurde bei der Firma Veris in den USA veranlasst. Der reparierte Messcomputer steht seit Mai wieder zur Verfügung. Nach unserer Einschätzung ist der Kabelbrand auf unzureichende Auslegung (Kabelquerschnitte) und unzureichende Sicherung der elektrischen Komponenten in der Serienausführung zurückzuführen. Um einen erneuten Ausfall der Sensorplattform und eine Gefährdung von Personen zu vermeiden, wurde die Stromversorgung vollständig neu konzipiert und aufgebaut.

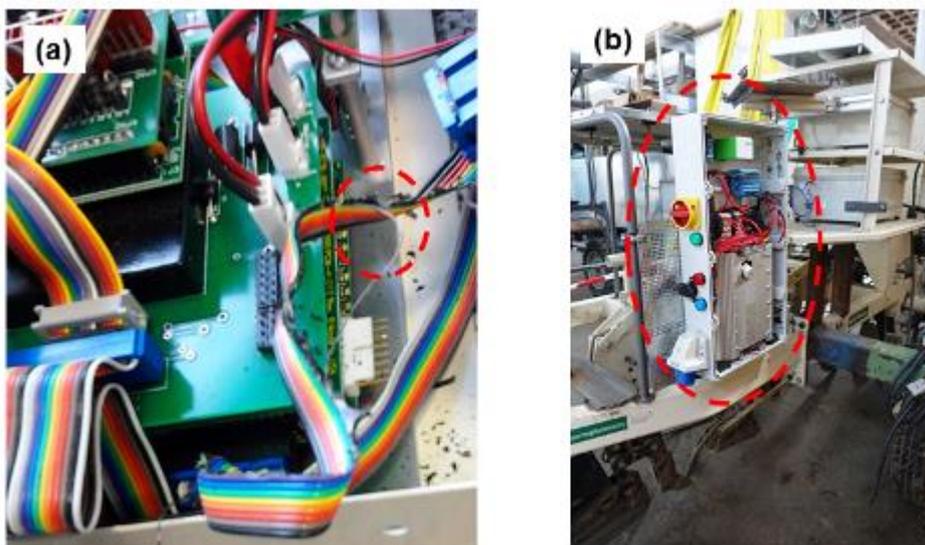


Abbildung 9: (a) Defekt durch Kabelbrand im Veris Messgerät; (b) neue Stromversorgung mit Schutzschaltern

## 4.2 Alternative Lösung zur automatisierten Probeentnahme während der Fahrt

Um die Probengewinnung bzw. die Ankopplung zum Boden zuverlässiger zu machen und gleichzeitig weniger Zerstörungen an der Grasnarbe hervorzurufen, wurden neue Ansätze zur Probenentnahme geprüft.

Insbesondere wurde untersucht, ob sich eine durch den Boden gezogene Kettensäge zur Gewinnung von Probenmaterial eignet (Abbildung 10). Auf dem Grünland hinterlässt das Schwert der Kettensäge nur eine sehr schmale, kaum sichtbare Eingriffsfurche (Abbildung 11).



Abbildung 10: Konzeptstudie für einen neuen Bodenprobenehmer. (a) Übersicht; (b) Detail, mit Bodenaushub; (c) Eingriff in den Boden



Abbildung 11: Konzeptstudie für einen neuen Bodenprobenehmer. Eingriff in den Boden

Bei der Bodenförderung mittels Kettensäge wird das Material hochgeschleudert. Dadurch ist eine Entmischung möglich, so dass die Probe nicht mehr repräsentativ ist. Vorläufige Untersuchungen

zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen konventionell, per Bohrstock entnommenen Boden, und dem durch die Kettensäge geförderten Boden.

Für die Nutzung dieser Fördermethoden in Verbindung mit pH- und Spektrometernmessungen ist eine Auffangvorrichtung, Dosierung und Messkammern notwendig. In einem „Messkarussell“ aus mindestens zwei Probenbecher, in den die pH-Messung durchgeführt, könnten abwechselnd in je einem Becher die Messung und im anderen Becher die Reinigung erfolgen. Die Entwicklung wurde aufgrund begrenzter Ressourcen im Projekt pH-Green nicht fortgesetzt.

Als zweiter Ansatz wurde ein absätziges Verfahren geprüft, bei dem mit einem Kernbohrgerät die Grasnarbe entnommen und nach der Messung das Kreissegment wieder eingesetzt wird. Der Ansatz funktioniert grundsätzlich, allerdings erfordert die vollständige Automatisierung erhebliche Entwicklungsarbeit, die Projekt pH-Green nicht zu leisten war.

### 4.3 Entwicklung von mobilen, handheldenen Sensorsystemen

Zur pH-Messung wurde ein eigenes pH-Modul auf Basis von Antimon-pH-Elektroden entwickelt. Das pH-Modul erlaubt Messungen direkt am feldfrischen Boden (in situ Messungen). Das Modul lässt sich manuell auf dem Grünland einsetzen und wurde so zunächst getestet.

Das Modul basiert auf zwei Potentiometern der Firma Jumo (Abbildung 12) und Antimon-pH-Elektroden (Abbildung 13).

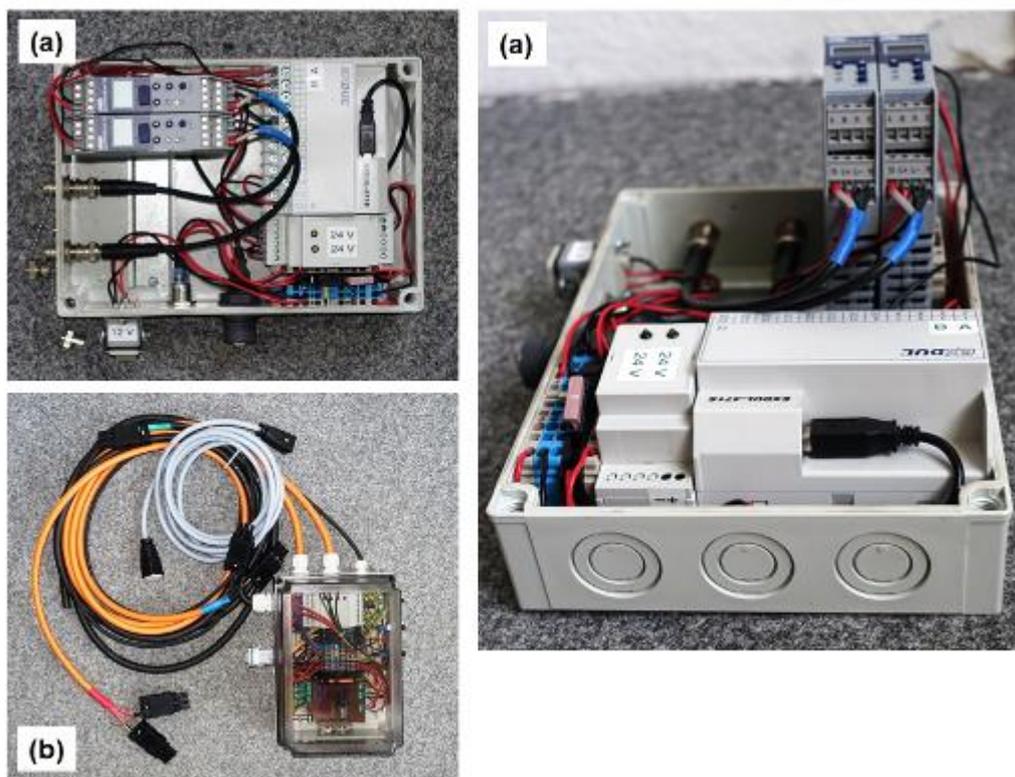
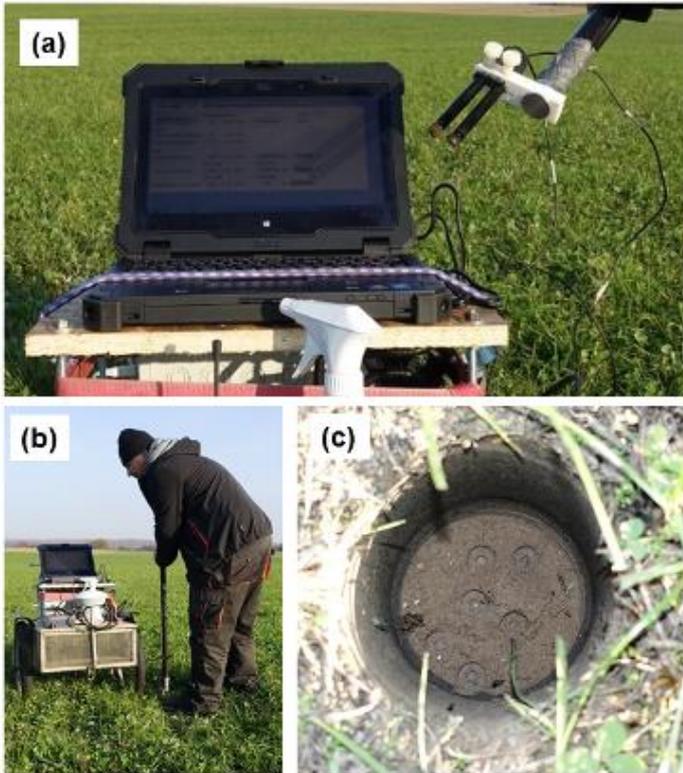
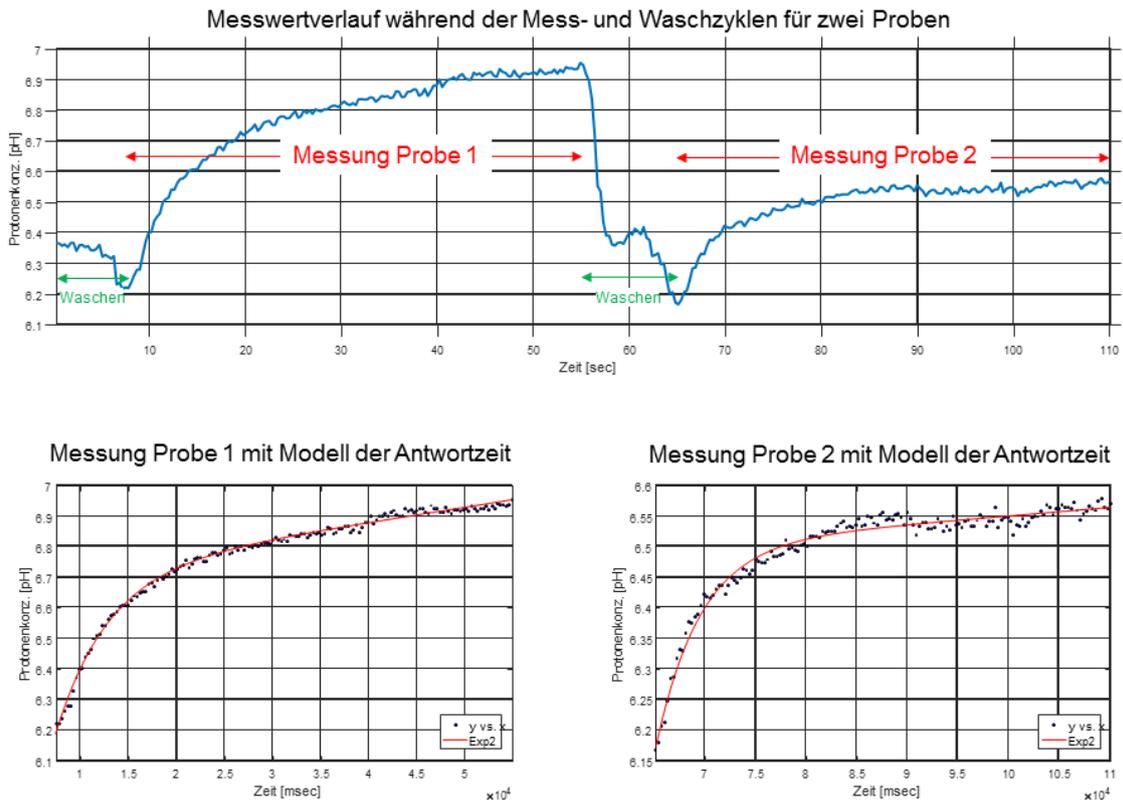


Abbildung 12: Neuer pH Sensor. (a) pH-Messeinheit; (b) Steuereinheit für den pH-Probenehmer



**Abbildung 13: Neuer pH Sensor. (a) Gesamtsystem mit Outdoor-Notebook, Antimon-Elektroden, Flasche mit Reinigungswasser, Elektrik; (b) Manuelle Messung auf jungem Grünland; (c) Abdrücke der Elektroden im Boden**

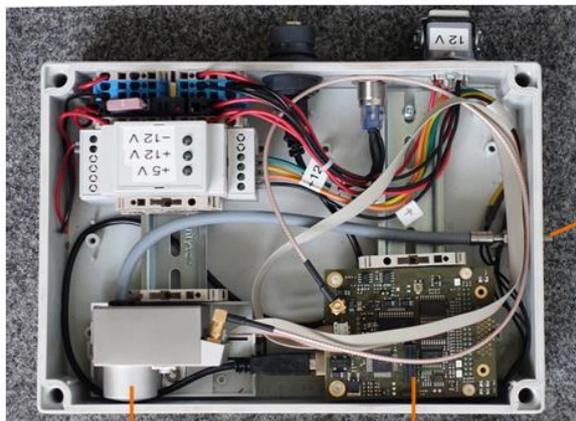
Test zum Einschwingverhalten der pH-Sensoren zeigen, dass nach etwa 1 min die Messwerte stabil sind (Abbildung 14).



**Abbildung 14: Neuer pH Sensor. Untersuchungen zum Antwortverhalten**

Weiterhin wurde mit der Entwicklung eines Spektrometer-Moduls begonnen. Es kann zur Messung der organischen Substanz und der Bodentextur eingesetzt werden. Diese Bodeneigenschaften sind wichtig um den pH-Wert richtig einschätzen zu können.

Spektrometermodul mit Elektronik

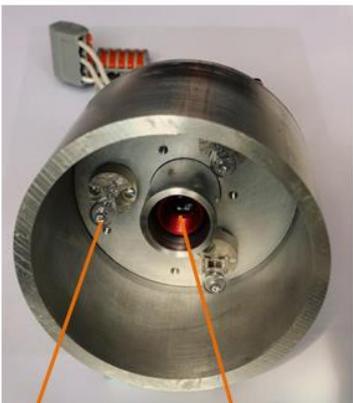


Optikmodul mit Gitter und Detektor

Elektronik

Glasfaseranschluss

Spektrometerkopf



Halogen-Lampen

Kollimator

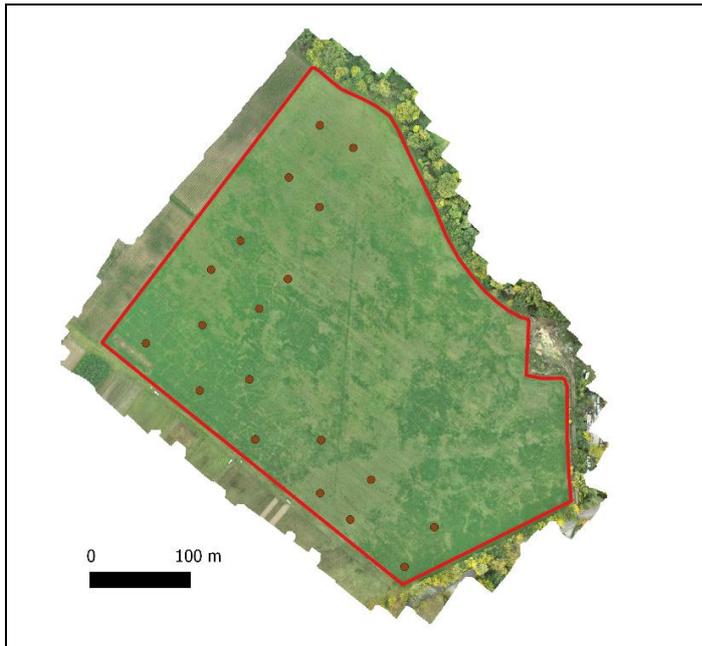
Abbildung 15: Neu entwickeltes Spektrometersystem

#### 4.4 Untersuchungen zur Variabilität und zum Kalkbedarf

Im Folgenden werden Untersuchung zur pH-Wirkung und zum Kalkbedarf auf der Fläche Königsfeld im Hinblick auf eine sensorgestützte Kartierung des Boden-pH-Wertes auf Grünland dargestellt.

##### Standort

Das Königsfeld liegt im Nordwesten Potsdams in der Nähe des ATB (Abbildung 16). Die Fläche wird seit 2011 als Grünland genutzt, vorwiegend als Weide für Mutterkuhhaltung. Es wurde eine Grass-Luzerne-Mischung angesät. Die Größe beträgt rund 15 ha. Das Substrat ist vorwiegend sandig. Der Standort ist grundwassernah, im Nordosten verläuft der Sacrow-Paretzer Kanal, allerdings wurde keine Vernässung beobachtet.



**Abbildung 16: Luftbild mit Beprobungspunkten für Biomasse (Oktober 2016)**

**Feldmessungen:**

- RGB-Luftbild mit RGB-Kamera und UAV des ATB (Oktober 2016)
- Veris MPS (März 2017): Geoelektrik erfolgreich, pH- und VisNIR-Messungen mussten abgebrochen werden
- Bodenproben (Oktober 2016, März 2017)
- Pflanzenproben (Oktober 2016)

**Ablauf**

Im Oktober 2016 wurde bei deutlich unterschiedlichem Bestand mit den Messungen begonnen. Die Messungen mit dem Veris Bodensensor konnten jedoch nicht erfolgreich durchgeführt werden (Defekte und Verstopfung / schlechte Ankopplung machten Messungen unmöglich). Im März 2017 wurden erneut Veris-Messungen versucht, zugleich wurde mittels engräumiger Bodenbeprobung und nachfolgender Bodenanalyse die Messung per Sensor „simuliert“ (Abbildung 17).

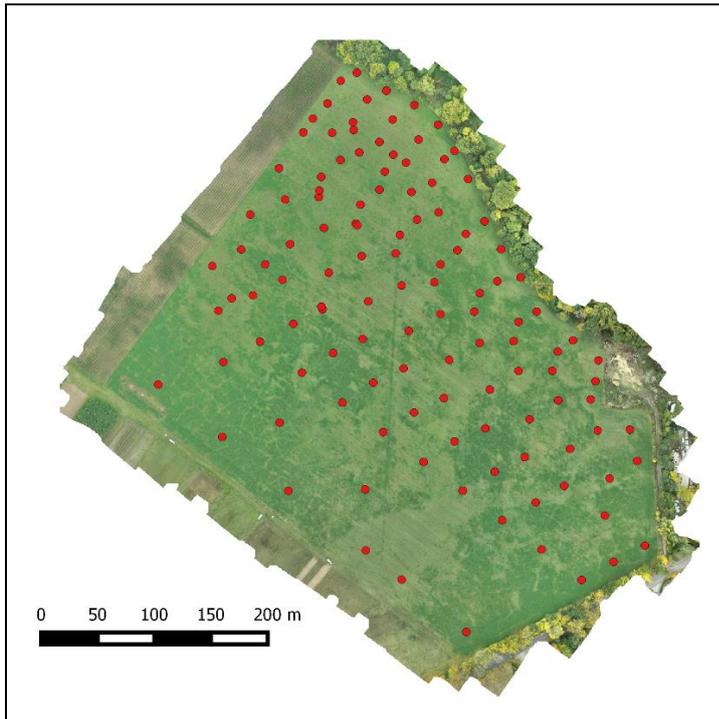


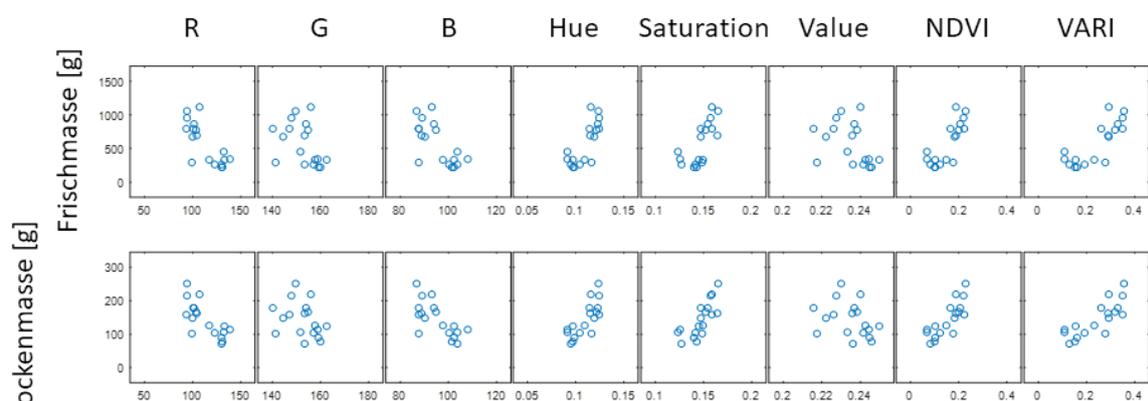
Abbildung 17: Luftbild mit Beprobungspunkten zur Bodenuntersuchung (Beprobung im März 2017)

## 4.5 Ergebnisse

Visuell war am Boden eine starke Differenzierung von Bestandeshöhe und Artenzusammensetzung zu erkennen. In Bereichen mit hohem Bestand dominierte die Luzerne, in Bereichen mit wenig wüchsiger Vegetation dominierten Gräser. Die ist anhand des Luftbildes ebenfalls gut erkennbar.

### 4.5.1 Korrelation Luftbild – Biomasse

Es wurden verschiedene Indizes aus den RGB-Teilbildern abgeleitet und mit der Frisch- und Trockenmasse korreliert. Farbton (Hue), Sättigung (Saturation), NDVI und VARI zeigen gute Korrelationen mit der FM und TM (Abbildung 18).



Korrelationskoeffizienten (Pearson's r)

FM und Bild

-0.7714 -0.4033 -0.7005 0.7810 0.7035 -0.4032 0.8100 0.8103

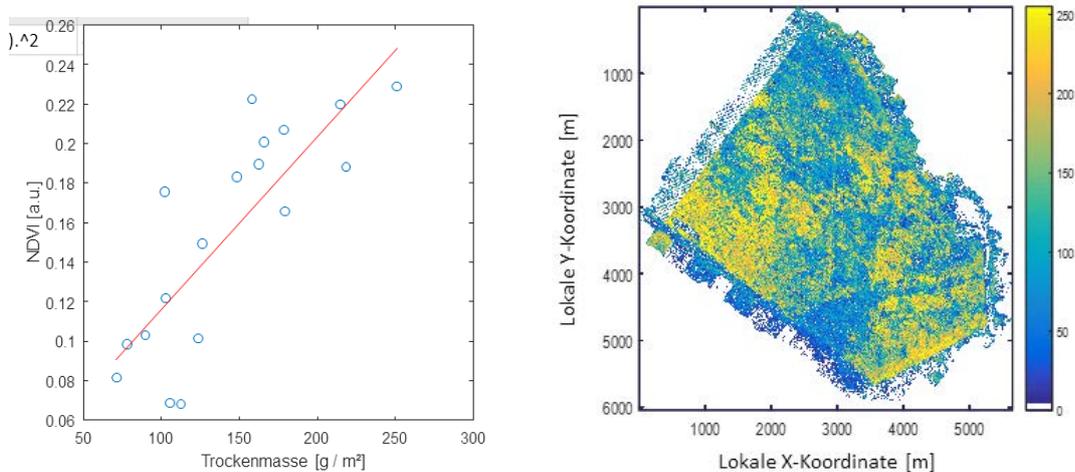
TM und Bild

-0.7528 -0.3389 -0.7016 0.7703 0.7585 -0.3385 0.8119 0.8080

Abbildung 18: Zusammenhänge zwischen Biomasse und Luftbild vom 24.10.2016

Die Korrelation zwischen NDVI und TM war insgesamt am stärksten. Daher wurde hierfür ein Regressionsmodell erstellt und im nächsten Schritt zur flächendeckenden Schätzung der Biomasse benutzt (Abbildung 19).

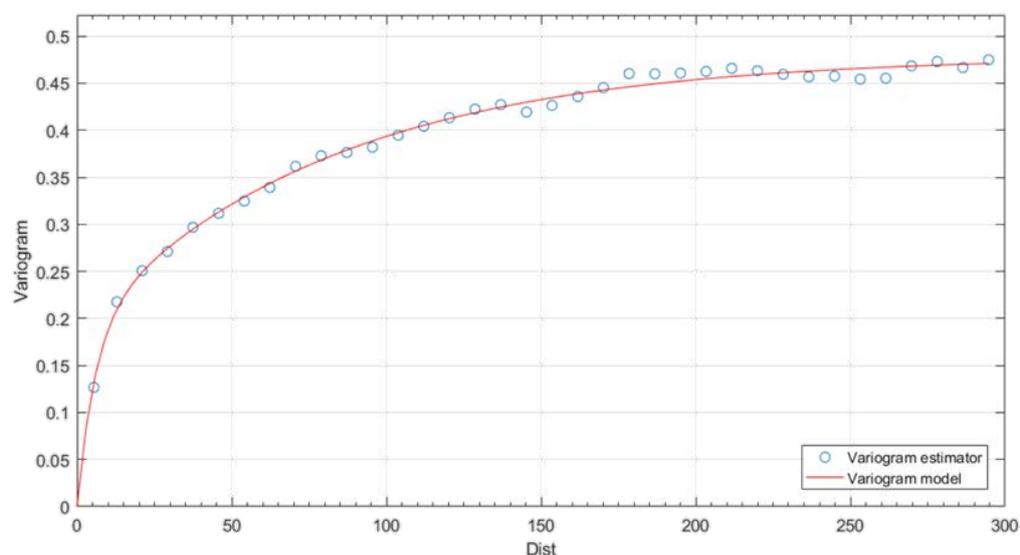
Regressionsmodell:  $NDVI = a + b \cdot TM$ , mit  $a = 0,028$  und  $b = 0,000876$



**Abbildung 19: Regression zwischen Trockenmasse und NDVI (links) und flächendeckender Schätzung der Trockenmasse (rechts)**

#### 4.5.2 Räumliche Variabilität der Trockenmasse

Anhand des aus dem Luftbild berechneten NDVI wurde eine Biomassekarte abgeleitet. Daraus wurden die Werte zur Variogramm-Berechnung entnommen um die räumliche Abhängigkeit zu modellieren (Abbildung 20). An das empirische Variogramm wurde ein geschichtetes Modell angepasst – bestehen aus dem Nugget-Effekt und zwei sphärischen Modellen. Die Anpassung ergibt einen sehr niedrigen Nugget-Effekt als erste Komponente der räumlichen Korrelation. Das weist auf ein geringes (räumlich unstrukturiertes) Rauschen in den Daten hin. Die Reichweite der zweiten Komponente (erstes sphärischen Modell) beträgt knapp 18 m, die Reichweite der dritten Komponente 245 m. Die Reichweite von 18 m zeigt eine hohe räumliche Varianz an und verdeutlicht die Notwendigkeit einer engräumigen Beprobung.



**Abbildung 20: Variogramm zur räumlichen Autokorrelation der Biomasse (trocken), geschätzt aus dem Luftbild**

### 4.5.3 Zusammenhang zwischen pH und Biomasse

Da das Veris-pH-System auf dem Standort nicht einsetzbar war, wurde die engmaschige Beprobung per Hand simuliert.

Mittels Quantilregression wurde die ertragslimitierende Wirkung des pH-Wertes geschätzt. Die Quantilregression erlaubt es die ertragslimitierende Wirkung von Umweltfaktoren im Sinne des Liebigschen Gesetzes vom Minimum zu modellieren (Cade et al., 1999; Cade & Noon, 2003; Kaiser et al., 1994; Koenker & Bassett, 1978; Thomson et al., 1996). Bei der Anpassung eines Polynoms zweiten Grades ergab sich aus dem Maximum der Kurve ein optimaler pH-Wert von 6,4 (Abbildung 21). Dieser liegt im erwarteten Bereich für Luzerne (wobei die Angaben in der Literatur bzw. von Züchtern sehr unterschiedlich sind).

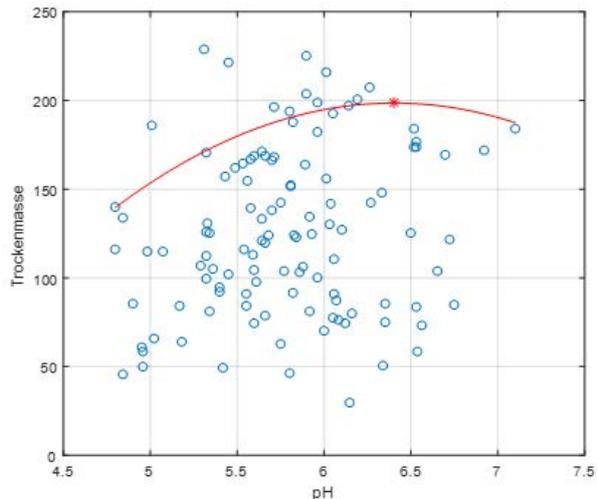


Abbildung 21: Quantilregression zum Zusammenhang zwischen Boden-pH-Wert und oberirdischer Trockenmasse der Pflanzen

### 4.5.4 Räumliche Variabilität des pH-Wertes

Anhand der Bodenproben wurde eine Variogramm-Analyse des Boden-pH durchgeführt (Abbildung 22). Das Variogramm-Modell umfasst die Teilmodelle Spherical und Nugget, mit den Parametern 0.0001 (Nugget), 0.1517 (Sill), 43.5409 (Range). Die Anpassung des sphärischen Modells mit Nugget-Effekt zeigt einen geringen Anteil räumlich unstrukturierten Rauschens. Die Reichweite liegt bei rund 40 m. Dies Ergebnis ist in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen der Arbeitsgruppe.

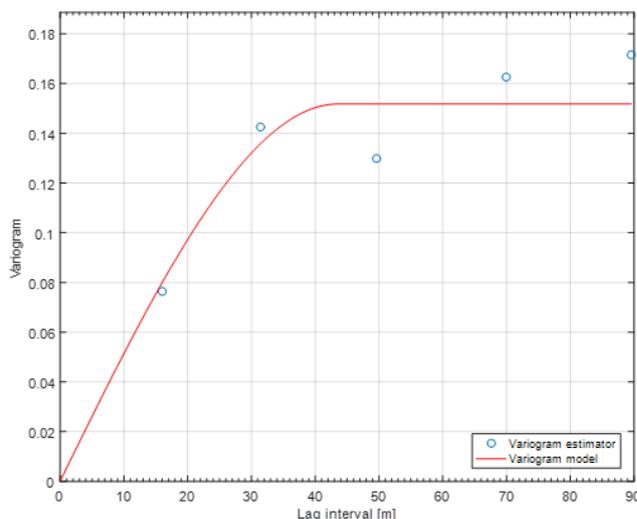


Abbildung 22: Variogramm zur räumlichen Autokorrelation der Boden-pH-Werte

#### 4.5.5 Abschätzung des Kalkbedarfs

Die Basenneutralisationskapazität (BNK) liefert direkte Informationen zur Bestimmung des Kalkbedarfs. Zur Bestimmung der BNK wird einer Bodenprobe Lauge in unterschiedlichen Konzentrationen zugesetzt und nach 18 h schütteln erfolgt eine pH Messung im Filtrat. Man erhält Punkte einer Titrationskurve indem man die den pH-Wert gegen die Konzentration der Lauge aufträgt (sechs  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Konzentrationsstufen).<sup>1</sup>

An die Einzelwerte der Titration wurden parametrische Kurven angepasst um den Kalkbedarf zu schätzen (Abbildung 23). Dazu wurde eine Gauß-Funktion verwendet:  $\text{pH} = a + b \cdot (1 - \exp(-(\text{Ca}(\text{OH})_2/c)^2))$

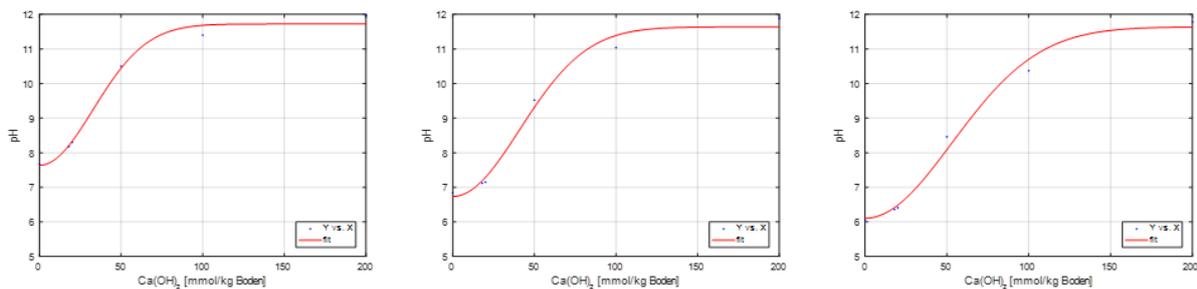


Abbildung 23: Ausgewählte Titrationskurven für die Bestimmung der BNK

Eine Zusammenfassung der BNK-Kurven für alle Bodenproben zeigt Abbildung 24.

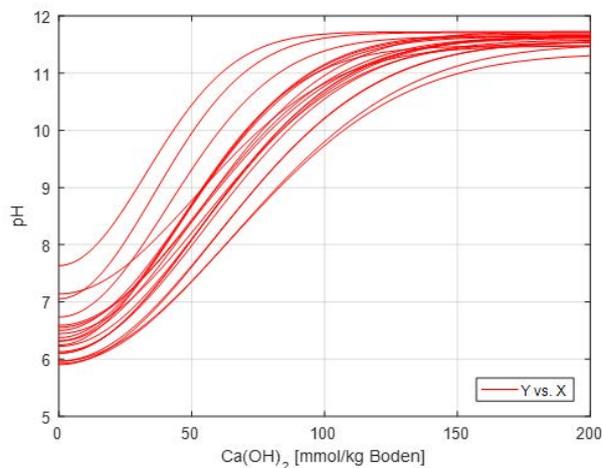


Abbildung 24: Übersicht aller Titrationskurven der BNK

Durch Umstellung der Gleichung für die Gauß-Kurve lässt sich der Kalkbedarf berechnen:

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 = c \cdot \sqrt{-\log(1 - (\text{pH} - a)/b)}$$

Dabei ist folgende Umrechnung zu beachten: 1 mmol<sub>c</sub>  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pro kg Boden entspricht 28 kg CaO pro ha\*dm (bei einem Feinbodenanteil von 100 % und einer Trockenraumdicke von 1 g / cm<sup>3</sup>).

<sup>1</sup> Bemerkung zur Methode: Die Methode nach Meiwes et al., 1984 gilt als Standardverfahren zur Bestimmung der BNK in Deutschland. Aufgrund des hohen Aufwands wird diese Analyse jedoch selten durchgeführt. Unser Arbeitsgruppe mußte sich daher erst in die Methode einarbeiten, wobei sich die Analysenvorschrift im Original (Meiwes et al., 1984 ) als fehlerhaft erwies (bestätigt durch Herrn Dr. Meiwes).

Anhand unserer Proben wurde eine Variation des Kalkbedarfs zwischen 0 und rund 900 kg CaO pro ha\*dm gefunden (Abbildung 25).

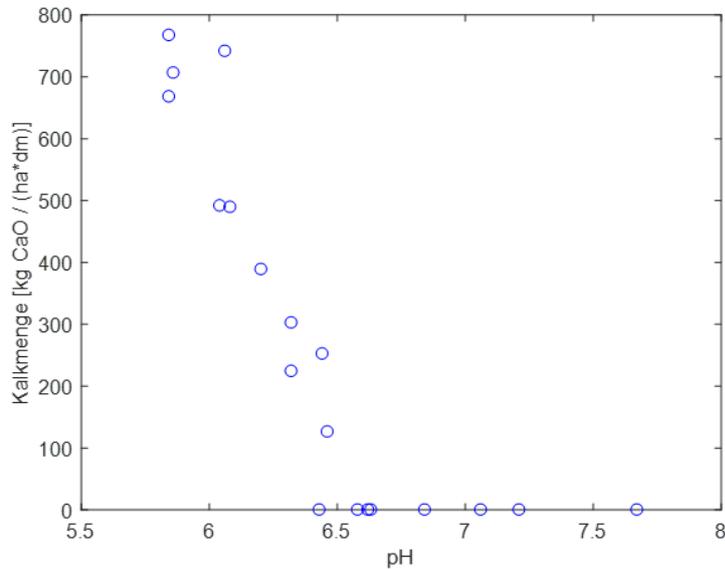


Abbildung 25: Abschätzung des Kalkbedarfs für die Bodenproben anhand der BNK-Kurve

#### 4.5.6 Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit (EC) und Biomasse

Die Karten der aus dem NDVI geschätzten Trockenmasse und der elektrischen Bodenleitfähigkeit zeigen gleichartiger Einfärbung ähnliche Muster (Abbildung 26). Vergleicht man die interpolierten EC-Daten mit der Biomasse, fällt auf, dass besonders geringe (rot) und hohe (grün) Leitfähigkeiten mit Gebieten geringer (rot) und hoher (grün) Biomasse zusammenfallen.

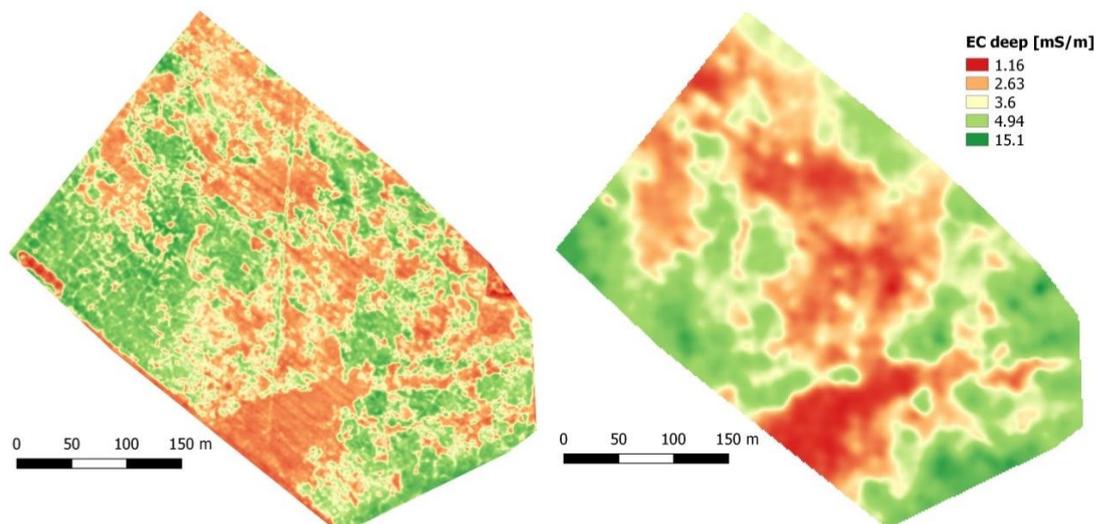
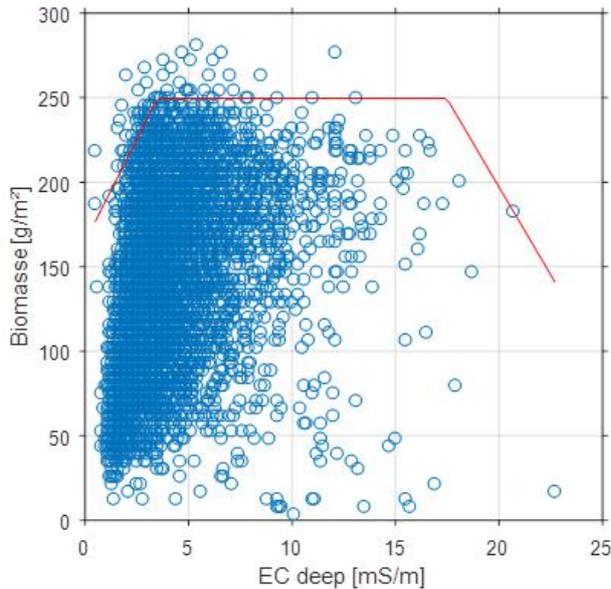


Abbildung 26: TM aus NDVI (links) und elektrische Leitfähigkeit des Bodens

Der Zusammenhang lässt sich mit einer einfachen linearen Regression auf Basis der Gaußschen Fehlerverteilung nicht plausibel modellieren. Stattdessen wurde auch hier die Quantilregression angewendet (Abbildung 27). Die Trapezoidfunktion lässt sich wie folgt interpretieren: Unter 3,5 mS/m ist der Boden sehr sandig, damit nährstoffarm und trocken, über 17,5 mS/m ist der Boden sehr bindig bzw. stark wassergesättigt bzw. stauwasseranfällig oder verdichtet.



**Abbildung 27: Modellierung der limitierenden Wirkung von Textur/Feuchte (Elektrische Leitfähigkeit (EC) als Proxy) auf die Biomasse eines Lupinen-Gras-Gemenges mittels Quantilregression.**

## 5 Diskussion der Ergebnisse

1. Sowohl die Grünlandvegetation als auch der Boden-pH variieren kleinräumig. Eine engmaschige Beprobung ist daher notwendig.
2. Der Boden-pH wirkt neben anderen Faktoren (Textur, Wasser) Ertragslimitierend und beeinflusst zudem die Artenzusammensetzung.
3. Es besteht Entwicklungsbedarf für robuste Sensorlösungen zur engräumigen Bodenuntersuchung

## 6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse

### 6.1 Wurden praxisrelevante Ergebnisse erzielt?

Die Anfangshypothesen wurden bestätigt, vgl. Absatz „Diskussion der Ergebnisse“.

Als Konsequenz besteht nach wie vor die Notwendigkeit, spezifische Verfahrenslösungen für die pH-Kartierung auf Grünland zu entwickeln. Wir haben hier erste Ansätze erreicht.

Erst wenn diese technisch validiert sind, ist es sinnvoll, die geplanten umfangreichen pH-Kartierungen und Kartierungen des Ernteguts für eine belastbare Datenbasis zur Analyse der ökophysiologischen Zusammenhänge, der räumlichen Variabilität und der ökonomischen Bewertung fortzusetzen.

Eine ökonomische Bewertung ist erst dann sinnvoll, wenn funktionsfähiges System zur pH-Kartierung auf Grünland verfügbar ist.

## 6.2 Falls ja: Erstellung eines Merkblatts

Die oben beschriebenen Zwischenergebnisse rechtfertigen keine Erstellung eines Merkblatts.

## 7 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten und tatsächlich erreichten Ziele; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen

Im Projektverlauf gab es Schwierigkeiten:

Die vor Projektbeginn erteilte Auflage einer Kürzung der ursprünglich beantragten ca. 500.000 € auf ca. 300.000 € hat Änderungen in der Projektplanung erfordert, die über die gesamte Laufzeit Schwierigkeiten in der Projektdurchführung verursachten. Es stellte sich als Fehler heraus, unter diesen Randbedingungen das Vorhaben anzunehmen.

Über lange Zeit war es nicht möglich, geeignete Fachkräfte für die Projektdurchführung und für die ursprünglich vorgesehene Lehrvertretung an der HNE zu finden.

Die aufgetretenen technischen Probleme und Schäden, besonders an der Veris-Plattform, waren weder erwartet noch vorhersehbar. Rückblickend wäre es sinnvoll gewesen sofort ein Nachfolgegerät aus der nun übernächsten Generation zu beschaffen, anstatt ständig zu reparieren.

Frühjahrs- und Sommertrockenheit machten Messkampagnen in 2015 und 2016 nahezu unmöglich: Die Furchenöffner konnten die Grasnarbe nicht öffnen, die geringe Restfeuchte führt zu fehlerhaften Messwerten, in der gestörten Narbe wuchs Unkraut oder es gab Trockenschäden, Landwirte lehnten Messungen unter diesen Bedingungen ab. Unter dem Eindruck der witterungsbedingten Unwägbarkeiten sollten weiterführende Projekte im Grünland über deutlich längere Zeiträume ab fünf Jahren angelegt werden.

Ein Arbeitsunfall mit längerer Krankheit beeinflusste ebenfalls die Projektzielerreichung. Ursache war ein im Grünland nicht sichtbarer größerer Stein, der die Messplattform plötzlich aushob und den aufsitzenden Versuchstechniker davonschleuderte. Weil solche Zwischenfälle auch in Zukunft nicht ausgeschlossen werden können, wurde der Einsatz der Messplattform auch aus diesem Grund grundsätzlich in Frage gestellt und mit der Entwicklung alternativer Sensoren und Messverfahren begonnen.

Eine Verlängerung und Aufstockung des Projektes kam nicht zustande.

Die Ergebnisse wurden nicht vollständig erreicht.

## 8 Zusammenfassung

Das Projekt zeigt, dass es bislang keine ausgereifte kommerzielle Lösung für eine vollautomatisierte pH-Kartierung auf Grünland gibt. Werden die Eigenschaften der verschiedenen Grünlandstandorte berücksichtigt, erfordert die Entwicklung einer Lösung ein mindestens fünfjähriges F&E-Vorhaben.

Im Projekt wurden zwei Demonstratoren für Handsensoren entwickelt, die für den Einsatz in der Praxis weiterentwickelt werden können. Dies könnte bei ausreichenden Finanzmitteln innerhalb von drei Jahren erfolgen. In weiteren zwei Jahren wäre der Aufbau eines autonomen Feldmesssystems umsetzbar.

Gegenstand war der Erhalt einer optimalen Boden-Acidität im Grünland. Ziele des Vorhabens waren:

- (i) Entwicklung, Tests und Bewertungen von pH-Sensorsystemen,
- (ii) Entwicklung von Auswertungsmethoden für die sensorgestützte Bodenkartierung sowie von sensorgestützten Entscheidungsunterstützungsalgorithmen zur adaptiven Kalkung,
- (iii) Ermittlungen der Bodenvariabilität durch Bodensensoren und ihr Zusammenhang mit wesentlichen Eigenschaften des Grünlands.

Im Projektverlauf gab es Schwierigkeiten: Budgetkürzungen, Fachkräftemangel, technische Probleme und Schäden, Trockenphasen sowie ein Arbeitsunfall beeinflussten Projektziele und Zeitplanung. Eine

Verlängerung und Aufstockung des Projektes kam nicht zustande. Die Ergebnisse wurden nicht vollständig erreicht.

Erster Untersuchungsgegenstand war die Verletzung der Grasnarbe infolge des mechanischen Bodenkontaktes der Sensoren. Sensoranordnungen sowie Lösungen zum Schließen der Furchen wurden untersucht: Radwalzen, ein modifiziertes Pflugschar sowie im Zuge der Entwicklung alternativer Lösungen zur automatisierten Probeentnahme eine durch den Boden gezogene Kettensäge, ein Kernbohrgerät und ein schmalerer Messschuh. Im Ergebnis wurde entschieden, ein alternatives absätziges Messverfahren mit Kernbohrgerät zu favorisieren.

Weiterer Untersuchungsschwerpunkt war die Zuverlässigkeit des Veris MSP Systems. Nach Störungen in der Software, bei der Datenaufzeichnung, einem Kabelbrand sowie Neubau der Stromversorgung wird der Einsatz im Grünland nicht empfohlen.

Es wurde notwendig alternative Messverfahren mit handgehaltenen Sensorsystemen entwickelt. Dies ist durch die absehbare Verfügbarkeit autonomer Mobile gerechtfertigt, mit denen eine absätzi-ge Kartierung möglich wird. Ergebnis ist ein pH-Modul auf Basis von Antimon-pH-Elektroden. Mit der Entwicklung eines Spektrometer-Moduls wurde begonnen.

Untersuchungen zur Variabilität und zum Kalkbedarf belegen die kleinräumige Variation von Grünlandvegetation und Boden-pH, engmaschige Beprobungen sind notwendig. Der Boden-pH wirkt neben anderen Faktoren ertragslimitierend und beeinflusst die Artenzusammensetzung. Primär besteht daher großer Entwicklungsbedarf für robuste Sensorlösungen zur engräumigen Bodenuntersuchung auf Grünland.

## 9 Literaturverzeichnis

- ADAMCHUK, V.I., LUND, E.D., SETHURAMASAMYRAJA, B., MORGAN, M.T., DOBERMANN, A., MARX, D.B. (2005): Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. *Computers and Electronics in Agriculture* 48, pp. 272-294
- ANONYM (2006): Die Zukunft von Praxis und Forschung in Grünland und Futterbau. 50. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V. in Straubing (Niederbayern) vom 31. August – 2. September 2006. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan. URL: [http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p\\_21846.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_21846.pdf)
- ANONYM (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt, vom Bundeskabinett am 7. November 2007 beschlossen. Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin. URL: [http://www.biologischevielfalt.de/fileadmin/NBS/documents/broschuere\\_biolog\\_vielfalt\\_strategie\\_bf.pdf](http://www.biologischevielfalt.de/fileadmin/NBS/documents/broschuere_biolog_vielfalt_strategie_bf.pdf)
- ANONYM (2011): Kalkung. Ratgeber 2011. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. URL (26.2.12): [www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/kalkung-pdf.pdf](http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/basisinfos/kalkung-pdf.pdf)
- BERENDONK, C., RIEHL, G. (Hrsg.) (2009): Futterbau und Klimawandel: Grünlandbewirtschaftung als Senke und Quelle für Treibhausgase. 53. Jahrestagung der AGGF vom 27. 29. August 2009 in Kleve. Mitteilungen der Gemeinschaft Grünland und Futterbau, Band 10. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. [http://www.grassland-organicfarming.uni-kiel.de/de/pdf/aggf\\_2009\\_riswick\\_alles.pdf](http://www.grassland-organicfarming.uni-kiel.de/de/pdf/aggf_2009_riswick_alles.pdf)
- BFN (2013): Erfassungsanleitung für den HNV-Farmland-Indikator Version 4. URL: [http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/monitoring/Erfassungsanleitung\\_HNV\\_V4\\_2013\\_2.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/monitoring/Erfassungsanleitung_HNV_V4_2013_2.pdf).
- BORCHERT, A., GEBBERS, R., KRAMER, E., TRAUTZ, D., SCHIRRMANN, M. (2010): Erfassung der räumlichen Variabilität von pH-Werten in Ackerböden durch das Online-Messverfahren VERIS MSP. Proc. 68. Internationale Tagung Land.Technik 27.-28. Oktober 2010, Braunschweig, S. 131-136.

- BURKART, M., DIERSCHKE, H., HÖLZEL, N., NOWAK, B., FARTMANN, T. (2004): Synopsis der Pflanzengesellschaften Deutschlands. Heft 9: Molinio-Arrhenatheretea, Teil 2: Molinietaalia. Futter- und Streuwiesen feucht-nasser Standorte und Klassenübersicht Molinio-Arrhenatheretea. – 103 S., Göttingen.
- CADE, B.S., GUO, Q. (2000): Estimating effects of constraints on plant performance with regression quantiles. *Oikos* 91, 245-254.
- CADE, B.S., NOON, B.R. (2003): A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Front Ecol Environ* 1(8), 412-420.
- CADE, B.S., TERRELL, J.W., SCHROEDER, R.L. (1999): Estimating effects of limiting factors with regression quantiles. *Ecology* 80, 311-323.
- CAMBARDELLA, C.A., KARLEN, D.L. (1999): Spatial Analysis of Soil Fertility Parameters. *Precision Agriculture*, 1, pp. 5-14
- DENNIS, P., BOGERS, M.M.B., BUNCE, R.G.H., HERZOG, F., JEANNERET, P. (Edts.) (2012): Biodiversity in organic and low-input farming systems. Handbook for recording key indicators. Alterra Report 2308, Wageningen. URL: <http://www.biobio-indicator.org/deliverables/D22.pdf>
- DIERSCHKE, H. (2007): Pflanzengesellschaften des Extensiv- und Kulturgraslandes in ihrer bundesweiten Bedeutung für den Naturschutz. – *Naturschutz u. Biologische Vielfalt* 43: 49-65. Bonn-Bad Godesberg.
- DIERSCHKE, H., BRIEMLE, G. (2002): Kulturgrasland. Wiesen, Weiden und verwandte Staudenfluren. 239 S., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- DÜNGEVERORDNUNG (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten Fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Neufassung der Düngeverordnung (27.02.2007). *Bundesgesetzblatt I*, 2007, S. 221
- FRIEDEL, J. K., ARNDORFER, M., BALÁZS, K., DENNIS P., EITER, S., JEANNERET, P., JONGMAN, R., KAINZ, M., LÜSCHER, G., MORENO, G., PAOLETTI, M. G., POINTEREAU, P., SARTHOU, J.P., STOYANOVA, S., HERZOG, F. (2013): Betriebliche Bewirtschaftungsindikatoren für Biodiversität im Ökologischen Landbau und in extensiven Anbausystemen in Europa. In: D. Neuhoff, C. Stumm, S. Ziegler, G. Rahmann, U. Hamm & U. Köpke (Hrsg.) (2013): *Ideal und Wirklichkeit - Perspektiven Ökologischer Landbewirtschaftung*. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 5. - 8. März 2013, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 418-421. URL: [http://orgprints.org/21448/1/21448\\_friedel.pdf](http://orgprints.org/21448/1/21448_friedel.pdf)
- GEBBERS, R. (2008): Fehleranalyse im System der ortsspezifischen Grunddüngung. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, 474, Darmstadt
- GEBBERS, R., ADAMCHUCK, V.I. (2010): Precision Agriculture and Food Security. *Science* 327(5967), pp. 828-831
- GEBBERS, R., HERBST, R., WENKEL, K.-O. (2009): Sensitivity analysis of soil nutrient mapping. In: Bregt, A.; Wolfert, S.; Wien, J. E.; Lokhorst, C. (eds.): *EFITA conference '09*. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, pp. 513-519
- GEBBERS, R., LÜCK, E., DABAS, M., DOMSCH, H. (2009): Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale. *Near Surface Geophys.* 7, 179-190.
- GEBBERS, R., SCHIRRMANN, M., KRAMER, E.; SEIDEL, J. (2011a): Predicting lime requirements by fusion of proximal soil sensors. In: J. V. Stafford (Edt.): *Precision Agriculture 2011*. Papers presented at the 8th European Conference on Precision Agriculture 2011, Prague, Czech Republic, 11-14 July 2011, 562-576.
- GEBBERS, R., SCHIRRMANN, M., KRAMER, E.; TRAUTZ, D. (2011b). Sensorgestützte Kalkdüngung. DLG-Ausschuss für Technik in der Pflanzenproduktion. Fachtagung auf der Agritechnica, Hannover. Vortrag am 14.11.2011.
- GEROWITT, B., SCHRÖDER, S., DEMPFFLE, L., ENGELS, E.-M., ENGELS, J., FEINDT, P. H., GRANER, A., HAMM, U., HEIßENHUBER, A., SCHULTE-COERNE, H., WOLTERS, V. (2013): Biodiversität im Grünland – unverzichtbar für Landwirtschaft und Gesellschaft. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Biodiversität und Genetische Ressourcen beim Bundesministerium für Ernährung,

- Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Bonn: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).
- HENSELEIT, M., VOLLMER, I. HOLM-MÜLLER, K., MÖSELER, B. M., (2006): Honorierung ökologischer Leistungen der Landwirtschaft: Einführung ergebnisorientierter Komponenten in das Kulturlandschaftsprogramm NRW. – Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 141, Teil 1, 247 S. URL: [http://www.usl.uni-bonn.de/pdf/Forschungsbericht%20141\\_1.pdf](http://www.usl.uni-bonn.de/pdf/Forschungsbericht%20141_1.pdf)
- HERZOG, F., BALÁZS, K., DENNIS, P., FRIEDEL, J., GEIJZENDORFFER, I., JEANNERET, P., KAINZ, M., POINTEREAU, P. (Edts.) (2012): Biodiversity Indicators for European Farming Systems - A Guidebook. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich. URL: <http://www.biobio-indicator.org/deliverables/guidebook.pdf>
- KAISER, M.S., SPECKMAN, P.L., JONES, J.R. (1994): Statistical models for limiting nutrient relations in inland water. *J Am Stat Assoc* 89, 410-423.
- KLEMM, V., DARKOW, G.; BORK, H. R. (1998): Geschichte der Landwirtschaft in Brandenburg. Münchenberg: Zentrum f. Agrarlandschafts- u. Landnutzungsforschung (ZALF), ISBN: 300035575
- KOENKER, R., BASSETT, G.J. (1978): Regression quantiles. *Econometrica* 46, 33-50.
- KRAMER, E., BORCHERT, A., GEBBERS, R., TRAUTZ, D., SCHIRRMANN, M. (2011): Praktische Erfahrungen bei der Erfassung von pH-Werten in Ackerböden durch das Online-Messverfahren VERIS MSP. In: Leithold, G., Becker, K., Brock, C., Fischinger, S., Spiegel, A.-K., Spory, K., Wilbois, K.-P. und U. Williges (Hrsg.) 2011: Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Gießen, 16.-18. März 2011, Band 1 Boden-Pflanze-Umwelt, Lebensmittel und Produktqualität. Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 64-67. URL: <http://orgprints.org/17624/>
- KRAMER, E., GEBBERS, R., SCHIRRMANN, M., PALME, S., BORCHERT, A. F., TRAUTZ, D., MOLITOR, H., LUDWIG, H. (2011): Teilflächenspezifische Kalkung für eine qualitätsorientierte Getreideerzeugung im ökologischen Landbau. *Proceedings „Innowacyjne technologie do produkcji ekologicznej“*, 14. April 2011, Poznań (Polen), S. 28-43.
- LUBW (2013): HNV farmland-Indikator. URL <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/55223/>
- LÜTTICKEN, R.E. (2000): Automation and Standardisation of Site Specific Soil Sampling. *Precision Agriculture*, 2, pp. 179-188
- LVLf (2008): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV). Gemeinsame Hinweise der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt, veröffentlicht durch das Land Brandenburg. Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung (LVLf), Güterfelde. URL: <http://lflf.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.240315.de>.
- MALLARINO, A.P., WITTRY, D.J. (2004): Efficacy of Grid and Zone Soil Sampling Approaches for Site-Specific Assessment of Phosphorus, Potassium, pH, and Organic Matter. *Precision Agriculture*, 5, 131–144
- MEIWES, K.J. et al. 1984. Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme*.
- MOLITOR, H. (2011): Kalkversorgung vor allem auf leichteren Standorten im ökologischen Landbau. Seddiner See: Naturland-Ackerbautagung Nord-Ost, 28.02.2011
- MÜLLER, G., EWALD, E., FÖRSTER, I., HICKISCH, B., REUTER, G., PAGEL, H. (1989): *Bodenkunde*. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag, ISBN 3331002852
- NEFF, R. (2011): Leistung und Qualität vom Grünland: Grünlandsanierung – Verfahren und ökonomische Bewertung. URL: [www.llh.hessen.de/downloads/landwirtschaft/pflanzenproduktion/gruenland/vortraege/v-11-02.pdf](http://www.llh.hessen.de/downloads/landwirtschaft/pflanzenproduktion/gruenland/vortraege/v-11-02.pdf)
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14., neu bearb. u. erw. Aufl. von P. Schachtschabel, H.-P. Blume, G. Brümmer, K.-H. Hartge und U. Schwertmann. Unter Mitar-

- beit von K. Auerswald, L. Beyer, W. R. Fischer, I. Kögel-Knabner, M. Renger, O. Strebel. Enke: Stuttgart
- SCHILLING, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Unter Mitwirkung von M. Kerschberger, K.-F. Kummer, H. Peschke. Ulmer: Stuttgart.
- SCHIRRMANN, M. (2011): Improving the quality of soil test maps for precision agriculture. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- SCHIRRMANN, M., GEBBERS, R., KRAMER, E. (2013): Performance of automated near infrared reflectance spectrometry for continuous in-situ mapping of soil fertility at field scale. *Vadose Zone Journal*. doi:10.2136/vzj2012.0199.
- SCHIRRMANN, M., GEBBERS, R., KRAMER, E., SEIDEL, J. (2011): Soil pH Mapping with an On-The-Go Sensor. *Sensors* 11, 573-598.
- SCHIRRMANN, M., KRAMER, E., GEBBERS, R. (2011 b): Evaluation of a soil sensor fusion for mapping macronutrients and soil pH. *Proc. Proximal Soil Sensing Montreal May 15-19, 2011*, pp. 48-51.
- SCHMIDT, J.P., TAYLOR, R.K., MILLIKEN, G.A. (2002): Evaluating the Potential for Site-Specific Phosphorus Applications Without High-Density Soil Sampling. *Soil Science Society of America Journal* 66: 276-283
- SCHRÖPEL, R., (2001): Kalk auf Grünland. LVFZ Spitalhof, Kempten. URL (28.2.12): [www.lfl.bayern.de/lvfz/spitalhof/gruenland/25200/linkurl\\_0\\_2.pdf](http://www.lfl.bayern.de/lvfz/spitalhof/gruenland/25200/linkurl_0_2.pdf)
- SCHWEPPE-KRAFT, B. (2010): Ökonomische Methoden bei der Bewertung biologischer Vielfalt: Zielsetzung und Ergebnisse – Potenziale – Grenzen. *Dresdner Landschaftskolloquium*, 19. November 2010. URL: [http://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER\\_Archiv/PDF\\_Veranstaltungen/2010/5\\_DD\\_Landschaftskolloquium/Schweppe-Kraft.Oekosys\\_Bew\\_Methoden.pdf](http://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER_Archiv/PDF_Veranstaltungen/2010/5_DD_Landschaftskolloquium/Schweppe-Kraft.Oekosys_Bew_Methoden.pdf)
- STROH, H.G., KESTING, S., ISSELSTEIN, J. (2009): Pflanzliche Artenvielfalt im heutigen Wirtschaftsgrünland – Ein Vergleich von Weiden, Mähweiden und Wiesen. In: Berendonk, C., Riehl, G. (Hrsg.): *Futterbau und Klimawandel: Grünlandbewirtschaftung als Senke und Quelle für Treibhausgase*. 53. Jahrestagung der AGGF vom 27. 29. August 2009 in Kleve. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau*, Band 10, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, S. 240-244.
- THOMPSON, A.N., SHAW, J.N., MASK, P.L., TOUCHTON, J.T., RICKMAN, D. (2004): Soil Sampling Techniques for Alabama, USA Grain Fields. *Precision Agriculture*, 5: 345–358
- THOMSON, J.D., WEIBLEN, G., THOMSON, B.A. (1996): Untangling multiple factors in spatial distributions: lilies, gophers and rocks. *Ecology* 77, 1698-1715.
- UTERMANN, J. (2000): *Labormethoden-Dokumentation*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Schweizerbarth, Stuttgart
- VDLUFA (2000 a): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten: Darmstadt (www.vdlufa.de)*
- VDLUFA (2000 b): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. Anlage: Richtwerte für das Rahmenschema zur Kalkbedarfsermittlung in Deutschland. *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten: Darmstadt (www.vdlufa.de)*
- VDLUFA (2000 c): Georeferenzierte Bodenprobenahme auf landwirtschaftlichen Flächen als Grundlage für eine teilflächenspezifische Düngung mit Grundnährstoffen. *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten: Darmstadt (www.vdlufa.de)*
- VISCARA ROSSEL, R.A., GILBERTSON, M., THYLÉN, L., HANSEN, O., MCVEY, S. MCBRATNEY, A.B. (2005): Field measurements of soil pH and lime requirements using an on-the-go soil pH and lime requirement measurement system. ([www.vdlufa.de](http://www.vdlufa.de))
- ZIECHMANN, W., MÜLLER-WEGENER, U. (1990): *Bodenchemie*. Mannheim, Wien, Zürich: BI-Wissenschaftsverlag, ISBN 3411032057

## 10 Veröffentlichungen zum Projekt

### 10.1 Realisierte Veröffentlichungen

- ADAMCHUK, V.A., JI, W., VISCARRA ROSSEL, R., GEBBERS, R., TREMBLEY, N. (2018). Proximal soil and plant sensing. In: Shannon, K., Sudduth, K., Clay, D. (eds.): Precision farming basics. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA
- GEBBERS, R. (2014): Current soil and crop sensors for precision agriculture. Keynote. ConBAP 2014, Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 14 a 17 setembro, São Pedro, SP, Brasil
- GEBBERS, R. (2014): Precision agriculture research at the ATB. Colloquium. Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo, Brasil
- GEBBERS, R. (2014): Review of proximal soil sensing in precision agriculture. European Photonics Industry Consortium (EPIC) meeting, 26th Nov. 2014, Apeldoorn, The Netherlands
- GEBBERS, R. with contributions by Boppenmaier, M.; Dammer, K.H.; Dworak, V.; Pflanz, M.; Schirrmann, M.; Selbeck, J.; Zude, M. (2014): Precision Agriculture: Applications of Methods for Crop Stress Detection. Lecture, held at the CROP.SENSE.net summer school "Sensors, images and methods for crop stress detection" 20.08.-29.08.2014, University of Bonn, Bonn, Germany
- GEBBERS, R.; SCHIRRMANN, M.; KRAMER, E. (2014): Sensorgestützte Bodenkartierung. Bodensensoren für die Landwirtschaft. In: Sensoren.Modelle.Erntetechnik. Sensoren.Modelle.Erntetechnik. Forschen für einen ressourceneffizienten Pflanzenbau. Potsdam, (0947-7314), p. 39-49.
- SCHIRRMANN, M.; GEBBERS, R.; BERG, W.; KRAMER, E.; PALME, S. (2014): Ist der Boden sauer? Forschungsfelder (früher Forschungsreport). 4-5
- WELTZIEN, C.; GEBBERS, R. (2016): Aktueller Stand der Technik im Bereich der Sensoren für Precision Agriculture. In: Ruckelshausen, A.; Meyer-Aurich, A.; Rath, T.; Recke, G.; Theuvsen, B.(eds.): Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus: Intelligente Systeme - Stand der Technik und neue Möglichkeiten. Proceedings der 36. GIL-Jahrestagung. 36. GIL Jahrestagung. Gesellschaft für Informatik, Bonn, (978-3-88579-647-3), p. 217-220.

### 10.2 Geplante Veröffentlichungen

Im Jahr 2018 ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung geplant.